

# Spanntechnik für die Mikrofertigung

Form- und stoffschlüssiges Spannen durch Gefrieren

Jens P. Wulfsberg, Jörg Lehmann

Prof. Dr.-Ing. Jens P. Wulfsberg, Dipl.-Ing. Jörg Lehmann  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik  
Laboratorium Fertigungstechnik  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
Tel.: 040 / 6541 – 2720 oder – 2610  
Fax: 040 / 6541 – 2839  
e-Mail: [Jens.Wulfsberg@UniBw-Hamburg.de](mailto:Jens.Wulfsberg@UniBw-Hamburg.de) oder [Joerg.Lehmann@UniBw-Hamburg.de](mailto:Joerg.Lehmann@UniBw-Hamburg.de)  
Internet: <http://laft.unibw-hamburg.de>

## Inhalt

Die Übertragung konventioneller kraftschlüssiger Spannverfahren auf die Mikrofertigung bereitet Probleme, weil es zu Spannfehlern und Werkstückschädigungen kommt. Abhilfe schaffen hier Verfahren, die auf mehreren physikalischen Prinzipien beruhen. Hierzu zählen Kombinationen aus Form-, Kraft- und Stoffschluss. Vorgestellt wird deshalb ein kraft-/formschlüssiges Spannverfahren, das auf der Gefriertechnik beruht.

## Abstract

Conventional clamping technologies which are based on the application of clamping forces to the workpiece are causing problems in the field of micro manufacturing. The reason are positioning errors and workpiece damages. This can be avoided by the application of clamping technologies which are using more than one physical principle. This is the reason for the development of a new fixturing device based on the freezing technologie which is clamping the workpiece by adhesion and additional supporting mechanical stops.

## 1. Einführung

Für den Aufbau hybrider Mikrosysteme ist die Fertigung von Einzelteilen, die oftmals kleiner als ein Millimeter sind, notwendig. Hierzu wurden in Anlehnung an die Hauptgruppen der Fertigungsverfahren in DIN 8580 bereits Formgebungsverfahren entwickelt, deren Auflösung und Genauigkeit den Anforderungen zur Herstellung von Geometrielementen im Bereich von wenigen 1/10 mm mit Toleranzen von 1/100 mm und weniger gerecht werden [1, 2, 3]. Dabei hat die Werkstückspanntechnik einen wesentlichen Einfluss auf das Arbeitsergebnis. In Bild 1 sind die wichtigsten Anforderungen an Spannsysteme für Mikroteile zusammengefasst. Hervorzuheben ist hier insbesondere die Flexibilität der Spannsysteme, die gerade für die Herstellung von Einzelteilen mit komplexen Geometrien benötigt wird, wie sie z.B. in der Sensortechnik oder Medizintechnik benötigt werden. Hierunter ist insbesondere eine Mehrseitenbearbeitung und Komplettbearbeitung von Mikroteilen zu verstehen. Ziel ist die Herstellung echter 3D-Geometrien, die sich deutlich von den in der Mikrosystemtechnik typischen  $2^{1/2}$ D-Strukturen unterscheiden. Ein weiteres Kriterium betrifft die Forderung, das Mikroteil durch den Spannvorgang selbst nicht zu beschädigen, d.h. in der Regel lokale Spannkraftspitzen zu vermeiden.



**Bild 1:** Anforderungen an die Spanntechnik für Mikroteile

## 2. Spannverfahren für Mikroteile

Die heute in der Fertigung von Einzelteilen der Feinwerk- und Mikrotechnik verwendeten Spannverfahren lassen sich zunächst klassisch nach den Spannprinzipien *Formschluss*, *Kraftschluss* und *Stoffschluss* gliedern. Einige der hierbei üblichen Verfahren sind in Bild 2 gezeigt. Zu den formschlüssigen Spannverfahren zählen im Bereich der Dreh- oder Drehfräsbearbeitung z.B. Formspannzangen, deren Innengeometrie an die Außengeometrie der Spannfläche des zu bearbeitenden Werkstückes angepasst wird. Für die Fräsbearbeitung von Mikroteilen wird die Negativgeometrie der für den Spannvorgang verwendeten Flächen als Kavität in einer Werkstückaufnahme abgebildet. Hier wird das zu bearbeitende Werkstück formschlüssig eingelegt, wobei die freibleibenden Flächen für die Bearbeitung zur Verfügung stehen. Ein Ausführungsbeispiel für eine derartige Spannvorrichtung und das darin bearbeitete Teil aus dem Bereich der medizinischen Endoskopie zeigt Bild 3. Für die Herstellung dieses Teiles wurde eine Mehrseitenbearbeitung benötigt. Diese wird durch die Verwendung mehrerer Nester realisiert, in die das Werkstück nacheinander für die Bearbeitung eingelegt wird. Durch die genaue Kenntnis der Lage der Kavitäten zueinander, die im NC-Programm der Bearbeitungsmaschine berücksichtigt werden kann, ist die Mehrseitenbearbeitung mit geringen Lagefehlern, die durch den Versatz von Geometrieelementen entstehen können, möglich.

