

Titel

Vi-Spann: Verfahren für die virtuelle Spannplanung in der Arbeitsvorbereitung

IGF-Nr.: 19591 N

Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)



Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner Institut:
M.Sc. Christian Teige
+49 511 762 18334
teige@ifw.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. B. Denkena
+49 511 762 2553
denkena@ifw.uni-hannover.de

Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19591 N (Verfahren für die virtuelle Spannplanung in der Arbeitsvorbereitung) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. - FGW wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojekts. Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Ausgangssituation

Spannelemente stellen bei der spanenden Bearbeitung mit Werkzeugmaschinen den Kraftschluss zwischen Werkstück und Werkzeugmaschine her. Zur Sicherstellung eines genauen Bearbeitungsprozesses muss die Reibkraft der kraftschlüssigen Verbindung die Bearbeitungskraft um ein Vielfaches übersteigen. Gleichzeitig muss eine gute Erreichbarkeit der Bearbeitungsflächen für das Werkzeug gewährleistet sein. Das gespannte Werkstück muss überdies eine hohe statische und dynamische Steifigkeit in allen Raumrichtungen aufweisen. So können durch Prozesskräfte angeregte Ratterschwingungen vermieden und eine hohe Prozesssicherheit sowie Werkstückqualität erreicht werden. Die Auslegung der Werkstückaufspannung beruht aktuell auf den Erfahrungen von Anwendern. Häufig werden Werkstückaufspannungen überdimensioniert oder müssen in mehreren Iterationsschritten optimiert werden. Insbesondere bei der Fertigung von Einzelteilen, z. B. im Werkzeug- und Formenbau, stößt der erfahrungsbasierte Ansatz der Spannplanung an seine Grenzen, da die Iterationsschritte zu erhöhten Kosten der Einzelteile führen. Zudem führt eine unnötige Vielzahl aufwendiger Spannvorrichtungen zu erhöhten Kosten durch längere Rüstzeiten. Zudem steigt das Risiko des Ausschusses teurer Einzelteile. Die Reduzierung der Rüstzeit und der Kosten setzt eine prozess- und werkstückangepasste Spannstrategien ab Losgröße eins voraus, die unabhängig von erfahrungsbasiertem Wissen ist. Hier setzt das Vorhaben der virtuellen Spannplanung an.

Forschungsziel

Das Ziel der virtuellen Spannplanung ist es, die Verkürzung der Einrichtzeit der Werkstückaufspannungen, um die Investitions- und Rüstkosten zu minimieren und gleichzeitig die Prozesssicherheit durch eine optimierte Werkstückaufspannung zu erhöhen.

Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Der Ablauf zur Entwicklung und Erprobung der virtuellen Spannplanung ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Bei der Umsetzung der virtuellen Spannplanung wurden im ersten Schritt experimentelle Untersuchungen zur Definitionen der Anforderungen und Klärung der Randbedingungen durchgeführt. Die so geschaffene Datengrundlage ermöglicht später einen Vergleich zwischen einer virtuell, hinsichtlich der Steifigkeit optimierten und einer erfahrungsbasierten Werkstückaufspannung. Während Referenzuntersuchungen wurden zudem die auftretenden Prozesskräfte und Werkstückabdrängungen bei der spanenden Bearbeitung von zwei Demonstratorbauteilen (Stringer-Analogiebauteil und Kranhaken) unter Anwendung erfahrungsbasierter Werkstückaufspannungen ermittelt. Neben den Zerspanuntersuchungen wurden in Schritt 2 die mechanischen Eigenschaften der Spannelemente als Parametrierungsbasis für eine simulative Optimierung der Werkstückaufspannungen ermittelt und in einer Spannmitteldatenbank dokumentiert. In Schritt 3 wurde die Simulationsumgebung mit Hilfe der

Simulationssoftware ANSYS aufgebaut und die Koppel- und Randbedingungen von Werkstück und Spannelementen implementiert. Danach wurde in Schritt 4 eine Analyse der Werkstück- und der Gesamtsystemverformung mit Hilfe der Simulation sowie eine numerische Optimierung des mechanischen Verhaltens unterschiedlicher Werkstückaufspannungen durchgeführt. Zur Parametrierung der Simulationen wurde eine eigene CAD-Anwendung mithilfe des CAD-Kernels von Open Cascade umgesetzt. Durch den simulativen Ansatz wurden für die Demonstratorbauteile optimierte Werkstückaufspannungen ermittelt. Abschließend wurde in Schritt 5 anhand experimenteller Untersuchungen ein Vergleich zwischen den optimierten und den erfahrungsbasierten Werkstückaufspannungen hinsichtlich der Werkstückabdrängung und der Prozessstabilität durchgeführt.

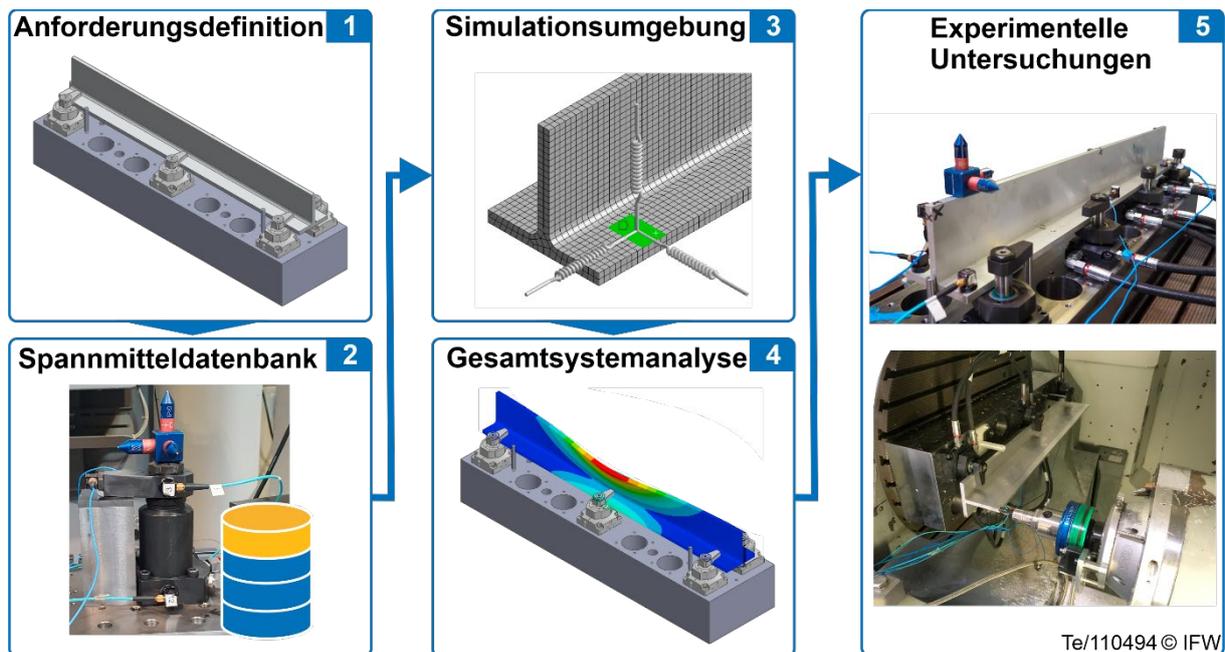


Abbildung 1: Ablauf zur Entwicklung und Erprobung der Methode der virtuellen Spannplanung

