

Universität Stuttgart

Fakultät für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften,

Studiengang Technikpädagogik

Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF)

und

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in

Stuttgart

Diplomarbeit

**Entwicklung, Aufbau und Test eines
robotergeführten Fräswerkzeugs zur
Bearbeitung von Holzwerkstoffen**

von

Andreas Leon

Matrikelnr.: 2192563

Betreuer: Dipl.-Ing. Hendrik Mütterich

Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. (FH) Kai Wegener

Stuttgart, Juli 2006

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis.....	1
Formelzeichen und Abkürzungen	4
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	9
0 Abstract.....	10
1 Einleitung	12
1.1 Motivation	12
1.2 Aufgabenstellung.....	12
1.3 Vorgehen	13
1.4 Ziel.....	13
2 Ausgangssituation.....	14
2.1 Grundlagen der Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen.....	14
2.1.1 Spannungstechnische Grundbegriffe	15
2.2 Stand der Technik bei der Späneerfassung	19
2.2.1 Differenzierung von Staub und Spänen.....	19
2.2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen des Spänetransportes	20
2.2.3 Verschiedene Konzepte von Absaugeinrichtungen	21
2.2.4 Trends in der Forschung	22
2.3 Qualitätsmerkmale bei der Holzbearbeitung	23
2.3.1 Oberflächenqualität und deren Beurteilung	23
2.3.2 Einflussgrößen auf die Oberflächenqualität.....	26
2.3.3 Kantenqualität und deren Beurteilung	27
2.3.4 Schmalflächenqualität und deren Beurteilung	27
2.4 Stand der Technik von Oberfräsen zur Holzbearbeitung	28
2.4.1 Bearbeitungszentren und NC-Oberfräsen	28

2.4.2	Parallelkinematiken	29
2.4.3	Holzbearbeitung mittels Robotern	30
2.4.4	Handoberfräsen.....	31
2.5	Magazinierung von Werkzeugen.....	33
2.6	Umgebung des Fräswerkzeugs.....	34
3	Analyse handelsüblicher Handoberfräsen hinsichtlich ihrer Eignung zur automatisierten Fertigung	37
3.1	Vorgehensweise bei der Analyse der Handoberfräsen	37
3.2	Analyse von Möglichkeiten der Aufnahme des Werkzeugs in einer robotergeführten Vorrichtung.....	37
3.2.1	Untergliederung des Gesamtsystems in Teilsysteme	38
3.2.2	Analyse des Trägersystems	39
3.2.3	Analyse des Spannsystems	42
3.2.4	Analyse der Möglichkeiten zum automatisierten Wechsel des Fräasers	47
3.2.5	Überprüfung des Einsatzes eines Betätigungssystems zur Drehzahlverstellung und zum Ein- und Ausschalten der Handoberfräse	48
3.2.6	Überprüfung der Möglichkeiten zur Steuerung des Werkzeugs - Überprüfung des Einsatzes von Sensorik.....	49
3.2.7	Analyse verschiedener Möglichkeiten des Spänetransportes.....	51
3.2.8	Analyse verschiedener Möglichkeiten der Stromversorgung der Handoberfräse	52
3.2.9	Resultierende Anforderungen.....	53
3.3	Analyse von Möglichkeiten der Werkstückpositionierung.....	55
3.3.1	Definition der Anforderungen an die Positioniervorrichtung	55
3.3.2	Analyse verschiedener Möglichkeiten der Werkstückpositionierung.....	55
3.4	Definition der Anforderungen an den Werkzeugbahnhof	58
4	Konzeption und Entwicklung einer Vorrichtung zur Aufnahme von Handoberfräsen	59
4.1	Vorgehensweise bei der Konzeption.....	59
4.2	Konzeption der Aufnahme der Handoberfräse.....	59

4.2.1	Konzeption des Spannsystems	59
4.2.2	Konzeption des Trägersystems	60
4.2.3	Anbringung des Kraft-Moment-Sensors	62
4.3	Konzeption der Späneabsaugung	62
4.4	Konzeption der Kabelführung	63
4.5	Auslegung und Konstruktion der Vorrichtung zur Aufnahme von Handoberfräsen	63
4.6	Konzeption und Auslegung der Positioniervorrichtung	64
4.7	Konzeption des Werkzeugbahnhof	65
5	Vorversuche und Optimierung des Fräswerkzeugs	67
5.1	Ziele der Vorversuche	67
5.2	Durchführung der Vorversuche	68
5.3	Ergebnisse der Vorversuche	69
5.4	Optimierung des Fräswerkzeugs aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche	71
6	Experimentelle Untersuchung des Fräswerkzeugs	73
6.1	Versuchsaufbau	73
6.2	Einflussfaktoren	75
6.3	Versuchsplanung	76
6.3.1	Versuchsziele	77
6.4	Versuchsergebnisse	80
6.4.1	Interpretation der aufgenommenen Kräfte	80
6.4.2	Exemplarische Überprüfung der Plausibilität der ermittelten Daten	82
6.4.3	Diskussion der Versuchsergebnisse	83
6.4.4	Fazit	90
7	Zusammenfassung und Ausblick	92
8	Anhang	95
	Quellenverzeichnis	96
	Abschlussklärung	99
	Acknowledgment	100

FORMELZEICHEN UND ABKÜRZUNGEN

Lateinisch

a	m/s^2	Beschleunigung
a_e	mm	Schnitttiefe
a_p	mm	Schnittbreite
a_{rth}	mm	theoretische Messerschlaglänge
a_{reff}	mm	reale (effektive) Messerschlaglänge
a_{max}	m/s^2	maximale Beschleunigung
b	mm	Breite
d	mm	Fräserdurchmesser
d_{ae}	mm	aerodynamischer Durchmesser
d_F	mm	Abstand von der Mittelachse
d_m	mm	Spanungsbreite
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
f		Vorschubrichtung
f_z	mm/s	Zahnvorschub
F	N/mm^2	Kraft
F_{fN}	N/mm^2	Vorschubnormalkraft
F_P	N/mm^2	Passivkraft
F_R	N	Reibkraft
F_x	N	Kraft in x-Richtung
F_y	N	Kraft in y-Richtung
F_z	N	Kraft in z-Richtung
F_{Zp}	N	Zerspankraft
h	mm	Höhe
h_m	mm	mittlere Spanungsdicke
h_{max}	mm	maximale Spandungsdicke
h_{min}	mm	minimale Spanungsdicke
l	mm	Länge
l_c	mm	Schnittweg
l_e	mm	Wirkweg
l_f	mm	Vorschubweg

M	Nm	Drehmoment
n	min ⁻¹	Drehzahl der Oberfräse
k _c	N/mm ²	spezifische Schnittkraft
O	mm ²	Spanoberfläche
Q	mm ³ /s ¹	Zeitspanvolumen
r	mm	Tastspitzenradius
R _a	μm	Mittenrauhwert
R _K	μm	Kernrauhtiefe
R _{max}	μm	maximale Rauhtiefe
R _{PK}	μm	reduzierte Spitzenhöhe
R _{VK}	μm	reduzierte Riefentiefe
R _z	μm	gemittelte Rauhtiefe
t _c	s	Schnittzeit
t _U	mm	Messerschlagtiefe
TCP		Tool Center Point
V		Querdehnungszahl
V _c	m/s	Schnittgeschwindigkeit
V _e	mm/s	Eintauchgeschwindigkeit
V _f	mm/s	Vorschubgeschwindigkeit
V _R	m/s	Rückschlaggeschwindigkeit
V _Z	mm ³	Zerspanvolumen
x _{ab}	mm	Gestaltabweichung
Z		Zähnezahl

Griechisch

α	°	Winkel zur Faserrichtung
χ	°	Spanwinkel
λ	°	Neigungswinkel
φ	°	Vorschubrichtungswinkel
φ _E	°	Eingriffswinkel
δ	kg/m ³	Dichte

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Makroskopischer Aufbau von Holz [Hen06]	14
Abbildung 2: Vergleich von Gleich- und Gegenlaufräsen [Ga06.1, 2]	16
Abbildung 3: Einstell- und Prozessgrößen beim Fräsen [He06].....	16
Abbildung 4: Rauheitsprofil und Abbottkurve mit zugehörigen Kennwerten zur Charakterisierung von Holzoberflächen [WSc95.2].....	25
Abbildung 5: Reichenbacher Hamuel GmbH, Parallelkinematik [Re06]	30
Abbildung 6: Kuka-Fräsroboter [Ku06].....	31
Abbildung 7: Aufbau einer Handoberfräse [Fe06]	32
Abbildung 8: Vakuumaufspanntisch VC-T mit Blocksaugern	35
Abbildung 9: Kraft-, Energie- und Informationsflüsse d. Aufnahmevorrichtung ..	39
Abbildung 10: Diverse Handoberfräsen.....	40
Abbildung 11: Relevante Maße der Handoberfräse	41
Abbildung 12: Skizze mit relevanten Oberflächenabmessungen der Handoberfräse.....	44
Abbildung 13: Handoberfräse Metabo OF 738 mit Spannhals.....	44
Abbildung 14: Fixierung mittels Führungsschienen	45
Abbildung 15: Fixierung mittels seitlicher Flächen	46
Abbildung 16: Unterschiedliche Anordnungen und Betätigungsarten der Schalter zum Ein- und Ausschalten der Handoberfräsen.....	48
Abbildung 17: Unterschiedliche Anordnungen und Betätigungsarten der Drehzahlverstellung.....	49

Abbildung 18: Ausrichten der Werkstücke durch Gewichtskraft	56
Abbildung 19: Ausrichten durch zuführen mechanischer Kraft	57
Abbildung 20: Befestigung der Handoberfräse auf einer Grundplatte	60
Abbildung 21: Vergleich der Kräfteeinleitung bei den verschiedenen Konzeptionen zur Anbringung des Werkzeugwechselsystems	61
Abbildung 22: Kraft-Moment-Sensor FT-Theta SI-2500-400	62
Abbildung 23: Kabel- und Schlauchführung	63
Abbildung 24: Positioniervorrichtung	65
Abbildung 25: Werkzeugbahnhof mit Fräswerkzeug	66
Abbildung 26: Vergleich unterschiedlicher Drehzahlen	69
Abbildung 27: Drehzahlverlauf bei steigender Vorschubgeschwindigkeit	70
Abbildung 28: Vergleich unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten	70
Abbildung 29: Hinsichtlich der Steifigkeit optimiertes Träger- und Spannsystem	72
Abbildung 30: Versuchsaufbau	74
Abbildung 31: Messpunkte zur Überprüfung der Steifigkeit der Aufnahmevorrichtung	75
Abbildung 32: Überprüfung der Steifigkeit der Fräsvorrichtung	76
Abbildung 33: Versuchsplan und zugehöriges Versuchsergebnis	78
Abbildung 34: Erzeugen einer Fräsbahn ohne Gestaltabweichungen durch Gegenlaufräsen	80
Abbildung 35: Darstellung von F_{zp} anhand Versuch 3f/Buche	81
Abbildung 36: Kräfte beim Zerspanprozess	81
Abbildung 37: Bezug des Kräfteverlaufs zum Fräsbild	82

Abbildung 38: Plausibilitätsüberprüfung	83
Abbildung 39: Auswirkungen der Zustelltiefe a_e anhand Versuch 3a-c/Kiefer	84
Abbildung 40: Resultierende Kräfte bei unterschiedlichen Zustelltiefen a_e anhand Versuch 3a und 3c/Kiefer	84
Abbildung 41: Maximal auftretende Kraft in z-Richtung	85
Abbildung 42: Gestaltabweichungen bei unterschiedlichen Zustelltiefen	85
Abbildung 43: Ursache der Gestaltabweichungen beim Fräsen	86
Abbildung 44: Einfluss der Faserschnitttrichtung auf die Qualität der Oberflächen und Kanten	86
Abbildung 45: Kraftentwicklung bei unterschiedlichen Eintauchrichtungen	87
Abbildung 46: Darstellung des Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf das Fräsergebnis anhand von Versuch 3a-c/Buche	88
Abbildung 47: Krafterwicklung bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten	88
Abbildung 48: Vergleich Gegenlauf- und Gleichlaufräsen	89
Abbildung 49: Auswirkungen des Schneidenverschleißes	90

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Einteilung der Qualitätsmerkmale gefräster Oberflächen und Zuordnung verschiedener Einflussgrößen [He96]	26
Tabelle 2: Übersicht CNC-Stationärbearbeitungszentren [HTr03].....	29
Tabelle 3: Leistungsdaten von Parallelkinematiken	30
Tabelle 4: Relevante Maße für die Auslegung des Trägersystems	41
Tabelle 5: Relevante Oberflächenabmessungen der Handoberfräsen	43
Tabelle 6: Anforderungen an das Fräswerkzeug	54
Tabelle 7: Gewicht des Fräswerkzeugs.....	64

0 ABSTRACT

In the present thesis a milling tool for woodworking is developed. It is operated by a robot and is supposed to be fast and flexibly convertible with other tools. Thus a contribution to the automated manufacturing of wood assemblies in small lot sizes shall be made.

The tool will be integrated into an already existing robot cell. Thus also an appropriate tool magazine for several tools has to be developed. With wood cutting, the chip and dust transport is important, too. This is also getting discussed in the front end of the thesis. The mechanical connection to the robot is made by an existing tool-changing system. To reach a dimensional accuracy at the milling process, the adjustment of the workpiece at the machining has to be known. So a device for the adjustment of the workpiece has to be developed. It concerns an inclined plane, on which the workpiece can be put down. By the force of gravity and an angle the workpiece gets aligned.

Wood is an extremely complex material. In the front end of this thesis, the characteristics of the material are presented. Afterwards, an overview of the essential aspects of milling is given. Thereby the coherences between the important process parameters at milling and the resulting process variables are briefed. To ensure a professional evaluation of the milling results, the quality characteristics of the woodworking process are described.

After the conception of the milling tool, preliminary tests will be conducted with two different concepts of tool-receiving sockets. With the results of the preliminary tests a decision among the concepts shall be made. After those tests, some additional optimizations at the milling tool are being made.

Also the effect of various process parameters on the machining quality shall be clarified in the context of the preliminary tests. Thus, suitable process parameters for the final test with the milling tool shall be determined. The cable conduit for the current supply of the milling tool and the tube guide of the dust removal can get tested, too.

After the assembly of the complete milling tool, test series with different timber materials are conducted. With a force-torque-sensor, the resulting forces are being

recorded. The evaluation of the achieved milling results is done concerning their quality. Thereby subjective norms are applied because the achieved quality is improvable. Criteria are the surface quality, edge quality and the machining accuracy.

The milling tool proves to be functional, but unexpectedly high forces arise at the milling process. Thus through the small stiffness of the entire system it comes to irregularities at the workpieces. At a further use of the milling tool a robot construed for higher loads (30-60kg) should be used. The robot which is used at the tests is charged over the permissible handling weight. This is the result of the dead weight of the milling tool as well as the resulting forces and torques at the cutting tooth.

At the dust removal some rework is necessary. The chip disposal directly at the tool functions constrained. Improvements can possibly be achieved for example by mounting PVC lamellas at the milling tool. To be able to observe the milling process as well as possible, PVC lamellas aren't mounted at the tests.

Because the vacuum pick-up device which is planned for the handling of the workpieces isn't applicable at the time of the tests, the positioning device can't be tested. Because the workpieces get transported after the adjustment, it has to be checked whether an accurate clamping can still be ensured.

After this the integration of the force-torque-sensor into the tool control has to be accomplished.

Originally, it was planned to integrate an active force control of the feed rate through the force-moment-sensor. But a direct coherence between the feed rate and the forces arising at the cutting tooth is unseizable. Important however is the possibility of an overload check by the force-moment-sensor during the milling process. Due to the high forces in z-direction while dipping the cutter it is also conceivable to regulate the setting depth by the force-moment-sensor.

After completion of the wood working cell and all intended tools etc. a program has to be made in such a way that it can demonstrate the plug-and-play ability on the basis of a complete machining and assembly operation.

1 EINLEITUNG

1.1 *Motivation*

Seit über 40 Jahren stehen für die flexible Automatisierung in der Fertigung Roboter zur Verfügung. Die Möglichkeiten der Robotik werden immer noch vor allem von größeren Industrieunternehmen ausgeschöpft. Marktübliche Lösungen sind für kleinere und mittelständische Unternehmen immer noch zu groß und zu teuer [SME05]. Mit dem Forschungsprojekt SMErobot hat sich ein internationales Konsortium zum Ziel gesetzt, die damit einhergehenden Aufgabenstellungen zu lösen und kostengünstige, modulare und interaktive Automatisierungslösungen für kleine und mittlere Unternehmen zu entwickeln. Die neue Roboter-Generation soll intuitive Programmierung und Bedienung ermöglichen, Sicherheitsvoraussetzungen für die Mensch-Maschine-Interaktion erfüllen und einen hohen Grad an Wandlungsfähigkeit besitzen. Um die Forderung nach Wandlungsfähigkeit zu erfüllen ist ein modularer Aufbau notwendig.

Ein als Demonstrator ausgewähltes Szenario ist die Holzbearbeitung. Am Fraunhofer IPA wird zurzeit eine Roboterzelle für die Holzmöbelbearbeitung eingerichtet, deren Teilsysteme weitgehend modular aufgebaut sind. Es wurden bereits ein Bohrwerkzeug sowie eine Saugspinne zur Handhabung von Holzplatten entwickelt, welche der Forderung nach Modularität gerecht werden.

1.2 *Aufgabenstellung*

Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung und Erprobung eines Fräswerkzeugs zur Holzmöbelbearbeitung. Das Werkzeug soll unter Verwendung einer handelsüblichen Handoberfräse entwickelt werden und den Austausch der Handoberfräse gegen andere Handoberfräsenfabrikate ermöglichen. Die mechanische Integration der Handoberfräse erfolgt über ein zur Verfügung stehendes Werkzeugwechselsystem. Um den Fräsprozess dezentral steuern zu können, sollen später eine Steuerung und Sensoren zur Erfassung relevanter Prozessparameter in das Werkzeug integriert

werden. Im Rahmen der Arbeit werden die für eine Steuerung des Fräswerkzeugs notwendigen Parameter festgelegt. Auch sollen die Möglichkeiten der Erfassung bzw. Steuerung relevanter Parameter untersucht werden.

Nach Entwicklung des Fräswerkzeugs soll in Versuchen dessen Funktionalität überprüft werden. Dazu sollen Prozessparameter wie Vorschub, Drehzahl, Qualität der Oberfläche etc. betrachtet werden.

1.3 Vorgehen

Zur Zielerreichung sind verschiedene Arbeitsschritte notwendig: in einem ersten Schritt werden Handoberfräsen hinsichtlich ihrer Eignung zum Einsatz in der Automatisierung analysiert. Relevante Faktoren wie Platzbedarf, Gewicht, entstehende Kräfte und Momente müssen untersucht werden. Auf Basis dieser Daten sollen anschließend die Anforderungen an das Werkzeug abgeleitet werden. Schwerpunkt hierbei bildet die automatisierungsgerechte Integration der Komponenten für den Fräsprozess. Die steuerungstechnischen Aspekte bilden lediglich den Randbereich. Nach der Entwicklung des Werkzeugs soll dieses im Rahmen von Vorversuchen aufgebaut und getestet werden. Basierend auf diesen Tests soll eine entsprechend verbesserte Konstruktion erfolgen. Mit dieser sind Versuchsreihen durchzuführen, welche den späteren Einsatzbereich simulieren.

1.4 Ziel

Wie schon beschrieben ist das Ziel der Arbeit die Entwicklung, der Aufbau und die Erprobung eines robotergeführten Fräswerkzeugs, unter Verwendung einer handelsüblichen Handoberfräse. Die Handoberfräse soll ohne Umrüstprozess oder sogar konstruktive Anpassungsmaßnahmen direkt zum Fräsen eingesetzt werden können. Untersucht werden sollen zudem die Möglichkeiten einer plug-and-play Fähigkeit des Fräswerkzeugs. Hintergrund der Entscheidung, eine handelsübliche Handoberfräse zu verwenden, ist die Vorgabe, den Robotereinsatz so kostengünstig wie möglich zu gestalten. Durch die Verwendung einer handelsüblichen Handoberfräse, kann ein kleineres Unternehmen weitestgehend auf die schon vorhandenen Werkzeuge zurückgreifen.

2 AUSGANGSSITUATION

2.1 Grundlagen der Zerspanung von Holz und Holzwerkstoffen

Holz als Werkstoff ist äußerst vielseitig einsetzbar. Im Gegensatz zu z.B. metallischen Werkstoffen beeinflussen jedoch wuchsbedingte Faktoren die Zerspanbarkeit von Holz. So weist Holz einen anisotropen und inhomogenen Aufbau auf. In seiner ursprünglichen Form wird Holz auch als Vollholz oder Massivholz bezeichnet.

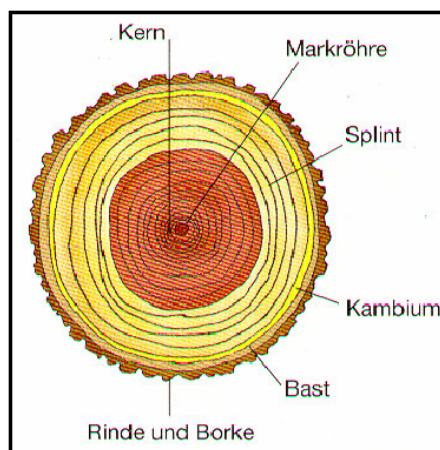


Abbildung 1: Makroskopischer Aufbau von Holz [Hen06]

Der innere Teil eines Stammes, auch Kern genannt, beinhaltet das Mark. Das Kernholz besteht aus toten Zellen. Es weist eine relativ hohe Dichte auf und ist deutlich härter als das radial dazu angeordnete weichere Splintholz. Dieses dient u.a. der Wasserversorgung des Stammes. Bedingt durch die jahreszeitlich verschiedenen Wachstumsgeschwindigkeiten entstehen die Jahresringe, welche unterschiedliche Dichten aufweisen. Die Dichteunterschiede führen u.a. zu unterschiedlichen Schnittkräften beim Spanen und bewirken damit auch unterschiedliche Oberflächenrauigkeiten [Fus 95].

Eine weitere Eigenschaft, die bei der Bearbeitung nicht vernachlässigt werden darf, ist die Holzfeuchtigkeit. Holz ist ein hygroskopischer Werkstoff, der sein Volumen und seine Querschnittsform bei Feuchtigkeitsschwankungen ändert. Das Quellen und Schrumpfen vollzieht sich in den verschiedenen Richtungen unterschiedlich stark und

die Zug- und Druckfestigkeit ändern sich je nach Feuchtigkeit des Holzes [Hen06]. Auch bei der spanenden Bearbeitung nimmt der Feuchtigkeitsgehalt des Holzes Einfluss auf die resultierenden Schnittkräfte.

Aufgrund der beschriebenen, aus der Inhomogenität des Werkstoffes resultierenden Bearbeitungsschwierigkeiten, wird häufig eine Homogenisierung des Ausgangswerkstoffes Massivholz angestrebt [Wal04]. Hierzu wird der Ausgangswerkstoff verkleinert. Die Homogenität steigt, je kleiner der Ausgangswerkstoff ist. Dies führt zu einer Vielzahl an Holzwerkstoffen. Bei Brettschichtholz, das aus faserparallel verleimten Brettern besteht, und Leimholz, das quer zur Faserrichtung verleimt ist, sind die Komponenten noch verhältnismäßig groß. Werkstoffe wie z.B. Lagerholz und Sperrholz sind ähnlich aufgebaut. Holzwerkstoffe wie Spanplatte und MDF (Medium Density Fibreboard) hingegen sind wesentlich feiner strukturiert. Sie finden als beschichtete Spanplatte und beschichtetes wie auch unbeschichtetes MDF zunehmend Verwendung in der Möbelindustrie. Aufgrund ihrer homogenen Struktur und der geschlossenen Oberfläche garantieren sie für die industrielle Möbelproduktion einen prozesssicheren Zerspanprozess mit konstanter Oberflächengüte [Wal04].

2.1.1 Spannungstechnische Grundbegriffe

2.1.1.1 Einstellgrößen

Mittels der Einstellgrößen lässt sich der Fräsprozess gezielt verändern. Die Wirkbewegung beim Fräsen resultiert aus der Überlagerung der rotatorischen Schnittbewegung und der translatorischen Vorschubbewegung [Fus95]. Unterschieden wird dabei zwischen Gleich- und Gegenlaufräsen. Diese Verfahren unterscheiden sich durch die Größe des Vorschubrichtungswinkels φ und unterschiedliche resultierende Wirkgeschwindigkeiten. Der Vorschubrichtungswinkel φ beschreibt die Differenz zwischen der Schnittrichtung und der Vorschubrichtung. Beim Gleichlaufräsen ist der Vorschubrichtungswinkel φ kleiner als 90° , zudem ist hier die Wirkgeschwindigkeit kleiner als die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeuges. Beim Gegenlaufräsen ist φ größer als 90° und die Wirkgeschwindigkeit größer als die Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeuges.

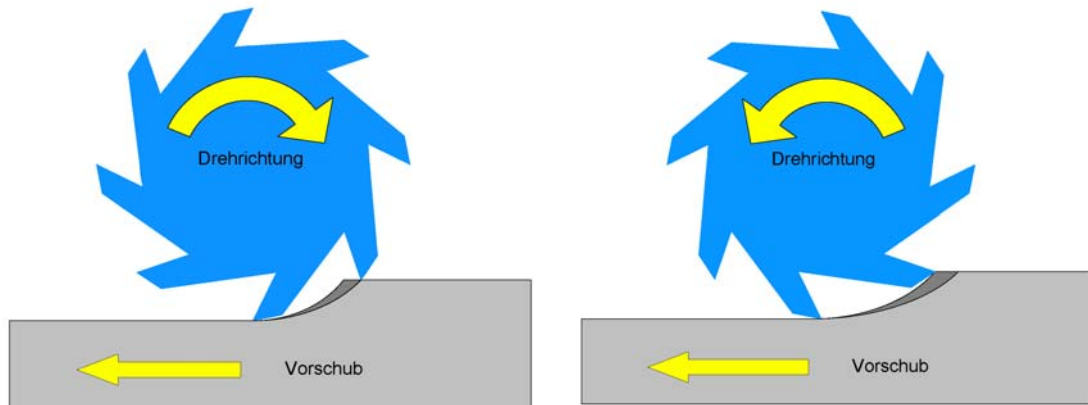


Abbildung 2: Vergleich von Gleich- und Gegenlaufräsen [Ga06.1, 2]

Bei Verfahren wie dem Nutfräsen kommen Gegen- und Gleichlaufräsen im selben Prozess vor. Die gewählte Einsatzart hat große Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften der Werkzeuge, wie z.B. Unfallsicherheit bei Handvorschub, Kantenausbrüche, Vorspaltung beim Spanen in Faserlängsrichtung und die Größe der Schnittkraft [Ma00]. Hierauf wird an den entsprechenden Stellen eingegangen.

