

# Untersuchung der Produktionstauglichkeit eines flexiblen Stiftbett-Thermoformwerkzeuges

Verfasser des Aufsatzes Prof. Dr.-Ing. Michael Heber, Patrick Fiorenza (M. Sc.)

Hochschule Niederrhein, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Campus Süd,  
Reinarzstr. 49, 47805 Krefeld, michael.heber@hs-niederrhein.de

[https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte\\_2024\\_018](https://doi.org/10.58134/fh-aachen-rte_2024_018)

## Zusammenfassung

In diesem Beitrag werden der aktuelle Stand der Technik sowie neu entwickelte Ansätze für den Einsatz von Stiftbettwerkzeugen beim Vakuum-Tiefziehen von Kunststoffen behandelt. Untersucht werden die erzielbaren Bauteileigenschaften, mögliche Stückzahlen, geometrische Einschränkungen sowie die Prozesszeiten. Eine technologische Lücke bei der Herstellung großflächiger, dünnwandiger Bauteile in herkömmlichen additiven Fertigungsverfahren wird durch die Entwicklung eines flexibel generierbaren Werkzeugs geschlossen. Diese Methode ermöglicht es, kleine Serien oder einzelne Prototypen wesentlich schneller und kostengünstiger herzustellen als durch das Fräsen von Werkzeugen. Abdrücke der Stifte in den Bauteilen werden vermieden, indem in kritischen Bereichen additiv gefertigte Einsätze oder Holzelemente verwendet werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden die Teile aus ABS im FDM-Verfahren hergestellt, grundsätzlich sind auch andere Werkstoffe und Verfahren denkbar. Die Einstellzeiten sowie die Abbildungsgenauigkeit des Prozesses werden ebenfalls untersucht und die Ergebnisse präsentiert.

**Abstract** This article explores the current state-of-the-art techniques and novel approaches in the use of pin-bed tools for vacuum thermoforming of plastics. The study investigates achievable component properties, potential production volumes, geometric limitations, and process times. By developing a flexibly adjustable tool, this method addresses a technological gap in the production of large-area, thin-walled components, which is challenging for conventional additive manufacturing processes. This approach enables a faster and more cost-effective production of small series or individual prototypes compared to traditional milling tools. To prevent pin imprints on components, additively manufactured inserts or wooden elements are employed in critical areas. In this paper ABS was processed in the FDM-process, in generally also other materials and processes should be possible. Additionally, the article examines the adjusting times and production tolerances of the process.

## Einleitung

In der Fabrik der Zukunft spielen Zielgrößen wie die Herstellungskosten, Innovationsgeschwindigkeit und Wandelbarkeit, beispielsweise durch flexible Produktionssysteme eine immer größere Rolle [1]. Angesichts sich verkürzender Produktlebenszyklen gewinnt zudem die Zeit bis zur Markteinführung immer mehr an Bedeutung. Der Werkzeugbau stellt dabei ein kritisches Element der Produktentwicklung dar und hat einen direkten Einfluss auf den Erfolg eines Produktes [2].

Großvolumige Konsumgüter, wie beispielsweise Verschaltungen für Kühl- und Gefriergeräte sowie insbesondere größere Abdeckungs- und Gehäuseteile, werden sehr häufig im Thermoformverfahren hergestellt. Diese Teile sind aufgrund Ihrer großen Abmessungen (oft mehr als 1.000 mm x 1.000 mm) und Ihrer geringen Wanddicken (0,5 bis 6 mm) für die traditionelle additive Fertigung nicht so gut geeignet. Die hierfür benötigten Werkzeuge werden üblicherweise aus Vollmaterial gefertigt, was ihre Rentabilität auf die Serienproduktion beschränkt. Erste Entwicklungen flexibler Werkzeugformen, die nach ihrer Nutzung erneut eingestellt und wiederverwendet werden können, wurden bereits 1969 von Nakajima in Japan beschrieben [3].

International wurden bereits Untersuchungen zu unterschiedlichen Werkzeugkonzepten durchgeführt. Dabei bestehen die flexiblen Werkzeugformen nahezu ausnahmslos aus einer Werkzeugform mit höhenverstellbaren Stiften. Die Funktionsweise dieser Werkzeuge variiert in Bezug auf die Größe, die Anordnung und die Arretierung der Formstifte [4].

Zur Beurteilung der Produktionstauglichkeit werden die unterschiedlichen Entwicklungen auf Basis von Eigenschaften wie Werkzeugvolumen, Auflösung der Geometrie und Zeit für die Umstellung betrachtet. Basierend auf den Ergebnissen wird die Untersuchung mit einem neuen Nadelbett-Prototyp-Werkzeug fortgeführt. Dieses *Fleximould* wurde im Rahmen eines internationalen Forschungsprojekts entwickelt, das in einer ersten Stufe durch das Interreg V A Programm [5] und in einem Folgeprojekt durch die ZIM des BMBF [6] gefördert wurde. Die Entwicklung erfolgte in Zusammenarbeit zwischen der Hochschule Niederrhein und der Firma Demcon.

## Methoden

Ein Vergleich der unterschiedlichen flexiblen Werkzeugformen ist in Tabelle 1 aufgeführt. Basierend auf den beschriebenen Untersuchungen werden die Leistungsaspekte Werkzeugvolumen, Verstellart und Größe der Formstifte sowie der Anwendungsbereich ausgewählt. Das Fleximould-Werkzeug wird insbesondere auf die Prozesszeit und der Abbildungsgenauigkeit untersucht, um die Produktionstauglichkeit zu bewerten. Tabelle 1: Übersicht div. Untersuchungen flexibler Werkzeuge.

