



17 031 01

FKZ (Förderkennzeichen)

Name der Forschungsstelle(n)

Schlussbericht

für den Zeitraum: 01.10.2001 bis 30.06.2003

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWi über die



geförderten Forschungsvorhaben

Forschungsthema:

Zerspanungsprozesse für neue Holzwerkstoffe

Rosenheim, 26.06.2003

Ort, Datum

Unterschrift des Projektleiters
Prof. Dr.-Ing. G. Lachenmayr

Anlage 5:

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart Schlussbericht	
3a. Titel des Berichts Zerspanungsprozesse für neue Holzwerkstoffe		
3b. Titel der Publikation		
4a. Autoren des Berichts (Name, Vorname(n)) Klaus Hofmann, Martin Grabenmeier, Georg Lachenmayr		5. Abschlußdatum des Vorhabens 30.6.2003
4b. Autoren der Publikation (Name, Vorname(n))		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fachhochschule Rosenheim Hochschulstrasse 1 83024 Rosenheim		9. Ber.Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen *) 17 031 01
		11a. Seitenzahl Bericht
		11b. Seitenzahl Publikation
13. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		12. Literaturangaben
		14. Tabellen
		15. Abbildungen
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Bei den Schneidwerkstoffen stellen heute die PKD-bestückten Werkzeuge den Stand der Technik dar. Neben gegenüber HM wesentlich höheren Standzeiten ermöglichen sie prinzipiell auch höhere Schnittgeschwindigkeiten (HSC). Gerade für den oberen Bereich sind zur Zeit kaum vernünftige Zerspanungsparameter verfügbar. Das gilt insbesondere für die neuen Holzwerkstoffe, wie Spanplatte, MDF, OSB, LVL, PSL usw. Geplant war eine systematische Messung der Schnittkraft mit Variation der Zerspanungsparameter (Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit, Winkel am Werkzeug, Frästiefe) und Auswertung als Schnittkraftparameter $k_{c0,5}$ für die oben genannten Holzwerkstoffe. Dabei Beschränkung auf drei PKD-Werkzeuge (zylindrischer Schafffräser mit drei Schneiden). Schnittkraftwerte für MDF, Spanplatte (FPY), Kerto-Q, BFU (längs und quer) und OSB, sowie einige Vergleichswerte für naturbelassene Hölzer (FI, BU und EI). Aufgrund technischer Probleme mit der Leistungsmessung der Spindel einerseits, der Dynamik der Piezo-Kraftaufnehmer andererseits war es nicht möglich, den Mittelwert der Schnittkraft genau zu bestimmen; daher ist die Qualität der Ergebnisse nicht ganz befriedigend. Dennoch liegen die für FPY und MDF ermittelten Werte in der Größenordnung, die aus früheren Versuchen (bei niedriger Schnittgeschwindigkeit) und der Literatur bekannt sind. Daher kann man erwarten, dass die anderen Werte auch brauchbar sind.		
19. Schlagwörter High Speed Cutting (HSC), Holzwerkstoffe, Schnittkraft, Schnittleistung, Schnittkraftmessung, <u>Schnittkraftkonstante</u>		
20. Verlag		21. Preis

*) Auf das Förderkennzeichen des BMBF soll auch in der Veröffentlichung hingewiesen werden.

Kurzfassung

Gegenstand des hier vorgestellten Forschungsvorhabens sind Schnittkraftmessungen auf einem Bearbeitungszentrum im Hochgeschwindigkeitsbereich zur Ermittlung von Schnittkraftkennwerten diverser Holzwerkstoffe. Nach den Beschreibungen der Literatur zu diesem Thema, die eine Basis sowohl für die Berechnungen als auch für die Versuchsaufbauten darstellt, wird auf die Wirkungsweisen sämtlicher verwendeter Komponenten der Versuchsaufbauten eingegangen und die dabei vorherrschenden Versuchsbedingungen aufgeführt. Abschließend werden die aufgenommenen Daten mit Hilfe spezieller Computersoftware analysiert und bewertet.

Die Auswertung setzt auf Berechnungsverfahren früherer Arbeiten auf, um die Vergleichbarkeit mit bereits vorhandenen Auswertungsergebnissen zu wahren. Im Hinblick auf Vergleichsversuche werden die Vorgänge und Arbeitsschritte detailliert beschrieben, sofern dies nicht in vorangegangenen Arbeiten geschehen ist. Für die Versuchsdurchführung wurden mehrere Holzwerkstoffe ausgewählt, die aufgrund ihres Marktanteils von wirtschaftlicher Bedeutung sind.

Schlagworte

- High Speed Cutting
- Neuartige Holzwerkstoffe
- Versuchsdurchführung
- Schnittkräfte und -leistung
- Schnittkraftkonstanten

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	II
Schlagworte	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
Verwendete Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Grundlegendes zur HSC-Zerspanung	1
1.2 Das AiF-Projekt	2
2 Die Aufgabenstellung	3
3 Stand der Technik	4
3.1 Gleich- und Gegenlauf	4
3.2 Die Schnittgeschwindigkeit v_c	4
3.3 Der Zahnvorschub f_z und die Messerschlagtiefe r_w	5
3.4 Unterschiedliche Spandicken	6
3.5 Der ziehende Schnitt	8
3.6 Zerspankraft F und ihre Komponenten	9
3.7 Die Schnittkraft F_c	11
3.8 Die Schnittleistung P_c	14
4 Die Versuchsdurchführung	15
4.1 Der Versuchsaufbau	15
4.1.1 Homag BOF 41 - Die Versuchsmaschine	15
4.1.2 Die Werkzeuge	17
4.1.3 Die Stahlplatte	19
4.1.4 Die Kistler-Messplattform	20
4.1.5 Der Ladungsverstärker	22
4.1.6 Das Messdatenerfassungssystem DAStar	24
4.1.7 Der Beschleunigungsaufnehmer	26
4.1.8 Der Lichtreflexsensor	27
4.1.9 Der Einsatz des Computers	28

4.2	Die eingesetzten Holzwerkstoffe	29
4.3	Die Versuchsdurchführung	31
4.3.1	Versuchsparameter	31
4.3.2	Versuchsvorbereitungen	31
4.3.3	Versuchsablauf	32
5	Die Auswertung	34
5.1	Werkzeuge der Auswertung	34
5.2	Problematik der Auswertung	35
5.3	Angewandte Auswertungsmethode	36
5.4	Lösungsansätze	41
6	Die Ergebnisse	47
7	Fazit und Ausblick	51
	Anhang	IX
	Literatur	XIX

Abbildungsverzeichnis

1	Gleichlauf GL	4
2	Gegenlauf GG	4
3	Schnittgeschwindigkeit v_c	5
4	Zykloide des Gleichlaufes [2]	6
5	Spandicke h_{max} [19]	7
6	Spandicke h_m nach dem Prinzip von Cavalieri [2]	8
7	Prinzip des ziehenden Schnittes	9
8	Aktivkraft F_a und Passivkraft F_p	10
9	Zerlegung der Zerspankraft F nach Heisel	11
10	k_{c1} und k_{c0} in Abhängigkeit von h_m [2]	12
11	Fräsintegral	13
12	Experimentelle Ermittlung der Schnittleistung P_c [1]	14
13	Schematischer Versuchsaufbau	15
14	Versuchsmaschine <i>Homag</i> BOF 41 K	16
15	Versuchsmaschine <i>IMA</i> Quadroflex	17
16	Schema des Aufsetzens	17
17	Aufsetzen der Stahlplatte	17
18	Stahlplatte	19
19	<i>Kistler</i> Messplattform 9257A[15]	20
20	Querschnitt <i>Kistler</i> Messplattform [15]	21
21	Frequenzgang Ladungsverstärker	22
22	Kabelmontage Ladungsverstärker	23
23	Einstellungen Ladungsverstärker	24
24	Anschlüsse an DAStarNet	25
25	<i>PCB</i> Beschleunigungssensor	26
26	Lichtreflexsensor	27
27	Überblick über die eingesetzten HWS	29
28	Zeichnung der Werkstückdimensionen	30
29	Übersicht der Versuchsparameter	31
30	Versuchsablauf	33
31	Fräsvorgang am Beispiel MDF	33
32	Datenbankstruktur	35
33	Darstellung der Leistungsmessung	36
34	Definition von F_x und F_y (Draufsicht)	37
35	Ausblendsignale, Sinus- und Cosinusfolgen für WZ 2	39
36	Ausschnitt für F_c festlegen	40
37	Muster für Auswertblatt	41
38	Lösungsvergleich	42

39	Schwingungsverhalten der <i>Kistler</i> -Plattform [15]	43
40	Vergleiche der Amplitudenspektren, n=18000, z=3, Filter=1500Hz	44
41	Vergleiche der Amplitudenspektren, n=26000, z=3, Filter=1600Hz	44
42	Vergleiche der Amplitudenspektren, n=34000, z=3, Filter=2000Hz	45
43	Diagramm zum Vergleich von F_{cmax} mit F_c	47
44	Diagramm von F_c über v_f mit unterschiedlichen Eingriffstiefen . .	48
45	Diagramm zum Vergleich von F_c bei unterschiedlichen WS	49
46	Datenblatt <i>Homag</i> BAZ [14]	IX
47	Datenblatt <i>IMA</i> BAZ [9]	X

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht der Werkzeugdaten	18
2	Übersicht der HWS-Daten	29
3	Ergebnisse der Eichungen	32
4	Einstellungen in Summit	32
5	Verrechnungsfaktor für F_c aus dem Zwischenbericht	49
6	neue Faktoren zum Vergleich von F_c bei unterschiedlichen WS	50
7	Verrechnungsfaktor für F_c aus dem Zwischenbericht	50
8	Technische Daten <i>Kistler</i> Messplattform [15]	XI
9	Technische Daten <i>Kistler</i> Ladungsverstärker [16]	XI
10	Technische Daten DASTarNet Accelerometer [7]	XII
11	Technische Daten DASTarNet GeneralPort AC/DC Steckkarte [7]	XIII
12	Technische Daten <i>Takex</i> Lichtreflexsensor [26]	XIV
13	Technische Daten <i>PCB</i> Beschleunigungsaufnehmer [21]	XV
14	Ergebnisse Teil 1	XVI
15	Ergebnisse Teil 2	XVII
16	Ergebnisse Teil 3	XVIII

Abkürzungsverzeichnis

AiF	Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. zur Förderung von kleinen und mittleren Betrieben
BAZ	Bearbeitungszentrum
BFU-L	Baufurniersperrholz (längs der Faser)
BFU-Q	Baufurniersperrholz (quer der Faser)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
bzw.	beziehungsweise
DANTE	Deutsche Anwendergemeinschaft für T _E X/L ^A T _E X e.V.
d.h.	das heißt
etc.	etcetera
FPY	Flachpreßplatte (Spanplatte)
ggf.	gegebenenfalls
GB	Gigabyte
GG	Gegenlauf
GL	Gleichlauf
HCS	High Speed Cutting
HWS	Holzwerkstoffe
i.d.R.	in der Regel
inkl.	inklusive
k.A.	keine Angabe
Kerto-Q	Furnierschichtholz (überwiegend Längsausrichtung der Schichten)
MB	Megabyte
MDF	medium density fibreboard
MHz	Megahertz
o.J.	ohne Jahresangabe
o.V.	ohne Verfasserangabe
OSB	Oriented Strand Board
RAM	random access memory
S.	Seite
sog.	sogenannte
usw.	unter anderem
u.a.	unter anderem
ÜVA	Übungs- und Versuchsanstalt
vgl.	vergleiche
WS	Werkstück
WZ	Werkzeug

Verwendete Formelzeichen

Physikalische Größe	Symbol	Maßeinheit
1. Basiseinheiten		
Masse	m	kg
Weg	r	m
Zeit	t	s
2. Messtechnische Größen		
Spannung	U	V
Ladung	Q	C
Widerstand	R	Ω
Kapazität	C	F
Messeinheiten	–	MU
3. Kinematische Größen		
Schnittgeschwindigkeit	v_c	m/s
effektive Schnittgeschwindigkeit	v_{eff}	m/s
Vorschubgeschwindigkeit	v_f	m/min
Winkelgeschwindigkeit	ω	rad/s
Drehzahl	n	min ⁻¹
Beschleunigung	a	m/s ²
Winkelbeschleunigung	α	rad/s ²
4. Spangrößen		
Flugkreisdurchmesser	d	mm
Flugkreisradius	r	mm
Zahnvorschub	f_z	mm
Messerschlagtiefe	r_w	mm
Schneidenzahl	z	–
maximale Spandicke	h_{max}	mm
mittlere Spandicke	h_m	mm
minimale Spandicke	h_{min}	mm
Spanbogenlänge	l_e	mm
Eingriffstiefe	a_e	mm
Eingriffswinkel	φ_e	°
Spanbreite	b	mm
Achswinkel	λ	°
Spanwinkel	α	°
Keilwinkel	β	°
Freiwinkel	γ	°

Fortsetzung Übersicht		
5. Zeiten und Frequenzen		
Messdauer	T	s
Eingriffszeit (Schneide)	t_e	s
Eingriffsfolgezeit	t_f	s
Messfrequenz = Abtastrate	f	Hz
Störfrequenzen (maximal)	f_{max}	Hz
Eigenfrequenz (in x-Richtung)	$f_{ex} = f_{0(x)}$	Hz
Eigenfrequenz (in y-Richtung)	$f_{ey} = f_{0(y)}$	Hz
Resonanzfrequenz	f_R	Hz
6. Kräfte, Momente und Leistungen		
Kraft	F	N
Zerspankraft	F	N
Aktivkraft	F_a	N
Passivkraft	F_p	N
Schnittnormalkraft	F_{cn}	N
Schnittkraft	F_c	N
maximale Schnittkraft	F_{max}	N
mittlere Schnittkraft (bei Zahneingriff)	F_{cm}	N
mittlere Schnittkraft (permanent)	F_{cD}	N
Haltekraft (x-Richtung)	F_x	N
Haltekraft (y-Richtung)	F_y	N
Haltekraft (z-Richtung)	F_z	N
Umfangskraft	F_u	N
Moment	M	Nm
el. Leistung	P_{el}	W
Schnittleistung	P_c	W
Leistung bei Last	P_{Last}	W
Leerlaufleistung	P_{Leer}	W
7. Konstanten		
Proportionalitätskonstante (x-Richtung)	k_x	N/V
Proportionalitätskonstante (y-Richtung)	k_y	N/V
Proportionalitätskonstante (z-Richtung)	k_z	N/V
Schnittkraftkonstante	$k_{c0,5}$	N/mm ^{1,5}
8. Sonstiges		
Schnittkraftbeiwert	k_{c0}	N/mm
Schnittkraftbeiwert	k_{c1}	N/mm ²
Holz(ausgleichs)feuchte	u_{gl}	%

1 Einleitung

Das traditionsreiche Prinzip des Spanens ist in der Holztechnik eine der wichtigsten Bearbeitungsverfahren. Durch permanente Weiterentwicklung ist dieses Verfahren nach wie vor zeitgemäß, wobei speziell im Bereich des Fräsens auf Bearbeitungszentren die HSC-Technologie den Stand der Technik darstellt. Die drei Buchstaben stehen für **H**igh **S**peed **C**utting und können mit Hochgeschwindigkeitsfräsen ins Deutsche übersetzt werden. Im Allgemeinen gilt dieser Begriff in der Holztechnik, sofern mit weit höheren Spindeldrehzahlen als 18.000min^{-1} gearbeitet wird und kommt ursprünglich aus der Metallbearbeitung. Höhere Drehzahlen der Spindel ermöglichen, ja sogar fordern auch proportional höhere Vorschübe der Werkstücke, welche die Hauptbearbeitungszeiten um denselben Faktor kleiner werden lassen. Je größer der Anteil der Hauptzeit in Bezug auf die Stückzeiten ist, desto wirtschaftlicher ist der Einsatz dieser Technologie. Im Mittel sind rund 20% Stückzeiterparnis zu erwarten. In Zeiten des permanent größer werdenden Kostendrucks steckt also großes Potential, die Kosten holzbearbeitender Betriebe zu senken, sofern sich deren Produktionsprogramm dafür eignet (z.B große Bauteile mit langen Fräszyklen) [4].

Neben den wirtschaftlichen Vorteilen kommen aber auch spanungstechnische Aspekte hinzu, die für einen solchen Technologieeinsatz sprechen. Eine wichtige Größe zur Prozessbeurteilung ist die Schnittgeschwindigkeit, die relativ einfach zu ermitteln ist¹. Entsprechende Sollwerte dafür liegen im Bereich von 40 bis 70m/s. Tatsächlich hat ein Standardfräser mit 25mm Durchmesser bei einer Normaldrehzahl von 18.000min^{-1} nur eine Schnittgeschwindigkeit von 23,6m/s [6]. Das Ergebnis bleibt also weit unter dem geforderten Literaturwerten für eine optimale Zerspanung zurück. Drehzahlen von 40.000min^{-1} und mehr dürften folglich für Oberflächenqualität und Werkzeuglebensdauer von Vorteil sein [11].

1.1 Grundlegendes zur HSC-Zerspanung

Trotz des erreichten Technologiestandards darf die HSC-Zerspanung noch nicht als ausgereift betrachtet werden. Ursachen dafür sind die mangelnden Kenntnisse über den Zerspanungsprozess selbst und der Tatsache, dass viele Formeln, die in der Praxis Anwendung finden, empirisch sind [18]. Zudem machen die großen Streuungen in den Kennwerten Vorhersagen über optimale Zerspanungsparameter und den Maschinen- und Materialanforderungen sehr schwierig, die wiederum die Grundlage für Bauteilkonstruktionen sind. Die Probleme sind vielfältig und müssen Bauteil für

¹Definition vgl. Abschnitt 3.2 auf S. 4

Bauteil gelöst werden. Vor allem aber in hohen Drehzahlbereichen sowie für die Zerspanung neuartiger Holzwerkstoffe fehlen solche Bemessungsgrundlagen größtenteils komplett. Genaue Kennwerte könnten Rückschlüsse auf die Schnittkräfte ermöglichen, die eine Weiterentwicklung des vorhandenen Equipments erleichtern [11].

1.2 Das AiF-Projekt

In dem Forschungsvorhaben von AiF sollen nun genau diese zuvor genannten Kennwerte ermittelt werden. Es wird mit derartigen Forschungsvorhaben das Ziel verfolgt, Tabellenwerke über Zerspanungsbedingungen, wie sie für die Metallbearbeitung vorhanden sind, erstellen zu können. Der Einsatz in der Praxis könnte so aussehen, dass abhängig vom eingesetzten Werkstoff die optimalen Einstellungen wie Werkzeugauswahl, Drehzahl, Vorschub etc. vorgenommen werden. Dem ist zur Zeit noch nicht so und deshalb besteht auf diesem Gebiet gegenüber der Metallbearbeitung hoher Nachholbedarf.

Eine ganzheitliche Erfassung würde jedoch den Rahmen eines jeden Projektes sprengen, sodass eine sinnvolle Kombination der möglichen Zerspanungsparameter ausgewählt werden muss. Einige Variationen wie die Drehzahl und den Vorschub lassen sich fast beliebig und über die Maschinensteuerung sehr einfach realisieren. Andere jedoch – allen voran die Winkel an den Schneiden – sind sehr kostenintensiv, weil dafür ein anderes Werkzeug benötigt wird. Die Versuche sind in Abhängigkeit der folgenden Parameter durchgeführt worden:

- Holzwerkstoffarten
- Span-, Keil- und Freiwinkel (→ Werkzeuge)
- Drehzahl n
- Vorschub v_f
- Eingriffstiefe a_e

2 Die Aufgabenstellung

Wie bereits im Abschnitt 1.2 auf Seite 2 angedeutet, ermöglichte AiF die Durchführung dieses Projektes zur Schnittkraftmessung. Gemäß den Vorüberlegungen, nach welchen Kriterien dieses Thema untersucht werden sollte, war festzustellen, dass eine sinnvolle Bearbeitung auf frühere Publikationen aufbauen musste. Dabei verfolgten die Autoren verschiedene Lösungsansätze mit zum Teil unterschiedlichen Daten als Berechnungsgrundlage. Soweit für dieses Projekt von Bedeutung, werden diese Lösungsansätze ausführlicher beleuchtet.

Da höherwertige Komponenten des Messaufbaus hohe Anschaffungskosten verursachen, kamen auch hier Bauteile bzw. Messapparaturen der FH Rosenheim zum Einsatz. Als Beispiel sei hier die ausführliche Arbeit von Herrn Wußler [27] angeführt. Nach der Vorbereitung des Versuchsmaterials, galt es den Versuch aufzubauen und zu testen. Einige, vorwiegend kleinere Geräte, mussten beschafft und in den Aufbau integriert werden. Unterschiedliche Eichungen waren notwendig, bevor die Messreihen nach einem vorher festgelegten Ablaufschema erstellt wurden. Hauptkriterium dafür war ein möglichst reibungsloser und schneller Ablauf, da höhere Vorschübe zum Beispiel schneller zu realisieren sind als ein WZ-Wechsel.

Für die Auswertung der Daten wurde die Software *FlexPro 5.0* eingesetzt, die mit einigen Funktionen das Auswerten von Signalen erleichtert, jedoch nicht automatisiert. Von besonderem Interesse ist, wie sich Kräfte und Kennwerte tendenziell entwickeln, wenn beispielsweise der Vorschub erhöht wird. Abschließend sei erwähnt, dass sich weit mehr Einflussparameter auf die Ergebnisse auswirken können, als die, nach denen untersucht wurde. Für die Aufgabenabgrenzung bedeutet das, dass sie zwar aufgenommen wurden, jedoch nicht weiter verfolgt werden.

3 Stand der Technik

Die Untersuchungen zu den Schnittkraftversuchen beinhalten verschiedene Themengebiete der Technik. Um eine einheitliche Basis zu schaffen, soll zunächst auf die Grundlagen eingegangen werden. Der größte Teil wurde den Ausführungen von Ettelt [2], Maier [19] und Heisel [10, 12] entnommen, wobei sich die Erläuterungen auf die hier relevanten Aspekte beschränken.

3.1 Gleich- und Gegenlauf

Grundsätzlich werden 2 Betriebsarten bei der Zerspanung unterschieden: Fräsen im Gleichlauf und im Gegenlauf. Während sich das WZ dreht, führt entweder das WS oder das WZ eine gleichzeitige lineare Bewegung zueinander aus, die als Vorschub definiert ist. Welches der beiden diese Translationsbewegung ausführt spielt für die Zerspanung keine Rolle. Im Falle eines BAZ mit einem Ausleger zur Spindel- und Werkzeugführung und einer starren Tischauflage für das WS, werden beide Bewegungen vom WZ ausgeführt, so wie in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die schraffierte Fläche stellt den Span dar, der von der Schneide abgetrennt wird.

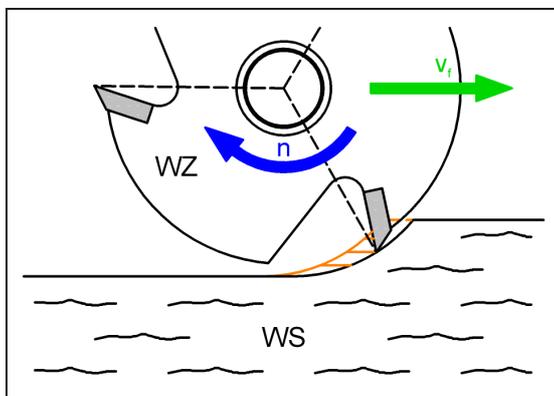


Abbildung 1: Gleichlauf GL

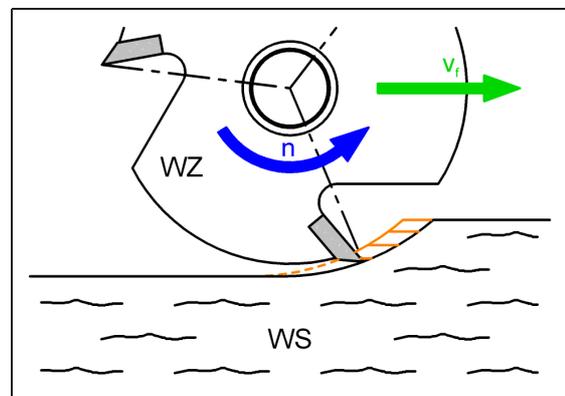


Abbildung 2: Gegenlauf GG

3.2 Die Schnittgeschwindigkeit v_c

In Abschnitt 3.1 wurde angedeutet, dass sich die Rotation des WZ's und der Vorschub überlagern. Die Abbildung 3 zeigt, dass sich folgerichtig die effektive Schnittgeschwindigkeit v_{eff} durch Vektoraddition aus den beiden Einzelgeschwindigkeiten ergibt. In der Praxis wird aber darauf verzichtet, weil sich nur eine Abweichung kleiner 1% ergäbe, die als vernachlässigbar angesehen wird. Diese Abbildung 3 ist

demnach nicht massstabsgetreu, sondern dient ausschließlich der Anschaulichkeit. Im Falle des Gleichlaufes gilt: $v_c > v_{eff}$.

