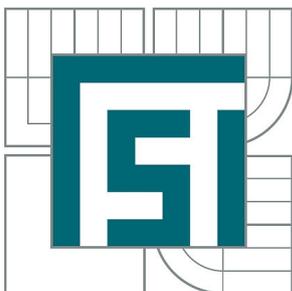


**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A  
ROBOTIKY**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND  
ROBOTICS

## **ROZDĚLENÍ A APLIKACE MATIC FLEXIBILNÍHO PROTOTYPOVÉHO NÁSTROJE**

MATRIX CLASSIFICATION AND APLICATION IN A FLEXIBLE PROTOTYPING TOOL

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. ONDŘEJ RYGL**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. PETR BLECHA, Ph.D.**

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky

Akademický rok: 2013/2014

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

student(ka): Bc. Ondřej Rygl

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Výrobní systémy (2301T030)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Rozdělení a aplikace matic flexibilního prototypového nástroje**

v anglickém jazyce:

### **Matrix classification and application in a flexible prototyping tool**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vyvinout univerzální zařízení na výrobu odlitků z reaktoplastů a výlisků z termoplastů pro malosériovou či prototypovou výrobu. Zařízení má mít měnitelný tvar pracovní plochy skládající z matice výškově nastavitelných členů. Takto vytvořený diskretní povrch nástroje bude následně interpolován.

Možných řešení matice spolu s nosnými členy se nabízí více, stejně jako tvar hlavy jednotlivých diskretních členů. Student provede rešerši v oblasti Flexible tooling. Na základě rešerše navrhne několik možných řešení, teoreticky posoudí jejich vlastnosti a vybere tu nejvhodnější, která bude poté zrealizována a přezkoušena.

Cíle diplomové práce:

- 1) Rešerše dosavadního stavu v oblasti Flexible Tooling
- 2) Návrh různých řešení a teoretické posouzení jejich vlastností
- 3) Konstrukce vybraného řešení
- 4) Přezkoušení a ohodnocení vybraného řešení
- 5) Určení potenciálu a limitů pro použití

Seznam odborné literatury:

Adenaur, J.; Petruschat, J.; Prototype! Physical, Virtual, Hybrid, Smart: Tackling New Challenges in Design and Engineering, Berlin, Form + Zweck-Verlag, 2012, ISBN 978-3-935053-60-0

Bertsche, B.; Bullinger, H.; Entwicklung und Erprobung innovativer Produkte - Rapid Prototyping, Berlin, Springer-Verlag, 2007, ISBN 978-3-540-69880-7

Lindemann, J.; Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden, Berlin, Springer - Verlag, 2004, ISBN 978-3-642-01422-2

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 17.12.2013



  
doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
Ředitel ústavu

  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## **Aufgabenstellung Diplomarbeit**

**Thema:** Klassifizierung und Technologiebewertung von Matrixträgern in einem Prototyping-Werkzeug

### **Aufgabestellung**

Es soll eine Anlage zur Herstellung von duroplastischen und thermoplastischen Werkstücken in Prototypen- und Kleinstserienbau entwickelt werden. Das dafür notwendige, formveränderliche Werkzeug besteht aus einer Matrix von Trägerstößeln. Auf der Matrix wird die Werkstückgeometrie interpoliert abgebildet. Für die Matrixträger existieren mehrere technologische Ansätze, z.B. Klemmstößel oder Feingewindestangen. Diese, wie auch die Kopfgestaltung (z.B. Pendelkopf, Kopfform) sollen in ihren Eigenschaften und Nutzen bewertet werden.

Dazu ist zunächst eine systematische Variantenbewertung erforderlich. Die Einflusskriterien sind festzustellen und deren Gewicht festzulegen. In einer zunächst theoretischen Bewertung sind diese zu bestätigen.

Die Vorzugsvariante soll konstruktiv umgesetzt werden. Nach Abnahme der Konstruktion ist diese herzustellen. Die Eigenschaften sind durch zielführende Versuche zu evaluieren.

Folgende Teilaufgaben sind hierfür zu lösen:

- Übersichtliche Darstellung grundsätzlicher Arten von Matrixträgern (Literatur- und Patentrecherche)
- Theoretische Bewertung der Eigenschaften
- Konstruktive Gestaltung der Vorzugsvariante, Fertigungsbetreuung
- Versuchsdurchführung und Evaluierung
- Aufzeigen von Potential und Einsatzgrenzen

Das Thema wird im Verbund zwischen dem Institut Chemnitzer Maschinenbau e.V., der LSA GmbH sowie Voith Engineering realisiert

**Betreuer:** Dr.-Ing. T. Hänel  
Dr.-Ing. S. Leischnig (LSA GmbH)

## Kurzreferat

Der Preis der Werkzeuge zur Herstellung von Prototypen oder von kleinen Serien sowie die Kosten für zusätzliche Änderungen in den Werkzeugen sind ziemlich hoch und verteuern das Endprodukt. Ein formflexibles Werkzeug bietet eine vorteilhafte Lösung zur Erzeugung von einer Form. Diese Arbeit untersucht den Bereich des Einsatzes von formflexiblen Werkzeugen, eine Demonstrationsanlage wird hergestellt und getestet. Mit der Hilfe von einem methodischen Fortgang werden mehrere Lösungen der formflexiblen Werkzeuge zur Herstellung von duroplastischen und thermoplastischen Formteilen vorgeschlagen. Die geeignetste Variante wird aufgrund der Bewertung der gewichteten Kriterien konstruiert und hergestellt. Das Werkzeug wird mit dem Thermoform-Prozess getestet und evaluiert. Verbesserungen und potentielle Anwendungsbereiche werden vorgeschlagen. Aus den Ergebnissen resultiert, dass das formflexible Werkzeug mit einigen Begrenzungen eine potentielle Ausnutzung in mehreren Anwendungsbereichen hat.

### Schlagwörter:

Flexibles Werkzeug, diskrete Werkzeugoberfläche, Vorschlag der Konstruktion, Konstruktion, Versuchsdurchführung

## Abstract

The price of the tools for making prototypes and small series of products, as well as the cost of additional changes in the tool are quite high and increase the price of the final product. A flexible tool provides an advantageous solution to create a wide variety of molds. In this thesis the area of flexible tooling is introduced. An experimental mechanism has been manufactured and tested. With the help of a methodical approach several solutions for a flexible tool design have been proposed. Based on the evaluation of all given criteria, the most suited version has been designed and manufactured. The tool has been tested and evaluated for the thermoforming process. Improvements and potential applications have been suggested. The results show that the flexible tool has some limitations but has a broad potential use in several applications.

### Keywords:

Flexible tool, discrete tool surface, design proposal, construction, testing

## Rozšířený abstrakt

V dnešní době jsou ceny nástrojů na výrobu prototypů a malých sérií vysoké, stejně jako dodatečné změny v různých nástrojích významně prodražují finální produkt. Oproti tomu flexibilní nástroj nabízí vhodnou alternativu k výrobě široké škály forem a jeví se jako velice atraktivní alternativa ke konvenčním nástrojům. Flexibilní nástroj obecně zvyšuje produktivitu. Změna tvaru flexibilního nástroje probíhá v řádech minut až hodin, zatímco dodání požadovaného nástroje například v rámci výrobní kooperace může trvat i několik týdnů. Další nezanedbatelný aspekt, který motivuje k vývoji takového nástroje je i celkově nižší materiálová a energetická náročnost na vytvoření požadované formy, což v současné době, nabývá čím dál tím více na významu. Myšlenka flexibilního nástroje s nastavitelným diskretním povrchem existuje již více než sto let. První pokusy o vytvoření flexibilního nástroje byly různá upínací a tvářecí zařízení. Potenciál flexibilních nástrojů silně vzrostl s příchodem automatizace a řízení. Flexibilní nástroj, který na základě počítačového modelu budoucího produktu, automaticky v relativně krátkém čase rekonfiguruje svůj povrch, se přibližuje pojetí ideálního nástroje, který definuje Waltzyk ve své práci o flexibilních nástrojích [7]. Ideální nástroj by se měl dle Waltzyka skládat ze spojitě, plynule měnitelné plochy na základě dat počítačového modelu. Nástroj takového typu v současné době neexistuje, nicméně nástroj s automaticky nastavitelným diskretním povrchem se této myšlence přibližuje.

Společnosti *LSA GmbH*, *ICM e.V.* a *Voith engineering services GmbH* se rozhodly tento princip využít primárně k vytváření forem pro RIM technologii (Reaction Injection Moulding) a dále pro tvarování termoplastů. Jedním z cílů projektu je získané poznatky při vývoji a aplikaci nástroje, uplatnit i v jiných oblastech. Úlohou diplomové práce v projektu zmíněných společností, je prozkoumat oblast flexibilních nástrojů, vyvinout zkušební zařízení a následně ověřit jeho vlastnosti, omezení a potenciál. Na základě těchto poznatků má být vyvinut plnohodnotný flexibilní nástroj.

Po úvodní kapitole je představen celý projekt prototypového flexibilního nástroje společně s jeho základními cíly, kterými jsou:

- konstrukce zkušebního zařízení
- vývoj a konstrukce zařízení pro rekonfiguraci a upnutí výškově nastavitelných členů nástroje
- vývoj interpolační vrstvy
- vývoj řídicí jednotky pro automatickou rekonfiguraci nástroje

Dále jsou v této kapitole představeny dvě technologie, pro které má být budoucí nástroj určen. Je popsán jejich princip a standardně používané nástroje. Jde o již zmíněné odlévání reaktoplastů a tvarování termoplastů. V této kapitole je i zběžně rozebrán princip a jednotlivé součásti flexibilních nástrojů, způsoby rekonfigurace spolu s aretací jednotlivých členů, interpolace diskrétního povrchu a možná uplatnění flexibilních nástrojů [Abb. 2-3].

V následující kapitole byla provedena důkladná rešerše v oblasti flexibilních nástrojů. Jako první byl představen dosavadní výzkum a jeho výsledky v této oblasti. Většina prací se soustředila na přístroje určené pro tažení či tváření plechu. Dále byla navržena řešení pro tvarování termoplastů, tvarování polotovarů k výrobě vláknových kompozitů, vstřikování a odlévání plastů či výrobu forem pro odlévání betonu. Jednotlivá řešení se liší především ve velikosti průřezu a hustotě rozmístění jednotlivých výškově nastavitelných členů. Dalším rozlišovacím prvkem je způsob rekonfigurace, zajištění a interpolace vzniklého schodovitého povrchu. Po představení dosavadního výzkumu jsou popsány případy, kdy se podařilo technologii flexibilního nástroje prosadit v průmyslu. Na rozdíl od širokého záběru technických řešení a jejich aplikací ve výzkumu, se do průmyslového využití prosadilo jen několik nástrojů. Jde především o různá flexibilní upínací zařízení, která mají nahradit jednoúčelové přípravky. Patentů v této oblasti bylo uděleno od roku 1863 do současnosti přibližně šedesát [Anlage 2]. Z tohoto důvodu jsou v rešerši představeny jen ty základní, které by mohly sloužit k inspiraci při konstrukci zkušebního flexibilního zařízení v této diplomové práci. Jednotlivá řešení se liší především hustotou a rozmístěním jednotlivých členů, způsobem rekonfigurace a interpolace povrchu nástroje.

Přestože je v předložené práci představeno mnoho potenciálních oblastí využití flexibilního nástroje, jen několik málo řešení dosáhlo praktického využití. Tento stav je způsoben především velikostí jednotlivých diskrétních členů a tím sníženou komplexností a rozlišení vytvořené formy. Dalším aspektem je i cena, která například u řešení s individuálním pohonem každého členu nástroje s hydraulickou aretací může dosáhnout hodnot v řádech milionů korun. Uplatnění flexibilních nástrojů se jeví jako optimální v oblastech, kde požadované geometrické přesnosti a detaily výrobku jsou nízké a rozmanitost produkovaných dílů je vysoká. Tyto vlastnosti splňují zaměření této diplomové práce, zabývající se flexibilním nástrojem na výrobu prototypů či malých sérií.

Ve čtvrté kapitole je navrženo pět možných řešení flexibilního nástroje pro zmíněné aplikace. K efektivnímu a vhodnému návrhu těchto řešení je použit přístup dle VDI směrnice (Verein Deutscher Ingenieure). Konkrétně je v diplomové práci použita směrnice VDI 2222 [45], která se zaměřuje na metodické konstruování a vývoj technických řešení. Postup návrhu je shrnut v následujících bodech.

- Definování požadavků na díl produkovaný na budoucím nástroji [Tabelle 4-1]
- Definování požadavků na flexibilní nástroj [Tabelle 4-2]
- Abstrakce celkové funkce flexibilního nástroje na funkce elementární [Abb. 4-1]
- Návrh možných řešení jednotlivých elementárních funkcí [Tabelle 4-3]
- Návrh pěti možných konstrukčních řešení flexibilního nástroje na základě vhodných kombinací elementárních funkcí [Tabelle 4-4]

První navržená varianta se skládá z pohyblivých členů čtvercového průřezu oddělených dělicími stěnami, které zamezují pohyb sousedících členů vlivem tření při rekonfiguraci formy, a současně drží všechny členy po rekonfiguraci v požadované pozici. Po rekonfiguraci celé formy je zvýšen tlak na strany matice a tím vznikne tuhý nástroj [Abb. 4-3].

Druhá varianta se skládá z dvou matic pohyblivých členů a to z matice rekonfigurační a matice hlavní. Nejdříve se seřídí matice rekonfigurační, kde jsou členy kruhového průřezu zasunuty do desky s třecím elementem. Následně je tato forma otisknuta do matice hlavní, která se skládá z členů čtvercového průřezu, naskládaných vedle sebe v upínacím rámu. Na tento rám s hlavní maticí se po otisknutí rekonfigurační matice vyvine tlak a tím vznikne pevný nástroj [Abb. 4-4].

Pohyblivé členy třetí varianty mají kruhový průřez, jsou rekonfigurovány všechny najednou a jsou uloženy ve speciální aretační desce. Tato deska obsahuje aretační mechanismus pro každý člen. Všechny členy jsou taženy najednou z horních poloh, kdy každý jednotlivý člen je při dosažení požadované výšky automaticky zajištěn [Abb. 4-5].

Varianta čtvrtá se skládá ze závitových tyčí zašroubovaných do základové desky. Rekonfigurace formy probíhá v tomto případě vyšroubováním a zašroubováním jednotlivých tyčí [Abb. 4-6].

Poslední navržená varianta se skládá z třecí desky, do které jsou zasunuty jednotlivé členy s kruhovým průřezem. Po rekonfiguraci všech členů je matice vložena do aretačního ústrojí, které pevně zajistí všechny členy [Abb. 4-7].

Dalším krokem ve vývoji zkušebního zařízení je systematický výběr té nejvhodnější varianty na základě požadavků na nástroj a produkt, který má být tímto nástrojem vyráběn [Anlage 3]. Jednotlivé kroky teoretického posouzení jsou shrnuty v následujících bodech.

- Vytvoření seznamu kritérií pro posouzení navržených variant
- Určení váhy jednotlivých kritérií
- Ohodnocení kritérií u všech navržených konstrukčních variant
- Součet bodových ohodnocení a výběr nejvhodnějšího řešení

Výše popsané varianty byly posuzovány 21 kritérii s rozdílnou váhou [Tabelle 4-6]. Hlediska, která měla na rozhodovací proces výběru největší vliv byla především ta, která hodnotila rozlišení, komplexnost a kvalitu povrchu produkovaného dílu. Velká váha byla přidělena i těm hlediskům, která zachycovala přesnost rekonfigurace a pevnost aretace jednotlivých členů. Dále měla značný vliv i proveditelnost kvalitní interpolace povrchu nástroje a potenciální uplatnění nástroje v jiných oblastech.

Po získání celkového bodového ohodnocení ze všech kritérií s ohledem na jejich důležitost, jsou jednotlivá řešení seřazena dle získaných bodů a jsou vyzdvihnuty jejich zásadní výhody a nevýhody.

Nejvyšší bodové ohodnocení obdrželo řešení, kde flexibilitu formy zajišťují závitové tyče. Tyto tyče mají mít kulatou hlavu pro co možná nejlepší interpolaci povrchu nástroje a jemný závit pro přesné nastavení. Plocha nástroje má být interpolována pomocí silikonové vrstvy, která má být k nástroji přichycena podtlakem. Závitové tyče mají být šroubovány jednotlivě pomocí automatického zařízení.

Po výběru té nejvhodnější varianty flexibilního nástroje přichází v další kapitole na řadu konkrétní řešení. Matice nosných členů, pomocí kterých je vytvořena požadovaná forma, se skládá ze 400 závitových tyčí se závitem M8 a jemným stoupáním o velikosti jeden milimetr. Tyto tyče jsou zašroubovány do základové desky ze slitiny hliníku. Díry s vnitřními závity v základové desce mají čtvercové uspořádání a rozteč 10 mm. Tato matice nosných členů je vložena na automatické zařízení, kde jsou všechny závitové tyče po jednom zašroubovány či vyšroubovány na požadovanou výšku [Abb. 6-1]. Matice nosných členů je na rám rekonfiguračního zařízení pevně přichycena. Rekonfigurační zařízení se skládá z pevného rámu, na který je vložena základová deska se závitovými tyčemi a z rámu pohyblivého, který zajišťuje rekonfiguraci jednotlivých tyčí. V horní části pohyblivého rámu se nachází kolmý pneumatický posuv, nesoucí krokový motor, který slouží k vyšroubování a zašroubování závitových tyčí. Ve spodní části pohyblivého rámu se nachází malý pneumatický válec s magnetickým odměřováním polohy, který se je ve styku se závitovou tyčí a dává řídicímu systému informaci o poloze tyče.

V kapitole zabývající se přezkoušením flexibilního nástroje, je nejprve ověřena přesnost odměřovacího zařízení pro určování výšky závitových tyčí. Dále je ověřena přesnost

rekonfigurace celé formy pomocí krokového motoru spřaženého s odměřovacím zařízením. Dalším krokem před vlastním testováním nástroje je ověření velikosti náklonu závitových tyčí, tento náklon je způsoben vůlí mezi vnitřním závitem základové desky a vnějším závitěm tyče. Všechny naměřené hodnoty byly shledány jako vyhovující s ohledem na požadovanou rozměrovou přesnost dílů, které mají být na flexibilním nástroji produkovány.

Následně jsou určeny maximální a minimální časy pro přestavení celé matice nosných členů. Doba rekonfigurace celé matice se pohybuje od 25 minut do 140 minut v závislosti na potřebné velikosti změny výšky každé závitové tyče. Pro většinu případů však trvá celá rekonfigurace přibližně jednu hodinu.

Vzhledem ke stavu projektu v době zpracování diplomové práce a prvního testování tohoto nástroje nebylo možné provést přezkoušení RIM technologie. Nástroj, do kterého má být vložena matice nosných členů [Abb 5-3], ani silikonová vrstva pro interpolaci povrchu nástroje nabyly připraveny k testování. Z tohoto důvodu je v diplomové práci pouze doporučen postup pro testování odlévání dílců z reaktoplastu.

Před vlastním zjišťováním schopností nástroje tvarovat termoplast, je třeba nejdříve vybrat ten nejvhodnější materiál pro nástroj tohoto typu. Bylo vybráno pět různých umělých hmot o třech tloušťkách, které byly tvarovány na formě obsahující rádius, pravý úhel a rovinnou plochu [Abb. 6-3]. Vzhledem k tomu, že pro testování byla k dispozici jen jedna matice nosných členů, musel být vyroben protikus, kterým byl materiál ručně zatlačen do formy. Tento postup byl použit pro veškeré tvarování termoplastu v předložené práci. Nejlepší výsledky s ohledem na sledované vlastnosti materiálu obdržely desky z PETG (Polyethylenterephthalat Glycol). Při výběru materiálu byl brán ohled na snadnost ohřevu desky, manipulaci a vložení rozehráté desky na nástroj, sílu potřebnou k formování a stálost tvaru po zchlazení dílce. Pro hlavní testování byly vybrány dvě tloušťky materiálu, 3 a 5 mm. Desky z PETG měly čtvercový tvar s hranou o délce 230 mm. K testování byly vybrány tři formy, ke kterým bylo třeba vyrobit protikusy [Abb. 6-5].

- Forma pro plochý díl s dvěma navzájem kolmými plochami
- Forma s třemi navzájem kolmými plochami (trojboký jehlan)
- Forma ve tvaru polokoule

Veškeré testování proběhlo bez interpolační podložky, protože v době testování nebyla silikonová ani žádná jiná podložka k dispozici. Z tohoto důvodu měly dle předpokladu všechny tvarované kusy na jedné straně otisky od hlav závitových tyčí [Abb. 6-7]. Pro každou tloušťku materiálu a formu bylo provedeno několik zkoušek. Na celkem třiceti provedených pokusech byly sledovány tyto znaky.

- síla potřebná k tvarování
- odchylka od požadovaných úhlů
- velikost rádiusů vzniklých na vnitřních hranách produkovaných dílů
- kvalita povrchu výrobku
- opakovatelnost výsledků

Na základě sledovaných vlastností formovaných desek byl vytvořen seznam vlivů na kvalitu procesu tvarování termoplastu na flexibilním nástroji [Tabelle 6-3]. Mezi ty nejvýznamnější patří použití adekvátní síly, použitá tloušťka materiálu, přesný protikus a přesnost pohybu protikusu. Výsledky testování ukazují, že flexibilní nástroj se závitovými tyčemi je vhodný pro tvarování jednoduchých plochých dílů z termoplastu. Problematické jsou pro nástroj tohoto typu složité díly s ostrými změnami tvaru a velkou hloubkou. Dále je důležité, aby díl v nástroji chladl rovnoměrně, aby se zamezilo nežádoucím deformacím vlivem nerovnoměrného ochlazování.

V sedmé kapitole je popsán potenciál a omezení představeného flexibilního nástroje. V první podkapitole jsou navržena možná rozšíření stávajícího nástroje, mezi které patří zvětšení pracovní plochy nástroje či délky závitových tyčí. Dále je navrženo zmenšení průměru závitových tyčí a změna jejich rozmístění za účelem většího rozlišení nástroje. S těmito změnami jsou navrhnuty i změny rekonfiguračního mechanismu. V následující podkapitole je vypočteno maximální možné namáhání jedné závitové tyče, za účelem znalosti přibližného maximálního zatížení celé matice pro jiné aplikace.

V diplomové práci je navrženo několik různých oblastí uplatnění flexibilního nástroje se závitovými tyčemi, mezi které patří tváření či odlévání různých materiálů. Nástroj může pro danou technologii sloužit přímo. Druhou možností je jeho nepřímé použití pro vytvoření formy, která bude následně použita například pro odlévání. Dále je v práci navrženo použití nástroje, jako upínací mechanismus pro nepravidelné dílce, nahrazující drahé upínací přípravky.

Výše navrhnutá možná uplatnění nástroje, jsou proveditelná pouze s určitými úpravami a mají samozřejmě vzhledem k charakteru nástroje i určitá omezení. Mezi ta nejvýznamnější omezení patří následující.

- omezení nástroje
  - maximální možný tlak na nástroj je omezen
  - rozlišení nástroje je závislé od uspořádání a velikosti průřezu pohyblivých členů
  - kvalita interpolace může být při vyšších procesních tlacích nedostatečná
  - flexibilní nástroj má ve srovnání s konvenčními nástroji omezenou geometrickou přesnost
  - oblast využití je omezena na prototypovou a malosériovou výrobu
  
- omezení produktu
  - tvarová složitost produkovaných dílů
  - kvalita povrchu dílů u některých navržených aplikací
  - geometrická přesnost
  - tloušťka tvářeného materiálu

V této diplomové práci bylo úspěšně vyvinuto zkušební flexibilní zařízení, jehož schopnosti byly částečně ověřeny pomocí tvarování termoplastu. Přes dobré výsledky při improvizovaném tvarování termoplastu, je nutné provést ještě několik úprav pro funkční, plně flexibilní systém. Je třeba druhá matice nosných členů, která nahradí vyráběné protikusy ze dřeva či jiného materiálu. Dále je třeba navrhnout a zrealizovat vedení pro tuto druhou matici, která zajistí přesně kolmý pohyb k matici pevné. Pro hladký povrch by dále bylo vhodné přezkoušet několik materiálů pro interpolaci schodovitého povrchu nástroje. Nemusí jít o speciální vrstvu jako v případě RIM technologie, ale měl by postačit nějaký typ fólie. Je třeba i vyřešit problém s nerovnoměrným ochlazováním, a tím deformacím v průběhu ochlazování tvarovaného kusu. Možností jak toto vyřešit je více, například jednoduché přídavné chlazení či kompenzace nerovnoměrného ochlazování vhodným nastavením geometrie formy.

Přezkoušení RIM technologie bylo pouze navrženo, ale je předpokládáno několik problémů, které mohou vyvstat. Především nízká trvanlivost silikonové interpolační vrstvy, či její možné roztrhnutí může způsobit značné problémy. Dále je nejisté vytvoření plnicích a odvodušňovacích kanálů pomocí nastavení jednotlivých členů, či těsnost celého nástroje.

Po ověření proveditelnosti a vlastností RIM zařízení, může být dále vyvinuto zařízení s lepším rozlišením a větší pracovní plochou. Například trojúhelníkové uspořádání závitových tyčí M6 by zvýšilo množství členů na danou plochu o 68%.

### **Klíčová slova:**

flexibilní nástroj, diskretní povrch nástroje, návrh, konstrukce, testování

**Bibliografická citace:**

RYGL, O. Rozdělení a aplikace matic flexibilního prototypového nástroje. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 131 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D..

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že diplomovou práci na téma *Rozdělení a aplikace matic flexibilního prototypového nástroje* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucích diplomové práce doc. Ing. Petra Blechy, Ph.D.; Dr.-Ing. Steffena Leischniga a Dr.-Ing. Thomase Hänela. Dále prohlašuji, že jsem veškerou použitou odbornou literaturu a ostatní prameny uvedl v seznamu literatury.

V Městečku Trnávce dne 15.1.2014:

.....

Ondřej Rygl

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	I
Abkürzungsverzeichnis .....	IV
Verzeichnis der Bilder .....	VI
Verzeichnis der Tabellen .....	VIII
1 Einleitung.....	1
2 Grundlegendes zum Thema „Flexibles Prototypen-Werkzeug“ .....	3
2.1 Vorstellung des Projekts .....	3
2.2 Anwendungen.....	4
2.2.1 Das RIM Verfahren .....	4
2.2.2 Thermoformen .....	6
2.2.3 Flexible Werkzeuge mit formverstellbarer Kontur.....	8
2.3 Grundsätzliche Anforderungen an die Werkzeugsystemkomponenten .....	9
3 Stand der Technik flexible Prototypenwerkzeuge.....	11
3.1 Bisherige und aktuelle Forschungsarbeiten .....	11
3.2 Bisher bekannter industrieller Einsatz .....	19
3.3 Patentsituation.....	22
3.3.1 FW mit undichte Anordnung und manueller Verstellung .....	22
3.3.2 FW mit undichter Anordnung und automatischer Verstellung.....	23
3.3.3 FW mit gepackter Anordnung und manueller Verstellung .....	23
3.3.4 FW mit gepackter Anordnung und automatischer Verstellung:.....	24
3.3.5 Gepackte Anordnung von Gewindestangen.....	26
3.4 Bewertung des Standes der Technik .....	27
4 Variantenentwicklung und theoretische Bewertung.....	29
4.1 Anforderungen an das Produkt und das Werkzeug.....	29
4.2 Funktionsstruktur .....	31
4.3 Morphologischer Kasten .....	32
4.4 Die Interpolationsmethode .....	35
4.5 Lösungsvarianten .....	35
4.6 Bewertung der Lösungsvarianten .....	40
5 Konstruktive Gestaltung der Vorzugsvariante .....	46
5.1 Der Gewindestift- Matrixträger .....	46
5.2 Voraussichtliches Verhalten des Matrixträgers beim RIM Verfahren.....	47
5.2.1 Eingliederung des Matrixträgers .....	47
5.2.2 Belastung des Matrixträgers .....	49

---

5.2.3	Wirkstelle des Matrixträgers zur Interpolationsmatte.....	51
5.2.4	Verstellung der Stifte .....	52
5.2.5	Gebrauch des Matrixträgers .....	54
5.2.6	Fazit .....	54
5.3	Konstruktive Maßnahmen zum RIM Matrixträger .....	55
5.3.1	Maßnahmen gegen die ungünstige Wirkstelle des Matrixträgers an die Interpolationsmatte .....	55
5.3.2	Maßnahmen zum Verstellen der Stifte.....	56
5.3.3	Maßnahmen zum Gebrauch des Matrixträgers.....	58
5.4	Ausblick .....	58
6	Versuchsdurchführung und Evaluierung .....	59
6.1	Mess - Vorversuche.....	59
6.1.1	Bestätigung der Genauigkeit des Verstellmechanismus .....	60
6.1.2	Bestimmung der Verstellzeiten .....	61
6.1.3	Messen der Verkippung der Stifte.....	61
6.2	RIM Versuche.....	62
6.3	Thermoformen Versuche .....	64
6.3.1	Vorversuche zur Materialauswahl .....	64
6.3.2	Versuche mit dem ausgewählten Material .....	68
6.3.3	Evaluierung der Ergebnisse der Versuche.....	71
6.3.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	76
6.4	Fazit .....	78
7	Aufzeigen von Potential und Ansatzgrenzen.....	80
7.1	Potentielle Erweiterungen des formflexibles Werkzeugs.....	80
7.1.1	Konstruktiven Erweiterungen des Matrixträgers.....	80
7.1.2	Erweiterungen des Verstellungssystems .....	82
7.1.3	Andere Modifikationen .....	83
7.2	Potenzielle Tragfähigkeit des Gewindematrixträgers .....	84
7.3	Anwendungsbereiche .....	86
7.3.1	Umformen.....	86
7.3.2	Urformen .....	90
7.3.3	Spannen von Werkstücke.....	91
7.3.4	Begrenzungen der vorgeschlagenen Anwendungen.....	92
8	Zusammenfassung .....	95
9	Ausblick .....	98

Literaturverzeichnis.....	100
Anlagenverzeichnis.....	103

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bezeichnung
CAD.....	Computer-aided design
CSV.....	Comma-separated values
F.....	Forderungen
FEM.....	Finite-Elemente-Methode
FW.....	Formflexibles Werkzeug
ICM.....	Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.
LSA.....	LSA GmbH
MIT.....	Massachusetts Institute of Technology
PETG.....	Polyethylenterephthalat-Glycol
PMMA.....	Polymethylmethacrylat
PE.....	Polyethylen
CAM.....	Computer aided manufacturing
RIM.....	Reaction Injection Moulding
VDI .....	Verein deutscher Ingenieure
VOITH .....	Voith Engineering Service GmbH
W.....	Wünsche

## Kurzzeichenverzeichnis

Kurzzeichen	Einheit	Bedeutung
$d_m$	mm.....	Flankendurchmesser
$F_{bmax}$	N.....	maximale Biegekraft
$F_{bmin}$	N.....	minimale Biegekraft
$F_M$	N.....	Gesamte Kraft an der Grundplatte
$F_S$	N.....	Maximale Kraft an einem Stift
$g$	$m/s^2$ .....	Erdbeschleunigung
$h$	mm.....	Steigung
$I$	$mm^4$ .....	Trägheitsmoment
$m_s$	kg.....	Gewicht eines Stiftes
$n$	N.....	Anzahl von Gewinde
$n_S$	–.....	Anzahl von Stiften
$p_P$	Pa.....	Druck von dem Prozess
$p_S$	Pa.....	Druck vom Gewicht der Stifte
$p_V$	Pa.....	Druck von dem Vakuum
$Re$	MPa.....	Streckgrenze
$s$	mm.....	Stützhöhe
$S_A$	$mm^2$ .....	Arbeitsfläche
$t$	mm.....	Gewindetiefe
$W_B$	$mm^3$ .....	Widerstandsmoment
$\sigma_a$	MPa.....	axiale Biegespannung
$\sigma_{er}$	MPa.....	Erlaubte Spannung

## Verzeichnis der Bilder

Abb. 2-1 Schema des RIM Prozesses .....	4
Abb. 2-2 Schema des Vakuum-Thermoformen Prozesses [5].....	6
Abb. 2-3 Schematische Darstellung des formverstellbaren Werkzeuges.....	8
Abb. 3-1 Das Prinzip von ein FW von Nakajima [6].....	11
Abb. 3-2 Prinzip des Blechabstandhalters [8].....	12
Abb. 3-3 Vakuumformung von Crawford und Kleespise [10] .....	13
Abb. 3-4 Prinzip des zwei-Matrix FW [16] .....	15
Abb. 3-5 Formflexibles Werkzeug für Spritzguss [20].....	16
Abb. 3-6 Hybrid vacuum forming system [21].....	17
Abb. 3-7 Prinzip der Klemmung mit schmelzbarer Legierung [23].....	18
Abb. 3-8 Formflexibles Werkzeug für Vakuumformung [24] .....	18
Abb. 3-9 Ein FW zur Herstellung von Formen [26] .....	19
Abb. 3-10 Ein einstellbare Spanneinrichtung von Matrix GmbH [27] .....	20
Abb. 3-11 Eine einstellbare Spanneinrichtung für große Teile mit Vakuumanschluss [29]20	
Abb. 3-12 Ein FW für Thermoformung [30] .....	21
Abb. 3-13 Ein FW, wo die Oberfläche bearbeitet wird [31] .....	21
Abb. 3-14 Ein FW für Herstellung von Segeln [33] .....	22
Abb. 3-15 Untere Matrize für den Schiffbau [34] .....	22
Abb. 3-16 Automatisch verstellbares Werkzeug für Blechumformung [35] .....	23
Abb. 3-17 Eine Hälfte Blattfederumformmechanismus [36] .....	23
Abb. 3-18 Formvorrichtung mit laminarer Klemmung [37] .....	24
Abb. 3-19 Ein FW zur Umformung von Blattfedern [39].....	25
Abb. 3-20 Die Modellmatrix und die Hauptmatrix des FWs von Umetsu [40].....	25
Abb. 3-21 Ein Prototypen Abformwerkzeug [41].....	26
Abb. 3-22 Ein FW mit Gewindestiften in einer gepackten Anordnung [42].....	26
Abb. 4-1 Funktionsstruktur .....	32
Abb. 4-2 Vergleich der quadratischen und trigonalen Ausrichtung .....	34
Abb. 4-3 Schematische Darstellung der ersten Lösungsvariante .....	36
Abb. 4-4 Schematische Darstellung der zweiten Lösungsvariante .....	37
Abb. 4-5 Schematische Darstellung der dritten Lösungsvariante .....	38
Abb. 4-6 Konzept der vierten Lösungsvariante.....	38
Abb. 4-7 Schematische Darstellung der fünften Lösungsvariante .....	39
Abb. 5-1 Modell der Grundplatte .....	46
Abb. 5-2 Der Verstellmechanismus.....	48
Abb. 5-3 Eingliederung des Matrixträgers in das RIM Werkzeug .....	49
Abb. 5-4 Eine einfache Form mit geringen Stifthöhenunterschiede.....	51
Abb. 5-5 Eine Form mit großen Stifthöhenunterschieden.....	52
Abb. 5-6 Stellung der Stifte .....	52
Abb. 5-7 Verkipfung der Stifte .....	53
Abb. 5-8 Mögliche Kopfgestaltungen .....	55
Abb. 5-9 Erzeugte Form mit Schwenkköpfen .....	56
Abb. 5-10 Ein Beispiel zur Vermeidung vom Verkipfung der Stifte .....	57
Abb. 6-1 Der Verstellmechanismus mit Beschriftungen.....	59

---

Abb. 6-2 Das Messsystem .....	60
Abb. 6-3 Die erzeugte Form mit dem Gegenstempel .....	66
Abb. 6-4 Die Abdrücke an der gute Seite des Formteiles .....	67
Abb. 6-5 Die erzeugten Testgeometrie .....	69
Abb. 6-6 Die Gegenstempeln für den Versuch B und D .....	70
Abb. 6-7 Ein Formteil des Versuches A.....	71
Abb. 6-8 Ein Formteil des Versuches B.....	72
Abb. 6-9 Ein Formteil des Versuches C .....	74
Abb. 6-10 Ein Formteil des Versuches D .....	75
Abb. 7-1 Trianguläre M6 und quadratische M8 Anordnung .....	81
Abb. 7-2 Richtungen der berechneten maximalen Kräfte .....	84
Abb. 7-3 Abhängigkeit des maximalen Belastung von der Höhe des Stiftes.....	85
Abb. 7-4 Der Matrixträger mit dem Spannrahmen und den quadratischen Stiften .....	87
Abb. 7-5 Konventionelles Streckziehen [51] .....	87
Abb. 7-6 Konventionelle Biegesenk in V Form [51] .....	88
Abb. 7-7 Biegen von Kunststoff.....	89
Abb. 7-8 Gießform für das Gießen von dreidimensionalen Gussteilen .....	91
Abb. 7-9 Ein Spannmechanismus mit zusätzlichem Spannrahmen.....	92

## Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1 Anforderungen an das Produkt.....	29
Tabelle 4-2 Anforderungsliste .....	31
Tabelle 4-3 Morphologischer Kasten.....	33
Tabelle 4-4 Morphologischer Kasten mit Lösungsvarianten .....	40
Tabelle 4-5 Beispiel von Gewichtung der Kriterien.....	41
Tabelle 4-6 Die Bewertungskriterien und ihr Gewichtungsfaktor $g_k$ .....	42
Tabelle 4-7 Wertskala zur Bewertung von Lösungsvarianten [46].....	43
Tabelle 4-8 Das Ergebnis der systematischen Bewertung .....	43
Tabelle 5-1 Einflussfaktoren auf die Formteile .....	54
Tabelle 6-1 Bewertungen der Ergebnisse .....	76
Tabelle 6-2 Einflussgrößen .....	77
Tabelle 6-3 Einflüsse an den Thermoformprozess .....	78
Tabelle 7-1 Voraussichtliche Begrenzungen und potenzielle Anwendungen.....	93

## 1 Einleitung

Heutzutage steigen die Werkzeugkosten für Ur – und Umformprozesse. Damit die Unternehmen die Wettbewerbsfähigkeit erhalten können, wechseln sie ihre Modelle ständig und produzieren auch kleinere Stückzahlen. Die Formen für kleine Serien, Prototypen oder Änderungen in den bestehenden Formen sind sehr teuer wegen der einzigartigen Werkzeuge, die dazu nötig sind. Aus dieser Sicht wäre ein universales formveränderliches Werkzeug für Ur- und Umformprozesse eine sehr attraktive Alternative zu den konventionellen Werkzeugen. Ein formflexibles Werkzeug würde nicht nur Geld sparen, sondern auch Zeit. Die Formänderung wäre eine Frage von einigen Stunden, nicht Tagen oder Wochen wie bei den konventionellen Vorgängen. Ein weiterer Aspekt, der zur Entwicklung eines formflexiblen Werkzeuges motiviert, ist ein ressourcenschonender Einsatz von Material und Energie, der heutzutage an Bedeutung gewinnt. Die Idee von einer Matrix mit verstellbaren Stiften als eine diskrete rekonfigurierbare Werkzeugoberfläche für unterschiedliche Anwendungen gibt es seit mehr als 100 Jahren. Die ersten Versuche waren verschiedene manuell verstellbare Klemmungs- und Umformmechanismen. Die Attraktivität eines flexiblen Werkzeuges wuchs stark mit dem Aufkommen von Automatisierungstechnik. Ein Werkzeug mit automatisch verstellbarer diskreter Werkzeugoberfläche nähert sich zu dem Konzept eines idealen Werkzeuges nach Daniel Walczyk [7]. Das ideale Werkzeug nach Walczyk besteht aus einer sich kontinuierlich verwandelnden Oberfläche auf der Basis von Informationen aus einem Computermodell. Heutzutage gibt es aber keine solche Technologie, die das ermöglicht. Eine automatisch einstellbare Form mit einer diskreten Werkzeugoberfläche würde sich aber dem Konzept eines „idealen“ Werkzeuges ziemlich annähern.