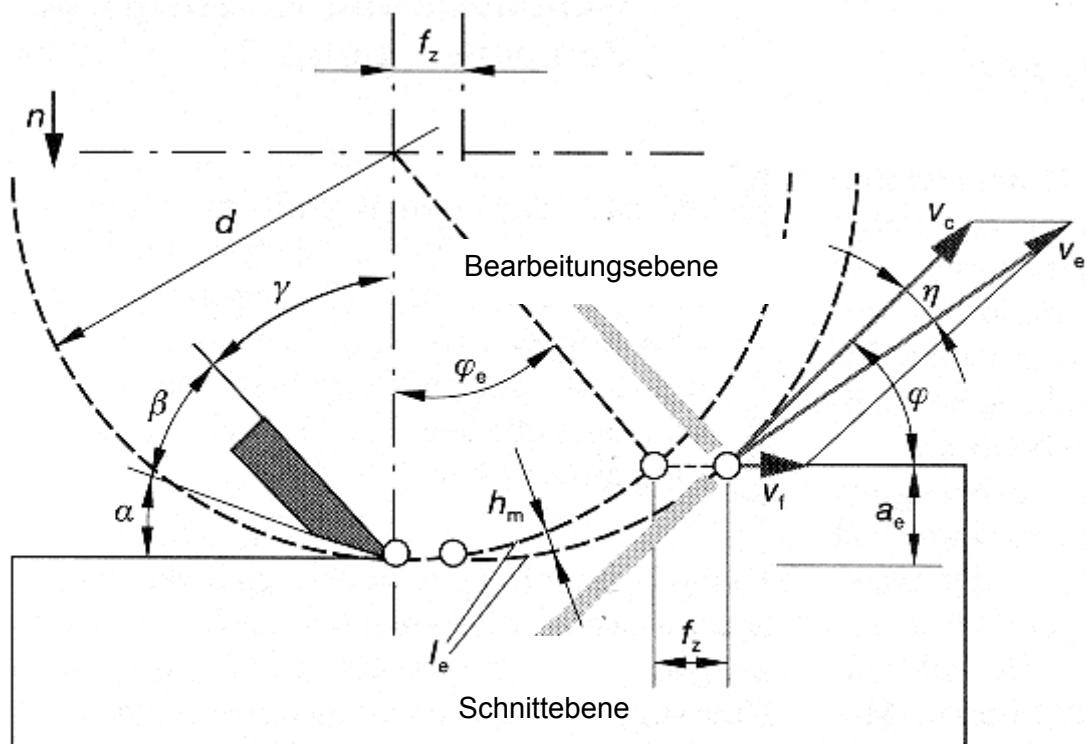


Abbildung 3: Einstell- und Prozessgrößen beim Fräsen [He06]

Die wichtigsten Einstellgrößen sind in Abbildung 3 dargestellt. Sie leisten Hilfe bei der Interpretation von Prozessergebnissen. Durch die Vorschubgeschwindigkeit v_f , die Eingriffstiefe a_e und die Eingriffsbreite a_p werden die Schnittkräfte sowie das Zeitspanvolumen Q , welches das zerspannte Werkstückvolumen V_w je Zeiteinheit t_c beschreibt beeinflusst:

$$Q = \frac{V_W}{t_c} = a_e \cdot a_p \cdot v_f$$

Der Zahnvorschub f_z ist besonders relevant bzgl. der Werkstückqualität und dem Standverhalten:

$$f_z = \frac{v_f}{z \cdot n} = \frac{v_f \cdot \pi \cdot D}{v_c \cdot z}$$

Beim Zerspanvorgang beschreibt die Werkzeugschneide in Relation zum Werkstück eine Zykloide. Da die Schnittgeschwindigkeit wesentlich höher als die Vorschubgeschwindigkeit ist, lassen sich zwei aufeinander folgende Zykloidenbahnen durch zwei Kreise, deren Abstand in Vorschubrichtung dem Zahnvorschub entspricht, ersetzen. Dies erleichtert die Berechnung der Spanungsgrößen erheblich. Die mittlere Spannungsdicke h_m lässt sich auch zum Beschreiben von Fräsprozessen verwenden. Sie spielt auch bei der Berechnung der Schnittkraft eine Rolle. Sie entspricht rechnerisch genügend genau der Mittenspanndicke h_M [Ma00]. Bestimmt wird sie durch die Spanquerschnittsfläche A

$$A = a_e \cdot a_p \quad (1.1)$$

die Spanbogenlänge S_B

$$S_E = R_F \cdot \rho_E$$

welche sich aus dem Spanbogenradius R_F und dem Eingriffswinkel ρ_E berechnet

$$\rho_E = \arccos\left(\frac{1 - 2 \cdot a_e}{D}\right)$$

und die Spanoberfläche O

$$O = a_e \cdot S_B$$

Die mittlere Spannungsdicke h_m ist somit

$$h_m = \frac{A \cdot f_z}{a_p \cdot \arccos\left(\frac{1 - 2 \cdot a_e}{D}\right)} = \frac{a_e \cdot f_z}{\arccos\left(\frac{1 - 2 \cdot a_e}{D}\right)}$$

oder

$$h_m = \frac{V_z}{O}$$

Diese hilft bei der Berechnung der mittleren Schnittkraft F_m . Diese ergibt sich aus der spezifischen Schnittkraft k_c , der mittleren Spannungsdicke h_m und der Schnittbreite a_p :

$$F_m = k_c \cdot h_m \cdot a_p$$

2.1.1.2 Kräfte beim Spanen

Die am Schneidkeil wirkenden Kräfte dienen nicht nur zur Bestimmung der erforderlichen Schnittleistung, sondern auch zur Dimensionierung von Werkzeugen und Maschinenbauteilen. Auch wird über diese Kräfte die Bearbeitungsqualität erheblich beeinflusst [HDi95].

Die Zerspankraft wird nur zu einem geringen Teil für die Trennung des Werkstoffes benötigt. Ein großer Teil der vom Schneidkeil aufzubringenden Kraft wird wegen anderer Einflüsse benötigt, wie z.B. der Reibung des Schneidkeiles mit dem Werkstück, der Reibung des Spanes mit dem Schneidkeil, der Verformung des Untergrundes, der Verformung des Spanes sowie zur Beschleunigung des Spanes. Die am Schneidkeil wirkende Zerspankraft F_{Zp} ist die Resultierende aller am Schneidkeil angreifenden Kräfte. Sie ist schon seit längerem Gegenstand wissenschaftlicher Arbeiten. Relevante Erkenntnisse wurden z.B. durch Heisel, Dietz und Tröger in ihrer Zusammenfassung zum Stand der Erkenntnisse über rotierende Holzbearbeitungsmaschinenwerkzeuge [HDi95] gesammelt. Dennoch sind die Zerspankraft und ihre Komponenten noch nicht zufriedenstellend erforscht. Es gibt verschiedene Theorien und darauf basierende Berechnungsmodelle zur Entstehung der Zerspankraft, allerdings liegen z.B. zum Einfluss der Nebenschneiden beim Nutfräsen oder zum Fräsen mit kleinen Einstellwinkeln noch keine ausreichenden Erkenntnisse vor. Die Zerspankraft F_{Zp} wirkt räumlich und lässt sich vektoriell in drei senkrecht aufeinander stehende Komponenten F_x , F_y und F_z zerlegen:

$$F_{Zp} = \left(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 \right)^{0,5}$$

Berücksichtigt man den Vorschubrichtungswinkel φ lassen sich die Passivkraft F_p als die senkrecht auf der Arbeitsebene stehende Komponente von F_{Zp} , die Schnittkraft F_c

als Komponente von F_{Zp} in Schnittrichtung und die Wirknormalkraft F_{eN} als senkrecht zur Schnittrichtung stehende Komponente der Zerspankraft bestimmen. Es gilt also:

$$F_c(\rho) = F_f(\rho) \cdot \cos \rho - F_{fN}(\rho) \cdot \sin \rho$$

$$F_{cN}(\rho) = F_f(\rho) \cdot \sin \rho - F_{fN}(\rho) \cdot \cos \rho$$

Daraus wiederum lässt sich F_a berechnen. Diese, als Aktivkraft F_a bezeichnete Kraft, beschreibt die in der Arbeitsebene verlaufende Kraftkomponente der Zerspankraft:

$$F_a = (F_c^2 + F_{eN}^2)^{0,5} = (F_f^2 + F_{fN}^2)^{0,5}$$

Bei $\varphi = 90^\circ$ gilt $F_y = F_c$. F_x lässt sich in diesem Fall mit F_{fN} und F_z mit F_a gleichsetzen.

2.2 Stand der Technik bei der Späneerfassung

Bei sämtlichen spanenden Fertigungsverfahren treten Staub- und Späneemissionen auf. In der Holzbe- und -verarbeitung ist die Staub- und Späneerfassung aus den unterschiedlichsten Gründen unverzichtbar. Neben dem gesundheitstechnischen Hintergrund spielen insbesondere technologische, wirtschaftliche und qualitätstechnische Aspekte eine wesentliche Rolle. Die Motivation für den Einsatz effektiver Absaughauben liegt deshalb darin, den Menschen vor den schädlichen Wirkungen einatembarer Stäube zu bewahren, den Verschleiß an Werkzeugen und Messmitteln zu reduzieren, die Absaugkosten und den Aufwand der Werkstück- und Maschinenreinigung zu senken, sowie die Brand- und Explosionsgefahr in den Holzbetrieben zu vermeiden [Ble04]. Außer den beschriebenen Auswirkungen führen nicht beseitigte Späne an den Werkzeugschneiden gerade in der Holzbearbeitung zu Spanmarkierungen infolge doppelt zerspanter Späne. Auch wird eine sichere Vakuumspannung nachfolgender Werkzeuge erschwert.

2.2.1 Differenzierung von Staub und Spänen

Die Unterscheidung zwischen Staub und Spänen erfolgt nach der Partikelgröße. Da sich die Form der erzeugten Holzpartikel je nach Bearbeitungsprozess voneinander unterscheidet, wird oft auf ein Vergleichsmodell mit gleicher Form und Dichte zurückgegriffen. Als Maß für die Partikelgröße dient dabei der aerodynamische

Durchmesser d_{ae} . Dieser beschreibt den Durchmesser einer theoretischen Kugel mit der Dichte $\delta = 1\text{g/cm}^3$, welche in der Luft die gleiche Sinkgeschwindigkeit besitzt wie das untersuchte Partikel [Ble04]. Die Klassifizierung von Holzspänen wird nach Spanform- und -größe vorgenommen.

2.2.2 Gesetzliche Rahmenbedingungen des Spänetransportes

Laut der technischen Regel für Gefahrenstoffe (TRGS) 553 [TRG02] hat der Spänetransport von den Maschinen zum Sammelbehälter in der Holzbearbeitung immer im Luftstrom zu erfolgen. Hierin sind u.a. geforderte Mindestluftgeschwindigkeiten, Reinigungsvorschriften, Staubgrenzwerte sowie Vorgaben zum Brand und Explosionsschutz festgelegt. Wie beschrieben, hat der Spänetransport immer durch absaugen zu erfolgen. Hierzu werden die Maschinen an gesonderte Absaugeinrichtungen angeschlossen, welche den benötigten Luftstrom benötigen. Aus den Gebrauchseigenschaften der Maschinen und den zugehörigen Absaugeinrichtungen ergeben sich diverse zu beachtende Aspekte bezüglich der Spänetransportsysteme [Ma00]:

- ♦ gesetzlich geregelte, höchstzulässige Staubimmission im Umfeld der Maschinen und Anlagen zur Verbesserung der Arbeitssicherheit und Vermeidung von gesundheitlichen Schäden bei den daran arbeitenden Menschen
- ♦ Schutzmaßnahmen zur Vermeidung der bei Holzstaub bestehenden Brand- und Explosionsgefahr
- ♦ keine Beeinträchtigung der Maschinenfunktion durch Holzablagerungen und Verstopfung
- ♦ keine Qualitätseinbußen an Werkstücken durch nicht ausreichend entsorgte Späne

Auf europäischer Ebene wurden durch die prEN 12779 Vorgaben für die Hersteller von Absauganlagen erarbeitet. Sie beinhaltet sicherheitstechnische Anforderungen, welche die Grundlage für die CE-Kennzeichnung bilden [Ble04].

Späne können nur durch die so genannte Dünnstromförderung transportiert werden. Das bedeutet, dass zum Transport kleiner Feststoffe eine verhältnismäßig große Luftmenge benötigt wird. Daraus ergeben sich verschiedene Forderungen [Ma00]:

- ♦ hohe Geschwindigkeit der Förderluft

- ♦ strömungsgerechte Formgebung der Späneauffangteile am Werkzeug und der Querschnitte für den Späneabtransport
- ♦ ausreichende Reserven der Absaugventilatoren bei unterschiedlichen Betriebszuständen

2.2.3 Verschiedene Konzepte von Absaugeinrichtungen

Bedingt durch die beim Spanabhub wirkenden Kräfte, werden die Späne schon mit bestimmten Bedingungen vom Fräswerkzeug in den Luftstrom eingeleitet. Es lassen sich deshalb die Vorgänge außerhalb der Maschine, innerhalb der Maschine und im gesamten System unterscheiden. Absaugeinrichtungen bilden damit einen unmittelbaren Bestandteil einer Holzbearbeitungsmaschine und dürfen nicht unabhängig davon betrachtet werden. So ist schon bei der Konstruktion der Bearbeitungsvorrichtung darauf zu achten, dass die Absaugeinrichtung so ausgeführt ist, damit sie die Holzstäube und –späne möglichst vollständig erfasst. Auch darf der Bearbeitungsprozess nicht durch die Absaugeinrichtung beeinträchtigt werden [Ble04].

Diese Anforderungen haben zu unterschiedlichen Lösungsmöglichkeiten geführt, welche unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Unterschieden wird zwischen drei grundlegenden Konzepten: der vollständigen Einkleidung, einer Teileinkleidung und der Absaugung. Diese Konzepte lassen sich durch verschiedene konstruktive Lösungen verwirklichen.

Bei stationären Holzbearbeitungsmaschinen wird meistens auf eine vollständige Einkleidung der Maschinen verzichtet. Da die Zugänglichkeit der zum Teil noch handbestückten Maschinen eine wesentliche Rolle spielt, und die Funktionalität der oft verwendeten Vakuumsaugmittel nur in sauberem Zustand gewährleistet ist, muss eine einfache Zugänglichkeit der Maschine gewährleistet sein. Bei der Stationärbearbeitung sind zudem die hohe Flexibilität der Maschinen und damit auch die sich häufig ändernden Bearbeitungsverfahren wie Fräsen, Bohren oder Sägen zu beachten. Die absaugtechnische Schwierigkeit besteht darin, dass die unterschiedlichen Werkzeug- und Prozessparameter zu ständig in Orientierung und Geschwindigkeit variierenden Staub- und Spänestrefeldern führen [Ble04]. Häufig werden deshalb bei Stationärmaschinen kastenförmige Absaughauben verwendet, welche den Zerspanungsbereich weiträumig einhausen. Zum Werkstück hin sind die Absaughauben mit Vorhängen aus PVC-Lamellen oder mit Bürstenelementen flexibel

abgedichtet. An diesen Stellen besteht das Problem einer erhöhten Leckage. Zum Werkzeugwechsel kann die Haube gewöhnlich vertikal nach oben gefahren werden. Um jedoch bei 5-Achs-Fräsmaschinen sämtliche rotatorischen Bewegungsfreiheitsgrade der Maschine auf die Absaughaube zu übertragen ist ein erheblicher konstruktiver Aufwand zu betreiben. Auch entstehen durch die den Flexibilitätsanforderungen Rechnung tragenden, groß dimensionierten Absaughauben hohe Verluste. So geht der Trend heute doch zu vollgekapselten Maschinen.

Einen anderen Lösungsansatz verfolgen z.B. diverse Werkzeughersteller. Fräswerkzeuge, welche dem Staub- und Spänestrahl eine Vorzugsrichtung und eine möglichst hohe Geschwindigkeit nach der Zerspanung geben, sollen helfen, den Erfassungsgrad der Absaugeinrichtungen zu steigern. Verwirklicht wird dies z.B. durch das Einbringen von Wendelnuten in den Werkzeuggrundkörper, was zu einer aufwärts gerichteten Flugrichtung der zerspannten Partikel führt [Ble04].

2.2.4 Trends in der Forschung

Intensivere Forschung wird auf dem Gebiet der Holzstaub- und –späneerfassung seit ca. Anfang der 80er Jahre betrieben. Dies hängt u.a. mit der verschärften Vorschriftenlage zusammen. Aufgrund der Werkzeugvielfalt gestaltet sich gerade die Entwicklung von Absaugeinrichtungen an stationären Bearbeitungsmaschinen allerdings äußerst schwierig. Diverse Ansätze hatten die Steigerung der Erfassungsgeschwindigkeit an der Wirkstelle zum Ziel. Durch die Erzeugung von Wirbelfeldern oder den Einsatz von Leitelementen sollte der an der Zerspanungsstelle austretende Partikelstrahl fokussiert oder umgelenkt werden, so dass eine nachgeschaltete, konzentrierte Erfassung über den Absaugstutzen erreicht werden konnte. Auch mit diversen Dichtkonzepten sollte eine lokale Konzentration der Partikelemissionen im Bereich der Wirkstelle erreicht werden. Jedoch wurden auch hierbei keine stapelfähige Werkstückoberflächen erreicht und auch hier steht ein Nachweis der Praxistauglichkeit noch aus. Auch ein ganzheitlicher Ansatz für eine effektive Staub- und Späneerfassung an Stationärmaschinen, welcher sämtliche Bearbeitungsfälle abdeckt wurde bisher noch nicht entwickelt. So liegen die Erfassungsgrade von Absaugeinrichtungen immer noch unter 90% [Ble04].

Zu Patenten, welche sich in der Praxis durchsetzten, kam es lediglich bei den kontinuierlich arbeitenden Durchlaufanlagen. Hier konnten mit Leitblechen und speziellen Werkzeugen gute Ergebnisse erzielt werden.

2.3 Qualitätsmerkmale bei der Holzbearbeitung

Die Bearbeitungsqualität von Holzwerkstücken wird anhand verschiedener Qualitätsmerkmale bestimmt. Diese werden durch unterschiedliche Einflussgrößen festgelegt.

2.3.1 Oberflächenqualität und deren Beurteilung

Westkämper und Schadoffsy [WSc95.2] beschreiben das Problem, Holzoberflächen nach einem objektiven Maßstab zu beurteilen. Als eines der bedeutendsten Qualitätsmerkmale gilt die Oberflächenstruktur. Im Gegensatz zur Metallbearbeitung ist die Funktion z.B. einer Massivholzoberfläche zumeist ästhetischer Natur. Häufig ist eine gewisse Rauigkeit sogar gewünscht.

Bei der Beurteilung von Holzoberflächen muss zwischen der Strukturrauigkeit des Werkstoffs, der Bearbeitungsrauigkeit und der kinematischen Rauigkeit unterschieden werden. Die Strukturrauigkeit existiert aufgrund der inhomogenen Eigenschaften von Holz. Sie ist zum einen von der Holzart und zum anderen von der Art der Betrachtung abhängig. So können holzanatomische Merkmale dazu führen, dass je nach Anzahl und Durchmesser der angeschnittenen Gefäße die Strukturrauigkeit unterschiedlich ist. Die Bearbeitungsrauigkeit ergibt sich durch die Abbildung der Schneidkante auf der Oberfläche des Werkstücks und aus der Schädigung der Zellstruktur durch den Schneideeingriff. Dies kann z.B. auf abgenutzte Schneiden zurückgeführt werden. Die kinematische Rauigkeit lässt sich auf die geometrischen Eingriffsverhältnisse beim Fräsen zurückführen. Aufgrund der zykliden Bewegungsbahnen der Schneidenpunkte entstehen rillenförmige Spuren am Werkstück, so genannte Messerschläge. Trotz der geringen, im μm -Bereich liegenden Messerschlagtiefe t_u , sind diese gut zu sehen, da sie schräg einfallendes Licht streuen und dabei Schattenwirkungen erzeugen. In diesem Fall ist ein Werkstück ohne Nachbearbeitung kaum noch zu verwenden.

Bei einer Beurteilung von Holzoberflächen ist eine Trennung der Strukturrauigkeit von der Bearbeitungsrauigkeit das vorrangige Ziel [WSc95.1]. Eine mathematische Erfassung bearbeiteter Oberflächen hat ihren Ursprung in der Metallbearbeitung [Wa00]. Das nach DIN 4760 [Din1] definierte Ordnungssystem lässt sich laut Sachsse auch zur Bewertung von Holzoberflächen einsetzen. Er hält mechanische Tastschnittverfahren als am besten dafür geeignet.

Erfassung der Holzoberfläche durch das berührende Tastschnittverfahren

Westkämper und Schadoffsky [WSc95.1, WSc95.2] stellen in Anlehnung daran verschiedene Mess- und Auswerteverfahren zur Bestimmung von Oberflächenqualitäten vor und erfassen die Oberflächentopographie von Massivholz durch das berührende Tastschnittverfahren. Dieses Verfahren bietet zur Bewertung von Holzoberflächen einige Vorteile: es handelt sich dabei um ein Verfahren mit Profiwiedergabe. Der aufgezeichnete Schrieb stellt die Oberfläche entlang einer Linie dar. Bei entsprechender Erfahrung des Prüfers lassen sich aufgrund dieser Form schon bestimmte Struktur- und Bearbeitungsmerkmale bereits am ungefilterten Messschrieb erkennen. Bei Holzoberflächen mit großvolumigen Poren ist das Verfahren jedoch ungeeignet, da beide Rauheitsanteile gleichermaßen in das Messergebnis einfließen. Berücksichtigt werden muss bei berührenden Tastern, dass auch Kräfte normal zur Oberfläche auftreten. Diese sind jedoch relativ gering. Die zu erwartende Eindringtiefe W_0 lässt sich mittels der Hertzsschen Formel abschätzen. Sie ergibt sich aus der Messkraft F , der Querdehnungszahl ν , dem Tasspitzenradius r und dem Elastizitätsmodul E des Werkstoffes senkrecht zur Oberfläche des Werkstoffes:

$$W_0 = \sqrt[3]{\frac{2,25(1-\nu^2)^2 \cdot F^2}{E^2 \cdot r}}$$

Die wirkende Messkraft F ist dabei relativ gering. Aufgrund des inhomogenen und anisotropen Aufbaus von Holz kommt es jedoch immer auf die Merkmale der jeweiligen Oberfläche an, ob der Einfluss der Tastkraft tolerierbar ist. Außer des Werkstoffes sind hier auch die Messrichtung (Einfluss der Jahresringe) entscheidend. Eine ganze Reihe gängiger Messverfahren scheidet bei der Bewertung von Holz aus, da die Auflösung dieser Verfahren für den Nachweis von Bearbeitungsmerkmalen an Holzoberflächen häufig zu hoch ist. Die ermittelten Kenngrößen, der Mittenrauhwert R_a , die gemittelte Rauhtiefe R_z und die maximale Rauhtiefe R_{max} lassen sich nur zum Teil direkt auswerten. Um die langwelligen von den kurzwelligen Signalanteilen zu trennen bedarf es einer Filterung, mit der Welligkeit und Rauigkeit der Oberfläche voneinander getrennt werden können. Für die hierfür durch DIN 4768 vorgesehene Wahl der notwendigen Grenzwellenlänge λ_c liefert die Literatur jedoch kaum Anhaltspunkte [WSc95.2].

Die Grenzwellenlänge ist von Periodizitäten im Messsignal abhängig. Diese entstehen bei Massivholzoberflächen unter anderem durch die Zellwände, Früh- und Spätholzunterschiede bei Nadelhölzern sowie der kinematischen Rauheit. Sie führen jedoch zum Ergebnis, dass beim derzeitigen Stand der Rauheitsmesstechnik für

Massivholzoberflächen eine genaue Kenntnis der Filter und Auswertelgorithmen notwendig sind. Dies vorausgesetzt, lassen sich jedoch auch an Holzoberflächen bedingt reproduzierbare Messungen durchführen. Konstante Messbedingungen sind die Voraussetzung dafür. Dennoch streuen die Messergebnisse vergleichsweise stark, so dass im Einzelfall immer noch der jeweilige Profilschrieb hinzugezogen werden muss [WSc95.2]. Dies zeigt auch Abbildung 4.

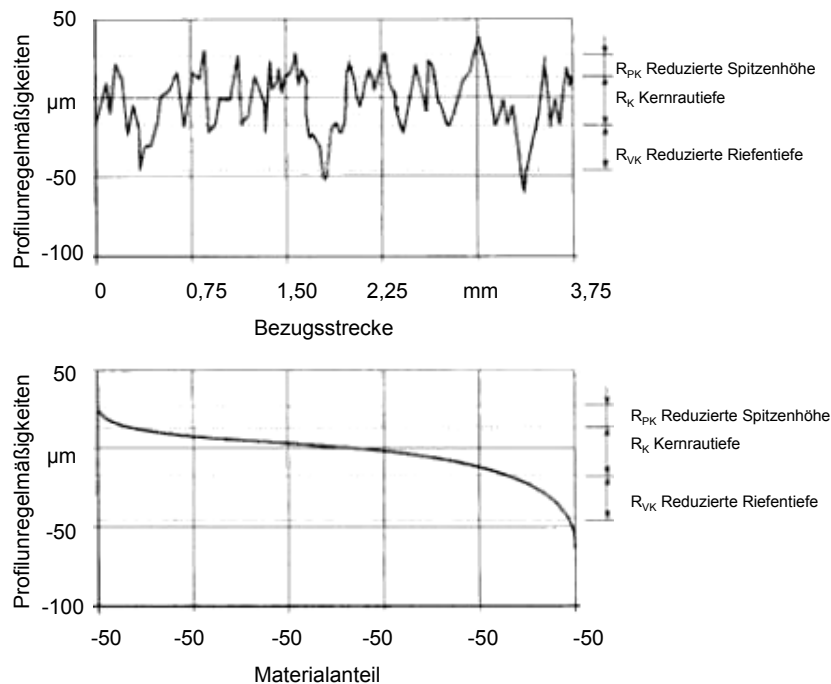


Abbildung 4: Rauheitsprofil und Abbottkurve mit zugehörigen Kennwerten zur Charakterisierung von Holzoberflächen [WSc95.2]

In Abbildung 4 werden unterschiedliche Kennwerte zur Oberflächencharakterisierung wie bei der Metallbearbeitung üblich auf die Holzbearbeitung angewandt. Die dargestellte Abbott-Kurve dient dabei als Vergleichsgröße. Sie gibt die Verteilung des Materialtraganteils mit der Tiefe des Rauheitsprofils an. Die verschiedenen Teile der Abbot-Kurve, die reduzierte Spitzenhöhe R_{PK} , die Kernrautiefe R_K und die reduzierte Riefentiefe R_{VK} kennzeichnen laut Westkämper und Schadoffsky verschiedene Merkmale der Holzoberfläche. R_{PK} kennzeichnet den Porenanteil, R_{VK} beschreibt den Faseranteil und R_K die Bearbeitungsstruktur.

Erfassung der Holzoberfläche durch parallel angeordnete Profilschriebe

Für sich betrachtet wird zwar durchaus eine Übereinstimmung mit Praxiswerten erzielt, jedoch sind die Beurteilungsmaßstäbe zu unterschiedlich [Wal04]. Um Ergebnisse besser vergleichbar zu machen, wurden Versuche getätigt, bei denen die Holzoberfläche zunächst durch parallel angeordnete Profilschriebe „flächig“ erfasst

wird. Daraus wird ein Graustufenbild erstellt, wobei die Änderung der Helligkeit von Punkt zu Punkt ein Maß für die Neigung der Oberfläche ist. Durch spezielle Filter sollen auf diesem Weg Poren im Profilschrieb erkannt werden und bei der Ermittlung der Bearbeitungsrauigkeit nicht mehr in die Kenngrößen einfließen. In laufenden Fertigungen wird dieses Verfahren meines Wissens nach jedoch noch nicht angewendet.

2.3.2 Einflussgrößen auf die Oberflächenqualität

Einen umfassenderen Überblick über die Einflussgrößen auf die Oberflächenqualität gibt Heisel [He96]. Er unterteilt die Einflussgrößen bzgl. der Oberflächenqualität in werkstoff- und technologisch bedingte Größen.

Tabelle 1: Einteilung der Qualitätsmerkmale gefräster Oberflächen und Zuordnung verschiedener Einflussgrößen [He96]

EINFLUSSGRÖßEN AUF DIE OBERFLÄCHENQUALITÄT			
<i>werkstoffbedingt</i>	<i>technologisch bedingt</i>		
	<i>prozessbedingt</i>	<i>werkzeugbedingt</i>	<i>maschinenbedingt</i>
Art	Bearbeitungsverfahren	Schneidenwinkel	Bahninterpolation
Härte/Dichte	Vorschub	Verschleiß	statisches Strukturverhalten
Homogenität	Eingriffsverhältnisse	Unwucht	thermisches Strukturverhalten
Faserrichtung	kinematische Rauheit	Schnittkräfte	dynamisches Strukturverhalten
Beschichtungswerkstoff	Schnittkräfte	Werkzeugfehler	
	Schnittgeschwindigkeit	Rund-/Planlauf	
		Werkzeugart	

Die werkstoffbedingten Qualitätsmerkmale wurden schon beschrieben. Die prozessbedingten Einflussgrößen werden großteils durch die entstehenden Schnittkräfte gespiegelt. Abhängig vom Bearbeitungsverfahren, Zahnvorschüben, den Eingriffsverhältnissen und der Schnittgeschwindigkeit ergeben sich spezifische Schnittkräfte. Diese werden zudem auch vom jeweiligen Werkzeug z.B. durch den Schneidenwinkel und den entstehenden Verschleiß an diesem beeinflusst. Die maschinenbedingten Qualitätsmerkmale werden zum einen durch die Maschinensteuerung verursacht (Bahninterpolation, Anfahr- und Abbremsverhalten etc.) und zum anderen durch das Verhalten der mechanischen Maschinenbauteile. Genauigkeitsfehler einzelner Maschinenteile führen auch zu Fehlern am Werkstück.

Besondere Bedeutung kommt beim Fräsen mit dem Roboter dem statischen und dynamischen Maschinenverhalten zu. Bei der Konstruktion von Werkzeugmaschinen spielt z.B. die Steifigkeit eine extrem wichtige Rolle. Genauigkeiten werden auch immer absolut angegeben. Gerade bei Knick-Arm Robotern kann jedoch schon bauartbedingt nur ein Teil der von Werkzeugmaschinen geforderten Steifigkeit erreicht werden, da gerade beim Arbeiten mit ausgefahrenem Arm ein ungünstiges Verhältnis von Kraft/Hebel entsteht. Auch ist bei Robotern im Allgemeinen nicht die absolut erreichbare Genauigkeit relevant, sondern die Wiederholgenauigkeit.

2.3.3 Kantenqualität und deren Beurteilung

Gerade bei beschichteten Holzwerkstoffen stellt die Kantenqualität das Hauptqualitätskriterium dar [Fus95]. Meistens werden hier die bearbeiteten Flächen anschließend überdeckt, so dass lediglich die Kante sichtbar bleibt. Als Beurteilungskriterium werden verschiedene Kriterien herangezogen: Ausbruch, Welligkeit der Schmalfläche, Porigkeit der Mittellage oder der Schmalfläche. Als größtes Kriterium bezüglich der Kantenqualität wird allgemein der Standweg gesehen.

Zur Beurteilung der Kantengüte stellt z.B. Knospe [Kno84] ein Messverfahren vor. Hierbei wird die zu bewertende Messlänge des Werkstückes in gleich lange Abschnitte von jeweils 50 mm eingeteilt. In jedem Abschnitt wird der größte Kantenausbruch bestimmt und gemittelt. Dies hat sich als ein in der Praxis bewährtes Vergleichsnormale zum subjektiven Eindruck des Auges herausgestellt: nicht viele kleine, sondern große Kantenausbrüche bestimmen die Qualität der Schnittkante. Des Weiteren gibt es noch verschiedene mechanisch tastende Verfahren, welche z.B. Fuß [Fus95] zusammenfasst.