1. Anforderungsdefinition

Im Rahmen der Anforderungsdefinition wurden zunächst Referenz-Zerspanprozesse auf Basis zweier Aufspannungen eines Demonstratorbauteils mit unterschiedlicher Steifigkeit durchgeführt. Dabei wurde eine Aufspannung mit sechs äquidistant verteilten Spannelementen als eine Aufspannung mit hoher Steifigkeit und eine nachgiebige Aufspannung mit drei Spannelementen gewählt. In Abbildung 2 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Die Ergebnisse der Referenzprozesse dienen der Schaffung einer Ausgangsbasis für den späteren Vergleich der Steifigkeiten und erzeugten Formfehler der bearbeiteten Werkstücke zwischen erfahrungsbasierter und virtueller (optimierter) Spannplanung. Darüber hinaus dienen die Untersuchungen der Randbedingungs- und die Schnittstellendefinition der für die virtuelle Spannplanung zu nutzenden Verformungssimulation der Bauteile. Bei der Zerspannung der Bauteile wurden die Werkstückabdrängung und die auftretenden Prozesskräfte erfasst und ausgewertet. Die Auswertung der Formfehler, d. h. der Abdrängung des Stringers, bildete die Grundlage für die Parametrierung des Modells zur Verformungssimulation des Demonstratorbauteils. Das Vorgehen bei der Ermittlung der Werkstückabdrängung und der Prozesskräfte wird nachfolgend am Beispiel des Stringer-Analogiebauteils beschrieben.

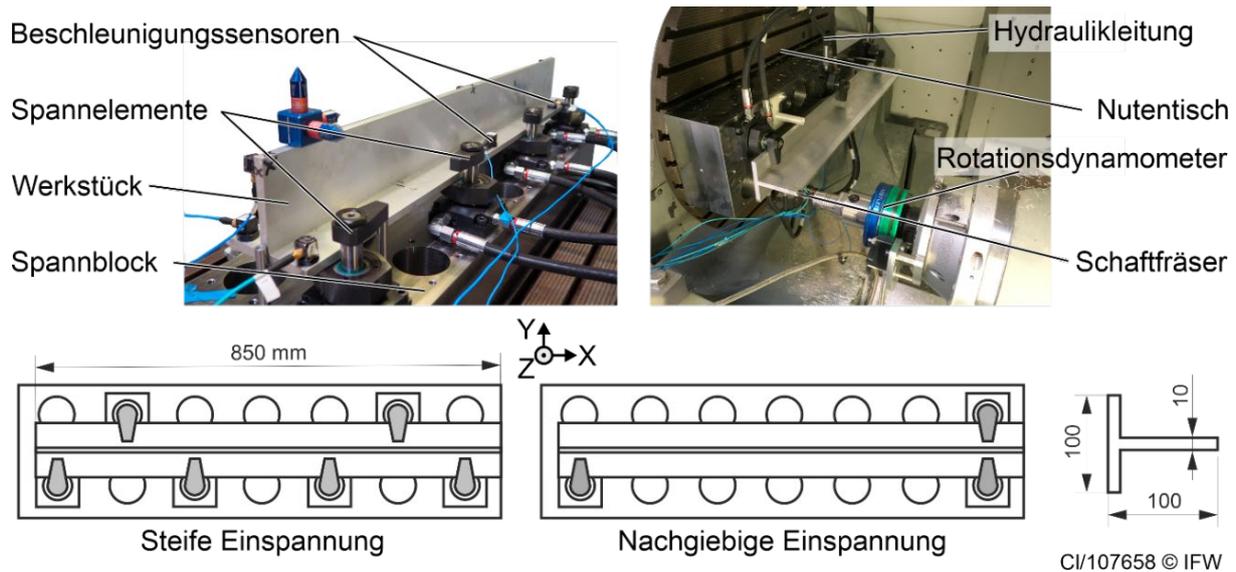
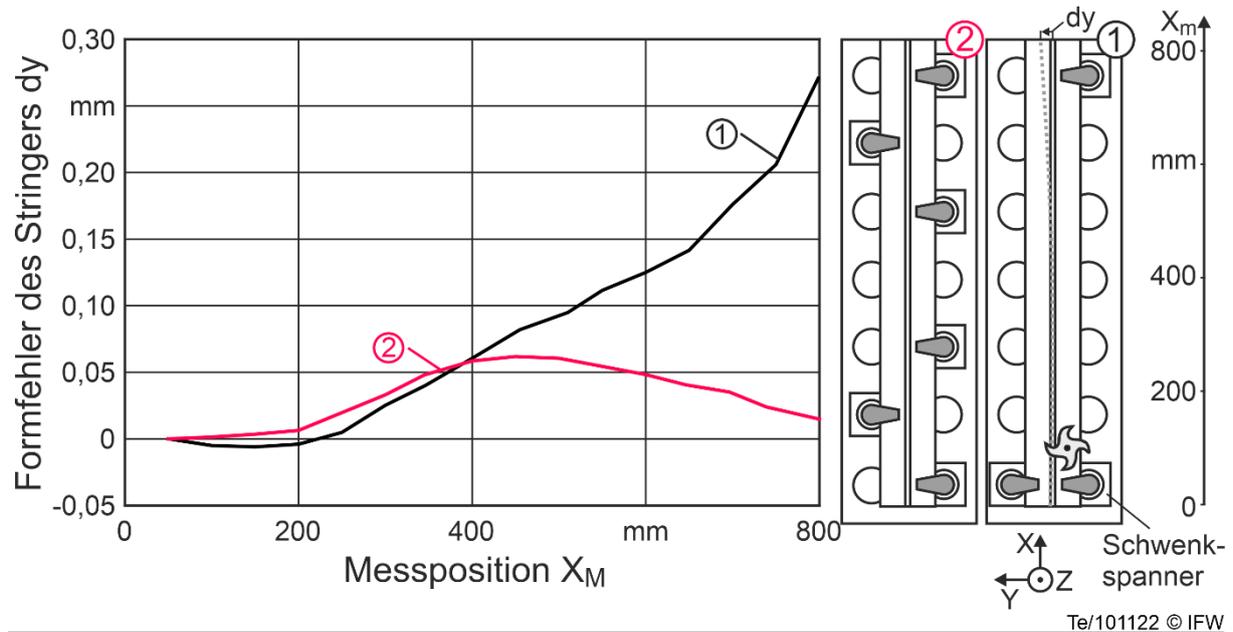


Abbildung 2: Versuchsaufbau (oben) und Variation der Einspannung (unten)