LSA GmbH, Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V. und Voith Engineering GmbH streben an, dieses Prinzip für Reaktions-Injektions-Formen (RIM) ausnutzen und auf den Markt zu bringen. Die erhaltenen Erkenntnisse bei der Entwicklung und Implementierung des formflexiblen Werkzeuges sollten auf andere Anwendungen übertragen werden.

Ziel dieser Masterarbeit ist es, einen Probemechanismus zu konstruieren und seine Fähigkeiten und Begrenzungen zu überprüfen. Als erstes wird eine Analyse des Standes der Technik durchgeführt. Es werden die Patentsituation und die bisherigen und aktuellen Forschungsarbeiten zusammen mit dem industriellen Einsatz beschrieben. Mit der Hilfe von einem methodischen Konstruktionsprozess werden Lösungsvarianten angefertigt und eine Vorzugsvariante durch eine systematische Bewertung ausgewählt. Erste Versuche an dem

formflexiblen Werkzeug werden durchgeführt und die Ergebnisse werden evaluiert. Der letzte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit den möglichen Erweiterungen des formflexiblen Werkzeugs zusammen mit den potenziellen Anwendungsbereichen.

## 2 Grundlegendes zum Thema „Flexibles Prototypen-Werkzeug“

### 2.1 Vorstellung des Projekts

Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojektes soll ein material- und energie effizientes flexibles Prototypenwerkzeug entwickelt werden. Das Werkzeug soll hauptsächlich für die Herstellung von duroplastischen Teilen dienen, aber auch andere Anwendungen des Werkzeugs werden in Betracht gezogen.

Das Projekt wird durch Kooperation von ICM (Institut Chemnitzer Maschinen- und Anlagenbau e.V.), LSA (LSA GmbH) und VOITH (Voith Engineering Service GmbH) realisiert. Die Formflexibilität des Werkzeugs wird mit einer Matrix von Stiften realisiert. Die Höhe der Stifte soll automatisch eingestellt werden, und damit die Formflexibilität gewährleisten. Der Matrixträger soll hauptsächlich zur Erstellung einer Form für das RIM Verfahren (Reaction Injection Moulding), dienen (siehe Kapitel 2.2.1). Bei der Entwicklung der Stellmechanik und Klemmtechnik des Matrixträgers wird auch die Anwendung von Thermoformen von flächigen Teilen (siehe Kapitel 2.2.2) mitberücksichtigt.

Das Projekt hat vier Entwicklungsschwerpunkte:

- Werkzeugkonzept
- Stellmechanik und Klemmtechnik
- Interpolationsmatte
- Regel- und Steuereinheiten.

Es soll für das RIM Verfahren ein neues formflexibles Werkzeugkonzept entwickelt werden. Die Formflexibilität soll mit verstellbaren Stiften mit einer Stellmechanik und Klemmtechnik erreicht werden. Die diskrete erzeugte Form soll mit einer elastischen Matte interpoliert werden. Die Form des Werkzeuges soll automatisch auf Grund der CAD Daten erzeugt werden [1].

## 2.2 Anwendungen

Wie schon erwähnt, soll der Matrixträger zur Herstellung von flächigen duroplastischen und thermoplastischen Werkstücken verwendet werden. Zwei konkrete Anwendungen werden berücksichtigt: das RIM Verfahren und das Thermoformen.

### 2.2.1 Das RIM Verfahren

#### Prozess

Das RIM Verfahren ist ein Verfahren, mit dem Werkstücke aus Polyurethan hergestellt werden. Zwei Komponenten Polyol und Isocyanat (und Additive) werden unter Druck von 3 bis 6 bar in einem Mischkopf vermischt und in die Spritzgussform gespritzt. In der Form reagieren die zwei Komponenten miteinander durch einen exothermen Prozess, wodurch Polyurethan entsteht. In der Gussform härtet das Polyurethan in wenigen Minuten aus. Das Verhältnis zwischen den beiden Komponenten bestimmt die endgültigen Eigenschaften des Materials [2].

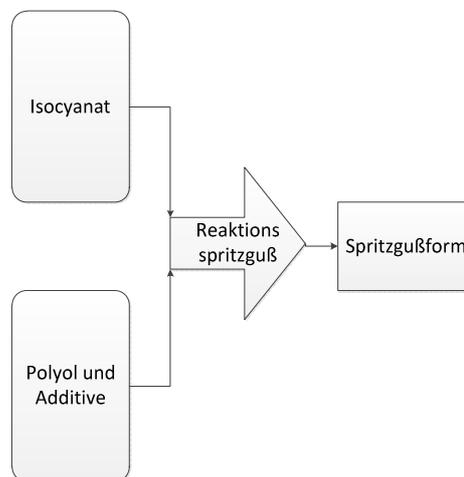


Abb. 2-1 Schema des RIM Prozesses

## Zyklus des Prozesses

- Auftragen vom Trennmittel auf die Form
- Zugabe und Mischung von Polyol und Isocyanat
- Einspritzung des reaktiven Gemisches in die Gussform
- Aushärtung des Formteiles in der Gussform.

Es gibt noch Erweiterungen von dem RIM Verfahren: R-RIM (reinforced reaction injection moulding) und S-RIM (structural reaction injection moulding). Beim R-RIM Verfahren wird ein Verstärkungstoff in die Mischung zugegeben, um die Eigenschaften wie Steifigkeit oder Bruchdehnung zu verbessern. Der Zusatzstoff kann gemahlene Glasfasern oder Kohlefasern sein. S-RIM Verfahren erlaubt Glasfasern von einer Länge bis zu 50 mm zu verwenden. Eine Glasmatte wird erst in eine dreidimensionale Kontur des Endprodukts vorgeformt. Das Halbzeug wird dann in ein Schaumwerkzeug angelegt. Danach wird das Reaktionsgemisch aufgetragen und alle Komponenten werden zusammengepresst [1], [2], [3].

## Werkzeuge

Im Vergleich zum konventionellen Spritzgießen kann bei der RIM-Technologie schon bei geringerem Druck und geringerer Haltekraft gearbeitet werden. Aus diesem Grund müssen die Werkzeuge nicht aus Metall hergestellt sein. Der Aufbau des Werkzeugs ist von Herstellungsstückzahlen, Abmessungen und Wandstärke des Formteils abhängig. Für große Teile mit großen Stückzahlen, z.B. für die Automobilindustrie, werden nur Metallwerkzeuge verwendet. Das ganze Werkzeugsystem benötigt aufgrund der Größe ein Vorheizungs- und Kühlungssystem. Bei niedrigen Stückzahlen werden die Werkzeuge aus Polyurethan Hartschaum hergestellt um die Bearbeitungs- und Materialkosten zu verringern [1].

## 2.2.2 Thermoformen

### Prozess

Beim Thermoformen werden Thermoplaste erwärmt und in eine dreidimensionale Geometrie durch eine Thermoform gebracht. Es wird zwischen Negativ- und Positivformen unterschieden, es hängt davon ab, ob das Halbzeug konvex oder konkav ist.

### Zyklus des Prozesses

- Einspannen des Halbzeuges
- Erwärmung des Halbzeuges
- Umformung
- Abkühlung
- Nachbearbeitung.

Das Ziel des Prozesses ist es, möglichst eine einheitliche Stärke über das gesamte Bauteil zu bekommen. Dies erfolgt auf verschiedene Weise wie unterschiedliche Erwärmung des Halbzeuges, Vorblasen, Vorsaugen, Verwendung verschiedener Oberstempel oder der Einsatz von Niederhaltern [4].

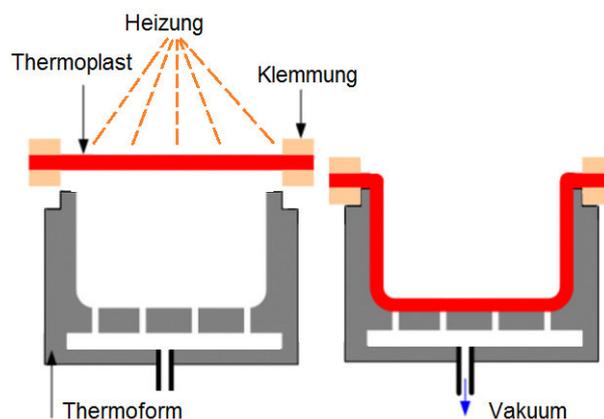


Abb. 2-2 Schema des Vakuum-Thermoformen Prozesses [5]

## Werkzeuge

Es gibt viele verschiedene Formwerkzeuge für das Thermoformen, abhängig vom Verfahren und vom Produkt. Für große flächige Formteile wird meistens eine Aluminiumgussform verwendet. Bei mehrfachen Werkzeugen wird das Aluminium bearbeitet. Für Thermoplaste mit hohem Schmelzpunkt wird Stahl für das Werkzeug verwendet. Elektrogeformtes Nickel ist für sehr große und ausführliche Formteile besonders gut geeignet. Prototypen der Formwerkzeuge werden aus leicht zu bearbeitendem Material hergestellt, wie Hartholz, Duroplast oder auch Metall wie Zink und Legierungen, die auf ein Holzmuster gespritzt werden. Die Formwerkzeuge benötigen Kühlungssysteme, um die Zykluszeiten zu reduzieren und Luftlöcher um Vakuum zu erzeugen [4].

### 2.2.3 Flexible Werkzeuge mit formverstellbarer Kontur

Seit der zweiten Hälfte des achtzehnten Jahrhunderts, wurden viele verschiedene Arten von Werkzeugen mit einstellbaren Parametern erfunden. Die verschiedenen Ansätze werden folgendermaßen eingeteilt: Stiftkonstruktionen, Verstellmechanismen, Werkzeugoberflächenbehandlungen und Anwendungen des Werkzeugs (Abb. 2-3).

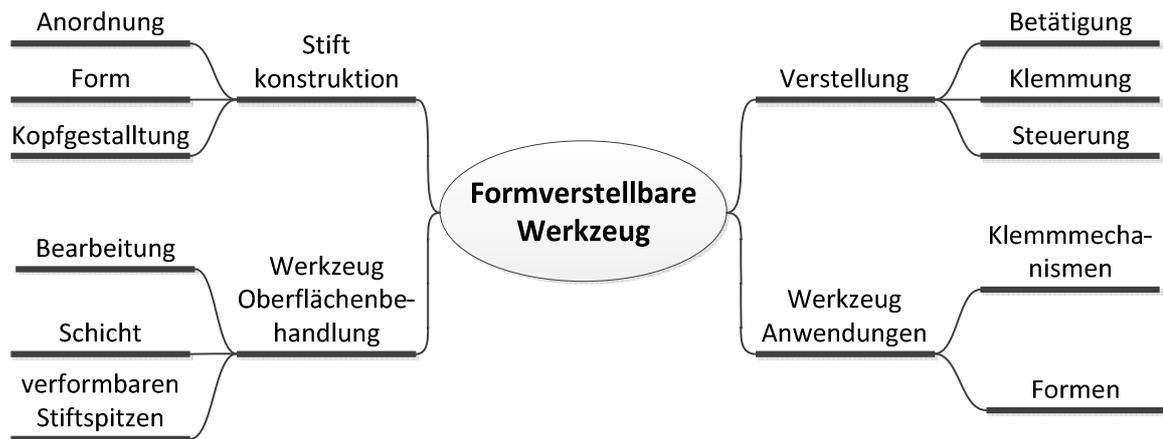


Abb. 2-3 Schematische Darstellung des formverstellbaren Werkzeuges

Jedes FW (Formverstellbare Werkzeug) besteht aus Stiften, die in der Längsrichtung eine veränderbare Position haben. Die Stifte können dicht arrangiert werden, entweder mit sehr kleinen Abständen oder ohne, abhängig vom Querschnitt der Stifte. Oder sie können relativ große Abstände zueinander haben. Eine sehr wichtige Eigenschaft des FWs ist der Querschnitt und die Größe der einzelnen Stifte, diese Eigenschaften bestimmen die Auflösung des Produkts. Die Kopfform der Stifte ist von der Anwendung abhängig. Die Köpfe der Stifte können auswechselbar oder schwenkbar sein. Bei Bedarf besitzen die Köpfe Löcher für das Abkühlungsmedium.

Für die meisten Anwendungen muss die diskrete Oberfläche interpoliert werden. Interpolation erfolgt in der Regel mittels einer Interpolationsschicht von verschiedenen Materialien, verformbaren Stiftköpfen oder durch Bearbeitung der diskreten Oberfläche.

Der Schlüssel zur Umgestaltung des Werkzeugs ist eine Matrix von Stiften, die nach oben oder nach unten beweglich sind, um die Werkstückgeometrie zu bestimmen. Die Betätigung der Stifte kann manuell, mechanisch, hydraulisch oder pneumatisch erfolgen. Die Stifte können einzeln oder in ganzen Reihen verstellt werden. Andere technische Lösungen erlauben alle Stifte gleichzeitig zu verstellen. Nach der Positionseinstellung müssen alle Stifte geklemmt werden, um den Prozesskräften zu widerstehen. Jeder Stift kann individuell geklemmt werden, oder die Stifte mit dichter Anordnung werden alle von der Seite geklemmt.

Der Zeitaufwand der manuellen Verstellung wäre für die meisten Anwendungen ungünstig. Aus diesem Grund soll die Verstellung und auch die Klemmung automatisch gesteuert werden.

Die am meisten genutzten Ansätze des FWs sind verschiedene Spannvorrichtungen, Blechumformen, Thermoformen oder Gießformen.

### **2.3 Grundsätzliche Anforderungen an die Werkzeugsystemkomponenten**

Die oben genannten Anwendungen, RIM und Thermoformen sind sehr verschieden, aber die Anforderungen an die Stiftverstellung, die Klemmung und die Wirkstelle des Matrixträgers zur Interpolationsmatte sind ähnlich. Auch die allgemeinen Ansprüche an das Werkzeugsystem sind sehr ähnlich.

Anforderungen an die Stellmechanik und die Klemmtechnik

In der Regel wird ein Stift oder alle Stifte erst verstellt und dann geklemmt. Die innovative Stellmechanik und Klemmtechnik sollte folgenden Anforderungen entsprechen:

- automatisch
- sicher und stabil
- nicht zeitaufwendig
- gering mechanisch aufwendig.

### Anforderung an die Kopfform der Stifte

Die Kopfform der Stifte zusammen mit der ausgewählten Interpolationsmethode der diskreten Oberfläche soll:

- Welligkeit der erzeugte Form verhindern
- Abdrücke der Stifte auf den produzierten Teilen vermeiden
- Wiederverwendbarkeit der Interpolationsschicht garantieren.

Anforderungen an das RIM und das Thermoformen Werkzeugsystem:

- neuartig
- energetisch effizient und materialsparend
- flexibel und einstellbar
- rechnergestützt und automatisiert.

### 3 Stand der Technik flexible Prototypenwerkzeuge

Seit der industriellen Revolution in der Mitte des achtzehnten Jahrhunderts, haben viele Erfinder und Forscher verschiedene Arten eines FW entwickelt. Das Ziel war meistens die herkömmlichen Werkzeuge durch ein FW zu ersetzen, um die Kosten und Fertigungszeiten zu senken.

#### 3.1 Bisherige und aktuelle Forschungsarbeiten

*Nakajima* an der Universität von Tokyo kam im Jahr 1968 mit dem ersten automatischen verstellbaren FW. Seine zwei Prototypen bestanden aus Drähten mit einem kleinen Durchmesser (1,8 mm und 5,4 mm) und einer flachen Kopfgestaltung. Diese Drähte wurden in einer Quadratspannvorrichtung verpackt. Die Matrix von Drähten wurde zuerst an einer NC-Maschine angebracht, um dann die Drähte in die gewünschte Position zu drücken. Die Schubstange wurde mit einem Ultraschall-Oszillator verkoppelt, um die benachbarten Drähte nicht zu bewegen. *Nakajima* demonstrierte verschiedene Anwendungen für sein FW und abhängig davon schlug er geeignete Interpolatoren vor, um die Werkzeugoberfläche glatt zu machen [6].

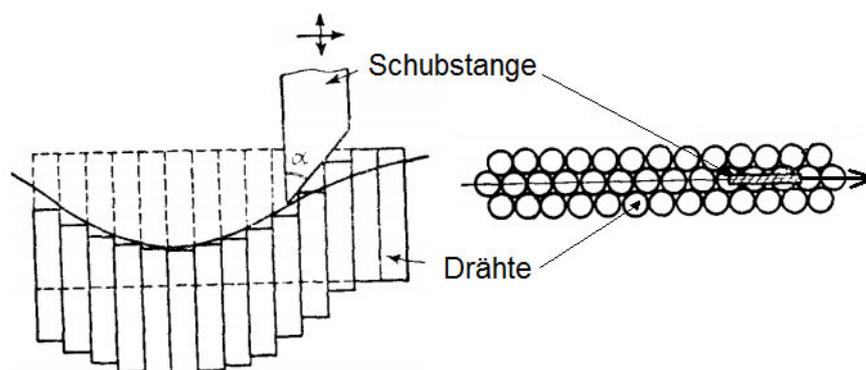


Abb. 3-1 Das Prinzip von ein FW von Nakajima [6]

Im Jahr 1980 begann ein langfristiges Projekt am MIT (Massachusetts Institute of Technology), das sich mit einem FW für Streckziehen von Aluminium-Flugzeugteilen beschäftigte. *David Hardt* und seine Forschungsgruppe entwickelte ein FW mit dicht arrangierten quadratischen Stiften mit kugelförmigen Köpfen, die automatisch verstellt werden können. Das Werkzeug wurde modular aufgebaut, bei dem jedes Modul aus acht Stiften besteht und jeder Stift seine eigene Gewindestange, Encoder und Motor hat. Die Stifte werden automatisch verstellt ohne Beeinflussung von Nachbarstiften dank den Blechabstandhaltern (Abb. 3-2). Diese Elemente gewährleisten, dass die Reibung zwischen den Stiften niedriger ist als die Reibung zwischen einem Stift und der Zwischenwand [7].

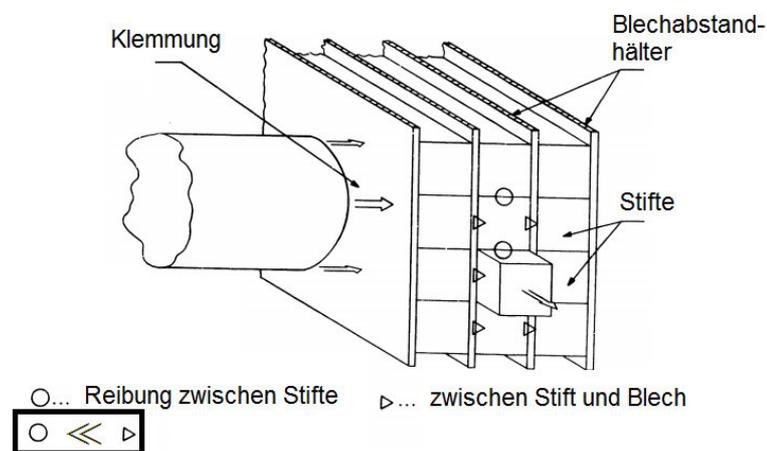


Abb. 3-2 Prinzip des Blechabstandhalters [8]

Die Stifte werden nach der Verstellung hydraulisch geklemmt, um ein starres Werkzeug zu bilden. Die ganze Matrix besteht aus 2688 Stiften und kann in 12 Minuten verstellt werden.

Auch andere Betätigungsmethoden wurden untersucht. Antriebswellen für jede Reihe von Stiften mit Schneckengetrieben und gesteuerten Kupplungen für jeden Stift, oder ein Feld von 16 Hochgeschwindigkeits-Servomotoren, die auf einem beweglichen XY-Positionssystem unter dem Gerät angebaut werden. Die Wissenschaftler beschäftigten sich auch mit der Materialauswahl von einem Interpolator. Für Umformprozesse wurde eine Elvax (Ethylenvinylacetat) Schicht mit der selben Dicke wie der Durchmesser der Stifte vorgeschlagen [7], [9].

*Crawford* von der University of Texas in Austin zusammen mit *Kleespies* von Lockheed Martin Tactical Aircraft Systems präsentierten im Jahr 1998 ein FW für Vakuumumformung von thermoplastischen flächigen Teilen (Abb. 3-3). Der Mechanismus besteht aus gleichmäßig verteilten Gewindestiften. Die Werkzeugoberfläche wurde mit einer Gummischicht interpoliert. Der Thermoplast wurde mit Hilfe von Heizstrahlern erhitzt und mit Vakuum auf die Werkzeugoberfläche gezogen [10].

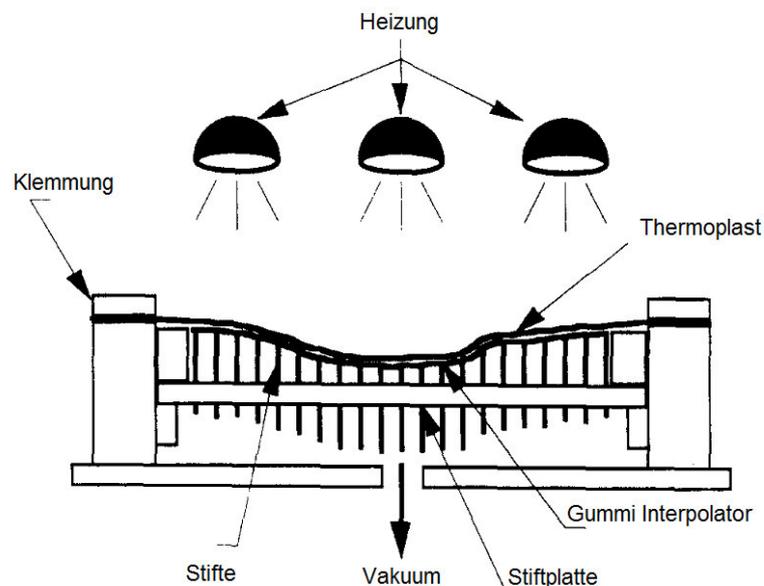


Abb. 3-3 Vakuumumformung von Crawford und Kleespise [10]

*Waltzyk* und sein Kollektiv an der Rensselaer Polytechnic Institute in New York untersuchten mögliche Lösungen für ein FW zur Umformung von Blechteilen für die Flugzeugindustrie. Erst wurde ein Prototyp von einer hydraulisch angetriebenen 4x4 Matrix konstruiert. Dazu wurde eine dichte Anordnung von quadratischen (25 mm x 25 mm) Stiften und runder Kopfgestaltung gewählt. Die Stiftreihen wurden mit Trennwänden voneinander abgetrennt. Die Oberfläche wurde mit einem Elastomer interpoliert [11]. Die verschiedenen Klemmungsmethoden bei dichtem Stiftwerkzeug, die für Blechumformen verwendet werden, wurden in Kooperation mit *Hardt* von MIT theoretisch untersucht und beschrieben [12].

Im Jahr 2000 haben *Im* und *Waltzyk* drei verschiedene Stifantriebe für Stretch-Maschinen getestet und verglichen [13].

- 42x64 Matrix mit Gewindestangen und 16 Motoren mit X-Y-Z Achssystem
- 48x72 Matrix mit hydraulisch individuell angetriebenen Stiften, die durch Servoventile gesteuert werden
- 42x64 Matrix, die eine Antriebswelle für jede Reihe von Stiften besitzt. So können die Stifte durch Schneckengetriebe und Gewindespindel verstellt werden.

Weitere Untersuchungen von möglichen Anwendungen des FWs für inkrementelle Umformungen von Composite-Flugzeugteilen wurden durchgeführt. Verschiedene Stärken von Silikoninterpolatoren und verschiedene Höhe des Unterdrucks für den Abformprozess wurden getestet [14].

In den Jahren von 2006 bis 2009 wurde ein Internationales EU Projekt von der Cardiff Universität koordiniert. Das Projekt beschäftigte sich mit der Entwicklung und dem Testen von einer hydraulischen Presse und einer Streckzieh Maschine für das Drücken und Ziehen von Blech für die Flugzeugindustrie. Die entwickelten Maschinen hatten eine dichte Anordnung von quadratischen Stiften, die von der Seite geklemmt wurden [15].

An der Universität von Manchester wurde von *Owodunni*, *Rozo* und *Hinduja* ein neues Konzept von einem FW entwickelt. Es besteht aus zwei Matrizen mit Stiften (Abb. 3-4). Die erste Matrix wird verstellt und dient später als ein Mastermodell. Diese besteht aus zwei Stahlplatten mit einer Gummischicht in der Mitte. Die runden Stifte stehen nicht mehr dicht, und werden mit der Hilfe von einer CNC Fräsmaschine oder einem computergesteuerten Aktuator verstellt. Die zweite Matrix enthält quadratische Stifte, die größer als die in der ersten Matrix sind. Diese Stifte sind dicht in einem Rahmen arrangiert. Die Hauptmatrix wird auf die Modellmatrix aufgelegt und dann fest geklemmt. Dieses Konzept wurde getestet zur Herstellung von Kohlefasern, Thermoplasten und Blechen [16].

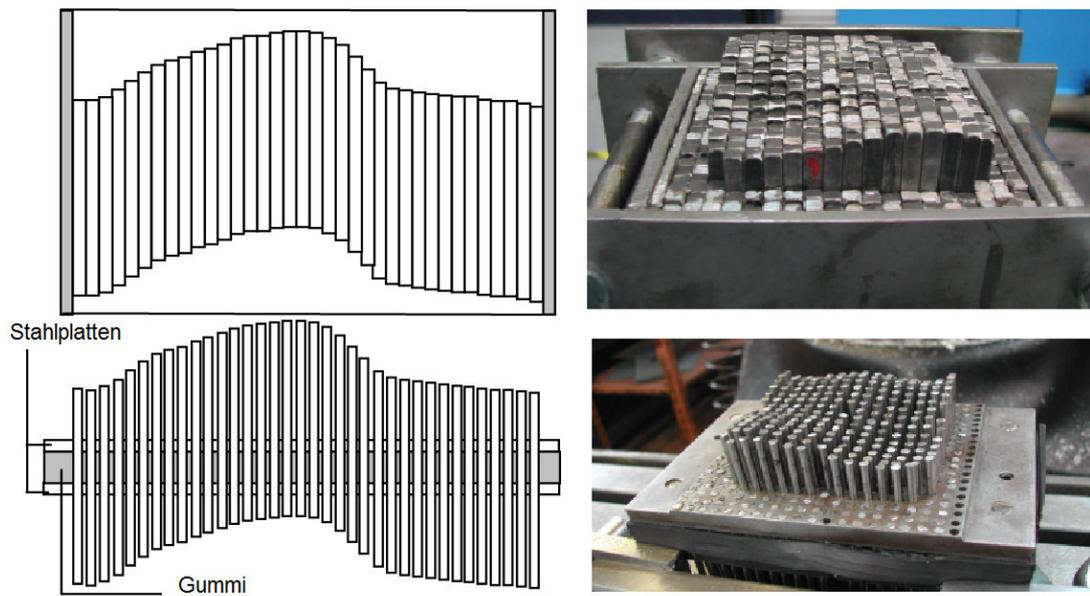


Abb. 3-4 Prinzip des zwei-Matrix FW [16]

*Kirby* und *Stauffer* haben eine Analyse der Eignung von verschiedener Stiftgeometrie für die Vakuumformung von Kunststoffplatten durchgeführt. Sie haben runde, sechseckige und viereckige Stifte für die Analyse ausgewählt. Ein Silikoninterpolator wurde vorgeschlagen. Sie haben verschiedene Kriterien berücksichtigt, und als die beste Option wurde die mit quadratischen Stiften in einer dichten Konfiguration ohne Lücken gewählt [17].

*Liu, Li, und Fu* von Jiliny Universität in China untersuchten verschiedene technologische Methoden für flexible Umformung von Blechteilen an einem FW. Ihre Umformmaschine besteht von einem Unter- und Oberwerkzeug, wo jeder viereckige Stift seinen eigenen Antrieb, ein Getriebe und einen Encoder hat. Die Betätigung der Stifte wurde durch Gewinde ausgeführt. Das Team hat anstatt einer Interpolationsschicht, für jede Stößel mit kugelförmiger Kopfgestaltung eine Polyurethan Abdeckung genutzt [18].

An der Universität von Warwick in Großbritannien wurde von *Cook, Smith und Britnell* eine Untersuchung über Verteilung von Klemmungskräften durchgeführt, und zwar mit (1 mm x 1 mm) Quadratstiften in einer dichten 20x5 Aufstellung. Die Stifte wurden von der Seite geklemmt und es wurde untersucht ob sie den verschiedenen Druckkräften widerstehen können. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die Verteilung von Klemmungskräften mehr von Fertigungstoleranzen abhängen als von der Größe der Stifte. Das nächste Ziel dieser

Forschungsgruppe war einen neuen kompakten Verstellmechanismus für quadratische 6 mm Stifte zu entwickeln. Dazu wurde ein Versuchstand mit 36 Stiften gebaut, bei dem alle Stifte gleichzeitig verstellt wurden. Jeder Stift wurde durch einen Klemmmechanismus aus Memorymetall in der gewünschten Lage geklemmt. Den Autoren nach ist der wesentliche Faktor für die Steuerung und Positionierung von den Stiften der Einbau von Memorymetall Aktuatoren [19].

An der TU München wurde bei *Hagemann* ein formflexibles Werkzeug für Spritzguss entwickelt. Dieses Werkzeug besteht aus einem Spanrahmen mit quadratischen Nadeln (0,4 mm x 0,4 mm) mit flachen Kopfgestaltungen. Axial verschiebbar ist immer nur eine Nadel durch einen besonderen halb offenen Rahmen mit verschiebbaren Blenden. Die Verstellung wurde durch eine Gewindespindel mit einer Einstellspitze realisiert [20].

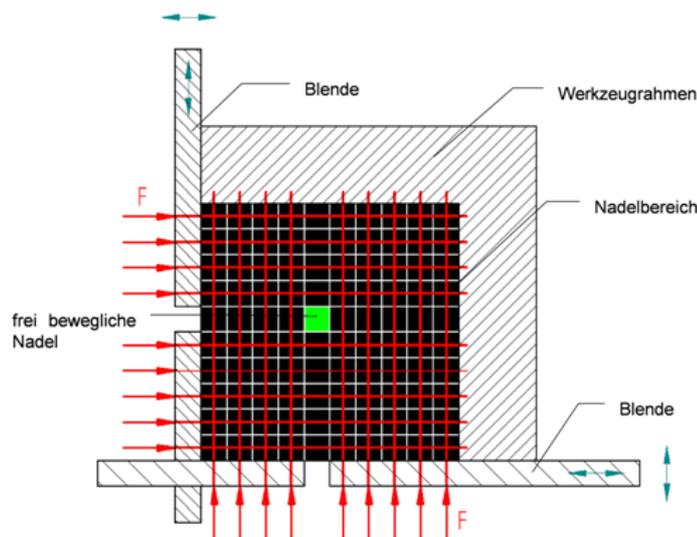


Abb. 3-5 Formflexibles Werkzeug für Spritzguss [20]

An der University of Nottingham in Großbritannien wurde im Jahr 2010 von *Wang* ein neues Konzept eines FW vorgestellt. Es heißt HAVES (Hybrid vacuum forming system). Es ist ein Thermoformungs-Mechanismus mit verstellbaren Elementen. Die Gewindestifte wurden in einer Verteilung ohne Lücken verbunden (Abb. 3-6). Die Gewindestifte unterstützen einander. Erst wurden die Stifte automatisch verstellt. Danach anstatt einer Interpolationsschicht, wurde die Stiftabstufung mit einem Füllstoff ausgefüllt und mit einer integrierten Fräsmaschine in die gewünschte Oberflächenkontur gebracht [21].