2.3.4 Schmalflächenqualität und deren Beurteilung

Bis heute wird die Schmalflächenqualität nur durch eine vergleichende Sichtkontrolle beurteilt. Ein Messverfahren, welches objektive Vergleiche ist noch nicht im Einsatz [Wal04]. Optische Messverfahren gelten als zu aufwändig und teuer, mechanische Messverfahren hingegen sollten große Messbereiche (bis zu 3mm) überstreichen können, da die aus dem Verband der Schmalfläche herausgerissenen Späne in dieser

Größenordnung liegen. Auch ist die viel zu kleine Messlänge der vorhandenen Geräte von Nachteil, wenn es um die Bewertung von Bauteilen mit größerer Länge geht.

2.4 Stand der Technik von Oberfräsen zur Holzbearbeitung

2.4.1 Bearbeitungszentren und NC-Oberfräsen

In der Holzverarbeitenden Industrie kommen bei Fräsprozessen zwei Maschinentypen zum Einsatz: stationäre Bearbeitungsmaschinen (Bearbeitungszentren und NC-Oberfräsen), die wegen ihrer Flexibilität vorwiegend zur Produktion kleiner Stückzahlen eingesetzt werden und Durchlaufmaschinen (z.B. Formatbearbeitungsmaschinen und Kehlautomaten), mit denen in der Regel in größeren Stückzahlen produziert wird [Hes00]. Da die Zielsetzung der Diplomarbeit die Entwicklung einer preisgünstigen, modular aufgebauten robotergeführten Oberfräse ist, wird im Folgenden lediglich auf stationäre Bearbeitungszentren mit einem Grundpreis bis max. 100000 € eingegangen. Durchlaufmaschinen werden ihrer geringen Flexibilität wegen nicht weiter betrachtet.

Möchte man die am Markt verfügbaren Holzbearbeitungsmaschinen bezüglich ihrer Leistungsfähigkeit miteinander vergleichen, liegt das Hauptaugenmerk auf den erreichbaren Vorschubgeschwindigkeiten, der Achsbeschleunigung, den Schnittgeschwindigkeiten und der erreichbaren Spindeldrehzahl und -leistung. Die Leistungsfähigkeit der heute am Markt verfügbaren Holzbearbeitungsmaschinen wird somit im Wesentlichen durch die eingesetzten Hauptspindeln und Antriebskomponenten bestimmt. Zwar erreichen moderne Bearbeitungszentren wie in Tabelle 2 zu sehen Achsgeschwindigkeiten bis zu 85 m/min, jedoch sind diese Geschwindigkeiten unter Berücksichtigung der erzielbaren Werkstückqualität nicht auf den Arbeitsvorschub übertragbar. Dieser liegt abhängig von der Bearbeitungsaufgabe derzeit zwischen 20-30 m/min [Hes00]. Die derzeit erreichbare Beschleunigung liegt bei konventionellen Bearbeitungszentren zwischen 0,9-5 m/s² im Arbeitsgang. Höhere Vorschubgeschwindigkeiten bei gleichbleibend hohem Qualitätsniveau sind nach derzeitigem Stand der Erkenntnisse nur in Verbindung mit höheren Schnittgeschwindigkeiten zu erzielen. Die Drehzahl konventioneller Spindeln für Bearbeitungszentren liegt großteils in einem Bereich zwischen 24.000 bis 30.000 min⁻¹. Es ergibt sich somit folgender Überblick:

Tabelle 2: Übersicht CNC-Stationärbearbeitungszentren [HTr03]

LEISTUNGSDATEN VON CNC-BEARBEITUNG SZENTREN		
<i>Achsen</i>	Achsgeschwindigkeiten (Eilgang)	20-85 m/s
	Bahngeschwindigkeiten	20-80 m/s
	Achsbeschleunigungen (Eilgang)	1-6 m/s ²
	Achsbeschleunigungen (Arbeitsgang)	0,9-5 m/s ²
	wiederholbare Positioniergenauigkeit	+/- 5 - +/- 100 µm
	wiederholbare Konturgenauigkeit bei V _{max} im Arbeitsgang	+/-10 - +/-100 µm
	Antriebsleistung	2,5-20 kW
<i>Spindeln</i>	max. übertragbares Moment	2,9-32 Nm
	Drehzahlbereich	12000-50000 min ⁻¹
<i>Maschinentyp</i>	Preisklasse (berücksichtigter Bereich)	40000-100000 €

Da der stetig steigende Kostendruck in der Holzindustrie zur Forderung nach immer schnelleren, qualitativ aber zumindest gleichwertig fertigenden Maschinensystemen führt, geht der Trend zunehmend zur Hochgeschwindigkeitszerspannung (HSC). Hierbei geraten die am Prozess beteiligten Maschinenkomponenten jedoch zunehmend an technische Grenzen. Einige davon haben die Grenze der wirtschaftlichen Zweckmäßigkeit in Bezug auf Leistungs- und Geschwindigkeitssteigerung bereits erreicht. Das größte Potential zur Produktivitätssteigerung liegt meistens in der Steuerungs- und Softwareoptimierung, der Anpassung der Verwaltung, der Peripherie und der Hilfsanlagen zur Hochleistungsfertigung [HTr03].

Neben der Optimierung schon vorhandener Technik wird weiter in die Suche nach neuen Technologien investiert. Die größte Hoffnung wurde bislang in parallele und hybride Maschinenstrukturen gelegt.

2.4.2 Parallelkinematiken

Eine solche Maschine, speziell für die Holzbearbeitung konzipiert, wurde erstmals von der IMA Klessmann GmbH auf der LIGNA 1999 (Messe für die Forst- und Holzwirtschaft) vorgestellt. Sie ging aufgrund von Kalibrierproblemen jedoch nur für kurze Zeit in Serie. Weitere Konzepte zu Parallelkinematiken existieren u.a. von der Homag AG und dem Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) an der Universität Stuttgart (λ -Kinematik), sowie der Universität Dresden (Hexapode). Bereits auf dem Markt ist die Parallelkinematik „Pegasus“ der Reichenbacher Hamuel GmbH (vgl. Abbildung 5). Konzipiert ist sie für den Fräseinsatz und auch zum Handling von Platten etc.



Abbildung 5: Reichenbacher Hamuel GmbH, Parallelkinematik [Re06]

Die Struktur entspricht der eines Linapoden. Basis dieser Struktur sind Streben mit einer bestimmten Länge, deren Fußpunkte auf Führungen verschiebbar sind. Bezüglich der Parallelkinematiken ergibt sich folgender Überblick:

Tabelle 3: Leistungsdaten von Parallelkinematiken

LEISTUNGSDATEN VON PARALLELKINEMATIKEN		
<i>Achsen</i>	Bahngeschwindigkeiten	50-120 m/min
	Achsbeschleunigungen (Arbeitsgang)	10 m/s ²
	wiederholbare Positioniergenauigkeit	±1 - ±20 µm
	Antriebsleistung	1,7-21 kW
<i>Spindeln</i>	Drehzahlbereich	2400-30000 min ⁻¹

2.4.3 Holzbearbeitung mittels Robotern

Die Holzbearbeitung mittels Roboter steckt noch in den Anfängen. Die Kuka Roboter GmbH z.B. hat einen für hochpräzise Anforderungen konzipierten, absolutvermessenen Gelenkarmroboter (KUKA KR 60) für den mittleren Lastbereich (30-60 kg Handhabungsgewicht) mit einer wassergekühlten HSC Frässpindel (bis zu 35000 min⁻¹) ausgestattet. Mittels der Software KUKA.CAMRob 2.0 können NC-Daten, welche nach DIN 66025/DIN 66215 erstellt wurden, automatisch in ein Roboterprogramm umgewandelt werden. Dadurch wird der Roboter zu einer kostengünstigen Alternative (Kostenpunkt ca. 70 000 € ohne Zelle und Sicherheitseinrichtungen) zu 5-Achs-Bearbeitungsmaschinen und lohnt sich auch für kleine Losgrößen. Erreichbar sind damit Genauigkeiten von ± 0,3 mm [FhG06].

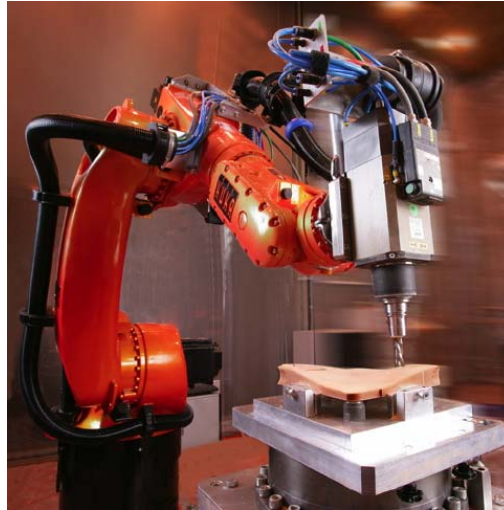


Abbildung 6: Kuka-Fräsroboter [Ku06]

Auch an der Hochschule für Architektur, Bau und Holz in Biel wurden Fräsversuche mit Robotern getätigt. Hierbei wurden Tests mit feststehender Frässpindel und auch Tests mit robotergeführtem Fräswerkzeug durchgeführt. Bei beiden Verfahren waren die Ergebnisse bezüglich der erreichten Fräsgenauigkeit jedoch nicht für den breiten Einsatz in der Produktion von Holzmöbeln etc. geeignet.

2.4.4 Handoberfräsen

Alle Elektrowerkzeuge lassen sich nach DIN 8590 entsprechend ihrer Fertigungsverfahren den sechs Hauptgruppen Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Beschichten und Ändern der Stoffeigenschaften einteilen. Weitere Möglichkeiten der Einteilung sind die Unterscheidung nach der Antriebsart, oder nach den Einsatz- und Anwendungsbereichen [He04].

Bei der Entwicklung von Elektrowerkzeugen steht ein möglichst hohes Leistungsgewicht an oberster Stelle. Weitere Anforderungen sind Handlichkeit, Kompaktheit, Bedienfreundlichkeit und Zuverlässigkeit. Um diesen Forderungen gerecht zu werden, müssen die einzelnen Komponenten bestimmten Anforderungen genügen. Als Antriebe werden aufgrund ihrer kompakten Bauweise in den meisten Fällen Universalmotoren eingesetzt, welche sowohl mit Gleich- als auch mit Einphasenwechselstrom betrieben werden. Ein weiterer Vorteil ist die sich durch eine Phasenanschnittsteuerung bietende Möglichkeit, eine einfache und preisgünstige Drehzahlverstellbarkeit zu schaffen [He04].

Die elektrische Aufnahmenleistung bewegt sich bei Handoberfräsen zwischen 750 W bis über 2000 W. Es werden dabei Drehzahlen bis zu 28000 min^{-1} erreicht. Bei Handoberfräsen stellt die Motorwelle gleichzeitig die Frässpindel dar. Wegen des breiten Einsatzspektrums besitzen Handoberfräsen meist eine stufenlose Drehzahlregelung, welche mittels einer Steuer- und Regelelektronik erzeugt wird. Die Drehzahl kann über ein breites Drehmomentband konstant gehalten werden, was sich beim Fräsen positiv auf die Oberflächenqualität auswirkt. Aus Sicherheitsgründen sorgen elektronische Bremssysteme für einen raschen Stillstand der Werkzeuge. Auch kann durch eine automatische Phasenanschnittsänderung ein elektronischer Sanftanlauf erreicht werden. Der Werkzeugwechsel wird bei Handoberfräsen im Gegensatz zu anderen Elektrowerkzeugen meist noch mit Schraubenschlüssel bewerkstelligt. Die vertikale Zustellung des Motors samt Frässpindel und Fräser geschieht durch Zwei- oder Dreisäulenführungen. Diese verbinden den Führungstisch mit der Handoberfräse. Um eine möglichst genaue Frästiefe einstellen zu können, ist an der Handoberfräse auch eine Messskala angebracht.

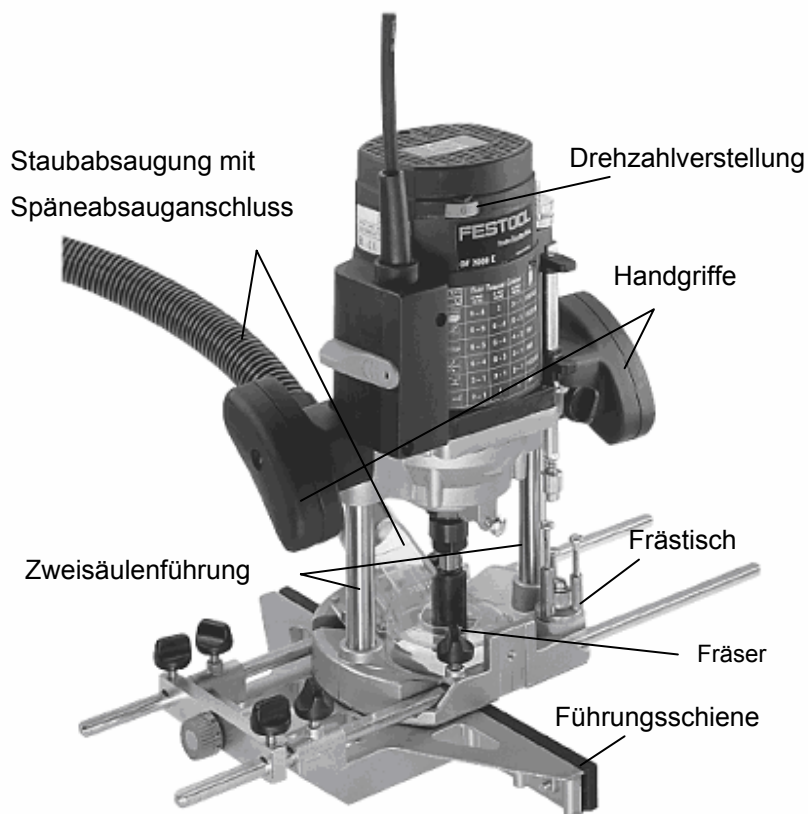


Abbildung 7: Aufbau einer Handoberfräse [Fe06]

Anwendungsbereiche von Handoberfräsen

Um die nach der Fertigstellung des Fräswerkzeugs folgenden Versuche möglichst gemäß dem späteren Einsatzbereich des Fräswerkzeugs durchzuführen, muss auch auf die Anwendungsbereiche der Handoberfräse eingegangen werden. Dem Einsatzbereich einer Handoberfräse sind kaum Grenzen gesetzt. So gilt sie als vielseitigstes Handwerkzeug. Mit Hilfe von Führungsschienen, Kopierschablonen etc. lassen sich genau definierte Konturen o.ä. abfahren. Auch lassen sich Handoberfräsen für eine stationäre Anwendung umrüsten. Hierzu werden sie an einer dafür vorgesehenen Vorrichtung fixiert.

Durch eine Vielzahl an Fräsern lassen sich nahezu alle Anwendungsbereiche abdecken. Nutfräser sind die am häufigsten eingesetzten Fräser. Sie werden für die Herstellung von Nuten im Werkstück, aber auch zur Bearbeitung der Werkstückkante verwendet. Die Handoberfräse wird dabei mittels eines Anschlags oder einer Schiene geführt. Falzfräser sind vor allem für die Herstellung von Möbeln und im Rahmenbau einsetzbar und werden für rechtwinklige Abstufungen und Ausfräsungen an Werkstückkanten benutzt. Als Führung dient ein Zapfen oder ein Kugellager. Mit Planfräsern werden Oberflächen aneinander angepasst oder Oberflächenüberstände abgefräst. Zudem gibt es eine Vielzahl von Profilfräsern für die unterschiedlichsten Anforderungen. Sie finden v.a. Einsatz in der Möbelfertigung und ermöglichen z.B. das fertigen von Werkstückkanten an Korpussen, Fachböden und Rahmen.

2.5 Magazinierung von Werkzeugen

Durch den Einsatz von Werkzeugwechselsystemen lässt sich die Flexibilität von Industrierobotern bezüglich der Anwendungsmöglichkeiten erheblich steigern. Beim Einsatz eines Wechselsystems müssen einzuwechselnde Werkzeuge und Greifer reproduzierbar bereitgestellt werden. Eine Fixierung erfolgt meist am werkzeugeitigen Unterteil. Beim Wechselvorgang sind immer die Positioniertoleranzen zwischen dem am Roboter befestigten Oberteil der Werkzeugwechsellvorrichtung und dem im Magazin abgelegten Unterteil, an dem die Werkzeuge etc. angebracht sind, zu berücksichtigen. Beim Wechselvorgang müssen diese Toleranzen durch entsprechende Zentriermöglichkeiten ausgeglichen werden. Um die Zentrierfunktion beim Einfahren nicht zu beeinträchtigen, sollte eine schwimmende Lagerung der Werkzeuge im Magazin vorgesehen werden. Auch muss zwecks einer einfachen Programmierung der Wechselbewegungen auf eine möglichst freie Zugänglichkeit und

ggf. eine an die Orientierung des Werkzeugs anpassbare Werkzeugablage geachtet werden [BSt90].

2.6 Umgebung des Fräswerkzeugs

Wie schon erwähnt, wird am Fraunhofer IPA zurzeit eine Roboterzelle für die Holzmöbelbearbeitung aufgebaut, deren Teilsysteme weitgehend modular sind. Es wurden bereits ein Bohrwerkzeug sowie eine Saugspinne zur Handhabung von Holzplatten entwickelt, welche der Forderung nach Modularität gerecht werden. In dieser Umgebung soll auch das Fräswerkzeug zum Einsatz kommen. Die Roboterzelle besteht aus folgenden Teilsystemen:

- ♦ Roboter mit Steuerung
- ♦ Zellenrechner mit Rechnerarbeitsplatz
- ♦ Spannsystem
- ♦ Werkzeuge mit Werkzeugmagazin
- ♦ Werkstückmagazine
- ♦ Werkstückpositioniersystem
- ♦ Zellengerüst

Zentrum der Holzbearbeitungszelle bildet ein Sechs-Achs-Knickarmroboter des Typs RX 130 der Firma Stäubli mitsamt Robotersteuerung. Der Roboter hat ein Handhabungsgewicht von 12 kg bei Nenngeschwindigkeit (Achsenabhängig zwischen 185 °/s und 580 °/s) und 22 kg bei langsamer Geschwindigkeit. Da zunächst davon ausgegangen wird, dass die Vorschubgeschwindigkeit V_f beim Einsatz der Handoberfräse nicht schneller als 60mm/s in Linearbewegung ist, kann durchgehend von einer langsamen Geschwindigkeit während des Fräsvorgangs ausgegangen werden. So dürfen hierbei auch höhere Belastungen auftreten.

Das maximale Kraftmoment darf als statisches Moment 66 Nm an Achse 5 (Z_6) und 25 Nm an Achse 6 (Z_7) betragen. Das dynamische Moment ist begrenzt auf 346 Nm an Achse 5 (Z_6) und 121 Nm an Achse 6 (Z_7). Die Reichweite zwischen den Achsen 2 und 5 beträgt 1250 mm.

Als Zellenrechner wird ein PC eingesetzt, der zur Programmierung des Roboters und der Werkzeuge dient. Zum Spannen der Werkstücke kommt ein Vakuum-Aufspanntisch des Typs VC-T der Firma Schmalz zum Einsatz. Kernstück des Systems ist eine Platte, auf der eine große Zahl an Saugstellen in einem Raster angeordnet sind. Alle Saugstellen werden über eine gemeinsame Leitung mit Vakuum versorgt und werden durch spezielle Ventile geschlossen. Wird ein Blocksauger bei einem Vakuum von ca. 30 kPa auf die Platte gesetzt, öffnet sich automatisch ein Ventil, sodass der Blocksauger an der Platte festgesaugt wird. Ab einem Vakuumniveau von ca. 50 kPa öffnet sich nach dem gleichen Prinzip ein Ventil im Blocksauger, sodass dieser das auf ihm liegende Werkstück mit ansaugt. Die Blöcke sind auf der Platte frei positionierbar, was eine sehr hohe Flexibilität bezüglich der Werkstückposition bietet.

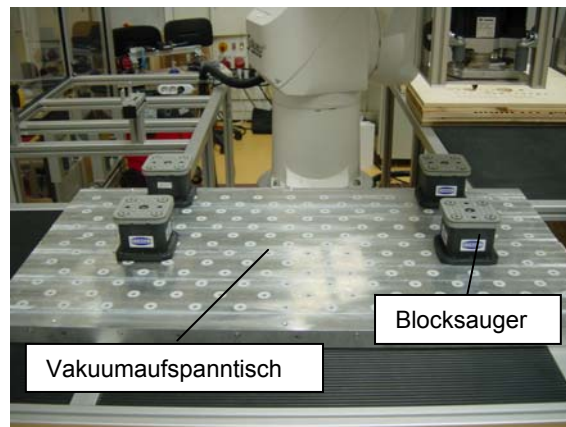


Abbildung 8: Vakuumaufspanntisch VC-T mit Blocksaugern

Zur Erzeugung des Vakuums steht eine Vakuum-Zentrale VZ 165 OG/200 der Firma Schmalz zur Verfügung. Diese besteht aus einer Vakuumpumpe, Vakuumspeicher, Sicherheitsrückschlagventil und interner Regelung. Damit baut die Pumpe im Speicher das eingestellte Vakuum auf. Ist dieses erreicht, wird die Pumpe über den integrierten Vakuumschalter solange abgestellt, bis das Vakuum unter den eingestellten Mindestwert absinkt [Mü05].

Um die Werkstücke auf dem Vakuum-Aufspanntisch spannen und bearbeiten zu können müssen sie vom Werkstückmagazin zum Spanntisch transportiert und zudem positioniert werden. Die Handhabung der Werkstücke wird mit Hilfe einer Saugspinne bewerkstelligt. Diese besteht aus 5 Saugnäpfen. Mit einem an der Saugspinne angebrachten Ejektor wird das benötigte Vakuum an den Saugnäpfen hergestellt. Die Saugkraft, mit der das Werkstück dann gehalten wird, resultiert aus der Druckdifferenz, die zwischen dem Vakuum im Inneren des Saugnapfs und dem atmosphärischen Druck der Umgebung herrscht [Bec93]. Der Saugnapf saugt sich also nicht an dem Objekt fest, sondern Objekt und Saugnapf werden durch den Überdruck der

Umgebung gegeneinander gepresst. Inlineventile ermöglichen ein Abschalten einzelner Saugnäpfe bei Bedarf. So lassen sich auch Werkstücke mit Löchern etc. handhaben. Dies kommt der Forderung nach größtmöglicher Flexibilität entgegen.

3 ANALYSE HANDELSÜBLICHER HANDOBERFRÄSEN HINSICHTLICH IHRER EIGNUNG ZUR AUTOMATISIERTEN FERTIGUNG

3.1 Vorgehensweise bei der Analyse der Handoberfräsen

Mit der Analyse der Handoberfräsen soll geprüft werden, inwieweit es mit welchem Aufwand möglich ist, diese in einer Vorrichtung aufzunehmen, welche von einem Industrieroboter geführt werden kann. Die einzelnen Teilsysteme, die zum Bedienen und Handhaben einer Handoberfräse nötig sind, werden definiert und darauf basierend werden die grundlegenden Anforderungen für die einzelnen Teilsysteme und das Gesamtsystem beschrieben. Die resultierenden Anforderungen werden anschließend detailliert und sofern möglich quantifiziert. Hierfür werden Geometrie, Abmessungen sowie relevante Handbedienungselemente der Handoberfräsen gängiger Hersteller ermittelt. Anhand dieser Daten wird im Anschluss eine Anforderungsliste abgeleitet, welche als Grundlage für Konzeption und Entwicklung der Vorrichtung dient.

3.2 Analyse von Möglichkeiten der Aufnahme des Werkzeugs in einer robotergeführten Vorrichtung

Zur Bedienung eines externen Werkzeuges mittels Industrieroboter benötigt man eine Schnittstelle zwischen Roboter und Werkzeug, in diesem Fall Roboter und Handoberfräse. Die Schnittstelle soll aus einer nach Möglichkeit plug-and-play-fähigen Vorrichtung bestehen. Diese wird anhand des Werkzeugwechselsystems mit dem Roboter verbunden und ist fest in die die Handoberfräse eingespannt. Es ist darauf zu achten, dass die gesamte Vorrichtung robust gegenüber den beim Fräsen entstehenden Prozesskräften und unempfindlich gegenüber frästypischen Einflüssen, wie Späneflug ist. Plug-and-play-fähig bedeutet, dass die Handoberfräse ohne Umrüstprozess oder sogar konstruktive Anpassungsmaßnahmen direkt zum Fräsen

eingesetzt werden kann. Das Ein- und Ausspannen soll dabei in möglichst kurzer Zeit machbar sein. Die Vorrichtung muss dazu unabhängig vom Handoberfräsentyp und Robotertyp, ohne aufwendige Sondermaßnahmen, verwendbar sein. Der Fräsprozess soll später überwacht und gesteuert werden können. Dazu muss die Möglichkeit Kommunikation mit dem Zellenrechner gegeben sein.

3.2.1 Untergliederung des Gesamtsystems in Teilsysteme

Um die Anforderungen an die Vorrichtung genauer formulieren und kategorisieren zu können, wird das Gesamtsystem der Aufnahmevorrichtung in Teilsysteme unterteilt. Die beschriebenen Teilsysteme werden anschließend bezüglich der an sie gestellten Anforderungen näher untersucht. Die Aufnahmevorrichtung besteht aus folgenden Teilsystemen:

- ♦ Trägersystem
- ♦ Spannsystem
- ♦ Werkzeugwechselsystem
- ♦ Betätigungssystem
- ♦ Werkzeugsteuerung und Sensorik

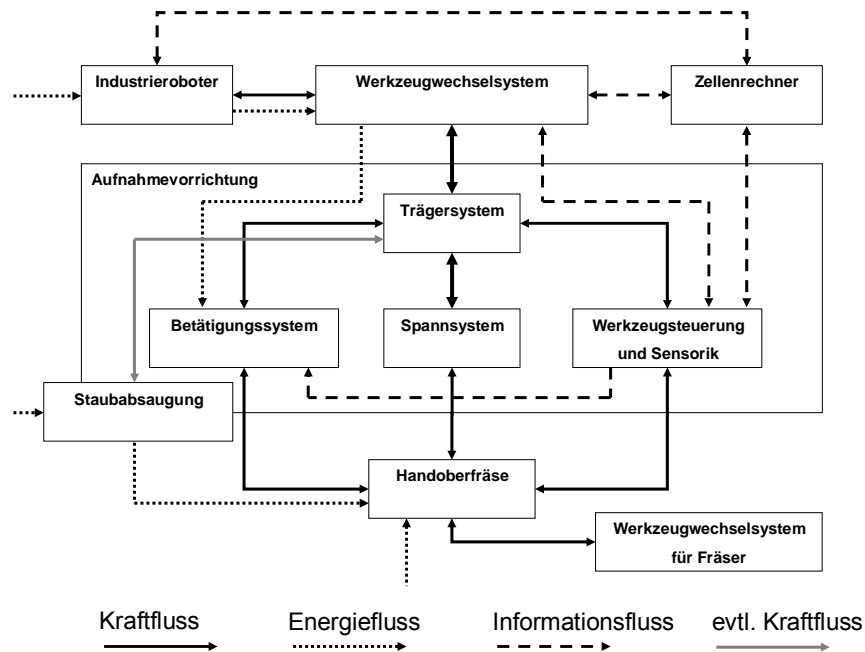


Abbildung 9: Kraft-, Energie- und Informationsflüsse d. Aufnahmevorrichtung

In Abbildung 9 sind schematisch die Kraft-, Energie- und Informationsflüsse innerhalb der Aufnahmevorrichtung und zwischen Aufnahmevorrichtung, Industrieroboter, Zellenrechner, Werkzeugwechselsystem und Handoberfräse dargestellt.

3.2.2 Analyse des Trägersystems

Das Trägersystem ist das Grundgerüst der Aufnahmevorrichtung. Es verbindet die einzelnen Teilsysteme miteinander und verbindet das Fräswerkzeug mit Hilfe des gegebenen Werkzeugwechselsystems mit dem Industrieroboter. Das Trägersystem soll auch die resultierenden Kräfte und Momente beim Fräsen vom Spannsystem aufnehmen und an den Roboter weiterleiten. Um eine hohe Maßhaltigkeit der zu bearbeitenden Werkstücke zu erreichen, muss das Trägersystem eine hohe Steifigkeit besitzen. Zu untersuchen ist auch, ob die Frässpindel mittels des Trägersystems direkt in einer Linie mit der 6. Achse des Roboters anzubringen ist. Dies bringt bei der Programmierung des Roboters Vorteile mit sich, da der TCP (die Spitze des Fräses) in der Verlängerung des Mittelpunktes des Handflansches liegt. Auf diese Weise wird später der Aufwand beim Programmieren der Roboterbahn verringert.

Für die Dimensionierung des Trägersystems sind wahrscheinlich die Außenabmessungen der verwendeten Handoberfräsen relevant. Da die Vorrichtung, wie beschrieben, jedoch nicht nur ein bestimmtes Modell aufnehmen können muss, wurden exemplarisch sieben für den Industrie- und Handwerksbedarf konzipierte Handoberfräsenmodelle verschiedener Hersteller bezüglich relevanter Werkzeugabmessungen untersucht:

- ♦ Bosch GOF 900 CE
- ♦ Bosch GOF 2000 CE
- ♦ Dewalt 625E
- ♦ Festo OF 1010
- ♦ Festo OF 1400/2000
- ♦ Metabo OFE 738
- ♦ Würth Master 1300

Die Handoberfräsenmodelle sind mit einem 10mm-Raster im Hintergrund fotografiert. Daran wurden die relevanten Maße erfasst.