Der Versuchsaufbau wurde so gestaltet, dass der Einfluss unterschiedlich steifer Aufspannungen des Stringers auf den resultierenden Formfehler bei der Zerspaltung aufgezeigt werden kann. Zur Charakterisierung unterschiedlich aufgespannter Stringer wurden diese in ein 5-Achs-Fräszentrum vom Typ DMU 125P der DMG Mori AG integriert und Zerspaltunguntersuchungen durchgeführt. Die Stringer wurden mit Hydraulikspannern vom Typ SRA 20 FD der HYDROBLOCK s.r.l über einen Adapter-Spannblock auf den Nutentisch der Werkzeugmaschine gespannt. Der Stringer verfügte über eine Länge von $L = 800$ mm, das T-Profil über Querschnittsmaße von $B = 100$ mm und $H = 100$ mm bei einer Wandstärke von $w = 10$ mm (vgl. Abbildung 1). Für den Zerspaltungprozess wurde ein 3-schneidiger VHM-Schafffräser mit einem Durchmesser $D = 12$ mm und einer Titan-Nitrid-Beschichtung vom Typ 3677-12,0 der Gühring KG verwendet. Im Rahmen der Bearbeitung wurde das Fräs Werkzeug in einem Flankenfräsprozess entlang der X-Achse am Steg des Stringers verfahren. Für die Aufnahme der Prozesskräfte wurde ein 4-Komponenten Rotationsdynamometer vom Typ 9123C der Kistler Instrumente GmbH eingesetzt, das zwischen der Arbeitsspindel und dem Fräs Werkzeug integriert wurde. Zur Messung des Werkstückformfehlers wurde der Stringer im Anschluss an die Zerspaltungversuche mithilfe eines taktilen Maschinenmesstasters (Heidenhain TS 642 P81 TK01) über das Verfahren der Maschinenachsen abgetastet. Als Referenz wurde der Steg in X-Richtung in einem vorher geschliffenen Abschnitt vermessen, wobei 16 Messpunkte mit einem Abstand von je 50 mm eine Messlinie ergeben. An den identischen Messpunkten auf der gefrästen Flanke des Stegs erfolgte die Ermittlung der Abdrängungskurve. Die Differenz aus der Referenzmessung und der Messung der gefrästen Fläche ergibt jeweils den Formfehler.

Die Messergebnisse sind in der Abbildung 3 dargestellt. Dem Diagramm links kann entnommen werden, dass bei der äquidistanten Verteilung von sechs Spannelementen ein, im Vergleich zur Verwendung von nur drei asymmetrisch verteilten Spannelementen, geringerer Formfehler des Stringers auftritt. Statt einer maximalen Abweichung von $dy = 0,27$ mm bei drei Spannelementen (Aufspannung 1) tritt beim Einsatz von sechs Spannelementen (Aufspannung 2) ein maximaler Fehler von $dy = 0,06$ mm auf. Dies ist plausibel, da mit steigender Anzahl an Spannelementen die Steifigkeit des Gesamtsystems ansteigt und hieraus geringere Verformungen resultieren.



Te/101122 © IFW

Spanndruck $p = 50 - 200 \text{ bar}$ Schnittbreite $a_e = 1 \text{ mm}$ Schnitttiefe $a_p = 20 \text{ mm}$
 Zahnvorschub $f_z = 0,020 \text{ mm}$ Drehzahl $n = 10.000 \text{ min}^{-1}$ Werkzeugdurchmesser $d = 12 \text{ mm}$
 Abbildung 3: Formfehler bei verschiedenen Aufspannungen

Zudem lässt sich feststellen, dass der Verlauf des Formfehlers ebenfalls vom Vorhandensein einzelner Spannsysteme beeinflusst wird. Bei der nachgiebigeren Aufspannung 1 tritt am Stringierende mit nur einem Spannelement an der Messposition $X_M = 800 \text{ mm}$ die höchste Abdrängung auf. Die gemessenen Abdrängungen und die gemessenen Prozesskräfte werden für die Parametrierung der Steifigkeit einer realitätsnahen Verformungssimulation genutzt. Zur Optimierung der Verformungssimulation müssen zusätzlich die mechanischen Eigenschaften in der Simulation verwendeten Spannelemente bekannt sein. Hierzu wurde eine Spannmitteldatenbank angelegt.

2. Spannmitteldatenbank

Für eine realitätsnahe Parametrierung von Simulationsmodellen der anzuwendenden Spannelemente, wurde eine Datenbasis, bestehend aus den geometrischen und mechanischen Eigenschaften der Spannelemente, geschaffen. Dabei wurden die richtungsabhängigen Steifigkeits- und Dämpfungswerte experimentell bestimmt. Die Informationen zu den Eigenschaften werden in einer Datenbank hinterlegt und können während der Simulation abgerufen werden. Anhand der Herstellerinformationen wurden Typ, Betätigungsprinzip, Kontaktfläche und Störkontur extrahiert. Die geometrischen Daten wurden aus den technischen Zeichnungen der Spannmittel entnommen und spannmittelspezifische Störkonturen abgeleitet. Für die Interaktion mit dem Werkstück sind die maximale Spannkraft sowie die statischen und dynamischen Eigenschaften der Spannmittel von besonderer Bedeutung. Grund hierfür ist, dass diese Eigenschaften Einfluss auf die Fixierung und Stützwirkung des Werkstücks haben und somit maßgeblich das Prozessergebnis beeinflussen. Die Daten der Spannkraft sowie die statischen und dynamischen Eigenschaften in Form der Systemsteifigkeit und Dämpfung wurden für verschiedene Spannmittel experimentell bestimmt. Hierfür wurden Nachgiebigkeitsuntersuchungen der Spannverbindungen sowie eine Modalanalyse für drei kartesische Raumrich-

tungen durchgeführt. Im Folgenden werden exemplarisch die statischen Nachgiebigkeitsuntersuchungen der Spannverbindungen erläutert. Die Untersuchungen wurden mit dem in der Abbildung 4 dargestellten Aufbau durchgeführt.