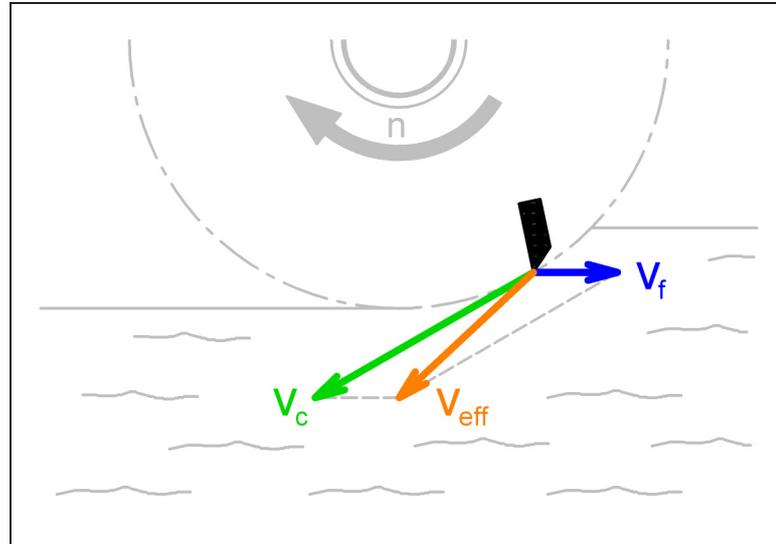


Abbildung 3: Schnittgeschwindigkeit v_c

Da $v_c \approx v_{eff}$ ist, ergibt sich für die Berechnung der Schnittgeschwindigkeit v_c folgende aus der Physik [17] abgeleitete Formel für die Rotation:

$$v_c = r \cdot \omega = d \cdot \pi \cdot n \quad (1)$$

Der Wertebereich für v_c für eine optimale Zerspanung kann zwischen 40 und 70m/s angesetzt werden [1, 6].

3.3 Der Zahnvorschub f_z und die Messerschlagtiefe r_w

Die Schneide bewegt sich während des Fräsvorganges auf einer Kreisbahn um die eigene Achse. Zusätzlich dazu wird das WZ geradlinig zum WS geführt. Der Flugkreis der Schneide bestimmt die Oberflächenkontur, indem sie Holz abhebt und erzeugt so die bekannten Messerschläge. Die Kontur des Messerschlages ist ein Teil einer Zykloide, was der mathematische Ausdruck für die abgefahrenen Bahnen ist. Die Abbildung 4 zeigt Zykloiden für ein im Gleichlauf betriebenes WZ und veranschaulicht die Definition des Zahnvorschubes: Der Zahnvorschub f_z wird als der Weg bezeichnet, den ein WZ während einer kompletten Umdrehung linear in Vorschubrichtung zurücklegt.

In einer mathematischen Formel ausgedrückt heißt das:

$$f_z = \frac{v_f}{n \cdot z} \quad (2)$$

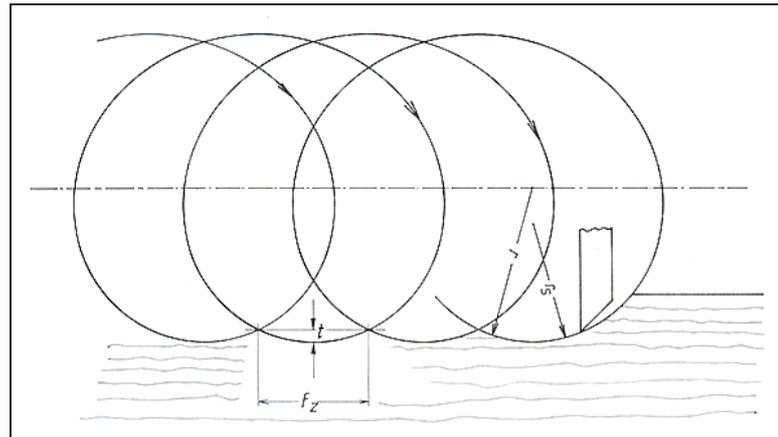


Abbildung 4: Zyklode des Gleichlaufes [2]

Der Zahnvorschub f_z ist also proportional zum Vorschub v_f und umgekehrt proportional zur Drehzahl n und der Schneidenanzahl z . Die noch nicht erwähnte Schneidenanzahl z mindert also den Zahnvorschub um den Wert von z , was einer Arbeitsteilung gleichkommt.

Ebenfalls der Abbildung 4 zu entnehmen ist die Messerschlagtiefe r_w , die hier das Kürzel t trägt. Berechnet wird die Messerschlagtiefe mit folgender Gleichung:

$$r_w = \frac{f_z^2}{4 \cdot d} \quad (3)$$

Beide Größen sind ein Maß für die Oberflächenqualität und die Schlußfolgerungen aus den Gleichungen 2 und 3 sind, dass ein größeres WZ mit einer höheren Drehzahl, sowie mehr Schneiden und ein kleinerer Vorschub eine bessere Qualität erwarten lassen. Für den hochwertigen Möbelbau sind die Anforderungen sehr hoch, d.h. Messerschläge dürfen weder sichtbar noch fühlbar sein. Für diese Anwendung sollen Messerschlagweiten kleiner 0,3mm (dann nicht mehr sichtbar) und Messerschlagtiefen kleiner 2,5 μ m (dann kaum noch fühlbar) angestrebt werden [5].

3.4 Unterschiedliche Spandicken

Die Kräfte bei Zerspanung korrelieren mit der Dicke des abzutragenden Materials. Bekanntes Merkmal beim Einsatz rotierender WZ ist der entstehende Kommaspan. Beim Gleichlauf tritt die Schneide schlagartig in das Holz ein und trennt so den aufgrund der Kinematik des Systems permanent dünner werdenden Span ab; beim Gegenlauf gilt entsprechend Umgekehrtes. Die Spandicke und die Schnittkräfte sind zeitlich nicht konstant, bedarf also einer genaueren Betrachtung. Es handelt sich um die Definitionen h_{max} , h_m und h_{min} . Erstere ist besonders für WZ-Hersteller

interessant, um ihre Produkte zu dimensionieren und zu optimieren, denn hier sind die größten Kräfte und Belastungen zu erwarten.

maximale Spandicke h_{max} ist die größte, in radialer Richtung vom WZ-Drehmittelpunkt aus gemessene Spandicke. Zu berechnen lässt sie sich mit Hilfe des Winkels φ_e und der entsprechenden Gegenwinkel unter Verwendung der Winkelfunktionen, wie in der Abbildung 5 dargestellt ist. h_{max} ist also sowohl von der Eingriffstiefe a_e , sowie von dem Zahnvorschub f_z aus der Gleichung 2 abhängig.

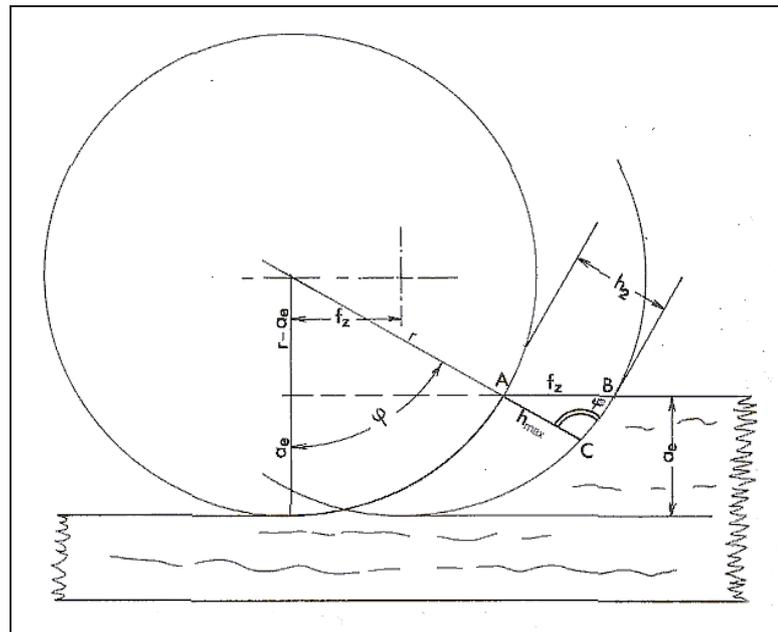


Abbildung 5: Spandicke h_{max} [19]

Die mathematische Beschreibung dafür lautet:

$$h_{max} = f_z \cdot \sin \varphi_e \quad (4)$$

$$\sin \varphi_e = \arccos \frac{r - a_e}{r} \quad (5)$$

mittlere Spandicke h_m kann auf unterschiedliche Arten berechnet werden. Hier sei aber nur die Gebräuchlichere erwähnt, in der der Grundgedanke besagt, dass jede einzelne horizontale Schicht eines Spanes die Breite des Zahnvorschubes f_z hat und demnach der Span gedanklich einem Rechteck gleichkommt. Diese Vereinfachung wird in der nachstehenden Abbildung 6 dargestellt.

Für die Berechnung kann nun für den Span $V_{Span} = h_m \cdot l_b \cdot b$ angesetzt werden, während für den Quader $V_{Quader} = f_z \cdot a_e \cdot b$ gilt. Da beide Volumina gleich

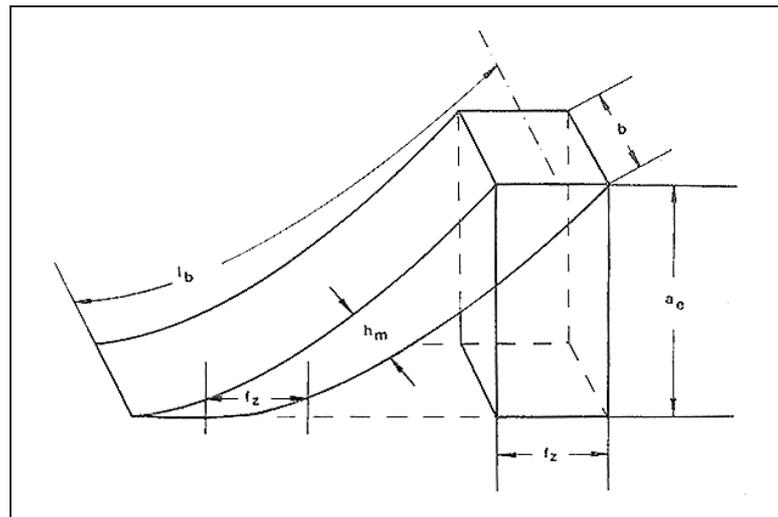


Abbildung 6: Spandicke h_m nach dem Prinzip von Cavalieri [2]

groß sein sollen, ist ein Gleichsetzen beider Volumenberechnungen erlaubt und ergibt aus $h_m \cdot l_b \cdot b = f_z \cdot a_e \cdot b$ [1] die verkürzte Form²:

$$h_m = \frac{f_z \cdot a_e}{r \cdot \varphi_e} \quad (6)$$

minimale Spandicke h_{min} ist am dünnsten Ende des Spanes gleich Null. Die hier stattfindenden Prozesse sind komplex, weil hier Holzzellen verdichtet bzw. gequetscht werden. Diese Vorgänge benötigen Energie, wie die für den Spanabhub selbst und müssen folglich ebenso von der Maschine aufgebracht werden. In den Messdaten sind beide enthalten.

3.5 Der ziehende Schnitt

Im normalen Fall der Zerspanung ist die Schneidenkante rechtwinklig zum Vektor \vec{v}_c ausgerichtet, wobei der beschreibende Achswinkel λ zwischen Schneide und WZ-Achse Null ist. Das Prinzip des ziehenden Schnittes beruht darauf von dieser Einstellung abzuweichen und den Winkel λ größer Null einzustellen, um den effektiven Keilwinkel zu verkleinern und die Schneide bei konstanter Festigkeit – der Schneidkeil selbst bleibt in seinen Dimensionen unverändert – schärfer wirken zu lassen. Abbildung 7 zeigt, dass mit steigendem λ der Keilwinkel β_x beim Punkt D kleiner wird, weil sich die Strecke \overline{DC} vergrößert und die Höhe \overline{BC} konstant bleibt.

²mit φ_e in rad

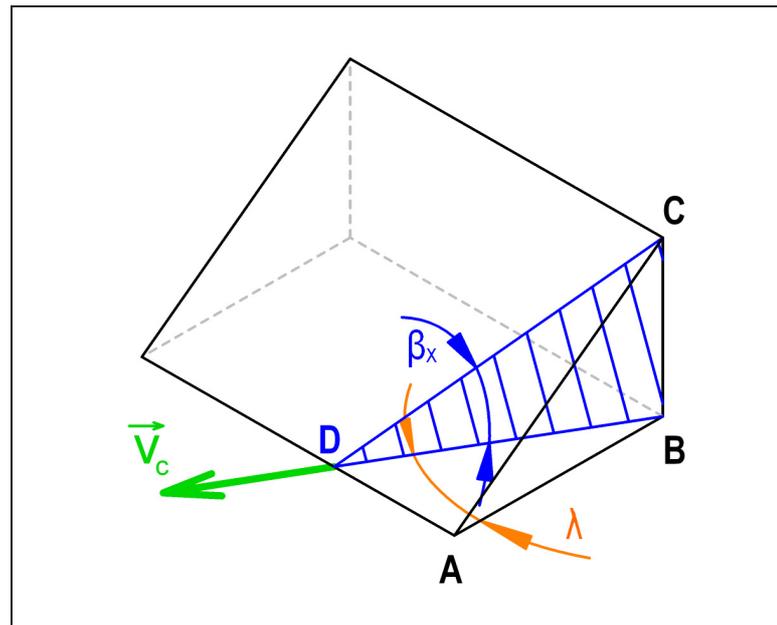


Abbildung 7: Prinzip des ziehenden Schnittes

Als direkte Folge der „schärferen Schneide“ ergibt sich eine kleiner werdende Schnittkraft F_c . Es muss aber erwähnt werden, dass sich dies nicht unbegrenzt fortsetzen lässt und die Schnittkraft bei $\lambda \approx 28^\circ$ sein Minimum erreicht [1].

3.6 Zerspankraft F und ihre Komponenten

Die Zerspankraft F ist in vielerlei Hinsicht für Maschinenhersteller und für Holzver- und -bearbeitende Betriebe von großer Bedeutung. Zum einen sind Maschinen und deren Komponenten wie WZ, Antriebe, Lager etc. nach den vorherrschenden Belastungen auszulegen und zum anderen verursacht die Zerspankraft Kosten für den Anwender aufgrund von Energieverbrauch und Verschleiß an Schneide oder anderen Bauteilen. Weiterhin beeinflusst sie die erzielbare Qualität des Endproduktes. Nicht zu vernachlässigen ist sie auch im Bereich der WS-Spannung zum Festhalten während des Fräsprozesses. Die häufig eingesetzte pneumatische Aufspannmethode stößt bei kleinen oder schmalen WS oft an ihre Grenzen, da die Haltekraft von der Ansaugfläche abhängt. Bei Überschreiten des kritischen Bereiches wird das WS verschoben oder ganz von der Halterung katapultiert.

Maximalkräfte und Mittelwertkräfte: Sämtliche Kräfte verändern sich in Richtung und Wert, treten aber periodisch auf, d.h. sie sind zeitlich nicht konstant. Maximale Kräfte dienen als Grundlage für die zuvor erwähnten Konstruktionen, da zuletzt genannte den Belastungen langfristig standhalten müssen. Für die Ermittlung

des Leistungsbedarfes einer Maschine bzw. eines Aggregates werden die mittleren Zerspankräfte herangezogen.

Komponenten der Schnittkraft F [19]: Zunächst sind Richtung und Wert der Zerspankraft unbestimmt, was eine direkte Messung erschwert. Einige Vorgänge, die sich neben dem eigentlichen Spanabhub abspielen, erhöhen die Zerspankraft F . Diese Vorgänge, wie die Spankrümmung, Spanablenkung, Reibung am Holz usw., müssen ebenso durch Aufwendung von Energie realisiert werden, auch wenn sie unerwünscht sind. Eine einzelne Erfassung ist aber nur schwer möglich, weshalb die gesamte Zerspankraft F mit ihren Komponenten richtungsabhängig zerlegt wird.

Unterscheidung Aktivkraft F_a und Passivkraft F_p [19]: Im Folgenden wird die Zerspankraft nur noch nach den Kriterien „aktiv“ und „passiv“ betrachtet. Aktiv bedeutet, dass diese Kraft am Energieverbrauch der Maschine beteiligt ist, weil sie zum einen senkrecht zur Drehachse steht und zum anderen einen Hebelarm hat. Das sind die Voraussetzungen, um ein Moment entgegen dem des Spindeltriebs zu erzeugen. Die Passivkraft dagegen ist parallel zur Drehachse und kann daher in Bezug auf Energieverbrauch prinzipiell als passiv betrachtet werden. Stattdessen wirkt sie auf die Lager ein bzw. müssen dort aufgenommen werden. Es muss demnach mit einer erhöhten Lagerreibung gerechnet werden, was den Energieeinsatz an der Maschine leicht erhöht.

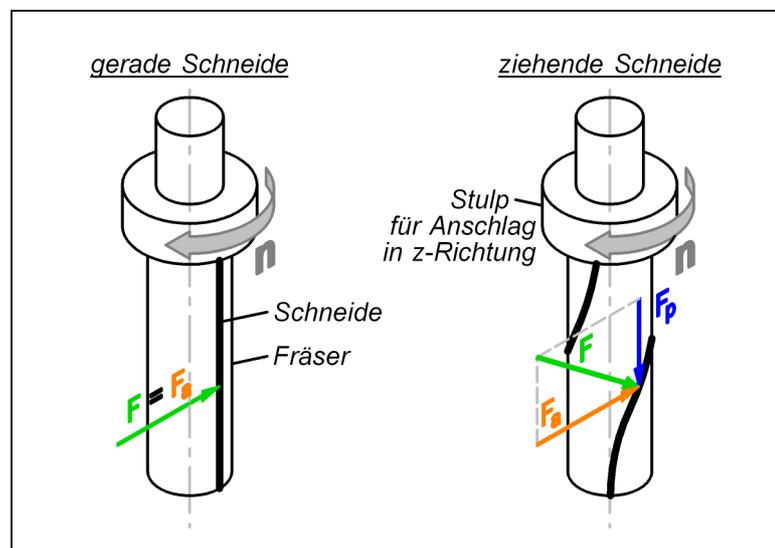


Abbildung 8: Aktivkraft F_a und Passivkraft F_p

In Abbildung 8 ist zu sehen, dass nicht immer eine Passivkraft vorhanden sein muss, das einen Achswinkel λ voraussetzt, der größer Null ist (vgl. auch Abschnitt 3.5 auf Seite 8). Die linke Skizze der Abbildung 8 zeigt einen Fräser mit gerader Schneide, während die rechte eine Schneide mit einem Achswinkel $\lambda > 0$ beschreibt.

Die Aktivkraft F_a enthält mehrere Komponenten, deren exakten Definitionen hier nicht aufgeführt werden sollen. Grund dafür ist eine Kraftzerlegung nach Heisel [12], die praxisnäher und einfacher zu handhaben ist. Diese Zerlegung wird in Abbildung 9 gezeigt.

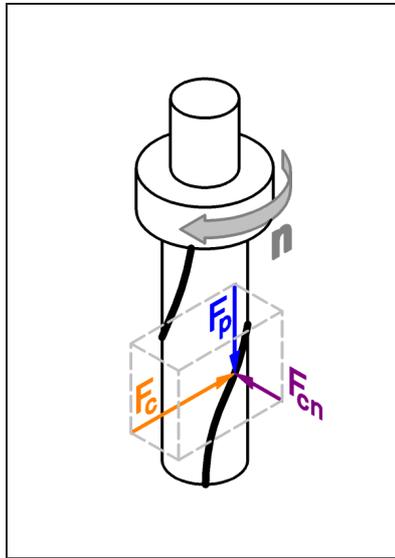


Abbildung 9: Zerlegung der Zerspankraft F nach Heisel

Sämtliche Kräfte stehen orthogonal zueinander und ergeben als Resultierende natürlich wieder die Zerspankraft F . Sie würde quer im Raum liegen, ist aber aus Gründen der Übersichtlichkeit hier weggelassen worden. Sie würde quer durch den Raum verlaufen und mit der Spitze auf die der anderen treffen.

3.7 Die Schnittkraft F_c

Die Schnittkraft F_c kann auf verschiedene Arten berechnet werden. Im folgenden Abschnitt sollen diese Verfahren kurz betrachtet werden.

Ermittlung von F_c mit Hilfe von k_{cn} -Werten [2]

Die Zerspankraft F_c ist grundsätzlich abhängig vom Spanvolumen, das durch die Parameter h_m und b beschrieben wird. Ein linearer Zusammenhang von F_c und b wird unterstellt. Eine mögliche mathematische Formulierung kann nun so aussehen, dass $F_c = k_{cn} \cdot b \cdot h_m^n$ ist, wobei k_{cn} der fehlende Faktor der Gleichung und n der Exponent von h_m sei. Für $n = 0$ und $n = 1$ sind beide k_c -Werte Funktionen von h_m , wie in der Abbildung 10 dargestellt. Ein h_m -unabhängiger Wert für k_{cn} wurde mit $n = 0,5 \dots 0,6$ empirisch ermittelt und der Einfachheit halber als $n = 0,5$

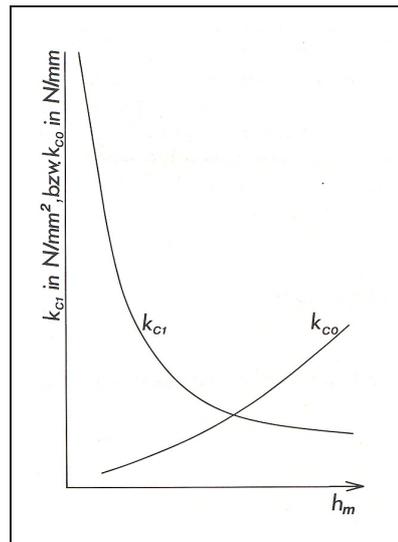


Abbildung 10: k_{c1} und k_{c0} in Abhängigkeit von h_m [2]

festgelegt. Dass dies nur eine Näherung einer Konstanten ist, wurde in Kauf genommen. Die Einheit erscheint mit $N/mm^{1,5}$ etwas ungewöhnlich, ist aber wegen $h_m^{0,5}$ mathematisch korrekt. Die daraus abgeleitete Formel lautet nun:

$$F_c = k_{c0,5} \cdot b \cdot \sqrt{h_m} \quad (7)$$

Im Gegensatz dazu werden in aktuellen Forschungsvorhaben wie von Heisel [10] oftmals k_{c1} -Werte verwendet. Nach Heisel gilt anstelle der Gleichung 7 die folgende Formulierung:

$$F_c = k_{c1} \cdot b \cdot h_m \quad (8)$$

Die hier vorliegende Arbeit setzt jedoch auf die ausführlich beschriebene Methode mit $k_{c0,5}$ auf, weil sie derzeit mehr Anwendung findet.

Ermittlung von F_c über das Fräsintegral [19]

Die zuvor beschriebene Rechenart hat Gültigkeit für eine konstante Schnittkraft F_c . Bei Bearbeitungsverfahren wie dem Bohren oder Drehen ist die Schneide permanent im Eingriff, sodass fortwährend eine konstante Kraft für die Zerspanung sorgen muss. Beim Fräsen ist die notwendige Kraft zeitlich nicht konstant, da zum einen nicht immer eine Schneide im Eingriff ist und zum anderen die Spandicke während des Eingriffs variiert. Die Folge sind zeitabhängige Funktionen, deren Integral, also die geometrische Fläche unterhalb des Kurvenverlaufs, der Arbeit für die Zerspanung entspricht. Falls keine Schneide in das Holz eingreift, ist die Funktion an der Stelle gleich Null.