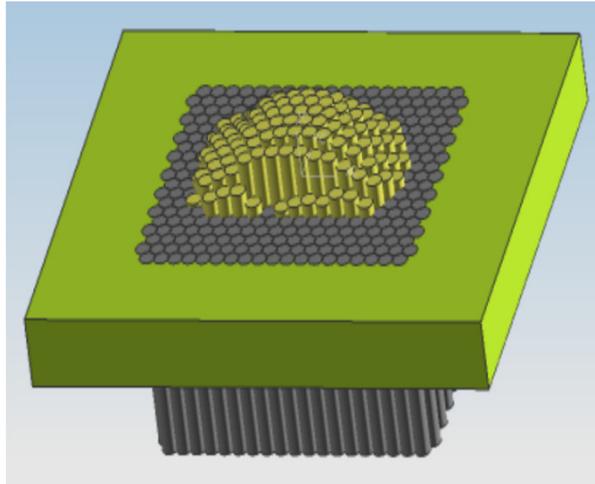


Abb. 3-6 Hybrid vacuum forming system [21]

*Koc* und *Thangaswamy* schlagen in ihrer Arbeit ein formflexibles Werkzeug für Abformung von dreidimensionalen Gussteilen vor. Ihr Werkzeug besteht aus quadratischen Stiften mit einer dichten Verteilung, die mit Gewindestößeln und mit einer Spindel mit einem x-y Vorschubsystem verstellt werden. Nach der Verstellung werden die Stifte geklemmt. Die Autoren schlagen mechanische oder hydraulische Klemmung vor. Ihre vorgeschlagene Konstruktion besteht aus 6 Stiftmatrizen für dreidimensionale Formteile [22].

Im Jahr 2011 kam die Forschungsgruppe von *Hardt* am MIT weiter mit dem formflexiblen Werkzeug. Das Ziel war es, einen neuen automatisierten Verstellmechanismus zu entwickeln, der den Einsatz von möglichst kleinen Stiften ermöglicht. Die Hauptidee war, dass alle Stifte gleichzeitig bewegt werden, und eine Mikrokupplungsschicht soll jeden Stift in der gewünschten Lage klemmen. Es wurden vier Konzepte von Klemmungen vorgeschlagen: thermisch, piezoelektrisch, Memorymetall und schmelzbare Legierung. Nach einer theoretischen Analyse wurde die Methode mit schmelzbarer Legierung die Abb. 3-7 darstellt, als die einzige durchführbare Lösung ausgewählt und getestet [23].

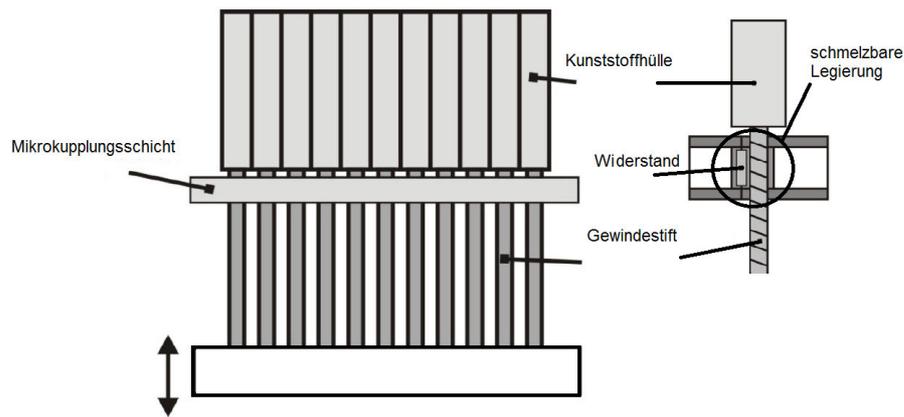


Abb. 3-7 Prinzip der Klemmung mit schmelzbarer Legierung [23]

An der Purdue Universität in den USA wurde ein formflexibles Werkzeug für Vakuumformung von medizinischen Teilen wie Schienen entwickelt. Es besteht aus einer sechseckigen Matrix mit Holstiften, die durch drei Schichten von Zwischenwänden getrennt werden, die zueinander um 45 Grad gedreht sind (Abb. 3-8). Die Daten über die Höhe von Stifte werden durch Verwendung von Stereoskopie erhalten (z.B. scannen einer verletzten Hand) und die Stifte werden mit einem Roboter in die richtige Position gedrückt. Dann wird der Druck zwischen den Zwischenwänden und den Stiften erhöht, um ein starres Werkzeug für Vakuumformung zu erhalten [24].

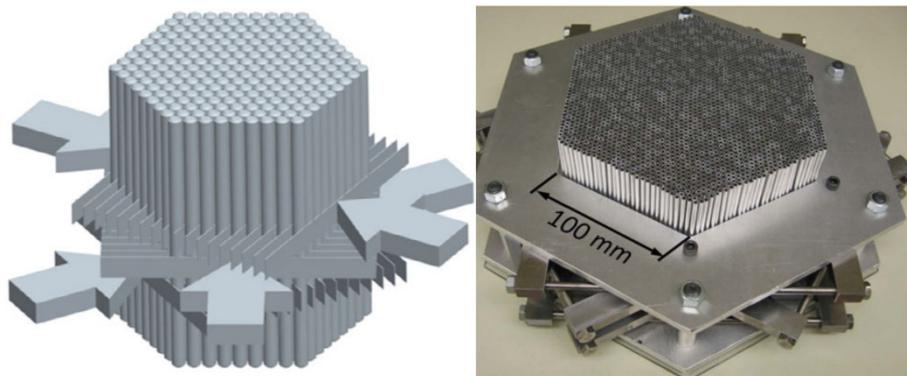


Abb. 3-8 Formflexibles Werkzeug für Vakuumformung [24]

An der Hochschule München wurde ein formflexibles Umformungswerkzeug für die Herstellung von Polycarbonatscheiben für Kraftfahrzeuge entwickelt. Das Werkzeug besteht aus getrennten Stiften mit flächigen Schwenkköpfen, an denen ein nicht spezifizierter Interpolator aufgelegt wird [25].

Mit einem neuen Ansatz von formflexiblen Werkzeugen kamen die Wissenschaftler der ETH Zürich. Das FW dient nicht direkt als Werkzeug. Dieses formflexible Werkzeug dient zur Herstellung einer Gussform, in die später Beton gegossen wird. Dieser Ansatz zeigt, dass ein formflexibles Werkzeug nicht unbedingt direkt zur Herstellung von Werkstücken verwendet werden muss, sondern auch zur Herstellung von Formen, die später als das Werkzeug dienen [26].

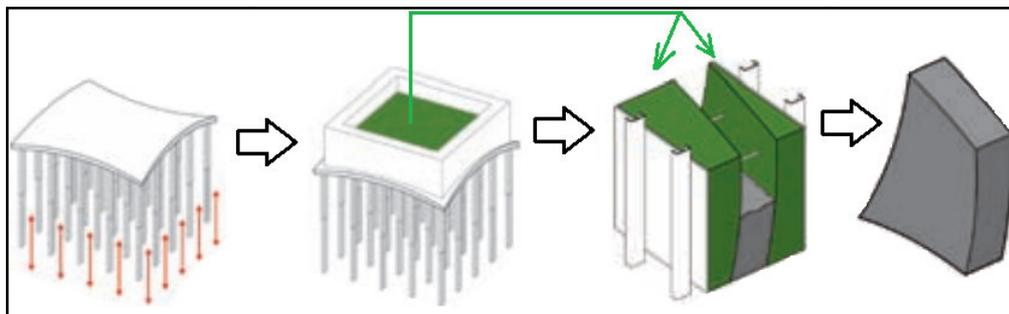


Abb. 3-9 Ein FW zur Herstellung von Formen [26]

### 3.2 Bisher bekannter industrieller Einsatz

Obwohl kleine FW Prototypen für Forschung und einmalige Projekte gebaut wurden, haben nur wenige Unternehmen eine funktionelle Lösung entwickeln können und an den Markt bringen können.

Parallel in zwei Unternehmen: *Matrix GmbH* und *Christian Bewer GmbH* wurden vergleichbare Spanneinrichtungen für die Fixierung von Werkstücken entwickelt und auf den Markt gebracht. Die runden Stifte mit einem Durchmesser von 3 bis 6 mm werden dicht angeordnet und mechanisch von der Seite geklemmt. Verschiedene Größen und ein modularer Aufbau bieten eine sehr interessante Lösung anstatt der konventionellen Spannvorrichtungen [27], [28].

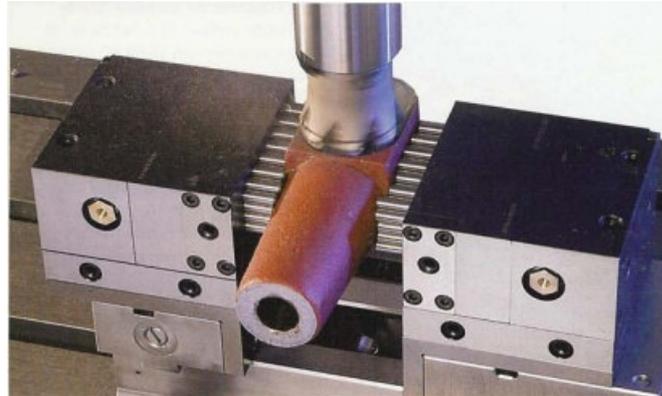


Abb. 3-10 Ein einstellbare Spanneinrichtung von Matrix GmbH [27]

*Infinite Tool Systems* entwickelte eine Spanneinrichtung mit Stiften, die in größeren Abständen zueinander angeordnet sind. Jeder Stift besteht aus Kugelgewindetriebe, einem direkten Antrieb und einem schwenkbaren Stiftkopf mit einem Vakuumschlus zur Befestigung von Werkstücken [29].



Abb. 3-11 Eine einstellbare Spanneinrichtung für große Teile mit Vakuumschlus [29]

Ein niederländischer Betrieb, *Optimal Forming Solutions* unter der Leitung von *Dr. Boers* entwickelte ein voll automatisiertes formflexibles Werkzeug für Thermoformung. Es besteht aus einer großen Menge von relativ kleinen flachköpfigen Stiften mit einer dichten Anordnung. Es wurde kein Interpolator für diese Anwendung verwendet [30].

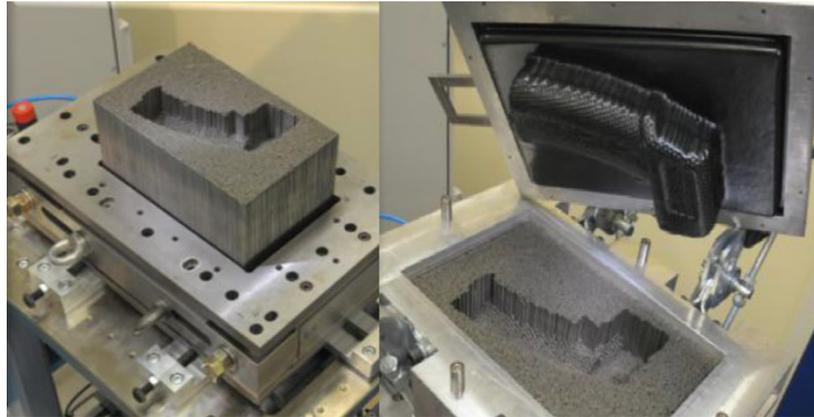


Abb. 3-12 Ein FW für Thermoformung [30]

*Surface Generation* entwickelte ein semi-verstellbares Werkzeug, bei dem relativ große quadratische Stifte durch Gewinde verstellt werden. Die Stifte werden geklemmt und danach werden die Köpfe zur gewünschten Oberflächenkontur bearbeitet. Die Quadratstifte sind aus Kunststoff, Metall oder Keramik und können eine Größe von 25mm x 25 mm bis 500 mm x 500mm haben, abhängig von der Anwendung [31], [32].

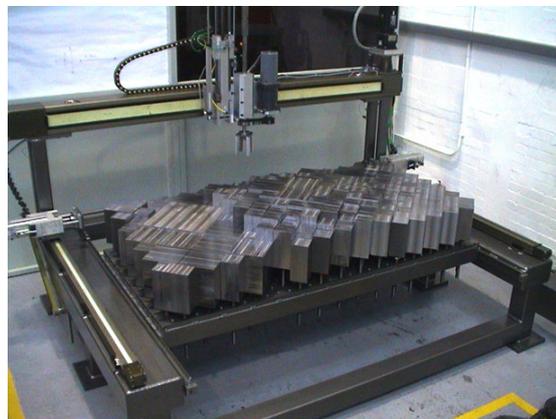


Abb. 3-13 Ein FW, wo die Oberfläche bearbeitet wird [31]

Die letzte Firma, die ein verstellbares Werkzeug mit Erfolg benutzte, ist die *North Sails Group*. Sie haben ein Werkzeug zur Herstellung von Segeln entwickelt. In diesem Fall geht es nicht um ein Stiftwerkzeug, sondern um einen Schere-Mechanismus, der anhand von CAD Daten verstellt wird, um die gewünschte Oberfläche zu bekommen [33].



Abb. 3-14 Ein FW für Herstellung von Segeln [33]

### 3.3 Patentsituation

In der Vergangenheit wurden viele verschiedene FW patentiert. Das erste formflexible Werkzeug wurde im Jahr 1863 patentiert, und bis heute wurden im Bereich flexible Werkzeuge ca. 60 weitere Patente erteilt. Die Anlage 2 gibt eine Übersicht der relevanten Patente. Ziel dieses Kapitels ist es, die grundlegenden Prinzipien der FWs vorzustellen, die als Inspiration dienen können.

#### 3.3.1 FW mit undichte Anordnung und manueller Verstellung

Im Jahr 1943 kam *Walters* mit einer hydraulisch angetriebenen Umformmaschine für erwärmte Metallplatten im Schiffbau. Zwei gleiche gegensätzliche Matrizen mit fernliegenden handbetätigten Gewindestiften und Schwenkköpfen, die mit einer flexiblen Schicht befestigt sind [34].

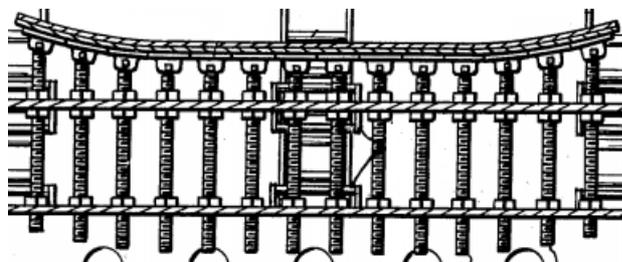


Abb. 3-15 Untere Matrize für den Schiffbau [34]

### 3.3.2 FW mit undichter Anordnung und automatischer Verstellung

Mit einer sehr ähnlichen Lösung für Blechumformung kam im Jahr 1980 *Pinson*. Nur die Gewindestifte wurden individuell angetrieben und durch ein CNC Ablaufprogramm gesteuert, und die Schwenkköpfe wurden nicht mit der Interpolationsmatte fest verbunden. Der Autor schlägt für die Matte verschiedene Materialien vor wie Metall, Kunststoff oder Gummi [35].

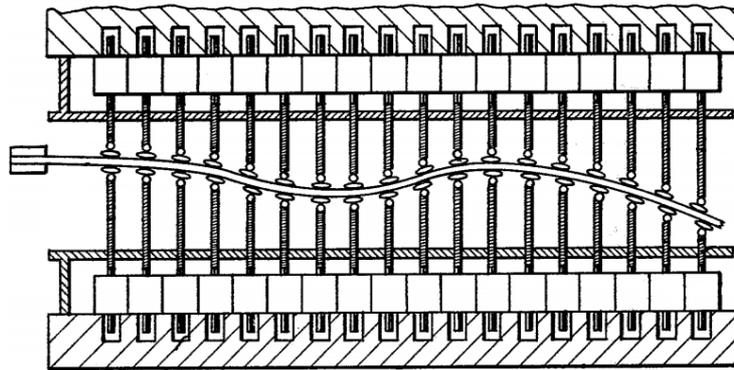


Abb. 3-16 Automatisch verstellbares Werkzeug für Blechumformung [35]

### 3.3.3 FW mit gepackter Anordnung und manueller Verstellung

Im Jahr 1920, lies *Elkins* einen Blattfederumformmechanismus, der aus zwei parallelen Werkzeugen besteht, patentieren. Die diskreten quadratischen Elemente dienen nicht dazu die Kontur der Federn zu erstellen, sondern nur um die genauen Korrekturen der Kontur zu erreichen [36].

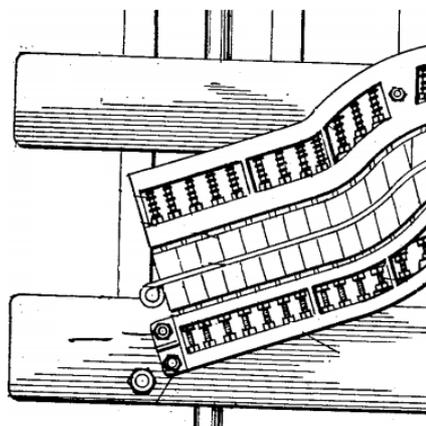


Abb. 3-17 Eine Hälfte Blattfederumformmechanismus [36]

Eine formflexible Gießform wurde von *Humprey* im Jahr 1971 patentiert. Runde Stifte mit gepackter Anordnung wurden nach der Verstellung durch ein Master-Modell geklemmt. Die Oberfläche wurde mit einer Gummimembrane interpoliert. Die Klemmung wurde durch einen laminaren Kasten durchgeführt. *Humprey* hatte für sein Konzept mehrere technologische Einsätze vorgeschlagen [37].

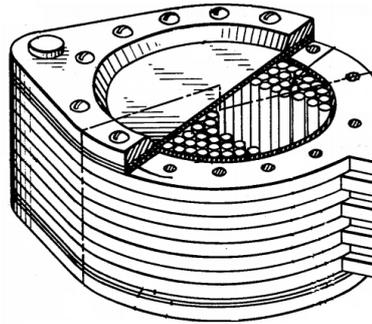


Abb. 3-18 Formvorrichtung mit laminarer Klemmung [37]

Ein sehr ähnliches Werkzeug wurde von *Hoffman* im Jahr 1992 präsentiert. Aber die Klemmung der Stifte wurde durch einen Sechseckspannmechanismus realisiert, und in der Mitte des Werkzeugs war eine Reibungsschicht, die das Ausfallen von den Stiften verhinderte [38].

#### 3.3.4 FW mit gepackter Anordnung und automatischer Verstellung:

Mit einem automatisierten formflexiblen Werkzeug für Umformung von Blattfedern, kam im Jahr 1993 *Morita*. Sein Unter- und Oberwerkzeug hat eine Reihe von dicht angeordneten quadratischen Stiften mit kugelförmiger Kopfgestaltung. Die Gewindestifte werden automatisch nacheinander verstellt [39].

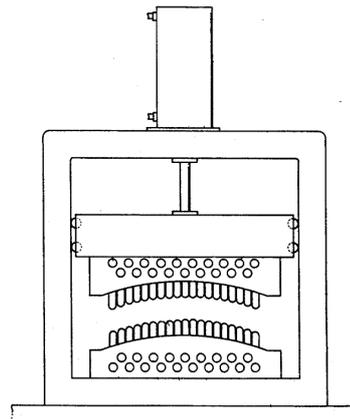


Abb. 3-19 Ein FW zur Umformung von Blattfedern [39]

*Umetsu* kam im Jahr 1993 mit einem dichten Werkzeug, das dasselbe Prinzip zur Gestaltung der Oberfläche wie das vorhergenannte Projekt von *Owodunni* und *Hinduja* besitzt. Erst wird eine Modellmatrix automatisch verstellt und danach wird sie in der Hauptmatrix abgedruckt. Die vorgeschlagenen Anwendungen sind das Ziehen und das Prägen von flächigen Teilen [40].

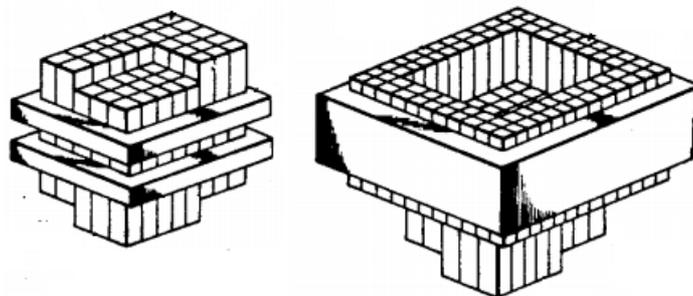


Abb. 3-20 Die Modellmatrix und die Hauptmatrix des FWs von *Umetsu* [40]

Ein relativ unkompliziertes Stiftwerkzeug, das mit Hilfe von einer CNC-Maschine verstellt werden kann, hat *Shevchuk* im Jahr 1999 patentiert. Zuerst werden die Stifte im Spannrahmen verstellt, dann wird der Druck im Rahmen durch Schrauben erhöht, um ein starres Abformwerkzeug zu bekommen. Dieses Abformwerkzeug dient zur Herstellung von Prototypen [41].

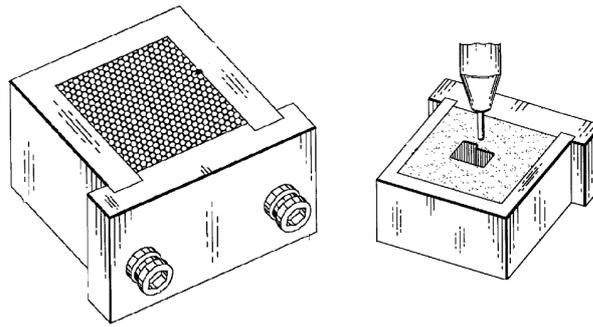


Abb. 3-21 Ein Prototypen Abformwerkzeug [41]

### 3.3.5 Gepackte Anordnung von Gewindestangen

*Bertau* kam im Jahr 1994 mit einer neuen Konzeption von einem flexiblen Werkzeug mit Gewindestiften. Die Stifte werden zusammen in eine gepackte Anordnung in einen rechteckigen Rahmen verbunden. Die Stifte unterstützen einander durch Gewinde. Diese Matrix wird durch ein Vierachssystem verstellt [42].

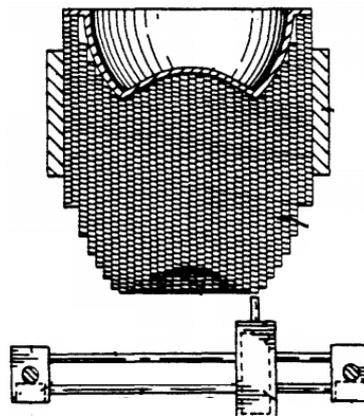


Abb. 3-22 Ein FW mit Gewindestiften in einer gepackten Anordnung [42]

Auf die Selbe Weise werden von *Schroeder* und *Stevenson* andere Anwendungen von diesem Matrixsystem vorgestellt, wie: Spannvorrichtungen, Gießformen, und Abform Werkzeuge [43], [44].

### 3.4 Bewertung des Standes der Technik

Es wurde eine sehr hohe Anzahl von Patenten und Forschungsarbeiten in dem Bereich von flexiblen Werkzeugen gefunden, aber nur einige von den Lösungen haben sich in der Industrie durchgesetzt. Dieser Zustand in dem versprechenden Bereich ist wegen der Begrenzungen in der Auflösung, Steifigkeit, oder Preis der Werkzeugen verursacht. Obwohl viele Anwendungen von formflexiblen Werkzeugen demonstriert wurden, scheinen sie am besten in den Fällen geeignet zu sein, wo die Teilgeometrie nicht viel detailliert wird und die Teilvielfalt groß ist. Diese Prämisse übereinstimmt mit der Zielrichtung dieser Arbeit, ein flexibles Werkzeug für Prototyping- und Kleinserienbau zu entwickeln.

Manche Lösungen, die genug kleine Stifte haben, könnten für das Thermoformen sehr gut leisten. Zum Beispiel die Vakuumformung Maschine von *Crawford* und *Kleespise* mit Gewindestiften, oder die Lösung von den Forschern an der Purdue Universität mit einer sechseckigen Matrix mit Holstiften. Das Prinzip des zwei-Matrix flexiblen Werkzeuges von den Forschern an der Universität von Manchester, sowie der Patent von *Umetsu* sieht attraktiv für Thermoformen und auch für das RIM Anwendung aus. In diesen Fällen ist aber die Genauigkeit der Verstellung fraglich. Weiter treten die Lösungen der Forschungsgruppe von *Hardt* mit der Mikrokupplungsschicht und dem Nadelwerkzeug von *Hagemann* hervor. Diese Lösungen könnten auch beide gestrebte Anwendungen erfüllen, aber sie sind sehr komplex und daher auch teuer. Die Lösung des flexiblen Anlage für Thermoformen von Dr. Boers ist funktionsfähig ohne Interpolator und hat sehr kleine Stiften. Theoretisch könnte eine ähnliche Lösung auch für das RIM Anwendung dienen.

Viele vorgestellte Lösungen waren für Blechumformen oder Streckziehen geeignet. Diese formflexiblen Werkzeuge haben große Stiften und eine sehr feste Klemmung mit individueller Verstellung für jeden Stift. Die Lösungen sind gar nicht anwendbar für Thermoformen oder RIM, hauptsächlich wegen der Größe der Stifte und der komplizierten Art von der Verstellung.

Das Ziel der nächsten Kapitel ist eine Lösung eines formflexiblen Werkzeuges zu finden, für die Anwendungen die im Kapitel 2.2 vorgestellt wurden. Dazu werden die gewonnenen Erkenntnisse von den bisherig realisierten formflexiblen Werkzeugen verwendet.

Den meisten existierenden Lösungen fehlen die folgenden Aspekte, die in der vorliegenden Arbeit gelöst werden sollen.

- möglichst niedrigste Preis des Werkzeugs
- einfache Konstruktion des Werkzeugs
- möglichst kleinste Abmessung des Querschnittes der Stifte
- geeignete Kopfform der Stifte im Kombination mit der Interpolationsmethode
- ein genauer und schneller Verstellmechanismus

## 4 Variantenentwicklung und theoretische Bewertung

Wie es vorher erwähnt wurde, gibt es viele verschiedene Lösungswege zur Entwicklung eines FW. Dafür ist es erforderlich eine methodische Vorgangsweise anzuwenden. Dies garantiert, dass keine mögliche Lösung übergegangen wurde, und eine optimale Lösung ausgewählt wird. Dazu ist die VDI 2222 [45] (Verein deutscher Ingenieure) Richtlinie: Konstruktionsmethodik, Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien geeignet. Der feste Algorithmus beginnt mit der Anforderungsliste, die die Aufgabestellung konkretisiert. Danach wird eine Funktionsstruktur ausgearbeitet, die die Gesamtfunktion des FWs bis zu den Elementarfunktionen abstrahiert. Die möglichen Lösungen der Elementarfunktionen werden in einen morphologischen Kasten eingeordnet und durch Verbindung von passenden Elementen jeder Zeile werden Lösungsvarianten entwickelt. Der letzte Schritt wird eine systematische Variantenbewertung sein.

### 4.1 Anforderungen an das Produkt und das Werkzeug

Erst werden die Anforderungen an das Produkt bestimmt. Sie sind in der Tabelle 4-1 zusammengefasst. Nicht alle Anforderungen sind völlig erreichbar, deswegen werden die Anforderungen in Forderungen und Wünsche klassifiziert.

Anforderungen	F/W
hohe Auflösung	W
hohe Komplexität	W
keine nötige Nachbearbeitung	W
+/-0,1 mm von den Solldimensionen	<b>F</b>
glatte Oberfläche	<b>F</b>

Tabelle 4-1 Anforderungen an das Produkt

Die Anforderungsliste in Tabelle 4-2 konkretisiert die Aufgabestellung und die grundlegenden Anforderungen an das formflexible Werkzeug von Kapitel 2.3. Dieser Schritt in dem

Entwurfsprozess ist sehr wichtig für die weiteren Entscheidungen in dem Konstruktionsprozess. Die Anforderungen an das FW werden wie in [46] nach elf Merkmalen gegliedert: Geometrie, Kinematik, Kräfte, Energie, Stoff, Steuerung Ergonomie, Kontrolle, Transport, Gebrauch und Kosten.

Merkmal	Anforderungen	F/W
Geometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsfläche: 200 mm x 200 mm</li> <li>• minimaler Hub der Stifte: 50mm</li> <li>• möglichst kleine Abmessung der Stifte</li> <li>• geeignete Kopfform der Stifte im Kombination mit der Interpolationsmethode</li> <li>• möglicher Vakuumansatz</li> </ul>	<p>F F F F W</p>
Kinematik	<ul style="list-style-type: none"> <li>• genau und relativ schneller Verstellmechanismus</li> <li>• Vermeidung des Einflusses auf Nachbarstifte beim Verstellen</li> </ul>	<p>F F</p>
Kräfte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fest, sicher und stabile Klemmtechnik</li> <li>• Vermeidung von Verkippung der Stifte in der oberen Lage</li> <li>• Widerstehen von Prozesskräfte (Stifte, Klemmung)</li> </ul>	<p>F W F</p>
Energie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• energetisch effizientes Werkzeugsystem</li> <li>• Temperaturbeständigkeit (bis 90 Grad Celsius)</li> <li>• relativ schnelle Abkühlung des Formteiles</li> </ul>	<p>F F F</p>
Stoff	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Materialsparendes Werkzeugsystem</li> <li>• Dichtigkeit der Form (bei RIM)</li> <li>• Vermeidung von Abdrücken durch Stifte am Formteil (Durchführbarkeit der Interpolation)</li> <li>• Ausreichende Auflösung und Komplexität des Formteiles</li> <li>• Toleranz des Formteiles: +-0,1mm</li> <li>• Druck- und Temperaturstabilität des Interpolators</li> <li>• Dichtigkeit des Interpolators</li> <li>• Vermeidung von Festkleben des Interpolators an die Stifte oder an das Formteil</li> </ul>	<p>F F F F W W F F</p>

Steuerung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• automatischer Verlauf der Verstellung von Stiften</li> </ul>	<b>F</b>
Ergonomie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übereinstimmung mit vorgeschriebener Mensch-Maschine-Beziehung</li> </ul>	<b>F</b>
Kontrolle	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontrolle der Lage der Stifte nach der Verstellung der ganzen Matrix</li> <li>• Nachmessung der Geometrie des Produktes</li> </ul>	W W
Transport	<ul style="list-style-type: none"> <li>• minimale Handhabungszeiten</li> </ul>	W
Gebrauch	<ul style="list-style-type: none"> <li>• geringer mechanischer Aufwand des Verstellmechanismus</li> <li>• Wiederverwendbarkeit des Interpolators</li> <li>• Möglicher Ansatz von anderen Anwendungen</li> </ul>	W W W
Kosten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• niedrige Material- und Fertigungskosten</li> <li>• preiswerte Konstruktion</li> </ul>	W <b>F</b>

Tabelle 4-2 Anforderungsliste

## 4.2 Funktionsstruktur

Jede Konstruktionsaufgabe ist komplex, und soll nach der Konstruktionsmethodik [45], [46], [47] abstrahiert werden. Die Gesamtfunktion, die in dieser Arbeit die Formflexibilität darstellt, wird in Teilfunktionen, beziehungsweise Elementarfunktionen unterteilt. Die Aufteilung der Funktionen, insbesondere bei sehr komplexen Konstruktionsaufgaben spielt eine wesentliche Rolle in dem Konstruktionsprozess. Jede Elementarfunktion wird einzeln gelöst, ohne Beeinflussung von allgemeinen Zuständen der Gesamtfunktion. Dies ermöglicht eine große Lösungsvielfalt jeder Elementarfunktion.

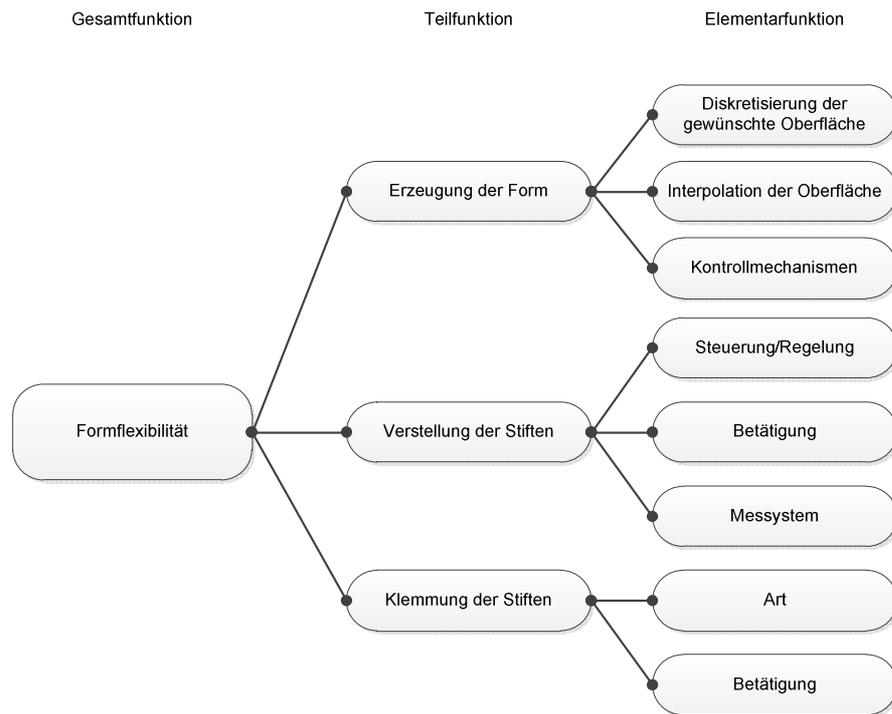


Abb. 4-1 Funktionsstruktur

Das Ziel des Entwurfsprozesses ist ein formverstellbares Werkzeug, das aus einer Matrix von Trägerstößeln besteht. Die Gesamtfunktion des Werkzeugs wird als Formflexibilität bezeichnet. Die Gesamtfunktion wird in Teilfunktionen unterteilt: Erstellung der Form, Verstellung der diskreten Elemente und Klemmung der diskreten Elemente.

### 4.3 Morphologischer Kasten

Es gibt vielen verschiedene Lösungswege zur Entwicklung eines FWs. Auf der Basis der Funktionsstruktur werden mit Berücksichtigung von der Anforderungsliste die Morphologischen Kasten gebaut, wo für jede Elementarfunktion mehrere Lösungen vorgeschlagen werden. Jede Funktion hat eine unterschiedliche Anzahl von Einzellösungen. Die die mit der Anforderungsliste ziemlich übereinstimmen sind mit fetter Schrift geschrieben.

Funktionen			Varianten					
Erzeugung der Form	Diskretization	Querschnitt der Stifte	quadratisch	kreisförmig	kreisförmig mit Gewinde	dreieckig	sechseckig	kombinierte
		Kopfform der Stifte	Art	fest	schwenkbar	auswechselbar		
			Geometrie	rund	flach	abgekantet	konvex	konkav
		Anordnung	undicht	dicht				
		Ausrichtung	quadratisch	trigonal				
	Interpolation	Art	Schicht	Kappe	bearbeitet	gespritzter Schaum	gespritzt + bearbeitet	
		Material	Silikon	Thermoplast	Prepreg	Neopren	Polyurethan	Elvax (ELVA)
		Befestigung	Vakuum	vorformen + klemmung	fest für jeden Stift	ohne		
	Kontrollmechanismen		Ohne	Laser	Tactile	Stereoskopie		
	Klemmung	Art		alle von einer Seite	alle von zwei Seiten	alle durch zwischenwände	alle ringsum	einzel ringsum
Betätigung		mechanisch	Klemmungsschrauben	Legierung	hydraulisch	pneumatisch	keine	
Verstellung	Steuerungssystem		SPS	IPC				
	Betätigung	Reihenfolge	nacheinander	alle Stifte	alle durch Mastermodel			
		Art	Lineartechnik mit Schrittmotor	CNC Maschine	individueller Antrieb	Schrittmotor	roboter	pneumatisch
	Messsystem		magnetisches durch Einstellspitze	magnetisches durch Einstellplatte	keine	Encoder		

Tabelle 4-3 Morphologischer Kasten

Die Lösungen von der Elementarfunktionen sind auf der Grundlage des Standes der Technik und Ideen der Teilnehmer des Projektes entstanden.