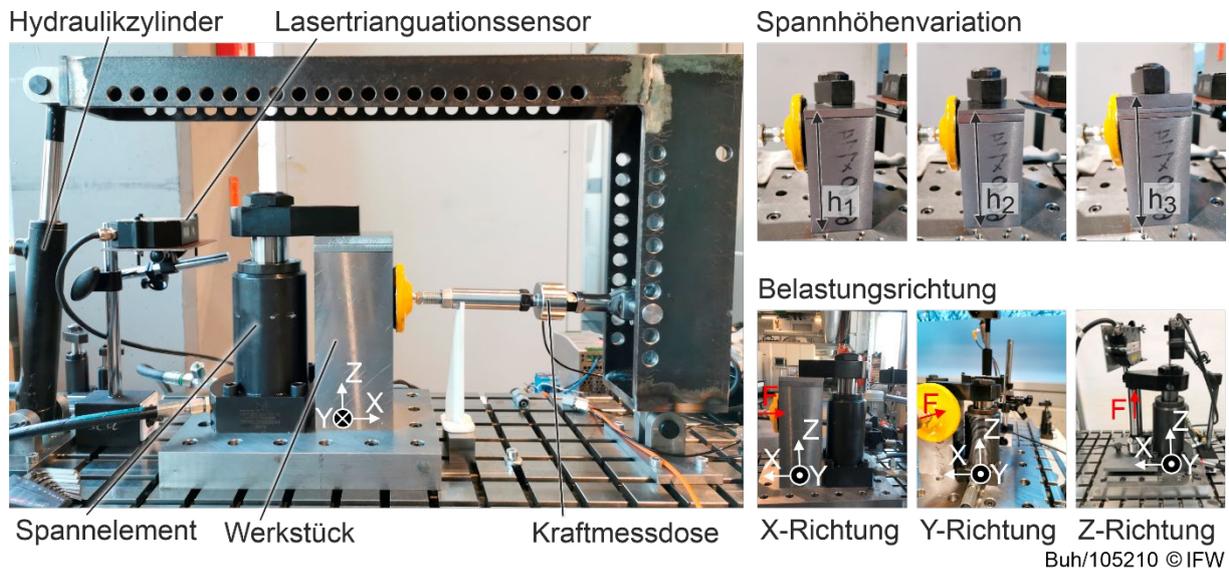
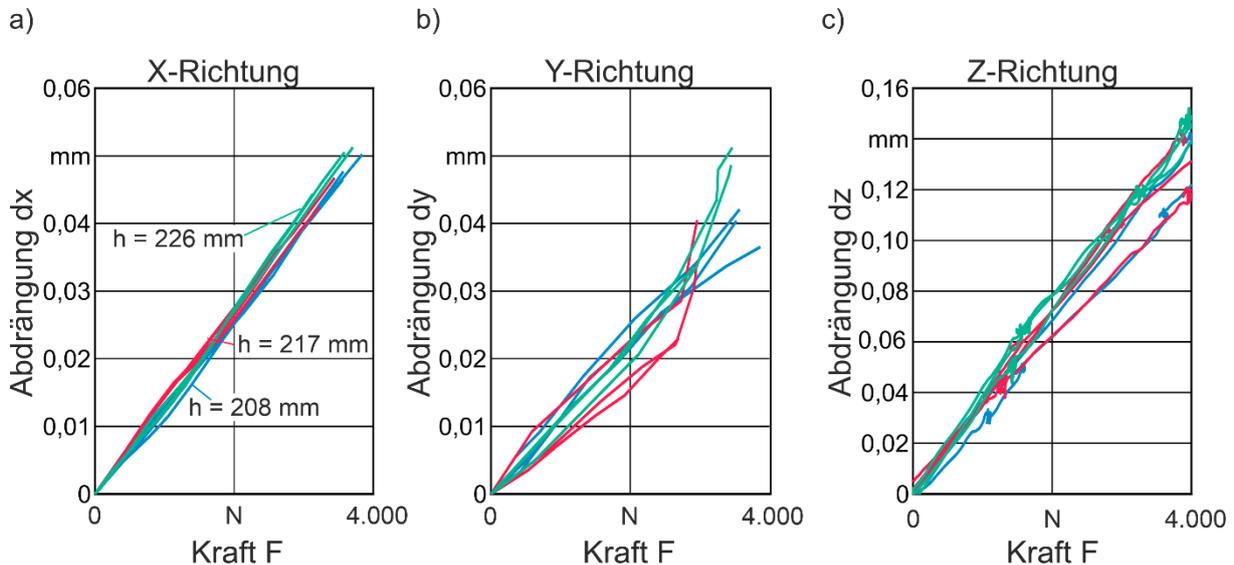


Abbildung 4: Nachgiebigkeitsuntersuchung der Spannelemente - Versuchsaufbau

Für die experimentellen Nachgiebigkeitsmessungen der Spannverbindung wurde ein quaderförmiges Werkstück mit einer definierten Höhe h mit dem gewählten Spannelement mit dem Spanndruck p gespannt. Mithilfe eines Hydraulikzylinders wurde eine Kraft F in X- und Y-Richtung in das quaderförmige Werkstück eingeleitet und die Abdrängungen dx und dy am Spanneisen des Spannelements gemessen. Die Kraft wurde mit der Kraftmessdose HBM 1-9UC/50kN mit der Sensitivität von $1\text{mV/V}/50\text{kN}$ detektiert. Für die Wegmessung der Abdrängung wurde ein Lasertriangulationssensor des Typs optoNCDT ILD2300-20 des Herstellers Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG mit einem Messbereich von $s_B = 20\text{ mm}$ und einer Auflösung von $\Delta s = 4\text{ }\mu\text{m}$ verwendet. Durch den Einsatz zusätzlicher Werkstücke mit unterschiedlichen Höhen konnten unterschiedliche Spannhöhen in einem Bereich von $\Delta h = 25\text{ mm}$ variiert werden, um den Einfluss der Spannhöhe auf die Steifigkeit zu analysieren. Mittels eines variabel einstellbaren Hydraulikaggregats (8400-233) des Herstellers Römheld GmbH Friedrichshütte wurde der gewünschte Spanndruck p eingestellt. Für die Untersuchung der Nachgiebigkeit in Z-Richtung wurde am Spanneisen mittels einer gekonterten Schraube die Belastung F entgegengesetzt der Spannkraft aufgebracht. Zudem wurde die Abdrängung des Spanneisens entgegengesetzt der Belastung gemessen.

Im Folgenden werden ausgewählte Ergebnisse am Beispiel eines Spannelements vom Typ SR45 der HYDROBLOCK s.r.l dargestellt. Die Steifigkeit der Spannverbindung lässt sich anhand der Steigung der Abdrängung-Kraft-Verläufe ermitteln, da die Steifigkeit c als Kraft F pro Abdrängung in der Einheit N/mm definiert ist. In Abbildung 5 sind die drei Verläufe (X-, Y- und Z- Richtung) der Verlagerung des Spanneisens in den drei kartesischen Raumrichtungen in Abhängigkeit der Belastung F bei einem Spanndruck von $p = 150\text{ bar}$ dargestellt. Anhand des Vergleichs der Verläufe wird deutlich, dass sich bei gleicher Belastung unterschiedliche Abdrängungen einstellen. Dies lässt auf eine Richtungsabhängigkeit der Steifigkeit der Spannverbindung schließen. Im Gegensatz dazu lässt sich in allen drei kartesischen Raumrichtungen

gen kein signifikanter Einfluss der Spannhöhe h auf die Steifigkeit der Spannverbindung nachweisen. Dies äußert sich durch den annähernd gleichen Anstieg der farblich differenzierten Kurven in den Diagrammen. In den Raumrichtungen X und Y ähneln sich die Steifigkeitsverläufe quantitativ, während die Steifigkeit in Z-Richtung um mehr als 50 % geringer ist.



