



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Kamil Nocon

Entwicklung eines Erweiterungsmoduls zum Prüfen von Außenrundscheifwerkzeugen an einer Flachscheifmaschine

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion

in Zusammenarbeit mit:

Saint-Gobain Winter Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Stefan Wiesemann

Zweitprüfer: Prof. Andreas Baumgart

Verfasser: Kamil Nocon

Matrikelnummer: 1916799

Abgabedatum: 24.02.2015

Abstract

In this bachelor thesis, a module for the flat grinding machine Profimat MT408 from the company Blohm Jung GmbH is going to be developed. With this module, tools for an external cylindrical grinding machine, will be tested on a flat grinding machine. A virtual 3D model of the module on Figure 0.1 is going to be created with CAD software. Subsequently, the CAD model will be analyzed using the finite element method for static and dynamic loads. In addition, a natural frequency analysis is performed, in order to determine the critical frequencies of the module. The benefits and costs of such a module are explained briefly in conclusion.

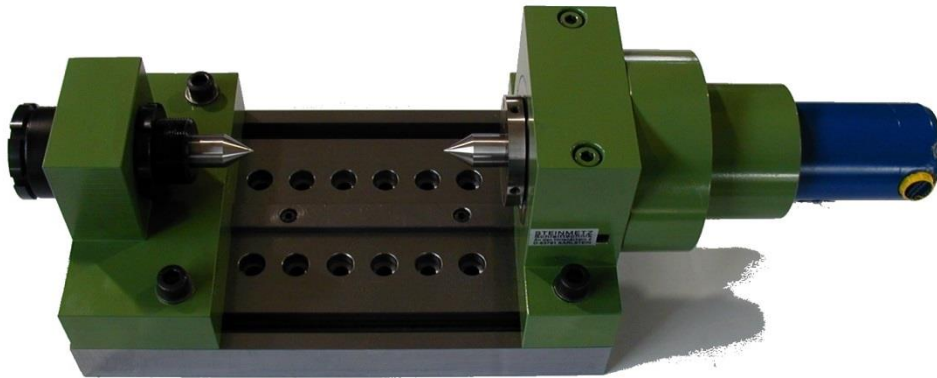


Abbildung 0.1: Circular grinder RSV410 Steinmetz

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird für die Flachsleifmaschine Profimat MT408 der Firma Blohm Jung GmbH ein Modul entwickelt, mit dem Werkzeuge für das Außenrundsleifen an einer Flachsleifmaschine anwendungsnah getestet werden. Dafür wird mithilfe einer CAD Software ein virtuelles 3D Modell des Moduls aus Abbildung 0.2 erstellt. Anschließend wird das CAD-Modell anhand der Finiten Elemente Methode auf statische und dynamische Belastungen analysiert. Zudem wird eine Eigenfrequenzanalyse durchgeführt, um die kritischen Frequenzen des Moduls zu bestimmen. Die Nutzen und Kosten eines solchen Moduls werden abschließend kurz erläutert.