Abbildung 10: Diverse Handoberfräsen

Da die Erfassung sämtlicher existierender Modelle kaum möglich ist und auch hinsichtlich neuer Modelle mit veränderten Geometrien keinen Sinn macht, genügt die hierbei erreichte Genauigkeit von ca. $\pm 5\text{mm}$ vollkommen. Aufgenommen wurden sämtliche Maße, welche für das Aufbringen der Spannkraft und der Auslegung des Trägersystems als evtl. relevant erachtet wurden.

Da die Oberflächengeometrien der Handoberfräsen stark strukturiert sind, ist das Generieren von CAD-Modellen äußerst aufwendig. Deshalb wurde darauf verzichtet. In

Tabelle 4 sind sämtliche Daten, welche für die Auslegung des Trägersystems evtl. relevant sind, aufgeführt. Dies sind die Höhe h , die Breite b_1 , b_2 und die Tiefe t_1 und t_2 (vgl. Abbildung 11).

Tabelle 4: Relevante Maße für die Auslegung des Trägersystems

Bezeichnung	Bosch GOF 900 CE	Bosch GOF 1300 CE	Metabo OFE 738	Festo OF 1010	Festo OF 1400	Festo OF 2000	Dewalt 625E	Würth 1100 E
Fräskorbhub [mm]	50	58	50	55	70	65	62	55
Gewicht [kg]	3,5	4,8	3	2,7	4,5	5,1	5,2	3,1
h [mm]	250	325	300	225	280	318	380	265
b_1 [mm]	160	180	160	126	130	172	230	165
b_2 [mm]	235	245	235	295	305	245	280	245
t_1 [mm]	130	165	112	148	160	144	170	110
t_2 [mm]	100	140	90	111	138	132	152	95

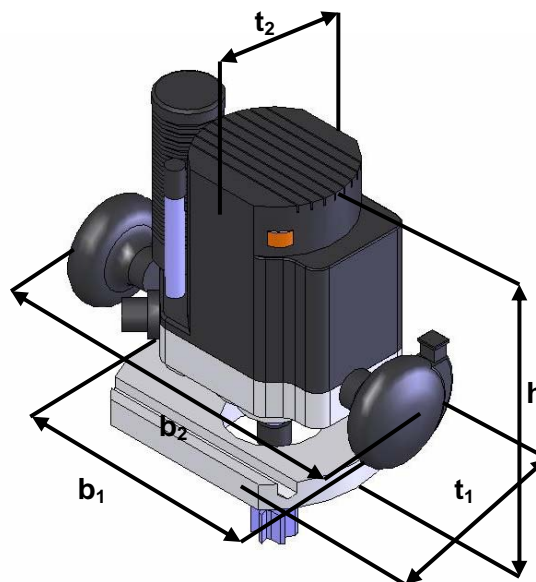


Abbildung 11: Relevante Maße der Handoberfräse

Als maßgebliche Höhe h wird der Abstand von der Unterseite des Frästisches bis zur Oberseite des Gehäuses bei eingefahrenem Fräskorb bestimmt. Dieser ist bei allen Systemen dauerhaft in jeder Position fixierbar. Die Verwendung der Handoberfräsen

mit eingefahrenem Fräskorb ermöglicht eine flexible Verwendung des Fräswerkzeugs. Da sich bei der robotergeführten Verwendung der Handoberfräsen kaum Vorteile durch eine auf dem Werkstück aufliegende Grundplatte ergeben, scheint es am sinnvollsten, diese so weit als möglich aus der Eingriffszone des Fräasers zu entfernen, so dass dieser durch den erweiterten Aktionsradius evtl. auch zur Erzeugung von Freiformflächen verwendet werden kann. Bei einer elastisch am Werkstück aufliegenden Grundplatte wäre die am Werkzeug vorhandene Absaugeinrichtung näher am Eingriffsort. Es bedürfte jedoch einer umfangreichen Regelung, um z.B. ein seitliches Anfahren an das Werkstück zu bewerkstelligen. Da die Konzeption des Trägersystems stark von der Konzeption des Spannsystems, der Art der Absaugeinrichtung etc. abhängig ist, wird die Konzeption erst nach der Entwicklung der anderen Teilsysteme vorgenommen.

3.2.3 Analyse des Spannsystems

Die Aufgabe des Spannsystems besteht darin, die Handoberfräse in der Vorrichtung zu fixieren, indem es die Kräfte und Momente, die über den Fräser auf das Werkzeug einwirken, aufnimmt und an das Trägersystem weiterleitet. Beim Fräsen sind gleichermaßen Kräfte in Richtung der Frässpindel als auch senkrecht dazu zu erwarten. Auch das durch die Drehbewegung der Frässpindel entstehende Moment muss aufgenommen werden.

Die Sicherung der Handoberfräse kann sowohl durch einen Kraftschluss, als auch einen Formschluss erfolgen. In beiden Fällen muss darauf geachtet werden, dass sämtliche evtl. wirkenden Kräfte und Momente aufgenommen werden können. Da sich, wie schon bei der Ableitung der Randbedingungen für das Trägersystem festgestellt, die einzelnen Fabrikate stark unterscheiden, wird die Möglichkeit der Kräfteaufnahme durch einen Formschluss ausgeschlossen. Bei einem Kraftschluss kann die Spannkraft entweder nur passiv, durch den Vorgang des Einspannens selbst erzeugt werden oder passiv und aktiv, wobei der aktive Kraftanteil durch einen Antrieb erzeugt wird. Der passive Kraftanteil bei der zweiten Variante soll die Handoberfräse nur in der Vorrichtung sichern, während die Antriebe ausgeschaltet sind. Der aktive Kraftanteil soll die Prozesskräfte beim Fräsen aufnehmen. Ein rein aktives Spannen ist nicht möglich, da beim Abschalten der Antriebe oder beim Ausfall der Antriebsenergie das Werkstück nicht mehr gesichert ist.

Das Erzeugen der Spannkraft kann im Prinzip unabhängig vom zu spannenden Handoberfräsenmodell betrachtet werden. Die Höhe der Spannkraft orientiert sich an der Kraft, mit der ein Mensch ungefähr eine Handoberfräse handhaben kann. Es wird angenommen, dass diese im Allgemeinen einen Wert von 300 N bei der manuellen Nutzung nicht überschreitet. Mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 ergibt sich daraus eine Spannkraft von mindestens 450 N, was einer Gewichtskraft von ca. 45 kg entspricht. Als maximal an der Frässpindel wirkendes Moment können lt. Auskunft der Fa. Metabo 3,5 Nm angenommen werden. So ergibt sich mit einem Sicherheitsfaktor von 1,5 ein Moment von 5,25 Nm.

Um die Spannkraft auf die Handoberfräse übertragen zu können, muss zunächst ermittelt werden, an welchen Stellen dies möglich bzw. sinnvoll ist. Dazu ist es notwendig Stellen zu finden, an denen die Spannkraft auf jede Handoberfräse übertragen werden kann. Grundsätzlich ist das Aufbringen der Spannkraft an allen nicht beweglichen Teilen einer Handoberfräse möglich. Da jedoch mit verhältnismäßig hohen Kräften und Momenten gerechnet werden muss, sollen die Punkte an denen die Spannkraft aufgebracht wird, einen Formschluss erlauben oder eine ebene Fläche aufweisen. In Tabelle 5 sind die erfassten Daten, welche zur Analyse der Randbedingungen für ein Spannsystem relevant sein können, aufgeführt.

Tabelle 5: Relevante Oberflächenabmessungen der Handoberfräsen

Bezeichnung	Bosch GOF 900 CE	Bosch GOF 1300 CE	Metabo OFE 738	Festo OF 1010	Festo OF 1400	Festo OF 2000	Dewalt 625E	Würth 1100E
∅ Führungsstangen [mm]	10	10	8	8	8	8	10	8
Abstand F: Führungsstange-Führungsstange [mm]	160	160	95	107	79	100	100	85
Abstand G: Gleitebene-Führungsstange [mm]	14	17	12	11	17	11	9,4	11

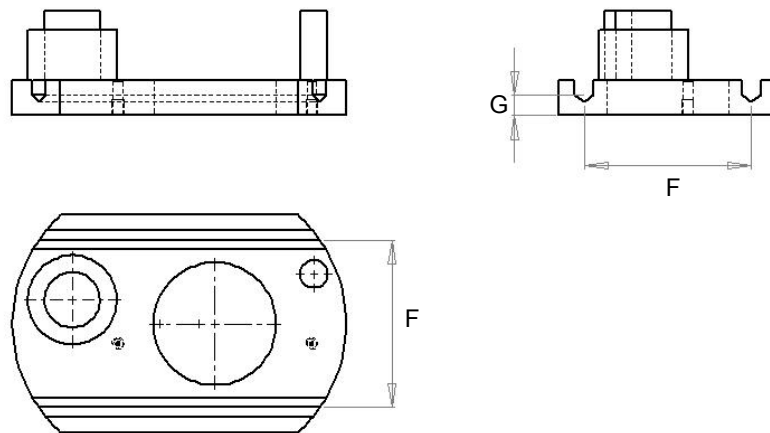


Abbildung 12: Skizze mit relevanten Oberflächenabmessungen der Handoberfräse

Aufgrund der unterschiedlichen Formen der einzelnen Handoberfräsen kann die Möglichkeit eines reinen Formschlusses außer Acht gelassen werden. Da die Motorgehäuse und Griffe der Handoberfräsen keine einheitliche Form aufweisen und auch keine gemeinsamen ebenen Flächen haben, lassen sich die notwendigen Spannkraften hier nicht mit einem auf alle Handoberfräsen passenden Spannmittel aufbringen. Manche Elektrowerkzeughersteller, wie z.B. Metabo mit der OF 738 bieten Handoberfräsen an, welche extra mit einem Spannhals versehen sind. Mit einer Spannzange lassen sich diese Werkzeuge problemlos maschinell führen.



Abbildung 13: Handoberfräse Metabo OF 738 mit Spannhals

Der angesprochene Spannhals ist in Ansätzen an allen Handoberfräsen vorhanden, jedoch ist die Höhe dieser meistens kleiner 5 mm. So gestaltet sich das verlässliche Aufbringen einer ausreichenden Spannkraft sehr schwer. Auch ist bei den meisten

Fabrikaten an dieser Stelle oft ein Schalter zum Werkzeugwechsel angebracht. Bei einer bündigen Anbringung einer Spannzange wäre dieser immer betätigt.

Ein Spannen der Handoberfräsen an den parallel zur Frässpindel verlaufenden Führungssäulen ist prinzipiell möglich, allerdings unterscheiden sich diese in Durchmesser und auch in ihrer genauen Anordnung. Aus diesen Gründen wird das Hauptaugenmerk zum Aufbringen der erforderlichen Spannkräfte auf den Frästisch der Handoberfräsen gerichtet.

Gemeinsames Merkmal aller Frästische sind zwei senkrecht zur Fräsrichtung angebrachte prismenförmige Aussparungen zur Befestigung der Führungsschiene. Diese wird bei allen Modellen mit zwei runden Stäben angebracht (vgl. Abbildung 14). Die Prismenform führt dazu, dass gleichzeitig eine genaue Positionierung der Stäbe erfolgt. Diese werden mit Schrauben in die keilförmige Nut gespannt. Eine Fixierung der Stäbe an dem Trägersystem durch einen Formschluss, wie auch durch einen Kraftschluss, würde ein Aufnehmen der axialen Kräfte sowie der radialen Kräfte ermöglichen. Dabei wäre darauf zu achten, dass auch bei axial in Stabrichtung anliegenden Kräften, diese vom System aufgenommen werden können.

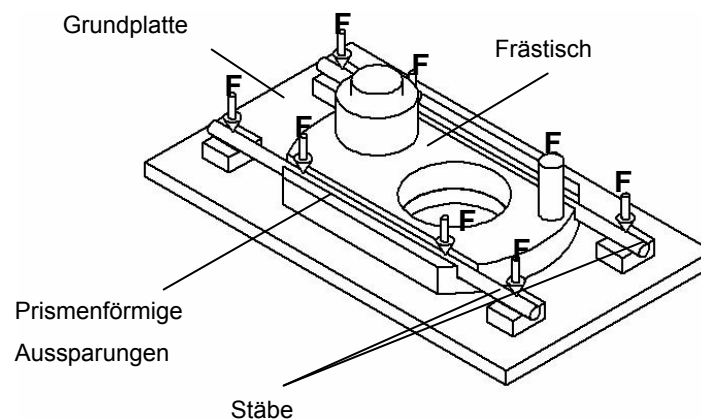


Abbildung 14: Fixierung mittels Führungsschienen

Die beschriebenen Nuten besitzen jedoch unterschiedliche Abstände voneinander und unterscheiden sich auch in ihrer Höhe bzgl. der Gleitfläche. Ein Spannen der Handoberfräsen mittels der Prismen ist somit zwar möglich, benötigt aber relativ viel Platz. Ein erhöhter Platzbedarf bedeutet an dieser Stelle immer auch eine gewisse Unhandlichkeit des Werkzeugs und eventuelle Einschränkungen beim Fräsen von Freiformflächen. Auch muss durch die Kopplung Handoberfräse-Stäbe-Spannsystem-Trägersystem mit einem Verlust an Steifigkeit gerechnet werden. Auch die exakte Ausrichtung des Werkzeugs würde sich wahrscheinlich schwierig gestalten, was

entweder eine Zusatzlösung zur exakten Positionierung erfordert oder zu erhöhten Rüstzeiten führt.

Parallel zu den Nuten weisen die ansonsten an der Seite runden Frästische ebene Flächen auf, an denen sich eine Spannkraft aufbringen lässt (vgl. Abbildung 15). Durch den Druck von 4 Formelementen bzw. 2 flächig anliegenden Formelementen ließe sich die Handoberfräse gegen axiale Kräfte und gegen Verdrehen sichern.

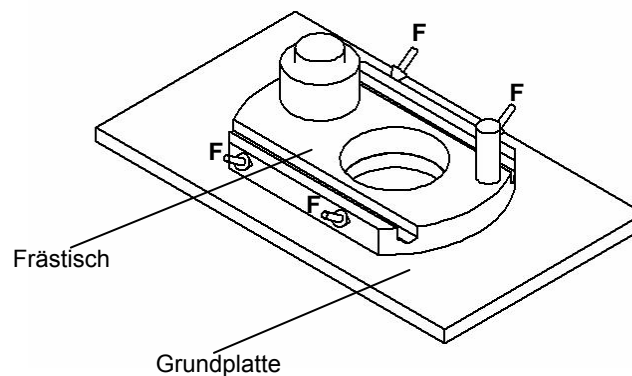


Abbildung 15: Fixierung mittels seitlicher Flächen

Die Kraft müsste bei dieser Variante lediglich unabhängig von der Breite des Frästisches aufbringbar sein. Da dies nur eine Verstellrichtung bedingt, wäre dies einfach zu lösen. Nachteile bringen nur der zu erwartende erhöhte Platzbedarf mit sich, sowie die erschwerte Ausrichtung des Werkzeugs durch fehlende Fixpunkte zur Positionierung.

Auch an der Oberseite befinden sich ebene Flächen. Durch ein Aufbringen von ausreichender Spannkraft senkrecht und vertikal zur Oberfläche, lassen sich die axialen und radialen Kräfte aufnehmen. Bei dieser Lösung würden schon zwei mit Spannkraft beaufschlagte Flächen ausreichen. Die Oberseiten der Frästische sind allerdings nicht einheitlich, so dass bei einem Spannen an der Frästischoberfläche eine hohe räumliche Flexibilität der Spannmittel gewährleistet sein müsste, was an dieser Stelle auch erhöhten Platzbedarf bedeuten würde. Auch hier lässt sich eine exakte Positionierung nur mittels evtl. Zusatzlösungen oder erhöhten Rüstzeiten erreichen.

Um einen stationären Einsatz der Handoberfräsen zu ermöglichen, sind an der Unterseite sämtlicher Handoberfräsen Gewindebohrungen angebracht. Diese ermöglichen es, die Handoberfräse in, für stationäre Anwendungen konzipierte Frästische, einspannen zu können. Die Gewindebohrungen sind zwar nicht einheitlich angeordnet, ermöglichen jedoch das Erreichen einer hohen Steifigkeit bei geringem

Platzbedarf. Bei dieser Lösung lässt sich auch problemlos eine exakte Positionierung der Handoberfräse auf dem Trägersystem erreichen. Nicht berücksichtigte Bohrmuster lassen sich zudem problemlos in kurzer Zeit anbringen.

3.2.4 Analyse der Möglichkeiten zum automatisierten Wechsel des Fräasers

Sämtliche Handoberfräsen sind mit einer Spindelarrretierung zum einfachen Fräserwechsel ausgestattet. Die Arrretierung befindet sich jeweils am Rumpf des Motorgehäuses. Gespannt werden die Werkzeuge immer mit einer 8 mm oder 10 mm Spannzange, welche mit einer zugehörigen Mutter arrretiert wird. Neu ist die Version mit eingebautem Ratschenmechanismus wie bei den Handoberfräsen von Festo, bei der das Umsetzen des Schlüssels nicht mehr erforderlich ist.

Beim Werkzeugwechsel von Hand muss sich der Fräskorb der Handoberfräse aus Zugänglichkeitsgründen in ausgefahrenem Zustand befinden. Durch Betätigen der Spindelarrretierung wird die Frässpindel fixiert und die Mutter kann mit einem handelsüblichen Schraubschlüssel gelöst werden. Anschließend lässt sich das Werkzeug durch Aufbringen einer Zugkraft entfernen. Das Einsetzen eines neuen Werkzeuges geschieht in umgekehrter Reihenfolge und Richtung. So müssen für einen Werkzeugwechsel sowohl ein Moment um die Frässpindel als auch vertikal auf den Fräser wirkende Zug- und Druckkräfte sowie senkrecht zum Fräser anliegende Druckkräfte aufgebracht werden. Zum Lösen und Anziehen der Mutter ist bei einer Automatisierung des Vorganges zudem eine Sensorik für ein korrektes Aufbringen des Drehmoments notwendig. Geht man davon aus, dass man den Werkzeugwechsel bei einem ausgefahrenen Fräskorb bewerkstelligt, muss dieser entweder kontinuierlich ausgefahren sein, oder dieser muss zwecks seiner Eignung für ein automatisiertes Verstellen untersucht werden. Da es aber 3 grundlegend verschiedene Verstellsysteme gibt, würde sich dies äußerst aufwändig gestalten. Aus genannten Gründen muss bei der Entwicklung eines Werkzeugwechselsystems davon ausgegangen werden, dass sich der Preisvorteil des Konzepts gegenüber konventionellen Frässpindeln für den industriellen Einsatz amortisiert.

Da ein Hauptanliegen des Projektes die Entwicklung kostengünstiger, modularer Werkzeuge für mittlere und kleine Unternehmen ist, wird trotz sich ergebender

Einschränkungen des Fräswerkzeugs, im Rahmen der Diplomarbeit darauf verzichtet, das Werkzeug durch einen automatisierten Werkzeugwechsel flexibler zu gestalten.

3.2.5 Überprüfung des Einsatzes eines Betätigungssystems zur Drehzahlverstellung und zum Ein- und Ausschalten der Handoberfräse

Die Aufgabe des Betätigungssystems besteht darin, die Handoberfräse ein- und auszuschalten und die Drehzahl im Voraus einzustellen. Das Ein- und Ausschalten der Handoberfräse geschieht üblicherweise durch Drücken eines Betätigungsknopfes, wofür das Betätigungssystem mit einem Aktor ausgerüstet werden muss. Vergleicht man jedoch Handoberfräsen bezüglich der Lage und Ausführung des Schalters, lässt sich erkennen, dass eine uneinheitliche Anordnung sowie drei grundsätzlich verschiedene Betätigungssysteme eine Automatisierung dieses Vorgangs erschweren.



Abbildung 16: Unterschiedliche Anordnungen und Betätigungsarten der Schalter zum Ein- und Ausschalten der Handoberfräsen

Prinzipiell besteht die Möglichkeit der direkten Steuerung des Motorstroms durch die Werkzeugsteuerung. Hierfür ist jedoch ein Eingriff in die Elektronik unumgänglich, was wiederum bedeutet, dass jede Handoberfräse, die eingesetzt wird, speziell vorbereitet werden muss. Dies widerspricht allerdings der Forderung nach einer plug-and-play-Fähigkeit, weswegen diese Möglichkeit auch nicht weiter verfolgt wird. Eine weitere Möglichkeit des Ein- und Ausschaltens bietet der Anschluss der Handoberfräse an einen externen Schalter. So kann die eingeschaltete Handoberfräse von außen angesteuert werden. Hierbei bietet sich auch die Möglichkeit, den plug-and-play-Gedanken weiter zu verfolgen.

Auch die Drehzahlverstellung ist bei den untersuchten Handoberfräsen keineswegs einheitlich. Sowohl Anordnung, als auch die Drehzahlverstellfunktion selbst unterscheiden sich voneinander. Dies würde einen bezüglich der räumlichen Anordnung extrem flexiblen Aktor erfordern.

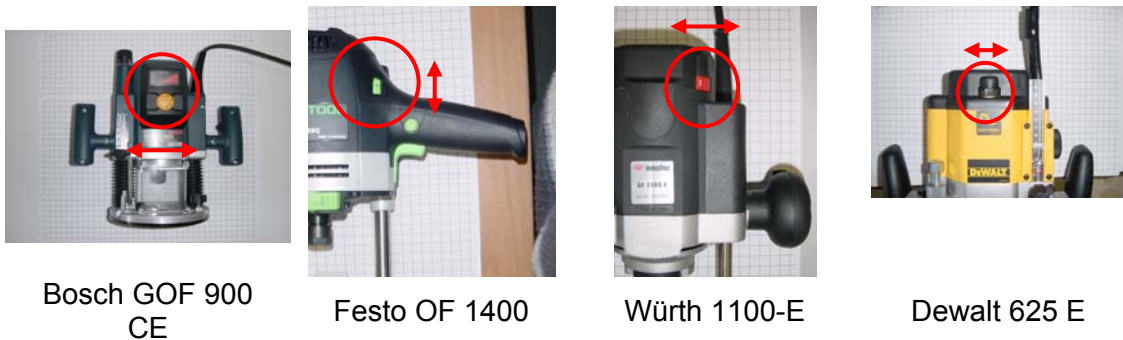


Abbildung 17: Unterschiedliche Anordnungen und Betätigungsarten der Drehzahlverstellung

Auch müsste geklärt werden, ob trotz der verschiedenen Drehzahlverstellmöglichkeiten ein Aktor ausreichen könnte. Während des Fräsprozesses sorgt bei den meisten Handoberfräsen eine Steuerungselektronik dafür, dass die Drehzahl möglichst konstant gehalten wird. Da die meisten in Handoberfräsen eingesetzten Fräswerkzeuge zumindest bei Holzwerkstoffen im oberen Drehzahlbereich betrieben werden und eine Änderung der Drehzahl wahrscheinlich lediglich bei der Bearbeitung von Kunststoffen oder bei der Verwendung bestimmter Fräser in Betracht gezogen werden muss, stellt sich die Frage nach der Notwendigkeit einer automatisierten Drehzahlregelung. Zudem muss wie in Kapitel 3.2.4 gezeigt davon ausgegangen werden, dass ein Werkzeugwechsel weiter von Hand erfolgen muss. Der sich durch eine automatisierte Drehzahlverstellung ergebende Vorteil ist dadurch äußerst gering, weshalb darauf vorerst verzichtet wird.

3.2.6 Überprüfung der Möglichkeiten zur Steuerung des Werkzeugs - Überprüfung des Einsatzes von Sensorik

Die Aufgabe der Werkzeugsteuerung besteht darin, mit dem Zellenrechner zu kommunizieren, um den Fräsprozess zu koordinieren, und die werkzeugseitigen Prozessparameter zu überwachen und zu kontrollieren. Die für den Fräsprozess relevanten Parameter sind:

- ♦ Vorschub

- ♦ Drehzahl
- ♦ resultierende Kräfte und Momente

Aufgenommen werden sollen die Prozessparameter mittels Sensoren.

Für den Vorschub ist der Roboter zuständig, weswegen die Werkzeugsteuerung hierauf keinen direkten Einfluss hat. Erreicht einer der anderen Parameter, beispielsweise die resultierende Kraft, einen unzulässigen Wert, so wird dies von der Werkzeugsteuerung an den Zellenrechner übermittelt, der dann den Vorschub ändert. Zur Messung der Drehzahl können unterschiedliche, zum Teil recht einfache Effekte verwendet werden. Die Drehzahl kann prinzipiell entweder durch Messen des Motorstroms oder direkt an der Frässpindel festgestellt werden. Die erste Möglichkeit scheidet aus, da auch hier wieder ein Eingriff in die Elektronik nötig wäre. An der Frässpindel kommt ein Erfassen der Drehzahl mittels verschiedener Prinzipien in Frage:

- ♦ Zählen von Drehinkrementen mittels unterschiedlicher physikalischer Prinzipien und Ableiten nach der Zeit
- ♦ Messen der Umfangsgeschwindigkeit der Frässpindel

Die erste Methode lässt sich durch verschiedene physikalische Prinzipien wie z.B. Induktion oder optische Prinzipien verwirklichen. Die jeweiligen Drehinkremente werden dabei meist durch Hohlwellen an der Welle angebracht. Da jedoch die Frässpindeln unterschiedliche Durchmesser besitzen und die Frässpindel außerhalb des Motors großteils aus dem Werkzeugspannsystem besteht, scheidet diese Möglichkeit aus. Optisch kann die Drehzahl auch gemessen werden, indem man positionsabhängige Unterschiede im Reflexionsgrad ausnutzt. Diese können einfach als Strichmarken auf der Frässpindel aufgebracht werden. Diese Methode entspräche auch eher der plug-and-play-Forderung. Dabei kann es jedoch zu Problemen mit der Einwirkung von Fremdlicht kommen. Auch muss untersucht werden, ob nicht Verschmutzungen an der gemessenen Oberfläche zu Störungen im Signal führen. Das mechanische Erfassen der Umfangsgeschwindigkeit durch ein Messrad scheidet durch die hohen Drehzahlen an der Frässpindel aus. Da bei modernen Handoberfräsen die Drehzahl im Allgemeinen mittels Elektronik konstant gehalten wird, ist eine Erfassung der Drehzahl lediglich aus sicherheitstechnischen Aspekten interessant.

Sicherheitsvorkehrungen lassen sich auch anhand der durch den Fräsprozess auf die Handoberfräse und die Aufnahmevorrichtung wirkenden Kräfte und Momente bewerkstelligen. Diese können über Kraft-Moment-Sensoren aufgenommen werden. Steigen die resultierenden Kräfte und Momente über ein bestimmtes Maß, wird der Roboter abgeschaltet oder verlangsamt. Zudem ist es denkbar, über die resultierenden Schnittkräfte evtl. die Vorschubgeschwindigkeit zu regeln.

Das Erfassen der Kräfte und Momente mittels Kraft-Moment-Sensoren kann an drei Punkten geschehen: entweder zwischen Spannsystem und Trägersystem, zwischen Aufnahmevorrichtung und Roboterflansch oder an der Werkstückspanneinrichtung.

3.2.7 Analyse verschiedener Möglichkeiten des Spänetransportes

Da Absaugeinrichtungen wie schon beschrieben einen unmittelbaren Bestandteil einer Holzbearbeitungsmaschine bilden, wird im Rahmen der Entwicklung der Handoberfräsenaufnahme auch auf die Entwicklung der dazugehörigen Absaugeinrichtung eingegangen. Durch dieses soll erreicht werden, dass die beim Fräsprozess entstehenden Holzstäube und –späne möglichst vollständig erfasst werden. Auch soll dadurch verhindert werden, dass der Bearbeitungsprozess durch die Absaugeinrichtung beeinträchtigt wird. Drei prinzipielle Lösungen sind vorstellbar: eine direkt an der Handoberfräse angebrachte Absaugeinrichtung, eine stationär in der Zelle angebrachte Absaugeinrichtung, oder die vollständige Kapselung der Zelle.

Bei einer direkten Erfassung der Späne, muss auf einen problemlosen Abtransport dieser geachtet werden. Da die Absaugeinrichtung an der Handoberfräsenaufnahme befestigt ist, muss eine problemlose Schlauchführung gewährleistet sein. Dabei ist vor allem die Schlauchführung beim Werkzeugwechsel zu klären. Hier stellt sich die Frage, ob die komplette Absaugeinrichtung an der Aufnahmevorrichtung befestigt ist oder ob zumindest Teile davon z.B. über den Handflansch des Roboters dauerhaft mit diesem verbunden sind.

Eine fest in der Bearbeitungszelle installierte Absaugeinrichtung besitzt den Vorteil, dass auch bei weiteren in der Zelle installierten spanenden Verfahren für eine Staub- und Späneabsaugung gesorgt wäre. Ist das Absaugsystem allerdings nicht mit dem Werkzeug beweglich, wird eine erhebliche Mehrleistung gegenüber einer direkt am

Werkzeug installierten Vorrichtung benötigt werden, um vergleichbare Resultate bezüglich des Erfassungsgrades zu erreichen.