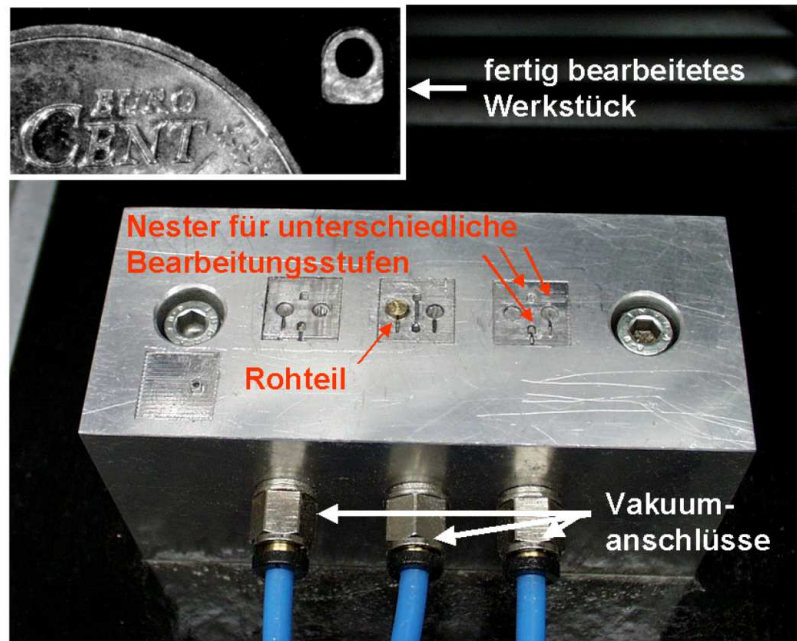
	formschlüssig	kraftschlüssig	stoffschlüssig
3 - dimensional	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Negativformen „Nester“</li> <li>• Formspannzangen</li> <li>• werkstückspez. Sonderlösungen</li> <li>• Frieren (Einbetten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spannzangen (Zylinder)</li> <li>• Spannbacken (Prismen)</li> <li>• Vakuumspanntechnik</li> <li>• Magnetspanntechnik</li> <li>• Frieren (Adhäsion)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kleben</li> <li>• Löten</li> </ul>
	Spannen mit niedrigschmelzenden Werkstoffen		
	Verlorene Spannflächen		
	Adaptive Spannfläche ( Membran)		
	Adaptive Spannsegmente		
2 <sup>1/2</sup> D	Fertigung auf Substraten		

**Bild 2:** Spanntechnik für die Bearbeitung von Mikroteilen

Die in der Fertigung großer Bauteile üblichen kraftschlüssigen Verfahren werden heute auf die Mikrofertigung übertragen. Hierzu gehören Spannzangen, Spannbacken oder auch die aus der Schleifbearbeitung bereits bekannten Magnetspannverfahren. Die berührenden Verfahren sind für die Herstellung komplexer 3D-Mikroteile jedoch als kritisch zu betrachten, weil durch die Spannkraft eine Schädigung des Werkstückes stattfindet. Dazu kommt die bereits bekannte Vakuumspanntechnik, die aber eher für die 2<sup>1/2</sup>D-Bearbeitung geeignet ist, weil die Spannkraft direkt von der zur Verfügung stehenden Fläche zur Aufbringung des Vakuums abhängt. Diese Fläche ist jedoch bei komplexen dreidimensionalen Strukturen oft zu klein, um gerade für die spannende Bearbeitung ausreichende Spannkraft aufzubringen

Ebenfalls eingeführt sind bereits stoffschlüssige Spannverfahren. So werden heute z.B. Linsen, insbesondere Mikrolinsen durch Kleben gespannt. Aus der Schleifbearbeitung von Turbinenschaufeln ist seit langem das Eingießen der Werkstücke in eine niedrigschmelzende Legierung bekannt. Das Verfahren kann aber auch für die Fräsbearbeitung im Makrobereich eingesetzt werden [4]. Das Spannen mit niedrigschmelzende Legierung läßt sich in den Mikrobereich übertragen und ist somit geeignet „verlorene Spannflächen“ an den Werkstücken zu erzeugen. Nachteilig ist hier der hohe Aufwand für den Formenbau sowie das Eingießen und das Entfernen des Spannelementes nach der Bearbeitung.