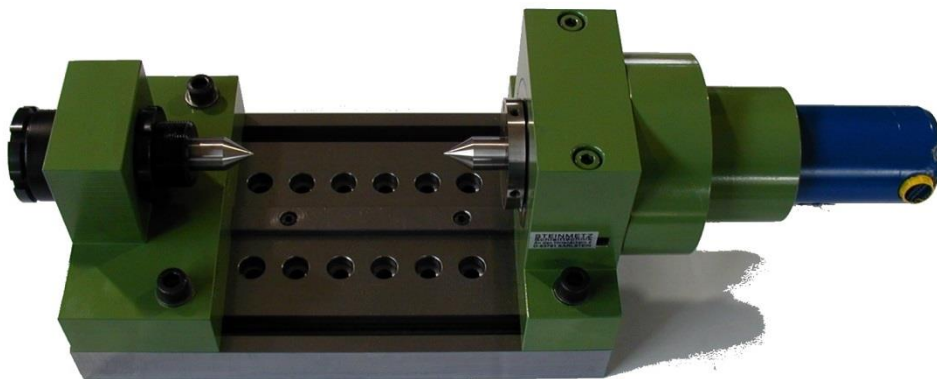


Abbildung 0.2: Rundsleifvorrichtung RSV410 von Steinmetz

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen.....	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Aufgabenstellung	2
1.2 Inhalt der Arbeit.....	2
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Die Finite-Elemente-Methode.....	4
2.1.1 Statisches Verhalten.....	6
2.1.2 Schwingungsverhalten	6
2.1.3 Dynamisches Verhalten	7
2.2 Flachsleifverfahren.....	8
2.3 Außenrundsleifverfahren	13
2.4 Vergleich der beiden Schleifverfahren.....	17
3 Auswertung der Ergebnisse.....	26
3.1 Rechercheergebnisse.....	27
3.2 CAD-Modell der Rundsleifvorrichtung.....	28
3.3 FE-Analyse der Rundsleifvorrichtung	36
3.3.1 Statische Analyse	39
3.3.2 Eigenwertanalyse.....	48
3.3.3 Dynamische Analyse.....	57

3.4	Optimierung	61
3.5	Kostenanalyse.....	62
4	Zusammenfassung	63
	Literaturverzeichnis.....	65

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0.1: Circular grinder RSV410 Steinmetz.....	III
Abbildung 0.2: Rundschleifvorrichtung RSV410 von Steinmetz.....	IV
Abbildung 2.1: Beispiel eines FE-Netzes in Catia	5
Abbildung 2.2: Eingriffsverhältnisse der beiden Flachsleifverfahren [1].....	8
Abbildung 2.3: Schleifvorgang beim Tief- und Pendelschleifen [1].....	9
Abbildung 2.4: Isometrische Skizze einer Blohm Profimat Maschine [5].....	11
Abbildung 2.5: Technische Daten der Blohm Profimat MT Reihe [5]	12
Abbildung 2.6: Leistungsverlauf der Blohm Profimat MT Maschinen [5].....	12
Abbildung 2.7: Skizze vom Außenrund-Umfangs-Querschleifverfahren [1].....	13
Abbildung 2.8: Technische Daten der Studer S31 Rundschleifmaschine [6].....	16
Abbildung 2.9: Wesentliche Kenngrößen beim Schleifvorgang [1].....	17
Abbildung 2.10: Kontaktbedingungen beim Plan- und Außenrundsleifen [1]....	19
Abbildung 2.11: Verschiedene Schleifverfahren und ihre Kenngrößen [1].....	20
Abbildung 2.12: Kenngrößen mit den zugehörigen Formeln [1]	20
Abbildung 2.13: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf Arbeitsergebnis [1].....	22
Abbildung 2.14: Normalkraft bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]	23
Abbildung 2.15: Verschleiß bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1].....	24
Abbildung 2.16: Temperaturverlauf bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1] ...	24
Abbildung 2.17: Oberflächenrauheit bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]....	25
Abbildung 3.1: Technische Zeichnung der Rundschleifmaschine RSV410.....	29
Abbildung 3.2: Bodenplatte der Drehvorrichtung.....	30
Abbildung 3.3: Kleiner Reitstock vom RSV410	31
Abbildung 3.4: Fertiges CAD-Modell der Werkstückdrehvorrichtung	32
Abbildung 3.5: Die Stahlscheibe welche als Werkstück dient.....	33
Abbildung 3.6: Welle mit zwei Werkstücken	34
Abbildung 3.7: Zusammengesetzte CAD-Modelle	35
Abbildung 3.8: oben: grobes Netz (4-24mm), unten: feines Netz (0,5-5mm).....	37
Abbildung 3.9: Finales FE-Netz	38
Abbildung 3.10: Kraftangriffspunkt am Werkstück	42
Abbildung 3.11: oben: Verteilte Last, unten: Streckenlast	43
Abbildung 3.12: Verhalten des Systems bei genannter Belastung.....	45