Buh/105212 © IFW

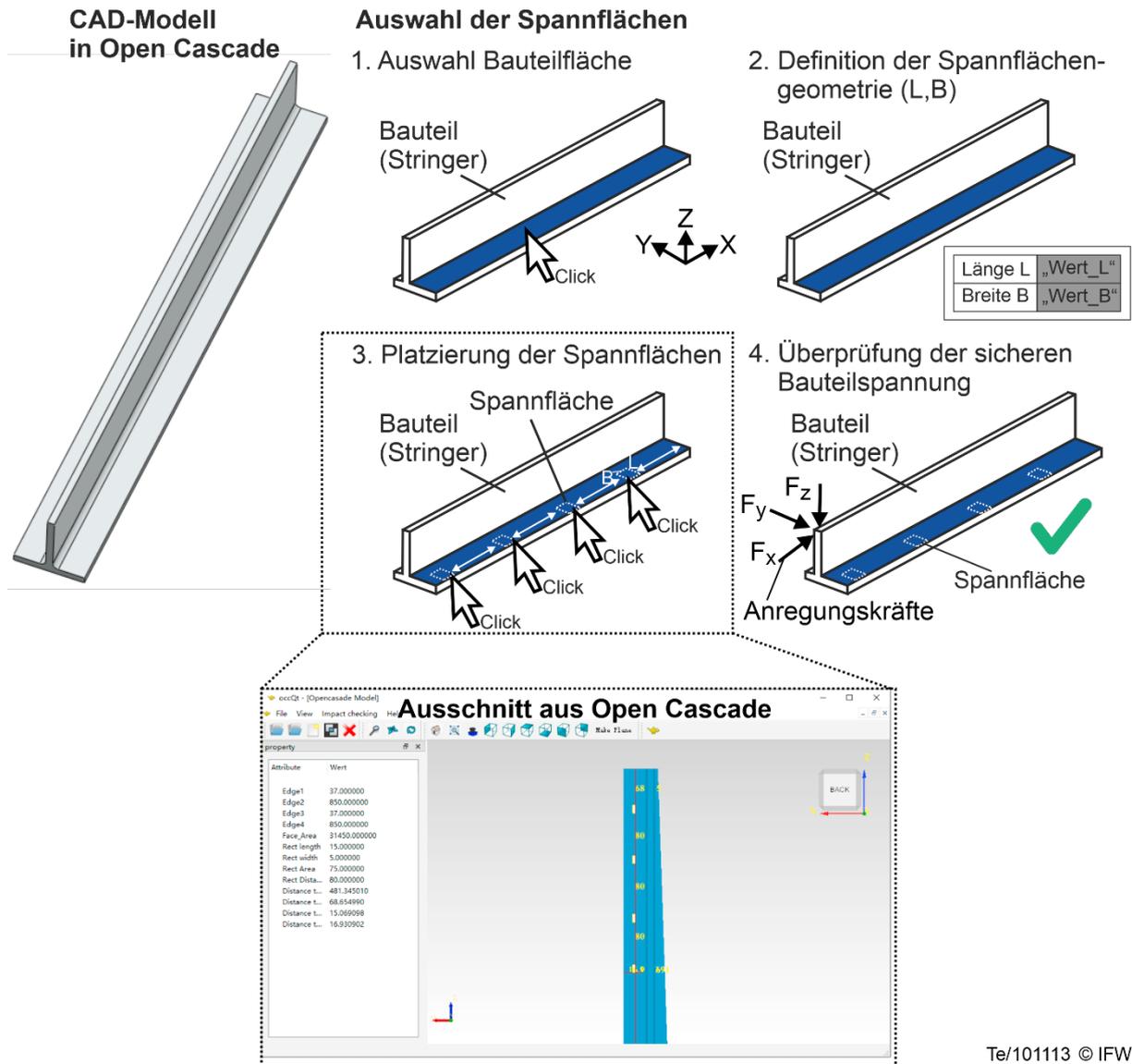
Abbildung 5: Einfluss der Spannhöhe auf die Steifigkeit der Spannschnittstelle des SR45

Anhand der durchgeführten Untersuchungen wurde aufgezeigt, dass die Spannelemente über eine richtungsabhängige Steifigkeit verfügen. Daher wurde in der Datenbank für jede kartesische Raumrichtung eine Steifigkeit hinterlegt. Es konnte aufgezeigt werden, dass die Spannhöhe keinen signifikanten Einfluss auf die Steifigkeit des Spannelements besitzt und die Abhängigkeit somit nicht hinterlegt werden muss. Die zur Implementierung in die Datenbank ermittelten Steifigkeiten der Spannmittel sind in der Tabelle 1 exemplarisch für drei Schwenkspanner-Typen zusammengefasst.

Tabelle 1: Statische Steifigkeitswerte der untersuchten Schwenkspanner

Schwenkspanner	Steifigkeiten in N/mm		
	X-Richtung	Y-Richtung	Z-Richtung
SR45	74.100	88.500	29.130
SR32	73.500	59.900	18.524
SR28	80.600	95.200	35.902

Die experimentell ermittelten Kenngrößen wurden in der Excel-Datenbank gespeichert, um diese in die Simulation der Werkstückaufspannung zu integrieren. In der Abbildung 6 ist ein Auszug aus der Spannmitteldatenbank dargestellt. Neben der bildhaften Beschreibung der Spannmittel sind auch die mechanischen Eigenschaften aufgeführt. Diese setzen sich aus den Herstellerinformationen und den experimentell ermittelten Eigenschaften zusammen. Mittels einer Exportfunktion können die Werte für das Simulationsprogramm bereitgestellt und eingelesen werden. Mit der Fertigstellung der Datenbank liegen die wesentlichen Spannmittel-Kennwerte vor, die für die Simulation im Rahmen der Werkstückanalyse benötigt werden.



Te/101113 © IFW

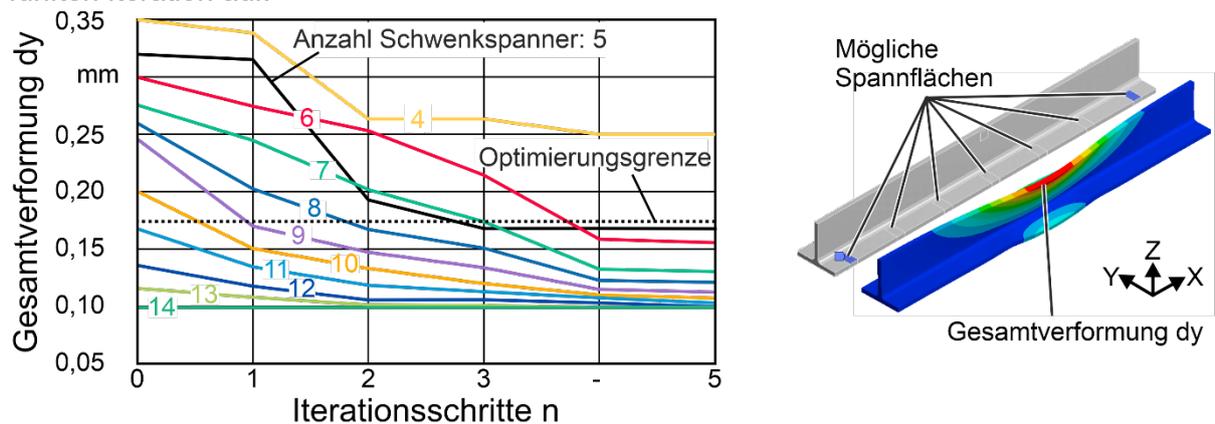
Abbildung 7: Ermittlung von potentiellen Spannpositionen am Fertigteil

Anhand der definierten potentiellen Spannflächen und des Lastkollektivs wird durch das Programm geprüft, ob die Mindestanzahl an potentiellen Spannflächen zur Verfügung steht, um das Bauteil sicher zu spannen. Hierfür werden die Anregungskräfte mit den Haltekräften des Spannsystem-Bauteil-Verbands verglichen. Die Haltekräfte des Spannsystems werden anhand der eingelesenen Steifigkeitswerte und Spannkraften bestimmt und auf alle Spannstellen aufgebracht. Ist die Haltekraft des Spannsystems groß genug, um eine Starrkörperverformung in allen sechs Freiheitsgraden zu verhindern, werden die gewählten Spannflächen als zulässig markiert. Ist eine Mindestanzahl an Spannelementen vorhanden, wird das Bauteil mit den potentiellen Spannflächen anschließend als STEP-Datei exportiert, sodass es in der Simulationsumgebung ANSYS Workbench als Modell eingelesen werden kann. Die Vorarbeiten zur Parametrierung der Simulation sind damit abgeschlossen und der Schritt 4 der Gesamtsystemanalyse (vgl. Abbildung 1) erfolgt. Mithilfe der Simulationsumgebung wird anschließend die resultierende Abdrängung am Werkstück berechnet und mittels eines Optimierungsalgorithmus minimiert.