	Länge x Breite x Höhe [mm <sup>3</sup> ]	Verstellung	Größe der Formstifte	Anwendungsbereiche
Nakajima 1969[3]	75x82x200	Einzeln mit NC/ gleichzeitig mit Bestehender Form	∅ 1 mm	Blechumformung Thermoformen

				Elektrochemisches Abtragen
Cao et al. 2015[7]	800x1200x n.A.	n.A.	∅ 30 mm	Thermoformen
Jia et al. 2017[8]	200x200x50	Stifte können einzeln mit einer Einstellschraube verstellt werden	∅ 20 mm	Blechumformung
Liu et al. 2008[9]	1350x1350x n.A.	Stifte können zeitgleich durch integrierten Motor verstellt werden	150x150 mm	Blechumformung
Paunoiu et al. 2008[10]	130x130x n.A.	Einzeln mit CNC, Verstellung im Prozess möglich	13x13 mm	Blechumformung Thermoformen Stanzen
Boers 2006[11]	40x50x25	Vollautomatisch 5 min	∅ 1 mm	Blechumformung
Zitzlsberger 2016[12]	1260x2400x n.A.	Höhenverstellbare Stempel	Stempel mit breitem achteckigem Teller; Mittelpunktabs tand 185 mm	Thermoformen

Das hier beschriebene Fleximould Werkzeug stellt die komplexe Werkzeuggeometrie für den Thermoformprozess über eine Formfläche mit höhenverstellbaren Stiften dar. Die Stahlstifte sind an der Oberseite mit einem temperaturresistenten Kunststoff umspritzt, wodurch eine sphärische Endkappe mit einem Durchmesser von 6 mm entsteht. Durch diese wird das Halbzeug an den Stützstellen geführt. Die runde Form vermeidet zusätzlich scharfe Kanten, an denen das Werkstück beschädigt werden könnte oder sich bei Belastungen Kerbwirkungen ergeben könnten. Das Werkzeug besitzt eine Formfläche von 1600 mm x 600 mm. 308 Stiftreihen entlang der X-Achse und 100 entlang der Y-Achse bilden die Formfläche. Die Höhenverstellung beträgt 300 mm, wodurch ein Bauraum von 288 dm<sup>3</sup> entsteht. Die Formstifte sind in versetzten Reihen angeordnet, um den Zwischenraum zwischen den Stützstellen zu reduzieren. Durch externe Aktuatoren werden die Formstifte in der Höhe verstellt. Während der Rückstellung drücken Stempel auf der Unterseite die Formstifte in die oberste Position. Die Formeinstellung erfolgt über Einstellmotoren an der Oberseite, um Längenunterschiede in den Formstiften auszugleichen. Die Stifte sind selbstklemmend, wodurch nicht für jeden Stift ein Aktuator benötigt wird. Dadurch kann der Durchmesser der Stifte verringert und gleichzeitig die Kosten erheblich gesenkt werden, da weniger teure Aktuatoren benötigt werden und theoretisch sogar ein einzelner Aktuator alle Stifte verstellen kann.

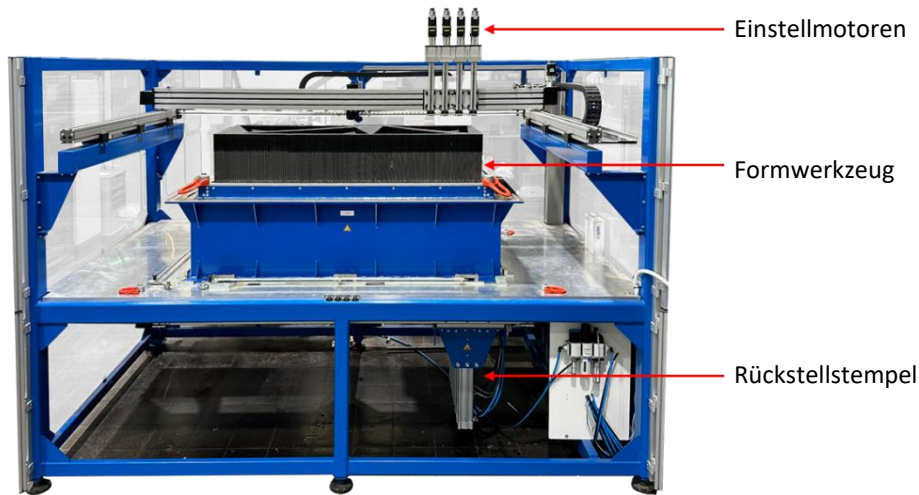


Abbildung 1: Formwerkzeug im Einstellprozess

Die Verstellung des Werkzeuges erfolgt über eine Programmschnittstelle, die mit herkömmlichen 3D-CAD-Modellen kompatibel ist. Dazu wird eine Punktwolke mit den Koordinaten jedes Formstiftes auf das Bauteil projiziert und die resultierende Höhe wird als Einstellparameter verwendet. Für den Thermoformprozess wird eine Einplatz-Thermoformanlage FTE 2000x1000 der Firma Frimo verwendet. Die Werkzeugaufnahme ist für das flexible Stiftbettwerkzeug angepasst.

In Abbildung 1 ist das Formwerkzeug in der Einstellvorrichtung dargestellt. Der Aufbau des Flexiblen Stiftbettwerkzeugs ist in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

Die Kontur, die Tiefgezogen werden soll, wird durch in der Höhe individuell einstellbare Stifte generiert. Die Stifte sind in einer Fixierung durch eine Gummimatte geklemmt und werden zusätzlich durch gelochte Metallplatten (in Abbildung 2 nicht dargestellt) während des Verstellvorgangs geführt. Die Kontur hat eine „Auflösung“, die dem Durchmesser des Stiftkopfes (6 mm) entspricht.