Abbildung 3.13: Vergrößerte Darstellung der Belastung an den Spitzen	46
Abbildung 3.14: Spannungsverlauf in der Werkstückscheibe.....	47
Abbildung 3.15: Feste Einspannung am Boden des CAD-Modells.....	49
Abbildung 3.16: Tabellarische Abbildung der Eigenfrequenzen.....	50
Abbildung 3.17: Eigenform 1 bei 802,008 Hz	51
Abbildung 3.18: Eigenform 2 bei 1029,56 Hz	52
Abbildung 3.19: Eigenform 3 bei 1284,09 Hz	53
Abbildung 3.20: Eigenform 4 bei 1475,72 Hz	54
Abbildung 3.21: Eigenform 5 bei 2141,11 Hz	55
Abbildung 3.22: Eigenform 6 bei 2386,06 Hz	56
Abbildung 3.23: Ausgewählter Knotenpunkt	57
Abbildung 3.24: Auslenkung in m	58
Abbildung 3.25: Auslenkung in m/s	59
Abbildung 3.26: Auslenkbeschleunigung in m/s^2	60

Verzeichnis der Abkürzungen und Formelzeichen

Griechische Formelzeichen

π	Kreiszahl pi	
μ	Schnittkraftverhältnis	-

Lateinische Formelzeichen

a_e	Zustellbetrag	mm
$a_{e\text{ ges}}$	Gesamtzustellung	mm
a_p	Eingriffsbreite (Schnitteingriff)	mm
$b_{s\text{ eff}}$	Breite des aktiven Schleifscheibenprofils	mm
b_{sa}	Breite der Ausfunkzone	mm
d_{eq}	äquivalenter Schleifscheibendurchmesser	mm
d_s	Schleifscheibendurchmesser	mm
d_{w0}	Werkstückdurchmesser vor der Bearbeitung	mm
d_w	Werkstückdurchmesser (Bearbeitungs-, Schleifdurchmesser)	mm
d_{wA}	Ausgangsdurchmesser	mm
d_{wE}	Durchmesser nach der Bearbeitung	mm
f_a	axialer Vorschub	mm
h_{wA}	Anfangshöhe	mm
h_{wE}	Endhöhe	mm
k_i	Federkdämpfung	N/m
l_g	geometrische Kontaktlänge	mm
l_w	Werkstücklänge	mm
n_w	Werkstückdrehzahl	s ⁻¹
n_s	Schleifscheibendrehzahl	s ⁻¹
q_s	Geschwindigkeitsquotient	-
$q(y)$	Streckenlast (radial)	Nm
$q(z)$	Streckenlast (tangential)	Nm
r_s	Schleifscheibenradius	mm
t_c	Schnittzeit, Schleifzeit	s

u_i	Auslenkung	m
v_{fr}	radiale Vorschubgeschwindigkeit, Einstechgeschwindigkeit	mm/s
v_s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit	m/s
v_w	Werkstückgeschwindigkeit (Werkstückumfangs- geschwindigkeit)	m/s
z	Bearbeitungszugabe, (Schleif-) Aufmaß (bei runden Werkstücken durchmesserbezogen)	mm
F_i	Federkraft	N
F_N	Normalkraft	N
F_T	Tangentialkraft	N
M_s	Drehmoment an der Schleifscheibe	Nm
U_a	Überschliffzahl der Ausfunkzone	-
Q_w	Zeitspannungsvolumen (Zerspanleistung)	mm ³ /s
Q'_w	bezogenes Zeitspannungsvolumen (bezogene Zerspanleistung)	mm ³ /(mm·s)
P_s	Leistung an der Schleifscheibe	kW
V_w	Zerspannungsvolumen	mm ³
V'_w	bezogenes Zerspannungsvolumen	mm ³ /mm

1 Einleitung

In der Industrie werden oftmals Maschinen verwendet, die für eine Aufgabe vorgesehen sind, welche keine andere Maschine übernehmen kann. Diese Maschinen sind in ihrem Aufgabenbereich beschränkt. Ändert sich jedoch das Arbeitsverfahren oder wird ein anderes Ergebnis gewünscht, ist die Anschaffung einer neuen Maschine nötig, die diese Ziele erreicht.

Bei der Firma Saint-Gobain Winter Diamantwerkzeuge GmbH & Co. KG in Nordstedt werden im Bereich der Qualitätsprüfung, Schleifscheiben an Metallwerkstücken getestet. Diese Schleifvorgänge werden an Außenrund- und Flachscheifmaschinen durchgeführt.