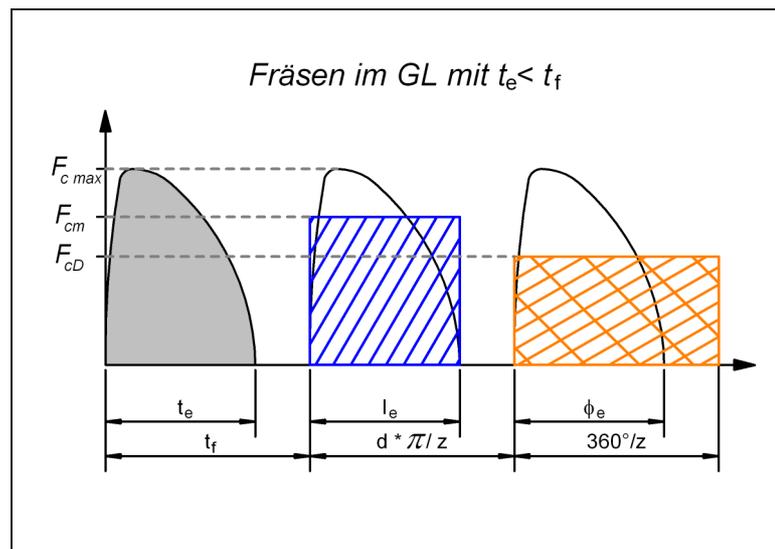


Abbildung 11: Fräsintegral

In Abbildung 11 sind drei Eingriffe mit zeitlichem Abstand wie zuvor beschrieben dargestellt. Beim Gleichlauf ist ein impulsartiger Kraftanstieg zu verzeichnen, der dann allmählich wieder auf Null zurückgeht, weil h_m stetig kleiner wird. Grundsätzlich sind auch Überlagerungen durch z.B. zwei gleichzeitig eingreifender Schneiden möglich, was berücksichtigt werden muss.

Die grau hinterlegte Fläche entspricht der aufzubringenden Arbeit. Sie ist flächengleich und identisch mit den Werten der blauschraffierten und orangeschraffierten Fläche, die durch Vereinfachungen entstehen. Die unterschiedlichen Bemaßungen sind ebenfalls gleichwertig, sodass hier rechnerisch variiert werden kann.

Die Arbeit ist:

$$\int_0^{t_e} F_c(l) \cdot dl = F_{cm} \cdot l_e \quad (9)$$

Für die Kraft F_{cD} gilt:

$$F_{cD} = F_{cm} \cdot \frac{t_e}{t_f} \quad (10)$$

$$F_{cD} = F_{cm} \cdot \frac{z \cdot \varphi_e}{360^\circ} \quad (11)$$

F_{cD} ist folglich die permanente Schnittkraft, die unabhängig von Weg oder Zeit ist.

F_{max} ist die einzige Größe die in Fachliteratur und Aufsätzen stets gleich definiert wird, während F_{cm} für die mittlere Schnittkraft und F_{cD} für die Schnittkraft im permanenten Eingriff von verschiedenen Autoren unterschiedliche Nomenklaturen tragen.

3.8 Die Schnittleistung P_c

Bei rotierenden Werkzeugen ist die Leistung $P_c = M \cdot \omega$. Das Drehmoment M kann auch in $F_u \cdot \frac{d}{2}$ zerlegt werden, was folgende Gleichung ergibt:

$$P_c = M \cdot \omega = F_u \cdot \frac{d}{2} \cdot \omega \quad (12)$$

Weiterhin kann die Umfangskraft F_u mit $F_c \cdot z_e$ substituiert werden:

$$P_c = F_c \cdot z_e \cdot \frac{d}{2} \cdot \omega \quad (13)$$

Wenn nun auch die Winkelgeschwindigkeit aufgelöst wird und mit dem Faktor 60 dividiert wird (Umrechnung von min^{-1} auf s^{-1}), ergibt sich die endgültige Form der Gleichung zur Berechnung der Schnittleistung, die wie folgt aussieht [1]:

$$P_c = F_c \cdot z_e \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{\pi \cdot n}{30} \quad (14)$$

Experimentelle Ermittlung der Schnittleistung P_c

In Versuchen zur Schnittkraftmessung findet die Gleichung 14 insofern Anwendung, dass durch Umstellen dieser Gleichung auf die Schnittkraft F_c zurückgerechnet werden kann. Dabei werden die Leistungswerte bei Last und bei Leerlauf voneinander subtrahiert, wie in der Abbildung 12 veranschaulicht ist. Bei konstant angenommenen Parametern wie der Drehzahl führt dies zu einer guten Näherung der gewünschten Schnittleistung P_c .

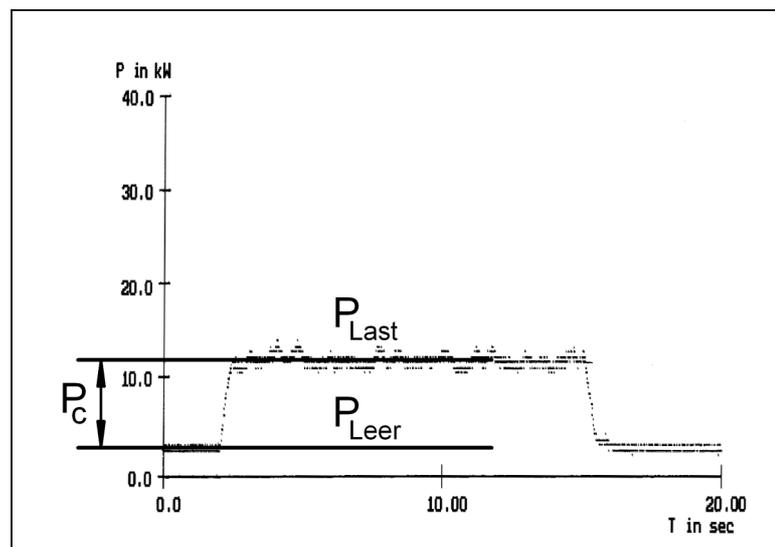


Abbildung 12: Experimentelle Ermittlung der Schnittleistung P_c [1]

4 Die Versuchsdurchführung

4.1 Der Versuchsaufbau

Um die Signale von den aufgenommenen Versuchen abspeichern und verarbeiten zu können, muss ein relativ großer Aufwand bezüglich des Versuchsaufbaus betrieben werden. In Abbildung 13 ist dieser Aufbau schematisch dargestellt.

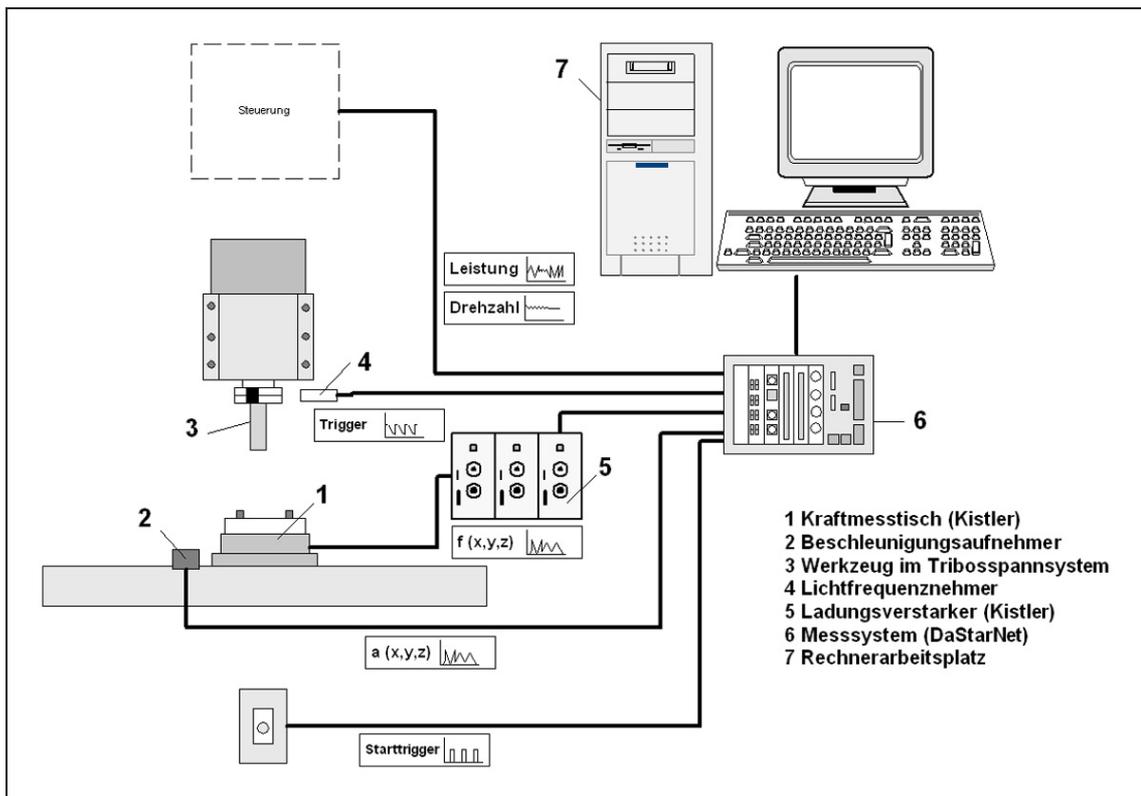


Abbildung 13: Schematischer Versuchsaufbau

Nachfolgend werden die einzelnen Bestandteile des Messaufbaus genauer beschrieben, sofern sie nicht in vorangegangenen Diplomarbeiten ausführlich behandelt wurden. In diesem Fall werden Verweise auf entsprechende Stellen gemacht.

4.1.1 Homag BOF 41 - Die Versuchsmaschine

Bei Beginn der Arbeiten zum AiF-Projekt wurde davon ausgegangen, dass sämtliche Versuche in der ÜVA der FH Rosenheim durchgeführt werden können. Da aber in der Zeit des Versuchszeitraumes ein Wechsel des Maschinenparks stattfand, wurden die Versuche im Versuchslabor der Firma *Leuco Ledermann GmbH* in Horb am Neckar

durchgeführt. Bei der Versuchsmaschine handelt es sich um ein BAZ der *Homag*-Gruppe des Typs BOF 41 K, die in der Praxis meist für das Formatieren, Profilieren, Bohren etc. von Spanplatten, MDF und anderen gängigen HWS-Typen eingesetzt wird [14]. Die Abbildung 14 zeigt diese Maschine inklusive der Versuchsaufbauten wie der Stahlplatte und der Kistler Messplattform.



Abbildung 14: Versuchsmaschine *Homag* BOF 41 K

Bei der beschriebenen Maschine handelt es sich um eine Sonderausführung, bei der die Spindel gegenüber dem Standard hochwertiger ist. Sie ist für Drehzahlen von bis zu 40.000min^{-1} ausgelegt und nimmt eine Nennleistung von etwa 20KW^3 auf [13].

IMA Quadroflex - Die Versuchsmaschine für die Vergleichsmessungen

Nach Abschluss der Messungen auf der eben beschriebenen Maschine wurden Vergleichsversuche auf einem anderen BAZ der Firma IMA durchgeführt. Abbildung 15 zeigt eine Ansicht der zweiten Maschine. Weitere Informationen bezüglich der Maschinen sind den Datenblättern im Anhang zu entnehmen.

Für die Versuchsanordnung auf der IMA wurde die Stahlplatte aus Gründen der Steifigkeit direkt auf die Laufschienen gesetzt. Die Laufschienen wurden durch zwei MDF-Abdeckungen vor eventuellen Beschädigungen geschützt (v.a. beim Absenken

³bei den Werten für die Leistung differieren die erhaltenen Angaben zwischen 19 ... 21 KW



Abbildung 15: Versuchsmaschine IMA Quadroflex

der Stahlplatte). Die Abbildungen 16 und 17 stellen die Lösung der Auflage dar. Gleichzeitig ist der Höhenunterschied der beiden Laufschiene deutlich zu erkennen, weshalb das U-Profil unterhalb der Stahlplatte angebracht wurde, um die unterschiedlichen Höhen auszugleichen.

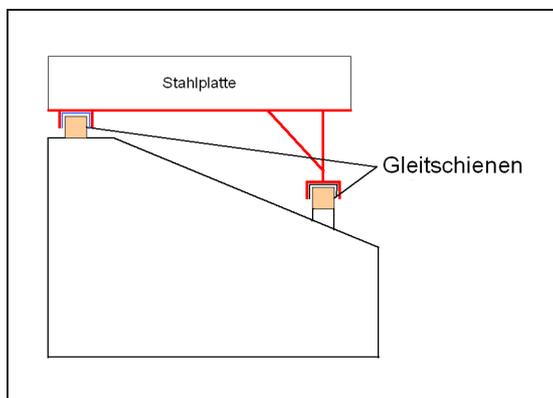


Abbildung 16: Schema des Aufsetzens

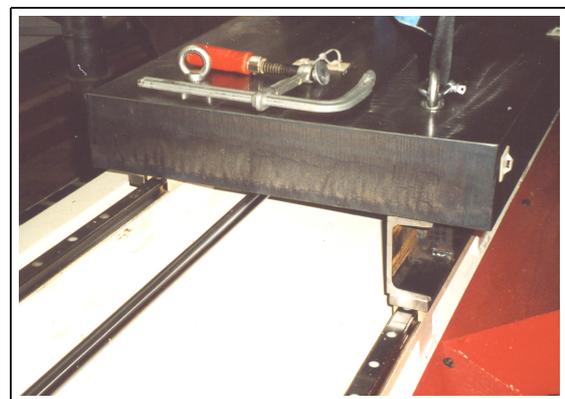


Abbildung 17: Aufsetzen der Stahlplatte

4.1.2 Die Werkzeuge

Die Versuche wurden mit drei verschiedenen WZ durchgeführt, die alle von der Firma *Leuco Ledermann GmbH* zur Verfügung gestellt wurden. Nach Rücksprache mit der Firma sind die Datenblätter vertraulich zu behandeln, sodass hier nur die Daten in der Tabelle 1 zusammengefasst sind, aber keine technischen Zeichnungen folgen werden.

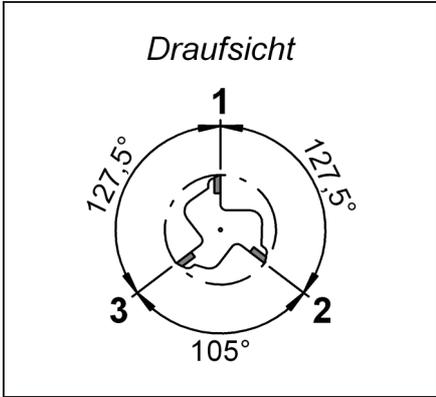
Daten	WZ 1	WZ 2	WZ 3
Ident-Nr.	005 06 484	005 06 485	800 63 742
 <p style="text-align: center;"><i>Draufsicht</i></p>			
Fräserart	Schaftfräser	Schaftfräser	Schaftfräser
Name	Diamax	Diamax	Diamax
Flugkreisdurchmesser d [mm]	21,36	21,36	24,32
Schneidenanzahl z [-]	3	3	3
Trigger an Schneide [-]	2	3	1
Achswinkel λ [°]	25/-25	25/-10	25/-25
Spanwinkel α [°]	0 ... 7	0 ... 7	0 ... 7
Keilwinkel β [°]	71 ... 78	71 ... 78	71 ... 78
Freiwinkel γ [°]	10 ... 12	10 ... 12	10 ... 12
Länge l [mm]	125	125	125
maximale Schnittbreite b [mm]	43,4	43,4	43,4
Schneidstoff	PKD	PKD	PKD

Tabelle 1: Übersicht der Werkzeugdaten

Bei der Auswahl wurden bewusst Standard-Fräser ausgewählt, um praxisnahe Resultate zu erhalten. Die WZ waren bereits vermessen, sodass die Werte vom Hersteller übernommen werden konnten. Die Schneiden selbst waren arbeitsscharf.

Die Schneiden sind im WZ-Querschnitt nicht symmetrisch angeordnet, sondern weisen die Winkel $127,5^\circ/127,5^\circ/105^\circ$ auf. Dadurch soll eine periodische Schwingungsanregung durch die eingreifenden Schneiden vermieden werden. Die Anordnung der Schneiden sind in der linken Skizze der Tabelle 1 ersichtlich. Weiterhin ist zu bemerken, dass die schräggestellten Schneiden (vgl. Achswinkel λ) am zylindrischen Grundkörper durch Erodieren nachgeschliffen werden, weshalb Span-, Keil- und Freiwinkel entlang der Schneide nicht konstant sind. Es muss noch hinzugefügt werden, dass solche komplexen Werkzeuge die Auswertung erheblich erschweren, wie der Abschnitt 5 ab der Seite 34 aufzeigen wird.

Die Achswinkel λ sind an ein und derselben Schneide unterschiedlich in Vorzeichen und Wert, d.h. bei Ansicht von der Seite macht der Schneidenkantenverlauf einen Knick. Derartige Ausführungen ermöglichen beim Zerspanen mit richtiger z-Positionierung bessere Kanten, weil die Schneide zuerst an beiden WS-Kanten in das Holz eintritt und anschließend in Richtung WS-Mitte zerspanen.

Bei Versuchsbeginn musste jeweils eine Schneide festgelegt werden, die für den Trigger markiert wird. Das sog. Triggern ist notwendig, um später bei der Auswertung nachvollziehen zu können, wo sich welche Schneide zum jeweiligen Zeitpunkt befindet. Für nähere Ausführungen dazu wird auf den noch folgenden Abschnitt 4.1.8 verwiesen.

4.1.3 Die Stahlplatte

In der Abbildung 14 war die eingesetzte Stahlplatte bereits zu sehen. Abbildung 18 zeigt die technische Zeichnung der Stahlplatte.

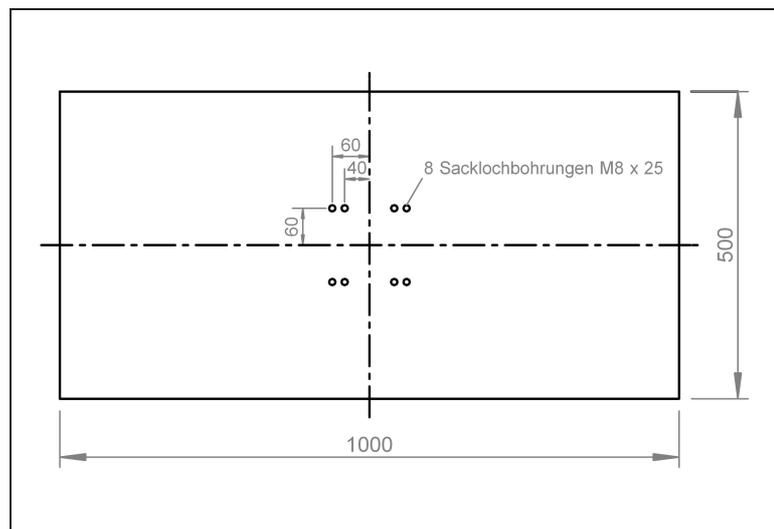


Abbildung 18: Stahlplatte

In der Mitte der Platte sind entsprechend der Kistler-Messplattform 8 Gewindefacklochbohrungen des Typs M8x1,5 für deren Montage gebohrt. Aufgrund der Abmessungen beläuft sich die Masse der Stahlplatte auf 392,5kg, jedoch erforderte dies eine Anfrage bei der Firma *Homag*, ob solch eine Last für die Maschine zulässig ist. Die Bestätigung galt unter der Bedingung, die Platte vorsichtig aufzusetzen und anschließend nicht zu bewegen. Diese Bestätigung gilt also nicht für Maschinen mit verfahrbarem Tisch, bei denen eine Vorrichtung eine Lösung des Problems der fehlenden Mobilität sein könnte.

Der Grund für den Einsatz der massiven Stahlplatte waren die zu erwartenden Schwingungen, die derartige Messungen unbrauchbar machen können. Nach folgender Gleichung [17] bewirkt die vergrößerte Masse, dass das ganze System weniger dazu neigt sich aufzuschwingen.

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{m}} \quad (15)$$

Hierbei sei f_R die entscheidende Resonanzfrequenz, c die Steifheit und m die Masse des Systems. Bei einer nennenswerten Erhöhung der Masse verkleinert sich wie gewünscht die Resonanzfrequenz. Weiterhin sind kleinere Beschleunigungen zu erwarten.

4.1.4 Die Kistler-Messplattform [15]

Die Kistler-Messplattform stellt mit dem Ladungsverstärker und DAStar die zentrale Einheit in dem Versuchsaufbau dar. Die Wirkungsweise beruht auf piezoelektrischer Basis und hat gegenüber analog arbeitenden Geräten den Vorteil eines größeren nutzbaren Frequenzbereiches. Wußler [27] hat diese Messplattform sehr ausführlich abgehandelt, sodass hier nur das Wichtigste aufgeführt werden soll.

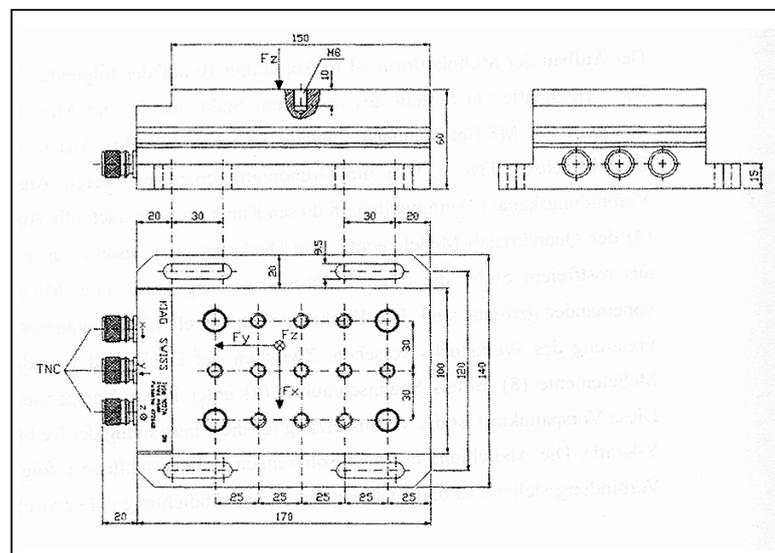


Abbildung 19: Kistler Messplattform 9257A[15]

Die Abbildung 19 liefert die technische Zeichnung des Messaufnehmers und zeigt gleichzeitig eine wichtige Definition. Hier sind die Kraftrichtungen \vec{F}_x , \vec{F}_y und \vec{F}_z eingezeichnet, die später für die Auswertung wichtig sind. Egal aus welcher Richtung eine Kraft auf das Messsystem einwirkt, sie wird in dieses orthogonale Kraftkoordinatensystem zerlegt. Für die 3 Richtungen \vec{x} , \vec{y} und \vec{z} sind an der linken Seite

je ein Ausgang des Typs TNC vorhanden, die aus Gründen der Systemsicherheit immer verschlossen sein müssen (entweder Kabel oder Abschlusskappen). Die Gewindesacklochbohrungen auf der Messplattform sind wie in der Stahlplatte M8x1,5, hier jedoch für die Befestigung der WS-Proben.

Die hohe Steifigkeit des Gerätes steht im direkten Zusammenhang mit der Eigenfrequenz, die verglichen mit ähnlichen Messinstrumenten relativ hoch ist. Sie bestimmt mit der gesamten Resonanzfrequenz den Messbereich, der ohne Verzerrungen messbar ist. Daher muss betont werden, dass dieses Gerät nicht unbegrenzt eingesetzt werden darf. Bei Überschreiten dieser Grenzen lassen sich nicht mehr zuverlässige Aussagen über die Signaltreue machen. Dieser Prozess, so angenommen, wird schleichend in Erscheinung treten.

Geräteaufbau und Funktionsweise

Um die Funktion der Kistler-Messplattform besser zu verstehen, ist in Abbildung 20 schematisch ein vertikaler Schnitt durch das Gerät dargestellt. Die zu messende Kraft greift an der Deckplatte an und wird auf die 4 Dreikomponenten-Kraftaufnehmer verteilt. In den Kraftaufnehmern befinden sich unter hoher Vorspannung jeweils 3 Quarzkristallplattenpaare, die, wenn sie gegeneinander verschoben werden, eine entsprechende Ladung hervorrufen. Prinzipiell ist eine Verformung weglos, d.h. es gibt keine messbare Verschiebung der Deckplatte. Die besagten Ladungen entsprechen der Ausgabe und sind den verarbeitbaren Spannungen proportional.