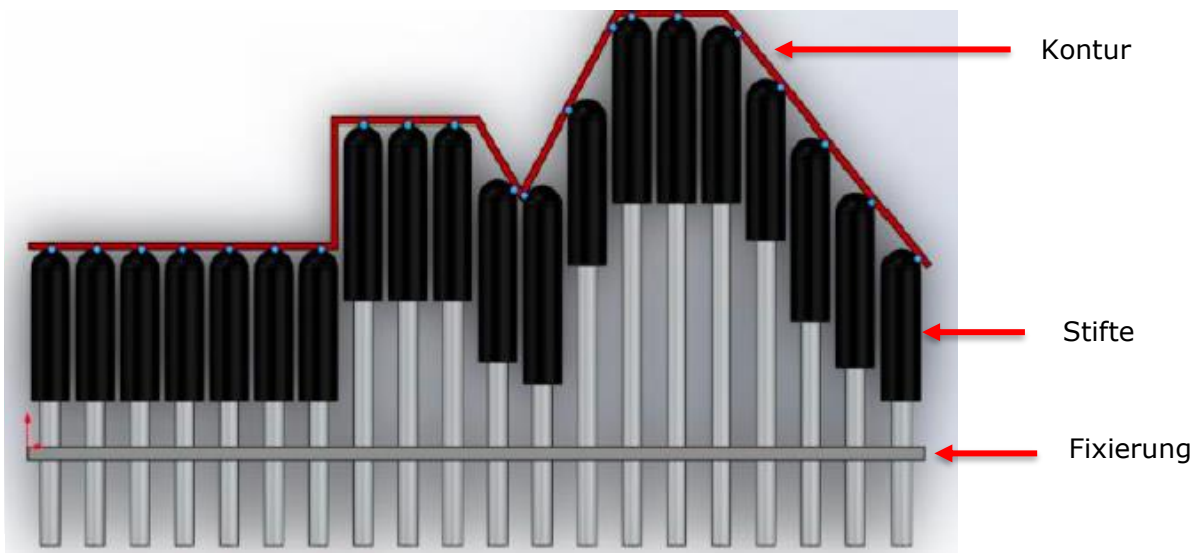


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Stifte im Werkzeug

## Prozesszeitanalyse

Zur Untersuchung der Prozesszeiten werden nacheinander zehn unterschiedliche Formen auf dem Werkzeug eingestellt. Die Formen variieren dabei in ihrer Geometrie und belegen mindestens 75% der Werkzeugfläche. Der erste Versuchsdurchgang behandelt ausschließlich Positivformen. Das Halbzeug wird dabei über ein Konvex-Modell verstreckt und die Außenkontur des Werkzeuges abgeformt [13; 14]. Die Bauteilgeometrie befindet sich 15 mm über der Grundfläche des flexiblen Werkzeuges und alle nicht genutzten Stifte sind auf die Höhe Null heruntergedrückt. Der zweite Versuchsdurchgang verwendet die gleichen Bauteilgeometrien als Negativformen, bei der die Innenkontur eines Konkav-Modells abgeformt wird [14]. In dieser Variante sind alle nicht genutzten Formstifte auf eine Höhe von 285 mm eingestellt, knapp unter dem Maximalwert. Für die Untersuchung wird die Rückstellzeit und die Einstellzeit separat erfasst.

## Abbildungsgenauigkeit

Zur Ermittlung der Abbildungsgenauigkeit wird die Werkzeugeinstellung in Grenzsituationen untersucht. Die verwendete Testgeometrie (siehe Abbildung ) ist mit Autodesk Inventor erstellt. Sie besteht aus vier unterschiedlichen Zonen, um die Darstellungsgenauigkeit durch die Stiftstruktur aufzuzeigen. Die ersten drei Zonen dienen der Untersuchung der Abbildungsgenauigkeit und zeigen auf, ab welchen Grenzwert ein weiterer Stift verwendet wird und wie sich diese Änderung auf die Abmessungen auswirkt. Zone vier beinhaltet eine Freiform, um unterschiedliche Steigungen und geschwungene Konturen zu veranschaulichen. Die Zonen werden von einer Umrandung umgeben, wobei der Radius von 1 bis 20 mm in Schritten von 1 mm ansteigt.

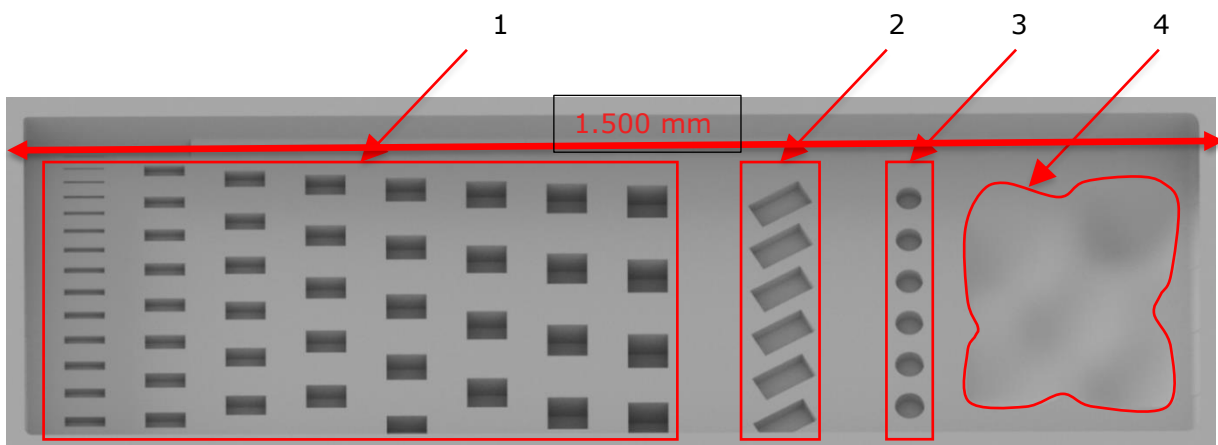


Abbildung 3: CAD-Modell der Testgeometrie für das Stiftbettwerkzeug

Die Thermoformversuche zur Ermittlung der Abbildungsgenauigkeit werden mit Regenerat-Polystyrolplatten von S-POLYTEC durchgeführt [15] und finden bei einer Umformtemperatur von 180°C statt.