Bei einer Kapselung der Zelle ist mit einem durch Staub und Späne verursachten Verschleiß an den Werkzeugen und evtl. auch am Roboter zu rechnen. Gerade beim Durchführen von Versuchen ist diese Variante ungünstig.

Wegen den sowohl bei der Anschaffung, als auch beim Betrieb geringeren Kosten, wird die Möglichkeit einer direkt am Werkzeug erfolgenden Absaugung weiter untersucht. Hier stellt sich die Frage, ob die komplette Absaugeinrichtung an der Aufnahmevorrichtung befestigt ist oder ob diese extern, z.B. am Handflansch des Roboters befestigt wird. Ein Anbringen am Roboter brächte den Vorteil, dass die Absaugeinrichtung bei mehreren Werkzeugen einsetzbar ist. Vorstellbar wäre dabei ein Sperren der 6. Achse des Roboters. So könnte man durch starre Verbindungsstücke eine kraftschlüssige Verbindung zwischen der Absaugeinrichtung und den Einrichtungen an den jeweiligen Werkzeugen bewerkstelligen. Ein Sperren einer Roboterachse bringt jedoch erhebliche Einschränkungen mit sich. Eine Befestigung direkt an der vorhandenen Absaugeinrichtung der Handoberfräse verhindert hingegen einen universellen Einsatz des Absaugsystems.

3.2.8 Analyse verschiedener Möglichkeiten der Stromversorgung der Handoberfräse

Da der Roboterarm lediglich einen 12V-Anschluss besitzt und die Handoberfräse mit 230V betrieben wird, muss die Stromversorgung der Handoberfräse von extern erfolgen. Dazu sind zwei Alternativen denkbar: das Kabel wird beim Werkzeugwechsel getrennt oder die Handoberfräse bleibt dauerhaft am Stromnetz angeschlossen. Beim Trennen des Kabels beim Werkzeugwechsel könnte das Stromkabel am Roboterarm befestigt werden. So wäre es nie im Arbeitsbereich. Eine Trennung mittels normalen Steckers dürfte jedoch technisch nur relativ aufwendig realisierbar sein. Vorstellbar wäre eine Kupplung des Kabels mit Hilfe zweier Spulen. Hierzu sind jedoch keine technischen Lösungen auf dem Markt verfügbar.

Aus genannten Gründen muss von einem dauerhaft an die Stromversorgung angeschlossenen Werkzeug ausgegangen werden. Da das Stromkabel aufgrund des großen Arbeitsbereiches des Roboters nicht an diesem geführt werden kann, muss

nach Lösungen gesucht werden, bei denen das Kabel ohne den Bearbeitungsprozess zu behindern zugeführt wird.

3.2.9 Resultierende Anforderungen

In der Anforderungsliste (Tabelle 6) werden die Ziele und Bedingungen in Form von Forderungen und Wünschen mit quantitativen und qualitativen Angaben aufgeführt. Forderungen (F) sind dabei Bedingungen, die unter allen Umständen erfüllt werden müssen. Wünsche (W) enthalten Bedingungen, die nach Möglichkeit berücksichtigt werden sollten und unter Umständen einen gewissen Mehraufwand erfordern dürfen [Mü05].

Tabelle 6: Anforderungen an das Fräswerkzeug

ANFORDERUNGSLISTE FÜR EIN FRÄSWERKZEUG ZUR HOLZMÖBELBEARBEITUNG		
Anforderungen		Beschreibung, Quantifizierung, Ideen...
<i>Gesamtsystem</i>		
W	plug-and-play-Fähigkeit	
F	geringes Gewicht	
W	Flexibilität beim Fräsen	
W	kompatibel zu allen Handoberfräsentypen ohne Rüstaufwand, bzw. einfaches Umrüsten	
F	Energieform: Gleichstrom bis 24 V und Druckluft bis 8 bar sowie ~230 V / 50 Hz zur Stromversorgung der Handoberfräse	
F	Staubabsaugung	
<i>Trägersystem</i>		
F	hohe Steifigkeit	Werkzeugwechsellvorrichtung mögl. nahe am Fräser anbringen (geringer Hebel)/Nutzen der Spannung der OF bei zusammenpressen?
F	kompatibel zum Werkzeugwechselsystem	
<i>Spannsystem</i>		
W	Einfacher Werkzeugwechsel	
F	Sicherung der Handoberfräse gegen Verdrehen	$M = 3,5 \text{ Nm} * 1,5 \text{ SF} = 5,25 \text{ Nm}$
F	Aufbringen konstanter axialer Spannkraft	$F = \text{angenommen } 300 \text{ N} * 1,5 \text{ SF} = 450 \text{ N}$
F	Ermöglichen einer genauen Positionierung der Handoberfräse	Grundplatte als Auflagefläche?
<i>Betätigungssystem</i>		
	Betätigungssystem (a)	-> Ein-/Ausschalten der Handoberfräse
W	Schnelle Anpassung an verschiedene Handoberfräsen	An-/Ausschalten über Stromversorgung?
	Betätigungssystem (b)	-> Einstellen der Drehzahl
W	Schnelle Anpassung an verschiedene Handoberfräsen	
<i>Werkzeugsteuerung und Sensorik</i>		
W	Messen der Drehzahl	
F	Messen der Kräfte und Momente beim Fräsen	

3.3 Analyse von Möglichkeiten der Werkstückpositionierung

3.3.1 Definition der Anforderungen an die Positioniervorrichtung

Um die Werkstücke mit einer möglichst hohen Maßhaltigkeit bearbeiten zu können, müssen diese exakt zum Roboter hin ausgerichtet sein. Die für das Werkstückhandling verwendete Saugspinne kann Greifobjekte bis zu 11 kg handhaben. An dieses Gewicht soll auch die Positioniervorrichtung angepasst sein. Die Saugspinne ist für Holzplatten im Größenrahmen von 230x380 mm bis 800x400 mm ausgelegt. Deshalb wird auch bei der Positioniervorrichtung von diesem Größenrahmen ausgegangen. Zudem wird von rechteckigen Werkstücken ausgegangen. Dies ermöglicht ein Ausrichten der Holzplatten anhand der Werkstückkanten.

Je nach Werkstück sind die Anforderungen an die Maßhaltigkeit des Werkstückes in der Holzbearbeitung unterschiedlich. So liegen die Toleranzen bei technischen Oberflächen wie Verbindern bei ca. $\pm 0,2$ mm. Bei sonstigen Flächen hingegen sind Toleranzen von ± 1 mm keine Seltenheit. Da die vorliegende Roboterzelle nicht in einer laufenden Fertigung zum Einsatz kommen soll, wird von einer Toleranz von $\pm 0,5$ mm ausgegangen.

3.3.2 Analyse verschiedener Möglichkeiten der Werkstückpositionierung

Bei einer Positionierung durch das Herstellen eines Formschlusses muss geklärt werden, ob der Positioniervorgang durch die Gewichtskraft des Werkstückes oder durch das Zuführen mechanischer Kraft von außen initiiert werden soll.

Abhängig vom gewählten Prinzip, kommen unterschiedliche Orte für das Ausrichten des Werkstückes in Frage: das Werkstück kann vor der Aufnahme durch die Saugspinne positioniert werden, das Werkstück wird durch die Saugspinne positioniert oder das Ausrichten erfolgt nach Ablage des Werkstückes auf dem Vakuumaufspanntisch.

Generell erscheint ein Ausrichten der Werkstücke durch ihre Gewichtskraft als sehr sinnvoll, da keine zusätzlichen Aktoren etc. notwendig sind. So kann davon ausgegangen werden, dass diese Variante am kostengünstigsten ist. Möglich ist die

Anwendung lediglich vor der Aufnahme durch die Saugspinne, da sich das Werkstück dazu in einer Position befinden muss, in der es durch die Gewichtskraft einen Formschluss aufbauen kann. Da davon ausgegangen werden kann, dass alle Werkstücke rechtwinklig sind, wird ein Winkel zum Aufbau des Formschlusses verwendet. Das Werkstück muss hierzu vor der Aufnahme durch die Saugspinne zumindest annäherungsweise hochkant stehen. Steht es hochkant, bedarf es einer Führung, ansonsten kann man es auf einer Fläche auflegen.

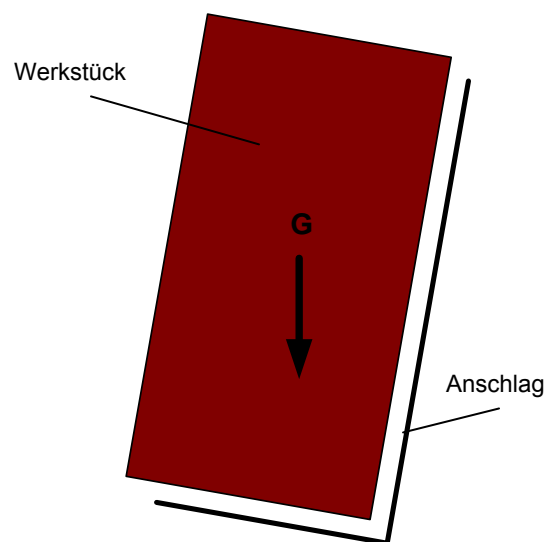


Abbildung 18: Ausrichten der Werkstücke durch Gewichtskraft

Die Positionierung kann entweder direkt im Werkstückmagazin vorgenommen werden, oder die Holzplatten werden durch die Saugspinne aus dem Werkstückmagazin entnommen und an einem dafür vorgesehenen Platz abgelegt. Sollen die Holzplatten direkt im Magazin ausgerichtet werden, muss berücksichtigt werden, dass die an den Holzplatten wirkenden Adhäsionskräfte und auch die Luftdurchlässigkeit von Holz, bei der Aufnahme durch die Saugspinne dazu führen können, dass die Holzplatten verschoben werden, wenn sie auf einem Stapel, direkt übereinander liegend, positioniert werden. Bei einer einzelnen Lagerung und Positionierung der Werkstücke ist mit einem erhöhten Platzbedarf zu rechnen. Bei einer Ausrichtung außerhalb des Magazins ließe sich dies z.B. durch eine mit einem Winkelanschlag versehene schiefe Ebene erreichen. Das Ausrichten der Holzplatten durch das Zuführen mechanischer Kraft kann prinzipiell an jeder Stelle erfolgen. Um Genauigkeitsverluste durch Transport und Aufspannen zu vermeiden, ist eine Positionierung auf dem Vakuumtisch am sinnvollsten. Dabei werden die Werkstücke von mindestens zwei Seiten an einen fest installierten Anschlag geschoben oder es wird von allen vier Seiten eine Kraft eingeleitet (vgl. Abbildung 18).

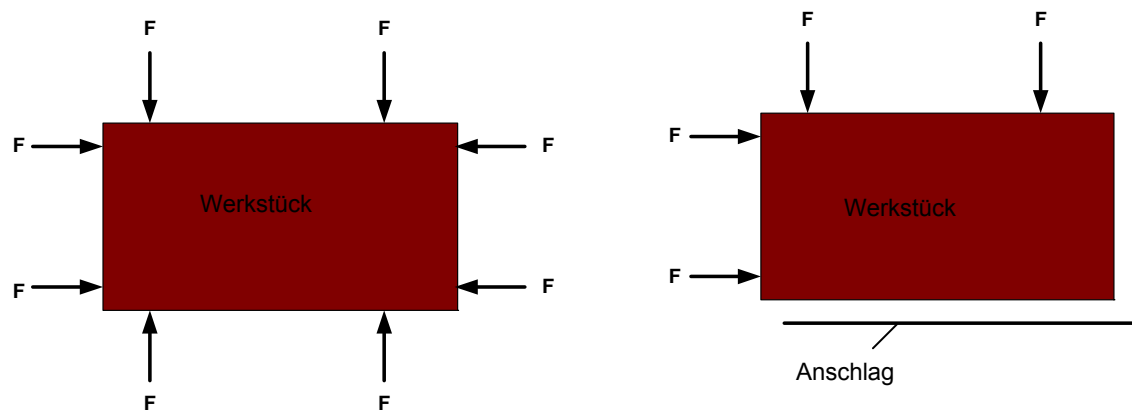


Abbildung 19: Ausrichten durch zuführen mechanischer Kraft

Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Werkstücke bei der Positionierung auf den Vakuumspannblöcken aufliegen. Diese sind am Rand mit einer Gummilippe versehen. Gerade bei einem kraftbegrenzten System könnte es durch den Stip-slick Effekt zu Positionierungsungenauigkeiten kommen. Ein wegbegrenztes System hat den Nachteil, dass immer die genaue Werkstückgröße bekannt sein muss. Ungenauigkeiten wären dabei nicht tolerierbar. Bei der Verwendung von Aktoren an 3 oder 4 Seiten müssten diese die Kraft flächig einleiten, um das Werkstück exakt auszurichten. Aufgrund der durch die Gummilippen an den Vakuumblocken resultierenden hohen Haftreibung, müssten die Aktoren auch bezüglich Kraft und Steifigkeit ausreichend dimensioniert werden.

Die Positionierung durch Sensoren zeichnet sich zwar durch eine hohe erreichbare Genauigkeit aus, ist aber aufgrund der zu erwartenden hohen Kosten für Aktorik, Sensorik und den benötigten Regelkreis kaum mit dem Grundgedanken des SMErobot-Projektes vereinbar.

Eine Sonderlösung bei der Werkstückausrichtung stellt das Positionieren mittels Saugspinne und Kraft-Moment-Sensor dar. Beim Anfahren mit einem Werkstück an einen Winkelanschlag treten am Kraft-Moment-Sensor Kräfte auf. Erst wenn die Kräfte aus beiden Richtungen senkrecht zur Werkstückkante eingeleitet werden, also kein Moment um die z-Achse mehr entsteht, gilt das Werkstück als ausgerichtet. Hierbei werden jedoch erhebliche Anforderungen an die Werkzeugsteuerung gestellt. Im Rahmen der Arbeit wird deshalb die Werkstückpositionierung durch eine außerhalb des Werkstückmagazins liegende schiefe Ebene bewerkstelligt. Es muss geprüft

werden, ob die Werkstücke nach dem Transport und dem Aufspannen am Vakuumtisch ihre Position beibehalten.

3.4 Definition der Anforderungen an den Werkzeugbahnhof

Wie in Kap. 2.5 beschrieben müssen beim Einsatz eines Werkzeugwechselsystems einzuwechselnde Werkzeuge und Greifer reproduzierbar bereitgestellt werden. Um eine sichere Anwendung zu gewährleisten, sollte mit dem Zellenrechner über eine Belegung des Werkzeugmagazins kommuniziert werden können. Bei der Fixierung des Werkzeugs muss auf eine ausreichende Standsicherheit geachtet werden. Dies kann durch eine Aufnahme des Werkzeugs oberhalb des Schwerpunkts erreicht werden. Um die Zentrierfunktion beim Einfahren nicht zu beeinträchtigen, sollte eine schwimmende Lagerung der Werkzeuge im Magazin vorgesehen werden. Auch muss zwecks einer einfachen Programmierung der Wechselbewegungen auf eine möglichst freie Zugänglichkeit und ggf. eine an die Orientierung des Werkzeugs anpassbare Werkzeugablage geachtet werden [BSt90].

4 KONZEPTION UND ENTWICKLUNG EINER VORRICHTUNG ZUR AUFNAHME VON HANDOBERFRÄSEN

4.1 Vorgehensweise bei der Konzeption

Zunächst werden die Konzepte für die einzelnen Teilsysteme der Aufnahmevorrichtung vorgestellt und es werden die Vor- und Nachteile gegeneinander abgewogen. Als Grundlage für die Konzeption selbst dient die Anforderungsliste. Aus den sich ergebenden Konzepten werden Kombinationen ausgewählt und zu Gesamtkonzepten weiterentwickelt. Schon bei der Entwicklung der Konzepte für die Teilsysteme muss die Abhängigkeit der Teilsysteme untereinander berücksichtigt werden. Auch eine wichtige Rolle spielt das zu erwartende Gewicht der Vorrichtung.

Existieren am Ende vermeintlich gleichwertige Konzepte, werden diese in Vorversuchen miteinander verglichen. Auf Basis der Versuchsergebnisse wird eine Konstruktion zur Weiterentwicklung ausgewählt.

4.2 Konzeption der Aufnahme der Handoberfräse

4.2.1 Konzeption des Spannsystems

Die Handoberfräsen werden wie in Abbildung 20 gezeigt, auf einer Grundplatte durch mindestens zwei Schrauben gegen Verdrehen und axiale Belastungen gesichert. Diese werden an den am Frästisch der Handoberfräse angebrachten Gewinden fixiert. Durch den Einsatz von Schrauben ist auch die Frage nach der Art des Aufbringens der Spannkraft geklärt. Einziger Nachteil des Konzeptes ist der verringerte Freiraum am Fräser, welcher sich durch die benötigte Grundplatte ergibt.

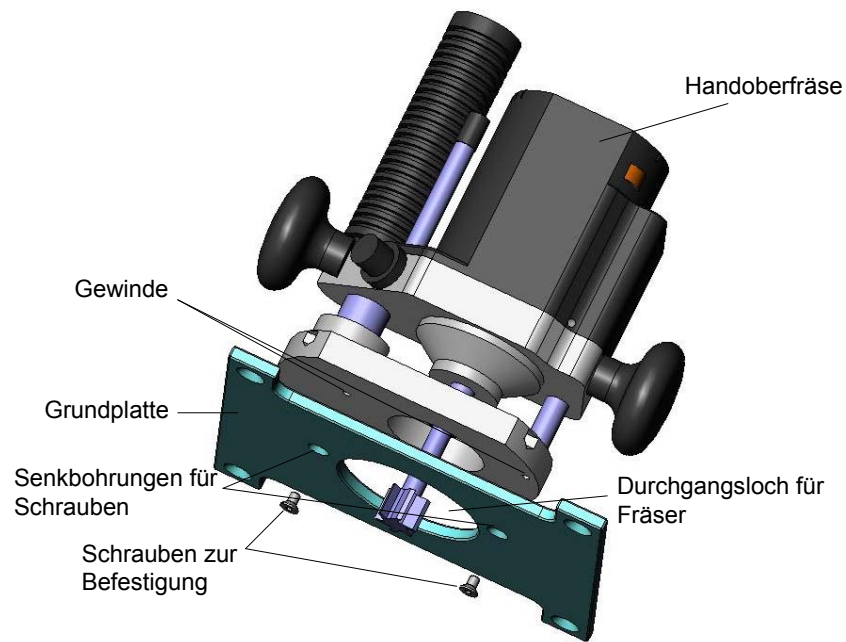


Abbildung 20: Befestigung der Handoberfräse auf einer Grundplatte

4.2.2 Konzeption des Trägersystems

Durch die in Kap. 4.2.1 begründete Festlegung auf ein Spannsystem ergeben sich bei der Konzeption des Trägersystems bestimmte Anforderungen. Da die Spannkraft an der Frästischunterseite aufgebracht wird, wird an dieser Stelle ein Gegenstück benötigt. Dieses ist zugleich tragend, da die Handoberfräse durch die Schrauben direkt damit verbunden ist. Verwendet wird eine Aluminiumplatte mit einer Stärke von 10mm. Die Platte muss an der Stelle der Frässpindel ein Loch besitzen, welches größer als der maximal verwendbare Fräserdurchmesser ist.

Wie beschrieben, wird die Verbindung zwischen Roboter und dem Werkzeug durch ein Werkzeugwechselsystem (WWS) hergestellt. Dieses ist schon vorgegeben und stammt von der Firma Applied Robotics. Das TXC30T wiegt 1,9 kg. Es kann prinzipiell direkt auf der beschriebenen Platte angebracht werden.

Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass auf diese Art die Frässpindel nicht direkt in einer Linie mit der 6. Achse des Roboters angebracht wird. Auf diese Weise wird später der Aufwand beim Programmieren der Roboterbahn verringert, da der TCP (die Fräterspitze) in der Verlängerung des Mittelpunktes des Handflansches liegt. Der Abstand beider Punkte auf der Achse ist lediglich vom Modell der verwendeten Handoberfräse und der Länge des Fräasers abhängig. Soll die Frässpindel direkt auf

einer Linie mit der 6. Achse des Roboters liegen, muss das Werkzeugwechselsystem oberhalb der Handoberfräse angebracht werden (vgl. Abbildung 21). Dazu wird eine weitere Platte verwendet, welche die gleiche Grundfläche wie die Grundplatte aufweist und mit Aluprofilen an jeder Ecke mit der Grundplatte verbunden ist. Auf dieser Platte wird das Werkzeugwechselsystem angebracht. Nachteil hierbei ist das durch den verlängerten Hebel vergrößerte Moment am Handflansch des Roboters und die verringerte Steifigkeit. Die beim Fräsen entstehenden Kräfte können nur schwer abgeschätzt werden. So lässt sich auch die Steifigkeit der 2. Konzeption nicht ausreichend beurteilen.

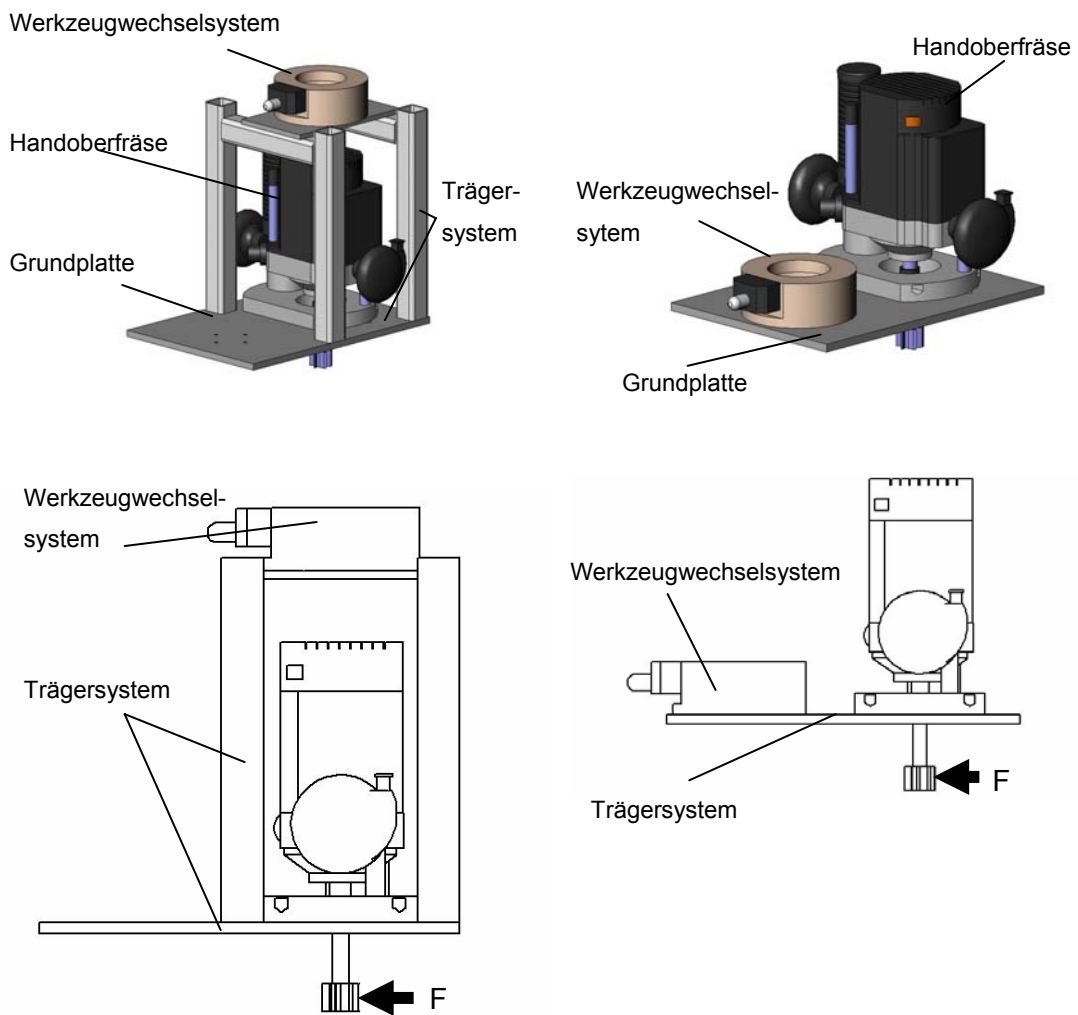


Abbildung 21: Vergleich der Kräfteinleitung bei den verschiedenen Konzeptionen zur Anbringung des Werkzeugwechselsystems

Aus diesem Grund werden beide Konzepte im Rahmen von Vorversuchen bezüglich ihrer Steifigkeit miteinander verglichen. Im Anschluss daran soll eine Entscheidung zu Gunsten eines Konzepts getroffen werden.

4.2.3 Anbringung des Kraft-Moment-Sensors

Der zur Aufnahme der Kräfte und Momente verwendete 6-Achsen Kraft-Moment-Sensor Schunk FT-Theta SI-2500-400 wird wie in Abbildung 22 zu sehen zwischen Aufnahmevorrichtung und Roboterflansch installiert. Auf diese Art lassen sich auch bei anderen Bearbeitungsprozessen die resultierenden Kräfte und Momente ermitteln und zur Werkzeugsteuerung verwenden. Auch lassen sich, im Gegensatz zur Anbringung an der Werkstückspannvorrichtung, die entstehenden Momente aufnehmen. Das Gewicht des Sensors beträgt 5 kg.

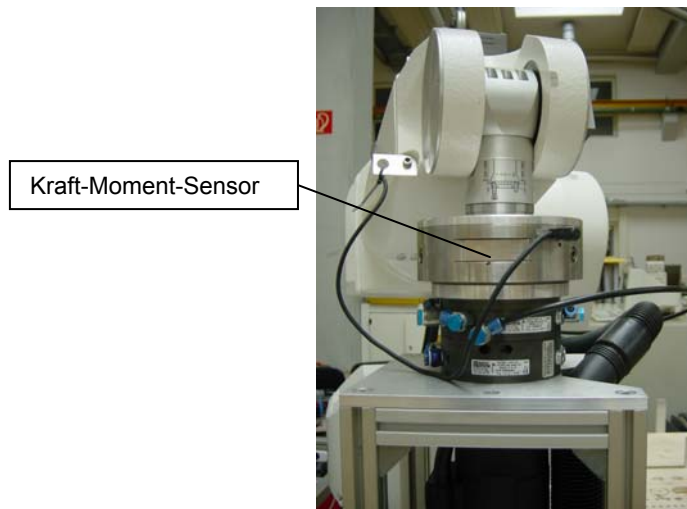


Abbildung 22: Kraft-Moment-Sensor FT-Theta SI-2500-400

4.3 Konzeption der Späneabsaugung

Da die sich derzeit im Einsatz befindlichen Werkzeuge keine Absaugeinrichtung besitzen bzw. keine benötigen, wird im Rahmen der Arbeit auf die Konzeption einer universell verwendbaren Absaugeinrichtung verzichtet. Auch auf das Anbringen einer Abdichtung der Werkzeugunterseite mittels PVC-Lamellen oder Bürstenelementen wird verzichtet, da der Eingriffsbereich bei den Fräsversuchen sichtbar sein soll. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese im Bedarfsfall relativ einfach anzubringen sind.

Abgesaugt werden Staub und Späne mit einem für Holzstäube geeigneten Industriestaubsauger. Dessen Schlauchdurchmesser ist kompatibel mit sämtlichen Absaugeinrichtungen an den Handoberfräsen. Ein Problem bei dieser Konzeption ist das Wegführen des Schlauches vom Werkzeug. Bei den Vorversuchen soll geklärt werden, ob die Schlauchführung mittels eines Kabelzuges praktikabel ist. Ermittelt

werden sollen dabei auch die ideale Position und Traglast des Kabelzugs. Vorgesehen ist, den Schlauch mit Hilfe des Kabelzugs weg vom Arbeitsbereich zu führen. Der Kabelzug soll dazu dienen, den Schlauch immer straff zu halten und Roboterbewegungen auszugleichen.

4.4 Konzeption der Kabelführung

Das Problem der Kabelführung ist vergleichbar mit der Schlauchführung. Deshalb wird beim Durchführen der Vorversuche getestet, das Kabel zusammen mit dem Schlauch der Staubabsaugung vom Roboter wegzuführen.

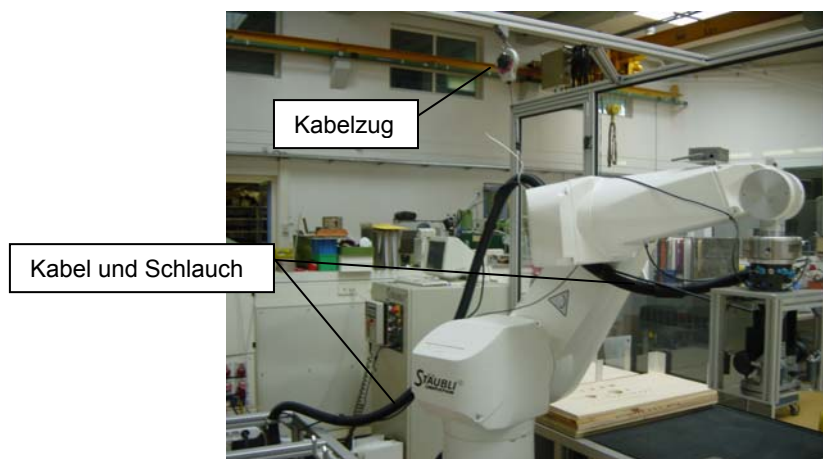


Abbildung 23: Kabel- und Schlauchführung

4.5 Auslegung und Konstruktion der Vorrichtung zur Aufnahme von Handoberfräsen

Die Auswahl und Auslegung der Komponenten erfolgt zeitgleich mit der Konstruktion der Vorrichtung, da deren Kenngrößen, wie Abmessungen, Leistungen, Kräfte etc., auf den Aufbau Einfluss haben und umgekehrt.