- Erzeugung der Form

Eine wichtige Eigenschaft des FWs ist der Querschnitt der Stifte. Woraus geht die mögliche Anordnung und weiter die Klemmungsmethode der Stifte hervor. Die Stiften können eine verschiedene Ausrichtung haben (siehe Abbildung 4-2), unabhängig, ob sie dicht oder undicht angeordnet werden. Die Kopfform kann fest, schwenkbar oder auswechselbar sein, und kann verschiedene Geometrie haben. Die Stifte können auf verschiedene Weise interpoliert werden. Entweder wird das Interpolator erwärmt und an der erzeugten Oberfläche des Werkzeugs vorgeformt (Thermoplast, Prepreg,

Elvax), oder es kann nur angelegt werden (Neopren, Polyurethan). Eine weitere Möglichkeit ist ein Silikon Interpolator der durch Unterdruck befestigt wird. Es wäre optimal, wenn die erzeugte Oberfläche des FWs könnte durch ein Kontrollmechanismus übergeprüft werden. Es gibt mehrere Möglichkeiten wie es gewährleisten.

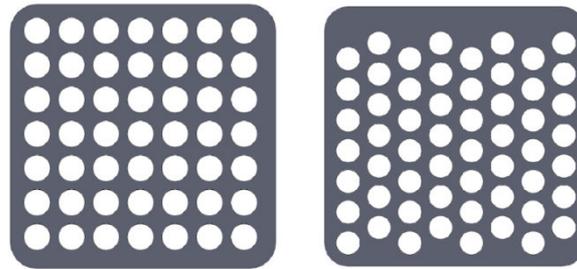


Abb. 4-2 Vergleich der quadratischen und trigonalen Ausrichtung

- Klemmung

Es gibt mehrere Klemmungsmethoden (siehe Tabelle 4-3), abhängig von dem angewendeten Querschnitt und der Anordnung der Stifte. Die Stifte können alle zusammen oder einzeln geklemmt werden. Aber eine Lösung mit Gewindestiften braucht keine Klemmung.

- Verstellung

Die automatische Verstellung besteht von einem Betätigungsmechanismus, einem Messsystem und einem Steuerungssystem. Die Stifte können alle gleichzeitig oder nacheinander verstellt werden. Als Eingebung zu den verschiedenen Betätigungsmethoden (siehe Tabelle 4-3) wurde der Stand der Technik ausgenutzt.

## 4.4 Die Interpolationsmethode

Der Stand der Technik nach gibt es mehrere Möglichkeiten wie die abgestufte Werkzeugoberfläche interpoliert werden kann, abhängig von der Anwendung des Werkzeuges. Die Tabelle 4-2 fasst in der Zeile Interpolation zusammen, die möglichen Arten, Materialien und Befestigungsvarianten des Interpolators. Es wurde eine Silikonschicht gewählt, die mit Vakuum befestigt wird. Von der Auswahl des Interpolators hängt auch die Kopfgestaltung der Stifte ab. Nach *Waltzyk* und *Hard* ist die beste Wahl für die meisten Anwendungen eine runde Kopfform, die den Interpolator nicht beschädigt. Nach den Autoren soll der Radius der Kopf eine Hälfte von der maximalen Entfernung des Querschnitts des Stiftes sein [12]. Eine sehr wichtige Eigenschaft des ganzen Werkzeugs, ist die Fähigkeit des Interpolators sicher und voraussehend die abgestufte Fläche zu interpolieren. An den Interpolationsprozess werden hohe Anforderungen gelegt, weil es die Qualität der erzeugten flexiblen Oberfläche und damit auch des Formteils bestimmt. Die ausgewählten Eigenschaften der Schicht wie Shore-Härte und Stärke zusammen mit der Stiftgeometrie und dem erzeugten Unterdruck soll eine qualitative Interpolation schaffen. Um die gewünschten Eigenschaften der Matte zu präzisieren, wurden von Dr. Hoyer FEM Simulationen an einem nicht von den Stiften unterstützte Silikonschicht durchgeführt. Es wurde die Auslenkung der Silikonmatten, von verschiedener Stärke, unter Belastung von Vakuum simuliert. Es wurde weiter untersucht wie sich die Stärke einer 6 mm dicken, 40 Shore-Härte Schicht unter 300 mbar ändert (Anlage 5). Die Ergebnisse zeigen, dass die 6 mm frei angelegte Silikonschicht ohne Unterstützung von Stiften und vom Unterdruck von 300 mbar, 150 mm tief hingezogen wurde. Die Verjüngung der Schicht war erheblich. In dem niedrigsten Punkt wurde die Matte bis zu 3,8 mm verjüngt.

## 4.5 Lösungsvarianten

Die Morphologischen Kasten dienen als Basis möglicher Lösungen von Elementarfunktionen. Durch die Verbindung von passenden Elementen jeder Zeile, werden die einzelnen Lösungsvarianten gebildet. Die verschiedenen farbigen Linien stellen in der Tabelle 4-4 die einzelnen Lösungsvarianten dar. Das Wirkungsprinzip der sechs Varianten wird in folgenden Abschnitten kurz beschrieben. Die Lösungsvarianten sind bei der Verstell- und Klemmmechanik sehr unterschiedlich, aber dort wo es möglich ist wird die gleiche Interpolationsmethode ausgewählt.

### **Variante 1: Stiftmatrix im Spannrahmen**

Die Matrix besteht aus dicht angeordneten quadratischen 4 mm x 4 mm Stiften. Die Stifte werden mit 1 mm dicken Zwischenwänden verteilt, die den Einfluss von Nachbarstiften beim Verstellen vermeiden. Zwischen den Wänden und den Stiften wird eine bestimmte Reibung erzeugt, die jeden Stift in der gewünschten Lage nach der Verstellung hält. Der Verstellmechanismus entsteht aus einem linearen X-Y-Z Achssystem mit welchem jeder Stift einzeln verstellt werden kann. Nach der Verstellung wird der Druck zwischen den Wänden und den Stiften durch einen Spannrahmen von den Seiten erhöht. Die Oberfläche wird mit einer Silikonmatte interpoliert und mit Vakuum befestigt.

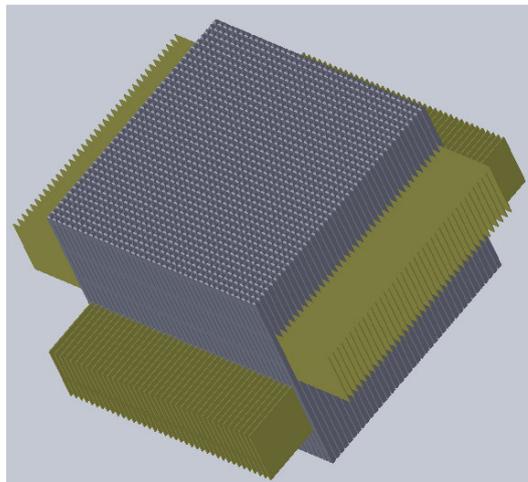


Abb. 4-3 Schematische Darstellung der ersten Lösungsvariante

### **Variante 2: Kombination von einer Verstellmatrix und einer Hauptmatrix**

Das Werkzeug besteht aus einer Verstell- und Hauptmatrix. In der Verstellmatrix werden undicht angeordnete runde Stifte nacheinander verstellt. Die Verstellung kann mit einem X-Y-Z Achssystem Verstellmechanismus oder einer CNC Fräsmaschine durchgeführt werden. Die Stifte haben einen Durchmesser von 3 mm und bleiben nach der Verstellung in der Lage mittels einer Schicht mit einem Reibungselement. Nach dem alle Stifte in der Verstellmatrix verstellt worden sind, wird die Hauptmatrix mit quadratischen 4 mm x 4 mm dicht angeordneten Stiften an die Verstellmatrix gelegt und von der Seite fest geklemmt (siehe Abb. 3.4). Diese Lösung basiert auf dem früher erwähnten FW von *Owodunni O.*, *Rozo J.* und *Hinduja S* [16] in Kapitel 3.1. Wegen der dichten Anordnung der Stifte kann zur Befestigung der Interpolationsschicht kein Vakuum angewendet werden. Ein Thermoplast

wird für Interpolation gewählt, diese Kunststoffschicht wird vor der Verwendung erst erwärmt und an die erzeugte Form des FWs angelegt und dann zugeklemt.

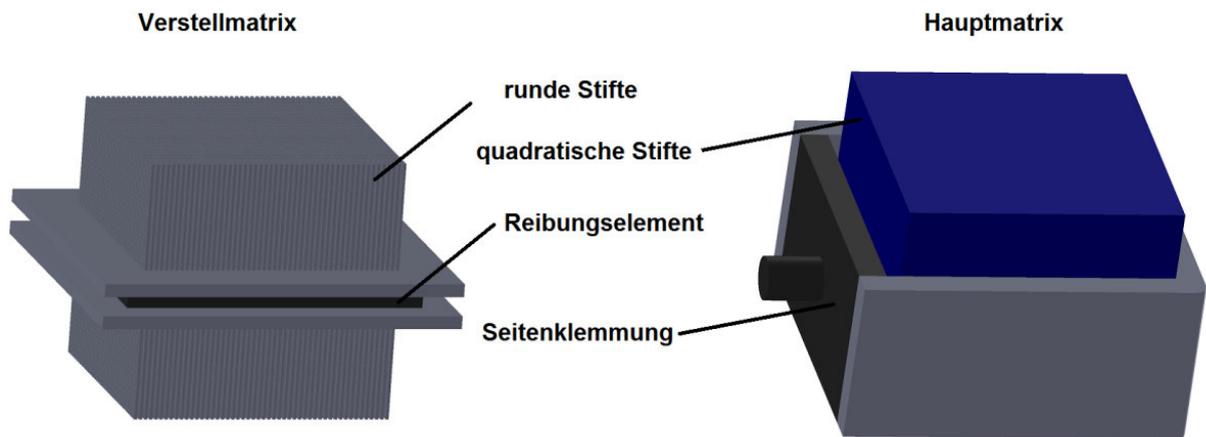


Abb. 4-4 Schematische Darstellung der zweiten Lösungsvariante

### Variante 3: Runde Stahlstifte in einer Mikrokupplungsschicht

Der Matrixträger entsteht aus einer undichten triangulären Anordnung von runden Stahlstiften mit einem Durchmesser von 8 mm. Alle Stifte werden mit ihren dünnen Unterseiten in eine Mikrokupplungsschicht eingesetzt. In dieser Schicht ist jeder Stift von einem Raum umgeben mit einer schmelzbaren Legierung und einem elektrischen Widerstand, der die Legierung schmelzen lässt. Wenn die Legierung um jeden Stift flüssig ist, werden alle Stifte gleichzeitig verstellt. Bevor der Stift die gewünschte Lage erreicht, wird der Widerstand ausgeschaltet, und der Stift wird mit der Legierung fest geklemmt (siehe Abb. 3-7). Dieses Prinzip wurde schon in Kapitel 3.1 erwähnt und stammt von *Benjamin J Peters* [23].

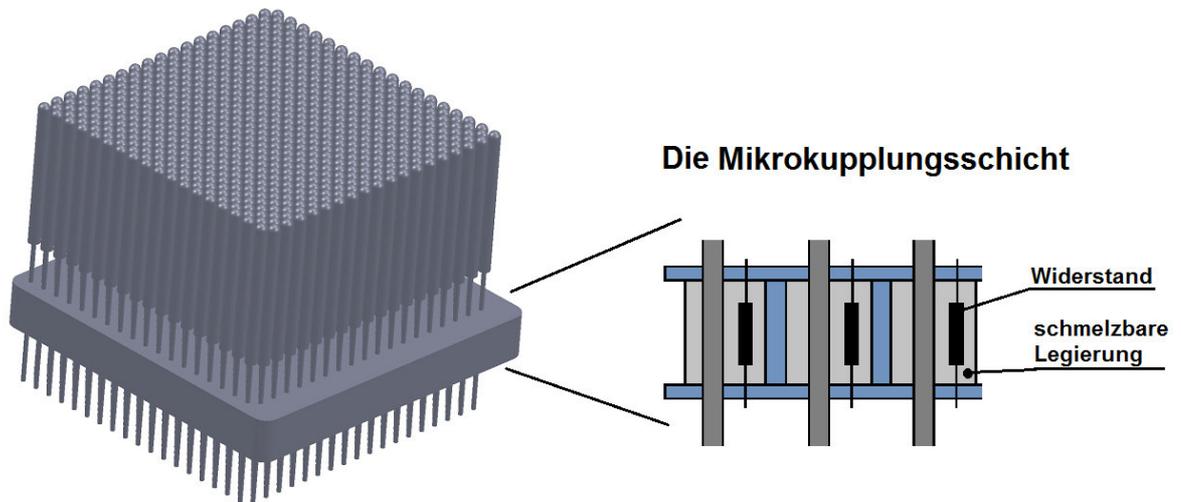


Abb. 4-5 Schematische Darstellung der dritten Lösungsvariante

#### Variante 4: Gewindestiftmatrixträger

In eine Metallplatte werden Gewindestifte in eine quadratische Anordnung eingeschraubt. Die Stifte haben ein Feingewinde M8 mit der Steigung von 1 mm. Die Stifte werden mit einem Vierachsverstellmechanismus verstellt. Die Oberfläche wird mit einem Silikoninterpolator interpoliert und mit Vakuum befestigt.

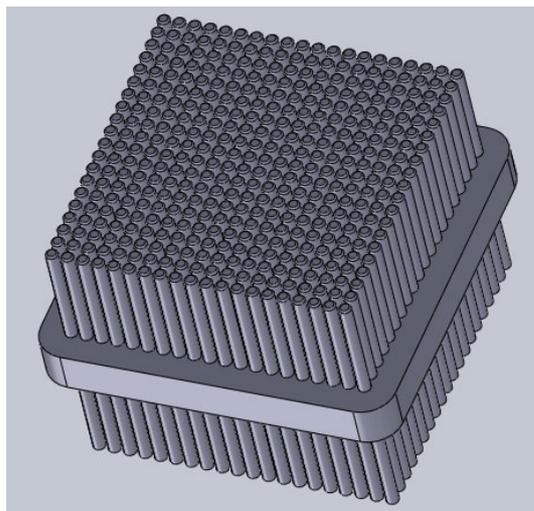


Abb. 4-6 Konzept der vierten Lösungsvariante

### Variante 5: Ein Matrixträger mit einer Legierungsklemmung

Runde Stahlstifte mit einem Durchmesser von 6 mm und einer undichten quadratischen Anordnung werden in eine Reibungsschicht eingelegt und mit einem vier Achsverstellmechanismus verstellt. Der untere Teil des Werkzeugs wurde mit einer schmelzbaren Legierung gefüllt (Abb. 4-4), diese wird bei der Verstellung flüssig. Legierungen wie Wood'sche Legierung oder Fieldsches Metall haben einen sehr niedrigen Schmelzpunkt, der ungefähr bei 60-70 °C liegt. Aus diesem Grund kann zum Schmelzen der Legierung heißes Wasser verwendet werden. Nach der Verstellung wird kaltes Wasser in das System eingelassen und die Legierung wird starr und die Stifte werden fest geklemmt. Zur Interpolation kann, wie bei der vorherigen Variante, Vakuum befestigte Silikonmatte angewendet werden.

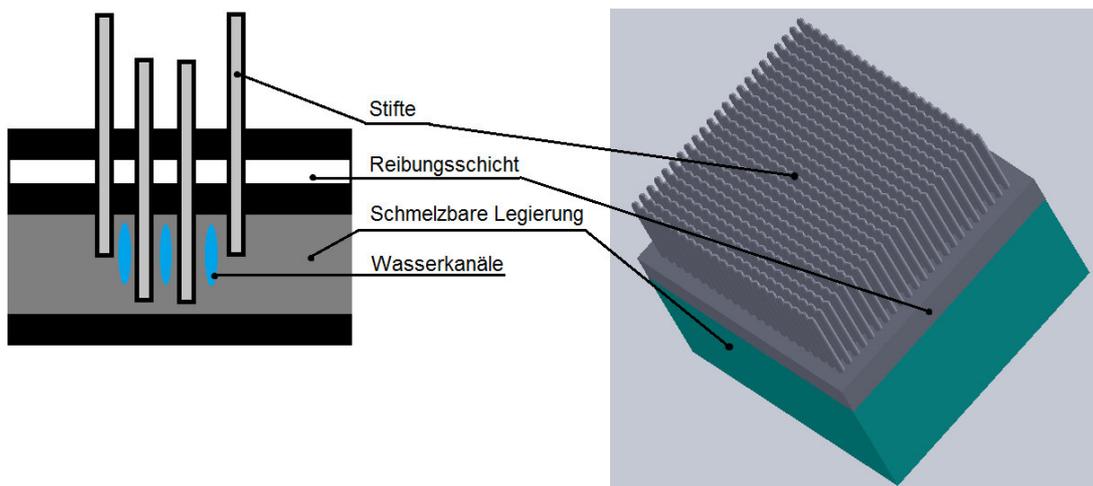


Abb. 4-7 Schematische Darstellung der fünften Lösungsvariante

Funktionen			Varianten						
Erzeugung der Form	Diskretization	Querschnitt der Stifte	quadratisch	kreisförmig	kreisförmig mit Gewinde	dreieckig	sechseckig	kombinierte	
		Kopform der Stifte	Art	fest	schwenkbar	auswechselbar			
			Geometrie	rund	flach	abgekantet	konvex	konkav	
		Anordnung	undicht	dicht					
	Ausrichtung	quadratisch	trigonal						
	Interpolation	Art	Schicht	Kappe	bearbeitet	gespritzter Schaum	gespritzt + bearbeitet		
		Material	Silikon	Thermoplast	Prepreg	Neopren	Polyurethan	Elvax (ELVA)	
		Befestigung	Vakuum	vorformen + Klemmung	fest für jeden Stift	ohne			
	Kontrollmechanismen		Ohne	Leert	Tactile	Stereoskopie			
	Klemmung	Art	alle von einer Seite	alle von zwei Seiten	alle durch Zwischenwände	alle ringsum	einzelns ringsum	keine	
Betätigung		mechanisch	Klemmschrauben	Legierung	hydraulisch	pneumatisch	keine		
Verstellung	Steuerungssystem		SPS	IPC					
	Betätigung	Reihenfolge	nacheinander	alle Stifte	alle durch Mastermodel				
		Art	Lineartechnik mit Schritt Motor	CNC Maschine	individueller Antrieb	Schritt motor	roboter	pneumatisch	
	Messsystem		magnetisches durch Einstell	magnetisches durch	keine	Encoder			
Variante			Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4	Variante 5		

Tabelle 4-4 Morphologischer Kasten mit Lösungsvarianten

### 4.6 Bewertung der Lösungsvarianten

Der Vergleich der Lösungsvarianten wird nach ausgewählten Kriterien durchgeführt. Jedes Kriterium hat eine bestimmte Relevanz, nach der die Gewichtung der Kriterien durchgeführt werden muss. Die einfache Rangfolge von Bewertungskriterien wird nach dem Handbuch für Entwicklung und Konstruktion [47] gemacht. Alle Kriterien werden miteinander der Reihe nach verglichen und es wird immer festgestellt welche der beiden Kriterien wichtiger ist. Das Kriterium das wichtiger ist bekommt eine „1“ und wenn es nicht wichtiger als das andere ist, bekommt es „0“. Die Gewichtung  $g$  der Kriterien ergibt sich von der Summe der „1“. Als der

letzte Schritt wird der Gewichtungsfaktor  $g_k$  berechnet. Die Tabelle 4-4 stellt ein Beispiel wie die Kriterien gewichtet werden dar.

Ist wichtiger als -->	Kriterium 1	Kriterium 2	Kriterium 3	Kriterium 4	Gewichtung $g$	Gewichtungsfaktor $g_k$
Kriterium 1	X	0	0	1	1	16,7
Kriterium 2	1	X	0	0	1	16,7
Kriterium 3	1	1	X	1	3	50,1
Kriterium 4	0	1	0	X	1	16,7

Tabelle 4-5 Beispiel von Gewichtung der Kriterien

- Gewichtung eines "Punkts" : der Gewichtsbeitrag  $g_i$  [47]

$$g_i = \frac{1}{\sum "g"} \times 100 \quad (1)$$

$$g_i = \frac{1}{6} \times 100 \cong 16,7 \%$$

- Gewichtungsfaktor eines Kriteriums  $g_k$  [47]

$$g_k = g_i \times (\text{Anzahl der "Punkte" eines Kriteriums}) \quad (2)$$

Einundzwanzig Kriterien werden in der Anlage 3 ausgewählt und miteinander verglichen. Die Kriterien umfassen die meisten Forderungen von der Anforderungsliste aus dem Kapitel 4.1. Manche Kriterien wie: Durchführbarkeit der gesamten Lösung, Begrenzung des Hubs und andere wurden zu den Bewertungskriterien in die Tabelle 4-5 hinzugefügt. Diese Kriterien sind grau markiert.

<b>Die Kriterien</b>	<b><math>g_k</math></b>
Preis des ganzen Werkzeugs	1,9
Durchführbarkeit der gesamten Lösung	5,24
Durchführbarkeit der Interpolation (glatte Oberfläche des Werkzeugs)	6,19
Wiederverwendbarkeit der Interpolationsmatte	2,38
Dichtheit des Werkzeugs bei RIM Anwendung	2,38
Fest, sicher und stabile Klemmtechnik	7,62
Beständigkeit gegen verschiedenen technologischen Temperaturen	3,33
Größe der Stiften (Auflösung des Matrixträgers)	7,62
Möglicher Ansatz für andere Anwendungen	6,67
Genauigkeit der Stellmechanik	8,1
Begrenzung des Hubs (wegen Verkippung der Stifte)	1,91
Ansprüche für Regelung	1,43
Möglicher Ansatz von Vakuum zur Befestigung des Interpolators	4,76
Ansprüche für Energie	0
Kontrollmöglichkeiten (in-situ, direkte Nachmessung) LASER	5,24
Erzeugung von Linien (Seitensicht + Draufsicht)	6,19
Erzeugung von Radien (Seitensicht + Draufsicht)	5,71
Zeit für den Verstellzyklus eines Stiftes (maximaler Hub)	1,43
Abkühlungsdauer des Werkstücks (RIM, Thermoformen)	3,34
Auflösung und Komplexität des Produkts	9,05
Qualität der Oberfläche (Welligkeit, Details) des Produkts	9,52

Tabelle 4-6 Die Bewertungskriterien und ihr Gewichtungsfaktor  $g_k$

Die Lösungsvarianten werden für jedes Kriterium nach der VDI 2225 bewertet. Die Bewertungspunkte von der Tabelle 4-6 werden mit dem Gewichtungsfaktor  $g_k$  von einzelnen Kriterien multipliziert. Die Summen von den gewichteten Bewertungspunkten wurden für jede Lösungsvariante in der Anlage 3 berechnet. Die Summe zeigt, welche Lösung den Kriterien und damit auch den Anforderungen am besten entspricht. Aufgrund so erhaltener Bewertungen wird die Lösung mit den besten Eigenschaften ausgewählt.

Wertskala			
Nutzwertanalyse		Richtlinie VDI 2225	
Pkt.	Bedeutung	Pkt.	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung	0	unbefriedigend
1	sehr mangelhafte Lösung	1	gerade noch tragbar
2	schwache Lösung		
3	tragbare Lösung		
4	ausreichende Lösung	2	ausreichend
5	befriedigende Lösung		
6	gute Lösung mit geringen Mängeln	3	gut
7	gute Lösung		
8	sehr gute Lösung	4	sehr gut (ideal)
9	über die Zielvorstellung hinausgehende Lösung		
10	Ideallösung		

Tabelle 4-7 Wertskala zur Bewertung von Lösungsvarianten [46]

In dem nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Bewertung beschrieben. Die Entwicklungshindernisse des funktionsfähigen FW werden zusammen mit den wesentlichen Nach- und Vorteilen beschrieben. Die Tabelle 4-7 stellt die Bewertungsergebnisse von Anlage 3 dar.

Variante	Summe der gewichteten Punkte	Reihenfolge
Variante 1	239	3
Variante 2	233	4
Variante 3	228	5
Variante 4	251	1
Variante 5	240	2

Tabelle 4-8 Das Ergebnis der systematischen Bewertung

Die Bewertung von den fünf ausgewählten Varianten zeigt, dass die wenigsten geeignete Lösung die dritte Variante mit der Mikrokupplungsschicht ist. Der größte Nachteil dieser Lösung ist die problematische Entwicklung der Mikrokupplungsschicht. Diese Variante wäre teuer zu entwickeln und ein Ergebnis wäre unwahrscheinlich. Jeder einzeln geregelte Stift braucht einen elektrischen Widerstand mit einer Leitung die isoliert werden muss. Wegen

einer großen Anzahl von Stiften wird viel Wärme erzeugt und das kann die Regelung von Widerständen beeinflussen. Der Vorteil der Verwendung von einer Mikrokupplungsschicht ist die feste Klemmung und die schnelle synchrone Verstellung von allen Stiften.

Die nächste in der Reihenfolge ist die zweite Lösungsvariante, bei der die größten Nachteile mit dem Verstell/Hauptmatrix System auftreten. Die Genauigkeit der Verstellmatrix ist wegen der Reibungsschicht unsicher. Die Reibung zwischen den Stiften und dem Reibungselement muss groß genug sein, um dem Gewicht der Hauptmatrix ohne Verschiebung zu widerstehen. Eine genaue Verstellung muss ohne Stick-Slip-Effekt möglich sein. Die Entwicklung einer solchen Reibungsschicht, die den Anforderungen entspricht ist realisierbar, aber problematisch. Wegen der dichten Anordnung der Hauptmatrix wäre der Ansatz von der gewünschten Interpolationsmethode nicht möglich. Zu den Vorteilen gehören ein niedriger Preis des ganzen Systems, eine sehr gute Auflösung und eine feste Klemmung des FWs.

Bei der Entwicklung der ersten Variante, der Stiftmatrix im Spannrahmen treten wieder die Probleme mit der Reibung auf. Der Druck auf die Stifte durch den Spannrahmen und durch die Zwischenwände muss gesteuert werden. Das größte Problem wäre die Herstellung von 1600 Stiften mit einer sehr genauen Fertigungstoleranz. Manche Stifte können bei der Verstellung ausfallen und andere können zwischen den Wänden festgeklemmt werden. Die Vorteile dieser Lösung sind, eine sehr gute Auflösung, und eine einfache Konstruktion.

Die fünfte Variante, der Matrixträger mit einer Legierungsklemmung bekam nur um einen Punkt mehr als die vorherige Variante mit den Zwischenwänden, aber sie sind sehr unterschiedlich. In diesem Fall würde das Hauptproblem am Klemmmechanismus, der durch schmelzbare Legierung realisiert ist, liegen. Dazu ist noch eine Reibungsschicht nötig, die die Stifte nach der Verstellung hält. Das Werkzeug hat eine ausreichende Auflösung und eine sehr feste Klemmung.

Das beste Bewertungsergebnis bekam die vierte Lösungsvariante mit Gewindestiften. Es gibt mehrere Gründe dafür: sehr gute Genauigkeit und Festigkeit des FWs in Kombination mit einer einfachen problemlosen Konstruktion. Zu den Nachteilen im Vergleich mit den vorherigen Varianten, zählt die Größe der Stifte mit den Abständen und damit ein wenig schlechteren Auflösung und Komplexität des finalen Produktes. Diese Eigenschaften sind aber für ein Prototypenwerkzeug genügend. Es wird weiter angenommen, dass der mit Vakuum befestigte Silikoninterpolator eine hochwertige Interpolation mit einer glatten Oberfläche gewährleistet. Der Punktevorsprung vor der zweiten besten Variante zeigt

deutlich, dass diese Lösung des FWs die Anforderungen und Kriterien am besten erfüllt. Deshalb wird die vierte Variante als Vorzugsvariante gewählt und weiter detailliert.

## 5 Konstruktive Gestaltung der Vorzugsvariante

Die optimale Lösungsvariante des Matrixträgers wird in diesem Kapitel konstruktiv dargestellt. Nach der konstruktiven Gestaltung des Matrixträgers wird das vollständige flexible RIM Werkzeugsystem vorgestellt. Voraussichtliche Eigenschaften bei der Benutzung des Matrixträgers werden identifiziert und die entsprechenden konstruktiven Maßnahmen vorgeschlagen.

### 5.1 Der Gewindestift- Matrixträger

Der Matrixträger besteht aus einer Aluminiumplatte und Gewindestiften mit denen die flexible Form erstellt wird. Wenngleich im Kapitel 4.4 eine runde Kopfgeometrie als die beste festgestellt wurde, wird in dieser Konstruktion eine andere Kopfgeometrie genutzt. Der Grund dafür ist, dass nur die Gewindestifte mit abgekanteten Köpfen zur Verfügung standen. Aufgrund der voraussichtlichen Eigenschaften, könnten die Kopfformen der Stifte zusätzlich rund gedreht werden. Die bevorstehenden Versuche werden diese Annahme bestätigen.

- Die Grundplatte

Die quadratische 230 mm x 230 mm Aluminiumplatte mit der Stärke von 30 mm hat eine Arbeitsfläche von 200 mm x 200 mm. Die Grundplatte hat 400 Innengewinde M8 mit 1 mm Steigung. Der Abstand der Löcher ist 10 mm von einander entfernt. Die Ecken haben einen Radius von 20 mm und die Außenkanten haben eine Fase von 1 mm x 45°. Die Platte wird mit der Allgemeintoleranz ISO 2768 gefertigt.

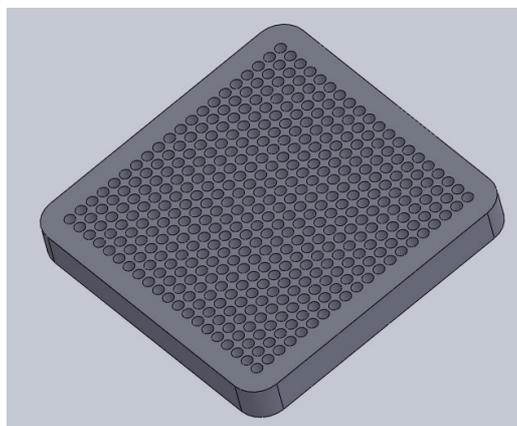


Abb. 5-1 Modell der Grundplatte

- Die Stifte

Die runden 180 mm langen Gewindestifte sind aus Stahl hergestellt mit einem Außengewinde M8 mit einer Steigung von 1 mm. Die Kopfform hat an der Oberkante eine Fase von 1,25 mm x 45°. An der Unterseite ist ein verjüngendes Sechskantloch für ein 4 mm Steckschlüssel, mit welchem die Stifte mittels des Verstellmechanismus ein – oder ausgeschraubt werden können.

## 5.2 Voraussichtliches Verhalten des Matrixträgers beim RIM Verfahren

### 5.2.1 Eingliederung des Matrixträgers

Bevor der Matrixträger benutzt werden kann, muss die gewünschte Kontur erstellt werden. Der Matrixträger selbst umfasst die Stelleinheit nicht. Aus diesem Grund wird der Matrixträger erst an den Verstellmechanismus angelegt und dort werden die Stifte einer nach dem anderen aus- oder eingeschraubt.

Die Abb. 5.2 stellt den Verstellmechanismus dar. Der Verstellmechanismus besteht aus einem Gestell, an welchem ein Zwei-Achsen Linearvorschub befestigt wird. Jede Achse wird durch ein Servomotor individuell angetrieben. Das Linearsystem dient zur Bewegung eines Rahmens, das die Verstellung des festliegenden Matrixträgers gewährleistet. Dieser rechteckige Rahmen hält an der oberen Seite einen pneumatischen Vorschub, an dem ein Schrauber befestigt wird. Der Schrauber wird von einem Schrittmotor angetrieben und durch den pneumatischen Vorschub senkrecht verschiebbar. An der unteren Seite des Rahmens unter dem Matrixträger wird ein pneumatischer Zylinder befestigt. Der pneumatische Zylinder gibt die Information über die Lage des Stiftes mittels eines magnetischen Messsystems an. Der senkrecht verschiebbare Schrauber ändert die Lage des Stifts durch Ein- oder Ausschrauben anhand der Angabe des Messsystems. Die Höhe der Stifte wird in den CSV (comma separated values) Datenformat für jeden Stift angegeben. Die Lage der einzelnen Stifte werden aufgrund der gewünschten Form berechnet und in das CSV Format exportiert. Die Daten werden dann in das Steuerungssystem des Verstellmechanismus gespeichert und die ganze Form wird verstellt. Dieser Verlauf ist aber nur vorläufig und nur für die ersten Versuche geeignet ist. Es soll ein neuer innovativer Stellalgorithmus entwickelt werden. Die

optimalen Lagen der Stifte sollen automatisch aus den CAD Daten des Formteiles und den Eigenschaften des Interpolators berechnet werden.

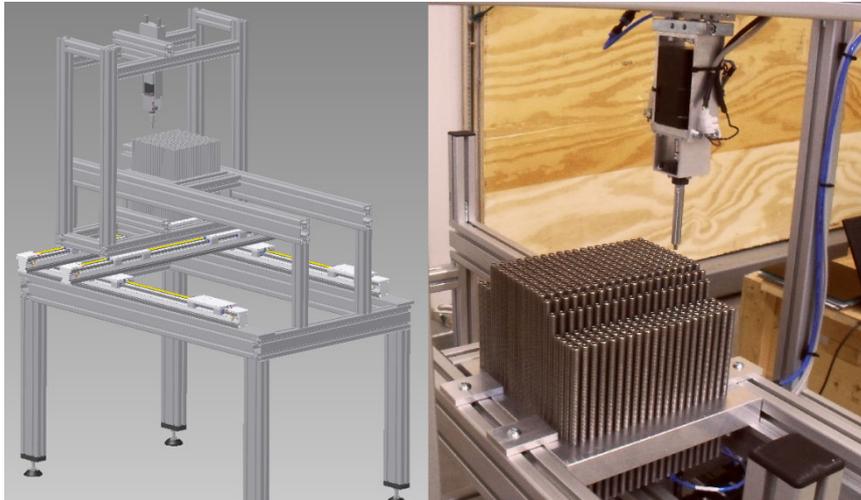


Abb. 5-2 Der Verstellmechanismus

Nach der Verstellung von allen 400 Gewindestiften wird der Matrixträger in das RIM Werkzeug hineingelegt (Abbildung 5.3). Die Grundplatte des Matrixträgers mit den verstellten Stiften wird in den Werkzeuggrundkörper an den Auflagerahmen angelegt und mit dem Spanrahmen befestigt. Auf der Abbildung 5.3 ist die violette Grundplatte des Matrixträgers ohne Stiften abgebildet. Nach der Verspannung des Matrixträgers wird der Auflagerahmen für die Interpolationsmatte aus Silikon in den Grundkörper eingelegt. An diesen Rahmen wird die Interpolationsmatte durch das Spannelement verspannt. Erst danach kann das Oberwerkzeug, das durch zwei Positionierkalotten zentriert wird, angelegt werden. Zur Befestigung der elastischen Interpolationsmatte wurde Vakuum von dem unteren Teil des Werkzeuggrundkörpers durch Fugen zugeführt. Das Bild der RIM Werkzeuges ist nur ein vorläufiger Vorschlag des Werkzeuges, der noch präzisiert und hergestellt werden muss. Für die Vorversuche wird nur ein Werkzeug verwendet werden. Dazu wird ein ausgefräster Gegenkörper für jede Form hergestellt, um die Entwicklungskosten herabzusetzen.