## Produktionstauglichkeit

Zur Gewährleistung der Einhaltung von Funktionsmaßen oder zur Durchführung einer lokalen Oberflächenvergütung werden sowohl der Einsatz von 3D-Druck-Inserts als auch von Holzplatten evaluiert. Die 3D-Druckformen werden unter Verwendung eines Ultimaker 2 hergestellt und verwenden eABS+HS von eSun als Druckmaterial [16]. Die Oberfläche des 3D-Drucks wird mit Schmirgelpapier der Körnung 120 nachbearbeitet. Die Holzinserts werden aus unbehandelten, rohen Faserplatten gefertigt, wobei der Zuschnitt mittels eines Epilog Lasercutter M2 durchgeführt wird.

## Ergebnisse

### Prozesszeitanalyse

Bei der Verwendung einer Positivform werden nicht eingestellte Formstifte während des Rückstellprozesses von ihrer Ausgangsposition (0 mm) auf eine Position von 300 mm verfahren. Im Einstellprozess der nächsten Geometrie werden diese Stifte dann wieder auf die Ausgangsposition von 0 mm zurückgesetzt. Bei sehr flachen Bauteilgeometrien werden die formgebenden Stifte im unteren Bereich der Formfläche positioniert, um die Verstreckung des Materials zu minimieren

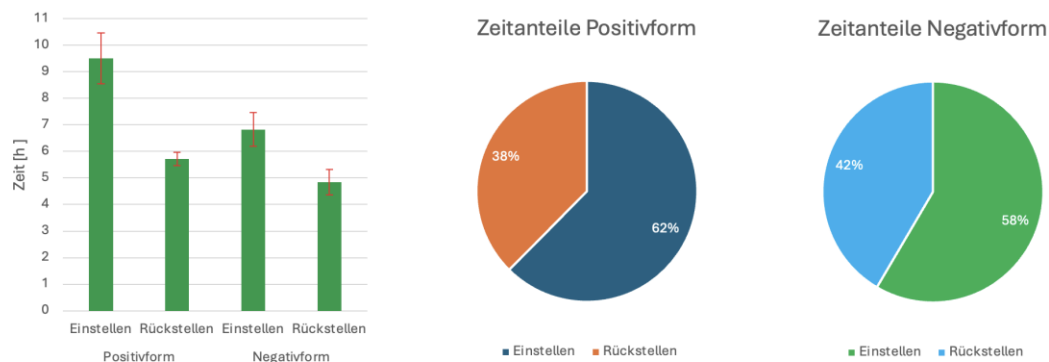


Abbildung 4: Zeitanalyse von Ein-, und Rückstellzeiten mit dem Fleximould

Im Gegensatz dazu werden bei Negativformen, die nicht verwendeten Stifte nur um 15 mm nach unten verstellt, was den Rückstellweg erheblich verkürzt. In einem vollständigen Zyklus beträgt der Verstellweg eines nicht genutzten Stifts somit lediglich 30 mm. Bei flachen Bauteilgeometrien werden die Stifte bei dieser Methode am oberen Rand des Werkzeugs ausgerichtet, um die Verstreckung des Halbzeugs weiter zu reduzieren.



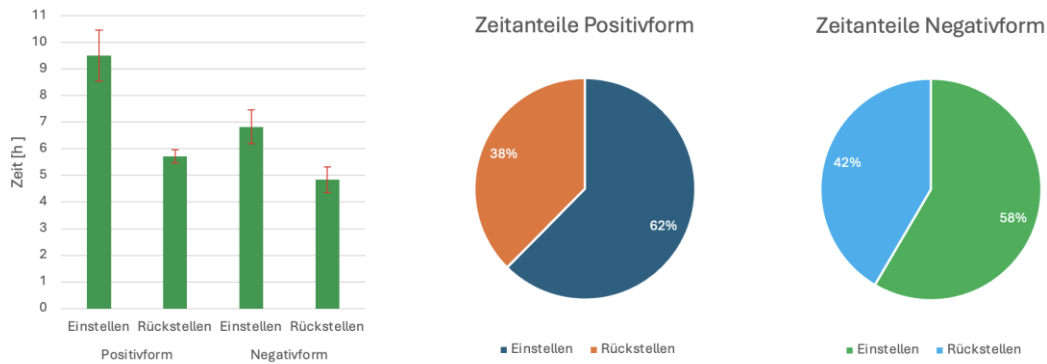


Abbildung illustriert die Ergebnisse der Analyse der Prozesszeiten. Der Einsatz von Negativformen resultiert in einer Reduktion der Einstellzeiten um etwa 30%. Der Vorgang des Zurücksetzens und erneuten Einstellens einer Werkzeugform dauert ungefähr 11,5 Stunden.

Nach einmaligem Einstellen der Werkzeugform können gängige Taktzeiten von 1 bis 3 Minuten erreicht werden. Diese Variabilität ist ausschließlich materialabhängig, und die Taktzeiten sind vergleichbar mit denen von spanend hergestellten, ungekühlten Werkzeugen.

### Abbildungsgenauigkeit

Das Formteil der Testgeometrie ermöglicht die Untersuchung der darstellbaren Geometrien in den Grenzbereichen. Die Justierung der Formstifte in der Z-Achse kann mit einer Auflösung von 0,1 mm erfolgen. Die Auflösung der Geometrie entlang der X- und Y-Achse wird durch die Größe und Anordnung der Formstifte bestimmt.

Der minimal darstellbare Außenradius wird durch die Endkappe der Stifte definiert und beträgt 3 mm. Der minimale Innenradius kann bis zu 1,5 mm betragen, wenn er im Zwischenraum zweier Stiftreihen liegt.