Da das Gewicht des Werkzeugs aufgrund der begrenzten Handhabungslast des Roboters begrenzt ist, werden bei der Konstruktion des Trägersystems vorwiegend Aluminiumkomponenten eingesetzt. Die Alu-Profile für die zweite beschriebene Konzeption der Aufnahmevorrichtung haben die Abmessung 30x30 mm und stammen von der Firma Bosch. Sie sind 250 mm lang. Mit der Vorrichtung können so ca. 90 % aller Handoberfräsenmodelle aufgenommen werden. Für die größten Modelle ist die Vorrichtung zu klein. Durch die kleinen Abmessungen der Vorrichtung soll deren

Steifigkeit erhöht werden und die Flexibilität beim Bearbeitungsvorgang (z.B. 3-D Bearbeitung) erhalten werden. Die Profile werden durch Winkel (mit den Schenkellängen 28x28 mm) sowie mit den passenden Nutensteinen miteinander verbunden. Sämtliche Platten bestehen aus Aluminium und haben eine Dicke von 10mm. Nach den Vorversuchen sollen die Abmessungen an die auftretenden Belastungen angepasst werden. Es ergibt sich folgende Traglast für den Roboter:

Tabelle 7: Gewicht des Fräswerkzeugs

Handoberfräse Würth 1100-E	3,1 kg
Werkzeugwechselsystem Applied Robotics TXC30T	1,9 kg
Kraft-Moment-Sensor Schunk FT-Theta SI-2500-400	5 kg
Trägersystem	2 kg
insgesamt	12 kg

Da die max. Handhabungslast des Roboters 22 kg beträgt, dürfen beim Fräsen max. 90N senkrecht zur Fräserrichtung auftreten. Belastungen senkrecht zum Fräser treten für längere Zeit auf und sind deshalb zum Handhabungsgewicht zu zählen. Da die Belastungen in z-Richtung nur kurzfristig auftreten, lassen sich diese als dynamische Lasten betrachten und dürfen somit auch höher liegen.

Die Staubabsaugung erfolgt mit einem für Holzstäube und andere gefährliche Staubarten vorgesehenen Elektrosauger der Firma Würth, dem ISS 45-M. Um den gesamten Arbeitsbereich des Roboters abzudecken, wird dieser mittels eines 5 m langen Schlauchs mit der dafür vorgesehenen Absaugeinrichtung der Handoberfräse verbunden. Für die Versuche wird ein Kabelzug der Firma Bosch mit einer Traglast von 0,5-1,5 kg verwendet.

4.6 Konzeption und Auslegung der Positioniervorrichtung

Die Möglichkeit der Werkstückpositionierung durch eine schiefe Ebene ist die einfachste und kostengünstigste der analysierten Alternativen. Aus diesem Grund wird der Einsatz einer schiefen Ebene zur Werkstückpositionierung im Rahmen der Versuche getestet.

Die Grundfläche der als Positioniervorrichtung verwendeten schiefen Ebene wird durch eine Edelstahlplatte mit den Maßen 800x400x4 mm gebildet. Aus Bosch-Profilen der Größe 30x30 mm wird der als Anschlag dienende Winkel gebildet. Die Ebene wird an

einem Gestell aus Aluminiumprofilen (30x30 mm) befestigt. Um eine zur Positionierung ideale Neigung zu erhalten sind sowohl die Edelstahlplatte, als auch das Gestell verstellbar in der Neigung.

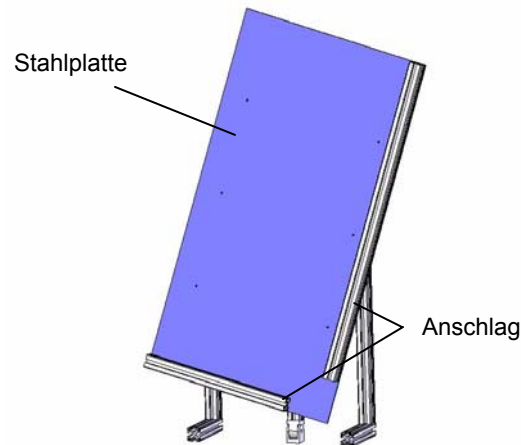


Abbildung 24: Positioniervorrichtung

4.7 Konzeption des Werkzeugbahnhofs

Das Werkzeug wird mit dem Fräser nach unten im Werkzeugmagazin abgestellt. Es wird über 4 Stifte und der zugehörigen Bohrung zentriert und fixiert. Um sicherzustellen, dass das Werkzeug immer richtig abgestellt wird, sind am Werkzeug drei Zentrierstifte und eine Zentrierbohrung angebracht. Am Bahnhof sind ein Stift und drei Bohrungen angebracht. Die Stifte und die Bohrung am Werkzeug sind mittels Winkeln vertikal und auch horizontal verstellbar angebracht. Das Werkzeug kann so oberhalb des Schwerpunktes abgestellt werden und es lassen sich evtl. Fertigungstoleranzen ausgleichen. Durch Spielpassungen wird eine schwimmende Lagerung des Werkzeugs im Magazin erreicht. Das Ablegen und das Wiederaufnehmen des Werkzeugs erfolgt immer in vertikale Richtung. Die Belegung des Werkzeugmagazins wird mittels eines mechanischen Positionsschalters LS-11S/P der Firma Moeller überprüft. Ein Rollenstößel, welcher mit der Grundplatte des Werkzeugs vertikal angefahren wird, betätigt ein Sprungschaltglied mit einem Öffner- und einem Schließerkontakt.

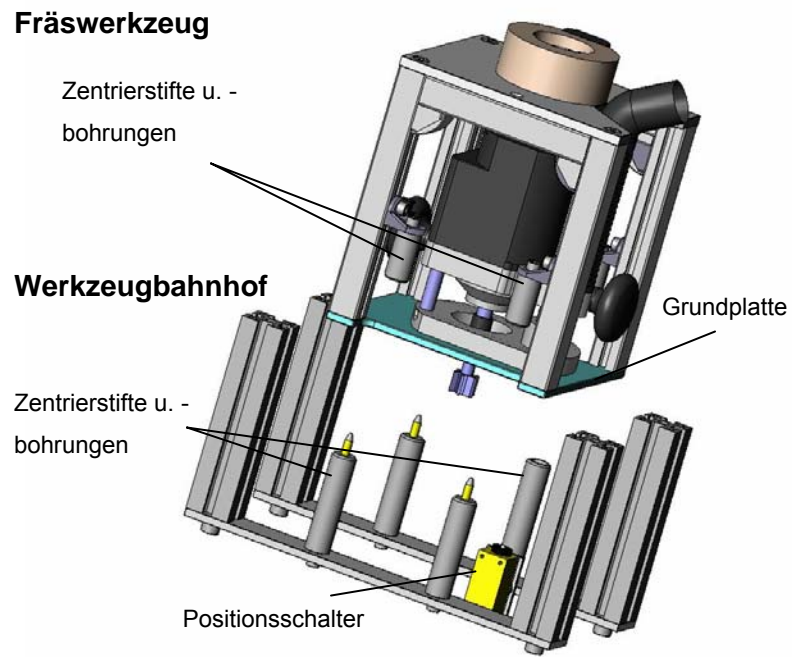


Abbildung 25: Werkzeugbahnhof mit Fräswerkzeug

5 VORVERSUCHE UND OPTIMIERUNG DES FRÄSWERKZEUGS

5.1 Ziele der Vorversuche

Beim Fräsen mit Handoberfräsen erfolgt die Anpassung der relevanten Einstellgrößen auf Basis von praktischen Erfahrungen bzw. Vorversuchen. Empfohlene Richtwerte, wie sie bei stationären Bearbeitungszentren verwendet werden, lassen sich aufgrund technischer Einschränkungen wie auch anderer Rahmenbedingungen nur begrenzt übernehmen. Auch lassen sich beim Betrieb einer für den Handeinsatz ausgelegten Handoberfräse mit dem Roboter Erfahrungen aus dem Einsatz von stationären Holzbearbeitungsmaschinen nur bedingt heranziehen. Werkzeuge für Handvorschub unterliegen weiteren besonderen Anforderungen. Diese beziehen sich auf die Schneidenüberstände, die Spanlückenweiten und das Rückschlagverhalten. So werden die Werkzeuge in zwei Klassen unterteilt: Werkzeuge für Handvorschub (BG-TEST) und Werkzeuge für den mechanischen Vorschub. Fräser für handbetriebene Handoberfräsen besitzen u.a. einen begrenzten Schneidenüberstand, um die Spandicke aus Sicherheitsgründen auf max. 1,1mm zu begrenzen. Dadurch lässt sich auch das Rückschlagverhältnis V_R/V_C reduzieren [BGI99]. Zudem ist die geringe Steifigkeit von Industrierobotern im Vergleich zu Bearbeitungszentren zu berücksichtigen. Um für die Versuche möglichst ideale Einstellgrößen zu ermitteln, werden im Vorfeld der Versuche so genannte Vorversuche unternommen. Drei direkt beeinflussbare Einstellgrößen sollen im Rahmen der Vorversuche untersucht werden: die Drehzahl n , die Frästiefe a_e und die Vorschubgeschwindigkeit V_f .

Ein Ziel ist es, Einstellgrößen für eine möglichst gute Bearbeitungsqualität zu ermitteln. Auch berücksichtigt werden soll dabei der Aspekt einer möglichst hohen Ausbringung. Dies ist besonders wichtig, da Investitionen in die Automatisierung der Fertigung meist unter dem Gesichtspunkt einer höheren möglichen Ausbringung in Betracht gezogen werden.

Weiter soll im Rahmen der Versuche eine Entscheidung zwischen zwei unterschiedlichen Konzepten für die Aufnahmevorrichtung getroffen werden. Dabei stellt sich die Frage, welche Auswirkungen ein durch die Werkzeugaufnahme bedingter größerer Hebel auf die Fräsergebnisse hat. Des Weiteren soll die Funktionalität des Werkzeugs beim Einsatz von unterschiedlichen Fräsern getestet werden. Da beim Durchführen der Vorversuche der Kraft-Moment-Sensor noch nicht einsatzbereit war, kann die Bewertung der Versuche lediglich anhand subjektiver Beobachtungen beim Fräsen sowie anhand der erzielten Fräsergebnisse vorgenommen werden.

5.2 Durchführung der Vorversuche

Um erste Erfahrungen bezüglich des Einflusses der Holzart auf die Fräsergebnisse zu bekommen, werden diverse Fräsversuche mit Buche- und Kieferleimholz sowie Mdf durchgeführt. Verwendet wird für die Versuche ein HM-Nutfräser mit $d = 10$ mm. In der Literatur wird im Allgemeinen eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c \approx 40$ m/s vorgeschlagen. Da gilt:

$$V_c = \frac{d \cdot \pi \cdot n}{60000}$$

sollte also eine Drehzahl von $n \approx 76\,000 \text{ min}^{-1}$ gewählt werden. Dies lässt sich technisch nicht realisieren. Aufgrund des begrenzten Fräserdurchmessers bei handgeführten Handoberfräsen kann davon ausgegangen werden, dass bei den meisten Anwendungen deshalb mit der Maximaldrehzahl der Handoberfräse gearbeitet werden kann. Eine Versuchsreihe zur Ermittlung der idealen Drehzahl erübrigt sich daher, wird jedoch zum Kennen lernen der Einstellgrößen trotzdem durchgeführt. Untersucht werden vier Drehzahlstufen (8000/12000/16000/24000 min^{-1}). Die tatsächliche Drehzahl wird bei den Versuchen über ein Laserstrahltachometer erfasst. Da sich die optische Drehzahlerfassung als einzige Möglichkeit zur Regelung des Werkzeuges mittels der Drehzahl herausgestellt hat, kann dabei die Funktion des Prinzips in dem durch Staub- und Späne belasteten Umfeld getestet werden.

Um die ideale Vorschubgeschwindigkeit zu ermitteln, wird der Vorschub von einer Geschwindigkeit von 5 mm/s an schrittweise um jeweils 5 mm/s bis 90 mm/s gesteigert. Die Frästiefe beträgt hierbei $a_e = 5$ mm. Im Anschluss werden die erzielten Ergebnisse miteinander verglichen.

Um die optimale Frästiefe zu ermitteln werden bei einem Vorschub von 20 mm/s und bei einer Drehzahl von 24000 min^{-1} Fräsungen mit der Tiefe $a_e = 2$ mm, $a_e = 4$ mm und $a_e = 6$ mm vorgenommen und verglichen.

Um einen Vergleich zwischen den zwei unterschiedlichen Konzepten für die Aufnahmevorrichtung treffen zu können, werden Fräsungen an verschiedenen Holzplatten vorgenommen. Die Entscheidung zugunsten eines Konzepts erfolgt anhand der Bewertung der Fräsergebnisse. In diesem Rahmen kann auch ein Eindruck vom Einfluss der Holzsorte auf das Fräsresultat gewonnen werden.

Die Späneabsaugung erfolgt bei den Vorversuchen direkt an der vorhandenen Absaugeinrichtung der Handoberfräse. Sie wird mit einem Industriestaubsauger bewerkstelligt. In diesem Rahmen wird auch das vorgestellte Konzept zur Schlauch- und Kabelführung getestet.

5.3 Ergebnisse der Vorversuche

Drehzahl

Pauschal lässt sich sagen, dass bei sämtlichen Versuchen mit höheren Drehzahlen auch ein qualitativ besseres Fräsergebnis erzielt wird. Lediglich bei den Versuchen an Buche Leimholz kommt es durch die starke Hitzeentwicklung bei zu hohen Drehzahlen oder zu langsamen Vorschub zu Brandspuren.

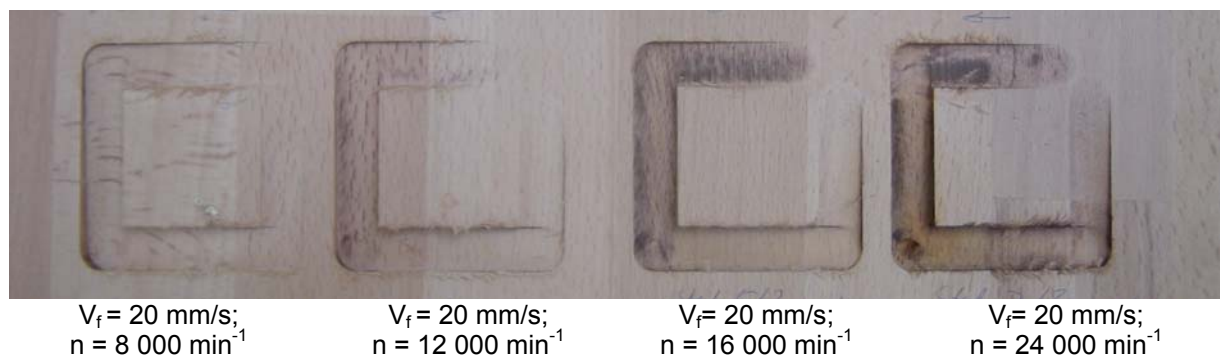


Abbildung 26: Vergleich unterschiedlicher Drehzahlen

Um die Versuche exakt interpretieren zu können, benötigt man Kenntnis über die beim Fräsen herrschenden Rahmenbedingungen. So muss z.B. bei den in Handoberfräsen eingesetzten Universalmotoren, trotz der elektronischen Drehzahlregelung, bei hohen Drehmomenten mit einem Abfallen der Drehzahl gerechnet werden. Da im Rahmen der Arbeit auf eine ständige Drehzahlmessung verzichtet wird, bei den Vorversuchen auch

der Drehzahlverlauf bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten untersucht. Durchgeführt wird der Versuch an Bucheleimholz, bei dem die höchsten resultierenden Momente an der Frässpindel zu erwarten sind. Die Frästiefe a_e beträgt 4 mm. Abbildung 27 zeigt, dass die Drehzahl über den gesamten möglichen Vorschubbereich sich nur geringfügig ändert.

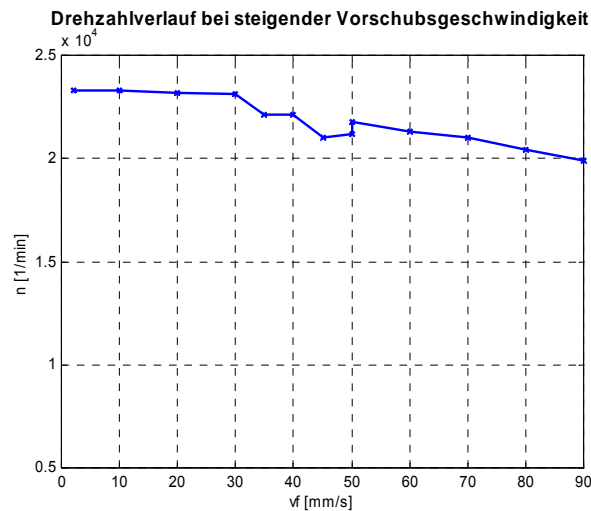


Abbildung 27: Drehzahlverlauf bei steigender Vorschubgeschwindigkeit

Die Erfassung der Drehzahl mittels Laserstrahltachometer wird durch die hohe Spänekonzentration erschwert. Deshalb kann eine Drehzahlerfassung für den dauerhaften Einsatz ausgeschlossen werden.

Vorschubgeschwindigkeit

Die Vorschubgeschwindigkeit hat kaum Einfluss auf die Kantenqualität und Oberflächenqualität. Lediglich die Maßhaltigkeit wird durch eine Vorschubgeschwindigkeit V_f kleiner oder gleich 60 mm/s negativ beeinflusst.

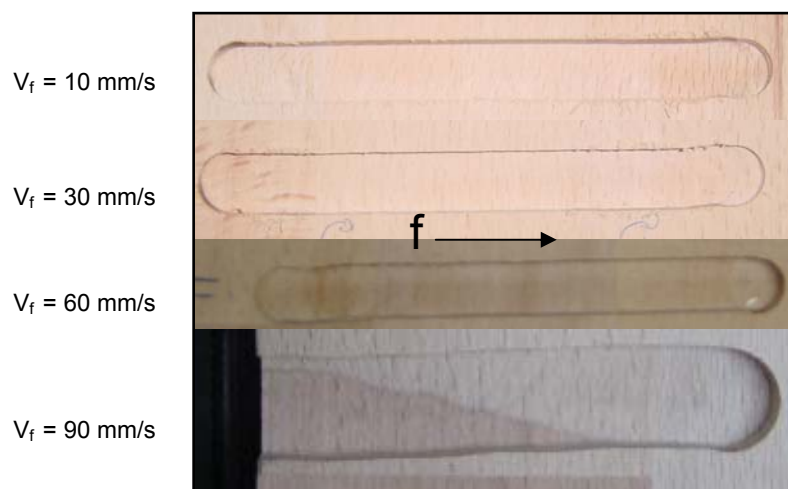


Abbildung 28: Vergleich unterschiedlicher Vorschubgeschwindigkeiten

Da die Vorschubgeschwindigkeit maßgeblichen Einfluss auf die Taktzeit hat, sollte sie möglichst hoch sein. Für die Versuche wird deshalb eine Vorschubgeschwindigkeit von 40 mm/s gewählt.

Untersuchung der Kabel- und Schlauchführung

Das vorgeschlagene Konzept der Kabel- und Schlauchführung mittels eines Kabelzuges erweist sich als praktikabel. Als die ideale Position des Kabelzugs erweist sich die Anbringung des Kabelzugs vertikal über der Roboterbasis. Mit einem für eine Traglast von bis zu 1,5 kg vorgesehenen Kabelzug können Schlauch und Kabel immer straff gehalten und Roboterbewegungen ausgeglichen werden. Da sich der Kabelzug direkt über der zentralen Drehachse des Roboters befindet, kann ein Verhaken des Roboters mit Schlauch und Kabel bei regulärem Betrieb nahezu ausgeschlossen werden.

Getestet wird das Konzept durch das Anfahren von diversen Punkten durch den Roboter. Gewählt werden 5 Punkte, die v.a. am äußeren Rand des Arbeitsbereichs des Roboters liegen. Diese werden durch den Roboter auf unterschiedliche Art und Weise angefahren: entweder durch ein Verfahren auf direktem Weg, oder mit möglichst geringem Bewegungsaufwand. Auch ein Anfahren des Werkzeugbahnhofs sowie der Betrieb mit im Werkzeugbahnhof abgestellter Vorrichtung werden in diesem Rahmen simuliert. Für den Werkzeugbahnhof ergibt sich aufgrund der Gefahr einer Kollision des Roboters mit dem Schlauch und Kabel die Forderung, dass dieser möglichst weit vom Vakuumaufspanntisch entfernt installiert wird und alle anderen Werkzeuge dazwischen abgestellt werden.

5.4 Optimierung des Fräswerkzeugs aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche

Generell zeigt sich bei den Vorversuchen, dass das Gesamtsystem eine zu geringe Steifigkeit aufweist. Dies führt zu Gestaltabweichungen beim Fräsergebnis, weshalb vor den eigentlichen Versuchen das Fräswerkzeug hinsichtlich der Steifigkeit optimiert wird (vgl. Abbildung 29).

Bei einem Vergleich der mit den beiden Trägersystemen erzielten Fräsergebnisse zeigen sich keine Unterschiede. Deshalb wird das in einer Linie mit der 6. Roboterachse liegende Konzept weiter ausgearbeitet. Dieses verringert später den

Aufwand beim Programmieren der Roboterbahn, da der TCP (die Fräuserspitze) in der Verlängerung des Mittelpunktes des Handflansches liegt.

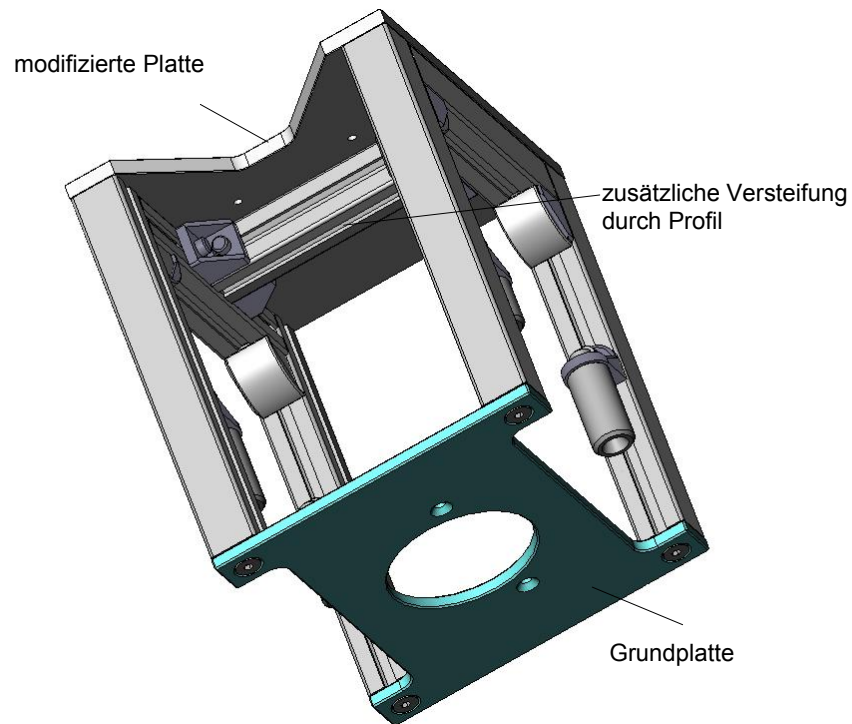


Abbildung 29: Hinsichtlich der Steifigkeit optimiertes Träger- und Spannsystem

6 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNG DES FRÄSWERKZEUGS

6.1 Versuchsaufbau

In der schon beschriebenen Umgebung der Roboterzelle soll auch das entwickelte Fräswerkzeug zum Einsatz kommen. Da die beim Fräsen entstehenden Zerspankräfte sich lediglich experimentell ermitteln lassen, werden im Rahmen der Versuche Sicherheitsvorkehrungen getroffen. Um die auf Werkzeug, Messeinrichtungen und Roboter auftretenden Kräfte zu begrenzen, wird eine Art Sollbruchstelle zwischen dem Vakuumaufspanntisch und der Roboterzelle belassen.

Die Roboterzelle besteht aus 45x45 mm Aluprofilen. In die entstehenden Zwischenräume werden Holzplatten, welche mit einer Gummiauflage versehen sind, eingepasst. Der Vakuumaufspanntisch liegt ohne weitere Fixierung auf den Holzplatten. Steigen die Kräfte beim Fräsen z.B. durch einen Fräserstillstand extrem an, wird der Vakuumaufspanntisch verschoben und die restliche Vorrichtung wird geschont. Um die Maßhaltigkeit der zu bearbeitenden Werkstücke während der regulären Bearbeitung sicherzustellen, wird innerhalb der schon angesprochenen Vorversuche die Verschiebung des Vakuumaufspanntisches bei normalem Fräsbetrieb gemessen. Aufgenommen wird die Verschiebung in x- und y-Richtung bei einer Bearbeitung des Werkstückes in die entsprechende Richtung. Dies geschieht mit einer mechanischen Messuhr, welche senkrecht zur jeweiligen Kante des Vakuumaufspanntisches angebracht wird.

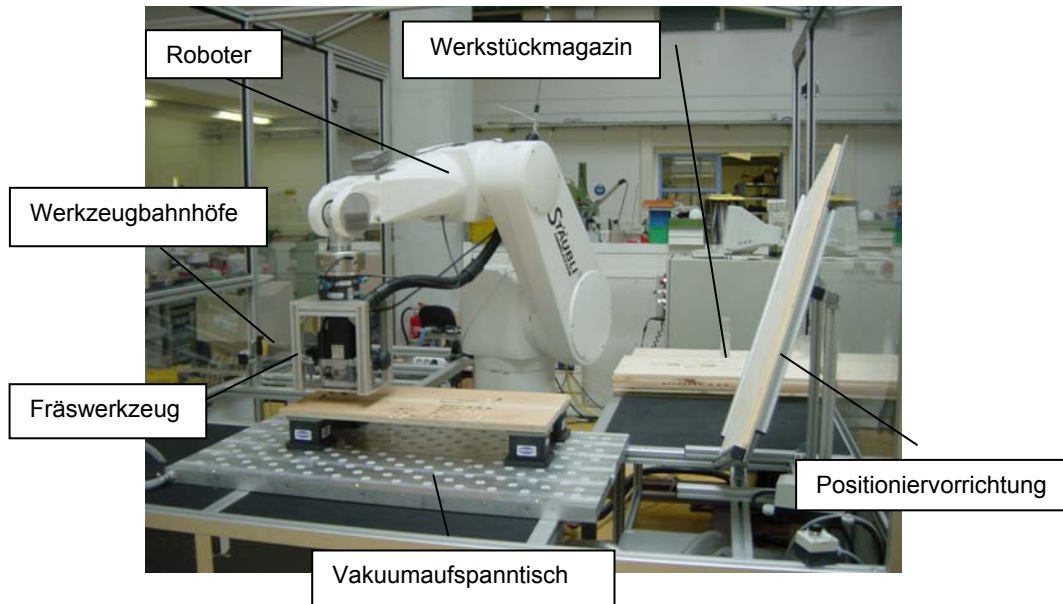


Abbildung 30: Versuchsaufbau

Bei der Bearbeitung werden Einstellgrößen verwendet, welche innerhalb der Vorversuche als jeweiliges Maximum ermittelt wurden. Der Vorschub liegt dabei bei 60 mm/s, die Frästiefe a_e beträgt 6 mm. Als Fräser wurde der bei den Vorversuchen verwendete HM-Fräser mit $z = 2$ und $d = 10$ mm verwendet. Hierbei ergeben sich in beide Richtungen Verschiebungen von 0,02 mm. Da davon ausgegangen wird, dass das Werkzeug nicht für die Präzisionsbearbeitung verwendet wird, kann dieser Wert innerhalb der Fräsversuche toleriert werden.

Zum Spannen und Positionieren der Werkstücke auf dem Vakuum-Aufspanntisch ist geplant, diese mit einer Saugspinne aufzunehmen. Diese soll die Werkstücke vom Werkstückmagazin auf eine Positioniervorrichtung transportieren. Nachdem die Werkstücke durch ihre Gewichtskraft positioniert worden sind, können sie von der Saugspinne an einer nun genau definierten Stelle aufgenommen werden und auf dem Vakuumaufspanntisch abgelegt werden. Da die Saugspinne zum Zeitpunkt der Versuche noch nicht in Betrieb ist, werden die Werkstücke von Hand positioniert. Da die Maßhaltigkeit der bearbeiteten Flächen bezüglich der Werkstückkanten v.a. von der Positioniergenauigkeit und der Genauigkeit des Roboters abhängt, wird dies in den Versuchen nicht weiter beachtet. Die von Hand erfolgende Genauigkeit der Werkstückpositionierung ist lediglich eine Notlösung und die Genauigkeit des Roboters lässt sich im Rahmen der Arbeit nicht beeinflussen und muss als gegeben betrachtet werden. Deshalb wird ein aus zwei Profilstücken an der Kante des Vakuumaufspanntischs gebildeter Winkel als ausreichend zur Positionierung der Werkstücke erachtet. Die genaue Position des, wie erwähnt lose liegenden

Vakuumaufspanntisches bzgl. des Roboters wird mit einem Strichmaß auf der Roboterzelle gewährleistet.