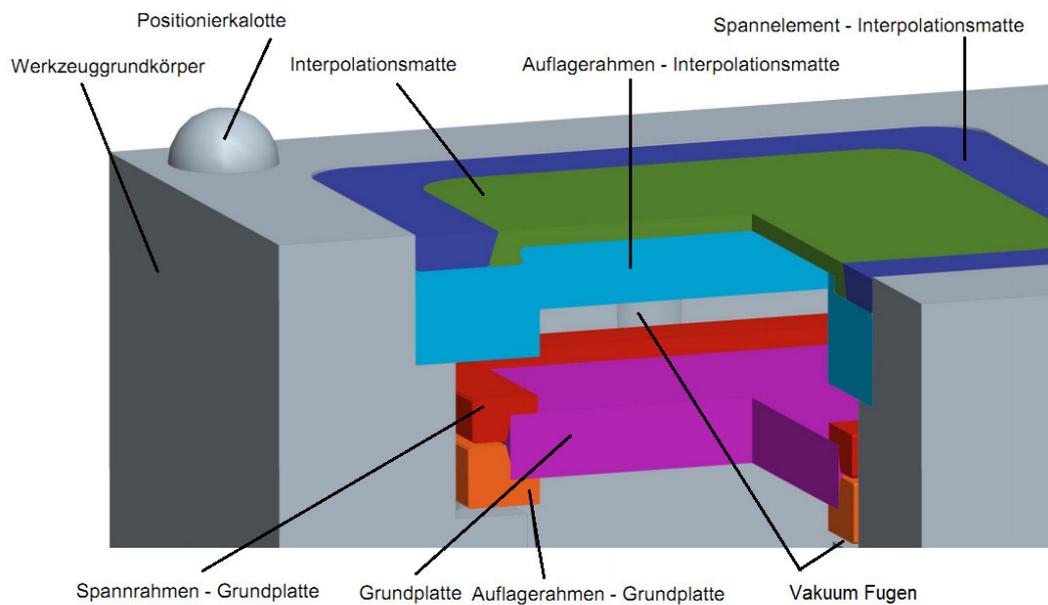


Abb. 5-3 Eingliederung des Matrixträgers in das RIM Werkzeug

### 5.2.2 Belastung des Matrixträgers

Die Grundplatte wird an der Arbeitsfläche 200 mm x 200 mm von dem Gewicht der 400 Stifte, von dem Prozessdruck und von dem Unterdruck belastet. Um die gewünschte Genauigkeit des Endprodukts zu erreichen ist es nötig, dass die Grundplatte der Belastung ohne wesentliche Durchbiegung widersteht.

- Der erzeugte Druck an der Grundplatte aus dem Gewicht der Stiften

Das Gewicht eines Stiftes:  $m_S \cong 0,07 \text{ kg}$

Die Arbeitsfläche:  $S_A = 0,23 \times 0,23 = 0,0529 \text{ m}^2$  (3)

Der Druck:  $p_S = \frac{g \times [n_S \times m_S]}{S_A} = \frac{9,81 \times [400 \times 0,07]}{0,23^2} \cong 5 \text{ 192 Pa}$  (4)

- Der erzeugte Druck an der Grundplatte von der Vakuumbefestigung

Das Vakuum kann bis zu 500 mbar hoch sein

*Maximaler Unterdruck:*  $p_V = 500 \text{ mbar} = 50\,000 \text{ Pa}$

- Prozessdruck

Der Prozessdruck des RIM Verfahrens bewegt sich zwischen 3 und 5 bar

*Maximaler Prozessdruck:*  $p_P = 5 \text{ bar} = 500\,000 \text{ Pa}$

- Der Gesamte maximale Kraft an der Grundplatte

$$F_M = (p_S + p_V + p_P) \times S_A = 555192 \times 0,0529 \cong 29\,370 \text{ N} \quad (5)$$

- Maximale Kraft an einem Stift

$$F_S = \frac{F_M}{n} = 73 \text{ N} \quad (6)$$

Obwohl das gesamte Gewicht der Grundplatte mit 400 Stiften ungefähr 30 kg ist, spielt es für die Gesamtbelastung keine wesentliche Rolle. Die größten Anforderungen an die Grundplatte kommen durch den Prozessdruck, der die Höhe von verstellten Stiften durch Biegung der Platte beeinflussen kann. Aus diesem Grund wurde von Dr. Klaus Hoyer von dem ICM eine FEM (Fine Element Methode) Simulation der belasteten Grundplatte durchgeführt. In der Modellsituation wurde die Grundplatte mit 5 bar belastet und die Verformungen und Spannungswerte wurden berechnet. Die Ergebnisse zeigen (siehe Anlage 4), dass die maximale Verformung an einer Aluminiumplatte mit der Stärke von 28 mm nur 63  $\mu\text{m}$  ist. Der maximale Wert von der Spannung in dem Material erreicht 30  $\text{N}/\text{mm}^2$ . Der Wert von der Verformung ist akzeptierbar, und könnte theoretisch mit der Einstellung von den Stiften eliminiert werden. Der Maximalspannungswert ist im Vergleich mit der Streckgrenze für Aluminium unkritisch.

### 5.2.3 Wirkstelle des Matrixträgers zur Interpolationsmatte

Die interpolierte Werkzeugoberfläche soll glatt ohne Wellen wegen der Stiftabstände sein. Das Formteil soll keine Defekte haben, da diese zu einer schlechten Interpolation führen. Die Kombination von abgekanteten runden Stiften mit einem geeigneten Unterdruck, einer Stärke und einer Shore-Härte der Matte wird für flächige unkomplizierte Teile ausreichen. In diesem Fall werden die Stifte, die nebeneinander stehen, geringe Unterschiede in der Höhe haben, und dadurch auch eine problemlose Interpolation gewährleisten. Die Verjüngung der Matte wird nicht zu groß sein und auch die Möglichkeit der Beschädigung der Interpolationsmatte an den Kanten der Stiffase ist reduziert.

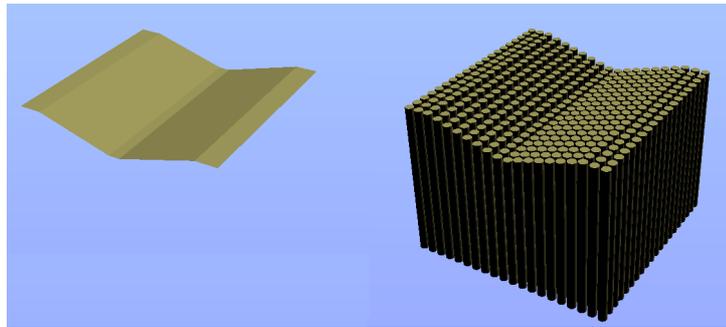


Abb. 5-4 Eine einfache Form mit geringen Stifthöhenunterschiede

In den Fällen mit großen Höhenunterschieden bei benachbarten Stiften können mit der Interpolation Probleme entstehen. Das heißt eine schlechte Interpolation mit Abdrücken der Stifte am Formteil wegen der Verjüngung der Matte und auch Beschädigung der Matte durch die nicht ideale Kopfgestaltung. Mit der großen Verspannung gegen die scharfen Kanten an den Stiften kann die Matte beschädigt werden, und damit die Wiederverwendbarkeit der Interpolationsmatte reduziert werden. Ein Extremfall wäre das Zerreißen der Interpolationsschicht. In diesem Fall würde sich der ganze Innenraum des Werkzeugs mit dem RIM Gemisch füllen. Dieser Unfall muss unbedingt vermieden werden.

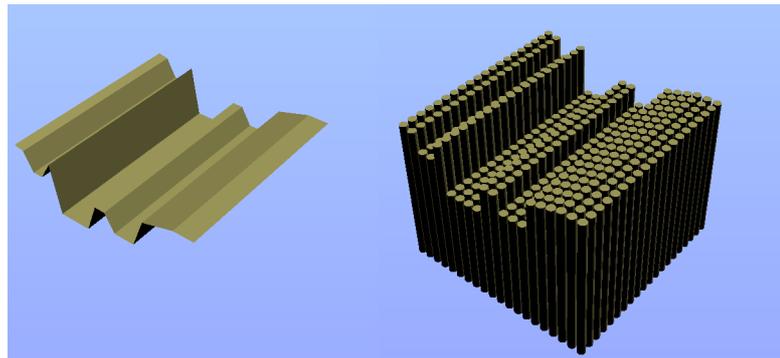


Abb. 5-5 Eine Form mit großen Stifthöhenunterschieden

#### 5.2.4 Verstellung der Stifte

- Grundstellung der Stifte

Die Verstellmechanik ist durch den Hub des magnetischen Messsystem begrenzt. Die Grundstellung ist in der Mitte des 50 mm Hubs. Von der Grundstellung haben die Stifte in beide Richtungen 25 mm Hub zur Verfügung. Die Minimalstellung wird in der Höhe 2 mm von der Grundplatte festgestellt.

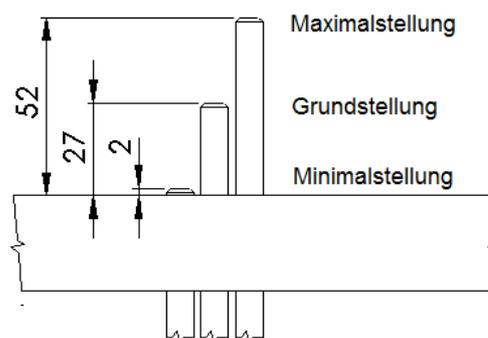


Abb. 5-6 Stellung der Stifte

- Verkippung der Stifte

Der Matrixträger, beziehungsweise die Stifte werden verschiedenes Spiel der Lage in horizontaler Richtung haben. Es gibt ein Spiel zwischen dem Gewinde an den Stiften und

dem Gewinde in der Platte. Mit der Höhe der Lage der Stifte erhöht sich auch die Verkippung der Stifte (Abb. 5-7).

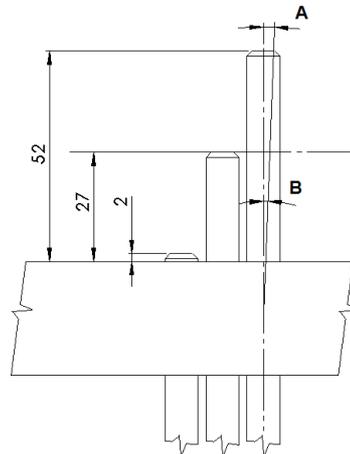


Abb. 5-7 Verkippung der Stifte

Dank des kleinen Hubs wird auch die Verkippung voraussichtlich relativ klein. Die Verkippung wird in Kapitel 6.1 Mess-Vorversuche gemessen und Einfluss auf das Endprodukt geschätzt.

- Der Kontakt zwischen den Stiften und der Grundplatte

Wegen der Auswahl einer Aluminiumplatte und den Stahlgewindestiften ist der Verschleiß der Grundplatte vorausgesetzt. Die Aluminiumplatte wird bei den harten Gewindestiften abgeschliffen. Das Spiel zwischen der Grundplatte und den Stiften vergrößert sich mit dem Wiedereinstellen der Stifte, und das kann die Genauigkeit des Formteils beeinflussen.

- Der Kontakt zwischen den Stiften und der Schrauber

Der Schrauber mit dem Steckschlüssel muss immer das Sechskantloch des Stiftes finden. Der Schrauber schraubt abwechselnd links und rechts, bis das Messsystem eine Änderung in der Position erfasst. Um der Verschleiß des Sechskantloch zu reduzieren, wurde der Steckschlüssel aus üblicher Stahl ausgefräst. Das heißt von einem weicheren Material als die Stifte. Dann wird der Verschleiß der Steckschlüssel angenommen, nicht der Stifte.

### 5.2.5 Gebrauch des Matrixträgers

Wie es schon in Kapitel 5.2.1 erwähnt wurde, muss der Matrixträger immer versetzt werden, wenn die Form geändert werden soll. Der 30 kg wiegende Matrixträger muss von dem Werkzeug zum Verstellmechanismus und zurück transportiert werden. Der Matrixträger muss genau und vorsichtig an den Auflagerahmen in das Werkzeug oder auf den Verstellmechanismus angelegt und geklemmt werden.

### 5.2.6 Fazit

Die verschiedenen Eigenschaften bei Verwendung des Matrixträgers, die die Eigenschaften des Formteiles beeinflussen könnten werden in Tabelle 5-1 zusammengefasst. Die Einflussfaktoren werden in kleine (K) und große (G) Auswirkungen gegliedert.

Vorraussichtliche Verhalten	Einfluss durch	
Durchbiegung der Grundplatte	Prozessparametern	K
	Stärke der Platte	G
	Material der Platte	G
Wirkstelle des Matrixträgers zum Interpolationsmatte	Typ von Interpolator	G
	Kopfgestaltung	G
	Prozessparametern	G
Verstellung	Hub der Stiften	K
	Verkippung der Stiften	K

Tabelle 5-1 Einflussfaktoren auf die Formteile

Wie es schon erwähnt wurde, die Durchbiegung der Grundplatte könnte mit der Einstellung der Stifte kompensiert werden. Die übrig gebliebenen Eigenschaften mit einer großen Auswirkung auf das Ergebnis, ist die Interpolation der abgestuften Oberfläche. Aus diesem Grund muss diesem Thema in diesem Projekt weiter große Beachtung gewidmet werden.

## 5.3 Konstruktive Maßnahmen zum RIM Matrixträger

In diesem Kapitel werden konstruktive Maßnahmen vorgeschlagen. Die Maßnahmen sollen die ungünstigen Zustände des FWs, die in dem vorherigen Kapitel erwähnt wurden, eliminiert oder reduziert werden.

### 5.3.1 Maßnahmen gegen die ungünstige Wirkstelle des Matrixträgers an die Interpolationsmatte

Es gibt zwei Möglichkeiten die erzeugte Oberfläche zusammen mit der Wiederverwendbarkeit der Interpolationsmatte zu verbessern. Entweder muss die Materialauswahl des Interpolators oder die Kopfgestaltung geändert werden. Wie schon erwähnt wurde, es gibt viele Möglichkeiten wie die Interpolation zu erreichen ist. Für dieses Projekt wurde Silikon gewählt und von der aktuellen Sicht des Projektes wird dieses Material nicht geändert. Die abgekantete Kopfform kann zusätzlich gedreht sein, um die scharfen Kanten an den Köpfen zu beseitigen. Entweder kann die 1,25 mm x 45° Fase mit einem 2 mm Radius ersetzt werden, oder der Kopf wird rund gedreht. Die Kopfform kann auch aus zwei verschiedenen Radien entstehen (Abb. 5.8).

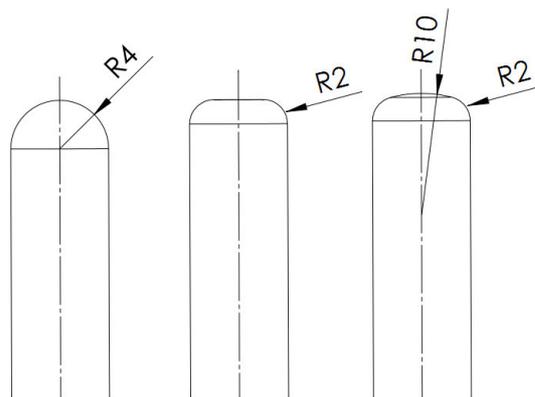


Abb. 5-8 Mögliche Kopfgestaltungen

Die günstigste der drei Varianten ist der runde Kopf mit einem Radius der die Hälfte des Durchmessers des Stiftes ist. Die Interpolationsmatte hat dann mit dem Kopf in allen Fällen einen tangentialen Kontakt. Das heißt, das Verhalten des Kontakts zwischen der Kopfform

und der Interpolationsmatte ist in allen Fällen gleich. Das hilft zur Vorhersagbarkeit des Interpolationsprozesses und damit auch der Qualität der Interpolation und des Endprodukts. Die zwei übrigen Kopfgeometrien könnten für flächige unkomplizierte Teile geeignet sein. Die Flächen an den Köpfen helfen zu einer besseren Unterstützung der Interpolationsmatte. Für flächige Teile wäre auch der Ansatz von Schwenkköpfen möglich (Abb. 5-9).

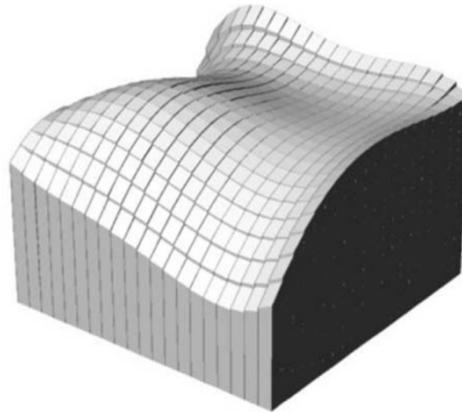


Abb. 5-9 Erzeugte Form mit Schwenkköpfen

### 5.3.2 Maßnahmen zum Verstellen der Stifte

- Hub des Verstellmechanismus

Der Hub ist wegen dem Messsystems auf 50 mm begrenzt, d.h. dass die ganze Länge von den Stiften nicht ausgenutzt werden kann. Die Stifte ermöglichen einen Hub bis zu 150 mm. Mit relativ kleinen Änderungen an dem Verstellmechanismus und dem Ersetzung des Messsystems könnte der Hub vergrößert werden.

- Verkippung der Stifte

Die Größe der Abweichung wird in dem Kapitel 6 beschrieben. Falls die Abweichung für die Thermoformung oder für das RIM Verfahren kritisch wäre, müssten dann geeignete Maßnahmen angesetzt werden. Je stärker die Grundplatte ist, desto niedriger auch die Verkippung. Eine neue stärkere Grundplatte mit 400 Gewindestiften wäre zu teuer, und löst das Problem nicht völlig. Die Vergrößerung der Höhe der Grundplatte kann mit einer von oben geklemmten elastomeren Schicht realisiert werden (Abb. 5-10). Der von oben geklemmte Elastomer hält die Stifte fest ohne beträchtliche Änderungen in der Konstruktion des RIM Werkzeugs zu erzeugen.

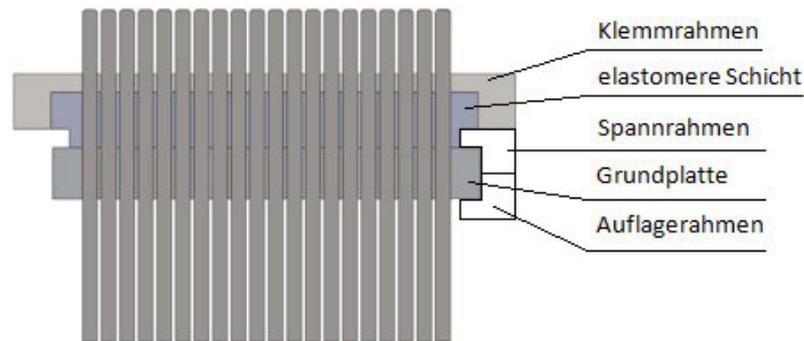


Abb. 5-10 Ein Beispiel zur Vermeidung vom Verkipfung der Stifte

Der zweite Vorschlag zum Reduzieren der Verkipfung von Stiften, sind zwei dünne Schichten mit Löchern für die Stifte. Die Schichten werden an die Grundplatte angelegt und in zwei senkrechte Richtungen verspannt. Es bietet sich auch eine alternative Möglichkeit. In diesem Fall wird der untere Teil des RIM Werkzeuggrundkörpers mit einer Nicht-newton'schen Flüssigkeit gefüllt und angeregt und dadurch werden die Stifte geklemmt. Diese Lösung von der Klemmung scheint schwer durchführbar zu sein, wegen des notwendigen Erregers, der die Flüssigkeit fest macht.

- Der Kontakt zwischen den Stiften und der Grundplatte

Der voraussetzende Verschleiß der Grundplatte kann mit verschiedenen Maßnahmen erniedrigt werden. Die Stifte können mit einem Schmierstoff geschmiert werden. Das RIM Gemisch kann bis 90 °C heiß sein und dadurch wird auch das ganze Werkzeug erwärmt. Aus diesem Grund muss ein temperaturbeständiger Schmierstoff genutzt werden. Es gibt noch die Möglichkeit der Ersetzung der Aluminiumplatte durch ein härteres Material, das besser dem Kontakt mit den Stahlstiften widerstehen kann. Es kann zum Beispiel eine Platte aus Stahl, Kupfer oder einer Kupfer-Legierung sein.

### 5.3.3 Maßnahmen zum Gebrauch des Matrixträgers

Zu dem Matrixträger muss zusätzlich ein Rahmen zum Ergreifen des Matrixträgers hergestellt werden. Der Rahmen wird nach der Verstellung der Stifte in die Grundplatte eingeschraubt. Erst dann kann der Matrixträger sicher und genau in das RIM Werkzeug eingelegt werden. Der Rahmen kann Handgriffe haben, mit denen der Matrixträger von zwei Arbeitern umgestellt werden kann. Oder der Rahmen kann Haken haben, und der Matrixträger kann dann mit einem Hebezeug umgestellt werden.

## 5.4 Ausblick

Die oben beschriebenen ungünstigen Zustände des Matrixträgers bei RIM Verfahren müssen erst praktisch überprüft werden. Erst dann könnten die vorgeschlagenen Maßnahmen eingeführt werden. Die voraussichtlichen Eigenschaften des Matrixträgers bei Thermoformen sind im Prinzip fast gleich, nur die erzeugte Belastung an die Stifte wird viel kleiner sein. Der Einfluss der ungünstigen Kopfgestaltung an den Prozess von Thermoformen wurde in Kapitel 6 erstellt.

## 6 Versuchsdurchführung und Evaluierung

### 6.1 Mess - Vorversuche

Bevor die Fähigkeiten des flexiblen Werkzeuges erstellt werden können, muss der Verstellmechanismus von der Abbildung 6-1 getestet werden. Genauigkeit des Messsystems, und des Verstellmechanismus wird dadurch bestimmt. Die Zeitanprüche zum Umstellen der ganzen Matrix werden bestimmt. Weiter wird die Neigung der Stifte gemessen, und der Einfluss auf die Genauigkeit der Formteile abgeschätzt.

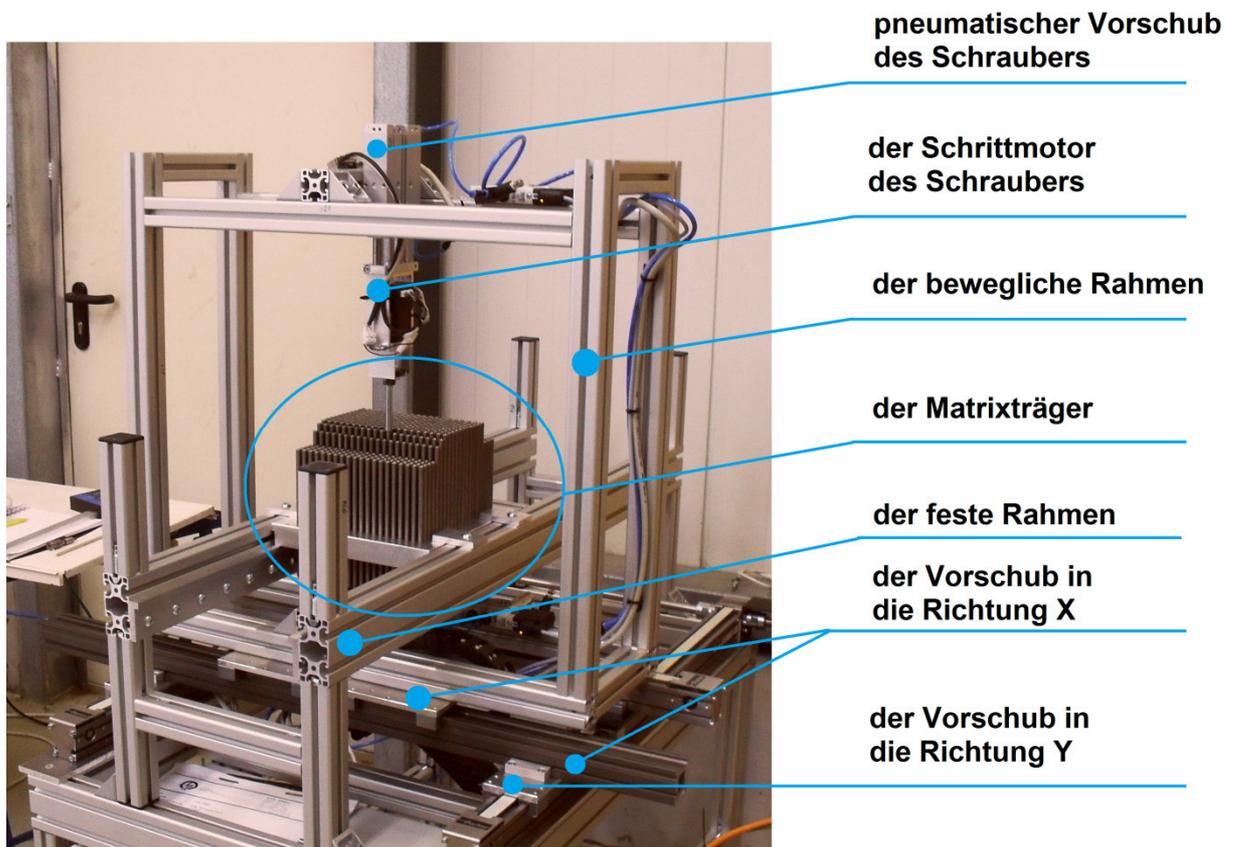


Abb. 6-1 Der Verstellmechanismus mit Beschriftungen

### 6.1.1 Bestätigung der Genauigkeit des Verstellmechanismus

- Genauigkeit des Messsystems

Wie es vorher erwähnt wurde, das Messsystem besteht aus einem pneumatisch angetriebenen Zylinder, dessen Lage mit einem magnetischen Messsystem bestimmt wird. Die Höhe wird an der Arbeitsfläche des Matrixträgers von unten gemessen und von oben wird jeder Stift verschraubt. Der Messhub und damit auch der Hub der Stifte ist 50 mm. Drei unterschiedliche Höhen von einem Gewindestift werden in der vertikalen Richtung zwanzigmal gemessen (siehe Anlage 6). Die Ergebnisse zeigen, dass der Ansatz von solchen Messsystemen ausreichend ist, denn die Toleranz der RIM Formteile soll im Bereich von einem Zehntelmillimeter sein. Die Standardabweichung des Messsystems ist viel kleiner und damit auch der Einfluss auf die Genauigkeit des Endprodukts.



Abb. 6-2 Das Messsystem

- Genauigkeit der Verstellung

Der nächste logische Schritt ist die Überprüfung der Genauigkeit der Verstellung der Stifte. Es wurden fünf verschiedene Höhen der Stifte wiederholt an dem Matrixträger angestellt und dann mit dem Messsystem noch überprüft (siehe Anlage 6). Die Ergebnisse zeigen, dass die Höhe der Stifte relativ große Höheunterschiede im Vergleich mit den Sollwerten haben. Die Wiederholbarkeit der Höhen der Stifte ist auch nicht optimal. Die Genauigkeit und Wiederholbarkeit der Verstellung wurde als ausreichend für die Thermoformversuche festgestellt. Aber bevor die RIM Versuche durchgeführt werden können, muss die Genauigkeit verbessert werden, wegen der Genauigkeitsanforderungen an die Gussteile.

### 6.1.2 Bestimmung der Verstellzeiten

Das Ziel der Entwicklung eines formflexiblen Werkzeugs ist nicht nur Geld für die Bearbeitung einer Form zu sparen sondern auch die Zeit zu sparen. Die vierhundert Stifte werden einer nach dem anderen verstellt, was relativ lange dauern kann. Die Verstellzeiten sind von der Geometrie der vorherigen und der neuen Form abhängig, beziehungsweise dem Höheunterschied von jedem Stift zwischen den zwei Formen. Die Verstellzeiten haben sich im Bereich von 25 Minuten für geringe Unterschiede zwischen der vorherigen und gewünschten Form, bis zu 146 Minuten für die maximalen Höhenunterschiede eingependelt. Das sind aber extreme Fälle, die erwarteten Verstellzeiten werden mit einer Schraubspindel im Bereich von 35 bis zu 70 Minuten liegen. Der Ansatz von mehreren parallelen Schraubspindeln wäre möglich, was die Zeiten erheblich reduziert.

### 6.1.3 Messen der Verkippung der Stifte

Wegen dem Spiel zwischen dem Innengewinde in der Grundplatte und dem Außengewinde der Stifte entsteht die Neigung der Stifte in der horizontalen Richtung. Das Spiel in der vertikalen Richtung ist unbedeutend. Es wurde die Neigung von zwanzig zufällig ausgewählten Stiften gemessen (siehe Anlage 6). Die 180 mm Stifte wurden in die obere Lage geschraubt. Das heißt die Stifte werden ganz in die 30 mm Grundplatte verschraubt und die Arbeitsfläche der Stifte wird dann 150 mm über der Grundplatte sein. Der Mittelwert der Neigung der 20 ausgewählten Stifte ist 2,01 mm. In den folgenden Versuchen wurde aber nur ein Drittel von dem ganzen Hub genutzt. In diesem Fall erreichte die Verkippung in alle Richtungen ungefähr ein Drittel des Messwertes. Das heißt nur 0,33 mm von der Mittellinie. Dieser abgeschätzte Wert ist für das Thermoform Prototypenwerkzeug annehmbar. Für die RIM Anwendung muss der Einfluss durch die Versuche bestätigt werden. Für beide Anwendungen könnte der Klemmechanismus von Kapitel 5.3.2, oder ein Kompensationsalgorithmus der Höhe der Stützpunkte zusätzlich aufgebracht werden.

## 6.2 RIM Versuche

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Versuchsplanung des FW für die RIM Anwendung. Es ist ein Vorschlag für den Versuchsablauf. Die Versuche selbst können leider nicht in dieser Arbeit eingefügt werden, weil der Stand der Konstruktion, der Fertigung des Werkzeugs und der Interpolationsmatte nicht weit genug bearbeitet sind.

Das Ziel der RIM Versuchen ist festzustellen:

- optimale Prozessparameter
- Lebensdauer der Interpolationsmatte
- optimale Einfüllung- und Entlüftungssystem
- Begrenzungen der Genauigkeit, Oberflächenqualität und Komplexität des Formteiles
- Kompensation der Verjüngung von der Interpolationsmatte durch die Umstellung der Stifte.

Die gewählte Testgeometrie (siehe Anlage 7) wird nicht nur für die Fertigungsversuche angewendet, sondern auch für die Evakuierung und – Abdruckversuche.

- Geometrie A: Platte
- Geometrie B: Schale
- Geometrie C: stehender Würfel
- Geometrie D: Halbkugel
  
- Evakuierungsversuch

Nach dem Zusammensetzen des kompletten Unterwerkzeugs (siehe Abb. 5-3) wird die Vakuumbefestigung der Matte getestet. Das Ziel dieses Versuches ist festzustellen, ob der Unterdruck unbeabsichtigt entweicht zwischen den Komponenten oder nicht. Weiter wird festgestellt, ob die Höhe von dem Unterdruck stufenweise oder in einem Zug angesetzt werden soll. Dazu wird die Geometrie C und D gewählt. Es wird beobachtet wie sich die Interpolationsmatte gleichmäßig ohne Falten an den Matrixträger anpasst.

- Abdruckversuch

Bevor die ersten Teile gefertigt werden, werden die Prozessbedingungen simuliert und betrachtet. In dem Unterwerkzeug wird anstatt des RIM Gemisches heißes Wasser unter Druck von 5 bar eingelassen. An dem Unterteil des RIM Werkzeugs wird von oben Plexiglas befestigt. Dies ermöglicht die Betrachtung, ob die Abdrücke der Stifte an der Interpolationsmatte sichtbar werden. Diese Abdrücke wären dann an dem Endprodukt, und dass muss unbedingt vermieden werden. Für diesen Versuch, aufgrund der FEM Simulationen, sollen zwei geeignete verschieden starke Silikonmatten mit angepasster Shore-Härte gefertigt und getestet werden. Das Ergebnis soll sich der idealen Stärke und Shore-Härte der Interpolationsmatte annähern, sowie der Eignung der abgekanteten Stiftköpfe. Es macht Sinn mit der einfachen Geometrie und dünneren Matte anzufangen, und bei einem erfolgreichen Verlauf ohne Abdrücke, können die weiteren Geometrien getestet werden.

- Lebensdauer des Interpolators

Bei dem Durchlauf von den vorherigen Abdruckversuchen, soll die Interpolationsmatte immer kontrolliert werden, ob die abgekanteten Stifte Risse oder Anzeichen von Schädigung zurücklassen. Wenn nach allen Abdruckversuchen die Interpolationsmatte ohne sichtbare Schädigung bleibt, dann soll die Interpolationsmatte an einer extremen Form mit großen Stifthöheunterschieden getestet werden. Das Ziel der regelmäßigen Kontrolle ist die Anzahl von Prozesszyklen abschätzen zu können, die die Interpolationsmatte ungefähr aushalten könnte.

- Fertigungsvorversuche

Die Fertigungsvorversuche sollen mit der Hilfe von der Testgeometrie die gewünschten Eigenschaften der Interpolationsmatte bestimmen. Nur ein formflexibler Matrixträger steht zur Verfügung, und dafür wird für jede Testgeometrie ein Gegenwerkzeug aus Kunststoff ausgefräst. In dem Gegenwerkzeug werden auch die Einfüllungs- und Entlüftungskanäle ausgefräst. Für jede getestete Stärke von der Interpolationsmatte wird der Matrixträger umgestellt, um dieselbe Stärke von den Werkstücken für jeden Versuch zu bekommen. Das Ziel der Vorversuche soll die

Auswahl der geeignetsten Mattenstärke sein. Weiter wird der Einfüll - und Entlüftungsprozess betrachtet und die Maßnahmen daraus abgeleitet.

- Fertigungsversuche

Die vorherigen Versuche werden noch einmal mit der am besten geeigneten Interpolationsmatte durchgeführt. Aufgrund der FEM Simulationen soll die Verjüngung des Interpolators mit der Höhe der Stifte kompensiert werden. Die Einstellung der Stifte soll auch die Maßhaltigkeit gewährleisten. Der Gegenkörper wird für jede getestete Form aus Kunststoff ausgefräst. Der Grund dafür ist, den Kostenaufwand der Entwicklung zu erniedrigen. Der entstandene RIM Werkzeug wird von zwei gegeneinander angestellte Werkzeuge von Abbildung 5-3 entstehen.

Der Gegenkörper soll, wenn nötig, umgearbeitet werden um die optimale Einfüllung und Entlüftung zu bekommen. Die dimensionale und geometrische Genauigkeit der Gussteile zusammen mit der Oberflächenqualität wird bewertet und die Begrenzungen des formflexibles Werkzeuges für die RIM Anwendung werden erstellt.

## 6.3 Thermoformen Versuche

### 6.3.1 Vorversuche zur Materialauswahl

Die Vorversuche dienen zur Bestimmung eines idealen Kunststoffes, der für die Thermoformung an dem flexiblen Werkzeug am besten geeignet sein wird. Es wurden vier Kunststoffe ausgewählt und getestet.

- Beschreibung der Vorversuchsmaterialien
  - Polycarbonat

Polycarbonat ist ein synthetisches Polymer. Es hat eine gute Festigkeit, Schlagzähigkeit und Steifigkeit. Polycarbonat ist auch ein guter Isolator gegen elektrischen Strom. Das Material ist transparent und farblos. Polycarbonate kann man mit verschiedenen Verfahren verarbeiten, deswegen ist der Anwendungsbereich sehr breit. Zu den Nachteilen gehört die Notwendigkeit der Trocknung des Materials vor

der Verarbeitung. Das Beseitigen der Restfeuchtigkeit kann sehr lang dauern, abhängig von der Stärke des Materials. Zum Beispiel, eine 8 mm starke Platte muss 30 Stunden bei 125 °C getrocknet werden [48].

- PETG (extrudierte Polyethylenterephthalat Glycol)

PETG ist ein transparenter Thermoplast mit einer sehr guten chemischen Beständigkeit und hoher Schlagfestigkeit. Im Gegensatz zu Polycarbonat muss PETG nicht getrocknet werden, was viel Zeit und Energie spart. PETG hat sehr gute mechanische Eigenschaften bei niedrigeren Temperaturen und ist thermisch sehr leicht verformbar. Der Anwendungsberiech ist sehr breit [49].