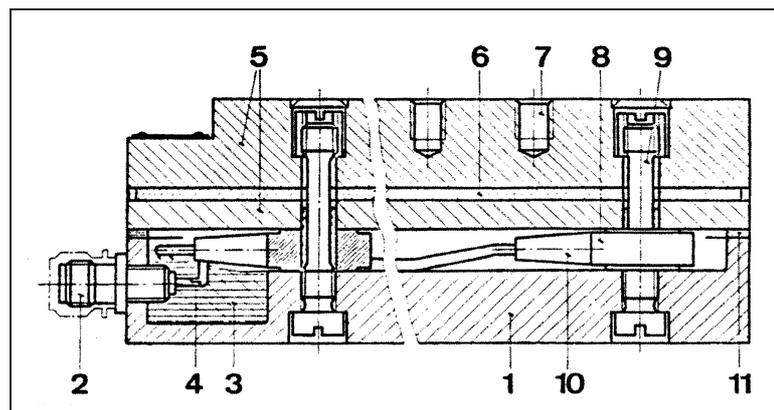


Abbildung 20: Querschnitt *Kistler* Messplattform [15]

- | | | |
|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| 1 = Grundplatte | 2 = TNC-Anschlussbuchsen | 3 = Verbindungskanal |
| 4 = Anschlussleitungen | 5 = Deckplatte | 6 = Micaver-Schicht |
| 7 = Montagebohrungen M8 | 8 = Kraftaufnehmer | 9 = Spanschrauben |
| 10 = Verbindungskanal | 11 = Abdichtung | |

Montage und Betrieb

Das Gerät kann auf unterschiedliche Arten auf der Maschine befestigt werden. Wichtig ist eine saubere und ebene Fläche als Auflage. Eine Möglichkeit der Befestigung stellen Gewindeschrauben über die Flansche dar, wobei das Anzugsmoment 30Nm betragen soll. Dies gilt nicht für eine Schraube, die mit einem Erdungskabel versehen ist; hier reicht handfest.

Die maximalen Kräfte dürfen sich pro Kanal im Bereich von -5.000N bis 5.000N bewegen, wobei eine Überlastbarkeit von 50% erlaubt ist. Die Ansprechschwelle für kleinste Messgrößen liegt bei optimalem Messaufbau bei weniger als 0,01N. Die Eigenfrequenz $f_0(x, y, z)$ für alle 3 Achsen beträgt in etwa 3,5kHz, jedoch nicht, wenn diese an Flanschen montiert ist. Hier gilt für x und y eine niedrigere Eigenfrequenz $f_0(x, y)$ von ca. 2,3kHz. Im Anhang 8 befinden sich die technischen Daten in übersichtlicher Form.

4.1.5 Der Ladungsverstärker [16]

Wie im vorigen Abschnitt bereits beschrieben, ist das Ausgangssignal der *Kistler*-Messplattform eine Ladung. Die Kapazität ist aber unhandlich, was die Verarbeitung des Signal angeht und so muss der Ladungsverstärker zum einen das Signal verstärken und es zum anderen in eine verwertbare Größe wie z.B. einer Spannung umwandeln. Der Bereich des Ausgangssignal bewegt sich zwischen -10 und +10V.

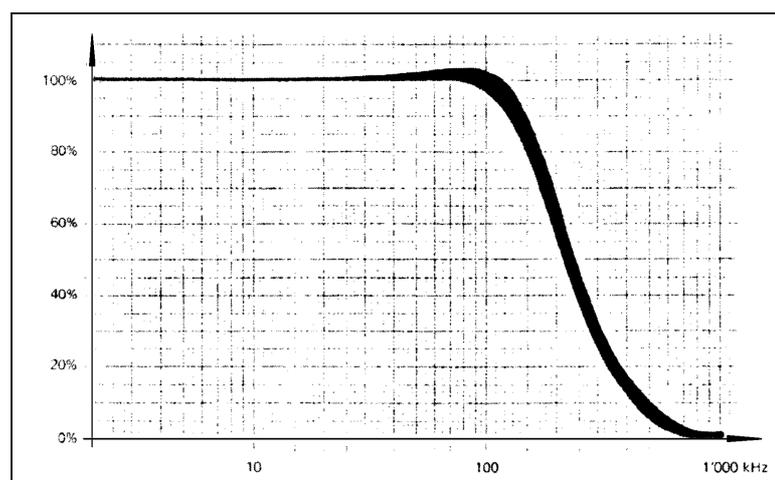


Abbildung 21: Frequenzgang Ladungsverstärker

In Abbildung 21 kann der Frequenzbereich des Ladungsverstärkers betrachtet werden. Hieraus geht hervor, dass der Ladungsverstärker für einen weitaus größeren

Frequenzbereich ausgelegt ist, als es die Messungen mit den erwartenden Frequenzen erfordern würden. Demnach ist festzustellen, dass der Ladungsverstärker nicht die Grenzen des Messsystems bestimmt. Es muss davon ausgegangen werden, dass dies bei der Messplattform der Fall ist.

Montage

Eine Montage wie bei der Messplattform ist nicht nötig, da das Gerät für gewöhnlich auf einem Tisch neben dem Rechner steht. Es sind lediglich die Ein- und Ausgänge entsprechend der Abbildung 22 richtig zu verbinden. Wie darin zu sehen, befinden sich rückseitig 3 Eingänge in der unteren Reihe (grüner Pfeil) und 3 Ausgänge in der oberen Reihe (roter Pfeil). Außerdem sind die Komponenten des Signals mit x, y und z deklariert.

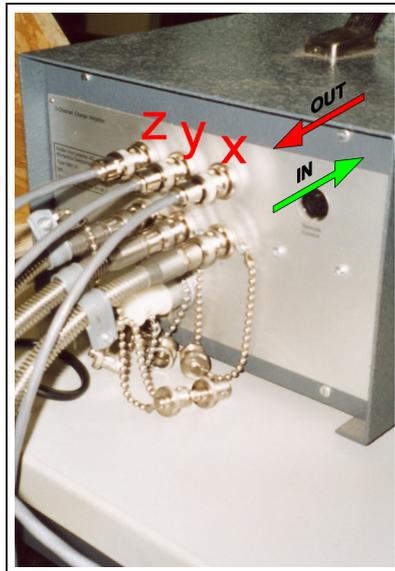


Abbildung 22: Kabelmontage Ladungsverstärker

Einstellungen

Sämtliche notwendigen Einstellungen werden anschließend frontseitig vollzogen, welche in Abbildung 23 durch die Markierungen 1 bis 4 gekennzeichnet sind.

Markierung 1: In den technischen Daten der Tabelle 23 werden unterschiedliche Zeitkonstanten beschrieben. Da die hier vorgestellten Versuche nur eine Dauer von 1 Sekunde haben ist der Schalter auf „Short“ zu stellen.

Markierung 2: Diese Einstellungen setzen das Verhältnis von Ein- und Ausgangs-

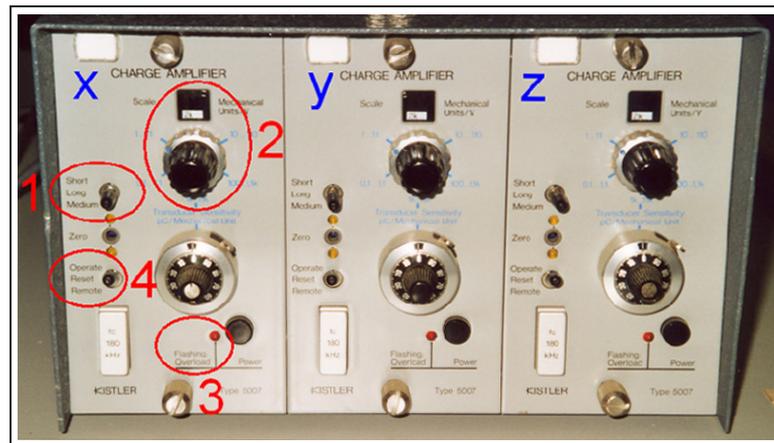


Abbildung 23: Einstellungen Ladungsverstärker

signal fest. Dieser Punkt wird unter Abschnitt 4.3.2 auf Seite 31 genauer beschrieben.

Markierung 3: Beim Blinken dieses Lämpchens ist ein sog. Overload vorangegangen, der Ladungsverstärker wurde überladen. Es ist Punkt 4 auszuführen. Die entsprechende Messung ist wertlos und deshalb zu wiederholen.

Markierung 4: Nach einem Overload ist der Kippschalter auf „Reset“ zu stellen und kurze Zeit zu warten, bis sich die Ladung abgebaut hat. Bevor die Messung wiederholt wird, muss der Schalter wieder auf „Operate“ gesetzt werden.

Weitere technische Informationen sind im Anhang und in der Diplomarbeit von Wußler [27] enthalten.

4.1.6 Das Messdatenerfassungssystem DASTarNet [8]

Das Messdatenerfassungssystem DASTarNet ist ein universell einsetzbares Gerät zur Messdatenaufnahme, das sowohl alleinstehend⁴ betrieben werden kann als auch in Anbindung an einen Rechner. Die Verbindung wird dann per Netzwerk hergestellt. Grundsätzlich gehört zur Ausstattung Hard- und Software; auf die Software wird im Abschnitt 4.3.2 ab Seite 31 eingegangen.

Hardware

Das Gerät besteht aus einem Basisgerät, das den Einsatz von bis zu 6 unterschiedlichen Steckkarten des Typs *Gould 7700* erlaubt. Die Steckmodule können beliebig

⁴DASTarNet läuft unter dem eigenem Betriebssystem Windows 98

kombiniert werden. Grundsätzlich sind bis zu 96 Kanäle verfügbar von denen hier 10 Stück benötigt wurden. Die Samplingrate beläuft sich auf maximal 400kS/s., d.h. es sind 400.000 Abtastungen bzw. Messwerte pro Sekunde möglich. Die Verkabelung mit den Steckkarten ist in der folgenden Abbildung 24 näher erläutert.

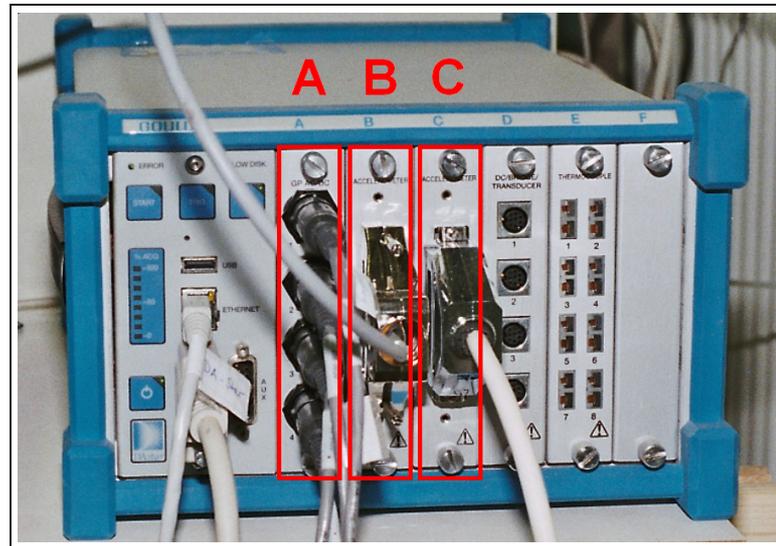


Abbildung 24: Anschlüsse an DAStarNet

Markierung A: Eingang der 3 Kraftkomponenten \vec{F}_x , \vec{F}_y und \vec{F}_z

Markierung B: Eingänge von Leistung P_c , Drehzahl n , Trigger und Starttrigger

Markierung C: Eingang der 3 Beschleunigungskomponenten \vec{a}_x , \vec{a}_y und \vec{a}_z

Steckkarte GP AC/DC ermöglicht Datenaufnahme mit und ohne Gleichanteil, wobei die 4 Kanäle individuell und unterschiedlich eingestellt werden können. Der Einsatz von Tiefpaßfiltern kann mit unterschiedlichen Filtergrenzen realisiert werden. Die exakten Einstellungen werden in Abschnitt 4.3.2 beschrieben. Die technischen Daten sind dem Anhang zu entnehmen.

Steckkarte Accelerometer für Daten ohne Gleichanteile. Es werden nur die Veränderungen der Messgröße aufgezeichnet. Deshalb ist die Spannweite der Einheiten vertikal symmetrisch. Butterworth- und Bessel-Tiefpaßfilter sind in kleinen Filterstufen möglich. Auch zu dieser Steckkarte befindet sich im Anhang eine Tabelle mit den technischen Daten.

Weiterhin bietet DAStarNet die Möglichkeit die erhaltenen Daten in diverse Fremdformate für die Weiterverarbeitung zu exportieren, u.a. in das Format für das hier verwendete *FlexPro*.

4.1.7 Der Beschleunigungsaufnehmer

Die Beschleunigung gemäß SI-Einheit ist der Quotient aus Weg und dem Quadrat der Zeit [17]. Schwingungen werden durch die 3 Größen Schwingweg (Amplitude), Schwinggeschwindigkeit (Frequenz) und Schwingbeschleunigung beschrieben. Für die Untersuchung des hier betrachteten Systems wurde der Beschleunigungssensor Modell 356B08 von der Firma *PCB Piezoelectronics Inc.* verwendet. In Abbildung 25 ist der Sensor im Versuchsaufbau direkt neben der Messplattform zu sehen.

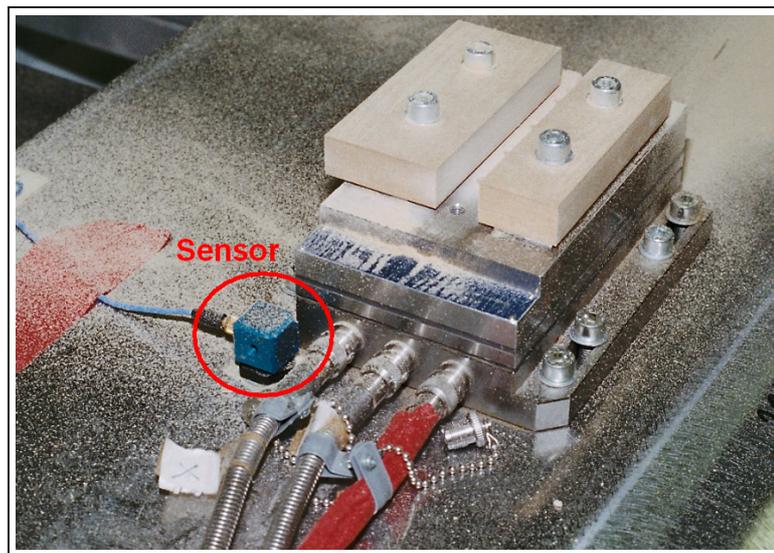


Abbildung 25: PCB Beschleunigungssensor

Funktionsweise und Montage

Ein polarisierter Piezofilm dient als Sensorelement, wobei die Masse des ganzen Aufnehmers nur 20g beträgt. Für derartige Versuche sind solch geringe Massen erforderlich, um das Versuchergebnis so wenig wie möglich zu verfälschen. Das erhaltene Signal wird automatisch in die 3 orthogonalen Koordinaten aufgeteilt. In Anlehnung an die Kraftzerlegung tragen die Beschleunigungssignale die Namen a_x , a_y und a_z . In Bezug auf die Eichung und auf die Einstellungen in der Software Summit, zeigt Tabelle 4, dass für die Beschleunigungen keine besonderen Vorbereitungsarbeiten anfallen. Der Anhang beinhaltet das Datenblatt des Aufnehmers.

Messergebnisse

Aufgrund der ersten Auswertungsergebnisse, die keine nennenswerten Erkenntnisse brachten, wurden die Signale zwar weiter aufgenommen, jedoch fanden sie keine Berücksichtigung in der Auswertung des Abschnitts 5.

4.1.8 Der Lichtreflexsensor

Der Lichtreflexsensor reagiert auf Hell-Dunkel-Unterschiede des abgetasteten Objektes und erzeugt ein Signal, das wie die Kräfte in den Datensatz mitaufgenommen werden. Das Signal des Sensors wird ebenfalls über der Zeit aufgetragen und läßt so Rückschlüsse auf die Position des Werkzeugs zu, welche für die Auswertung benötigt werden (vgl. dazu Abschnitt 5).

Funktionsweise

Der Lichtreflexsensor F1RHPN der Firma *Takex* aus Japan basiert auf einer einfachen Wirkungsweise, indem sichtbares Licht mit Hilfe einer roten LED aussendet (vgl. Abbildung 26) und gleichzeitig erfasst wird, wieviel aufgrund von Streuung und Absorption noch reflektiert wird bzw. zum Sensor zurückkommt [24]. Beim beschriebenen Versuchsaufbau wird das Triggersignal an der Spindel bzw. WZ-Aufnahme aufgenommen, was eine relativ nahe Positionierung des Sensors durch eine Halterung erfordert. Dieser Abstand a darf gemäß Bedienungsanleitung [26] maximal 40mm betragen (vgl. Anhang).

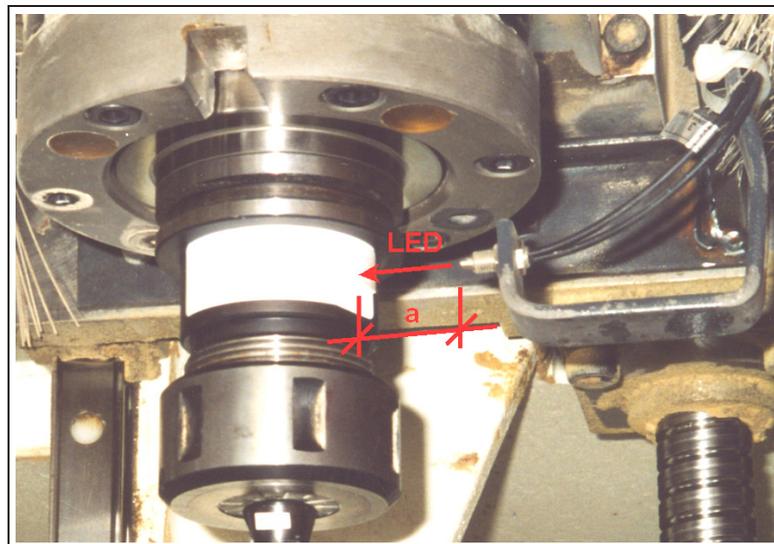


Abbildung 26: Lichtreflexsensor

Vorbereiten der abzutastenden Oberfläche

Wie eingangs dieses Abschnittes schon angedeutet muss die abzutastende Oberfläche präpariert werden. Oft können sich Oberflächen nur durch Nuancen unterscheiden, weshalb die Lösung empirisch ist. Je nach Material, Farbe und Beschaffenheit müssen unterschiedliche Marken angebracht werden. Versuche haben gezeigt, dass sich für

diese Markierungen schwarze Permanentmarker wie der *Edding* 3000 (für dunkle Marken) und handelsübliche Zweckform-Etiketten (für helle Marken) eignen. Als Bezugspunkt⁵ wurde jeweils der unterste Punkt der ziehenden Schneiden gewählt, weil dieser Punkt unabhängig von der WS-Dicke ist.

Von großer Bedeutung vor der Herstellung der Sensorhalterung ist der Vorgang des WZ-Wechsels, der genau beobachtet und studiert werden muss, um Kollisionen vom WZ-Wechsler und der Halterung zu vermeiden. Sinnvollerweise wird der Sensor nach der x- oder y-Richtung der Maschine ausgerichtet.

4.1.9 Der Einsatz des Computers

Ursprünglich war geplant, einen kleinen Laborrechner mit 166MHz Taktfrequenz, 96MB RAM und mit dem Betriebssystem *Windows NT* für die komplette Versuchsdurchführung einzusetzen. Die Versuchsplanung sah außerdem vor, die gewonnenen Datensätze täglich abzuspeichern, um einen eventuellen Datenverlust vorzubeugen. Erste Probeversuche zeigten eine auffällige Häufigkeit an Systemabstürzen, sodass ein anderer Rechner mit 1000MHz, 512MB RAM inklusive funktionstüchtigem Brenner verwendet wurde. Im Nachhinein eine gute Entscheidung, denn die Datenbanken und die Rohdaten benötigen zusammen etwa 4GB – das macht pro Datensatz knapp 2MB – Festplattenspeicher, was nicht schnell auf einen anderen Rechner übertragen werden kann. Außerdem zeigte das auch Vorteile beim Handling der großen Datenbanken und der Auswertung.

Netzwerk

Im Abschnitt 4.1.6 auf der Seite 24 wurde das DASTar-System ausführlich beschrieben. Diese Einheit stellt nichts anderes dar, als eine externe Messkarte und wird mit dem Computer per Peer-to-Peer-Ethernetkabel verbunden. Für das Konfigurieren in den Netzwerkseinstellungen gibt es 2 Möglichkeiten. Zum einen kann das DASTar an den Computer angepaßt werden, wenn es sie dabei um einen Rechner aus einem größerem Netzwerk wie z.B. das der FH handelt. Der Vorteil ist eine schnelle Wiederanbindung des eingesetzten Rechners an dieses Netz. In der zweiten Möglichkeit kann auch ein klassisches kleines Netzwerk aufgebaut werden, indem man die IP-Adresse mit 198.168.0.X vergibt. Für beide Fälle gilt, dass sich die letzten Ziffer der IP-Adresse unterscheiden muss, deshalb das „X“. Die Arbeitsgruppe sollte dieselbe sein. In der Bedienungsanleitung des DASTarNet ist eine ausführliche Beschreibung darüber enthalten.

⁵entspricht gleich dem Anfangspunkt der Markierung in Drehrichtung

Bei der Inbetriebnahme des DAStars traten Probleme auf, weil keine Verbindung über das Netzwerk hergestellt werden konnte. Eine defekte Netzwerkkarte konnte mit Hilfe des sog. Ping-Befehls erkannt werden und der Fehler vom Händler behoben werden.

4.2 Die eingesetzten Holzwerkstoffe

Die Auswahl der untersuchten HWS-Proben gestaltete sich relativ einfach. Zum einen mussten HWS untersucht werden, die bereits in früheren Untersuchungen zur Anwendung kamen und zum anderen sollten auch Daten für neue HWS ermittelt werden. Das nachstehende Bild 27 zeigen die versuchsfertigen HWS-Proben.

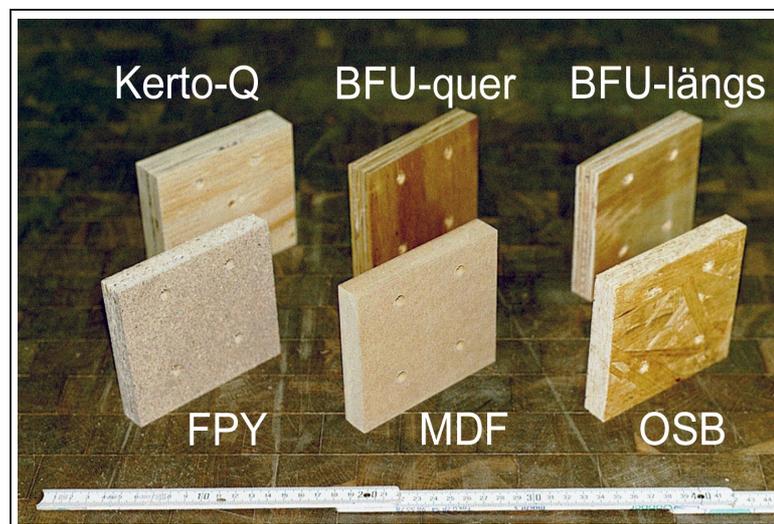


Abbildung 27: Überblick über die eingesetzten HWS

Die folgende Tabelle 2 soll einen kleinen Überblick von den relevanten HWS-Daten ermöglichen.

	MDF	FPY	OSB	BFU	Kerto-Q
Hersteller	Fa. Egger	Fa. Egger	Fa. Egger	Fa. Carl Götz	Fa. Merk Holzbau
Kürzel für DB	MDF	FPY	OSB	BFU-L BFU-Q	KEQ-27
Nennstärke [mm]	19	19	18	20	27
Dicke [mm]	18,95	18,95	18,30	20,00	26,40
Holzfeuchte u_{gl} [%]	7,5	7,9	8,9	8,8	10,4

Tabelle 2: Übersicht der HWS-Daten

MDF und FPY sind fast schon Standard bei solchen Versuchen, jedoch sind sie aufgrund ihres Marktanteils auch gerechtfertigt. Zu den neueren HWS zählen OSB (substituiert Sperrholzplatten), BFU (vermehrter Einsatz im Holzbau) und Kerto (z.B. Tragwerkskonstruktionen und -verstärkungen), bei denen wenig bis gar keine Kennwerte vorhanden sind.