6.2 Einflussfaktoren

Um die Steifigkeit der aus den Vorversuchen hervorgegangenen Aufnahmevorrichtung in Kombination mit dem Roboter zu untersuchen wird direkt auf dem Gelenk der 5. Roboterachse eine Messuhr befestigt (vgl. Abbildung 31). Dieser Punkt befindet sich 100 mm oberhalb des Handflansches des Roboters. Mit einem Federkraftmesser wird der Fräser der Handoberfräse mit einer senkrecht wirkenden Kraft beaufschlagt. Diese wird schrittweise gesteigert und in Fräsrichtung, 430 mm unterhalb des Roboterhandflansch eingeleitet. An zwei Punkten wurde die resultierende Auslenkung aufgenommen. Punkt 1 befindet sich 12 mm oberhalb des Handflansches des Roboters. Punkt 2 liegt auf dem Kraft-Moment-Sensor 40 mm unterhalb des Roboterhandflansches.

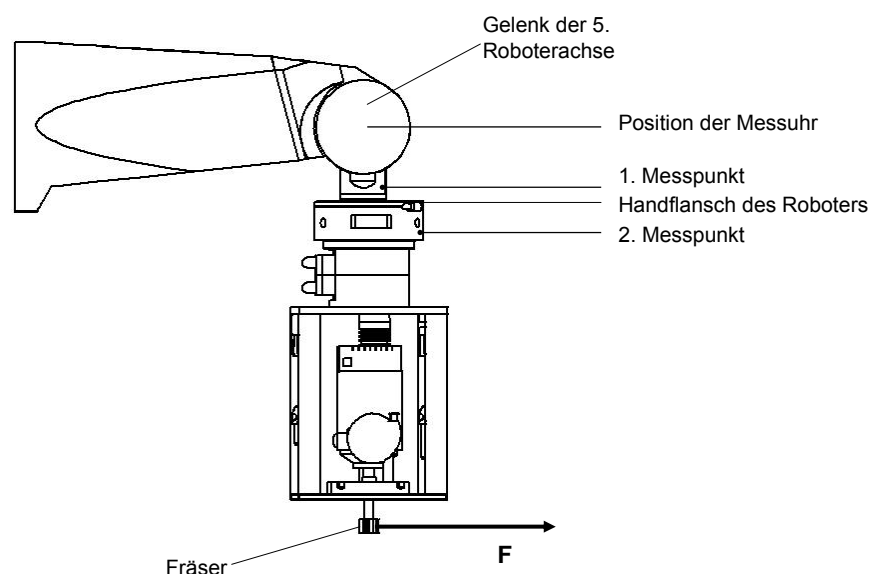


Abbildung 31: Messpunkte zur Überprüfung der Steifigkeit der Aufnahmevorrichtung

Die Wahl der Punkte erfolgt aufgrund der begrenzten Reichweite und Flexibilität der Messvorrichtung. So sind auch die ermittelten Messwerte in Abbildung 32 lediglich als Hinweis auf die doch geringe Steifigkeit des Roboters und die sich ergebenden Auswirkungen zu betrachten und nicht zu weiteren Berechnungen etc. geeignet.

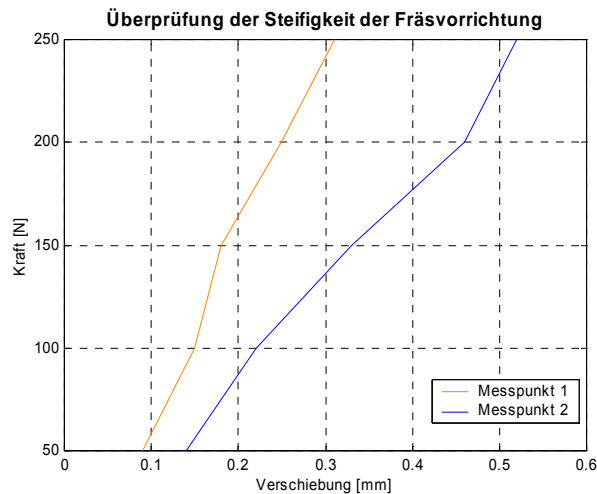


Abbildung 32: Überprüfung der Steifigkeit der Fräsvorrichtung

Aufgrund der Befestigung der Messuhr am Gelenk der 5. Roboterachse lässt sich dieses als Festlager betrachten. Anhand von Abbildung 2 kommt man zu dem Schluss, dass die Verschiebungen v.a. auf der mangelnden Steifigkeit des Roboters basieren. Die größeren Verschiebungen am Messpunkt 2 resultieren v.a. aus dem längeren Hebelarm an dieser Stelle.

6.3 Versuchsplanung

Mit den durchgeführten Versuchen sollen unterschiedliche Fragen geklärt werden. Auf die jeweiligen Ziele wird in Kapitel 6.3.1 näher eingegangen. Durchgeführt werden die Versuche an unterschiedlichen Holzwerkstoffen in folgender Reihenfolge:

- ♦ Fichte Leimholz als weiches Holz
- ♦ Kunststoffbeschichtete Pressspanplatte als beschichteter Werkstoff
- ♦ Buche Leimholz als hartes Holz
- ♦ Furnierte Pressspanplatte als Werkstoff mit sowohl homogener als auch heterogener Struktur
- ♦ Kiefer Leimholz als mittelhartes Holz
- ♦ Mdf als Holzwerkstoff mit homogener Struktur

Zudem wird ein Teil einer Versuchsreihe zu Vergleichszwecken im Vorfeld an Kieferleimholz durchgeführt. Jede Versuchsreihe besteht aus 7 unterschiedlichen

Versuchen, welche immer in derselben Reihenfolge durchgeführt werden. Verwendet wird für die Versuche ein Hartmetallfräser mit einem Durchmesser $d = 16$ mm und der Zähnezahl $z = 2$. Dieser wird, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, nicht ausgetauscht oder neu geschliffen. Nach der dritten Versuchsreihe wird er zur Gewährleistung gleicher Versuchsbedingungen auf auftretende Verschleißerscheinungen untersucht. Um Spanmarkierungen und einen übermäßigen Werkzeugverschleiß durch nicht beseitigte Späne an den Werkzeugschneiden zu vermeiden, wird der Fräser nach Abschluss jeder Versuchsreihe gereinigt. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt, sofern sie nicht Teil der Untersuchung ist, bei $V_f = 40$ mm/s. Die Eintauchgeschwindigkeit V_e wird auf $V_e = 5$ mm/s begrenzt.

6.3.1 Versuchsziele

Jeder der Versuche verfolgt bestimmte Ziele. Durch die Variation bestimmter Einstellgrößen wie Vorschubgeschwindigkeit V_f , Eingriffstiefe a_e , Fräsrichtung und Fräsart sollen deren Auswirkungen auf den Fräsprozess ermittelt werden.

Ausgewertet werden die Versuche anhand der aufgenommenen Kräfte sowie mittels der Bearbeitungsqualität. Wie in Kap. 2 gezeigt, sind objektive Verfahren zur Bewertung der Bearbeitungsqualität in der Holzverarbeitung teilweise sehr aufwändig. Auch gibt es kaum verbindliche Richtlinien. Da entsprechende Einrichtungen lediglich extern verfügbar gewesen sind, wird auf eine objektive Bewertung der Oberflächenqualität, Kantenqualität etc. verzichtet. Auch ist die erzielte Bearbeitungsqualität meist noch verbesserungswürdig, so dass eine subjektive Beurteilung als ausreichend erscheint.

Im Folgenden werden die Ziele der einzelnen Versuche sowie die relevanten Einstellgrößen kurz erläutert. In Abbildung 33 sind die Fräsbahn und die entsprechende Vorschubrichtung abgebildet.

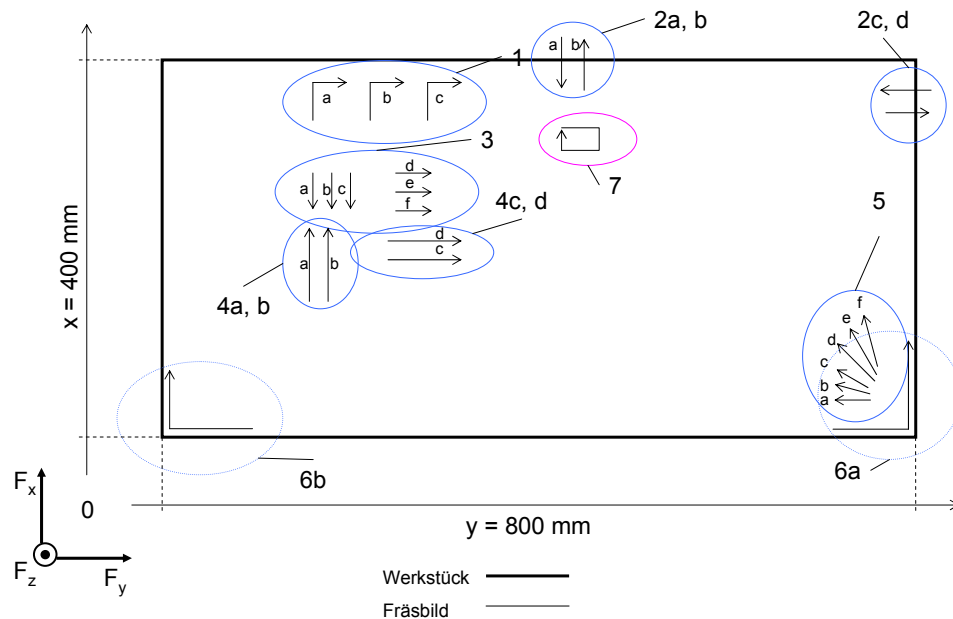


Abbildung 33: Versuchsplan und zugehöriges Versuchsergebnis

Versuch 1

Durch die Variation der Eingriffstiefe a_e soll die Abhängigkeit der Vorschubkräfte von der Eingriffstiefe festgestellt werden. Durch das Abfahren einer winkelförmigen Bahn, sollen zudem eventuell auftretende quasistatische Verlagerungen beim Richtungswechsel festgestellt werden können.

Versuch 2

Versuchsziel ist die Ermittlung quasistatischer Verlagerungen vom Fräswerkzeug zum Werkstück beim seitlichen Einfahren des Fräasers in den Werkstoff. Zudem soll die Entwicklung der Schnittkräfte beim Eintauchen/Ausfahren miteinander verglichen werden. Der Versuch wird bei den Vollholzwerkstoffen auch in Abhängigkeit von der Faserrichtung durchgeführt. Dabei soll verglichen werden, ob gerade beim seitlichen

Anfahren bzw. Ausfahren charakteristische Unterschiede, welche auf der Faserrichtung basieren, auftreten.

Versuch 3

Durch die Variation der Vorschubgeschwindigkeiten bei konstanter Eingriffstiefe etc. soll die Entwicklung der am Schneidkeil auftretenden Kräfte in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit festgestellt werden. Auch bei diesem Versuch wird sowohl in Faserrichtung, als auch senkrecht zur Faserrichtung gefräst. Hintergrund des Versuchs ist u.a. die Idee, die Vorschubgeschwindigkeit mittels des Kraft-Moment-Sensors zu regeln. Dies lässt sich jedoch nur durchführen, wenn ein Zusammenhang zwischen Vorschubgeschwindigkeit und resultierenden Kräften festgestellt werden kann.

Versuch 4

Innerhalb des Fräsvorgangs erfolgt bei diesem Versuch eine lineare Änderung der Frästiefe a_e von 0-6 mm bzw. von 6-0 mm. So kann der benötigte Leistungsbedarf bei den im Prinzip gleichen Fräsungen miteinander verglichen werden. Zudem kann vor allem der Zusammenhang zwischen Frästiefe und den auftretenden Kräften direkt verfolgt werden. Auch dieser Versuch wird senkrecht zur Faserrichtung und in Faserrichtung fräsend durchgeführt.

Versuch 5

Durch eine schrittweise Änderung des Winkels der Fräsbahn zur Faserrichtung des Holzes soll die Entwicklung der Vorschubkräfte beim Fräsen in unterschiedlichen Winkeln zur Faserrichtung beobachtet werden. Der Winkel der Fräsbahn zur Faserrichtung wird dabei um jeweils 15° verändert.

Versuch 6

Da beim Fräsen von Nuten nie ein reines Gegenlauf- oder Gleichlaufräsen auftritt, sollen bei diesem Versuch beide Fräsarten verglichen werden.

Im Handbetrieb ist die Handoberfräse lediglich für das Gegenlaufräsen vorgesehen, im Versuch soll eine Eignung zum Gleichlaufräsen untersucht werden. Dazu wird das Werkstück an einer Außenkante bearbeitet. So ist nie der ganze Fräser im Einsatz. Durch Verändern der Vorschubrichtung, können Gegen- und Gleichlaufräsen miteinander verglichen werden.

Versuch 7

Da schon innerhalb der Vorversuche Gestaltabweichungen auftraten, welche auf der geringen Steifigkeit des Systems basierten, sollen hierbei die auftretenden Abweichungen durch das Fräsen von 2 Bahnen ausgeglichen werden. Der Fräser wird beim Fräsen der zweiten Bahn nachgestellt, so dass das Werkstück durch Gegenlaufräsen bearbeitet wird. Durch das Vermindern der resultierenden Kräfte am Fräser, soll ein qualitativ hochwertigeres Fräsresultat erzielt werden.

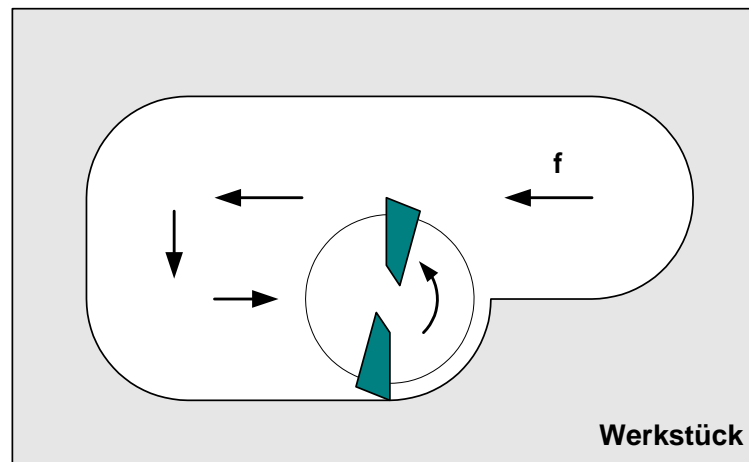


Abbildung 34: Erzeugen einer Fräsbahn ohne Gestaltabweichungen durch Gegenlaufräsen

6.4 Versuchsergebnisse

6.4.1 Interpretation der aufgenommenen Kräfte

Die beim Fräsprozess auftretenden Kräfte werden, wie beschrieben, mit einem 6-Achsen-Kraft-Momentsensor aufgenommen. Dieser gibt die Kräfte als resultierende Kräfte in x-, y- und z-Richtung an. Aus diesen Kräften lässt sich die am Schneidkeil wirkende Zerspankraft F_{Zp} ermitteln:

$$F_{Zp} = \left(F_x^2 + F_y^2 + F_z^2 \right)^{0,5}$$

F_{Zp} besitzt keine einheitliche Wirkrichtung. Dies ist v.a. bei der Auslegung der Frässpindel etc. interessant.

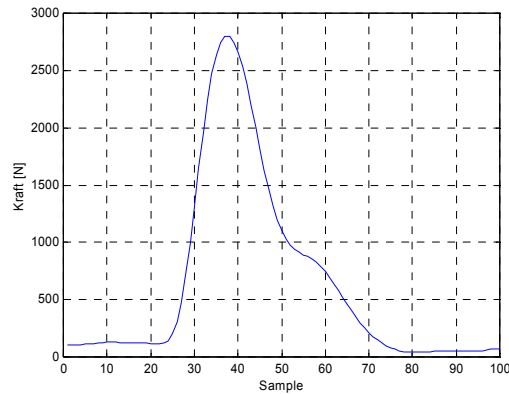


Abbildung 35: Darstellung von F_{Zp} anhand Versuch 3f/Buche

Wie in Kap. 2 beschrieben, lassen sich die am Schneidkeil wirkenden Kräfte auch ihrer Wirkung nach untergliedern. So lassen sich z.B. gezielt die Schnittkraft F_c oder die Vorschubkraft F_f darstellen. Da diese jedoch auch ihre Wirkrichtung, bedingt durch die Drehbewegung des Fräasers oder wechselnde Vorschubrichtungen, ständig ändern, erscheint es sinnvoller, bei der Versuchsauswertung die in bestimmte Richtungen wirkenden Kräfte F_x , F_y und F_z zu verwenden und entsprechend zu interpretieren. In Abbildung 36 sind nochmals alle relevanten Größen aufgeführt.

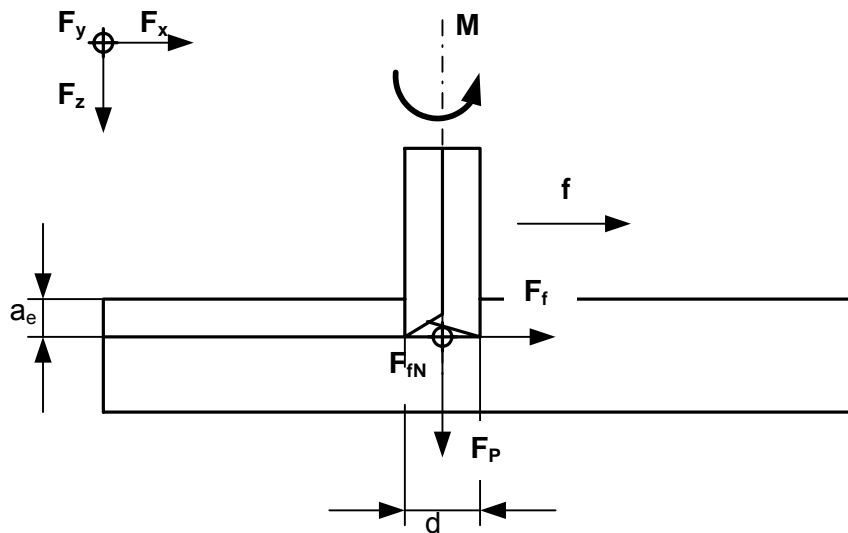


Abbildung 36: Kräfte beim Zerspanprozess

F_z steht dabei senkrecht zum Werkstück und bildet während dem Fräsen mit einem Vorschub quer zur Werkstückebene die Vorschubnormalkraft F_{fN} ab. Die Kräfte in x -Richtung stellen dabei die Vorschubkraft F_f dar.

Um die weitere Auswertung der aus den Versuchen resultierenden Diagramme zu ermöglichen, wird an dieser Stelle exemplarisch ein aufgenommener Kräfteverlauf dem entsprechenden Fräsbild zugeordnet (vgl. Abbildung 37).

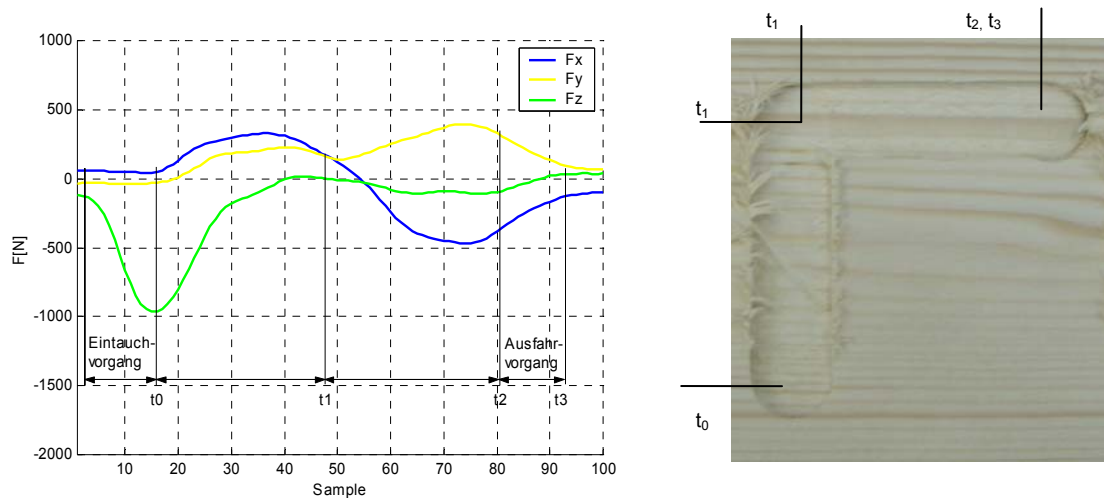


Abbildung 37: Bezug des Kräfteverlaufs zum Fräsbild

Der Eintauchvorgang zum Zeitpunkt t_0 ist anhand der Kraftspitze in z-Richtung zu erkennen. F_z bildet beim Eintauchen die Vorschubkraft F_f . Bis kurz vor t_1 steigt nach dem Anfahren die Kraft F_x an. Dies ist zu diesem Zeitpunkt die Vorschubkraft F_f . Die senkrecht dazu stehende Vorschubnormalkraft F_{fN} wird von F_y abgebildet. Die Kräfte in z-Richtung bilden nun die Passivkraft F_p . An t_1 fallen beide Kräfte ab. Dies rührt von dem durch den Richtungswechsel bedingten kurzen Stillstand des Fräasers in Vorschubrichtung. Da die Schnittgeschwindigkeit wesentlich höher als die Vorschubgeschwindigkeit ist, erfasst der Fräser in diesem Moment kaum noch Material. So fallen auch die Kräfte am Schneidkeil ab. Zwischen t_1 und t_2 wird F_y zur Vorschubkraft F_f und die Vorschubnormalkraft F_{fN} wird von F_x abgebildet. Durch den Richtungswechsel des Fräasers, wird F_x nun auch in negative Richtung angezeigt.

6.4.2 Exemplarische Überprüfung der Plausibilität der ermittelten Daten

Um die Plausibilität der Daten zu überprüfen, werden beispielhaft die in z-Richtung wirkenden Kräfte beim Eintauchvorgang herangezogen. Es gilt:

$$v = \frac{s}{t}$$

Die Vorschubgeschwindigkeit V_f beim Eintauchen beträgt 5 mm/s. Bei einer zu erreichenden Schnitttiefe von $a_e = 4$ mm bedeutet dies, dass der Eintauchvorgang 0,8 s dauert. Bei einer Abtastrate des Kraft-Moment-Sensors von 20 Hz entspricht dies 16 Messpunkten.

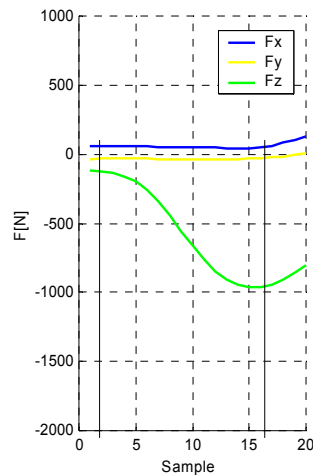


Abbildung 38: Plausibilitätsüberprüfung

Diese Zeitspanne entspricht exakt der Zeit, welche vom Auftreten einer Kraft in z-Richtung bis zum Erreichen von $F_{z_{max}}$ vergeht.

6.4.3 Diskussion der Versuchsergebnisse

Zustelltiefe

Die Beurteilung von Kantenqualität und Oberflächenqualität zeigt, dass eine Zustelltiefe a_e von ca. 2 mm die bestmögliche Oberflächen- sowie Kantenqualität ermöglicht (vgl. Abbildung 39/Abbildung 40). Die Oberfläche ist hier bzgl. der Bearbeitungsrauheit durchgängig am besten und auch hinsichtlich der Kantenqualität zeigt sich hier die geringste Kantenschartigkeit.

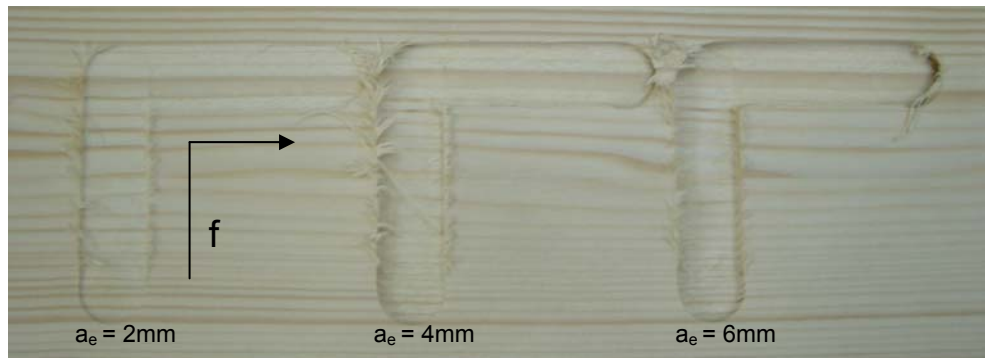


Abbildung 39: Auswirkungen der Zustelltiefe a_e anhand Versuch 3a-c/Kiefer

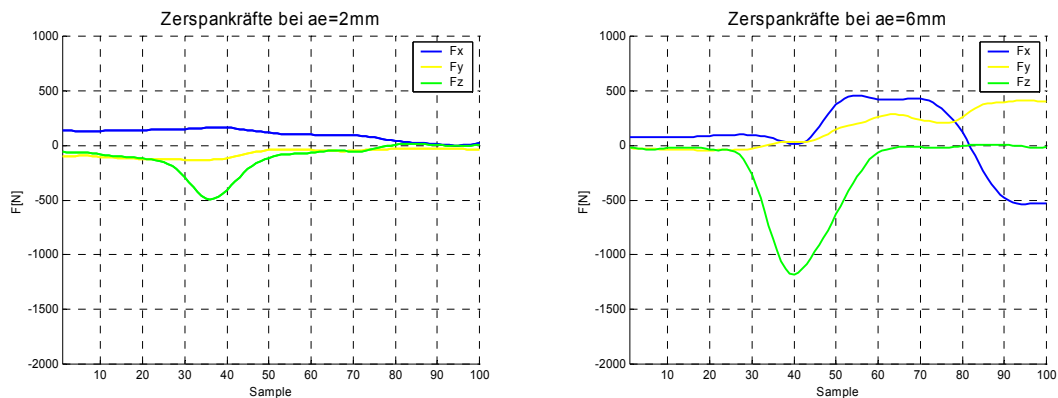


Abbildung 40: Resultierende Kräfte bei unterschiedlichen Zustelltiefen a_e anhand Versuch 3a und 3c/Kiefer

Bei der Bearbeitung von Buche deutet eine schwarze Oberfläche an den Eckpunkten auf eine zu große Hitzeentwicklung hin. Diese wird durch den stehenden Fräser verursacht und tritt unabhängig von der Zustelltiefe auf.

Bei einer geringen Zustelltiefe sind auch die am Fräser wirkenden Kräfte am geringsten. Dies ist v.a. bzgl. F_z relevant. Allgemein liegt F_z bei den Versuchen mit einer Zustelltiefe $a_e \geq 4$ mm je nach Holzart oftmals deutlich über 1000 N. Dies führt zu einer Belastung des Roboters, welche weit über dem maximalen Handhabungsgewicht liegt.

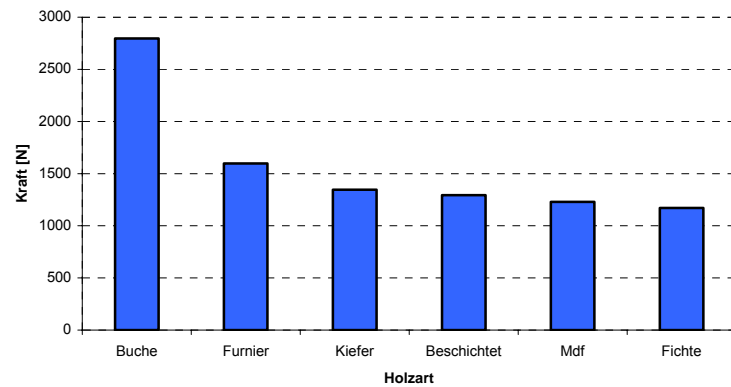


Abbildung 41: Maximal auftretende Kraft in z-Richtung

Gestaltabweichungen

Die in Abbildung 42 sichtbare Gestaltabweichungen resultieren aus der geringen Steifigkeit des Roboters sowie der Fräsvorrichtung. Bei $a_e \approx 2$ mm sind die Gestaltabweichungen x_{ab} der Fräsbahn zwischen dem Eintauchpunkt und dem Eckpunkt, sowie dem Eckpunkt und dem Endpunkt des Fräsvorganges noch kleiner oder gleich 0,5 mm. Bei einer größeren Zustelltiefe sind diese deutlich größer.



Abbildung 42: Gestaltabweichungen bei unterschiedlichen Zustelltiefen

Ursache der Abweichung x_{ab} ist die wie in Abbildung 43 zu sehen die beim Fräsen wirkende Vorschubnormalkraft in Gegenlaufrichtung. Diese ist beim Fräsen einer Nut relativ hoch und teilweise sogar mit der Kraft in Vorschubrichtung F_f gleichzusetzen.