4. Automatisierte Optimierung der Werkstückaufspannung

Im Rahmen der Optimierung der Werkstückaufspannung wird zunächst der Einfluss der Aufspannung auf die Werkstückverformung simulativ untersucht. In Abhängigkeit der Spann- und Bearbeitungskräfte werden jeweils die sich einstellenden maximalen Werkstückverformungen während der Bearbeitung abgeleitet. Die simulierten Verformungen werden mit Messergebnissen aus experimentellen Untersuchungen verglichen, um die simulierten Ergebnisse zu validieren. Mithilfe dieses Modells ist eine Optimierung der Aufspannsituation möglich. Die Optimierung umfasst dabei die Minimierung der Anzahl der Spannelemente unter Einhaltung einer maximal zulässigen Werkstückverformung.

Zur Optimierung des Spannzustands wurde ein genetischer Algorithmus verwendet. Im Rahmen der Optimierung wurden zunächst 100 zufällige Spannkongfigurationen als Ausgangsbasis der Optimierung erstellt. Mithilfe des Simulationsmodells wurden die auftretenden Verformungen des Stringers bei unterschiedlichen Spannkongfigurationen ermittelt. Die Spannsystemkongfigurationen, die die geringsten Verformungen des Stringers hervorrufen, wurden als Basis der nachfolgenden Iterationsstufe gewählt. Durch Mutation und Rekombination der besten Ausgangskongfigurationen wurden so 100 neue Spannkongfigurationen (1. Iteration) erstellt. Dieser Prozess wurde solange wiederholt, bis eine Konvergenz der Verformung resultierte. Eine Konvergenz herrschte dann vor, wenn die Änderung der Verformung zwischen zwei Iterationen kleiner als 2 % ist. Im Rahmen der Optimierung trat eine Konvergenz spätestens ab der fünften Iteration auf.



Optimierte Spannsituationen

Te/101116 © IFW

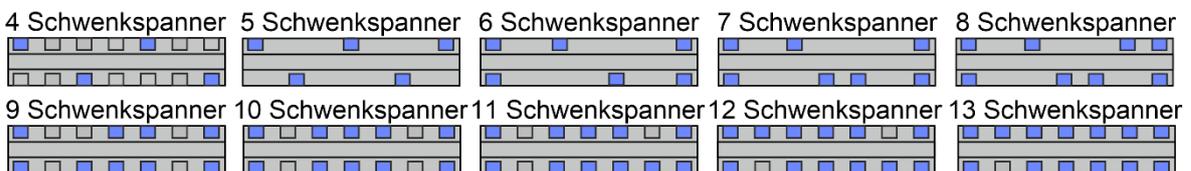


Abbildung 8: Ergebnisse der Optimierung der Spannmittelkonfigurationen

In der Abbildung 8 sind die Ergebnisse der Optimierung für den Stringer dargestellt. Die Zielgröße des Optimierungsprozesses ist dabei die Gesamtverformung, welche über die Gesamtlänge des Stringers mit möglichst wenig Spannelementen bis zum Erreichen der Optimierungsgrenze zu reduzieren ist. Hierfür wird zu Beginn die Optimierungsgrenze manuell definiert. In diesem Anwendungsfall ist laut Fertigungszeichnung eine maximale Formabweichung von $dy = 0,17$ mm erlaubt, sodass diese als Optimierungsgrenze gewählt wird. Im Rahmen der Optimierung wurden jeweils optimale Spannkongfigurationen für eine Spannmittelanzahl von

$n = 4 - 14$ Schwenkspanner ermittelt, die die Optimierungsgrenze erfüllt. Die jeweiligen optimalen Spannkonfigurationen für jede untersuchte Spannmittelanzahl sind im unteren Bereich der Abbildung 8 dargestellt. Es ist festzustellen, dass die resultierende Gesamtverformung mit steigender Anzahl an Spannelementen sinkt. Allerdings ist bereits mit einer Spannmittelanzahl von $n = 5$ nach der dritten Iteration die Optimierungsgrenze unterschritten. Das bedeutet, dass bereits mit fünf Spannmitteln, die über eine optimale Anordnung verfügen, eine hinreichend steife Aufspannung des Stringers realisiert werden kann, da die maximal zulässige Formabweichung nicht überschritten wird. Mit einer Spannmittelanzahl von $n = 4$ wird die Optimierungsgrenze hingegen nicht erreicht, sodass die Anforderung nicht erfüllt wird. An dieser Stelle sei gesagt, dass auch bei der Verwendung der maximalen Spannmittelanzahl von $n = 14$ eine Restverformung besteht, da der vertikale Steg des Stringers nicht direkt fixiert wird und somit in jedem Fall abgedrängt wird.

Um den Einfluss der Aufspannungsoptimierung auf die Formabweichung des Stringers realitätsnah zu analysieren, wurden Simulationen und Zerspanversuche mit einer erfahrungsbasierten Werkstückaufspannung (sechs Schwenkspanner) und mit einer optimierten Aufspannung des Stringers (fünf Schwenkspanner gemäß Abbildung 8) durchgeführt. Die erfahrungsbasierte Aufspannung wurde derart gewählt, dass die Positionen mit der höchsten Nachgiebigkeit, die jeweiligen Enden und die Mitte des Stringers, durch je zwei Spannelemente gestützt werden.