Die Probenvorbereitungen setzen sich zusammen aus dem Zuschnitt auf einer Formatkreissäge und dem Bohren auf einem BAZ. Abbildung 28 stellt die Abmessungen aller Proben dar.

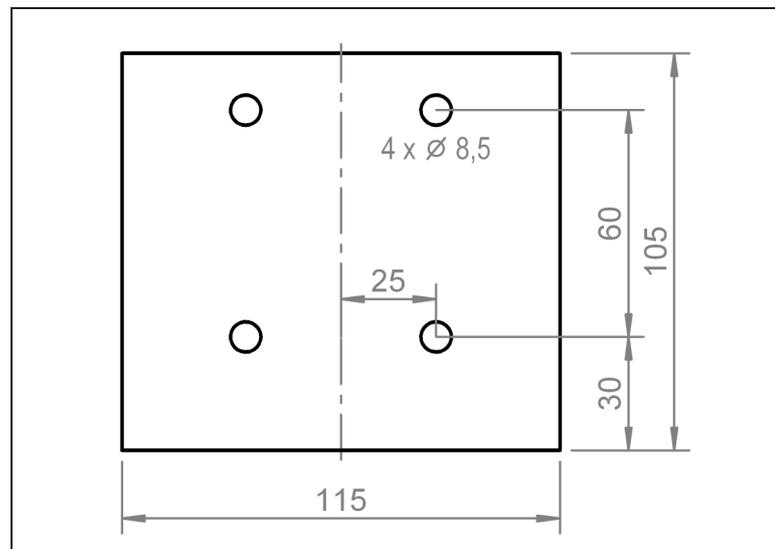


Abbildung 28: Zeichnung der Werkstückdimensionen

Holzfeuchtemessung [22] muss bei HWS mittels der Darrprobe erfolgen, weil die ungenaueren Holzfeuchtemessgeräte für diese Materialien ungeeignet sind. Für die Messungen wurde ein Wärmeschrank in der ÜVA der FH Rosenheim verwendet und bei 100°C betrieben. Wegen Brandgefahr wurde das Gerät nachts bei geschlossener Klappe abgeschaltet, um eine Wiederbefeuchtung der Probenstücke zu vermeiden. Erst nach 6 Stunden Gewichtskonstanz darf die Probe als atro, sprich absolut trocken betrachtet werden. Um den Trocknungsprozess zu beschleunigen, wurden die Proben in kleine Streifen getrennt. Nachdem die Streifen mit Druckluft abgestaubt waren, erfolgte die erste Messung und anschließend wurden in annähernd regelmäßigen Abständen weitere Aufnahmen gemacht. Für die Berechnung der Holzfeuchte wurde die Gleichung 16 verwendet und die Resultate sind in der vorherigen Tabelle 2 gegenübergestellt.

$$\text{Holzfeuchte } u_{gl} = \frac{(m_{gl} - m_{atro}) \cdot 100}{m_{atro}} \quad [\%] \quad (16)$$

4.3 Die Versuchsdurchführung

4.3.1 Versuchsparmeter

Die Versuche wurden in Abhängigkeit folgender Parameter durchgeführt:

Werkstoffe	Werkzeuge	Drehzahl	Vorschub	Eingriffstiefe
MDF 19	Schaftfräser 1	18.000min ⁻¹	5m/min	1mm
FPY 19	Schaftfräser 2	26.000min ⁻¹	10m/min	3mm
OSB 18	Schaftfräser 3	34.000min ⁻¹	15m/min	6mm
BFU 20			20m/min	Volleingriff
BFU 20				
Kerto-Q 27				

Abbildung 29: Übersicht der Versuchsparameter

Es muss noch ergänzt werden, dass die Versuche mit der Drehzahl 18.000min⁻¹ in Kombination mit Vorschub 20m/min nicht durchgeführt wurden, weil ansonsten der Zahnvorschub zu groß wäre und Bruchgefahr für die Werkzeuge bestehen würde.

4.3.2 Versuchsvorbereitungen

Mindestabtastrate

Das Abtasttheorem besagt, dass zur exakten Bestimmung einer Funktion eine mehr als doppelt so große Abtastung erforderlich ist, als es die höchste darin enthaltene Frequenz darstellt. Im Genauen heißt das $2 \cdot f_{max} + 1$ [25]. Da aber diese höchste Frequenz nicht bekannt ist, muss mit der maximal möglichen Frequenz abgetastet werden. Als Grenze gilt, wenn z.B. der Rechner abstürzt. Bei den hier beschriebenen Versuchen wurde mit 50kHz abgetastet.

Eichungen

Die Eichungen haben den Zweck, für jede Koordinate einen konstanten Faktor zu ermitteln, der eine Umrechnung von der einwirkenden Kraft an der Messplattform auf die ausgegebene Spannung des Ladungsverstärkers erlaubt. Daher gilt:

$$k_{\text{Koordinate}} = \frac{F}{U} \quad (17)$$

Die Durchführung der Eichungen folgt den Ausführungen von Wußler [27], sodass hier auf weitere Ausführungen verzichtet wird. Als Resultat der Eichungen kamen folgende Konstanten k_x , k_y und k_z hervor:

	k_x	k_y	k_z
Skalierung [N/V]	66,778	68,760	134,810
Einstellung Ladungsverstärker [MU/V]	500	500	500

Tabelle 3: Ergebnisse der Eichungen

DASStar-Software Summit

Die Installation der Software selbst ist ausführlich in der Bedienungsanleitung für DASStarNet [8] beschrieben. Hier sollen nur die wichtigsten Einstellungen in Bezug auf die Software gemacht werden, die in Tabelle 4 für die belegten Kanäle zusammengefasst sind:

Kanal	Bereich	Skalierung	Bemerkung
Leistung P_{el}	0 ... 25kW	2,5kW/V	bis 30.000min ⁻¹
Drehzahl n	0 ... 30.000min ⁻¹	3.000min ⁻¹ /V	bis 30.000min ⁻¹
Trigger	0 ... 10V	Ein/Aus	1-mal/Undrehung
Starttrigger	0 ... 10V	Ein/Aus	Handtaster
Kraft F_x	0 ... 600N	66,778 N/V	500 MU/V; short
Kraft F_y	0 ... 600N	68,76 N/V	500 MU/V; short
Kraft F_z	0 ... 600N	134,81 N/V	500 MU/V; short
Beschleunigung a_x	—	—	—
Beschleunigung a_y	—	—	—
Beschleunigung a_z	—	—	—

Tabelle 4: Einstellungen in Summit

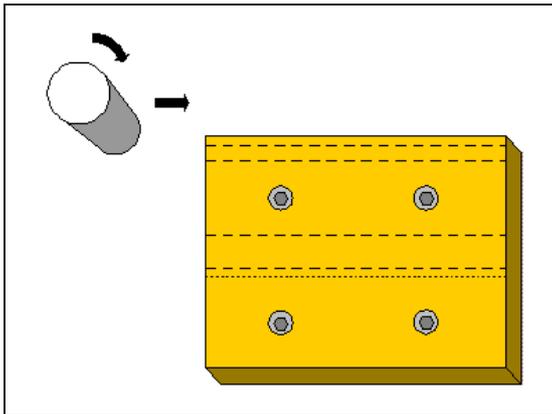
Der Trigger kann grundsätzlich automatisiert werden, indem in Summit eine bestimmte Kraft zum Auslösen des Triggers eingegeben wird. Nach einigen fehlerhaften Versuchen wurde mit dem Handtaster die Signalaufnahme manuell gestartet.

4.3.3 Versuchsablauf

Während der Messungen sind die beiden Programme *Summit* und *DataViewer* nebeneinander geöffnet. *Summit* zeigt online die ankommenden Signale auf einem horizontal mitlaufenden Bildschirm. Nachdem der Datensatz aufgenommen wurde, gibt

DataViewer den Datensatz zur Ansicht aus; dabei kann beurteilt werden, ob z.B. ein Overload stattfand (vgl. Overload Seite 24). Später werden die Datensätze nach *FlexPro* exportiert, woraus die Datenbanken resultieren.

Schematisch ist in Abbildung 30 der Ablauf der Messungen verdeutlicht. Die gestrichelten Linien stellen die Schnittkanten dar.



Reihenfolge der einzelnen Abläufe:

1. fügen
2. 3mm
3. 6mm
4. Volleingriff
5. 1mm

Abbildung 30: Versuchsablauf

Abschließend folgt ein Foto, das den Fräsvorgang von MDF zeigt. In dieser Abbildung 31 ist die hohe Staubentwicklung bei diesem Werkstoff gut zu erkennen.

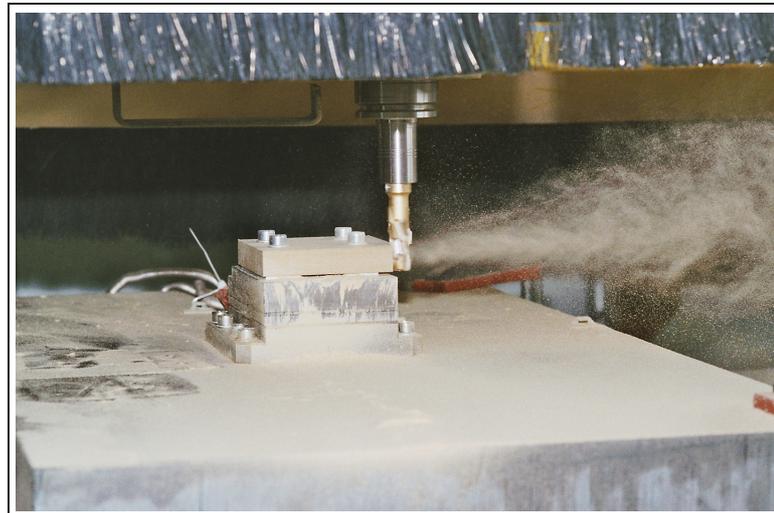


Abbildung 31: Fräsvorgang am Beispiel MDF

5 Die Auswertung

Das nun folgende Kapitel soll aufzeigen, mit welchen Methoden die Auswertung vollzogen wurde. Die Berechnungen folgen der Kraftzerlegung gemäß Heisel [12], jedoch sollen nur die Kräfte F_c und F_{cn} betrachtet werden, während die Passivkraft F_p eine untergeordnete Rolle spielen soll (vgl. Abbildung 9). Daraus folgt, dass das Problem lediglich 2-dimensional ist.

5.1 Werkzeuge der Auswertung

Für die Auswertung wurde hauptsächlich das Programm *FlexPro 5.0* verwendet. Es dient dazu Daten zu analysieren und anschließend zu präsentieren. In der Software enthalten sind unterschiedliche Funktionen zum Datenimport (z.B. aus Messsignalen, Excel u.a.), der Datenaufbereitung (z.B. Filter) und für Auswertungen (z.B. Tabellen, Diagramme). Ein großer Nachteil dieser Version ist jedoch, dass Daten im *FlexPro*-Format nicht nach *Excel* exportiert werden können. Deshalb mussten mehrmals manuelle Nacharbeiten gemacht werden. Das Aufzeigen der Methoden beschränkt sich auf eine gekürzte Form, die weniger programmspezifische Vorgänge beschreibt. Neben *FlexPro* kam *Excel* als unterstützendes Hilfsmittel zum Einsatz.

Datenbanken

Die Abbildung 32 zeigt die Struktur der verwendeten Datenbank. Da hier die Datenbank mit ca. 4 GB relativ groß ist, wird die sog. „direkte Bearbeitung“ gegenüber einer Bearbeitung mit Sicherheitskopie vorgezogen. Wenn es sich zudem um Datenbanken mit mehr als ein Dutzend Datensätzen handelt, sollten sie auch „in mehreren Ordner“ abgespeichert werden, da sonst *FlexPro* versucht alle Datensätze gleichzeitig zu laden, was der Rechner nicht schafft. Die Ordner haben dann die Endung *.DB bzw. für Unterordner *.FLD.

Typisch für *FlexPro* ist das Aktivieren bzw. Markieren des kompletten Ordnerpfades eines einzelnen Datensatzes. Die Ordner des Pfades sind dann als rote Ordner dargestellt (vgl. Abbildung 32). Dadurch wird dem Programm mitgeteilt, auf welchen Datensatz sich die folgenden Berechnungen beziehen sollen.

Die Ansicht von *FlexPro* gleicht stark dem Windows-Explorer. Oftmals empfiehlt es sich die eigenen Tabellen, Formeln etc. in die oberen Ebenen der Datenbank zu positionieren, um sie für alle darunterliegenden Datensätze verwenden zu können.

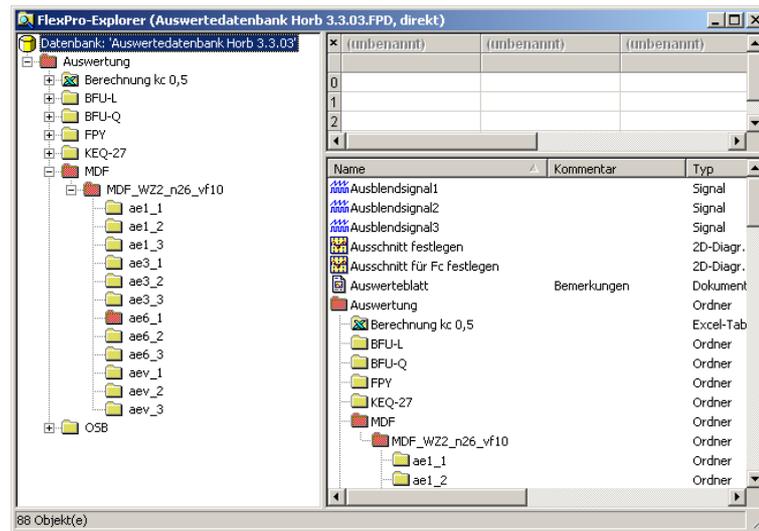


Abbildung 32: Datenbankstruktur

Nach Festlegen der Parameter gemäß Abschnitt 4.3.1 musste festgestellt werden, dass aufgrund der großen Versuchsanzahl das Abspeichern gewisse Strukturen verlangte, um später systematisch arbeiten zu können. Die Datenbank wurde zuerst nach den Werkstoffen aufgeteilt und anschließend alle Versuche nach diesem Kriterium eingeordnet. In den Dateinamen sind die Parameter enthalten, wie folgendes Beispiel verdeutlicht:

MDF
WZ2
n26
vf10
ae3

Die Vorteile dadurch sind geringe Gliederungstiefe der Datenbank und automatische Sortierung im Explorer, was einen schnellen Zugriff ermöglicht. Die Kürzel sind knapp gehalten und nach Abschnitt 3 selbsterklärend.

5.2 Problematik der Auswertung

Leistungsmessung

Häufig wird die Leistungsmessung dazu verwendet, mit der Gleichung 14 die Schnittkraft zu berechnen, zumal die restlichen Faktoren vergleichsweise einfach zu messende Größen darstellen. Die nachstehende Abbildung 33 zeigt das Ergebnis einer dieser Messungen.

Um den Unterschied zwischen Leerlauf und Lastfall zu verdeutlichen ist ein beliebiges Kraftsignal unterhalb der Leistungskurve hinzugefügt. Für die Anschaulichkeit

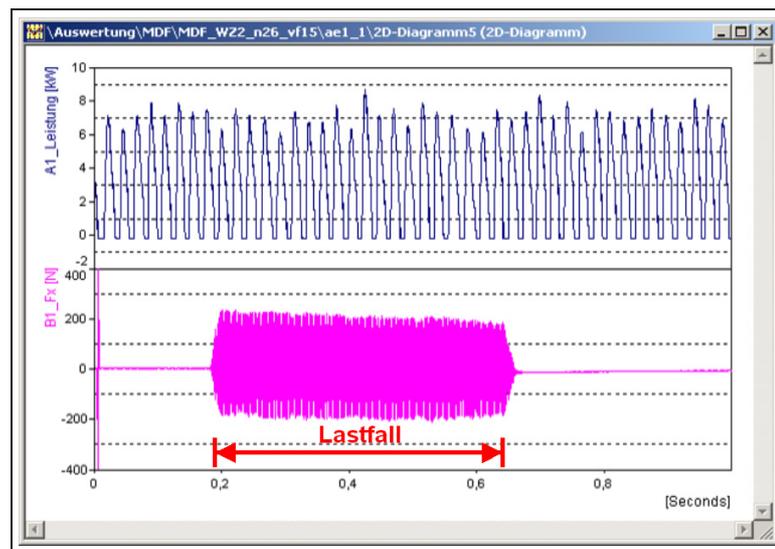


Abbildung 33: Darstellung der Leistungsmessung

der Diskrepanz zwischen Soll und Ist einer solchen Messung wird auf die bereits vorgetragene Schnittleistungsmessung verwiesen (vgl. Abbildung 12 auf Seite 14). Die Ursachen der Fehlmessung konnten nach Abschluß der Datenaufnahme nicht mehr näher untersucht werden.

Störfrequenzen

Die Signale F_x und F_y beinhalten Störfrequenzen, wobei der Störanteil von der Drehzahl unabhängig ist. Sie liegen im gleichen Frequenzbereich. Daraus ist zu folgern, dass der Störanteil die Eigenfrequenzen eines nicht rotierenden Bauteils sind. Die Eigenfrequenz innerhalb der Messplattform wird nicht von der Stahlplatte beeinflusst. Vielmehr beeinflusst die Stahlplatte die Eigenfrequenzen des Maschinengrundkörpers positiv im Sinne einer Frequenzverschiebung.

Das Filtern der Messsignale erzeugt Phasenverschiebungen, die für die unterschiedliche Frequenzgänge unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Genauer gesagt bedeutet das eine Phasenverschiebung vom Triggersignal und den Kraftsignalen F_x und F_y , die stets berücksichtigt werden müssen.

5.3 Angewandte Auswertungsmethode

Die folgenden beiden Abschnitte sind entgegen logischen Grundsätzen vertauscht worden, weil dadurch Doppelerklärungen vermieden werden können und die Übersichtlichkeit der beiden Lösungsansätze erhalten bleibt.

Bei Schnittkraftversuchen gibt es kleine aber feine Unterschiede. Unter derselben Deklaration werden hier zum einen die Resultierende F_R (= Aktivkraft F_a) und zum anderen die Schnittkraft F_c berechnet. Wie in Abschnitt 3.6 und 3.7 festgestellt sind diese beiden Kräfte unterschiedlich definiert. Während Wußler [27] und Zauner [28] F_R über den Satz von Pythagoras berechnen, stützen sich die hier vorgestellten Berechnungen wie bei Paintner [20] und Friebe [3] auf den Gleichungen von Saljé und Stühmeier [23], die wie folgt lauten:

$$F_c(\varphi) = F_x(\varphi) \cdot \cos \varphi + F_y(\varphi) \cdot \sin \varphi \quad (18)$$

$$F_{cn}(\varphi) = F_x(\varphi) \cdot \sin \varphi - F_y(\varphi) \cdot \cos \varphi \quad (19)$$

Für die richtige Anwendung der Gleichungen 18 und 19 muss auf die Ausrichtung der Koordinaten der Kistler-Plattform geachtet werden (vgl. auch Abbildung 19 auf Seite 20). Die Umsetzung auf den hier vorliegenden Versuchsaufbau wird mit der Abbildung 34 als Draufsicht verdeutlicht.

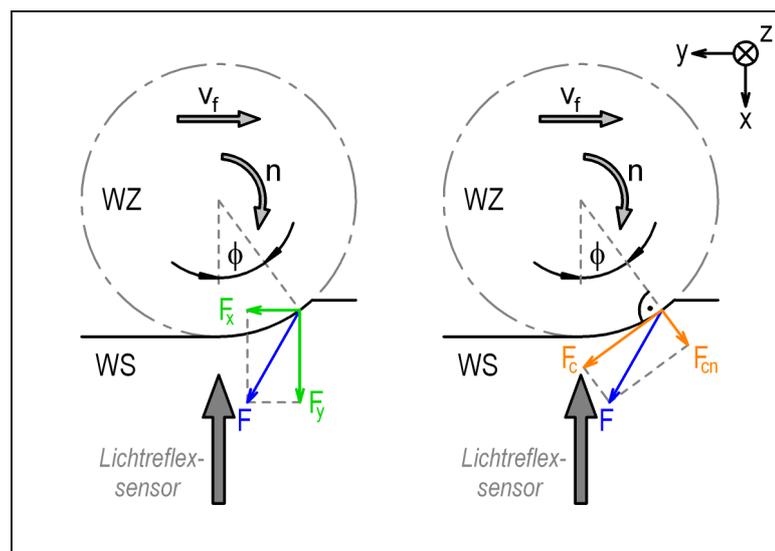


Abbildung 34: Definition von F_x und F_y (Draufsicht)

In der linken Skizze der Abbildung 34 sind die Komponenten nach dem fixen Koordinatensystem der Kistler-Plattform zerlegt worden. Sie entsprechen den gemessenen Kräften F_x und F_y , so wie sie messtechnisch aufgenommen wurden.

Die Kräfte F_c und F_{cn} sind in der rechten Skizze der Abbildung 34 zu sehen und vom Winkel φ abhängig; sie haben bezüglich der Schneide immer denselben Winkel, werden also quasi mitgezogen (vgl. Grundlagen in Abschnitt 3). Die jeweils Resultierende F ist in beiden Skizzen in Wert und Richtung identisch, sodass die Umformung von F_c und F_{cn} nach F_x und F_y korrekt ist.

Es gelten also für jede einzelne Schneide beide Winkelfunktionen gleichzeitig. Hat ein WZ wie hier 3 Schneiden, gelten für das WZ 3 Sinus- und 3 Cosinus-Funktionen. Die Sinusfunktionen sind zueinander um den Winkel versetzt, der auch zwischen den Schneiden vorliegt. Analog gilt das für die Cosinus-Funktionen.

Als Bezugspunkt für den Winkel φ gilt die Position des Lichtreflexsensors, der im Messaufbau von der Maschinenvorderseite auf die Spindel- bzw. WZ-Achse zeigt. Der für die Zerspanung wichtige Teil des Flugkreises ist gemäß Abbildung 34 der vierte Quadrant, was einen Bereich für den Winkel φ von 0° bis 90° entspricht.

Die Auswertung wird nun an einem Beispiel dargestellt. Dazu werden die Signale F_x , F_y , F_z , der Trigger und die Drehzahl herangezogen, wobei die Drehzahl aus dem Triggersignal errechnet wurde.

Ausblendsignale, Sinus- und Cosinusfolgen

Bevor die eigentliche Beschreibung für die Vorgehensweise bei der Versuchsauswertung beschrieben wird, müssen zunächst grundlegende Details zum Thema Ausblendsignal, Sinus und Cosinus erklärt werden. In der Abbildung 35 sind zwecks Übersichtlichkeit zusätzlich 2 Skizzen eingefügt.

Die Schneidenummerierung gemäß Abbildung 35 ist bei allen Werkzeugen gleich. Die Markierung für den Lichtreflexsensor setzt aber bei jedem WZ an einer anderen Schneide an. Beim WZ 2 ist das die Schneide 3. Das rechte untere Bild wurde bereits in Tabelle 1 gezeigt und stellt die Winkel zwischen den Schneiden dar. Daraus ergibt sich die in der Abbildung 35 dargestellte Reihenfolge der Zähne, weil eine Umdrehung mit der Schneide 3 und 105° beginnt⁶. Anschließend folgen die beiden anderen Schneiden mit jeweils $127,5^\circ$. Zusammen ergeben sie eine ganze Umdrehung, die mit „ 2π “ bemaßt ist. Jeder Zahn hat seine eigene Sinus- und Cosinusfunktion, die ausserhalb des zugehörigen Ausblendsignals auf Null gesetzt wird. Dadurch wird erreicht, dass nur der betrachtete Bereich in die Kraftkomponenten F_x und F_y eingeht (vgl. Gleichungen 18 und 19).