Zu den Standard-Spannverfahren zählt heute ein weiteres Vorgehen mit verlorenen Spannflächen. Hier wird ein Teil des Rohteils, aus dem das viel kleinere Mikroteil herausgearbeitet wird als Spannfläche genutzt, das auf Grund seiner Größe mit hoher Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aufgenommen werden kann und auch für das Umspannen in einer Maschine oder im Rahmen von Prozessketten in mehreren Maschinen geeignet ist. Nach der Herstellung des Mikroteils wird dieser Bereich des Rohteils, das als Spannelement diente, dann abgetrennt.



**Bild 3:** *Spannen eines Mikroteils in Nestern*

### 3. Neue Spanntechniken im Mikrobereich

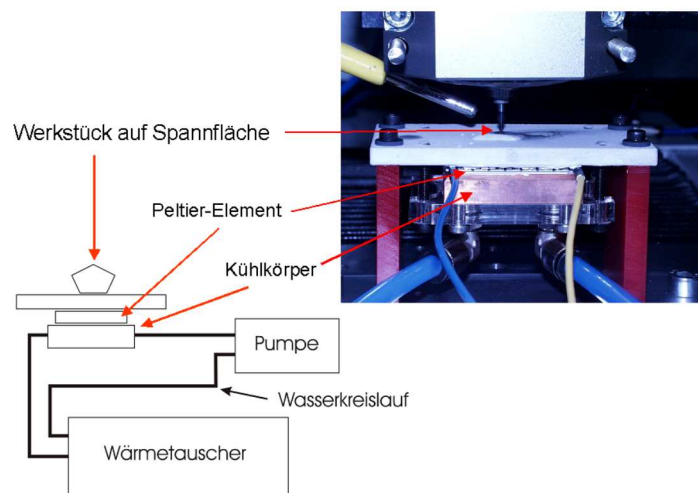
Ebenfalls in Bild 2 sind neue Ansätze zum Spannen von Mikroteile gezeigt. Hierbei handelt es sich um Techniken, die sich mehrerer Prinzipien bedienen, also Kombinationen von stoff-, kraft- oder formschlüssigen Verfahren sind. Dazu gehört die Entwicklung von adaptiven Spannelementen, die geeignet sind, sich an die tatsächliche Form des Werkstückes anzupassen. Dadurch können auch komplexe dreidimensionale Strukturen gespannt werden, ohne das es zu schädigenden Pressungen zwischen Spannelement und Werkstück kommt. Ein Beispiel hierfür ist das Aufbringen der Spannkraft durch flexible Membrane, die von Innen mit Druck beaufschlagt werden. Daneben ist auch der segmentweise Aufbau des Spannmittels denkbar, der bewirkt, das sich inkrementelle Bereiche des Spannmittels mit geregelter Spannkraft an das Werkstück anlegen und so ohne Überschreitung der maximal zulässigen Spannkraft eine Anpassung an die Werkstückgeometrie gewährleisten. Hierbei kann es sich für die Bearbeitung rotationssymmetrischer Teile beispielsweise um scheibenweise aufgebaute Spannzangen handeln.

Eine Variante des Spannens mit niedrigschmelzenden Werkstoffen stellt das Festfrieren der Werkstücke dar. Auch diese Technik ist aus der Makrofertigung bereits bekannt [5,6].

Das Gefrierspannen stellt eine Kombination aus kraftschlüssiger und formschlüssiger Kraftübertragung dar. Beim Auflegen eines Mikrowerkstückes auf eine ebene Spannfläche wirken zwischen der gekühlten Spannfläche, dem Werkstück und der Flüssigkeit in dem Spalt zwischen beiden Wirkpartnern lediglich Adhäsionskräfte als Spannkraft. Diese hängen von den Oberflächenspannungen und der wirksamen Fläche zwischen Spannfläche und Werkstück ab. Gefordert wird, das diese Kräfte in den relevanten Richtungen größer sind als die Bearbeitungskräfte. Kombiniert man diese Adhäsionskräfte mit einem formschlüssigen Spannelement, lassen sich die Spannkraften richtungsabhängig deutlich erhöhen. Eigene Versuche wurden mit der Kombination von Anschlägen, Prismen oder Negativformen des Werkstückes, wie sie bereits oben beschrieben wurden, einerseits und der Aufbringung von Adhäsionskräften durch das Gefrieren andererseits durchgeführt. Hierdurch ergeben sich folgende Vorteile:

- Es können auch komplexe 3D-Geometrien gespannt werden.
- Lokale Spannkraftspitzen, die zu Schädigungen des Werkstückes führen, werden vermieden.
- Die Positionierung, das Aufbringen der Spannkraft und das Lösen ist einfach durch die Temperaturänderung zu bewirken.
- Die entwickelten Spannelemente sind flexibel einzusetzen und leicht an eine Vielzahl von Werkstückgeometrien anzupassen.
- Die Gefrierspanntechnik ist sowohl für kleine Stückzahlen und Losgrößen als auch durch die Verwendung von Mehrfachaufnahmen für die Massenfertigung geeignet.

Im vorliegenden Fall wurde die in Bild 4 gezeigte Gefrierspannvorrichtung entwickelt, die auf der Verwendung von Peltier-Elementen beruht. Hierbei wird der Peltier-Effekt genutzt: Fließt Strom durch einen Stromkreis aus zwei verschiedenen Metallen, so kühlt sich das eine Metall ab, während sich das andere erwärmt. Dieser Effekt entsteht dadurch, dass den Elektronen in den verschiedenen Materialien unterschiedliche Austrittsenergie zugeführt werden muss, damit sie das Metall verlassen können. Das heißt, beim Übergang muss eine Energieschwelle überschritten werden, die der Differenz der Austrittsenergie entspricht. Muss Energie aufgewendet werden, wird der Kontaktstelle Energie entzogen und das Metall kühlt sich ab. Ändert sich die Stromrichtung, wird Energie in Form von Wärme freigesetzt. Vorteile dieser Elemente ist die einfache Ansteuerbarkeit und Regelbarkeit der Temperatur. Durch Ändern der Stromrichtung kann zwischen Abkühlen (Spannen des Werkstückes) und Erwärmen (Loslassen des Werkstückes) gewechselt werden. Durch die Stromstärke kann die Temperatur geregelt werden.

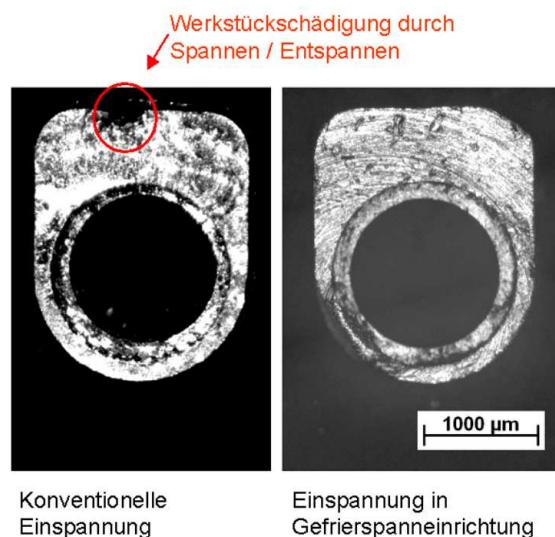


**Bild 5:** *Qualitativer Vergleich zwischen konventioneller Spanntechnik und Gefrierspanntechnik*

Nach Herstellerangaben kann das hier verwendete Peltierelement eine Temperaturdifferenz von 60°C zwischen warmer und kalter Seite erzeugen. Hierzu ist es allerdings notwendig auf der dem Werkstück abgewandten warmen Seite des Peltierelementes die Wärme sofort abzuführen, um einen Temperatenausgleich zwischen warmer und kalter Seite des Elementes durch Wärmeleitungsvorgänge zu unterbinden. Diese Wärmeabfuhr geschieht, wie im Bild 4 gezeigt durch einen Kühlkörper aus Kupfer, der durch einen umlaufenden Flüssigkeitsstrom aktiv gekühlt wird. Mit diesem einfachen und kostengünstigen Ansatz kann die vorgesehene Spannfläche von ca. 50 mm x 100 mm x 6 mm dauerhaft auf ca. -9° bis -10° gekühlt werden.