- PMMA (Polymethylmethacrylat, umgangssprachlich Acrylglas oder Plexiglas)

Plexiglas hat gute optische Eigenschaften mit einer glänzenden Oberfläche, eine hohe Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Beanspruchung. Das Material hat auch gute mechanische Eigenschaften und Schlagfestigkeit. Es eignet sich für die üblichen Bearbeitungstechniken, z.B. Sägen, Bohren, Polieren, usw. und ist auch zum Warmformen geeignet. Das Anwendungsgebiet ist auch sehr breit: Bauelemente, Beleuchtung und Dekoration aber auch Maschinenbaukomponenten wie Gehäuse und Abdeckungen [50].

- PE (Polyethylen)

Ungefärbtes Polyethylen ist matt. PE hat eine hohe Zähigkeit und Bruchdehnung, weiter es ist gut widerstandsfähig gegen chemische Substanzen. Es ist neben dem Polyvinylchlorid der am häufigsten industriell hergestellte Kunststoff.

- Verlauf der Vorversuche zur Materialauswahl

Erst wurde eine Form bestimmt, an der die Materialien verformt werden. Es wurde eine einfache flächige Negativform mit einem Radius, einer Fläche und auch einem Winkel von 90 Grad ausgewählt. Dazu wird ein Gegenstempel aus Holz gebaut, der an den erwärmten Kunststoff gedrückt wird (Abb. 6-2).

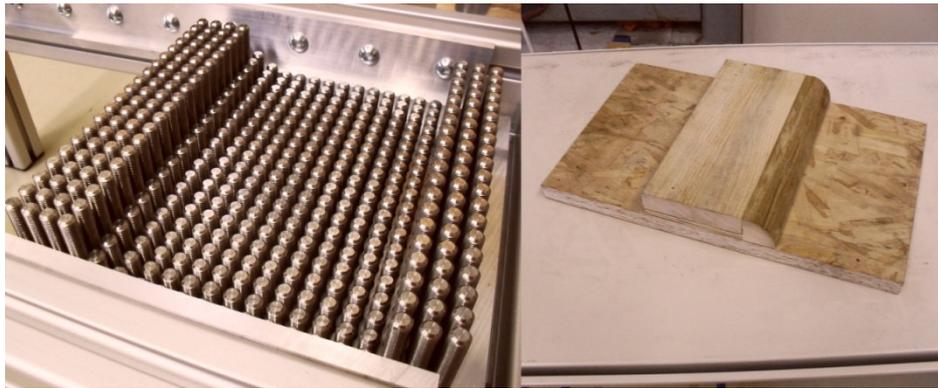


Abb. 6-3 Die erzeugte Form mit dem Gegenstempel

Es wurden drei Stärken (3 mm, 4 mm und 5mm) von jedem Material zur Verfügung gestellt. Aus diesem Grund werden die Stifte für jede Stärke verstellt. Die Verstellung gewährleistet den genauen Abstand für das formende Material zwischen dem hölzernen Oberstempel und den FWs.

Erst wird die Kunststoffplatte auf den vorgeschriebenen Temperaturbereich in einem Ofen erwärmt, um die Platte zu formen. Dann wird der erweichte Thermoplast an die verstellte Form angelegt und mit dem Gegenstempel in Form per Hand gedrückt. Der Gegenstempel wird so lange belastet bis das Formteil abkühlt ist, das hilft bei der Erhaltung der geometrischen Genauigkeit des Formteiles.

Zur Materialauswahl wurde eine einfache Bewertung durchgeführt. Jedes Material und jede Stärke wurde mit vier Kriterien bewertet (siehe Anlage 8). Das Gewicht der Kriterien wurde als gleichwertig genommen. Zur Bewertung der Kriterien wurde die Tabelle 4.7 genutzt.

Die Bewertungskriterien und ihr Inhalt:

- **Erwärmung**  
Die Höhe und die Breite des Temperaturbereiches zur Plattenformung und auch die Zeit, die zur guten Erweichung des Materials nötig ist.
- **Auflegen an die Form**  
Hier wurde bewertet, wie gut das Material die Form des FW ohne Druck von der Oberseite übernimmt.

- Kraft zur Verformung  
Diese Bewertung drückt aus, wie viel Widerstand das Material gegen den Oberstempel leistet.
- Geometrie nach Abkühlung  
Mit diesem Kriterium wurden die geometrischen Eigenschaften des Formteils nach der Abkühlung bewertet.

Nicht jeder Versuch ist perfekt gelungen. Meistens wurde die ideale Zeit für die Erwärmung oder für den Temperaturbereich nicht genau eingehalten. Eine zu hohe Temperatur führte zu Blasen in dem Material oder bei einer geringeren Erhitzung wurde der Verformungsprozess schwieriger. Die Versuche wurden ohne Interpolationsmatte durchgeführt, deswegen hat das Formteil eine gute und eine schlechte Seite. Die Silikonmatte war in der Zeit des Versuches noch nicht gefertigt. Theoretisch könnte eine andere Variante des Interpolators genutzt werden. Es wurde aber entschieden, dass die Versuche ohne Interpolator durchgeführt werden. Es wurde angenommen, dass der Formteil mit einer guten Seite genügend wird.

An der Unterseite entstehen Abdrücke von den Köpfen der Stifte. Bei manchen Versuchen entstehen die Stiftabdrücke auch an der Oberseite wegen der zu großen Umformkraft (Abb. 6-3).



Abb. 6-4 Die Abdrücke an der guten Seite des Formteiles

Die beste Bewertung bekam PETG. Der Temperaturbereich für die Erweichung zur Verformung ist breit genug und die Zeiten zur Erwärmung sind nicht zu lang. Das Material ist

sehr leicht verformbar und die Geometrie des Formteils nach der Abkühlung ist von den vier Kandidaten die beste. Aus diesen Gründen wird PETG für die weiteren Versuche genutzt.

### 6.3.2 Versuche mit dem ausgewählten Material

Das Ziel der Versuche ist, die Fähigkeiten des formflexiblen Werkzeugs beim Thermoformen ohne Interpolator festzustellen. Mit einer ausgewählten Testgeometrie wurde die geometrische Stabilität des Kunststoffes nach der Abkühlung bestimmt.

Das Ziel der Thermoformversuche mit PETG ist festzustellen:

- optimale Prozessparameter zum Thermoformen des PETGes
- geometrische Stabilität des Kunststoffes nach der Abkühlung
- Begrenzungen der Genauigkeit, Oberflächenqualität und Komplexität des Formteiles
- mögliche Kompensation der Eigenschaften des Formteiles durch Änderungen in der Form

#### Aufbau und Ablauf der Versuche

Die Testgeometrie wurde so erstellt, um die Fähigkeiten des Matrixträgers zu bestimmen und die Materialeigenschaften des Formteiles nach der Abkühlung zu bekommen. Es wurden drei Testgeometrien gewählt an welchen zwei Stärken, drei und fünf Millimeter des Materials, verformt werden (Abb. 6-4). Alle Formen wurden so vorgeschlagen um den maximalen Hub der Stifte von 50 mm auszunutzen. Für jede Form wurde ein Gegenstempel gebaut, und mit diesem Gegenstempel wird das Material per Hand an die Form angebracht. Zuerst wurde die gewünschte Form an dem Verstellmechanismus eingestellt. Dann wurde die PETG Platte in einem Ofen erwärmt. Die Erweichungstemperatur liegt bei 125 und 135 °C. Die dünneren 3 mm Platten wurden immer für 15 Minuten erwärmt. Die 5 mm Platten wurden für 20 Minuten erwärmt. Dann wird das Material an die Form mit Hilfe von dem Gegenstempel per Hand angebracht und hier bleibt es für 10 Minuten leicht belastet, bevor das Formteil abkühlt.

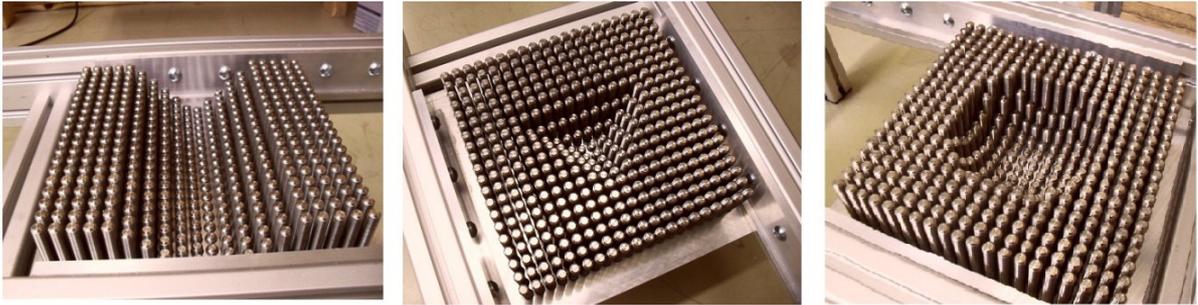


Abb. 6-5 Die erzeugten Testgeometrie

Jede Form und Stärke vom Material bildet einen anderen Widerstand gegen den Verformungsprozess. Es wurde immer ein Vorversuch durchgeführt um eine optimale Umformkraft und Haltekraft zu schätzen. Die optimale Umformkraft wurde einfach mit dem Gewicht eines Eimers mit Wasser geschätzt.

- Versuch A: Ein flächiges Teil mit einem Rechtwinkel

Der Erste Versuch wurde mit einem 50 mm tiefen Rechtwinkel durchgeführt. Für beide Stärken des verformten Materials wurde die gleiche Gegenform aus Holz genutzt. Aus diesem Grund mussten die Stifte für jede Stärke des Materials umgestellt werden, um den genau Abstand für das verformte Material zwischen dem Gegenstempel und dem Werkzeug in der ganzen Fläche des Werkzeugs zu bekommen. Es wurden fünf Platten von der Stärke 3 mm und vier Platten von der Stärke 5 mm verformt. Das Ziel dieses Versuches ist die Erstellung der Maßhaltigkeit des rechten Winkels eines einfachen flächigen Teils nach der Abkühlung.

- Versuch B: Ein Teil mit drei zueinander senkrechten Flächen

Für den zweiten Versuch wurde eine Form gewählt, die wie eine dreiseitige Pyramide aussieht. Als Gegenstempel wurde kein richtiges Gegenstück genutzt, sondern ein Würfel aus Holz, ohne Fläche rundum (Abb. 6-5). Aus diesem Grund kann auch die selbe Form des Matrixträgers für beide Stärken des Materials genutzt werden. Es wurden fünf 3 mm Platten und drei 5 mm Platten verformt. Das Ziel dieses Versuches ist die Maßhaltigkeit des rechten Winkels zu erstellen, wie in dem vorherigen Versuch. Aber in diesem Fall geht es um ein dreidimensionales Formteil wo Spannungen zwischen den drei Flächen entstehen können.

- Versuch C: Ein kugelförmiges Teil

Der dritte Versuch wurde mit einer Kugelform durchgeführt. Als Gegenstück wurden für die Versuche mit beiden Stärken der Platte eine Kugel mit 100 mm Durchmesser genutzt. Daher musste für die geänderte Stärke des Materials eine neue Form erstellt werden. Nach der Anlegung der erhitzten PETG Platte an die verstellte Form wurde erst ein Brett mit einem Loch von 100 mm Durchmesser an den Thermoplast angelegt. Erst dann wurde die Kugel, die als Gegenstück dient in die Form gedrückt. Dieser Verlauf gewährleistet die Vermeidung von ungewollten Deformationen des Materials rundum das gebildete Formteil. In dem Versuch B wurde nur ein Würfel, ohne Fläche rundum das Gegenstück genutzt. Die Ergebnisse waren da nicht optimal, weil rundum die Form Wellen entstanden sind, die das erzeugte Formteil deformierten (Abb.6-8). Aus diesem Grund wurde der Versuch C mit einem kompletten Oberstempel durchgeführt. Der Versuch B wurde noch einmal auf die selbe Weise wie im Versuche C durchgeführt. Der Versuch C wurde mit vier 3 mm und vier 5 mm Platten durchgeführt. Das Ziel dieses Versuches ist die Überprüfung, wie gut und genau der Matrixträger eine kugelförmige Form schaffen kann.

- Versuch D: Ein Teil mit drei zueinander senkrechten Flächen

Der Versuch B wurde noch einmal mit einem geänderten Verlauf durchgeführt. Erst wurde an den erweichten Thermoplast ein Brett mit einem dreieckigen Loch angelegt. Erst dann wurde das Gegenstück in das Material gedrückt. Dieser Verlauf gewährleistet voraussichtlich bessere Ergebnisse als der Versuch B. Es wurden wieder fünf 3 mm und vier 5 mm Platten verformt.



Abb. 6-6 Die Gegenstempeln für den Versuch B und D

### 6.3.3 Evaluierung der Ergebnisse der Versuche

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Ergebnissen der vorher beschriebenen Versuche. Es wurden die geometrischen Eigenschaften des Formteiles beziffert und die Qualität der Oberflächen beschrieben. Weiter wurde die optimale Umformkraft und Haltekraft für jede Form bestimmt. Es wurden nur die guten Seiten der Formteile beschrieben, das sind die Seiten des Thermoplasts die im Kontakt mit dem Stempel waren, nicht die Seiten die direkt im Kontakt mit den Stiften waren und immer Abdrücke hinterlässt.

- Die Ergebnisse des Versuchs A

Die Messergebnisse haben gezeigt, dass sich der Rechtwinkel nach Abkühlung des Formteiles verkleinert. Die 3 mm Platten haben sich im Durchschnitt um  $1,14^\circ$  beziehungsweise um 1,02 % verkleinert (siehe Anlage 9). An der Innenkante entstehen nicht zwei senkrechten Flächen, sondern ein Radius. Das ist sichtbar in der Abb. 6-6 im Bereich B. Die Größe des Radius wurde geschätzt. Bei der dünneren Platte waren es 40 mm. Die Umformkraft wurde an 40 N festgelegt, und die optimale Haltekraft wurde als 20 N gewählt.

Bei den 5 mm Platten war die Verkleinerung des Rechtwinkels durchschnittlich  $2,17^\circ$ , das ist 1,95 %. Der Radius an der Innenkante wurde ein wenig größer als mit der dünnere Platte. Bei der 5 mm Platte wurde der Radius 50 mm. Die Umformkraft wurde als 80 N und die optimale Haltekraft wurde 40 N geschätzt.



Abb. 6-7 Ein Formteil des Versuches A

Bei beiden Stärken von dem Material sind kleine Abdrücke im Bereich A und Bereich B an der guten Seite des Formteiles entstanden (Abb. 6-6). Es sind die Bereiche wo die Biegung des Materials entsteht. Die Abdrücke sind wegen der Transparenz des Materials sehr gut sichtbar, aber die Deformationen an der guten Seite sind gering. Die Deformationen bewegen sich im zehntel Millimeter Bereich und sind kleiner an den dickeren Platten.

Theoretisch sollte sich der Rechtwinkel öffnen wegen der erzeugten Spannung an der schlechten Seite, aber die Ergebnisse zeigen, dass der Winkel verkleinert wurde. Die einzige Erklärung für solches Verhalten des Thermoplastes ist, dass der hölzerne Oberstempel die Wärme an der guten Seite viel schneller annimmt als die Stiften mit den kleinen Kontaktflächen an der schlechten Seite. Aus diesem Grund kühlt die gute Seite schneller ab und damit werden die Ergebnisse beeinflusst.

- Die Ergebnisse des Versuchs B

Im Gegensatz zu den vorherigen Versuchen wurden in diesem Fall die Winkel in dem dreidimensionalen Formteil vergrößert (siehe Anlage 9). Bei den 3 mm Platten haben sich die Winkel zwischen den Flächen A, B und C in allen fünf Versuchen durchschnittlich um  $2,77^\circ$  beziehungsweise um 2,50 % vergrößert. Der Radius an dem Übergang zwischen den Flächen wurde von 1 bis 2 mm, von dem Versuch abhängig. Die Versuche wurden mit Umformkraft von 50 N und Haltekraft von 30 N durchgeführt.

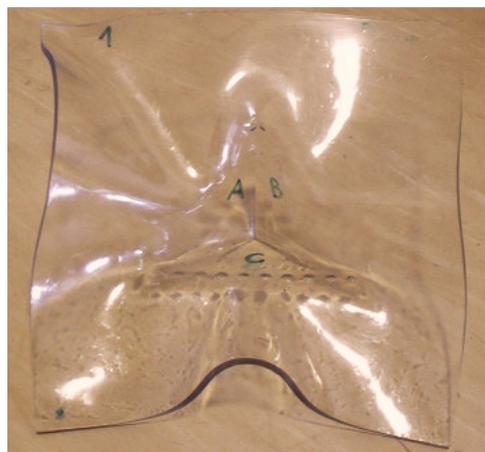


Abb. 6-8 Ein Formteil des Versuches B

Die Versuche mit den 5mm Platten haben gezeigt, dass die Abweichung von dem Sollwinkel kleiner ist als bei dem dünneren Material. Der durchschnittliche Abweichungswert zwischen allen drei Flächen wurde bei den drei Versuchen  $1,92^\circ$ , und das sind 1,73 %. Die Radien zwischen den Flächen bewegen sich ungefähr von 0,5 bis 1 mm. Der Material wurde mit 80 N verformt und es wurde mit 40 N belastet vor der Abkühlung.

An dem ganzen Umfang des Dreiecks wo die Form anfängt, entstehen Abdrücke (Abb. 6-7). Diese Bereiche am Rand des Formteiles übernehmen die Kräfte des Umformprozess und dafür entstehen Abdrücke der Stifte in dem erweichten Material. An manchen Formteilen entstehen auch Abdrücke inmitten einer von den drei Flächen. Dies wurde durch die nicht genau senkrechte Bewegung des Gegenstücks gegen das Thermoplast verursacht. Wie es schon erwähnt wurde, als Gegenstück wurde ein Würfel aus Holz genutzt, und dafür sind rundum das erzeugte Formteil unbeabsichtigte Wellen entstanden (Abb. 6-7).

Die Messergebnisse haben gezeigt, dass im Gegensatz zu dem Versuch mit dem rechten Winkel, sich die Winkel der zueinander senkrechten Flächen vergrößert haben. Es gibt zwei mögliche Gründe dafür. Der Würfel war nicht genau senkrecht zu dem Thermoplast gesetzt, oder er war nicht genau in der Mitte der Form bei dem Umformprozess. Die zweite Möglichkeit ist die Spannung zwischen den drei Flächen. Die Spannung könnte theoretisch durch die Wellen rundum die Form noch vergrößert sein.

Um diese Vermutung zu bestätigen wurde im Versuch D noch einmal der Versuch mit einem kompletten Oberstempel durchgeführt

- Die Ergebnisse des Versuchs C

Es stand kein Laser Scanner, oder ein anderes geeignetes Messgerät zur Verfügung, um die Genauigkeit der verformten Kugelfläche zu überprüfen. Aus diesem Grund wurde nur die Umform- und Haltekraft geschätzt. Für beide Stärken des Materials wurde die Haltekraft 80 N genutzt. Die Umformkraft war sehr hoch im Vergleich zu den vorherigen Versuchen. Für die 3 mm Platten betrug die Umformkraft im Bereich von 250 N bis 350 N. Für die 5 mm Platten wurden die genutzte Umformkraft bis zu 450 N erhöht. Trotz der großen Umformkräfte ist es keinem von den Versuchen gelungen das Material in die ganze Tiefe der Form zu drücken. Der

Grund für diese Ergebnisse war die Benutzung des Bretts mit einem Loch als Teil des Oberstempels. Das Material wurde in dem Bereich am Rand des Forms geklemmt und dann wurde das Material tief gezogen. Aus diesem Grund wurde die Tiefe des Formteiles übergemessen (siehe Anlage 9). Die Ergebnisse zeigen, dass im Durchschnitt nur 93 % der Tiefe bei der 3 mm Platten und 87 % bei der 5 mm Thermoplast erreicht wurde. Deswegen entstanden in alle Versuchen die Abdrücke nur am Rand, wo der Kugelform anfängt, nicht an der Fläche der Kugelform selbst. Die Abdrücke im Bereich D in der Abbildung 6-8 wurden mit der nicht genau senkrechten Bewegung des Gegenstempels verursacht.



Abb. 6-9 Ein Formteil des Versuches C

Aufgrund der Ergebnisse wurde ein Versuch für beide Stärken ohne Brett rundum das Gegenstück durchgeführt. Der Unterschied in der Umformkraft wurde bestimmt, und es wurde versucht ob der Thermoplast in der ganzen Tiefe gedrückt wird. Die Umformkraft war viel kleiner in diesen Fällen. Es war nur 80 N für die 3 mm Platte und 120 N für die 5 mm Platte. In den beiden Fällen ist es gelungen das Material in die ganze Tiefe des Werkzeugs zu ziehen. Bei dem Umformprozess nur mit einem Kugel-Gegenwerkzeug, sind rundum das Formteil ungewollte Wellen entstanden. In diesem Fall wurden die Wellen mit dem Brett erst nach dem Umformprozess gepresst, was Falten rundum das Formteil verursachte.

- Die Ergebnisse des Versuchs D

Die Ergebnisse der Erzeugung eines Formteiles mit drei zueinander senkrechten Flächen mit einem kompletten Oberstempel waren ein wenig besser als in dem Versuch B. Als durchschnittliche Abweichung von dem rechten Winkel wurde bei dem dünneren Material  $2,51^\circ$  gemessen, was eine Vergrößerung um 2,26 % darstellt. Die Radien waren gleich und die Umformkräfte waren ungefähr um 30 % größer als in dem Versuch B.



Abb. 6-10 Ein Formteil des Versuches D

Bei der 5 mm PETG waren die Winkelabweichungen größer als erwartet wurde. Die durchschnittliche Vergrößerung des rechten Winkels war  $2,34^\circ$ , was eine Vergrößerung um 2,11 % ist. Es wurde eine kleinerer Fehler als  $2,1^\circ$  erwartet, der in dem Versuch B erreicht wurde. Die Radien waren wieder gleich und die Umformkräfte waren um 60 % größer als in dem Versuch B, wegen der Anwendung von einem kompletten Oberstempel. Das Material wurde in dem Bereich am Rand des Forms geklemmt und dann wurde das Material tief gezogen, analog zum Versuch C. Der komplette Oberstempel hat sehr gut die Wellen rundum des Formteiles beseitigt. Es hat aber keinen Einfluss an die Genauigkeit des Winkels oder an die Größe der Radien in den Innenkanten. Die ungenauen Winkel sind bei der nicht genau senkrechten Bewegung des Oberstempels verursacht.

### 6.3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse werden in einer Tabelle zusammengefasst, wo die Messwerte und subjektiven Bewertungen eingefügt wurden. Die Bewertung von 0 bis 4 wurde nach der Tabelle 4-7 durchgeführt, wo 0 für unbefriedigend und 4 für sehr gut steht.

Form		Stärke des Materials	Durchschnittliche Messwerten			Bewertungen			Summe
			Umformkraft	Abweichung von Sollwinkel	Radien im Innenkanten	Oberflächenqualität	Geometrische Genauigkeit	Wiederholbarkeit der Ergebnisse	
A	Rechtwinkel	3	40 N	-1,03%	40 mm	2	3	3	8
A	Rechtwinkel	5	80 N	-1,95%	50 mm	3	2	3	8
B	Würfel	3	50 N	2,50%	2 mm	2	0	1	3
B	Würfel	5	80 N	1,73%	1 mm	2	0	1	3
D	Würfel	3	65 N	2,26%	2 mm	2	1	2	5
D	Würfel	5	105 N	2,11%	1 mm	2	1	2	5
C	Kugel	3	350 N	-	-	4	4	2	10
C	Kugel	5	450 N	-	-	4	4	2	10

Tabelle 6-1 Bewertungen der Ergebnisse

Die Bewertung zeigt, dass die beste Oberflächenqualität, geometrische Genauigkeit und Wiederholbarkeit die Kugelform und der rechte Winkel haben. Trotz der wiederholten Versuche mit dem Würfel waren die Ergebnisse nicht optimal.

Auf die Ergebnisse des Thermoformenprozesses an dem Gewindestift-Matrixträger hat die Komplexität des erzeugten Formteils den größten Einfluss. Mit der Komplexität, mit dem Verlauf der Umformprozess und auch der Stärke des umzuformenden Materials hängt die Größe der Umformkraft zusammen. In manchen Fällen wurde die Kraft ganz klein, aber in den Fällen wo Tiefziehen des erweichten Materials durchläuft, wurde die Kraft sehr hoch. Die Haltekraft für Abkühlung des Materials betrug meistens die Hälfte von der Umformkraft, aber nicht mehr als 80 N. Wie erwähnt war, wächst mit der steigenden Stärke des Materials auch die Umformkraft. Aber auf der anderen Seite, mit dem starken Material können die Abdrücke von den Stiften an der guten Seite vermeiden werden.

Was bei den Versuchen problematisch zu gewährleisten war, dass der Oberstempel genau in die Mitte der Form geht und senkrecht zu der Form steht. Um optimale Ergebnisse zu bekommen muss die Bewegung des Stempels genau senkrecht und in die Mitte der Form gerichtet werden. Das war manchmal schwer per Hand zu erreichen. Diese Schwierigkeit

war deutlich bei den Versuchen mit dem stehenden Würfel zu sehen. Die größte Abweichung hatte immer nur ein Winkel. Bei der Bewegung mit dem Gegenstück gegen die Form wurde das Gegenstück immer ein wenig von links nach rechts geneigt, und das hatte einen großen Einfluss auf den Winkel  $\alpha$  (siehe Anlage 9).

Auch der Oberstempel kann die Ergebnisse beeinflussen. Die Wellen rundum das Formteil beim Versuch B haben bei der Abkühlung nicht den rechten Winkel zwischen den Flächen beeinflusst, sondern die Ebenheit der Flächen selbst. Weiter beeinflusste die Ergebnisse auch das Material von dem Oberstempel. Es wäre optimal ein Material das die Wärme von dem Formteil so schnell wie die Stifte an der anderen Seite übernehmen würde. Die ungleichmäßige Wärmeabnahme deformiert das Formteil, trotz der Belastung bei der Abkühlung.

Die Merkmale und ihre Einflüsse an die Thermoformen wurden in der Tabelle 6-3 zusammengefasst. In der Tabelle war der Einfluss jedes Merkmals beschrieben und bewertet. Die Wichtigkeit der Einflüsse wurde in drei Stufen geteilt. (Tabelle 6-2).

Kleiner Einfluss	K
Mittlere Einfluss	M
Große Einfluss	G

Tabelle 6-2 Einflussgrößen

Merkmal		Einfluss auf	Das Gewicht des Einflusses
Werkzeug	Auflösung des Matrixträgers	Genauigkeit des Formteiles	M
		Oberflächenqualität	K
	Kopfgestaltung der Stiften	Größe der Abdrücke	K
	Genauigkeit des Gegenstücks	Genauigkeit des Formteiles	G
	Material des Gegenstücks	Genauigkeit des Formteiles	G
Prozess	Typ und Verlauf vom Prozess (Formen/Tiefziehen)	Größe der Umformkraft	G
		Verjüngung des Materials	M
		Größe der Abdrücke	M
		Wellen/Falten rundum des Formteiles	G
		Größe der Umformkraft	G
	Genauere Bewegung des Gegenstücks	Geometrische Genauigkeit	M
		Verteilung der Abdrücke	G
	Umformkraft	Größe der Abdrücke	G
		Erreichen der ganzen Tiefe der Form	M
	Komplexität des Formteiles	Größe der Umformkraft	G
		Größe der Abdrücke	M
		Geometrische Genauigkeit	M
		Durchführbarkeit des Prozess	G
	Stärke des Materials	Größe der Umformkraft	M
Größe der Abdrücke an der guten Seite		G	
Erzeugung von scharfen Übergängen		M	

Tabelle 6-3 Einflüsse an den Thermoformprozess

## 6.4 Fazit

In diesem Kapitel wurden die Fähigkeiten des Verstellungsmechanismus und des Matrixträgers für Thermoformen festgestellt. Weiter wurde der Verlauf des RIM Versuches vorgeschlagen.

Das angewendete Messsystem wurde als ausreichend festgelegt, aber die Verstellung braucht auf Grund der Messergebnisse noch eine Verbesserung der Genauigkeit. Nur dann wird die gewünschte Genauigkeit der Gussteile bei RIM Versuchen erreicht. Für die thermoformen Versuche wurde die Genauigkeit als ausreichend festgestellt.

Die thermoformen Versuche haben die Grenze des formflexiblen Werkzeuges gezeigt. Mit dem Werkzeug können sehr gute Ergebnisse bei flächigen unkomplizierten Teilen erzielt werden. Problematisch sind scharfe Winkelübergänge und große Höheunterschiede des Produkts. Weiter ist es wichtig, dass beide Seiten des formenden Materials gleich schnell abgekühlt werden müssen. Die Befürchtungen bezüglich der Kopfgestaltung des Stiftes

waren unproblematisch. Die Stifte hinterlassen Abdrücke nur bei den Winkelübergängen. Dies kann mit einem stärkeren Material gelöst werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Benutzung von einer Interpolationsschicht.

Bei den Thermoformversuchen wurde nur ein Matrixträger verwendet und der Gegenkörper wurde für jede Form zusammengesetzt. Es wäre optimal für die folgende Arbeit zwei Matrixträger zur Verfügung haben. Einen festen und einen beweglichen Matrixträger entgegen.

Auch die ersten RIM Versuche wurden so vorgeschlagen, dass nur ein Unterwerkzeug mit dem Matrixträger genügen wird. Aber für eine funktionsfähige formflexible RIM Anlage werden zwei gegenliegende Werkzeuge mit zwei Gewindestiftmatrixträgern notwendig.

## 7 Aufzeigen von Potential und Ansatzgrenzen

Die Versuche haben die Fähigkeiten des Verstellmechanismus und der Gewindestift Matrixträger für Thermoformen gezeigt. Aufgrund der bekannten Eigenschaften des Gewindestifts-Werkzeugs werden die möglichen Erweiterungen und Anwendungen des formflexiblen Werkzeugsystems vorgeschlagen.

### 7.1 Potentielle Erweiterungen des formflexiblen Werkzeugs

Der konstruierte und getestete Matrixträger dient nur als eine Demonstratoranlage zur Erprobung der erwarteten Fähigkeiten des Gewindematrixträgers. Es gibt noch viele mögliche Erweiterungen und Änderungen, die an dem bisherigen FW durchgeführt werden könnten. Es hängt von der Anwendung und den Anforderungen des Auftraggebers ab. Die Modifikationen könnten in konstruktive Erweiterungen der Matrixträger, Erweiterungen des Verstellungssystems und andere Modifikationen geteilt werden.

#### 7.1.1 Konstruktiven Erweiterungen des Matrixträgers

- Größe der Arbeitsfläche

Obwohl 400 diskrete Elementen als viel scheinen könnten, die Arbeitsfläche ist relativ klein. Die Vielseitigkeit des Werkzeuges ist nicht nur durch die Formflexibilität selbst, sondern auch die Größe der Arbeitsfläche gewährleistet. Mit der Vergrößerung der Arbeitsfläche müssten auch weitere Maßnahmen ergriffen werden. Der Verstellmechanismus aber auch die Mittel zur Handhabung des FW müssten entsprechend erweitert werden.

- Länge der Stifte

Wie es in dem fünften Kapitel bemerkt wurde, das Messsystem braucht eine Erweiterung, um die 180 mm Stifte in der ganzen Länge auszunutzen. Theoretisch könnten die Stifte, abhängig von der Anwendung, sehr lang sein. Mit der Höhe der Stifte müsste auch das Verstellungssystem zusammen mit dem Messsystem

modifiziert werden. Weiter müssten Maßnahmen gegen die Verkippung von langen Stiften getroffen werden.

- Stärke der Grundplatte

Die Festigkeit einer 30 mm starke Aluminiumgrundplatte muss nicht für alle Anwendungen reichen. Abhängig von der erwarteten Belastung eines Stiftes muss die Stärke und das Material der Grundplatte entworfen werden. Mit der Belastung der Gewindestifte beschäftigt sich das Kapitel 7.2.

- Auflösung des Werkzeuges

Ursprünglich wurde eine Grundplatte mit quadratisch angeordneten M8 Gewindestiften vorgeschlagen, konstruiert und gefertigt. Zur Verbesserung der Auflösung des FWs könnte die Anordnung der Stifte oder die Größe der Stifte geändert werden. Bei einer triangulären Anordnung mit M6 Gewindestiften würde die Auflösung um 68% verbessert sein.

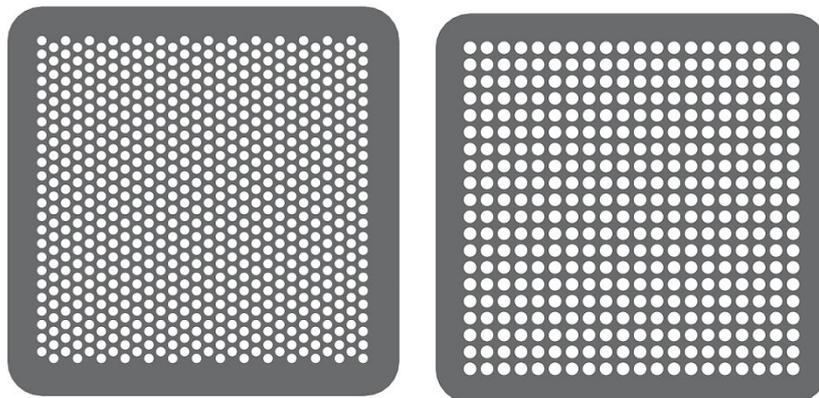


Abb. 7-1 Trianguläre M6 und quadratische M8 Anordnung

- Die Interpolation

Abhängig von der Anwendung muss auch der Interpolator geändert werden. Bei geänderten Prozesskräften, kann entweder die Stärke des Interpolators geändert werden oder muss ein anderes Material für den Interpolator verwendet werden.

### 7.1.2 Erweiterungen des Verstellungssystems

- Ausbreitung des Verstellmechanismus

Mit der Vergrößerung der Arbeitsfläche und des Hubes müsste selbstverständlich auch der Verstellmechanismus vergrößert werden. Das heißt, die Länge der Linearachsen, der Hub des Schraubers zusammen mit dem Messsystem muss erweitert werden. Wenn die Vergrößerung der Arbeitsfläche zu langen Verstellzeiten führt, könnte der Verstellmechanismus mehr als nur einen Schrauber haben. Mit zwei parallelen Schraubern an dem selben Schlitten würden sich die Verstellzeiten erniedrigen.

- Verstellalgorithmus

Es ist sehr zeitaufwendig für jede neue Form die genaue Höhe von jedem Stift zu berechnen. Aus diesem Grund ist der nächste logische Entwicklungsschritt ein Verstellalgorithmus. Der Verstellalgorithmus soll anhand der CAD Daten des Endprodukts und der geometrischen Bedingungen und Prozessbedingungen die Position von jedem Stift errechnen. Das heißt, dass der Verstellalgorithmus nicht nur die geometrische Möglichkeiten des FWs sondern auch Materialeigenschaften der Interpolationsmatte und des RIM Materials betrachtet.

Geometrische Bedingungen : Anordnung der Stifte

Größe und Kopfgestaltung der Stifte

Auflösung des Werkzeugs

Lage des Formteils relativ zu dem Werkzeug

Prozessbedingungen: Shore-Härte und Stärke des Interpolationsmatte

geeigneter Unterdruck zur Befestigung der Matte

angenommene Eigenschaften des RIM Materials nach der  
Abkühlung

Das Ziel sollte es dann sein, anhand der Verstellungsalgorithmus ein Programm zu erstellen, das den CAM (Computer aided manufacturing) Prozess unterstützen würde.