Normalerweise beginnen die Winkelfunktionen Sinus und Cosinus bei $\varphi = 0$ mit dem Wert 0 bzw. 1. Die in der Markierung ① festzustellende negative Phasenverschiebung des Ausblendsignals ist Folge von zwei zusätzlichen Änderungen gegenüber dem Grundgedanken: Der Lichtreflexsensor bezieht sich auf die untere Spitze der Schneide (vgl. Abschnitt 4.1.8); der Bezugspunkt für die Winkelfunktionen ist aber

⁶Erkennungsmerkmal im Vergleich zu den anderen beiden Zähnen/Schneiden ist ein „abgeschnittener“ Sinus und Cosinus

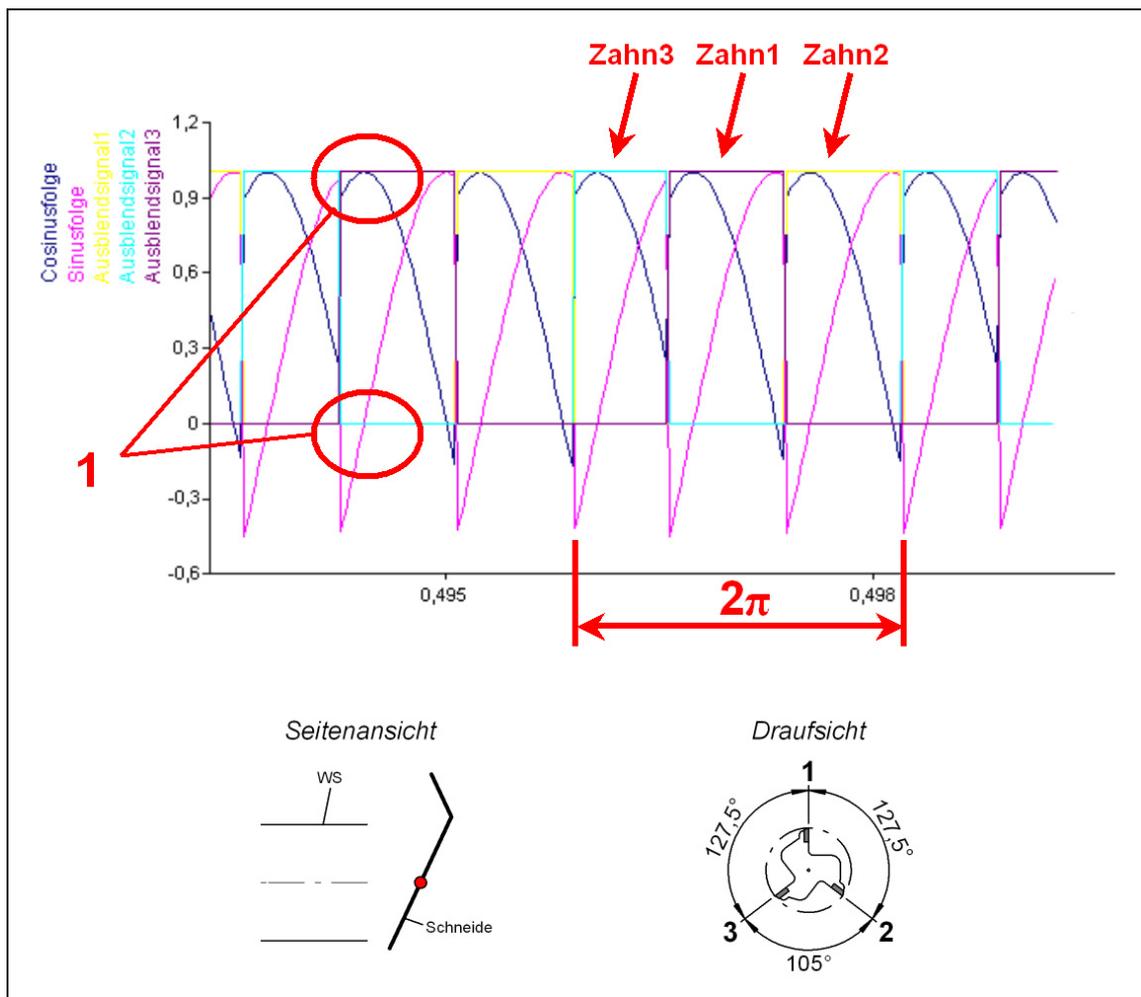


Abbildung 35: Ausblendsignale, Sinus- und Cosinusfolgen für WZ 2

die WS-Mitte, der als gemittelter Eingriff angesehen werden kann. Außerdem wurde der betrachtete Eingriffsbereich um weitere 20° im Uhrzeigersinn gedreht, um die Kräfte am Ende des Spanes ebenfalls zu erfassen (vgl. Zykloiden Abbildung 4). Je nach WS und WZ ergibt das eine Phasenverschiebung zwischen 25 und 30° .

Vorgehensweise bei der Auswertung

Nachdem der komplette Pfad des auszuwertenden Datensatzes als aktiv markiert ist (vgl. Abbildung 32), muss das Referenzsignal eingestellt werden, da für gewöhnlich das Referenzsignal zum Triggersignal zeitlich verschoben ist. Durch Korrektur des Phasenwinkels werden die beiden Signale manuell so zueinander versetzt, bis sie aufeinander abgestimmt sind, d.h. sie beginnen zeitgleich.

Anschließend werden mithilfe einer *Excel*-Tabelle die notwendigen Korrekturwerte für die Ausblendsignale, Sinus- und Cosinus bestimmt und entsprechend in *FlexPro*

manuell übertragen. Hier bietet *FlexPro* keine Möglichkeit diese Werte aus *Excel* zu importieren. Als Kontrolle der eingegebenen Werte dient ebenfalls die Abbildung 35, da eine fehlerhafte Eingabe durch einen unharmonischen Verlauf gekennzeichnet ist und somit sichtbar wird.

Generell ist zwischen zwei Bereichen in der Auswertung zu unterscheiden. Die Rechenwerte beziehen sich stets auf den größtmöglich verwendbaren Bereich im Lastfall, während für das Ausgabeblatt nur ein exemplarischer und kleiner Bereich des Kraftverlaufes herangezogen wird, um die Kraftkurven erkennbar zu machen. Abbildung 36 verdeutlicht diese Aussage anhand des gezeigten FlexPro-Diagrammes, in dem die Cursor den Bereich für das Ausgabeblatt markieren.

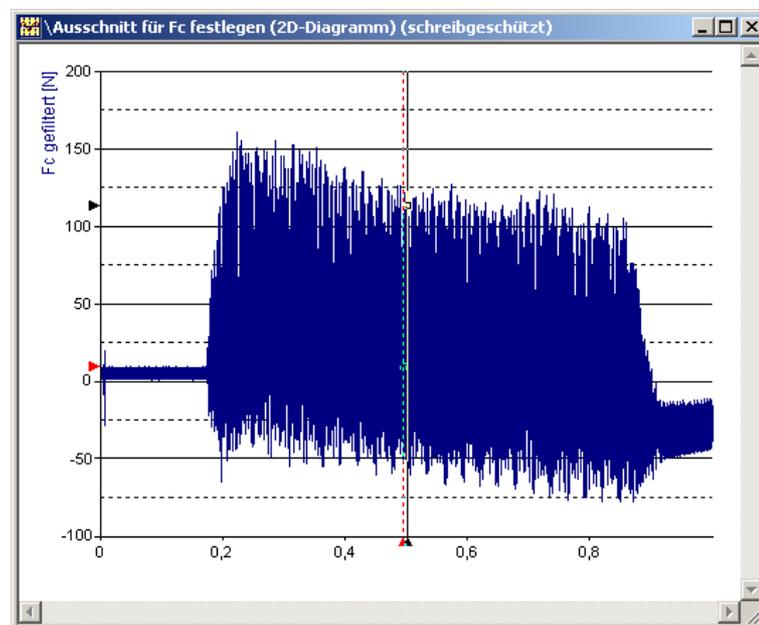


Abbildung 36: Ausschnitt für F_c festlegen

Ausgabeblatt (Protokoll)

Hier soll nur kurz beschrieben werden, wie das Ausgabeblatt strukturiert ist. Ein Exemplar ist verkleinert in der Abbildung 37 mit der groben Einteilung 1 bis 4 eingefügt.

In ① ist die Schnittkraft F_c über der Zeit aufgetragen. Die eben erwähnten Cursor in Abbildung 37 stellen die Grenzen des dargestellten Bereiches dar. Dabei resultiert F_c mithilfe der Gleichungen von Saljé und Stühmeier [23] aus den in ② präsentierten Komponenten F_x und F_y , die zum Vergleich über denselben Bereich skizziert sind. Die Ergebnisse der Berechnungen sind als Block in ③ zusammengefasst, wobei der

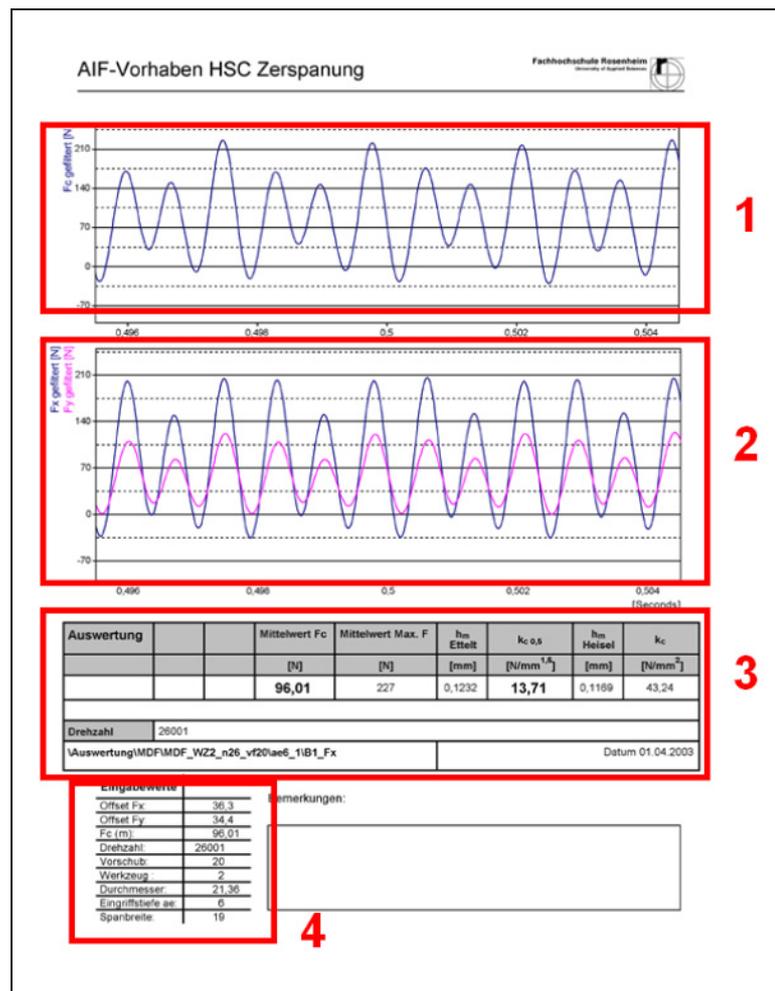


Abbildung 37: Muster für Auswertebblatt

angegebene Pfad mit dem Kontrollfenster in ④ verglichen werden kann. Die hier vorgetragenen Ergebnisse beruhen auf den Auswertebögen im Anhang.

5.4 Lösungsansätze

Vorab war noch nicht klar, wie sich die Verrechnung von F_x und F_y vor und nach dem Filtern auf das Ergebnis auswirkt. Für die Problemlösung sollen hier 2 Möglichkeiten der Auswertung vorgestellt werden.

Möglichkeit 1: F_x und F_y vorab gefiltert

- F_x und F_y filtern (Butterworth, Tiefpassfilter, 8. Ordnung, 1500Hz)
- Phasen der Zähne an Fx & Fy anpassen

- Sinus- und Cosinus-Signal für jeden Zahn einstellen
- Phasen der Ausblendsignale anpassen
- F_c errechnen und die Zahnzuordnung vergleichen ggf. korrigieren

Bei Methode 1 bezieht sich die Zahnzuordnung nicht auf das Referenzsignal (Triggersignal) und beinhaltet deshalb eine Phasenverschiebung. Daraus resultieren manuelle Korrekturen, die sehr zeitaufwendig sind und bei allen Auswertungen einzeln vorgenommen werden müssen.

Möglichkeit 2: F_c gefiltert

- Referenzsignal an das Triggersignal anpassen
- Phasen der Zähne an das Referenzsignal anpassen
- Sinus- und Cosinus-Signal für jeden Zahn einstellen
- Phasen der Ausblendsignale anpassen
- F_c berechnen und das Signal filtern

Vergleich beider Ansätze:

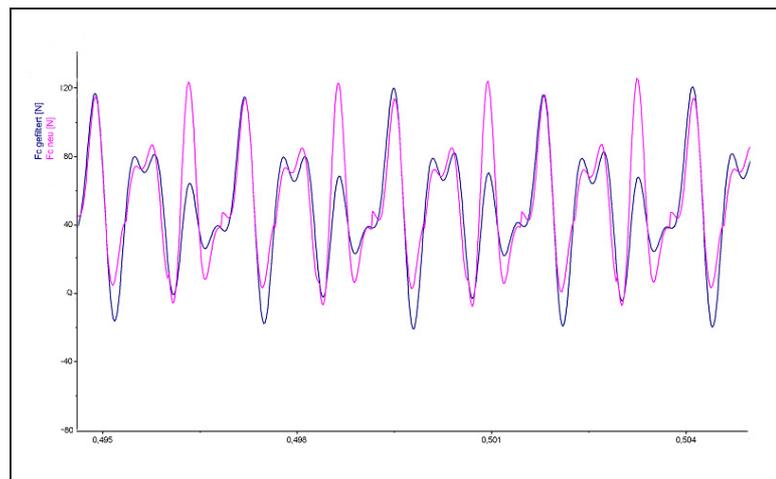


Abbildung 38: Lösungsvergleich

Schlussfolgerung: Die Ergebnisse beider Methoden sind vergleichbar. Nur die Maxima des 3. Zahns ist bei der Verrechnung vor dem Filtern nicht so ausgeprägt. Trotzdem wird Methode 2 verwendet, da hier kein Problem der Phasenverschiebung wie in Methode 1 vorhanden ist.

Frequenzproblematik: Der angewandte Messaufbau mit der Messplattform der Firma *Kistler* hat gemäß der Abbildung 39 folgendes Schwingungsverhalten.

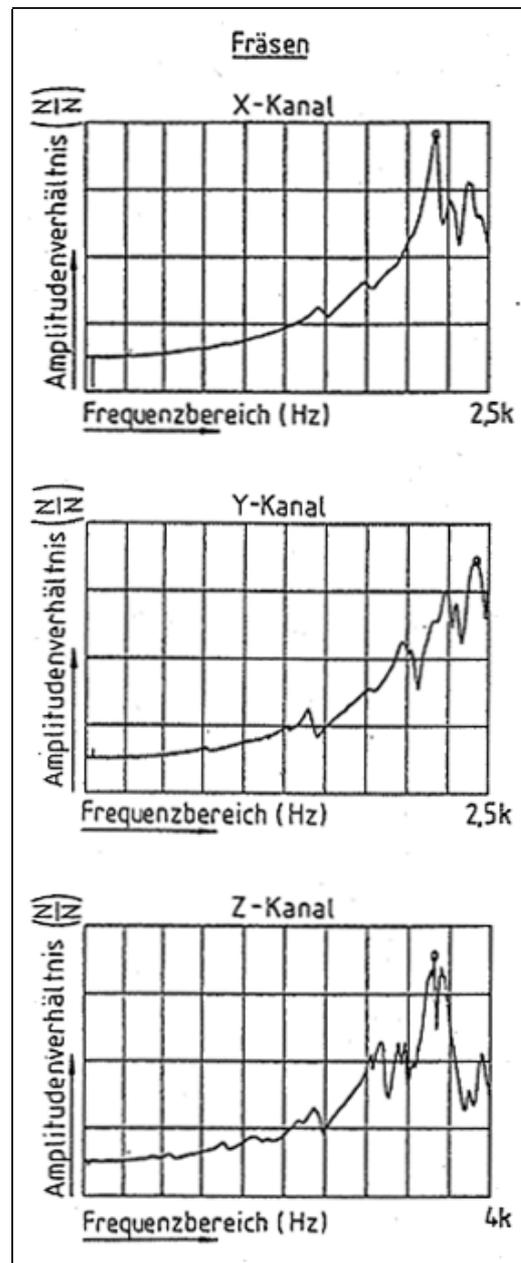


Abbildung 39: Schwingungsverhalten der *Kistler*-Plattform [15]

Hier wird deutlich, dass Messungen im HSC-Bereich problematisch sind, da beim Zerspanen von Holz sehr schnell die Eigenfrequenzen der Plattform erreicht werden.

Das Herausfiltern der kritischen Frequenzbereich ist eine Möglichkeit Ergebnisse aufzuzeigen. Durch das Filtern wird die Ausprägung der Amplituden verändert; die folgenden Diagramm zeigen, wie sich Amplituden bei entsprechenden Filter verändern.

- *Spektrum 1:* (→ vgl. Abbildung 40)

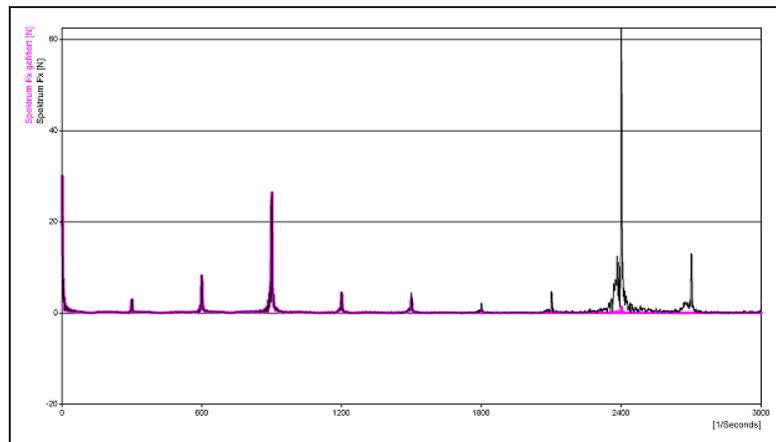


Abbildung 40: Vergleiche der Amplitudenspektren (gefiltertes Signal / ungefiltertes Signal), Drehzahl 18000, Scheidenzahl 3, Butterworth-Filter 1500Hz (Tiefpass)

Die Ausprägungen der Amplituden im relevanten Frequenzbereich ist bei beiden Graphen gleich. Es treten keine Beeinträchtigungen der Kraftspitzen ein. Der Störanteil aus der Eigenfrequenz der Messplattform ist kaum vorhanden.

- *Spektrum 2:* (→ vgl. Abbildung 41)

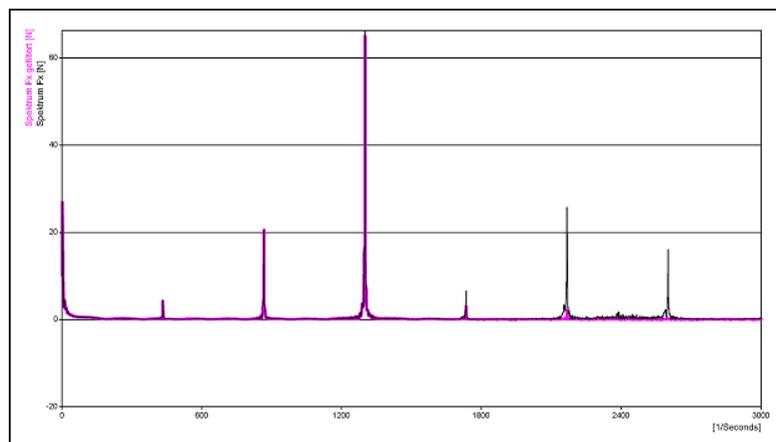


Abbildung 41: Vergleiche der Amplitudenspektren (gefiltertes Signal / ungefiltertes Signal), Drehzahl 26000, Scheidenzahl 3, Butterworth-Filter 1600Hz (Tiefpass)

Die Ausprägungen der Amplituden im relevanten Frequenzbereich ist bei beiden Graphen annähernd gleich. Die dritte Amplitude zeigt eine vernachlässigbare Abschwächung in der Ausprägung. Es treten keine Beeinträchtigungen der Kraftspitzen ein. Der Störanteil aus der Eigenfrequenz der Messplattform ist kaum vorhanden.

- *Spektrum 3:* (→ vgl. Abbildung 42)

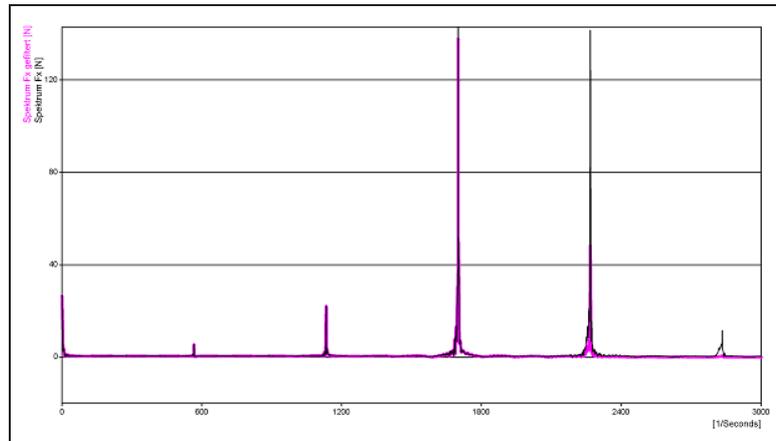


Abbildung 42: Vergleiche der Amplitudenspektren (gefiltertes Signal / ungefiltertes Signal), Drehzahl 34000, Scheidenzahl 3, Butterworth-Filter 2000Hz (Tiefpass)

Die Ausprägungen der Amplituden im relevanten Frequenzbereich ist bei der dritten Amplitude schwächer. Um die Abschwächung zu verringern muss ein höherer Frequenzbereich gewählt werden. Dies würde zu einen größerem Anteil des Störsignals führen als hier ohnehin schon vorhanden ist. Die Ergebnisse bei 34000min^{-1} sind unter Berücksichtigung dieser Tatsachen zu bewerten.

Anmerkung zum Butterworth-Filter: Als Filter wurde ein sog. Butterworth-Filter eingesetzt, der dem Namen nach tiefe Frequenzen passieren läßt. Die Filterung mit der Grenzfrequenz geschieht idealerweise schlagartig; real findet aber nur eine Dämpfung statt. Das gedämpfte Signal kann auch nach Vielfachen der Grenzfrequenz noch messbare Werte aufweisen. Je höher die Ordnung, desto schärfer ist die Dämpfung. Für weitere Hintergründe muss hier auf die einschlägige Literatur hingewiesen werden [25].

Grundsätzliches Problem bei der Projektdurchführung: Im Rahmen des Projektes zur HSC-Zerspanung gab es einige Punkte die den Projektlauf verzögerten bzw. behinderten: Für die Messungen wurde ein Bearbeitungszentrum mit einer HSC-Spindel benötigt, welche von der Firma *Homag* an die Fachhochschule Rosenheim geliefert werden sollte. Die Lieferung verzögerte sich um mehrere Monate, so das die Messungen auf einer Ersatzmaschine durchgeführt wurden. Das Bearbeitungszentrum wurde freundlicherweise von der Firma *Leuco* in Horb zur Verfügung gestellt. Durch die Messungen ausser Haus ist ein größerer Aufwand entstanden, die zusätzliche Kosten verursachten.

Bei den Messungen in Horb sollte die Leistung aus der Maschinensteuerung ausgelesen werden. Leider musste festgestellt werden, dass das Signal aus der

Steuerung die gesamte Leistung – also inkl. der Blindleistung – lieferte. Demzufolge ist die durchgeführte Leistungsmessung für die Ermittlung der Kräfte am WZ unbrauchbar.

Das neue Bearbeitungszentrum ist an der Fachhochschule durch andere Projekte und Praktika ständig im Einsatz. Um die Ergebnisse zu reproduzieren wurde der Messaufbau auf einem anderen Bearbeitungszentrum ohne HSC-Spindel wiederholt. Hier konnte nur ein Teil der Messungen wiederholt werden. Es sollte ein ausreichend großes Zeitfenster am neuen Bearbeitungszentrum zur Verfügung gestellt werden.

6 Die Ergebnisse

Die Resultate der Auswertung sind Auswertebblätter, die für jeden Versuch erstellt werden und im Anhang beigefügt sind (→ siehe CD). In diesem Abschnitt sollen die daraus resultierenden Ergebnisse diskutiert werden.