Um bei einer evtl. nötigen zweiseitigen Bearbeitung von Bauteilen die Referenz zu erhalten bzw. die Bauteile in einer definierten Lage an einer bekannten Position festfrieren zu können, ist es möglich Werkstückanschläge auf der Spannplatte zu montieren, gegen die die Bauteile gelegt werden können. Alternativ kann auch eine entsprechende Vertiefung in die Platte eingearbeitet werden, die die Funktion des Anschlags erfüllt. Der Vorteil besteht darin, dass diese Positionierungshilfen unabhängig von speziellen Bauteilgeometrien sein können. So ist z.B. für alle zylindrischen Bauteile ein Anschlag in einem 90° Winkel im Prinzip ausreichend. Durch Verwendung von Passstiften sowohl bei der Befestigung der Spannvorrichtung auf dem Tisch der Maschine, als auch beim Befestigen der Werkstückanschläge, wird der Aufbau in einer bekannten Lage zum Maschinenkoordinatensystem gehalten. Dies führt dazu, dass die Bauteillage im Maschinenkoordinatensystem immer bekannt ist.

Zur Erprobung der Gefrierspannvorrichtung wurden Bearbeitungsversuche durchgeführt. Die Geometrie des Werkstückes ist in Bild 5 zu erkennen. Das links dargestellte Bauteil wurde lediglich formschlüssig in eng tolerierten Nestern gespannt. Deutlich erkennt man die Beschädigung des Werkstückes durch den Spann- und den Entnahmevorgang. Durch das nicht vermeidbare Restspiel des Werkstückes in der Kavität entstehen außerdem unerwünschte Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück während der Bearbeitung, die Oberflächenschädigungen, die Rattermarken ähnlich sind, hervorrufen. Diese Fehler am Werkstück lassen sich durch Einsatz der Gefrierspanntechnik vermeiden. Das rechts dargestellte Bauteil weist geringere Maß-, Form- und insbesondere Oberflächenfehler auf, weil durch das Gefrierspannen Formschluss und Kraftschluss kombiniert wurden. Zudem wurde festgestellt, dass der in das Werkstück abfließende Wärmestrom, der aus der Energieumsetzung in der Zerspanzone entsteht, keinen Einfluss auf die Qualität der Einspannung des Werkstückes hat.



**Bild 5:** *Qualitativer Vergleich zwischen konventioneller Spann- und Gefrierspanntechnik*

#### 4. Zusammenfassung / Ausblick

Die Übertragung kraftschlüssiger Spannverfahren, wie sie aus der Makrobearbeitung bekannt sind, auf die Mikrobearbeitung bereitet Probleme. Ursache hierfür sind Spannfehler, die aus den wesentlich kleineren Kontaktflächen zwischen Werkstück und Spannmittel herrühren sowie die Beschädigung der Mikroteile durch lokale Spannkraftspitzen. Abhilfe schaffen hier

neue Spannverfahren, die aus einer Kombination der Prinzipien Kraft-, Form- und Stoffschluss bestehen. Exemplarisch wurde die Gefrierspanntechnik untersucht. Durch Verwendung eines Peltierelementes ist der Aufbau einer Spannvorrichtung möglich, die Mikrobauteile form- und kraftschlüssig fixiert. Da die wirkenden Adhäsionskräfte das Werkstück nicht schädigen und außerdem eine spielfreie Positionierung möglich ist, werden höhere Maß-, Form-, Lage- und Oberflächenqualitäten am Werkstück erzielt. Die entwickelte Spannvorrichtung zeichnet sich außerdem durch eine hohe Werkstückflexibilität und niedrige Herstellkosten aus.

## **Literatur:**

- [1] *Westkämper, E.; Hoffmeister, H.-W.; Gäbler, J.*: Spanende Mikrofertigung. F&M (1996) 7-8 S. 525 – 530
- [2] *Esser, E.; Krauß, H.-J.; Roth, S.*: Erzeugung von Mikrostrukturen durch Laserstrahlung. Idee – Vision – Innovation Hrsg.: Vollertsen, F.; Kleiner, M. Bamberg 2001, Verlag Meisenbach
- [3] *Schmidt, J.; Simon, M.; Tritschler, H.; Ebner, R.*:  $\mu$ -Fräsen und  $\mu$ -Erodieren für den Formenbau. Wt Werkstattstechnik online 91 (2001) H. 12 S 743 – 746
- [4] *Weck, M.; Keiser, R.*: Spannen mit niedrigschmelzenden Metallen. Wt Werkstattstechnik online 92 (2002) H. 7/8 S 372 – 376
- [5] Firmenschrift Alu-Spannsysteme Januar 2002: ICE-VICE Gefrierspanntechnik. Horst Witte Gerätebau 21354 Bleckede
- [6] N.N.: [www.naiss.de](http://www.naiss.de) NAISS GmbH 12489 Berlin, 6.12.2002