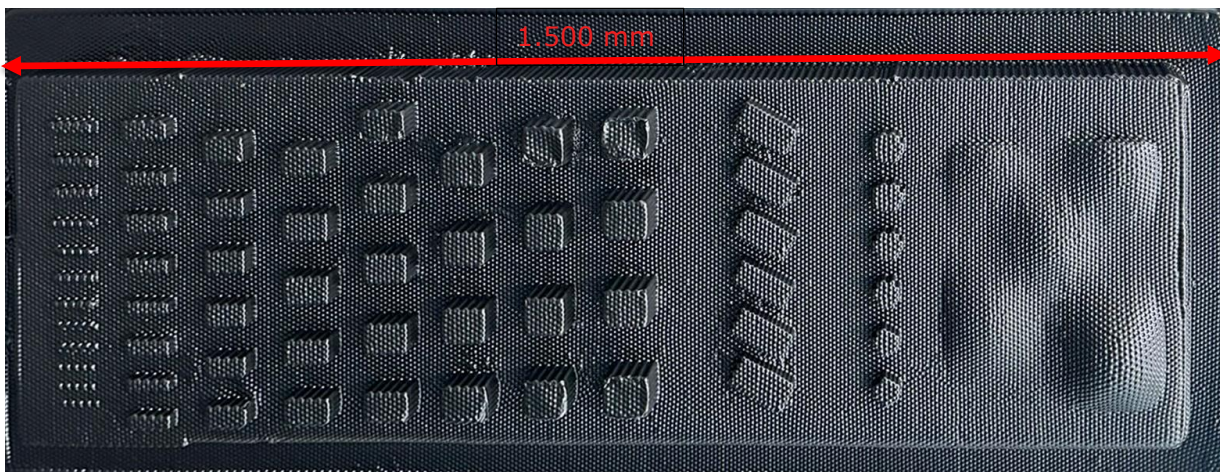


Abbildung 5: Formteil der Testgeometrie für das Stifbettwerkzeug.

Der Verstellmechanismus nutzt die Mittelpunktkoordinaten jedes Formstiftes, um an dieser Position die Höhe des einzustellenden Bauteils zu ermitteln. Liegt eine Bauteilkante innerhalb der Endkappe eines Formstiftes, schneidet jedoch nicht dessen Mittelpunkt, wird dieser Stift nicht in die Bauteilkontur einbezogen (siehe 6a). Aufgrund der Bauteilpositionierung können die Abmaße entlang der X- und Y-Achse im ungünstigsten Fall um  $\pm 3$  mm variieren.

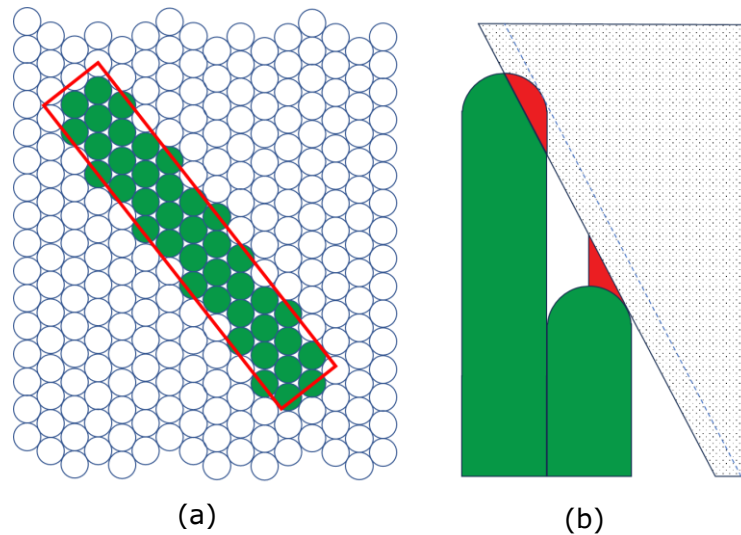


Abbildung 6:a) Draufsicht einer Bauteilgeometrie (rot) und der verwendeten Formstifte (grün)  
 b) Vergleich eines tangentialen und einfachen Punktkontaktes in der Seitenansicht

Entlang der Z-Achse weisen die Linearsysteme eine bidirektionale Wiederholgenauigkeit von  $< 25 \mu\text{m}$  auf. Das Ende des Einstellstempels besitzt eine konkave Kontur, um die Stifte beim Herunterdrücken zu zentrieren. Werden die Formstifte dabei nur teilweise getroffen, zentrieren sie sich nicht im Stempel und können in der Höhe um bis zu 2 mm verschoben sein.

Abbildung b zeigt die zwei Kontaktberechnungsmethoden der Formeinstellung. Die linke Variante stellt den einfachen Punktkontakt dar, bei dem der Mittelpunkt des Stiftes auf das Bauteil projiziert wird. Die rechte Variante zeigt den tangentialen Punktkontakt, bei dem die Kontakttangente zwischen der Endkappe des Stiftes und der Bauteilkontur verwendet wird. In der tangentialen Kontaktberechnung beträgt der Abstand zwischen Stiftmittlepunkt und Bauteil bis zu einem Winkel von 14 Grad weniger als 0,1 mm und bei 42 Grad etwa 1 mm. Ein typisches maximales Verstreckungsverhältnis von 3:1 führt zu einer Steigung von bis zu 71 Grad, wobei die Geometrieabweichung hierbei bereits 6,2 mm beträgt und somit größer als der Stiftdurchmesser ist. Das Material folgt im Thermoformprozess der Stiftkontur. Folglich kann durch die Auswahl der geeigneten Kontaktberechnungsmethode bestimmt werden, ob sich die Z-Achsenabweichung in positive oder negative Richtung erstreckt.