Durch die Auswertemethode konnten nicht alle Datensätze ausgearbeitet werden. Die eingesetzte Methode für die Auswertung hat nur Gültigkeit für den Fall, dass zur selben Zeit ausschließlich eine Schneide am Zerspanungsprozess beteiligt ist, da der Rest ausgeblendet wird. Einen Sonderfall würde ein 1-schneidiges WZ darstellen, das aber nicht zum Einsatz kam.

Einzelergebnisse und Tendenzen

Für das Verständnis der nachfolgenden Tabellen und Diagramme sei hier noch einmal betont, dass es sich bei F_c um die Schnittkraft handelt, wie sie von Maier [19] als F_{cD} definiert wird (vgl. Abbildung 11). F_c ist also die Schnittkraft, die sich bei konstantem Spanabhub ergeben würde. F_{cmax} und $k_{c0,5}$ sind bereits hinreichend eingeführt worden.

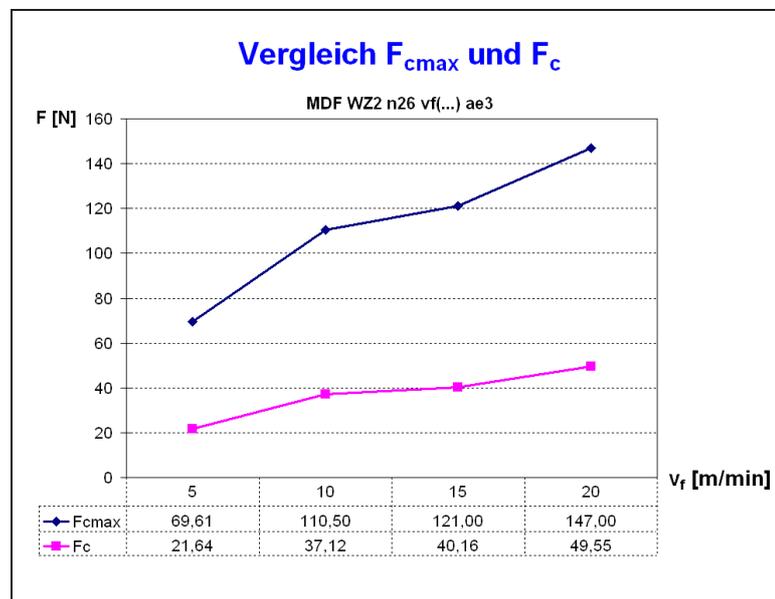


Abbildung 43: Diagramm zum Vergleich von F_{cmax} mit F_c

Bei der Analyse der $k_{c0,5}$ -Werte sind die Ergebnisse nicht in der erwarteten Qualität. Zwar sind die Werte bei erhöhtem Vorschub annähernd konstant, jedoch gilt dies nicht mehr, sobald die Drehzahl oder die Eingriffstiefe erhöht wird. Nach Gleichung 7 sollten die eben genannten Parameter in die mittlere Spandicke h_m eingegangen sein

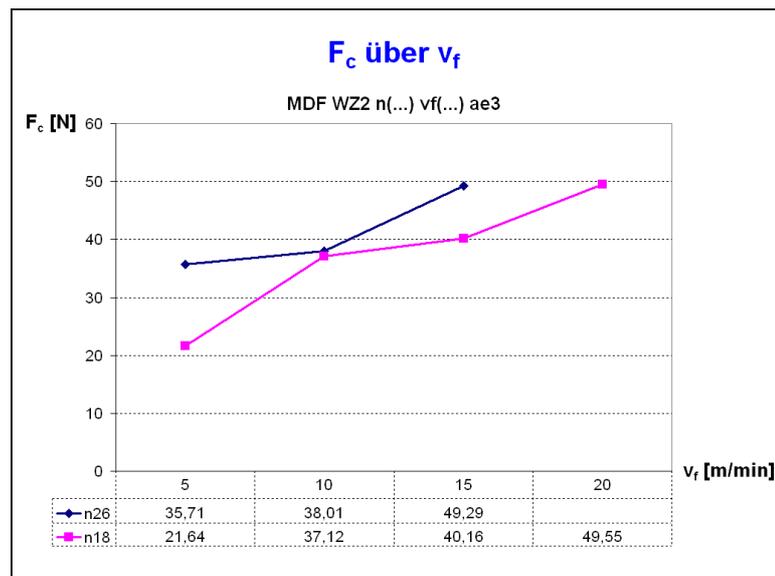


Abbildung 44: Diagramm von F_c über v_f mit unterschiedlichen Eingriffstiefen

und so keinen Einfluß mehr auf k_{c05} ausüben können. Aus diesem Grund werden nachfolgend die jeweiligen Schnittkräfte zu den Versuchen diskutiert.

Mit guter Näherung ist eine Relation von 3:1 zwischen F_{cmax} und F_c festzustellen. Obwohl das nur als Näherung aufgefasst werden darf, so ist diese Tendenz bei fast allen Auswertungen nachvollziehbar. In dem angeführten Beispiel in Abbildung 43 kann diese These anhand der darunter befindlichen Wertetabelle belegt werden.

Ein weiteres Diagramm (→ vgl. Abbildung 44) soll den Verlauf von F_c aufzeigen, diesmal wieder in Abhängigkeit des Vorschubes v_f . Es zeigt die unterschiedlichen Kurvenzüge von den Drehzahlen 18.000 und 26.000 min^{-1} . Auf den ersten Blick ist es vielleicht verwunderlich, aber die untere Kurve stellt die mit der höheren Drehzahl dar, weil bei der Letztgenannten die Spandicke h_m kleiner ist.

Weiterhin fällt auf, dass sich bei allen Darstellungen der etwas erhöhte Wert bei 10m/min Vorschub. Andernfalls könnte der Schnittkraft F_c ein präziser linearer Zusammenhang unterstellt werden. Jedoch muss die geringe Anzahl an Messpunkten berücksichtigt werden.

Die interessanteste Gegenüberstellung stellt die Abbildung 45 mit dem Vergleich zwischen den einzelnen Werkstoffen dar. In diesem Diagramm sind die einzelnen Schnittkräfte F_c miteinander verglichen. Wie anzunehmen benötigt FPY den kleinsten Kraftaufwand, um zerspannt zu werden und ist damit die Basis für einen Vergleich. Da die HWS unterschiedliche Dicken aufweisen, sind sie zudem auf die Werkstückdicke der FPY-Spanplatte normiert worden, um sie direkt vergleichen zu können.

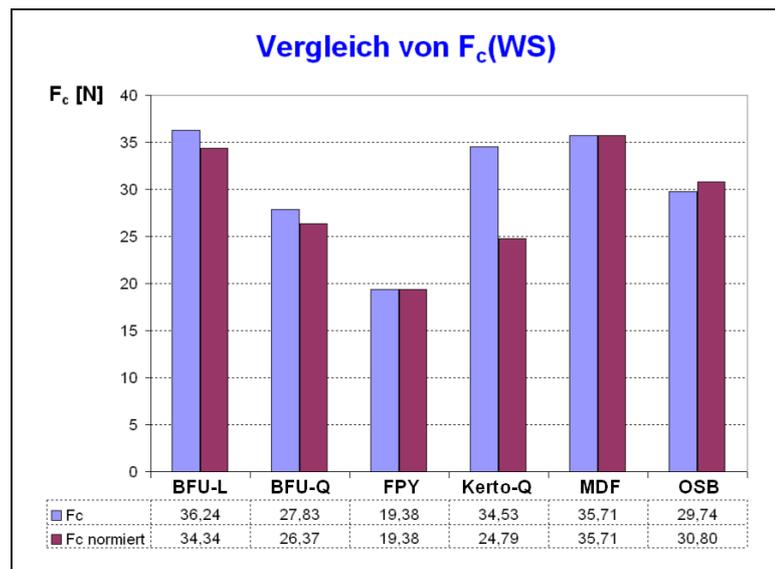


Abbildung 45: Diagramm zum Vergleich von F_c bei unterschiedlichen WS

Diese normierte Schnittkraft ist jeweils die rechte Säule in Abbildung fig:Diagramm-WS-Vergleich. Die daraus resultierende Schlussfolgerung wurde bereits im letzten Zwischenbericht vorgestellt (→ vgl. Tabelle 5).

Ist eine schnelle Umrechnung gewünscht, so kann die folgende Gleichung verwendet werden:

$$F_{c,HWS} = F_{c,FPY} \cdot k_{HWS} \cdot d_{HWS} \quad (20)$$

Die Einheiten lauten:

$$[N] = [N] \cdot [mm^{-1}] \cdot [mm]$$

Nach den hier vorgestellten Berechnungen ergeben sich für k_{HWS} folgende Faktoren. Für die Umrechnungen sind jeweils die gemessenen Dickenangaben aus Tabelle 2 auf Seite 29 zu verwenden.

	BFU-L	BFU-Q	FPY	Kerto-Q	MDF	OSB
k_{HWS}	1,772	1,361	1	1,279	1,843	1,589

Tabelle 5: Verrechnungsfaktor für F_c aus dem Zwischenbericht

Diese Tabelle 5 war das Resultat der ersten Auswertungen, die im Zwischenbericht veröffentlicht wurden. Ein aktueller Ergebnisüberblick ist im Anhang angefügt.

Aufgrund von weiteren Ergebnissen muss die Tabelle 5 zum Teil entscheidend nachkorrigiert werden. Folgende Rechnung in Abbildung 6 soll zur Anschauung dienen:

WS-Dicke [mm]	20	20	18,95	26,4	18,95	18,3
WS	BFU-L	BFU-Q	FPY	KEQ-27	MDF	OSB
FcD (WZ2 n18 vf05 ae3) [N]	36,24	27,83	19,38	34,53	35,71	29,74
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,870	1,436	1,000	1,782	1,843	1,535
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,772	1,361	1,000	1,279	1,843	1,589
FcD (WZ2 n18 vf10 ae3) [N]	48,90	47,70	33,98	59,11	38,01	32,54
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,439	1,404	1,000	1,740	1,119	0,958
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,364	1,330	1,000	1,249	1,119	0,992
FcD (WZ2 n18 vf15 ae3) [N]	80,43	-	33,66	74,08	49,29	48,49
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	2,389	-	1,000	2,201	1,464	1,441
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	2,264	-	1,000	1,580	1,464	1,492
FcD (WZ2 n26 vf05 ae3) [N]	46,68	31,85	27,11	76,17	21,64	35,84
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,722	1,175	1,000	2,810	0,798	1,322
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,631	1,113	1,000	2,017	0,798	1,369
FcD (WZ2 n26 vf10 ae3) [N]	57,92	39,87	29,78	77,26	37,12	46,59
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,945	1,339	1,000	2,594	1,246	1,564
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,843	1,269	1,000	1,862	1,246	1,620
FcD (WZ2 n26 vf15 ae3) [N]	74,44	52,73	37,32	84,17	40,16	52,33
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,995	1,413	1,000	2,255	1,076	1,402
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,890	1,339	1,000	1,619	1,076	1,452
FcD (WZ2 n26 vf20 ae3) [N]	71,01	65,38	38,03	63,78	49,55	59,95
Faktor (auf FPY bezogen) [-]	1,867	1,719	1,000	1,677	1,303	1,576
Faktor (auf Dicke normiert) [-]	1,769	1,629	1,000	1,204	1,303	1,632
Summe (normierte Faktoren)	12,533	8,040	7,000	10,809	8,849	10,146
Teiler	7	6	7	7	7	7
norm. Faktor (arithm.Mittelwert)	1,790	1,340	1,000	1,544	1,264	1,449

Tabelle 6: neue Faktoren zum Vergleich von F_c bei unterschiedlichen WS

Es ist festzustellen, dass vor allem bei Kerto-Q und MDF ein sehr große Abweichung besteht. Bei Kerto-Q kann einer der Gründe die sehr unterschiedliche Qualität des Materials mit vielen großen Ästen in den Zwischenschichten etc. sein (Bauwerkstoff!). Etwas überraschend ist BFU, ebenfalls Bauwerkstoff, das beinahe reproduzierbare Ergebnisse zugelassen hat.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind noch einmal die alten und neuen Rechenfaktoren zusammengetragen.

	BFU-L	BFU-Q	FPY	Kerto-Q	MDF	OSB
$k_{HWS, alt}$	1,772	1,361	1	1,279	1,843	1,589
$k_{HWS, neu}$	1,790	1,340	1	1,544	1,264	1,449

Tabelle 7: Verrechnungsfaktor für F_c aus dem Zwischenbericht

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Schnittkraftmessungen unternommen, da nach wie vor dieses Gebiet noch nicht ausreichend erforscht ist. Gemessen am Ausgangsziel muss festgestellt werden, dass das Ziel aufgrund nicht vorhersehbarer Umstände nicht zu voller Zufriedenheit erreicht werden konnte. Gleichzeitig muss aber betont werden, dass man bei derartigen Messungen im HSC-Bereich an die Grenzen der Messtechnik stößt bzw. schon überschritten hat, sodass solche Messungen grundsätzlich kritisch beurteilt werden müssen. Verglichen mit der eingangs erwähnten Metallbearbeitung herrschen bei der HSC-Zerspanung um den Faktor 10 höhere Erregerfrequenzen, die den Eigenfrequenzen der Versuchsaufbauten idealerweise nicht zu nahe kommen sollten. Für künftige Messungen empfiehlt sich eine Beobachtung des Marktes der Messtechnik.

Allgemein

Derzeit sind mehrere Verfahren zur Ermittlung der Schnittkräfte bei der HSC-Zerspanung im Einsatz. Hier seien die neuesten Untersuchungen von Heisel [10] zu nennen, bei denen es weniger um die einzelnen Kraftverläufe geht, als mehr um das Ergebnis der mittleren Schnittkraft. Diese vom BMBF unterstützten Projekte werden in den nächsten Monaten weitergeführt und es bleibt abzuwarten, welche Erkenntnisse daraus gewonnen werden können.

Forschungsvorhaben AiF

Vorausschauend für Folgeprojekte sollen einige Aspekte der hier gewonnenen Erkenntnisse vermittelt werden. Die Maschinenauswahl ist von grundlegender Bedeutung, vor allem was die Disposition angeht. Diese beschriebenen Messungen wurden im Versuchslabor von der Firma *Leuco/Horb* am Neckar gemacht. Trotz der guten Zusammenarbeit bestand hier das Problem, dass aufgrund fehlender finanziellen Mitteln die Maschine für keinerlei Vergleichsversuche oder weitere klärende Untersuchungen genutzt werden konnte. In Bezug auf das Schwingverhalten mit der eingesetzten Stahlplatte war diese Maschine als überdurchschnittlich gut zu bewerten. Des Weiteren kommt der Leistungsmessung eine besondere Bedeutung zu, weil dadurch eine vergleichsweise einfache Auswertung ermöglicht wird. Die Werkzeuge sollten zu Beginn der Messungen nur aus einem einschneidigen geraden WZ bestehen. Sofern diese Versuche erfolgreich sind, wird auch die Auswertung komplexer Werkzeuge vereinfacht.

Weiterführende Ansätze

Ein von der Fachhochschule Rosenheim und *IXIST Messtechnik GmbH* vorgeschlagener Lösungsansatz bestimmt nicht die Reaktionskräfte auf der Holzplatte, sondern die Aktionskräfte im Werkzeug. Gemessen wird die umlaufende Schnittkraft, die auftretenden Momente, sowie das Schwingungsverhalten des Schnittwerkzeuges. Das Messelement erlaubt durch seine Konstruktion und die Verwendung von Dehnungsmessstreifen einen Frequenzbereich bis mindestens 3kHz bei einer Messsicherheit von 1%. Die Messstelle befindet sich am Werkzeugschaft, die Datenübertragung erfolgt durch eine geeignete Telemetrie. Diese Versuchsanordnung und die Messung der Kräfte am Werkzeug bietet eine Aussage ohne Einfluss von experimentellen Störgrößen (wie z.B. dem Schwingverhalten des Messtisches oder der Aufspannvorrichtung) und eröffnet weitere Möglichkeiten der Erfassung physikalischer Größen bei Schneidvorgängen.

Abschließend ist festzustellen, dass nur mit einem kostenintensiven Messaufbau und einer systematischen Vorgehensweise die Aufgabe sinnvoll bewältigt werden kann. Welche der angeführten Methoden zum Einsatz kommt muss dabei fallweise entschieden werden. Dieses Projekt kann als Grundstock für nachfolgende Forschungsvorhaben dienen, sofern ein ähnliches Ziel verfolgt wird.

Kooperation und Drittmittel

Allen voran gilt es der Fördergemeinschaft AiF für die finanzielle Unterstützung und für die gute Zusammenarbeit zu danken. Weiterhin sind hier die Firmen aufzuzählen, die als Sponsoren von Material und Equipment im Hintergrund auftraten. Neben den Firmen *Egger*, *Götz* und *Merk Holzbau* soll aber im Besonderen die Firma *Leuco* genannt sein, die sowohl die Werkzeuge als auch ihr Versuchslabor zur Verfügung stellten. Die nachfolgende Auflistung gibt einen Überblick über die erhaltenen Drittmittel:

- **Fa. Leuco**

Laborbenutzung	21.600,-
3 WZ (Sondermodelle)	3.168,-
Maschinenfachkraft	1.125,-
<hr/>	
Summe Fa. Leuco	25.893,-
<hr/> <hr/>	

- **Fa. Merk Holzbau**

Furnierschichtholz Kerto	≈ 250,-
<hr/>	
Summe Fa. Merk Holzbau	≈ 250,-
<hr/> <hr/>	

- **Fa. Egger**

Spanplatte FPY	≈ 40,-
MDF-Platten	≈ 50,-
OSB-Platten	≈ 75,-
<hr/>	
Summe Fa. Egger	≈ 165,-
<hr/> <hr/>	

- **Fa. Carl Götz GmbH**

Baufurniersperrholz BFU	≈ 100,-
<hr/>	
Summe Fa. Carl Götz GmbH	≈ 100,-
<hr/> <hr/>	

- **Gesamte Drittmittel**

Fa. Leuco Ledermann GmbH	25.893,-
Fa. Merk Holzbau	≈ 250,-
Fa. Egger	≈ 165,-
Fa. Carl Götz GmbH	≈ 100,-
<hr/>	
Summe Drittmittel	≈ 26.408,-
<hr/> <hr/>	

Rosenheim, den 26. Juni 2003

Prof. Dr.-Ing. G. Lachenmayr
 Prof. Dr.-Ing. F. Scholz
 Dipl.-Ing.(FH) M. Grabenmeier
 Dipl.-Ing.(FH) E. Winter
 Diplomant K. Hofmann

Anhang

Technische Daten

Die Technischen Daten		Optimat BOF 41/30	Optimat BOF 41/45
Type			
A = Länge [mm]		5.750	7.250
B = Breite [mm]		4.000	4.000
C = Höhe [mm]		2.400	2.400
Absaugleistung für Hauptspindel [m ³ /h]		5.000	5.000
Absaugverbindung [mm]		1 x Ø 250	1 x Ø 250
Prebluftverbrauch [NL/min]		ca. 300	ca. 300
Elektroanschlußwert [kW]		ca. 19	ca. 19
Max. Werkstücklänge [mm]	Einzelbetrieb 2-Fach-Belegung Pendelbetrieb (optional)	3.000 2 x 1.450* 2 x 900	4.500 2 x 2.200* 2 x 1.650
Max. Werkstückbreite [mm] ab einer Teilebreite von 1.150 mm am Anschlag hinten		1150/1300*	1150/1300*

*für Fräsbearbeitung mit Werkzeugdurchmesser 20 mm

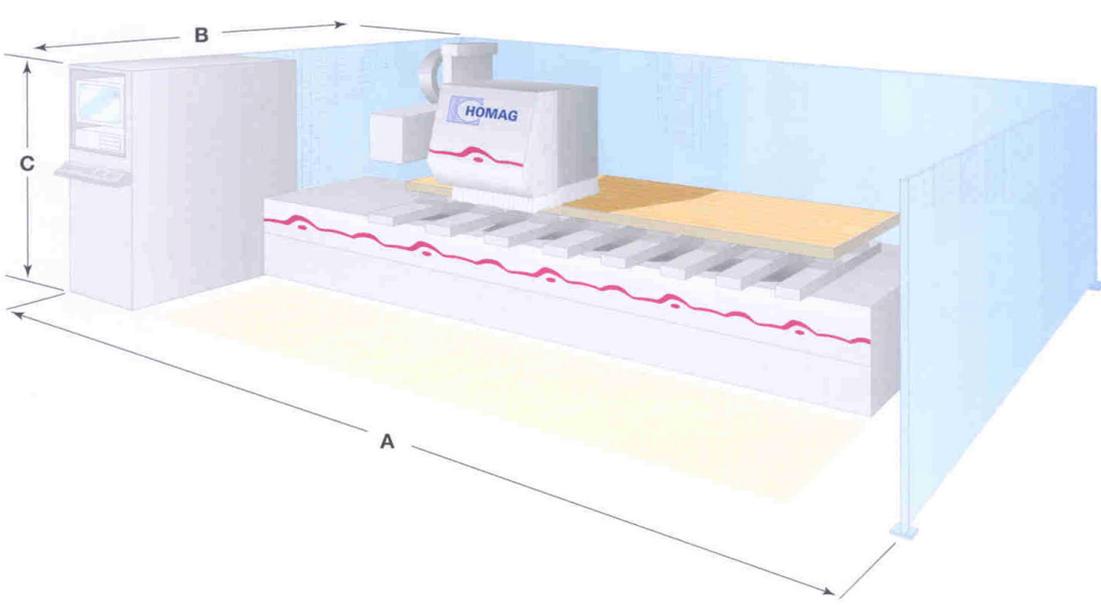


Abbildung 46: Datenblatt Homag BAZ [14]

3 IMA- Bohr- und Fräsbearbeitungszentrum



3.1 Einsatzbereiche und Maschinenkonzept des IMA BAZs in der ÜVA

Das Bohr- und Fräsbearbeitungszentrum BIMA-Quadroflex ist zur Bearbeitung plattenförmiger Werkstücke vorgesehen. Ebenso wie bei Maschinen zur Formatbearbeitung oder bei Kehlmaschinen, wird das Bearbeitungszentrum durch den Aufbau der nötigen Aggregate auf das Maschinengrundgerüst und die Auswahl der nötigen Werkzeuge an die Bearbeitungsaufgaben angepaßt.

Wichtigster Einsatzort der Bearbeitungszentren ist die Vormontage und die Komplettbearbeitung von Sonderfertigungen. Dort werden auftragsneutrale Teile mit den kommissionsbezogenen Bohrungen und Fräsungen versehen. Durch verschiedene Aggregate und den Einsatz einer CNC- Steuerung ist eine hohe Flexibilität bezüglich der Teilevielfalt und der Reihenfolge der Abarbeitung der Teile gegeben. Bedingt durch die Anzahl der Positioniervorgänge ergeben sich je nach Bearbeitungsaufgabe unterschiedliche Bearbeitungszeiten, die aber immer deutlich über denen von Spezialmaschinen liegen.