- Verstellungsoptimierung

Eine Erweiterung des Verstellungsalgorithmus der zur Erniedrigung der Verstellzeiten führt ist eine Verstellungsoptimierung. Das heißt, dass der Verstellungsalgorithmus nicht nur entscheidet wie das Formteil zu orientieren ist, um die beste geometrischen Eigenschaften zu bekommen, sondern auch so wenig wie möglich Stifte zu verstellen müssen. Dies gewährleistet, dass nicht alle Stifte immer unbedingt abhängig von der Nullebene verstellt werden müssen.

### 7.1.3 Andere Modifikationen

Jetzt ist die Demonstratoranlage von dem Verstellmechanismus räumlich getrennt. Das heißt, es gibt zwei Arbeitsplätze. Nach der Verstellung muss der Matrixträger zu einem anderen Arbeitsplatz transportiert werden wo die Anwendung des Prozesses durchgeführt werden kann. Das braucht Zeit und wahrscheinlich nicht nur einen Arbeiter. Ein Arbeitsplatz mit einem integrierten Verstellmechanismus, Hebezeug und einem Mechanismus für die Anwendung des Matrixträgers, spart Zeit, Platz und auch Arbeitskräfte.

## 7.2 Potenzielle Tragfähigkeit des Gewindematrixträgers

Der Gewindestiftmatrixträger hat theoretisch einen sehr breiten Anwendungsbereich. In diesem Kapitel werden die maximalen Belastungen in der vertikalen und der horizontalen Richtung an einem Stift berechnet (Abb. 7-1). Es wurden die Parameter des gegenwärtigen Matrixträgers genutzt. Das heißt Gewindestifte M8 aus Stahl mit der Festigkeitsklasse 5.6 und eine Aluminiumplatte mit einer Streckgrenze von 200 MPa. Aufgrund der Tragfähigkeiten des Matrixträgers könnten die Anwendungsbereiche, beziehungsweise die nötigen Modifikationen abgeleitet werden.

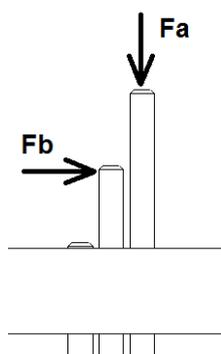


Abb. 7-2 Richtungen der berechneten maximalen Kräfte

- Berechnung der maximalen horizontalen Kraft  $F_b$

Streckgrenze des Materials:  $Re = 300 \text{ MPa}$

Erlaubte Spannung:  $\sigma_{er} = 0,8 \times Re = 240 \text{ MPa}$  (7)

Trägheitsmoment des Kreisprofils:  $I = \frac{\pi \times d^4}{64} = \frac{3,14 \times 7,065^4}{64} = 122,30 \text{ mm}^4$  (8)

Widerstandsmoment des Kreisprofils:  $W_B = \frac{I}{d/2} = 34,62 \text{ mm}^3$  (9)

Axiale Biegespannung:  $\sigma_a = \frac{M_B}{W_B}$  (10)

Die maximale Kraft ist von der Höhe des Stiftes abhängig, beziehungsweise wie hoch der Stift ausgeschraubt wird (Abb. 7-2).

Maximale Kraft: 
$$F_{bmax} = \frac{\sigma_{er} \times W_b}{l_{min}} = \frac{2,4 \times 10^8 \text{ Pa} \times 3,462 \times 10^{-8} \text{ mm}^3}{0,01 \text{ m}} = 830,9 \text{ N} \quad (11)$$

Minimale Kraft: 
$$F_{bmin} = \frac{\sigma_{er} \times W_b}{l_{max}} = \frac{2,4 \times 10^8 \text{ Pa} \times 3,462 \times 10^{-8} \text{ mm}^3}{0,15 \text{ m}} = 55,4 \text{ N} \quad (12)$$

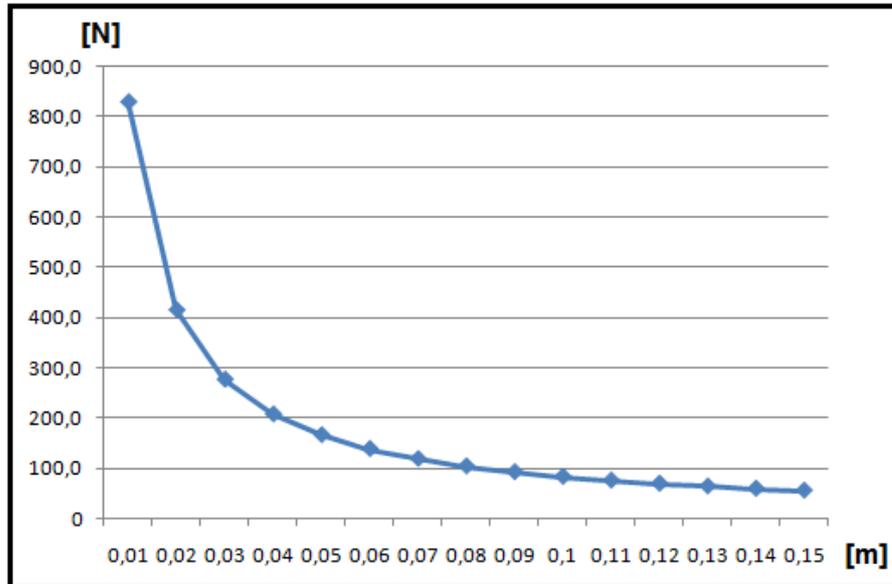


Abb. 7-3 Abhängigkeit des maximalen Belastung von der Höhe des Stiftes

- Berechnung der maximalen senkrechten Kraft auf einen Stift

Streckgrenze des Aluminiums:  $Re = 200 \text{ MPa}$

Erlaubte Spannung:  $\sigma_{er} = 0,8 \times Re = 160 \text{ MPa}$

Druck auf das Gewinde: 
$$\sigma_{er} = \frac{F}{n \times \pi \times d_m \times h} \quad (13)$$

Erlaubte Kraft: 
$$F = \sigma_{er} \times n \times \pi \times d_m \times s \quad (14)$$

Anzahl von Gewinden:  $n = 30$

Steigung des Gewindes M8x1:  $h = 1 \text{ mm}$

Gewindetiefe: 
$$t = 0,5\sqrt{3} \times h = 0,866 \text{ mm} \quad (15)$$

Stützhöhe des Gewindes: 
$$s = \frac{5}{8} t = 0,541 \text{ mm} \quad (16)$$

Flankendurchmesser M8x1:  $d_m = 7,35 \text{ mm}$

Erlaubte maximale Kraft:

$$F = 1,6 \times 10^8 Pa \times 30 \times \pi \times 7,35 \times 10^{-3} m \times 5,41 \times 10^{-4} m = 59962 N \quad (17)$$

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Gewindestifte sehr gute Tragfähigkeit in der senkrechten Richtung haben, trotz der Verwendung von einer Aluminiumplatte. Mit einer Stahlplatte wäre die erlaubte Kraft noch um 80 % höher. Die Horizontalkraft ist wesentlich von der Höhe der Stifte abhängig. Das könnte für verschiedene Anwendungen eine Beschränkung sein.

## 7.3 Anwendungsbereiche

Das formflexible Werkzeug ist für Anwendungsbereiche geeignet, wo Teilevielfalt breit ist, Produktionsmengen gering sind und die Teilgeometrie aus sanften Krümmungen besteht. Formflexible Werkzeuge bieten eine Flexibilität im Design des Produkts und Flexibilität in der Fertigung. Es gibt ein Potential im Sparen von Kosten und Zeit. Der Anwendungsbereich für ein formflexibles Werkzeug ist sehr breit entweder in der vorgestellten oder in einer modifizierten Konfiguration. In diesem Kapitel werden mögliche Anwendungen vorgestellt.

### 7.3.1 Umformen

- Umformen von metallischen Werkstoffen

Beim Umformen von metallischen Werkstoffen entstehen große Kräfte. Die Gewindestifte haben große Tragfähigkeit in der senkrechten Richtung. Aber der Widerstand des Materials gegen Biegen ist durch die Höhe der Stifte sehr erniedrigt. Aus diesem Grund um diese Festigkeitseigenschaften des FWs zu verbessern, wäre eine Modifikation des Werkzeuges nötig. Das Prinzip der zweiten Lösungsvariante des FWs von Kapitel 4, könnte hier angewendet werden. An dem verstellten Gewindestiftmatrixträger wird ein Spannrahmen mit quadratischen, dicht angeordneten Stiften angelegt und festgeklemmt (Abb. 7-4). Diese abgedrückte feste Form könnte dann als ein Werkzeug für die folgenden Umformprozesse dienen. Für Umformprozesse wurden in den Forschungsarbeiten [7] und [9] als Interpolator eine Elvax (Ethylvinylacetat) Schicht mit der selben Dicke wie der Durchmesser der Stifte

vorgeschlagen. Auch nach *Waltzyk* und *Hardt* [12] ist für das Blechumformen optimal wenn die Stärke der elastomeren Schicht und des Durchmessers von den Stiften die gleiche ist.

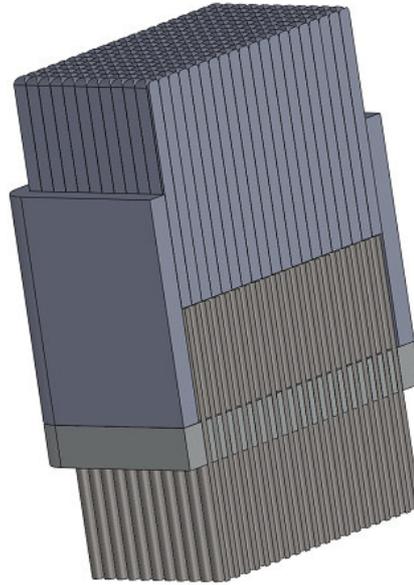


Abb. 7-4 Der Matrixträger mit dem Spanrahmen und den quadratischen Stiften

### Streckziehen von Blechteilen

Das modifizierte formflexible Werkzeug könnte sehr gut für Streckziehen von Blechteilen dienen. Das Werkstück wird mit den Spannzangen am Rand fest eingespannt und nimmt die Form des Stempels an (Abb. 7-5). Für ein funktionsfähiges formflexibles Streckziehwerkzeug wurde eine Erweiterung der Oberfläche des Werkzeugs erforderlich.

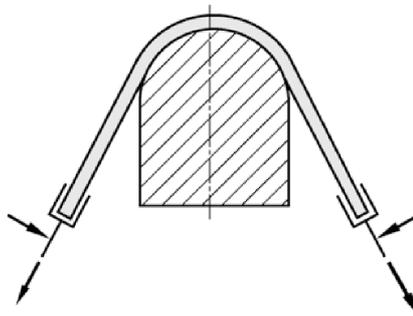


Abb. 7-5 Konventionelles Streckziehen [51]

## Biegeumformen

Das modifizierte formflexible Werkzeug könnte auch als ein Biegewerkzeug dienen. Theoretisch könnte die abgedrückte festgeklemmte Form als ein Gesenk und auch als ein Biegestempel für Gesenkbiegeverfahren dienen (Abb. 7-6), wie Freibiegen oder Prägebiegen, sowie Anschmiegen oder Anbiegen.

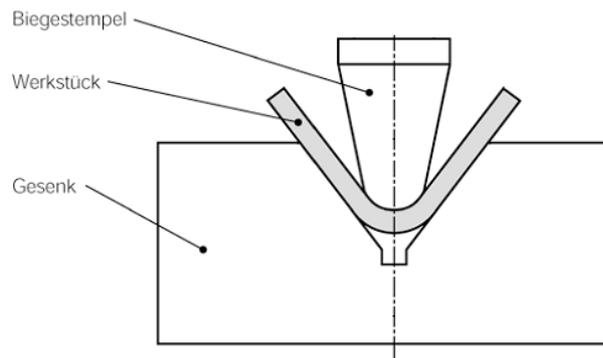


Abb. 7-6 Konventionelle Biegesenk in V Form [51]

- Umformen von Kunststoffen

Wie es in den Versuchen im Kapitel 6 gezeigt wurde, ist der Gewindestiftmatrixträger in der Lage, erwärmte Kunststoffplatten, die sich im thermoelastischen Bereich befinden, umzuformen. Die Oberflächenqualität ist begrenzt, was jedoch mit einem Interpolator gelöst werden kann. Mit einem Matrixträger oder zwei gegenüberliegenden Matrixträgern könnten die nachfolgenden konventionellen Thermoformverfahren mit einigen Einschränkungen ersetzt werden.

## Biegen

Wie es im Versuch A im Kapitel 6.3.2 überprüft wurde, ist das formflexible Werkzeug für das Biegen von Kunststoff gut geeignet. Als Gegenstempel könnte entweder Holz, Schichtpressstoff oder Metall verwendet werden. Es gibt eine zweite Möglichkeit, nämlich das Gegenstück von einer starken PETG-Platte ohne Stempel mit der Hand an dem formflexiblen Werkzeug zu formen, und dann mit dem erzeugten Formteil das Biegeverfahren

durchzuführen. Für eine komplette formflexible Biegeanlage könnten auch zwei gegeneinander gestellte Matrixträger genutzt werden. Es gibt verschiedene Biegeverfahren, die potenziell mit einigen Abgrenzungen das formflexible Werkzeug ersetzen könnten. Wie Gesenkbiegen, Anschmiegen oder Anbiegen.

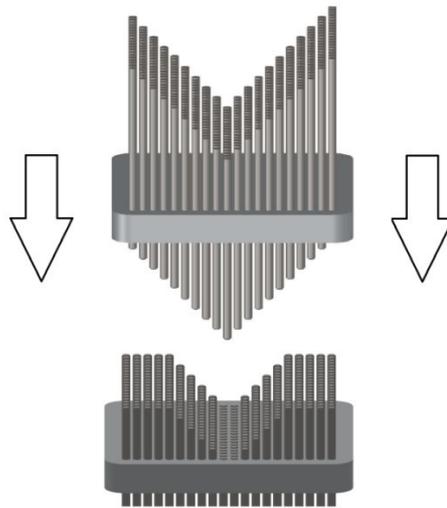


Abb. 7-7 Biegen von Kunststoff

### Vakuumformen

Konventionell wird Vakuumformen mit positiven oder negativen Formen genutzt. Beide Verfahren könnten mit dem Gewindestiftmatrixträger ersetzt werden. Die Negativ-Verformung benötigt meistens einen Stempel, der auch mit einem interpolierten Gewindestiftmatrixträger realisiert werden könnte. Der Matrixträger ohne Interpolator könnte solche Formen sehr gut ersetzen. Ohne Interpolator würde relativ einfach das Vakuum an den Thermoplast eindringen.

Um die Abdrücke an den beiden Seiten des Formteiles zu vermeiden, müsste ein Interpolator an der Gegenform genutzt werden. Es würde dann problematisch die Entlüftungskanäle an der interpolierten Fläche des Unterwerkzeuges zu realisieren. Der mit Vakuum befestigte Silikoninterpolator muss dann Löcher haben um das Vakuum auch an den Thermoplast einzubringen. Der Interpolator für diese Anwendungen könnte auch aus vorimprägnierten Fasern (preprag) oder Thermoplast sein. Der Interpolator wird erst an der erzeugten Oberfläche mit der Hilfe von Wärme vorgeformt, dann werden die Entlüftungslöcher für Vakuum gestaltet.

### 7.3.2 Urformen

Von den Urformverfahren könnte das formflexible Werkzeug für Gießen dienen. In das Werkzeug mit der interpolierten Oberfläche kann der Gießstoff direkt gegossen, oder injiziert werden wie in dem beschriebenen Fall mit dem RIM Verfahren. Das Werkzeug kann auch als ein Mittel zur Herstellung der Gussform dienen.

- Direkte Anwendung

Für die direkte Anwendung des formflexiblen Werkzeuges als Gussform könnte das bisherige formflexible Werkzeug mit der interpolierten Werkzeugoberfläche genutzt werden. Dieses wird nur für Materialien mit relativ niedriger Temperatur in dem flüssigen Zustand wie Gips, Ton oder Harz möglich. Hohe Temperaturen von geschmolzenen Metallwerkstoffen, könnte die Interpolationsmatte von Silikon nicht aushalten. Eine Lösung dafür wäre die Verwendung von dem modifizierten formflexiblen Werkzeug von Abbildung 7-4. Die Abstufungen der dicht angeordneten Stifte könnte überfräst werden und so eine glatte Gussform erzeugen.

Nach der Forschungsarbeit von Koc und Thangaswamy [22] könnte fünf oder sechs Matrizen mit dicht angeordneten Stiften zum Gießen von dreidimensionalen Gussteilen dienen. Das wird mit dem zusätzlichen Spannrahmen mit quadratischen Stiften nach der Abbildung 7-4 möglich. Um die Dichtigkeit zu gewinnen, müsste dazu eine effektive Methode entwickelt werden. Entweder eine Interpolation der erzeugten Werkzeugoberflächen, oder eine Nachbearbeitung des Werkstücks. Bearbeitung von sechs Matrizen ist auch eine Möglichkeit, aber scheint als zu zeit- und kostenaufwendig.

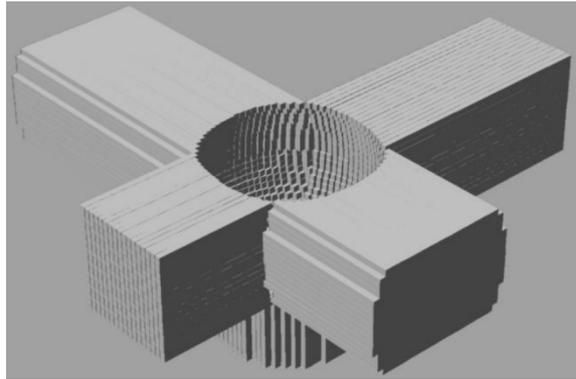


Abb. 7-8 Gießform für das Gießen von dreidimensionalen Gussteilen

- Indirekte Anwendung

Bei der indirekten Anwendung wird das Werkzeug als Mittel zur Herstellung der Gießformen angewendet. Die erzeugte Gießform kann von verschiedenen Materialien sein, abhängig von dem Gussteil. Aufgrund des gegossenen Materials muss auch die Interpolationsmethode oder der Matrixträger geändert werden wie bei der direkten Anwendung.

### 7.3.3 Spannen von Werkstücke

Der Matrixträger könnte auch als ein universeller Spannmechanismus für eine breite Vielfalt von Werkstücken dienen. Mit nur einem formflexiblen Klemmmechanismus wird das Werkstück in der verstellten Form angelegt. Wenn das Werkstück noch eine Befestigung von oben braucht, könnte eine zusätzliche Klemmung von oben nach der Abbildung 7-9 angebracht werden. Für eine sichere feste Klemmung würde die modifizierte Variante von der Bild 7-4 gelegen. Für große oder komplizierte Werkstücke können zwei oder mehr verstellte Klemmmechanismen genutzt werden.

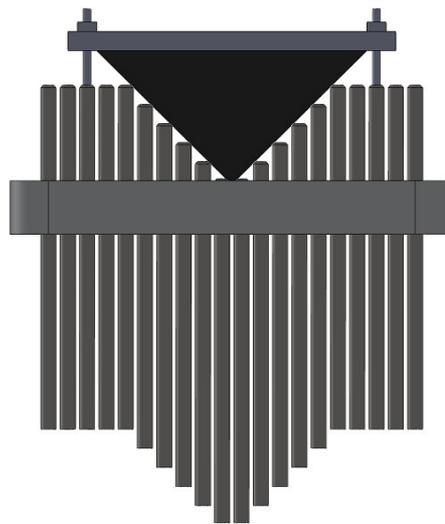


Abb. 7-9 Ein Spanmechanismus mit zusätzlichem Spanrahmen

Der Spanmechanismus könnte für spanende Bearbeitung, Fügen oder einfach zum Tragen von unsymmetrischen Werkstücken dienen.

#### 7.3.4 Begrenzungen der vorgeschlagenen Anwendungen

Es stehen viele mögliche Modifikationen und Kombinationen zur Verfügung. Abhängig von der Interpolationsmethode, der Anwendung und anderen Eigenschaften des formflexiblen Werkzeuges entstehen verschiedene Begrenzungen des Verfahrens. Die voraussichtliche Begrenzungen und potenzielle Anwendungen sind in der Tabelle 7-1 zusammengefasst.

Modifikation des Matrixträgers	Interpolation	Verfahren	Material des Produkts	Begrenzungen	Potenzielle Anwendungen
Zusätzliche Spannrahmen mit quadratischen Stiften	Elastomer, Elvax, Bearbeitung	Strekziehen, Biegeumformen von Fein - und Mittelblech	Verschiedene Stallsorten, Aluminium	Stärke des Materials, Zeit zum verstellung einer großen Matrix	Flugzeugindustrie, Prototypenkarosseriebau
Keine	Keine, Silikon, Preprag, Thermoplast	Biegen, Vakuumformen von Platten	Verschiedene Kunststoffen	Auflösung, geometrische Teilfielfalt	Kleinserien - und Prototypenbau
Keine	Silikon, Preprag, Thermoplast	Gießen/Erzeugung von Gießwerkzeugen	Gips, Ton, Harz	Auflösung, geometrische Teilfielfalt	Prototypen - und Modelbau
Zusätzliche Spannrahmen mit quadratischen Stiften	Spannbearbeitung	Gießen/Erzeugung von Gießwerkzeuge	Gießbare Metallische Werkstoffe	Prozessdruck, Abkühlungsdauer	Gießen von Teilen in kleinen Serien
Sechs Spannrahmen mit quadratischen Stiften	Keine, Spannbearbeitung	Gießen	Gießbare Werkstoffe	Prozessdruck, Interpolation, Zeit zum Verstellen von sechs Matrizen	Gießen von Teilen in kleinen Serien
Zusätzliche Spannrahmen mit quadratischen Stiften /Kappen an der Gewindestiften/keine	Keine	Spannen	Breite Vielfalt von unsymetrischen Werkstücken	Auflösung	Fertigungslinien wo vielfältige Werkstücke hergestellt werden

Tabelle 7-1 Voraussichtliche Begrenzungen und potenzielle Anwendungen

Die Tabelle fasst zusammen, dass die formflexiblen Werkzeuge in der Mehrheit von möglichen Anwendungen Begrenzungen haben. Das verhindert, solche Lösungen in die Massenproduktion zu bringen. Die Begrenzungen betreffen entweder die vorgeschlagenen Werkzeuge, oder die Werkstücke, die mit diesen Werkzeugen hergestellt würden.

#### Begrenzungen der Werkzeuge

- Der erzeugte Druck an der Werkzeugoberfläche von Umformen oder Druckgießen ist begrenzt.
- Auflösung der Werkzeuge ist von der Größe der Stifte abhängig.
- Die Interpolation kann wegen des Prozessdrucks begrenzt sein.

- Die geometrische Genauigkeit der Werkzeuge kann dem konventionellen Verfahren sehr schwer gleichkommen.
- Der Zeit- und Kostenaufwand bei der Interpolation durch Bearbeitung der Abstufungen kann ungünstig sein.
- Die Anwendungsbereiche sind begrenzt, die formflexiblen Werkzeuge sind für Kleinserienbau viel besser geeignet als für eine Massenproduktion.

#### Begrenzungen der Werkstücke

- Die Vielfalt von hergestellten Teilen kann begrenzt sein.
- Die Oberflächenqualität ist für manche vorgeschlagene Verfahren begrenzt.
- Die geometrische Genauigkeit der Produkte kann die konventionellen Verfahren sehr schwer gleichkommen.
- Die Stärke des Materials ist für manche Verfahren begrenzt.

Wenn die Qualität der erzeugten Form begrenzt ist, ist eine Nachbearbeitung von der Werkzeugoberfläche oder eine Nachbearbeitung des Produkts nötig. Das formflexible Werkzeug könnte seine Aufgabe in den Bereichen von Prototypen- und Kleinserienbau sehr gut erfüllen. Der Ansatz in die Massenproduktion ist noch fraglich.

## 8 Zusammenfassung

Im Rahmen der Arbeit wurde ein material- und energieeffizientes flexibles Prototypenwerkzeugkonzept entwickelt und teilweise erprobt. Das Werkzeug soll hauptsächlich für die Herstellung von duroplastischen Gussteilen dienen. Am Anfang dieser Arbeit wurden die Ziele des Projektes und der Bereich der flexiblen Werkzeuge mit formverstellbarer Kontur kurz vorgestellt. Grundsätzliche Anforderungen an die Werkzeugkomponente aufgrund der gewünschten Anwendungen wurden beschrieben.

Im nächsten Teil der Arbeit wurde der Stand der Technik der flexiblen Prototypenwerkzeuge untersucht. Erst wurden die verschiedenen bisherigen Forschungsarbeiten und ihre Ergebnisse vorgestellt, dann wurde der Ansatz der flexiblen Werkzeuge in der Industrie nachgeforscht. Der letzte Schritt in der Untersuchung des Standes der Technik war die Patentrecherche.

Für die Entwicklung des formflexiblen Werkzeugs wurde eine methodische Vorgehensweise verwendet. Erst wurden die geforderten und gewünschten Anforderungen definiert. Die Gesamtfunktion des Werkzeugs wurde abstrahiert und die Elementarfunktionen wurden festgelegt. Für jede Elementarfunktion wurden mehrere Einzellösungen vorgeschlagen und mit der Hilfe von morphologischen Kasten sind fünf Lösungsvarianten entstanden. Der Vergleich der Lösungsvarianten wird nach ausgewählten Kriterien durchgeführt. Jedes Kriterium wurde gewichtet und die Lösungsvarianten wurden für die Kriterien bewertet. Die beste Bewertungsergebnisse bekam ein Matrixträger mit Gewindestiften, die Stifte sollen mit einer vakuumbefestigten Silikonmatte interpoliert werden. Die Matrix sollte mit einem Schrittmotor verstellt werden, der mit einem Linearführungssystem verkoppelt ist.

Es wurde ein Matrixträger mit 400 M8 Feingewindestiften konstruiert und hergestellt. Die Eingliederung in die Reaktions - Injektionsanlage und der Verstellmechanismus wurde beschrieben. Die voraussichtlichen Eigenschaften wurden geschätzt und konstruktive Maßnahmen gegen Verkippung der Stifte oder gegen Beschädigung der Interpolationsmatte sowie Manipulation mit dem Matrixträger vorgeschlagen.

Bevor das Werkzeug getestet wurde, wurde die Genauigkeit der Verstellung, die Zeitaufwändigkeit der Verstellung und die Größe der Verkippung der Stifte überprüft. Es wurden Versuchsabläufe für das Gießen von Duroplasten und das Umformen von Thermoplasten vorgeschlagen. Wegen des Standes des Projekts wurden aber nur Thermoformversuche durchgeführt. Der erste Schritt der Thermoformversuche war die

Auswahl von einem geeigneten Kunststoff. Es wurden vier Kunststoffe untersucht. Nach verschiedenen Kriterien und deren Bewertungen wurde Polyethyleneterephthalate Glycol (PETG) ausgewählt. Drei Testgeometrien am formflexiblen Werkzeug wurden eingesetzt und die Gegenstempel dazu gebaut. Die Erzeugung von einem Rechtwinkel, einer Halbkugel und drei zueinander senkrechten Flächen wurden mit zwei Stärken des Kunststoffs wiederholend realisiert. Die PETG Platten wurden in einem Ofen auf die thermoelastische Temperatur erwärmt, an der erzeugte diskrete Werkzeugoberfläche angelegt und mit dem Gegenstempel gepresst. Bei dem Verlauf des Umformprozesses wurde die Umformkraft geschätzt. Nach der Abkühlung der Formteile wurden verschiedene Eigenschaften betrachtet. Wegen der ausgelassenen Interpolation hatten die Formteile eine gute Seite, die im Kontakt mit dem Oberstempel waren, und eine schlechte Seite wo die Stifte Abdrücke hinterlassen haben. Es wurde die Oberflächenqualität der Formteile betrachtet, die Genauigkeit der erzeugten Winkel gemessen und es wurden auch die Biegeradien bewertet.

Das letzte Kapitel der Arbeit beschäftigt sich mit den potentiellen Erweiterungen und Anwendungen des formflexiblen Werkzeugs. Es wurde das Umformverfahren von Blechteilen und Kunststoff, Gießen von verschiedenen Werkstoffe sowie Einspannung von Werkstücken vorgeschlagen. Der Verstellmechanismus zusammen mit dem Gewindestiftmatrixträger hat mit einigen Modifikationen potenziell viele verschiedene Anwendungen.

Die nachfolgende Liste fasst die wichtigsten Ergebnisse die in der Arbeit erreicht wurden zusammen.

- Es gibt eine sehr hohe Anzahl von Patenten und Forschungsarbeiten aber nur einige Lösungen von formflexiblen Werkzeugen haben sich in der Industrie durchgesetzt.
- Die formflexiblen Werkzeuge sind am besten in den Fällen geeignet, wo die Teilgeometrie nicht sehr detailliert und die Teilevielfalt groß ist.
- Der Variantenentwicklung gemäß, gibt es mehrere Lösungen von den Elementarfunktionen und damit auch Lösungen des gesamten formflexiblen Werkzeuges.
- Ein Gewindestiftmatrixträger, erfüllt die Forderungen am besten, und ist eine problemlose und kostengünstige Lösung des formflexiblen Werkzeuges.

- Der Gewindestiftmatrixträger der mit einer Silikonmatte interpoliert wird, hat eine potentielle Anwendung bei dem RIM Verfahren, aber diese Voraussetzung muss noch geprüft werden.
- Der entwickelte Matrixträger kann sehr gut zum Thermoformen von PETG (Polyethyleneterephthalate Glycol) und auch anderen Kunststoffplatten dienen.
- Das System von Gewindestift Matrixträger hat potentiell viele Anwendungen. Es wurde festgestellt, dass es Begrenzungen in der Oberflächenqualität, der geometrischen Genauigkeit, der Auflösung und der Komplexität der Endprodukte gibt.
- Die Begrenzungen der Endprodukte verhindern einer Mehrheit von den vorgeschlagenen Anwendungen in die Massenproduktion einzudringen.
- Für Modellerstellung oder Kleinserienbau haben die formflexiblen Werkzeuge ein großes Potential.

## 9 Ausblick

In der Arbeit wurde ein formflexibles Gewindestiftwerkzeug entwickelt und mit den Thermoformversuchen überprüft. Die ersten Ergebnisse mit dem Thermoformen waren sehr gut, trotzdem gibt es einige Herausforderungen:

- Entwicklung eines Oberstempels mit einer Führung. Der Oberstempel könnte ein zweiter Matrixträger sein, oder ein leichtbearbeitetes Material.
- Kompensationsmethode zum Eliminieren der unregelmäßigen Abkühlung des Formteils. Die Kompensation könnte durch entsprechende Umstellung der Stifte erreicht werden, oder durch eine zusätzliche Kühlung oder Erwärmung der Formteile während des Abkühlungsprozesses.
- Auswahl von einer entsprechenden Interpolationsschicht zur Vermeidung der Abdrücke von den Köpfen der Stifte.

Der Versuchsplan des Reaktions-Injektionsformens wurde vorgeschlagen aber nicht durchgeführt. Durch die ersten Versuche wurden Probleme aufgedeckt, die nachher gelöst werden müssen, wie zum Beispiel:

- Unzuverlässige Interpolation, eine kurze Lebensdauer des Interpolators, oder Riss der Interpolationsmatte könnte eintreten. In diesem Fall müsste eine neue Interpolationsmethode entwickelt werden.
- Realisierung der Einführung und Entlüftungskanäle
- Dichtigkeit des ganzen Werkzeugs

Nach der erfolgreichen Überprüfung des RIM Verfahrens, um vielfältigere Formteile herzustellen, könnte ein neues Werkzeug mit einer besseren Auflösung und einer größeren Arbeitsfläche gefertigt werden. Wie zum Beispiel ein dreieckig angeordneter M6 Gewindestiftmatrixträger.

Aufgrund der vorgeschlagenen Anwendungen könnten auch neue Projekte entstehen. Einige Vorschläge könnten sich mit relativ kleinen Modifikationen des Gewindestiftmatrixträgers für andere Anwendungen sehr gut eignen. Zum Beispiel für positive Vakuumformen würde nur ein Rahmen für den Matrixträger, ein Spannrahmen zur Befestigung des Kunststoffes, ein Erwärmungsmechanismus und eine Vakuumanlage nötig sein. Auf der anderen Seite das vorgeschlagene universelle Gusswerkzeug mit sechs Stiftrahmen braucht noch viel Forschungs- und Entwicklungszeit.