Die Stiftreihen sind versetzt zueinander angeordnet. Entlang der Y-Achse und um  $\pm 60^\circ$  versetzt zu dieser bilden die Stifte durchgängige Reihen (siehe Abbildung 7a). Besitzt ein Bauteil gerade Kanten, sollten diese möglichst an den Stiftreihen ausgerichtet werden, um eine Stufenbildung zu vermeiden (vergleiche 7b/c)



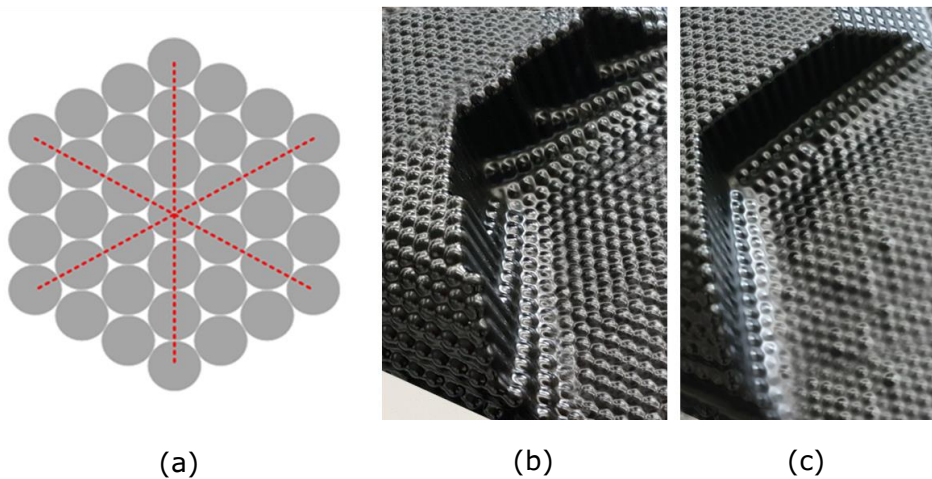


Abbildung 7: a) Stiftstruktur b) Form frei platziert c) Form an 60° ausgerichtet

## Produktionstauglichkeit

In den durchgeführten Versuchen stellte sich heraus, dass die Haftkraft der Formstifte bei dünnen Wandstärken zu Problemen führen kann. Abbildung 8 zeigt ein Thermoformteil, das lediglich aus dünnen Stegen besteht. In der linken Darstellung wird gezeigt, wie die Formstifte während des Thermoformprozesses in eine tiefere Position gedrückt werden. Mithilfe einer Presola Federwaage Macro Line 50 Newton wird von unten an den Stiften gezogen. Die gemessenen Verstellkräfte variieren zwischen 8 und 34 Newton pro Formstift. Die auftretenden Kräfte sind im Randbereich des Werkzeugs, um den Faktor 2 bis 3 höher als diese im Zentrum. Bei dem rechts dargestellten Formteil ist die Wandstärke von 2 auf 3 Stiftrihen erhöht, was einer ungewollten Verstellung der Pins entgegenwirkt. Die während des Thermoformprozesses auftretenden Kräfte variieren aufgrund des eingesetzten Materials und der Materialstärke. Für die im Rahmen dieser Publikation



Abbildung 8: Links: Deformation der eingestellten Form  
Rechts: Widerstandsfähige Form mit höheren Wandstärken

gezeigten Versuche wurden Polystyrol-Recylat [15] für die schwarzen Bauteile sowie geschäumtes PVC [17] für die weißen Bauteile verwendet. Grundsätzlich wurden aber auch sehr viele andere Werkstoffe für das Tiefziehen untersucht, die sich alle verarbeiten ließen. Bezüglich der Materialauswahl sind daher nach vorliegendem Kenntnisstand alle üblichen Tiefziehmaterialien in diesem Prozess verarbeitbar.

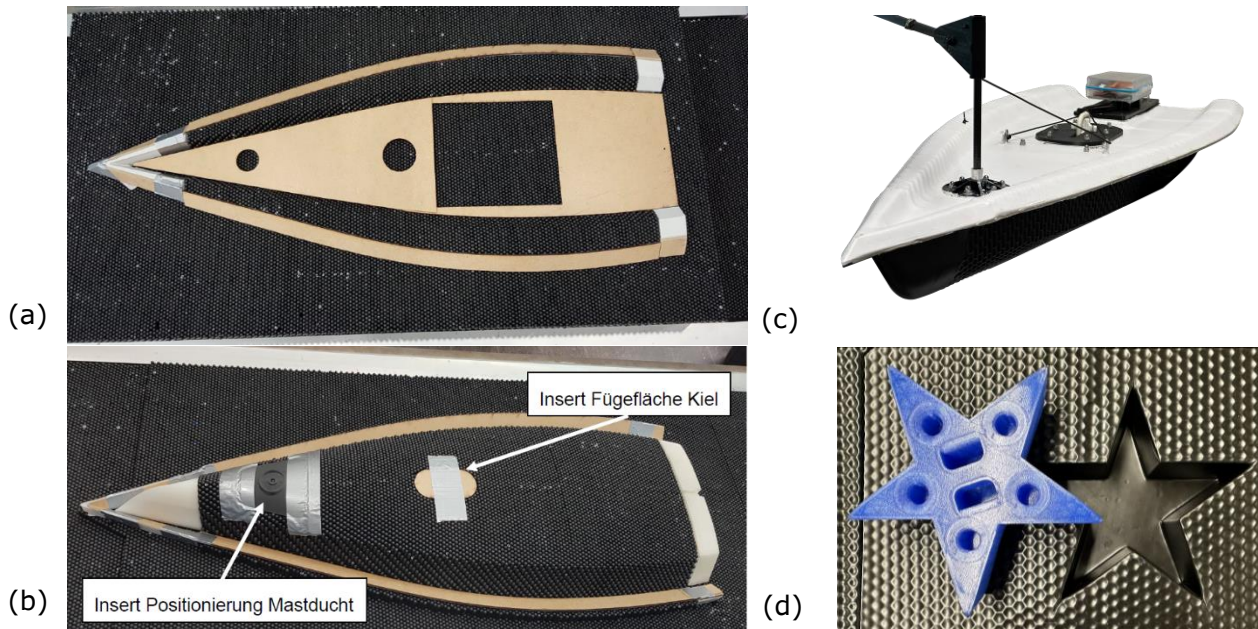


Abbildung 9: Werkzeugformen für Bootshälften mit Inserts für Klebeflächen [6]