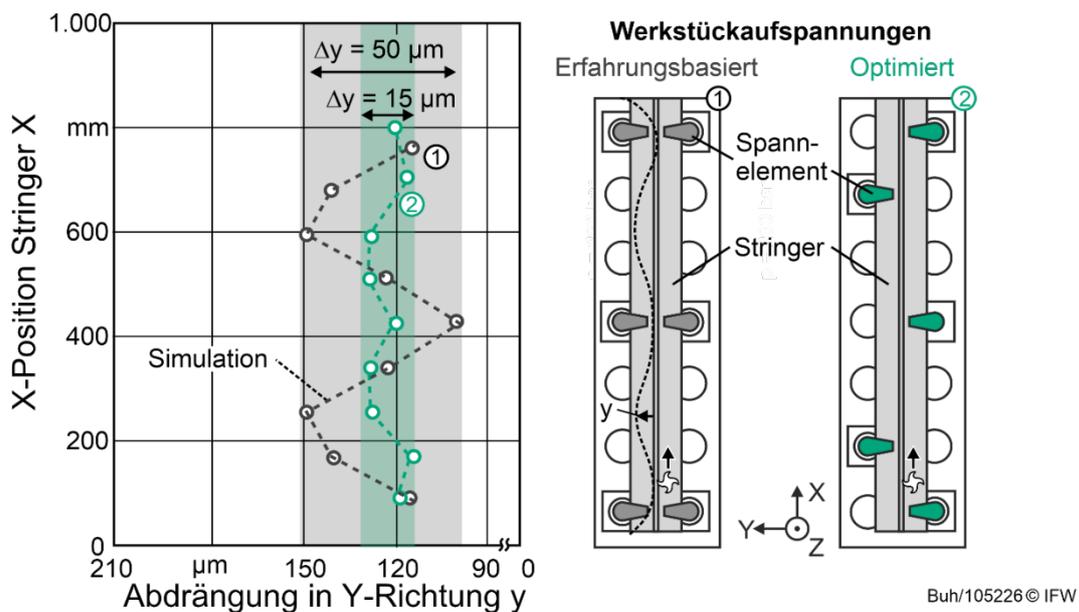


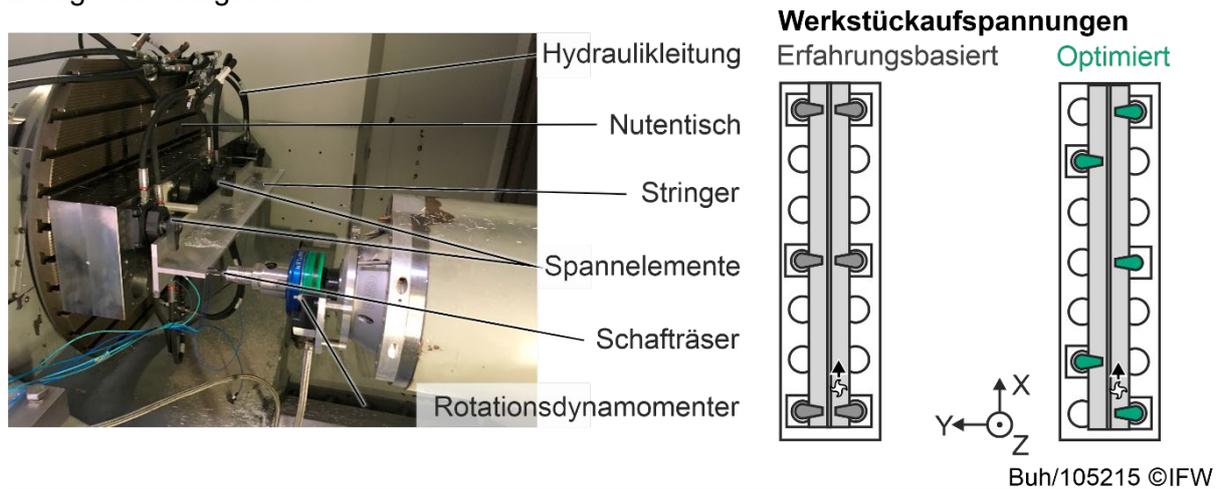
Abbildung 9: Simulierte Abdrängung einer erfahrungsbasierten und optimierten Aufspannung

In Abbildung 9 sind die erfahrungsbasierte und die optimierte Werkstückaufspannung dargestellt. Im nebenstehenden Diagramm ist die simulierte Abdrängung des Stringers in Y-Richtung über die Länge des Stringers in X-Richtung gezeigt. Als Belastung wurde eine abgeschätzte Kraft von $F_y = 400$ N in Y-Richtung definiert. Es ist zu erkennen, dass bei der erfahrungsbasierten Werkstückaufspannung an den Positionen der Spannelemente die geringste Abdrängung mit $dy = 100$ µm vorliegt. In den Bereichen zwischen den Spannelementen liegt jedoch eine Erhöhung der Abdrängung von $\Delta dy = 50$ µm vor. Die mittlere Abdrängung beträgt $dy_m = 120$ µm. Dem gegenüber wurden bei der optimierten Werkstückaufspannung die gleiche mittlere Abdrängung von $dy_m = 120$ µm berechnet. Allerdings weist das Profil einen gleichmäßigeren Verlauf mit einer Schwankungsbreite von lediglich $\Delta dy = 15$ µm auf. Es lässt sich

somit festhalten, dass durch die Anwendung einer reduzierten Anzahl an Schwenkspannern in optimaler Anordnung, eine gleichmäßigere Abdrängung hervorgerufen wird. Die mittlere Abdrängung entspricht etwaig der erfahrungsbasierten Aufspannung. Dies ist dadurch zu begründen, dass die Stringerverstärkung nicht direkt gespannt wird und somit immer eine Restverformung auftritt.

5. Experimentelle Validierung des Optimierungsalgorithmus

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurde der Flankenfräsprozess aus den Referenzuntersuchungen auf dem Fräszentrum DMU 125P mit einem Schaftfräser des Typs 3677-12,00 durchgeführt. In der Abbildung 10 sind der Versuchsaufbau und die eingestellten Prozessgrößen dargestellt.



Spannelement	SRA 20 FD	Spannelementanzahl	5/6 Stück
Spanndruck	$p = 200 \text{ bar}$	Drehzahl	$n = 7.956 \text{ min}^{-1}$
Schnittbreite	$a_e = 1 \text{ mm}$	Schnitttiefe	$a_p = 20 \text{ mm}$
Schnittgeschwindigkeit	$v_c = 377 \text{ m/min}$	Zahnvorschub	$f_z = 0,2 \text{ mm}$

Abbildung 10: Versuchsaufbau und Prozessparameter der Zerspanversuche

Während der Zerspannung wurden mit dem Rotationsdynamometer bei beiden Aufspannungen Abdrängungskräfte in Y-Richtung zwischen $F = 400 - 450 \text{ N}$ detektiert. Für den Vergleich der Abdrängung der gefrästen Flanke beider Werkstückaufspannungen wurde auf der gefrästen Oberfläche mit einem Maschinenmesstaster die tatsächliche Abdrängung in Y-Richtung gemessen. Die simulierte (s. Abbildung 9) und die gemessene Abdrängung sind in der Abbildung 11 vergleichend dargestellt. Für die erfahrungsbasierte Aufspannung wurde eine minimale Abdrängung von $dy = 100 \mu\text{m}$ und eine maximale Abdrängung von $dy = 170 \mu\text{m}$ detektiert, sodass sich eine mittlere Abdrängung von $dy_m = 135 \mu\text{m}$ in Y-Richtung ergibt. Folglich tritt eine mittlere Abweichung von 3,8 % zwischen den simulierten und den experimentell ermittelten Abdrängungen auf. Die bearbeitete Oberfläche weist eine Ebenheit von $\Delta y = 70 \mu\text{m}$ auf und weicht somit 20 % von den simulierten Ergebnissen ab. Bei der optimierten Aufspannung wurde ebenfalls eine minimale Abdrängung von $dy = 100 \mu\text{m}$ detektiert. Mit einer maximalen Abweichung von $dy = 145 \mu\text{m}$ ergibt sich eine mittlere Abdrängung von $dy_m = 123 \mu\text{m}$ in Y-Richtung. Demnach tritt eine mittlere Abweichung von 2,5 % zwischen den simulierten und experimentell ermittelten Abdrängungen auf. Die Ebenheit der bearbeiteten Stringerverstärkung beträgt $\Delta y = 45 \mu\text{m}$. Experimentell konnte somit nachgewiesen werden, dass mittels der optimierten Werkstückaufspannung gegenüber der erfahrungsbasierten Aufspannung eine

um 9,8 % geringere mittlere Abdrängung und eine um 35,7 % geringere Streuung in der Ebenheit gefertigt werden kann. Experimentell konnte somit auch aufgezeigt werden, dass die Varianz der Gesamtverformung reduziert werden konnte. Die bleibende mittlere Abdrängung von $dy_m = 123 \mu\text{m}$ ist durch die Nachgiebigkeit des vertikalen Steges des Bauteils begründet und mit Hilfe der verwendeten Schwenkspanner grundsätzlich nur sehr bedingt reduziert werden.