3.2 Technische Daten, Aufbau der Maschine

3.2.1 Spezifikation

- Hersteller: IMA- Norte Maschinenfabriken Klessmann GmbH, Postfach 1246, 32292 Lübbecke
- Typ: BIMA- Quadroflex
- Baujahr: 1995
- Ausführung / Ausstattung:
 - geschweißter Maschinentisch
 - Werkstückträger (Holmentisch) mit Vakuumspannung
 - Auslegerportal mit Werkzeugwechsler, Bündigfräsaggregat, Horizontalbohraggregat, Bohrbalken in X- und Y- Richtung, Nutsäge, Kantenanleimaggregat,
 - Steuerung: 2 1/2D Steuerung NUM 750B; Hersteller: NUM- Göttinger
- Arbeitsmaße:
 - Auflagetisch: 3000 * 1000 mm
 - mit Pendelbearbeitung: 2 * 1000 mm
 - ohne Pendelbearbeitung: 2*1400 mm
 - Werkstückdicke: max 75 mm



Bild 1: IMA CNC-Bearbeitungszentrum

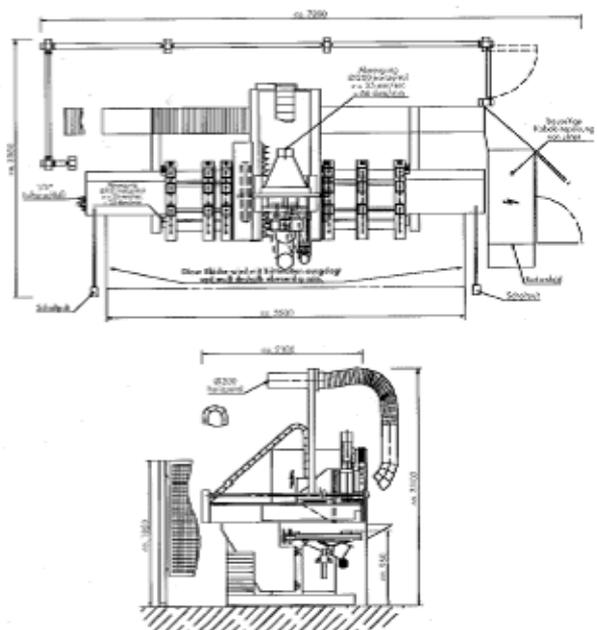


Bild 2: Ansichten der BIMA Quadroflex

Technische Daten		
maximaler Messbereich pro Kanal	-5.000 ... 5.000	N
Ansprechschwelle	< 0,01	N
Überlastbarkeit	50%	
Empfindlichkeit F_x	-7,5	pC/N
F_y	-7,5	pC/N
F_z	-3,5	pC/N
Steifheit F_x	1000	N/ μm
F_y	1000	N/ μm
F_z	350	N/ μm
Eigenfrequenz	3.500 ... 4.000	Hz
Linearität (maximaler Fehler)	< $\pm 1\%$	
Kapazität pro Kanal	140	pF
Isolationswiderstand	> 10^{13}	Ω
Betriebstemperaturbereich	0 ... 70	$^{\circ}\text{C}$

Tabelle 8: Technische Daten *Kistler* Messplattform [15]

Technische Daten		
Messbereiche, 12-stufig	-10 ... 10 : -500.000 ... 500.000	pC pC
Aufnehmerempfindlichkeit	0,1 ... 11.000	pC/M U
Spannungsausgang	-10 ... 10	V
Galvo-Ausgang	<60	mA
Isolationswiderstand (Eingang)	≈ 100	T Ω
Frequenzbereich mit Standardfilter	180	k Ω
bereichsabhängige Zeitkonstante		
short	0,01 ... 50	s
medium	1 ... 500	s
long	1.000 ... 100.000	s
Linearität	< $\pm 0,05\%$	
Genauigkeit der Bereiche	< $\pm 1\%$	
Kalibriereingang	1 $\pm 0,5\%$	pC/pV
Anschlüsse:		
Ein- und Ausgang	BNC negativ	
Galvo-Ausgang	Durchmesser 4mm	
Fernsteuerung	6-pol DIN 45322	
Betriebstemperatur	0 ... 50	$^{\circ}\text{C}$

Tabelle 9: Technische Daten *Kistler* Ladungsverstärker [16]

Accessories

This section list the available accessories that area available for the Accelerometer amplifier.

BNC-37D Input Cable Assembly – J02940

This cable assemble allows common accelerometer type transducers to be connected to a BNC input.

Specifications

Input Circuit (typical of each channel)

Single ended to common

Coupling: AC

Impedance: 1uF in series with 2 Megohm

Filter Type: Single Pole

High Pass Cut-off: -3dB at 0.1 Hz \pm 20%

Noise: 30 uVp-p with bandwidth=20KHz at \pm 1mVFS

Measurement Range

Input full scale range: \pm 10 mVFS to \pm 10 VFS

Variable Gain Range: x1 to x 0.1 of full scale

Drift with temperature: \pm 0.025 % of Reading / °C

Drift with time: \pm 0.005% of Reading /Month

Inaccuracy at (@) 25°C: calibrated \pm 0.1% of Reading

Excitation

Current Source: Off, 2mADC, 4mADC \pm 20%

Compliance Voltage: 28VDC \pm 10%

Filter

A software selectable filter of either Bessel or Butterworth using a switch capacitor topology.

Number of poles: 8

Range: 1Hz to 10KHz

Signal Conditioner Output

A/D Converter: 16 bits

Sample Rate: 100 KHz maximum per channel

Tabelle 10: Technische Daten DAStarNet Accelerometer [7]

Specifications

Input Circuit (typical of each channel)

Differential, non-isolated

Coupling: AC or DC, user selectable

Impedance: 1 Megohm each input to common

Common mode range:

- 1) 25 mV to 2.5 V \pm 5 volts without signal distortion
- 2) 2.5 V to 250 V \pm 250 volts without signal distortion

Maximum input voltage without damage: \pm 300 volts RMS

Insulation test voltage (IEC1010): 700 volts for 1 minute

Common Mode Rejection:

- 1) 25 mV to 2.5 V -55 dB minimum @ 60 Hz with 1k Ω unbalance
- 2) 2.5 V to 250 V -55 dB minimum @ 60 Hz with 1k Ω unbalance

Measurement Range

Linear Range: 25 mV to 250 volts full scale; VDC or peak AC.

Probe Excitation

Voltage: 12 volts \pm 5.0%. Excitation is unipolar with respect to circuit common.

Maximum current: 30 mA

Filter

Antialias/Noise Filter: Four pole Bessel with four fixed settings of 5 Hz, 500 Hz, 5 kHz and 25 kHz. Automatic default is 25 kHz. It is user selectable to any lower filter setting.

Zero Suppression

Automatic based upon Lo and Hi Span settings. Suppression is accomplished via a 16 BIT D/A Converter.

Measurement Span	Range
25 mV - 2.5 V	\pm 5 V with restriction of $(UFS + LFS) \leq 10$ V & $(UFS - LFS) \leq 2.5$ V
2.5 V - 250 V	\pm 250 V

Accuracy: \pm 0.25% of suppression voltage

Resolution: 0.01% of maximum suppression voltage

Stability: 0.002% of maximum suppression voltage

Signal Conditioner Output

A/D Converter: 12 BITS

Sample Rate: 400 kHz per channel maximum

Gain Accuracy: \pm 0.25% of span (exclusive of zero offset)

Zero Instability: \pm 0.1% of full scale / °C after 15 minute warm-up on the most sensitive range

Zero Offset: \pm 0.5% full scale @ Cal temperature of 23 °C

Non-linearity: 0.1% of full span

Noise: Less than 2% of full scale at 25 kHz

Frequency response:

Selectable in four decade steps: 5 Hz, 500 Hz, 5 kHz and 25 kHz, -3dB.

Filter type: 4 pole Bessel

Attenuation: 24 dB/octave (80 dB/decade).

Accuracy: \pm 15%

Tabelle 11: Technische Daten DAStarNet GeneralPort AC/DC Steckkarte [7]

Type	Quick response Type		Long distance Type		
Model	Flying lead	FIRH	FIRHPN	FIRM	FIRMPN
	Connector	FIRH-J	FIRHPN-J	FIRM-J	FIRMPN-J
Detection	Through-beam, Reflection (By fiber unit)				
Range	40mm (FR400, 500 series) ※1		120mm (FR505), 350mm (FT505) ※2		
Power supply	DC12V to 24V ±10%, Ripple 10% (max)				
Current consumption	30mA max.	35mA max	25mA max		
Output mode	NPN Open collector	PNP Open collector	NPN Open collector	PNP Open collector	
	Rating	NPN : Sink current 100mA (30V DC), PNP : Source current 100mA (30V DC)			
Operating mode	Light/Dark-ON Selectable				
	Timer	Timer function selectable (Off-Delay : 50ms)			
Response time	30 μs max.		250 μs max		
Hysteresis	10% max (Reflection)				
Light source	Red LED (660nm)				
LED indicator	OP.L : Operation (Red LED), UP : Stability (Green LED)				
Sensitivity	4 turns Vr.indicator				
Switch(SW)	LIGHT side...Light-on, DARK side...Dark-on,		TIME.....Off-delay : 50ms NORMAL...On/Off		
Circuit protection	Built in short circuit protection				
Case material	ABS resin				
Weight	80 g max				
Operating temp.	-25°C to +55°C (Storage : -40°C to +70°C)				
Humidity	35 to 85%RH				
Case protection	IP40				
Vibration	10 to 55Hz, 1.5mm Amplitude, 2 h, 3 Directions				

※1 : 5 × 5 cm White paper

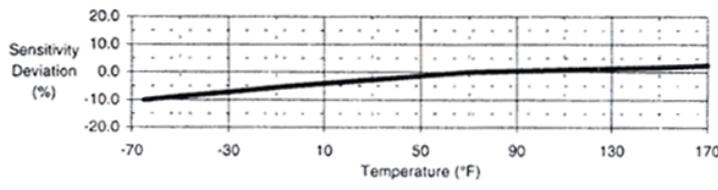
※2 : 10 × 10 cm White paper

Tabelle 12: Technische Daten Takex Lichtreflexsensor [26]

356B08			
<u>DYNAMIC PERFORMANCE</u>			
Voltage Sensitivity	mV/g [mV/(ms ⁻²)]	100 [10]	(±10%)
Measurement Range	±g pk [±ms ⁻² pk]	50 [490]	
Frequency Range: (±5%)	Hz	0.5 to 5,000	
(±10%)	Hz	0.3 to 6,500	
Mounted Resonant Frequency	kHz	≥20	
Resolution - Broadband	g pk [ms ⁻² pk]	0.0002 [0,002]	[1]
Amplitude Linearity	%	≤±1	[2]
Transverse Sensitivity	%	≤5	
<u>ENVIRONMENTAL</u>			
Shock Limit - All Axes (maximum)	±g pk [±ms ⁻² pk]	7,000 [68 600]	
Operating Temperature Range	°F [°C]	-65 to +170 [-54 to +77]	
Temperature Coefficient of Sensitivity	%/°F [%/°C]	See Graph	[1]
Strain Sensitivity	g/με [(ms ⁻²)/με]	0.001 [0,01]	[1]
<u>ELECTRICAL</u>			
Excitation Voltage/Constant Current	VDC/mA	20-30/2-20	
Output Impedance	ohms	<200	
Output Bias	VDC	7 to 12	
Discharge Time Constant	sec	1.5 to 3.5	
Warm Up Time (within 10% of output bias)	sec	<10	
Spectral Noise: (1 Hz)	μg/√Hz [(μms ⁻²)/√Hz]	60 [588]	[1]
(10 Hz)	μg/√Hz [(μms ⁻²)/√Hz]	20 [196]	[1]
(100 Hz)	μg/√Hz [(μms ⁻²)/√Hz]	5 [49]	[1]
(1 kHz)	μg/√Hz [(μms ⁻²)/√Hz]	2 [19]	[1]
(10 kHz)	μg/√Hz [(μms ⁻²)/√Hz]	1 [9,8]	[1]
<u>MECHANICAL</u>			
Sensing Element	material/geometry	Ceramic/Shear	
Housing	material/sealing	Aluminum/Epoxy	
Size (cube)	in [mm]	0.80 [20,0]	
Weight	oz [gm]	0.72 [20]	[1]
Electrical Connector	type/location	4-Pin Male/Side	
Mounting Thread	size	10-32	



[3]



All specifications are at room temperature unless otherwise specified.

In the interest of constant product improvement, we reserve the right to change specifications without notice.

ICP® is a registered trademark of PCB Piezotronics, Inc. DD032 Rev.F 8/6/98

Tabelle 13: Technische Daten PCB Beschleunigungsaufnehmer [21]

Ergebnisse Teil 1 (Horb, Homag)

WS	WZ	n	vf	ae	Nr.	FcD [N]	Fmax. [N]	hm [mm]	kc0,5 [N/mm ^{1,5}]	kc [N/mm]
BFU-L	WZ2	18	5	1	1	16,33	55,35	0,018	5,77	45,42
BFU-L	WZ2	18	5	3	1	36,24	110,40	0,031	9,73	59,16
BFU-L	WZ2	18	5	6	1	58,23	159,30	0,044	13,16	69,13
BFU-L	WZ2	18	10	3	1	48,90	159,70	0,063	9,29	39,92
BFU-L	WZ2	18	15	3	1	80,43	283,00	0,094	12,48	43,78
BFU-L	WZ2	26	5	3	1	46,68	178,10	0,022	15,06	109,90
BFU-L	WZ2	26	10	3	1	57,92	208,10	0,044	13,21	68,17
BFU-L	WZ2	26	15	3	1	74,44	239,20	0,065	13,86	58,41
BFU-L	WZ2	26	20	3	1	71,01	246,60	0,087	11,45	41,79
BFU-Q	WZ2	18	5	1	1	15,65	53,52	0,018	5,53	43,53
BFU-Q	WZ2	18	5	3	1	27,83	78,37	0,031	7,48	45,44
BFU-Q	WZ2	18	5	6	1	48,54	151,70	0,044	10,97	57,63
BFU-Q	WZ2	18	10	3	1	47,70	189,60	0,063	9,06	38,94
BFU-Q	WZ2	18	15	3	1	-	-	0,094	-	-
BFU-Q	WZ2	26	5	3	1	31,85	110,00	0,022	10,27	74,98
BFU-Q	WZ2	26	10	3	1	39,87	171,50	0,044	9,10	46,93
BFU-Q	WZ2	26	15	3	1	52,73	188,40	0,065	9,82	41,38
BFU-Q	WZ2	26	20	3	1	65,38	210,50	0,087	10,55	38,48
FPY	WZ2	18	5	1	1	18,25	62,78	0,018	6,79	53,43
FPY	WZ2	18	5	3	1	19,38	67,16	0,031	5,69	34,59
FPY	WZ2	18	5	6	1	50,34	149,50	0,044	12,02	63,16
FPY	WZ2	18	10	3	1	33,98	189,50	0,063	7,06	30,32
FPY	WZ2	18	15	3	1	33,66	214,80	0,094	5,71	20,02
FPY	WZ2	26	5	3	1	27,11	93,73	0,022	9,23	67,35
FPY	WZ2	26	10	3	1	29,78	93,24	0,044	7,17	36,99
FPY	WZ2	26	15	3	1	37,32	131,20	0,065	7,34	30,91
FPY	WZ2	26	20	3	1	38,03	124,00	0,087	6,47	23,62
Kerto-Q	WZ2	18	5	1	1	29,70	116,00	0,018	7,81	61,41
Kerto-Q	WZ2	18	5	3	1	34,53	121,90	0,031	6,87	41,77
Kerto-Q	WZ2	18	5	6	1	44,62	105,40	0,044	7,47	39,24
Kerto-Q	WZ2	18	10	3	1	59,11	199,00	0,063	9,42	44,40
Kerto-Q	WZ2	18	15	3	1	74,08	204,00	0,094	8,71	30,55
Kerto-Q	WZ2	26	5	3	1	76,17	209,60	0,022	18,62	135,80
Kerto-Q	WZ2	26	10	3	1	77,26	187,70	0,044	13,35	68,89
Kerto-Q	WZ2	26	15	3	1	84,17	191,80	0,065	11,88	50,03
Kerto-Q	WZ2	26	20	3	1	63,78	180,00	0,087	7,79	28,44

Tabelle 14: Ergebnisse Teil 1

Ergebnisse Teil 2 (Horb, Homag)

WS	WZ	n	vf	ae	Nr.	FcD [N]	Fmax. [N]	hm [mm]	kc0,5 [N/mm ^{1,5}]	kc [N/mm]
OSB	WZ2	18	5	1	1	24,05	69,61	0,018	9,29	73,10
OSB	WZ2	18	5	3	1	29,74	103,60	0,031	8,73	53,07
OSB	WZ2	18	5	6	1	57,94	142,40	0,044	14,31	75,18
OSB	WZ2	18	10	3	1	32,54	174,00	0,063	6,76	29,04
OSB	WZ2	18	15	3	1	48,49	195,70	0,094	8,22	28,84
OSB	WZ2	26	5	3	1	35,84	112,60	0,022	12,64	92,21
OSB	WZ2	26	10	3	1	46,59	175,50	0,044	11,61	59,93
OSB	WZ2	26	15	3	1	52,33	169,40	0,065	10,65	44,88
OSB	WZ2	26	20	3	1	59,95	184,80	0,087	10,57	38,56
MDF	WZ2	18	5	1	1	16,30	44,90	0,018	6,07	47,72
MDF	WZ2	18	5	3	1	35,71	83,85	0,031	10,10	61,38
MDF	WZ2	18	5	6	1	37,63	86,84	0,044	8,90	46,78
MDF	WZ2	18	10	1	1	20,38	61,90	0,036	5,36	29,83
MDF	WZ2	18	10	3	1	38,01	97,37	0,063	7,60	32,67
MDF	WZ2	18	10	6	1	66,30	153,40	0,088	11,15	41,43
MDF	WZ2	18	15	1	1	20,51	60,67	0,054	4,41	20,02
MDF	WZ2	18	15	3	1	49,29	138,80	0,094	8,05	28,24
MDF	WZ2	18	15	6	1	68,68	177,50	0,133	9,43	28,61
MDF	WZ2	26	5	1	1	15,28	47,30	0,013	6,83	64,49
MDF	WZ2	26	5	3	1	21,64	69,61	0,022	7,35	53,62
MDF	WZ2	26	5	6	1	50,80	122,40	0,031	14,51	91,52
MDF	WZ2	26	10	1	1	21,00	56,55	0,025	6,64	44,41
MDF	WZ2	26	10	3	1	37,12	110,50	0,044	8,91	45,99
MDF	WZ2	26	10	6	1	68,71	167,40	0,062	13,40	61,89
MDF	WZ2	26	15	1	1	23,06	61,57	0,038	5,95	32,44
MDF	WZ2	26	15	3	1	40,16	121,00	0,065	7,87	33,17
MDF	WZ2	26	15	6	1	76,67	194,10	0,092	12,64	46,04
MDF	WZ2	26	20	1	1	27,27	82,72	0,050	6,11	28,83
MDF	WZ2	26	20	3	1	49,55	147,00	0,087	8,41	30,70
MDF	WZ2	26	20	6	1	96,01	227,00	0,123	13,71	43,24

Tabelle 15: Ergebnisse Teil 2

Ergebnisse Teil 3 (Rosenheim, IMA)

WS	WZ	n	vf	ae	Nr.	FcD [N]	Fmax. [N]	hm [mm]	kc0,5 [N/mm^{1,5}]	kc [N/mm]
FI	WZ2	18	5	1	1	13,11	62,52	0,018	4,432	33,42
FI	WZ2	18	5	3	1	46,95	149,10	0,031	12,03	69,87
FI	WZ2	18	5	6	1	75,68	196,20	0,044	16,35	82,35
BU	WZ2	18	5	1	1	29,58	105,00	0,018	9,156	69,03
BU	WZ2	18	5	3	1	69,00	203,50	0,031	16,18	94,01
BU	WZ2	18	5	6	1	83,72	237,80	0,044	16,56	83,4
EI	WZ2	18	5	1	1	20,60	73,25	0,018	6,319	47,64
EI	WZ2	18	5	3	1	45,47	153,40	0,031	10,6	61,73
EI	WZ2	18	5	6	1	80,40	278,60	0,044	15,69	79,01

Tabelle 16: Ergebnisse Teil 3

Literatur

- [1] **Engl, Albert / Leider, Martin / Lachenmayr, Georg [u.a.]:** *Vorlesungsskriptum Holzbearbeitung*, Rosenheim, 1999
- [2] **Ettelt, Bernhard:** *Sägen Fräsen Hobeln Bohren*, DRW-Verlag Stuttgart, k.A. zur Auflage, 1987
- [3] **Friebe, Kai:** *Untersuchung zur Spanraumfüllung an Schaftwerkzeugen für Bearbeitungszentren zur Hochleistungsbearbeitung*, Diplomarbeit an der FH Rosenheim im Sommersemester 2002
- [4] **Gittel, Hans-Jürgen:** *Werkzeugtechnologie für die spanende Hochleistungsbearbeitung*, Auszug von den 6. Rosenheimer Holztechnischen Tagen, Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 04/2002, S. 25–27 (Jahresausgabe), 2002
- [5] **Gittel, Hans-Jürgen:** *Der Qualität auf der Spur*, Aus: dds – Das Magazin für Möbel und Ausbau Stuttgart, Heft 09/2001, S. 118–121, 2001
- [6] **Gittel, Hans-Jürgen:** *Potentiale und Risiken der HSC-Bearbeitung von Holz und Holzwerkstoffen*, Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 10/2000, S. 16–18 (Jahresausgabe), 2000
- [7] **Gould Nicolet Instrument Systems Inc.:** *7700 Amplifiers*, Gould Nicolet Instrument Systems Inc. Valley View(Ohio)/USA, 2000
- [8] **Gould Nicolet Instrument Systems Inc.:** *DAStarNet Installation Manual*, Gould Nicolet Instrument Systems Inc. Valley View(Ohio)/USA, 2000
- [9] **o.V.:** *Praktikumsunterlagen Fertigungstechnik I*, Rosenheim, 1999
- [10] **Heisel, Uwe:** *Lösungsansätze zur Realisierung der Hochleistungsbearbeitung*, Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 01–02/2003, S. 56–61, 2003
- [11] **Heisel, Uwe:** *Hochleistungsbearbeitung – eine komplexe Herausforderung für Hochschule und Industrie*, Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 05/2001, S. 24 (Jahresausgabe), 2001
- [12] **Heisel, Uwe / Dietz, U. / Tröger, Johannes:** *Am Schneidkeil wirkende Kräfte*, Teil 1 bis 3 Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 05–08/1995, S. 24 (Jahresausgabe), 1995

-
- [13] **Homag Holzbearbeitungssysteme AG:** *Homag Holzbearbeitungssysteme AG*, März 2003
URL: <http://www.homag-group.com/deutsch/homag/unterneh/unter1.htm>
- [14] **Homag Holzbearbeitungssysteme AG:** *Technische Daten (Homag BOF 41 K)*, Homag Holzbearbeitungssysteme AG Schopfloch, 2003
- [15] **Kistler Instrumente AG:** *Bedienungsanleitung Quarzkristall 3-Komponenten-Dynamometer Typ 9257 A*, Kistler Instrumente AG Winterthur/Schweiz, o.J.
- [16] **Kistler Instrumente AG:** *Betriebs- und Serviceanleitung Ladungsverstärker Typ 5007*, Kistler Instrumente AG Winterthur/Schweiz, 1979
- [17] **Kuchling, Horst:** *Taschenbuch der Physik*, Fachbuchverlag Leipzig im Carl-Hanser-Verlag München Wien, 16. Auflage, 1996
- [18] **Lachenmayr, Georg:** *Zerspanungsprozesse neuartiger Holzwerkstoffe*, nicht veröffentlicht, S.1–3, 2001
- [19] **Maier, Gerhard:** *Holzspanungslehre und werkzeugtechnische Grundlagen*, Vogel-Verlag Würzburg, 1. Auflage, 2000
- [20] **Paintner, Stefan:** *Theoretische und experimentelle Ermittlung von Zerspanungskräften*, Diplomarbeit an der FH Rosenheim im Sommersemester 1996
- [21] **PCB Piezotronics Inc.:** *ICP Accelerometer Installation and Operating Manual*, PCB Piezotronics Inc. NewYork/USA, 2000
- [22] **Ressel, Jörg / Gressel, Peter:** *Vorlesungsskriptum Holzwerkstoffkunde*, Rosenheim, 1992
- [23] **Saljé, E. / Stühmeier, W.:** *Rechnergestützte Schnittkraftmessung beim Fräsen*, Aus: HOB Ludwigsburg, Heft 11/1983, S. 28–34, 1983
- [24] **Schanz, Günther W.:** *Sensoren – Fühler der Messtechnik*, Dr. Alfred Hüthig Verlag GmbH Heidelberg, 2. Auflage, 1988
- [25] **Stearns, Samuel D.:** *Digitale Verarbeitung analoger Signale*, R. Oldenbourg Verlag München Wien, 4. Auflage, 1988
- [26] **Takenaka Electronic Industrial Co., Ltd. :** *Instruction Manual*, Takex Kyoto/Japan, o.J.
- [27] **WuBler, Oliver:** *Meßaufbau und experimentelle Untersuchung der Zerspan-Kräfte bei der Hochgeschwindigkeitszerspannung von Holzwerkstoffen*, Diplomarbeit an der FH Rosenheim im Wintersemester 1995/1996

- [28] **Zauner, Franz:** *Gerätebedienung und experimentelle Messung zum Ermitteln der Zerspankräfte bei Holzwerkstoffen*, Diplomarbeit an der FH Rosenheim im Wintersemester 1995/1996