Das Stiftbettwerkzeug eignet sich zur Integration von Einsätzen. 9a/b zeigen die beiden Werkzeughalbschalen für ein ferngesteuertes Segelboot (Abbildung 9Abbildung c). Bei der Konstruktion der Einsätze kann die Stiftstruktur des Werkzeugs genutzt werden. Zur Fixierung der Einsätze in ihrer Position werden in den Holzplatten Aussparungen für mehrere Pins mittels des Lasercutters oder kleine Vertiefungen in einem 3D-gedruckten Formteil eingebracht (Abbildung 9d). Durch diese Maßnahmen können spezifische Bereiche im Werkzeug detaillierter gestaltet werden, ohne auf den großen Bauraum und die schnellen Einstellzeiten des Stiftbettwerkzeugs verzichten zu müssen. Die erzielbaren Toleranzen in diesen Bereichen werden dabei hauptsächlich durch die additive Fertigung bestimmt.

Die Oberflächenstruktur wird maßgeblich durch die eingesetzten Formteile beeinflusst und entsprechend angepasst. Die mittels Fused Deposition Modeling (FDM) hergestellten Einsätze aus ABS neigen bei wiederholtem Tiefziehen zur leichten Verformung, obwohl die Thermoformtemperatur über 50°C unter der Verarbeitungstemperatur des Filaments liegt [16]. Daher ist dieses Material primär für den Einsatz bei Einzelprototypen geeignet [18]. Grundsätzlich können aber für höhere Stückzahlen auch metallische Einsätze verwendet werden, bei denen keine Temperaturprobleme im Prozess auftreten werden.

Unter Verwendung des flexiblen Stiftwerkzeugs ist es möglich, eine Produktionsmenge von bis zu 100 Teilen zu fertigen, bevor das Werkzeug erneut justiert werden muss. Infolgedessen tritt das flexible Werkzeug in Konkurrenz zu Kleinstserienformen aus offenporigem PU-Schaum, die für vergleichbare Losgrößen geeignet sind.

## Diskussion

Bisherige Untersuchungen zu flexiblen Werkzeugen haben bereits zur Entwicklung spezialisierter Werkzeuge für bestimmte Anwendungsfälle geführt. Dabei musste stets ein Kompromiss zwischen der Komplexität des Werkzeugs, der möglichen Geometrieauflösung

und der Oberflächenqualität abgewogen werden. Tabelle 2 listet die ermittelten Eigenschaften des Fleximoulds auf. Die erfolgreiche Anwendung eines flexiblen Werkzeugs bei über 170 verschiedenen Formbauteilen zeigt das Potenzial dieser Werkzeugtechnik. Diese Formteile wurden hauptsächlich in Funktionsdemonstratoren, Bauraumuntersuchungen und funktionellen Verkleidungsteilen verwendet.

Tabelle 2: Übersicht der Werkzeugeigenschaften

Rekonfigurationszeit	11,5 h
Min. Innenradius	1,5 mm
Min. Außenradius	3 mm
Längentoleranz X / Y	±3 mm (±0,2 mm mit Inserts)
Z-Toleranz bei 0° Steigung	+ ,025 mm -2,025
Z-Toleranz bei 71° Steigung	6,5 mm

Ein signifikanter Vorteil des Stiftbettwerkzeugs ist die schnelle Generierung realitätsnaher Prototypen. Die vollautomatisierte Umstellung der Werkzeugform und die Geometrieauflösung der Bauteile durch 6-mm-Stifte ermöglichen eine schnelle Produktion praxisrelevanter Formteile. Dies stellt eine erhebliche Zeitersparnis im Vergleich zu herkömmlichen Produktionsmethoden dar und bietet die Möglichkeit, Anpassungen mit minimalem Material- und Kostenaufwand durchzuführen. Eine stückzahlabhängige Kostenkalkulation für ein großvolumiges Schalenbauteil ist in Abbildung 10 dargestellt. Für eine Stückzahl von bis zu 10 Prototypen stellt der 3D-Druck die kostengünstigste Herstellungsoption dar. Bei Stückzahlen zwischen 10 und 1000 eignet sich der Einsatz des Fleximould-Werkzeugs. Ab einer Stückzahl von 1000 ist der Einsatz eines serienfähigen Thermoformwerkzeugs wirtschaftlich sinnvoll.

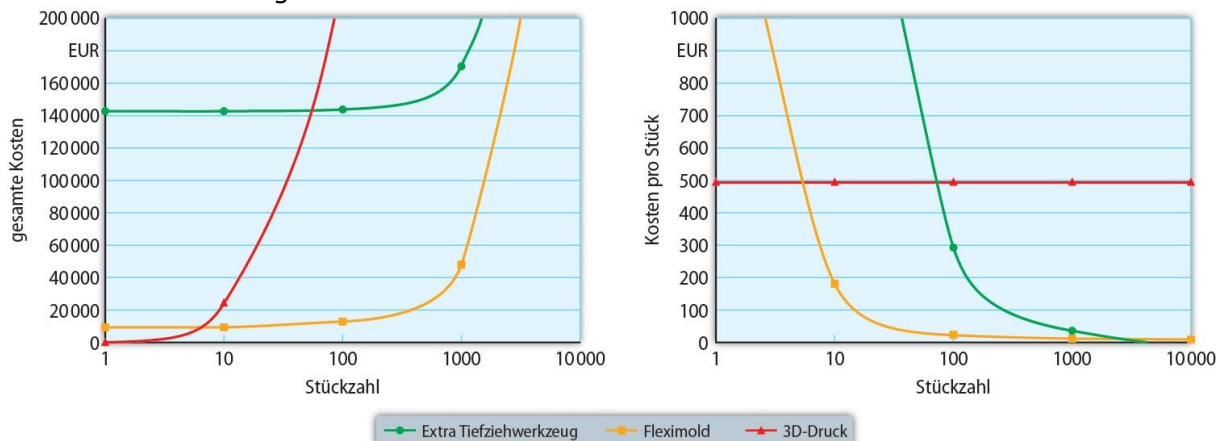


Abbildung 10: Kostenkalkulation für Prototypenbauteile in diversen Fertigungsverfahren [19].