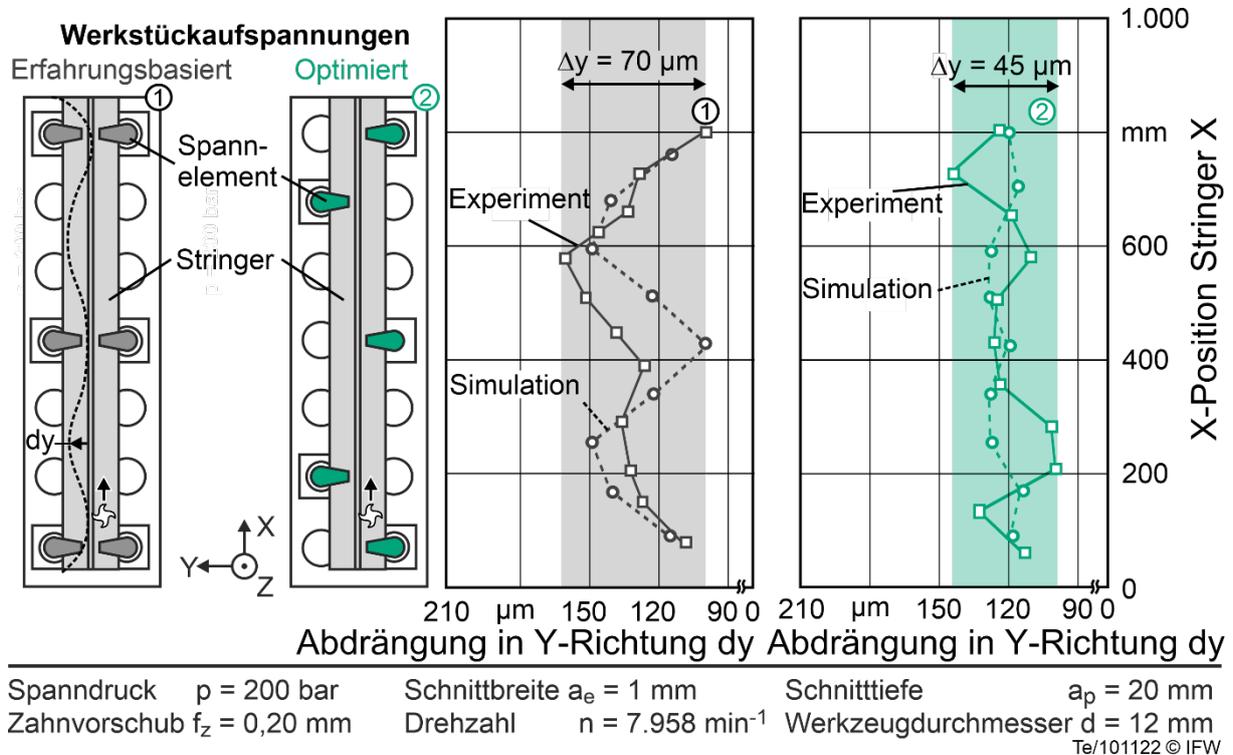


Abbildung 11: Vergleich der simulierten und gemessenen Abdrängung

Der Vergleich zwischen den simulierten und den gemessenen Ergebnissen zeigt, dass die mittlere Abdrängung in beiden Aufspannungen mit einer Abweichung kleiner als 4 % abgebildet wird. Die Ausprägungen der absoluten Abweichungen zwischen den simulierten und gemessenen Ergebnissen lassen sich auf die Diskrepanz zwischen den experimentell und simulativen Randbedingungen zurückführen. In der Simulation können idealisierte Randbedingungen exakt definiert und an allen Spannstellen gleichmäßig aufgebracht werden. Im Gegensatz dazu, sind die Randbedingungen in den Spannstellen (Spannkraft, Spannfläche, Steifigkeit) im Rahmen des Versuchs nicht überall gleich. Dadurch kommt es zum einen zu Abweichungen in der Gesamtsteifigkeit des gespannten Werkstücks. Zum anderen werden durch die Ungleichheit aller Spannstellen initiale Verformungen des Werkstücks (Spannverzug) hervorgerufen, die in der Simulation nicht auftreten.

Zusammenfassung

Im abgeschlossenen Forschungsvorhaben wurde eine virtuelle und teilautomatisierte Spannplanung entwickelt und anhand von praxisorientierten Demonstratorbauteilen bewertet. Mithilfe der virtuellen Spannplanung ist ein Anwender in der Lage, mit einer CAD-Datei bereits während der Spannplanung eine Abschätzung und Bewertung der optimalen Spannstellen und Spannelementauswahl mittels selbstgewählter Auslegungskriterien durchzuführen. Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Spannelemente mechanisch charakterisiert und deren Eigenschaften in einer Datenbank festgehalten. Während der simulativen Optimierung der Werkstückaufspannung wird auf die angelegte Datenbank zurückgegriffen. Mit der CAD-Software Open Cascade wurde eine frei verfügbare Schnittstelle für KMUs verwendet, mit der die Spannpositionen und die Spannmittel während der Optimierung ausgewählt werden können. Anhand der Definition der möglichen Spannpositionen und auftretenden Spann- und Prozesskräfte sowie der automatisierten Netzerstellung wurde für die Simulation ein teilautomatisiertes Vorgehen geschaffen. Mithilfe der Simulation wurden optimale Spannpositionen und die Anzahl der mindestens benötigten Spannelemente bestimmt und visualisiert. Am Beispiel eines Flugzeugstringer-Analogiebauteils wurde die maximale Abdrängung des gespannten Bauteils berechnet. Es wurde mittels einer experimentellen Validierung der Simulationsergebnisse aufgezeigt, dass mithilfe der entwickelten virtuellen Spannplanung nicht nur die Anzahl der benötigten Spannelemente reduziert, sondern auch die ungewünschte Bauteilabdrängung verringert werden kann. Der Vergleich zwischen der simulierten und der experimentell bestimmten mittleren Abweichung zeigt, dass die Ergebnisse der idealisierten Simulation mit einer Abweichung von weniger als 4 % die Realität gut annähern. Zudem wurde gezeigt, dass die virtuell geplante Aufspannung gegenüber einer manuell geplanten Aufspannung eine um etwa 37 % reduzierte Streuung in der Ebenheit der bearbeiteten Oberfläche aufweist.

Vorteilhaft der virtuellen Spannplanung ist, dass diese teilautomatisiert anhand eines objektiven Programmablaufs unter Computereinsatz durchführbar ist. Dadurch kann das Risiko eines unzulässigen zeitlichen Verzugs, der bei erfahrungsbasierter Spannplanung durch Trial & Error-Ansätze entsteht, mit der virtuellen Spannplanung reduziert werden. Dies ist besonders bei der Spannplanung von teuren Einzelteilen, z. B. im Werkzeug- und Formenbau, von Bedeutung. Durch eine objektive Spannplanung ist es möglich eine sichere Bauteilaufspannungen zu realisieren und somit den Ausschuss dieser teuren Einzelteile zu verhindern.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Herrn M.Sc. Christian Teige unter 0511 / 762 18334 oder per Mail unter teige@ifw.uni-hannover.de