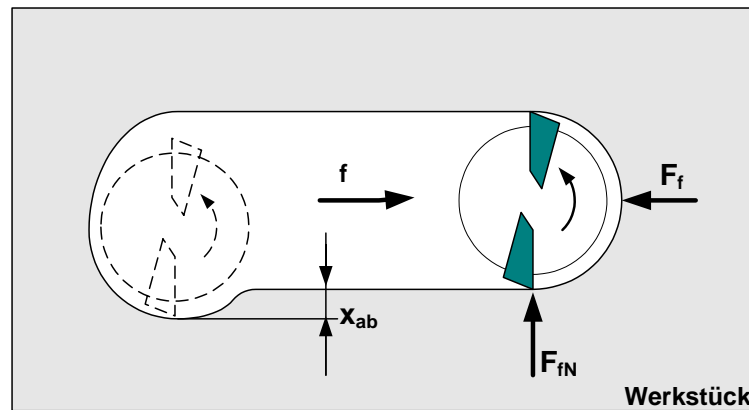


Abbildung 43: Ursache der Gestaltabweichungen beim Fräsen

Beim Eintauchen und Ausfahren hingegen wirkt die Vorschubkraft F_f in z-Richtung. Die Vorschubnormalkraft hebt sich hierbei durch die Rotation des Fräses auf, weshalb an diesen Stellen auch keine Ablenkung sichtbar ist.

Einfluss der Faserrichtung auf das Fräsergebnis

Das Fräsen in Faserrichtung ist bezüglich der Oberflächen- und Kantenqualität wesentlich besser als das Fräsen senkrecht zur Faserrichtung. Bzgl. der Kraftentwicklung sind lediglich geringfügige Unterschiede zwischen beiden Fräsrichtungen feststellbar. Beim furnierten Pressspanholz werden die Kräfte beim Fräsen gegen die Faserrichtung des Furniers sogar etwas geringer. Dies liegt daran, dass beim Nutfräsen bei jeder Fräsrichtung gleichermaßen Schnittbewegungen sowohl senkrecht zur Faserrichtung, als auch in Faserrichtung vorkommen. Lediglich die sichtbare Kante wird beim Fräsen in Faserrichtung durch eine Schnittbewegung in Faserrichtung erzeugt. Beim Fräsen mit einer Vorschubbewegung senkrecht zur Faserrichtung werden die sichtbaren Kanten mit einer Schnittbewegung senkrecht zur Faserrichtung erzeugt. Der Schneidkeil schiebt sich dabei zwischen die Fasern.

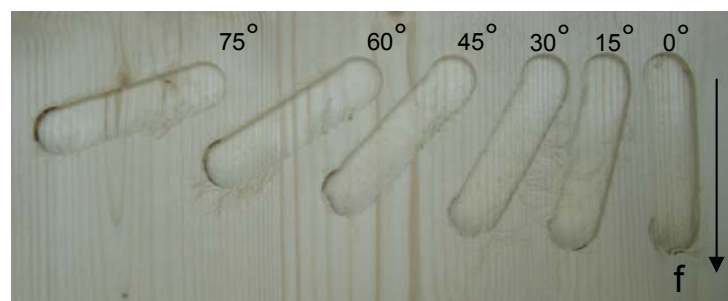


Abbildung 44: Einfluss der Faserschnittrichtung auf die Qualität der Oberflächen und Kanten

Vor diesem Hintergrund ist es auch verständlich, dass es beim Fräsen mit einem Winkel größer oder gleich 45° zur Faserrichtung gerade bei langfaserigen Werkstoffen

zu einer verstärkten Faserbildung kommt. In diesem Bereich werden die sichtbaren Kanten wie auch Schmalflächen mit einem ungünstigen Schnittwinkel erzeugt. D.h., die Schnittkraft wird nicht in einem optimalen Winkel auf die Faser geleitet, wie beim Fräsen senkrecht zur Faserrichtung. Beim Fräsen in Faserrichtung müssen im Prinzip keine Fasern im Kantenbereich getrennt werden. Deshalb wirken beim Fräsen mit Vorschub in Faserrichtung und senkrecht zur Faserrichtung die geringsten Kräfte in x- und y-Richtung. Die durch die mangelnde Steifigkeit bedingten Ausbeulungen nehmen generell ab einem Vorschubrichtungswinkel größer oder gleich 45° ab und sind statt bis zu $d_p \approx 1$ mm aus der Mitte dann $\leq 0,6$ mm. Bezogen auf die Kraftentwicklung ist das Anfahren von außen vorteilhafter. Hier entfällt v.a. die Kraftspitze in z-Richtung.

Die Kräfte in x- und y-Richtung liegen beim Anfahren von außen länger an (die verrichtete Arbeit ist also höher), die Kraftspitzen sind jedoch in etwa gleich.

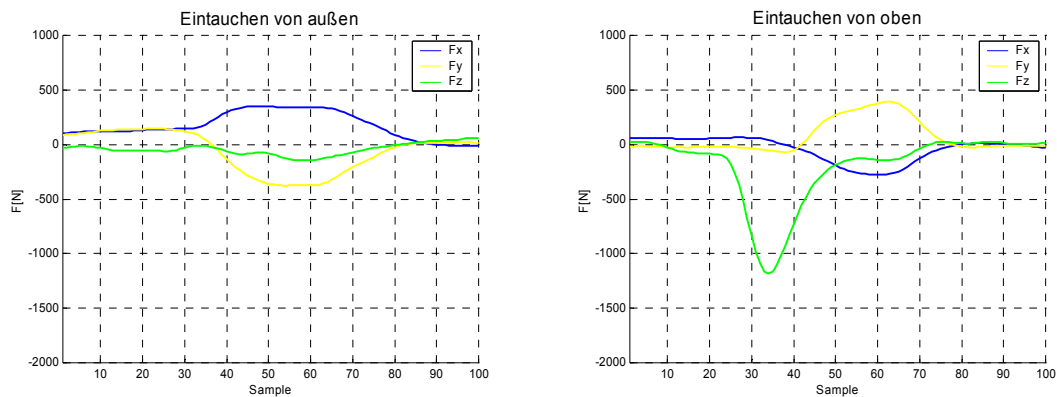


Abbildung 45: Kraftentwicklung bei unterschiedlichen Eintauchrichtungen

Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf das Fräsergebnis

Entgegen den Erwartungen hat die Vorschubgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die entstehenden Kräfte. Die Oberflächenqualität und Kantenqualität bleiben durch die sich ändernde Vorschubgeschwindigkeit auch weitgehend unbeeinflusst. Lediglich bei Buche wird durch eine Vorschubgeschwindigkeit von 60 mm/s die starke Hitzeentwicklung weitgehend unterbunden.

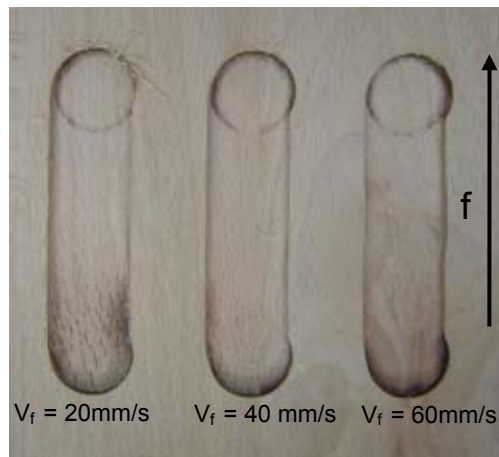


Abbildung 46: Darstellung des Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit auf das Fräsergebnis anhand von Versuch 3a-c/Buche

Die Maßhaltigkeit wird durch eine zu hohe Vorschubgeschwindigkeit negativ beeinflusst. Dies trifft v.a. auf die Versuche mit Buche Holz zu. Verwunderlich ist, dass sich dieser wahrscheinlich durch mangelnde Steifigkeit verursachte Fehler, kaum durch höhere Schnittkräfte äußert.

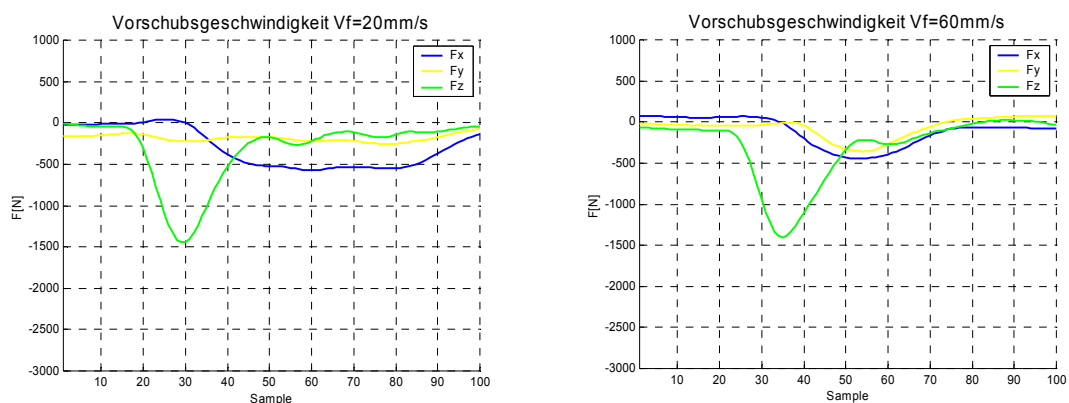


Abbildung 47: Kräfteentwicklung bei unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten

Vergleich von Gegen- und Gleichlaufräsen hinsichtlich der Fräsqualität

Aufgrund der hohen Ungenauigkeit und der starken Abweichungen ist der Versuch zur Unterscheidung der Fräserdrehrichtung nicht mittels der Kraftkurven etc. auswertbar. Wahrscheinlich führt die Kombination der mangelnden Steifigkeit, sowie der bei Handwerkzeugen große Spanwinkel χ dazu, dass der Fräser beim Gleichlaufräsen in das Werkstück hineingezogen wird. Beim Gegenlaufräsen wird durchgehend eine gute Oberfläche sowie Kantenqualität erzielt, so dass nach Möglichkeit immer das Gegenlaufräsen zur Bearbeitung angewendet werden sollte.

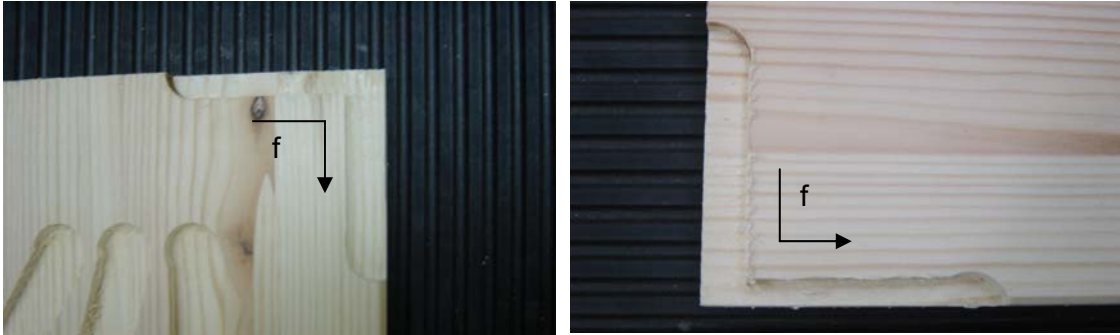


Abbildung 48: Vergleich Gegenlauf- und Gleichlaufräsen

Diskussion der Vergleichbarkeit der einzelnen Messreihen

Die einzelnen Messreihen sind nur bedingt miteinander vergleichbar, da der Verschleiß nachweislich auch bei der relativ kurzen Standzeit eine Rolle spielt. Vor Beginn der eigentlichen Versuche wurden zwei Versuche mit Kieferleimholz durchgeführt. Im Rahmen der regulären Versuche bildeten die Versuche auf Kieferleimholz die 5. Versuchsreihe. Der Fräser wies eine Standzeit von ca. 600 s auf. Sowohl bei einem Vergleich der erzielten Werkstückqualität, als auch bei einem Vergleich der Kraftkurven zeigen sich die Auswirkungen des Schneidenverschleißes. So wird die fertigungsbedingte Rauheit der Werkstückflächen größer, die Kantenschartigkeit nimmt zu und es kommt zu einer höheren Leistungsaufnahme des Werkzeuges durch die zunehmenden Kräfte beim Spanabhub.

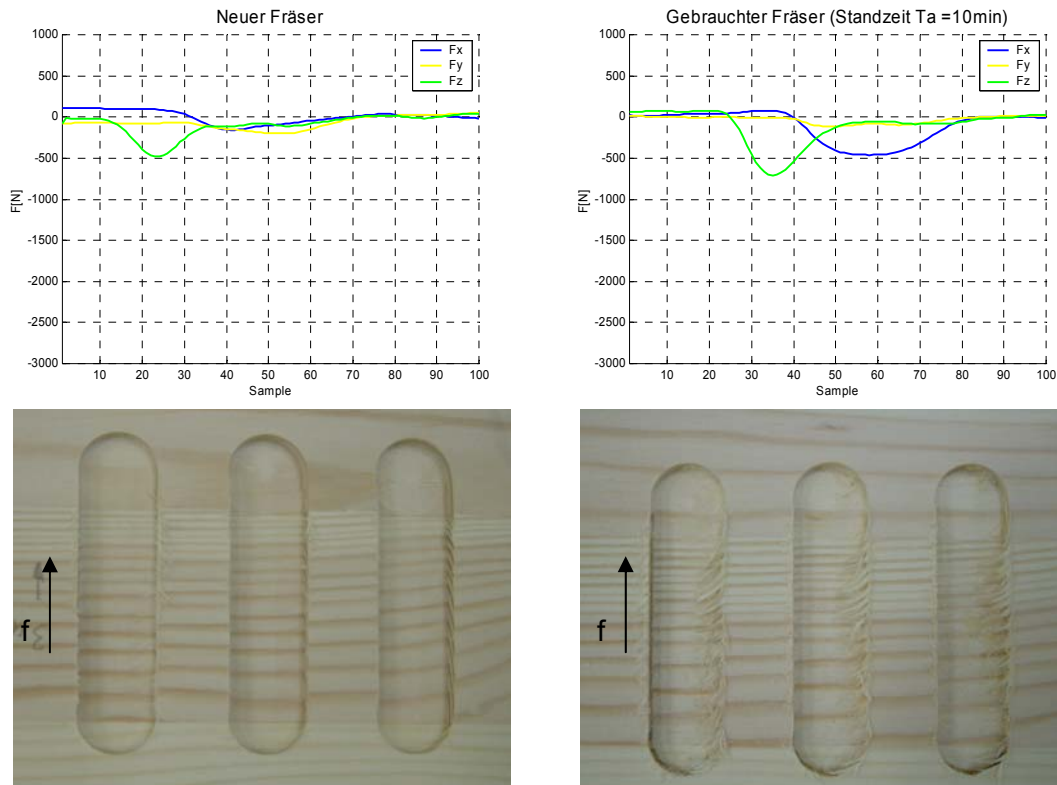


Abbildung 49: Auswirkungen des Schneidverschleißes

Der Fräser wurde lediglich innerhalb der Versuchsreihe benutzt. Da er nach der 3. Versuchsreihe kontrolliert wurde und für in Ordnung befunden wurde, muss m.E. von einem unverhältnismäßig hohen Verschleiß in den letzten Versuchsreihen ausgegangen werden. Da die Schneiden zwischen den Versuchen gereinigt wurden, kommen Aufbauschneiden nicht als Ursache in Frage. Ein Grund kann die unzureichende Späneabfuhr während der Versuche sein. Die umherfliegenden Partikel verursachen zusätzlichen abrasiven Verschleiß und können evtl. auch Ausbrüche an den Werkzeugschneiden bewirken [Ma00]. Auch aus Gründen der Arbeitssicherheit und zur Vermeidung von gesundheitlichen Schäden sollte die Späneabfuhr verbessert werden. Denkbar ist, das Fräswerkzeug auf Fräserhöhe mit einem Vorhang aus PVC-Lamellen oder Bürstenelementen flexibel zum Werkstück hin abzudichten. Dies wäre die einfachste Lösung, welche problemlos bewerkstelligt werden könnte.

6.4.4 Fazit

- ♦ Durch eine Zustelltiefe $a_e \approx 2\text{ mm}$ werden die besten Ergebnisse bzgl. der Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und Kantenqualität erreicht
- ♦ Beim Eintauchen entstehen Vorschubkräfte bis zu 2500 N in z-Richtung

- ♦ Durch die geringe Steifigkeit des Systems kommt es zu Maßabweichungen bis zu 1 mm am Eintauchpunkt sowie am Endpunkt des Fräsvorganges
- ♦ Die Faserrichtung hat großen Einfluss auf die Oberflächenqualität und Kantenqualität
- ♦ Die Vorschubgeschwindigkeit hat geringen bzw. keinen Einfluss auf die resultierende Vorschubkraft und Vorschubnormalkraft
- ♦ Die Bearbeitungsqualität nimmt mit zunehmender Standzeit ($t \approx 10$ min) stark ab
- ♦ Die Staub- und Späneabfuhr sind verbesserungswürdig

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Fräswerkzeug für die Holzbearbeitung entwickelt. Dieses wird von einem Roboter geführt und soll, im Sinne des plug-and-play-Gedankens, schnell und flexibel gegen andere Werkzeuge ausgetauscht werden können. Dadurch soll ein Beitrag zur automatisierten Fertigung von Holzbauteilen in kleinen Losgrößen geleistet werden.

Das Werkzeug wurde in eine schon vorhandene Roboterzelle integriert. So musste auch ein entsprechender Werkzeugbahnhof entwickelt werden. Wichtig beim spanenden Bearbeiten von Holz ist zudem die Späneabfuhr. Auch diese wurde im Vorfeld der Arbeit näher beschrieben und diskutiert. Die mechanische Verbindung zum Roboter wurde über ein vorhandenes Werkzeugwechselsystem hergestellt. Um eine Maßhaltigkeit beim Fräsen erreichen zu können, muss die Ausrichtung des Werkstücks beim Bearbeiten bekannt sein. So ist auch eine Vorrichtung zur Werkstückpositionierung entwickelt worden. Dabei handelt es sich um eine schiefe Ebene, auf der das Werkstück abgelegt wird und durch die Schwerkraft mittels eines Winkels ausgerichtet wird.

Da Holz ein äußerst komplexer Werkstoff ist, wurden im Vorfeld der Arbeit die Besonderheiten des Werkstoffes vorgestellt. Anschließend wurde ein Überblick zu den wesentlichen Aspekten des Fräsens gegeben. Dabei wurde auf die Zusammenhänge zwischen den beim Fräsen relevanten Einstellgrößen und den resultierenden Prozessgrößen eingegangen. Um eine fachgerechte Bewertung der bei den Versuchen erzielten Fräsergebnisse zu gewährleisten, wurde auch auf die wesentlichen Qualitätsmerkmale bei der Holzbearbeitung eingegangen.

Nach der Konzeption des Fräswerkzeugs wurden mit zwei verschiedenen Konzepten von Werkzeugaufnahmen Vorversuche durchgeführt. Anhand der Ergebnisse der Vorversuche sollte eine Entscheidung zu Gunsten eines Konzeptes gefällt werden. Zudem wurden am Fräswerkzeug nach den Vorversuchen nochmals Optimierungen vorgenommen.

Auch der Einfluss diverser Einstellgrößen auf die Bearbeitungsqualität sollte im Rahmen der Vorversuche geklärt werden. Dadurch sollten geeignete Einstellgrößen für

die am Ende stehenden Versuche mit dem Fräswerkzeug ermittelt werden. Dabei konnte auch die Kabelführung für die Stromversorgung des Fräswerkzeugs und die Schlauchführung der Absaugeinrichtung getestet werden.

Nach Aufbau des kompletten Fräswerkzeugs wurden Versuchsreihen mit verschiedenen Holzwerkstoffen durchgeführt. Mit einem Kraft-Moment-Sensor wurden dabei die resultierenden Kräfte aufgenommen. Die Bewertung der erzielten Fräsergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität erfolgte aufgrund der verbesserungswürdigen Resultate nach subjektiven Maßstäben. Kriterien bei der Bewertung waren die Oberflächenqualität, Kantenqualität und die Maßhaltigkeit.

Das Fräswerkzeug erwies sich als funktionsfähig, jedoch traten beim Fräsen unerwartet hohe Kräfte auf. So kam es durch die geringe Steifigkeit des gesamten Systems zu Gestaltabweichungen an den Werkstücken. Bei einem weiteren Einsatz sollte deshalb ein für höhere Traglasten (30-60kg) konzipierter Roboter verwendet werden. Der bei den Versuchen verwendete Roboter wurde bei den Versuchen durch das Eigengewicht des Fräswerkzeugs sowie die resultierenden Kräfte und Momente am Schneidkeil weit über das zulässige Handhabungsgewicht hinaus belastet.

Bei der Staubabsaugung sind zumindest Nachbesserungen notwendig. Die Erfassung der Späne etc. direkt am Werkzeug funktionierte nur eingeschränkt. Verbesserungen lassen sich evtl. durch das Anbringen von PVC-Lamellen o.ä. am Fräswerkzeug erzielen. Um den Fräsprozess besser beobachten zu können, wurde im Rahmen der Versuche auf die Anbringung von PVC-Lamellen verzichtet.

Da die zum Werkstückhandling vorgesehene Saugspinne zum Zeitpunkt der Versuche nicht einsetzbar war, konnte die Positioniervorrichtung nicht getestet werden. Weil die Werkstücke nach der Positionierung auf der Positioniervorrichtung nochmals transportiert werden, muss untersucht werden, ob eine exakte Ausrichtung dennoch gewährleistet werden kann.

Als nächstes ist die Integration des Kraft-Moment-Sensors in die Werkzeugsteuerung durchzuführen.

Ursprünglich war geplant, durch den Kraft-Moment-Sensor eine aktive Kraftregelung der Vorschubgeschwindigkeit zu integrieren. Da eine Beziehung zwischen der Vorschubgeschwindigkeit und den am Schneidkeil auftretenden Kräften messtechnisch nicht festgestellt werden kann, ist dies nicht möglich. Wichtig ist jedoch die Möglichkeit der Überlasterkennung beim Fräsvorgang durch den Kraft-Moment-Sensor. Aufgrund

der hohen Kräfte in z-Richtung beim Eintauchen des Fräsers ist es auch denkbar, die Zustelltiefe durch den Kraft-Moment-Sensor zu regeln. Bei Erreichen einer bestimmten Kraft in z-Richtung wird der Eintauchvorgang beendet. Mehrfache Bearbeitungsschritte durch schrittweises Zustellen sind so evtl. vermeidbar. Auf diese Art ist ein idealer Kompromiss zwischen Bearbeitungsqualität und Ausbringung erzielbar.

Die Holzbearbeitungszelle ist nach Fertigstellung sämtlicher vorgesehener Werkzeuge etc. so zu programmieren, dass sie ihre plug-and-play-Fähigkeit anhand eines kompletten Bearbeitungs- und Montagevorgangs demonstrieren kann.

8 ANHANG

In der Arbeit werden die Versuchsergebnisse nur exemplarisch beschrieben und dargestellt. Für ein weiteres Studium der Resultate sind alle aus den Versuchsreihen hervorgegangenen Diagramme und Bilder auf einer beigefügten CD-Rom zusammengestellt.

QUELLENVERZEICHNIS

- [Bec93] Becker, Ralf: Untersuchungen zum Kraftübertragungsverhalten von Vakuumgreifern. Dissertation, Universität Dortmund, 1993.
- [BG199] N.N.: Fräswerkzeuge für die Holzbearbeitung: Handhabung und sicheres Arbeiten. Holz-Berufsgenossenschaft, München, 5/99.
- [Ble04] Blecken, Jörn: Optimierung der Staub- und Späneerfassung in stationären Holzbearbeitungsmaschinen. Dissertation, TU Braunschweig, 2004.
- [BS190] Boley, D.; Stolz, A.: Werkzeugwechselsysteme. In: Warnecke, H.-J. und Schraft, R. D. (Hrsg.): Industrieroboter: Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 1990.
- [DIN1] DIN 4770 Begriffe für die Gestalt von Oberflächen. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [Fe06] Internetseite der Firma Festo:
http://www.festool.de/mediadoweb/index.cfm?ID_O_TREE_GROUP=2585&ID_O_PRODUCT=150&BLATT=5&PARENT=2578&BEGIN=1&DETAIL_ANSICHT=&#anker.15.06.2006
- [FhG06] N.N.: Fraunhofer IPA Workshop am 21.06.2006: Bearbeiten mit Industrierobotern.
- [Fus95] Fuß, M.: Fräsen von Holz und Holzwerkstoffen - Verbesserung von Zerspanleistung und Wirtschaftlichkeit. Dissertation TU Braunschweig, Vulkan-Verlag, Essen, 1995.
- [Ga06.1] Gaschnitz, T.. In:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gegenlaufr%C3%A4sen.jpg>. 19.06.06
- [Ga06.2] Gaschnitz, T. In:
<http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:Gleichlaufr%C3%A4sen.jpg>. 19.06.06

-
- [He96] Heisel, U.: Leistungssteigerung der CNC-Oberfräsentechnik zur Bearbeitung von Holz- und Holzwerkstoffen. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; AiF Ne. 9173. Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart, 1996.
- [HTr03] Heisel, U.; Tröger, J.; Martynenko, S.: CNC-Stationärbearbeitungszentren, 2003; In: HOB - Die Holzbearbeitung 50 (2003) 10, S. 18 – 33
- [HFr01] Heisel, U.; Fronius, J.: CNC-Oberfräsen in der Übersicht, 2001; In: HOB - Die Holzbearbeitung 54 (2001) 10, S. 56-73 UB:
- [HKr95] Heisel, U.; Krondorfer, H.: Meßtechnik für Massivholzoberflächen. HOB - Die Holzbearbeitung, 5/95.
- [HDi95] Heisel, U.; Dietz, U.; Tröger, J.: Am Schneidkeil wirkende Kräfte. In: HK Holz- und Kunststoffverarbeitung 30 (1995), Nr. 5, S. 604-613
HK Holz- und Kunststoffverarbeitung 30 (1995), Nr. 6, S. 884-888
HK Holz- und Kunststoffverarbeitung 30 (1995), Nr. 7, S. 1000-1004
- [He04] Heisel, U.: Werkzeugmaschinen und Produktionssysteme. Skript zur gleichnamigen Vorlesung am Lehrstuhl und Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart
- [Hen06] Henke, K., Internetseite des Institutes für Werkzeugmaschinen der Universität Hannover: Holzbearbeitung:
www.feel-ing.org/Dateien/Gruppe-5-Holzbearbeitung.pdf, 16.05.2006.
- [HSc00] Hesselbach, J.; Schnettker, T. A.: Maschinensysteme für die Holzbearbeitung von morgen. In: Innovationen für die Holzbearbeitung von morgen. 11. Braunschweiger Holztechnisches Kolloquium, 10.-12.10.2000. Essen, Vulkan Verlag, 2000.
- [Ki06] Internetseite der Firma Kistler: http://www.kistler.com/do.content.de.de?content=4111_Application&reset=true, 31.05.2006

-
- [Kno84] Knospe, L.: Werkstandard WHIS 237: Oberflächenvergütete Werkstoffe aus Faser und Spanplatten; Bestimmung von Kantenschäden. Forschungsinstitut für Holztechnologie, Dresden, 1984.
- [Ku06] Internetseite der Firma Kuka:
http://www.kuka.com/webspecial/galerie_dyn.aspx?cat=1&mode=detail&page=1&pic=1, 22.05.06.
- [Ma00] Maier, Gerhard: Holz-Spanungslehre. Würzburg, Vogel-Verlag, 2000.
- [Me06] Internetseite der Firma Metabo:
http://www.metabo.de/metabo/handgefuehrte/de/de/produkte/oberfraesen/fraesundschleifmotoren/710wattelektronikfraesundschleifmotorfme737_6_00737_00.html, 29.06.06
- [Mü05] Mütherich, Hendrik: Konzeption und Entwicklung von robotergeführten Werkzeugsystemen zur Fertigung von Holzbauteilen in kleinen Losgrößen. Diplomarbeit Universität Dortmund, 2005.
- [SME05] N.N.: SMErobot: Eine neue Robotergeneration für den Mittelstand. Pressemitteilung zum Projekt SMErobot, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung, 2005.
- [TRG99] N.N.: Technische Regel für Gefahrenstoffe (TRGS) 553, Holzstaub, Ausgabe März 1999, BArbBl. 1999-03, S. 52, zuletzt geändert BArBl. 2002-03, S. 70.
- [Re06] Internetseite der Firma Reichenbacher Hamuel GmbH:
http://www.reichenbacher.com/stdscripts/dp_downloading.asp?datei=226.pdf, 22.05.2006.
- [Wal04] Walz, Jürgen: Analyse und Verbesserung des dynamischen Betriebsverhaltens von Oberfräsmaschinen beim Fräsen von Holz und Holzwerkstoffen. Dissertation Universität Stuttgart, 2004.
- [WSc95.1] Westkämper, E.; Schadoffsky, O.: Massivholzflächen erfassen und bewerten. In: HOB-Die Holzbearbeitung, 9/95
- [WSc95.2] Westkämper, E.; Schadoffsky, O.: Oberflächentopographie von Massivholz: In: HOB-Die Holzbearbeitung, 3/95; 4/95

ABSCHLUSSERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich, dass die vorgelegte Arbeit von mir und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt worden ist, insbesondere, dass ich alle Abbildungen bzw. alle Stellen, die wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen sind, kenntlich gemacht habe.

ACKNOWLEDGMENT

This work has been funded by the European Commission's Sixth Framework Programme under grant no. 011838 as part of the Integrated Project SMErobot.