## Literaturverzeichnis

- [1] Leischnig, S.: Entwicklung und Implementierung eines flexiblen Prototypen-Werkzeugs für die Herstellung duroplastischer Teile aus faserverstärkten Kunststoffen, Ausgangssituation, 2011
- [2] Strümpel, F.; Palik, M.; Söchtig, W.: Von Reaktionstechnik bis Spritzgießen—Die passende Werkstoff- und Verfahrenstechnik für Ihre Anwendung. Tagungsband, 9. Internationale AVK-Tagung, Essen, September 2006, S. 71-79
- [3] Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer matrix, Berlin, Springer - Verlag, 1999, ISBN 978-3-642-58371-1
- [4] Throne, J.: Understanding thermoforming, München, Hanser - Verlag, 2008, ISBN 978-3-446-40796-1
- [5] SubTech (Substances&Technologies): free and open knowledge source in Materials Engineering. 15.9.2013,  
[http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermoforming#vacuum\\_thermoforming](http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=thermoforming#vacuum_thermoforming)
- [6] Nakajima, N.: A newly developed technique to fabricate complicated dies and electrodes with wires, The Japan Society of Mechanical Engineers, 1969, Vol. 54, P. 1546-1554
- [7] Munro, C.; Walczyk, D.: Reconfigurable pin-type tooling: a survey of prior art and reduction to practice, Journal of manufacturing science and engineering, 2007, Vol. 129, P. 551-565
- [8] Robinson, R.: Design of an automated variable configuration die and press for sheet metal forming, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1987
- [9] Eigen, G.: *Smoothing methods for discrete die forming*, Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1992
- [10] Kleespies, S.; Crawford R.: Vacuum forming of compound curved surfaces with a variable geometry mold, Journal of manufacturing systems, 1998, Vol. 17, P. 325-337
- [11] Walczyk, D.; Lakshmikanthan, J.; Kirk, J.: Development of a reconfigurable tool for forming aircraft body panels, Journal of manufacturing systems, 1998, Vol. 17, P. 287-296
- [12] Walczyk, D.; Hardt, D.: Design and analysis of reconfigurable discrete dies for sheet metal forming, Journal of Manufacturing Systems, 1998, Vol. 17, P. 436-454
- [13] Im, Y.; Walczyk, D.; Schwarz, R. et al.: A comparison of pin actuation schemes for large-scale discrete dies, Journal of Manufacturing Processes, 2000, Vol. 2, P. 247-257
- [14] Walczyk, D.; Hosford J.; Papazian, J.: Using reconfigurable tooling and surface heating for incremental forming of composite aircraft parts, Journal of manufacturing science and engineering, 2003, Vol. 125, P. 333-343

- 
- [15] Bartolo, P. et al.: Virtual and Rapid Manufacturing: Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, London, publishing company – Taylor & Francis group, 2007
- [16] Owodunni, O.; Diaz-Rozo J.; Hinduja.: Development and Evaluation of a Low-Cost Computer Controlled Reconfigurable Rapid Tool, Computer-Aided Design and Applications, 2004, Vol. 1, P. 101-108
- [17] Kirby, A.; Stauffer, L.: Analysis of pin characteristics for a variable geometry mold, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, Vol. 32, P. 698-704
- [18] Liu, Ch.; Li, M.; Fu, W.: Principles and apparatus of multi-point forming for sheet metal, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, Vol. 35, P. 1227-1233
- [19] Cook, N.; Smith, G.; Britnell, D.: An investigation and analysis of 'headers' in a high-fidelity pin-tool matrix, Journal of Manufacturing Processes, 2008, Vol. 10, P. 34-39
- [20] Hagemann, F.: Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen, München, Herbert Utz - Verlag, 2009
- [21] Wang, Z.: Rapid manufacturing of vacuum forming components utilizing reconfigurable screw pin tooling, PhD Thesis, University of Nottingham, 2010
- [22] Koc, B.; Thangaswamy, S.: Design and analysis of a reconfigurable discrete pin tooling system for molding of three-dimensional free-form objects, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, Vol. 27, P. 335-348
- [23] Peters, B.: Design and fabrication of a digitally reconfigurable surface, Bachelor Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011
- [24] Paul, A.; Gallagher J.; Cipra, R.; et al.: Robotic manufacturing of near-net-shape components utilizing stereo imaging and reconfigurable tooling, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, Vol. 63, P. 999-1009
- [26] Oesterle, S.; Vansteenkiste, A.; Mirjan, A.: Zero Waste Free-Form Formwork, International society of fabric forming, 2012
- [27] Matrix GmbH: Katalog des Matrix X-CLAMP Produktionsreihe, 5.9.2013, [http://www.matrix-innovations.com/pdfs/X-Clamp\\_LR\\_EN.pdf](http://www.matrix-innovations.com/pdfs/X-Clamp_LR_EN.pdf)
- [28] Chritian Bewer GmbH: Katalog des Pintec Produktionsreihe, 5.9.2013, <http://www.pintec.de/images/bewer/download/Bewer-PINTEC.pdf>
- [29] Texas Machine-Tool International, LLC: Broschüre des Unternehmens, 5.9.2013, <http://www.infinitetool.com/wp-content/uploads/2011/07/ITS%20Flexible%20Tooling%20System%20Brochure.pdf>
- [30] Optimal Forming Solutions, B.V.: Web Seite der Firma, 5.9.2013, <http://www.optimalforming.com/www.optimalforming.com/wsdindex.html>

- [31] Halford, B.: Tooling System, U.S. Patent No. 7726167, 1.6. 2010
- [32] Halford, B.: Reconfigurable workpiece support, U.S. Patent No. 7901166, 8.3.2011
- [33] North Sails Group, LLC.: Web Seite der Firma, 5.9.2013, <http://uk.northsails.com>
- [34] Walters, T.: Press, U.S. Patent No. 2334520, 16.11.1943
- [35] Pinson, G.: Apparatus for forming sheet metal, U.S. Patent No. 4212188, 15.7.1980
- [36] Elkins, E.: Die for spring forming machines, U.S. Patent No. 1331630, 24.2.1920
- [37] Humprey, D.: Mold forming device, U.S. Patent No. 3596869, 3.8.1971
- [38] Hoffman, P.: Conformable tool, U.S. Patent No. 5168635, 8.12. 1992
- [39] Morita, M.: Leaf spring cambering method and apparatus, U.S. Patent No. 5187969, 23.2.1993
- [40] Umetsu, S.; Miura T.: Variable mold apparatus, U.S. Patent No. 5192560, 9.3.1993
- [41] Shevchuk, G.: Quick mold prototyping, U.S. Patent No. 5914081, 22.6.1999
- [42] Berteau, J.: Variable-shape mold, U.S. Patent No. 5330343, 19.7.1994
- [43] Schroeder, Thaddeus, and Robin Stevenson. "Surface generating device suitable for generating a die, mold or fixture surface." U.S. Patent No. 5,513,972. 7 May 1996.
- [44] Schroeder, T.; Stevenson, R.: Device for generating a fixture, U.S. Patent No. 5738345, 14.4.1998
- [45] VDI 2222: Konstruktionsmethodik – Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf: VDI – Verlag, 1997
- [46] Pahl,G.; Beitz, W.; Feldhusen, J. et al.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung, Berlin, Heidelberg, Springer – Verlag, 2006, ISBN 3540220488
- [47] Gerhard, E.: Entwickeln und Konstruieren mit System: ein Handbuch für Praxis und Lehre, Expert - Verlag, 1998, ISBN 3816914527
- [48] Bayer, Polycarbonat Datenblatt, 8.10.2013,  
<http://www.stegplatten.info/pdf/montage/technischer-berater-makrolon-gp.pdf>
- [49] QUINN, PETG Datenblatt, 8.10.2013,  
<http://pdf.joergkueper.de/quinn-petg-datenblatt.pdf>
- [50] QUINN, PMMA Datenblatt, 8.10.2013,  
<http://pdf.joergkueper.de/quinn-xt-datenblatt.pdf>
- [51] Fritz, A.; Schulze, G.: Fertigungstechnik, Berlin, Heidelberg, Springer – Verlag, 2010

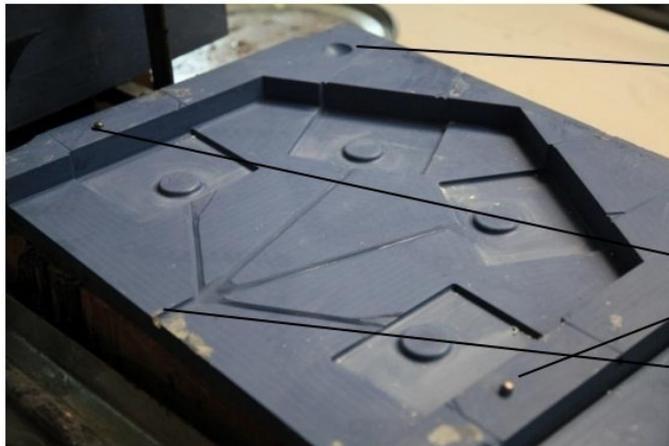
## Anlagenverzeichnis

- Anlage 1      Vorführung des RIM Verfahrens bei VOITH Engineering Service GmbH
- Anlage 2      Übersicht der Patente auf dem Gebiet „Flexible Werkzeuge“
- Anlage 3      Bewertungen von Kriterien und Lösungen
- Anlage 4      Simulation des Verformungsverhaltens einer Grundplatte
- Anlage 5      Simulation des Verformungsverhaltens einer Silikonmatte
- Anlage 6      Messdaten der Vorversuche
- Anlage 7      Die RIM Testgeometrie
- Anlage 8      Bewertung für Materialauswahl
- Anlage 9      Messergebnisse des Thermoformens

# Anlage 1

Vorführung des RIM Verfahrens bei VOITH

- Das aus der Kunststoff ausgefräste Unterteil der Form



Halbkugelförmige Vertiefung

Stifte zur Fixierung

Einspritzöffnung

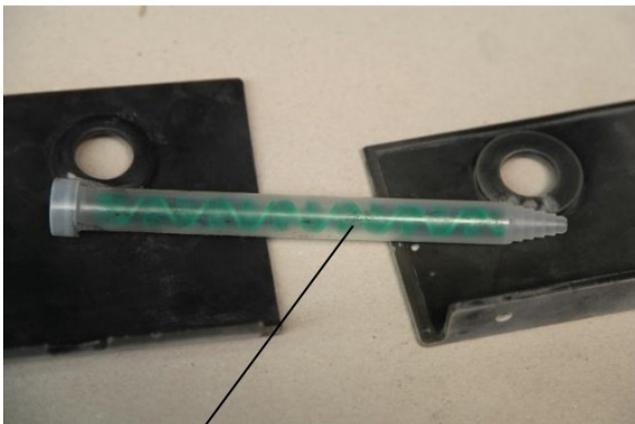
- Verwendung der Form



Ober- und Unterteil der Form, mit Schraubzwingen fest verspannt

Etwas austretendes Gemisch (Überlauf) als Zeichen für gefüllte Form

- Die Gussteile mit der Einspritzdüse



Einspritzdüse mit Förderschnecke

# Anlage 2

Übersicht

Der Patente auf dem Gebiet „Flexible Werkzeuge“

Veröffentlichungsnummer	Titel	Anmelder	Veröffentlichungsdatum
483,094	Machine for bending and forming springs	E.W. Ansted	20.9.1892
1,331,630	Die for spring forming machines	L.F.Elkins	24.2.1920
1,465,152	Spring forming device	C.J.Williams et al.	14.8.1923
1,826,783	Process and apparatus for manufacturing anatomically accurate individual foot supporting shoes	F.Hess	13.10.1931
2,280,359	Sheet metal forming apparatus	C.P.Trudell	21.4.1942
2,334,520	Press	T.Walters	13.11.1943
2,332,360	Die and Method of making same	W.H.Wakefield	19.10.1943
2,446,487	Hood and fender jig	J.F.O'Kelley	3.8.1948
2,783,815	Forming machine	J.E. Tegarden	5.3.1957
2,968,838	Three-dimensional die	A.A.hicks	24.1.1961
3,559,450	Incremental die construction having a hole piercing capability	F.E.Whitacre	2.2.1971
3,596,869	Mold forming device	David H. Humprey	3.8.1971
4,200,272	Holder for irregularly shaped articles	Bcira	29.4.1980
4,212,188	Apparatus for forming sheet metal	The Boing Company	15.7.1980
4,309,824	Method asn an arrangement for producing a curved sail	Alfred Fuchs	12.1.1982
4,527,783	Universal contoured parts holding fixture	Grumman Aerospace Corporation	9.7.1985
4,654,989	Vertical three-dimensional image screen	Ward Fleming	7.4.1987
4,684,113	Universal holding fixture	The Boing Company	4.8.1987
4,731,144	Method of shaping an antenna panel	Harris Corporation	15.3.1988
4,936,560	Workpiece-support assembly for automatic machining lines	Gian P.Barrozi	26.6.1990
5,151,277	Reconfigurable fiber-forming resin transfer system	The Charles Stark Draper Lab.,Inc.	29.9.1992

Veröffentlichungsnummer	Titel	Anmelder	Veröffentlichungsdatum
5,168,635	Conformable tool	McDonnell Douglas Corporation, St.	8.12.1992
5,187,969	Leaf spring cambering method and apparatus	Morita and Company Co. Ltd.	23.2.1933
5,192,560	Variable mold apparatus	Canon Kabushiki Kaisha	9.3.1993
5,253,176	Apparatus and method for producing variable configuration die	Nissan Motor Co.,Ltd.	12.10.1993
DE 4339102 A1	Handhabungsvorrichtung	Sehrt	1.6.1994
5,330,343	Variable-shape mold	Autocontrole Inc.	19.7.1994
5,513,972	Surface generating device suitable for generating a die, mold or fixturing surface	General Motors Corporation	7.5.1996
5,546,784	Adjustable form die	Grumman Aerospace Corporation	20.8.1996
5,722,646	Flexible tooling apparatus	CNA Manufacturing Systems, Inc.	3.3.1998
5,738,345	Device for generating fixture	General Motors Corporation	14.4.1998
5,796,620	Computerized system for lost foam casting process using rapid tooling set-up	Cleveland Advanced Manufacturing Program	18.8.1998
5,846,464	Method for forming composite parts using reconfigurable modular tooling	McDonnell Douglas Corporation, St.	8.12.1998
5,941,081	Quick mold prototyping	Lucent Technologies Inc.	22.6.1999
5,954,175	Modularized parallel drivetrain	Northrop Grumman Corporation	21.9.1999

<b>Veröffentlichungsnummer</b>	<b>Titel</b>	<b>Anmelder</b>	<b>Veröffentlichungsdatum</b>
5,984,293	Apparatus for holding printed circuit board assemblies in manufacturing processes	MCMS Inc.	16.11.1999
6,012,314	Individual motor pin module	Northrop Grumman Corporation	11.1.2000
6,053,026	Block-set form die assembly	Northrop Grumman Corporation	25.6.2000
6,089,061	Modularized reconfigurable heated forming tool	Northrop Grumman Corporation	18.7.2000
6,209,188 B1	Flexible tooling Method	CNA Manufacturing Systems, Inc.	3.6.2001
6,298,896	Apparatus for constructing a composite structure	Northrop Grumman Corporation	9.10.2001
6,209,380 B1	Pin tips assembly in tooling apparatus for forming honeycomb cores	Northrop Grumman Corporation	3.4.2001
6,354,561 B1	Adjustable casting mould and device for adjusting the mould surface thereof	Otmar Fahrion	12.3.2002
6,363,767 B1	System and method for forming sheer metal using a reconfigurable tool	Northrop Grumman Corporation	2.4.2002
6,484,776 B1	System for constructing a laminate	Northrop Grumman Corporation	26.11.2002
6,761,785 B2	Methode for constructing a composite structure	Northrop Grumman Corporation	13.7.2004
6,702,272 B2	Compliant locking support fixture	Airline Hydraulics Corp.	9.3.2004
6,578,399 B1	Single-die modularized reconfigurable honeycomb core forming tool	Northrop Grumman Corporation	17.6.2003
US 7,125,010 B2	Work piece holding arrangement	Rolls-Royce plc	24.10.2006
WO 2008/004858 A1	Discrete die	Broers	10.1.2008

<b>Veröffentlichungsnummer</b>	<b>Titel</b>	<b>Anmelder</b>	<b>Veröffentlichungsdatum</b>
US 7,703,190 B2	Tooling system and method	Surface Generation Limited	27.4.2010
US 7,726,167 B2	Tooling system	Surface Generation Limited	1.6.2010
US 7,901,166 B2	Reconfigurable workpiece support	Surface Generation Limited	8.3.2011
US 7,997,891 B2	Molding processes and tool therefor	Purdue Research Foundation	16.8.2011
US 8,057,206 B1	Reconfigurable tooling using variable stiffness material	HRL Laboratories, LLC	15.11.2011
US 8,079,578 B2	Universal holding fixture	HGS Aerospace, Inc.	20.12.2011
US 8,128,077 B2	Reconfigurable tooling system for supporting a workpiece	Surface Generation, Ltd.	6.3.2012

# Anlage 3

Bewertungen von Kriterien und Lösungen



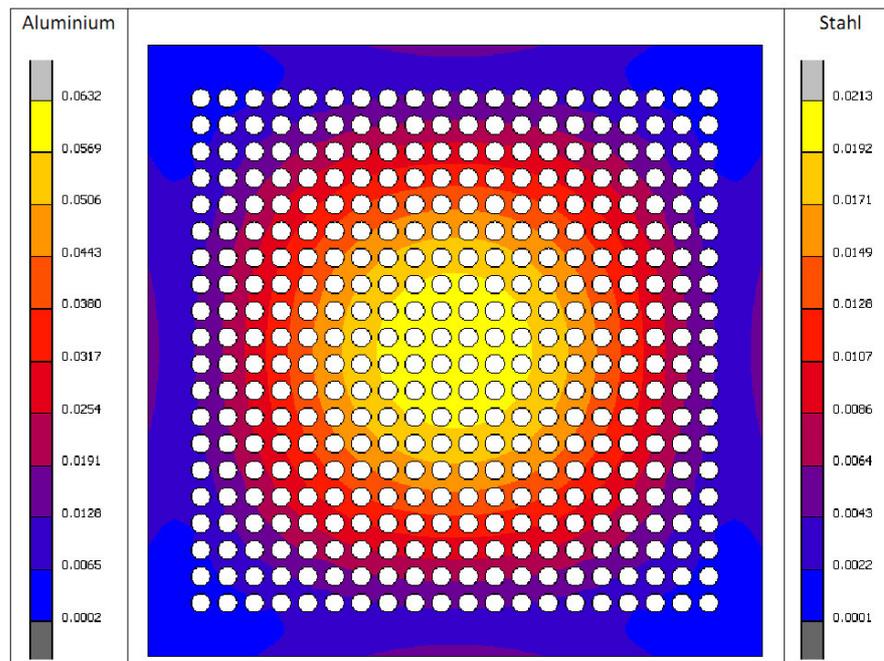
Evaluation Kriterien		Gewichtung der Kriterien									
		Variante 1	Variante 1 gewichtet	Variante 2	Variante 2 gewichtet	Variante 3	Variante 3 gewichtet	Variante 4	Variante 4 gewichtet	Variante 5	Variante 5 gewichtet
Werkzeug	Preis des ganzen Werkzeuges	2	3,80	3	5,70	0	0,00	4	7,60	2	3,80
	Durchführbarkeit der gesamten Lösung	1	5,24	2	10,48	1	5,24	4	20,95	3	15,71
	Durchführbarkeit der Interpolation (glatte Oberfläche des Formteiles)	3	18,57	2	12,38	3	18,57	3	18,57	3	18,57
	Wiederverwendbarkeit der Interpolationsmatte	3	7,14	1	2,38	3	7,14	3	7,14	3	7,14
	Dichtheit des Werkzeuges (RIM)	3	7,14	3	7,14	3	7,14	3	7,14	3	7,14
	Fest, sicher und stabile Klemntechnik	2	15,24	2	15,24	3	22,86	4	30,48	3	22,86
	Beständigkeit gegen verschiedene technologische Temperaturen	3	10,00	3	10,00	2	6,67	3	10,00	2	6,67
	Größe der Stiften (Auflösung)	3	22,86	3	22,86	1	7,62	1	7,62	2	15,24
	Möglicher Ansatz für andere Anwendungen	2	13,33	2	13,33	3	20,00	3	20,00	3	20,00
	Genauigkeit der Stellmechanik	2	16,19	1	8,10	3	24,29	4	32,38	3	24,29
	Begrenzung des Hubs	2	3,81	3	5,72	3	5,72	3	5,72	3	5,72
	Ansprüche für Regelung	2	2,86	2	2,86	0	0,00	3	4,29	2	2,86
	Vakuum Ansatz möglich	2	9,52	0	0,00	4	19,05	4	19,05	4	19,05
	Ansprüche für Energie	3	0,00	2	0,00	1	0,00	3	0,00	0	0,00
	Kontrollmöglichkeiten (in-situ, direkte Nachmessung) LASER	2	10,48	3	15,71	2	10,48	3	15,71	2	10,48
Prozess	Erzeugung von Linien (Seitenansicht+ Draufsicht)	3	18,57	3	18,57	2	12,38	1	6,19	2	12,38
	Erzeugung von Radien (Seitenansicht + Draufsicht)	3	17,14	3	17,14	2	11,43	1	5,71	2	11,43
Produkt	Zeit für den Verstellzyklus (ein Stoßel, ganze Matrix)	3	4,29	2	2,86	4	5,72	3	4,29	2	2,86
	Abkühlungsdauer (RIM, Thermouniformen)	2	6,67	2	6,67	2	6,67	3	10,00	2	6,67
	Auflösung und Komplexität des Produkts	3	27,14	3	27,14	2	18,10	1	9,05	2	18,10
	Qualität der Oberfläche (Welligkeit, Details) von oben und an Seiten	2	19,05	3	28,57	2	19,05	1	9,52	1	9,52
Summe			239		233		228		251		240

# Anlage 4

Simulation des Verformungsverhaltens einer Grundplatte

- FEM Simulation der Durchbiegung der Grundplatte (230 mm x 230 mm x 28 mm) bei Druck von 5 bar

2 Varianten für Material / Stahl

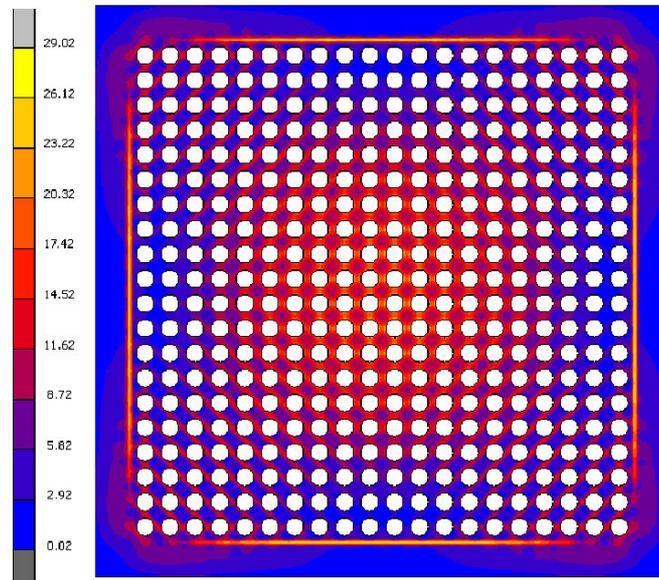


Maximale Axialverformung:

Aluminiumplatte: 63  $\mu\text{m}$

Stahlplatte: 21  $\mu\text{m}$

- Spannung in der belastete Grundplatte:

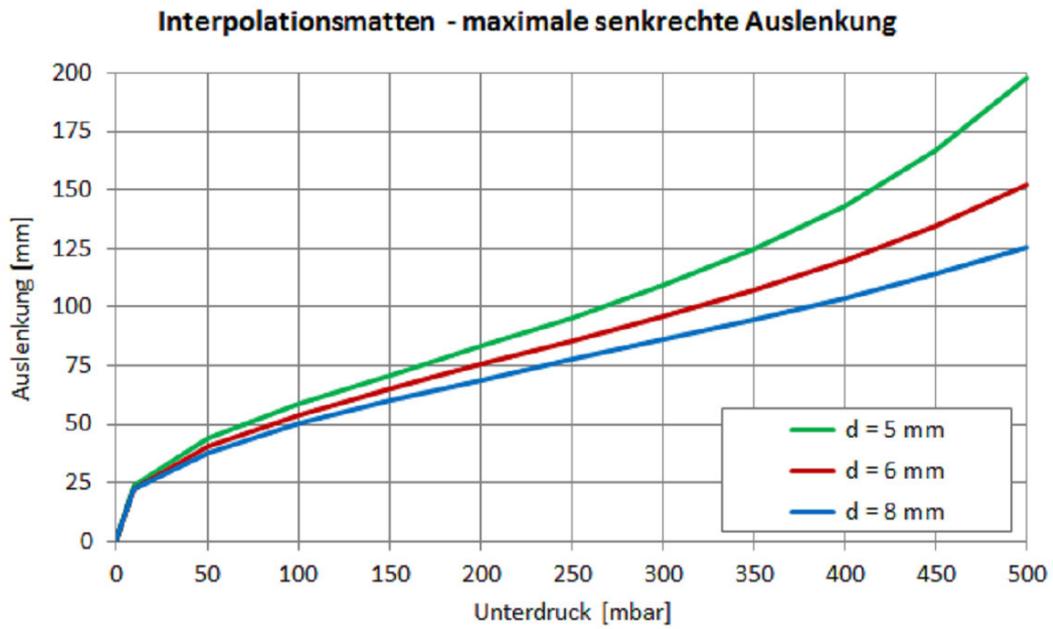


Spannungsmaximum bei ca. 30 N/mm<sup>2</sup> - unkritischer Wert

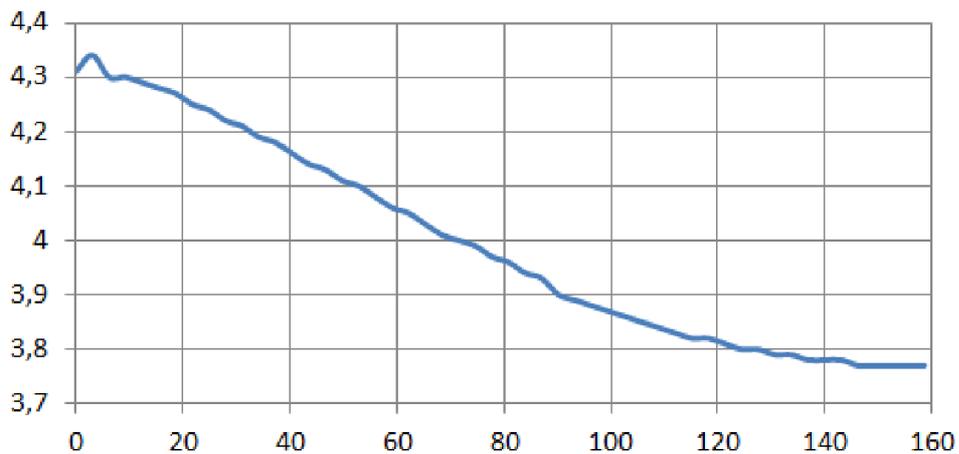
# Anlage 5

Simulation des Verformungsverhaltens einer Silikonmatte

- Auslenkung der Silikonmatten von verschiedener Stärke ohne Unterstützung von Stiften



- Verjüngung der 6 mm Silikonschicht mit Shore-Härte 40 ohne Unterstützung von Stiften



# Anlage 6

Messdaten der Vorversuche

- Genauigkeit des Messsystems

Messung	Höhe 1	Höhe 2	Höhe 3
1	13,06	35,35	45,89
2	13,06	35,35	45,89
3	13,05	35,36	45,89
4	13,05	35,36	45,88
5	13,06	35,37	45,89
6	13,06	35,36	45,89
7	13,05	35,36	45,88
8	13,06	35,37	45,89
9	13,05	35,36	45,89
10	13,06	35,36	45,88
11	13,05	35,37	45,89
12	13,05	35,37	45,89
13	13,06	35,36	45,88
14	13,05	35,36	45,89
15	13,06	35,36	45,87
16	13,06	35,43	45,89
17	13,05	35,42	45,88
18	13,05	35,43	45,88
19	13,07	35,43	45,89
20	13,06	35,43	45,88

Mittelwert	13,056 mm	35,378 mm	45,886 mm
Standardabweichung	0,0280 mm	0,0057 mm	0,0058 mm

- Genauigkeit der Verstellung

Die Sollwerte: 1,00 mm; 15,50 mm; 28,25 mm; 40,05 mm; 49,99mm

Messung	Höhe 1	Höhe 2	Höhe 3	Höhe 4	Höhe 5
1	0,90	15,40	28,10	39,87	49,79
2	0,84	15,35	28,22	40,07	49,92
3	0,77	15,27	28,10	39,88	49,84
4	0,70	15,20	27,97	39,88	50,16
5	0,73	15,34	28,03	39,95	49,92
6	0,65	15,33	27,97	39,82	49,79
7	0,63	15,34	28,03	39,95	49,79
8	0,71	15,34	28,03	39,88	49,79
9	0,71	15,21	28,02	39,81	49,86
10	0,71	15,26	28,10	39,70	49,78
11	0,76	15,27	27,97	39,81	49,79
12	0,77	15,15	28,03	39,83	49,85
13	0,64	15,20	28,11	39,76	49,99
14	0,84	15,21	28,02	39,82	49,79
15	0,79	15,15	28,02	39,83	50,12
16	0,70	15,33	28,04	39,88	49,99
17	0,64	15,21	28,04	39,75	50,12
18	0,60	15,27	28,00	39,81	49,86
19	0,77	15,15	28,16	39,76	49,86
20	0,69	15,21	28,15	39,96	49,98

Mittelwert	0,728 mm	15,260 mm	28,056 mm	39,851 mm	49,899 mm
Standardabweichung	- 0,2725 mm	-0.2405 mm	-0,1945 mm	-0,1990 mm	-0,0905 mm

- Messwerten von Verkippung 20 ausgewählte Stiften

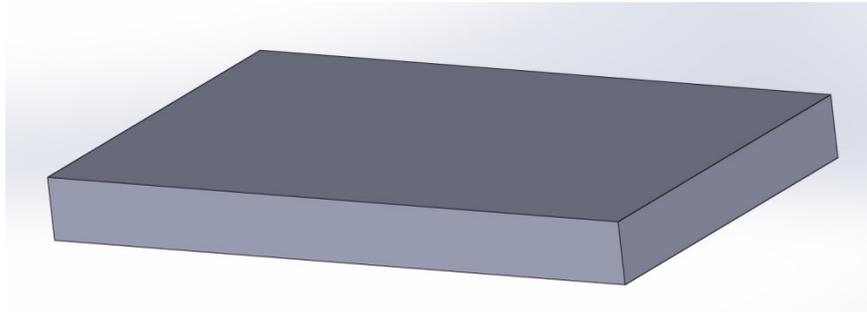
Messung	Wert
1	2,0
2	2,1
3	1,8
4	2,0
5	2,2
6	1,9
7	2,0
8	2,3
9	2,1
10	1,8
11	1,9
12	2,0
13	1,8
14	2,1
15	2,0
16	2,0
17	1,8
18	1,9
19	2,2
20	2,3

Mittelwert 2,01 mm

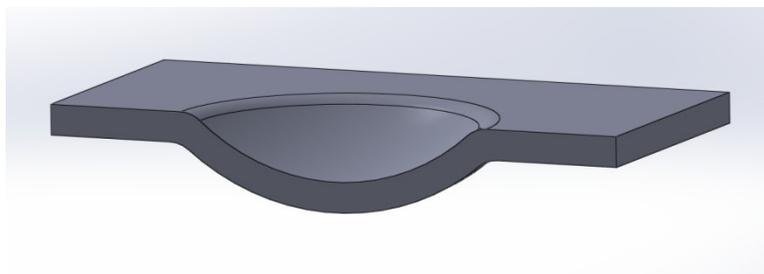
# Anlage 7

RIM Testgeometrie

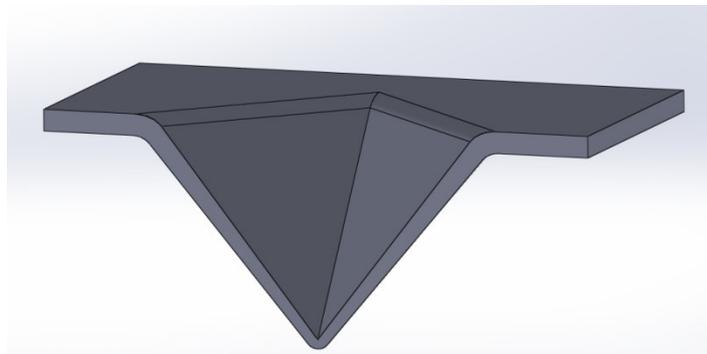
① „Platte“



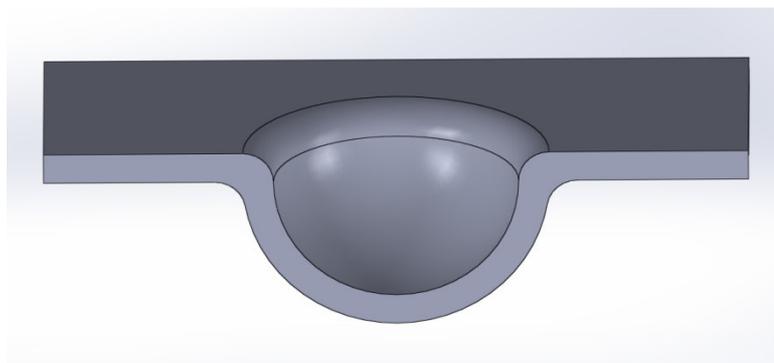
② „Schale“



③ „stehender Würfel“



④ „Halbkugel“



# Anlage 8

Bewertung für Materialauswahl

Stärke von dem Material	Material	Erwärmung	Auflegen an die Form	Kraft zum Verformung	Geometrie nach Abkühlung	Summe
3 mm	Polycarbonat	0	2	2	1	5
	PETG	3	4	4	3	14
	Acryl	2	3	2	2	9
	PE	1	1	3	1	6
4 mm	Polycarbonat	0	1	1	0	2
	PETG	3	4	4	3	14
	Acryl	2	2	2	2	8
5 mm	Polycarbonat	0	1	1	0	2
	PETG	3	3	3	3	12
	Acryl	2	2	1	2	7

# Anlage 9

Messergebnisse des Thermoformens

- Erzeugung von einem flächigen Teil mit einem Rechtwinkel

### 3 mm Platten

Versuch	Der gemessene Winkel	Der Unterschied
1	88,4°	1,6°
2	88,9°	1,1°
3	89,2°	0,8°
4	88,8°	1,2°
5	89°	1,0°
Der Mittelwert	88,86°	1,14°/-1,026 %

### 5 mm Platten

Versuch	Der gemessene Winkel	Der Unterschied
1	88,1°	1,9°
2	87,4°	2,6°
3	88,3°	1,7°
4	87,5°	2,5°
Der Mittelwert	87,83°	2,17°/-1,953 %



- Erzeugung von einem Teil mit drei zueinander senkrechten Flächen (erste Versuch)

$\alpha$ .....Winkel zwischen Flächen A und B

$\beta$ .....Winkel zwischen Flächen B und C

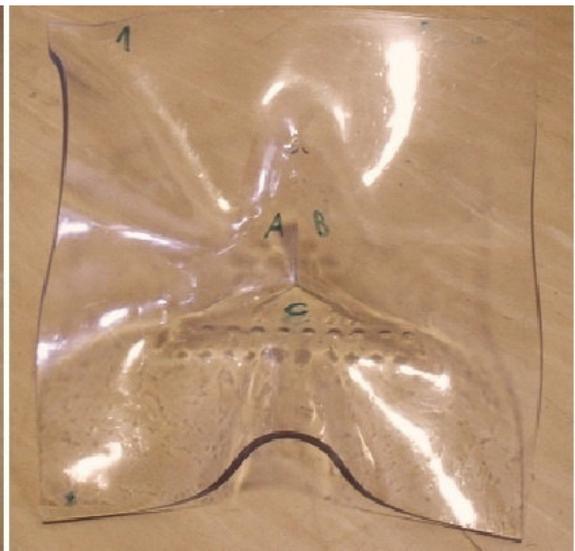
$\gamma$ ..... Winkel zwischen Flächen C und D

### 3 mm Platten

Versuch	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\beta$	$\Delta\beta$	$\gamma$	$\Delta\gamma$
1	98,9°	8,9°	91,5°	1,5°	91,0°	1,0°
2	96,1°	6,1°	92,7°	2,7°	90,9°	0,9°
3	92,3°	2,3°	92,1°	2,1°	90,9°	0,9°
4	96,4°	6,4°	92,1°	2,1°	91,1°	1,1°
5	92,5°	2,5°	92,4°	2,4°	90,7°	0,7°
Mittelwert	95,24°	5,24°/4,716%	92,16°	2,16°/1,944 %	90,92°	0,92°/0,828 %

### 5mm Platten

Versuch	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\beta$	$\Delta\beta$	$\gamma$	$\Delta\gamma$
1	92,7°	2,7°	91,4°	1,4°	92,0°	2,0°
2	91,5°	1,5°	90,3°	0,3°	92,1°	2,1°
3	92,5°	2,5°	92,5°	2,5°	92,3°	2,3°
Mittelwert	92,23°	2,23°/2,01 %	91,40°	1,40°/1,260 %	92,13°	2,13°/1,917 %



- Erzeugung von einem kugelförmigen Teil

Versuch	3 mm Platten	5 mm Platten
1	45,9 mm	48,7 mm
2	46,5 mm	40,2 mm
3	46,6 mm	40,8 mm
4	47,0 mm	44,2 mm
Der Mittelwert	46,50 mm	43,48 mm



- Erzeugung von einem Teil mit drei zueinander senkrechten Flächen (zweite Versuch)

### 3 mm Platten

Versuch	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\beta$	$\Delta\beta$	$\gamma$	$\Delta\gamma$
1	94,4°	4,4°	90,9°	0,9°	91,4°	1,4°
2	94,7°	4,7°	90,7°	0,7°	91,2°	1,2°
3	94,7°	4,7°	90,9°	0,9°	92,1°	2,1°
4	94,5°	4,5°	91,7°	1,7°	91,5°	1,5°
5	96,3°	6,3°	91,2°	1,2°	91,4°	1,4°
Mittelwert	94,92°	4,92°/4,428 %	91,08°	1,08°/0,972 %	91,52°	1,52°/1,368 %

### 5mm Platten

Versuch	$\alpha$	$\Delta\alpha$	$\beta$	$\Delta\beta$	$\gamma$	$\Delta\gamma$
1	94,7°	4,7°	91,7°	1,7°	91,2°	1,2°
2	93,1°	3,1°	91,3°	1,3°	92,1°	2,1°
3	93,9°	3,9°	91,6°	1,6°	91,5°	1,5°
Mittelwert	93,90°	3,90°/ 3,510 %	91,53°	1,53°/1,377 %	91,60°	1,60°/1,440 %



# Inhalt des Datenträgers

<b>Ordner</b>	<b>Beschreibung</b>
Ausarbeitung	Masterarbeit in Textform
Multimedia	
Bilder	Abbildungen der Masterarbeit
Tabellen	Tabellen der Masterarbeit
Patente	aufgeführte Patenten