Der Zeitaufwand für Iterationsschleifen kann aufgrund der schnellen Werkzeuggenerierung reduziert werden. Bis zu drei Varianten eines Prototyps konnten innerhalb einer Woche umgesetzt werden. Im flexiblen Stiftbettwerkzeug wird das identische Halbzeugmaterial verwendet, das auch für die Serienfertigung appliziert wird, wodurch eine praxisnahe Abschätzung des Materialverhaltens ermöglicht wird.

Trotz der Vorteile und der erfolgreichen Produktion von Formteilen gibt es jedoch einige bestehende Herausforderungen. Die Oberflächenqualität der Formteile, die durch die Abformung der Formstifte beeinflusst wird, ist nicht für optische Applikationen geeignet. Die Auflösung der Formstifte kann zu Variabilität in den allgemeinen Produktionsmaßen

führen. In speziellen Fällen, wie bei sehr dünnen Wandungen, sind zusätzliche Anpassungen erforderlich, um die Formstifte nicht im Thermoformprozess zu verstellen.

Eine mögliche Lösung zur Verbesserung der Abformungsgenauigkeit könnte eine Optimierung des Einstell-Algorithmus für komplexe Bauteilkonturen sein. Weiterführende Forschungsthemen könnten die Verarbeitung von kaschierten Platten behandeln, um die Oberflächenqualität durch eine Zwischenschicht aus Schaumstoff weiter zu verbessern. Zudem könnte eine Nachbearbeitung der Formteile untersucht werden, um diese beispielsweise als Laminierform für Faserverbundbauteile zu verwenden.



## Literatur

### Literaturverzeichnis

- [1] Abele, E; Reinhart, G.: *Zukunft der Produktion*. Hanser München 2011.
- [2] Schuh, G; Boos, W. et al.: *Operative Exzellenz im Werkzeug- und Formenbau*. 1. Auflage, Apprimus-Verl. Aachen 2010.
- [3] NAKAJIMA, N.: 1969.: *A Newly Developed Technique to Fabricate Complicated Dies and Electrodes with Wires*. In: *Bulletin of JSME* 12 (1969) 54, S. 1546–1554.
- [4] Simon, D.: *Automatisierte flexible Werkzeugsysteme zum Umformen und Spannen von Kunststoffscheiben und -schalen*, Dissertation, Technische Universität München 2016.
- [5] N.N.: 2017-2021: *Smart Production, Interreg V A, Teilprojekt Fleximould, Lead-Partner: Netzwerk Oberfläche NRW e.V., Münster*.
- [6] N.N.: 1.10.2022 bis 30.9.2024, *Entwicklung Multitool, ZIM-Projekt, Förderkennzeichen KK5377801LL1, 1.10.2022 bis 30.9.2024, Partner Hochschule Niederrhein, Krefeld, Linbrunner GmbH, Mengkofen*.
- [7] Cao, J;Fu, W;Li, M; Peng, H.: 2015.: *Research on the elastic cushion conditions in multi-point thermoforming for polymer sheet*. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering* 229 (2015) 3, S. 149–161.
- [8] Jia, B; Wang, W.-W.: 2017.: *New process of multi-point forming with individually controlled force-displacement and mechanism of inhibiting springback*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 90 (2017) 9-12, S. 3801–3810.
- [9] Liu, C;Li, M; Fu, W.: 2008.: *Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal*. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 35 (2008) 11-12, S. 1227–1233.
- [10] Paunoiu, V;Cekan, P;Gavan, E; Nicoara, D.: 2008.: *Numerical Simulations in Reconfigurable Multipoint Forming*. In: *International Journal of Material Forming* 1 (2008) S1, S. 181–184.
- [11] Boers, S.: *Optimum forming strategies with a 3D reconfigurable die*, Dissertation, University of Technology Eindhoven 2006.
- [12] Zitzlsberger, S.: *Flexibles Werkzeug zur Umformung von Polycarbonatplatten*, Dissertation, Technische Universität München 2014.
- [13] Schwarzmann, P.: *Thermoformen in der Praxis*. 3. Auflage, Hanser München 2016.
- [14] Bonten, C.: *Kunststofftechnik*. 3., aktualisierte Auflage, Hanser München 2020.
- [15] S-POLYTEC GmbH: *Technisches Datenblatt Polystyrol Regenerat schwarz*, in: [polytec-regenerat.de](https://www.polytec-regenerat.de), <https://www.polytec-regenerat.de/regenerate/ps-regenerat/>, 21.11.2024
- [16] *Technisches Datenblatt eABS+HS*, in: <https://www.galaxus.de/de/s1/product/esun-eabshs-175mm-black-1kg-abs-175mm-1000-g-schwarz-3d-filament-42380944>, 21.11.2024
- [17] N.N.: *Datenblatt Simopor S light*, in: [simona.de](https://www.simona.de), [https://www.simona.de/index.php?id=3948&func=product&product\\_code=010011047](https://www.simona.de/index.php?id=3948&func=product&product_code=010011047), 21.11.2024
- [18] Klemens, T; Müller, L. et al.: *Entwicklung eines ferngesteuerten Segelbootes mit Fertigungskonzept für eine Kleinserie Krefeld* 2022.
- [19] Friedlich, A.; Heber, M.; Lupa, N.; Propach, L.: 2019.: *Das täglich neue Thermoformwerkzeug*. In: *Kunststoffe* (2019) 7/2019, S. 68–72.