Abgesehen vom Bearbeitungsvorgang, liegt der grundlegenden Unterschied in der Schnittgeschwindigkeit. Flachscheifmaschinen können eine ca. 3-mal so hohe Schnittgeschwindigkeit wie Rundschleifmaschinen erreichen. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit führt zu besserer Oberflächenqualität, da die Rauigkeit abnimmt [1]. Es bietet sich also an die Versuchsreihen, die sonst an einer Rundschleifmaschine durchgeführt werden, auf eine Flachscheifmaschine zu verlagern, um zu prüfen, ob eine Steigerung der Oberflächenqualitäten erreicht wird.

Für solche Vorgänge gibt es Module, durch die Maschinen in ihrer Funktionalität erweitert werden können. So kann eine Flachscheifmaschine um die Außenrundschleifoption erweitert werden. Die Anschaffungskosten für ein solches Modul sind um ein vielfaches geringer als die einer weiteren Schleifmaschine. So bleibt, durch den geringen Aufwand beim Ein- und Ausbau, die Verwendung der Maschine flexibel.

Vor der Anschaffung solch eines Erweiterungsmoduls sollte die Realisierbarkeit geprüft werden, da bei Maschinen statische und dynamische Belastungsfälle auftreten. Dabei gilt es diese Belastungen zu ermitteln und zu bewerten. Hierfür wird sich der Möglichkeiten der Finite-Elemente-Methode (FEM) bedient.

Die FEM ermöglicht es Berechnungen am Computer durchzuführen, welche das Verhalten von Strukturen unter Einfluss bestimmter Belastungen beschreiben.

Hierzu wird in einem CAD-Programm, ein 3D-Modell vom jeweiligen Objekt hergestellt, welches anschließend mit Hilfe der FEM analysiert wird. Anhand dieser Daten, kann das Bauteil, noch vor der Herstellung optimiert werden.

1.1 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit wird ein Erweiterungsmodul (im folgenden Rundscheifvorrichtung RSV410 genannt) zuerst mit der CAD Software Catia V5 als 3D SOLID konstruiert und anschließend in der *Generative Structure Analysis* von Catia der FE-Analyse unterzogen. Dabei wird das Modul auf statische und dynamische Belastungen hin geprüft. Des Weiteren wird eine Schwingungsanalyse durchgeführt um die Eigenfrequenzen zu bestimmen. Zum Schluss wird auf die Optimierungsmöglichkeiten eingegangen und eine Kostenaufstellung erstellt.

1.2 Inhalt der Arbeit

In Kapitel 2 werden die theoretischen Grundlagen behandelt. Dabei werden die notwendigen Methoden und Fachbegriffe erklärt. Im ersten Teil wird beschrieben was die Finite-Elemente-Methode ist und worin sie ihren Ursprung hat. Es wird erläutert was ein FE-Netz ist, wie man es erstellt und wozu es dient. Anschließend wird das statische-, dynamische- und Schwingungsverhalten der FE-Analyse definiert. Daraufhin folgt in diesem Kapitel die Beschreibung zweier Schleifverfahren. Es wird erläutert was eine Flachscheifmaschine ist, dafür wird als Beispiel eine Schleifmaschine der Firma Blohm Jung GmbH vorgestellt. Weiterhin wird das Außenrundscheifen anhand einer Schleifmaschine der Firma Studer beschrieben. Den Abschluss dieses Kapitels bilden ein Vergleich der beiden Schleifverfahren und ihrer Bedeutung für diese Arbeit.

In Kapitel 3 werden die Ergebnisse vorgestellt und bewertet. Zunächst erfolgt die Beschreibung einer Recherchephase, in der nach einer Rundschleifvorrichtung gesucht wurde. Anschließend folgt eine detaillierte Beschreibung der Konstruktion von CAD-Modellen im Programm CATIA. Dabei wird erläutert wie CAD-Modelle und FE-Analyse miteinander zusammenhängen und welche Fehler bei der Modell Konstruktion vermieden werden sollten um eine reibungslose Analyse zu gewährleisten. Daraufhin folgt die FE-Analyse in der die Reaktionen der Rundschleifvorrichtung auf Belastungen sowie die Aufzählung der Eigenwerte und –formen erfolgt. Abschließend wird auf optionale Optimierungsmöglichkeiten am Modell eingegangen gefolgt von einer kurzen Kostenaufstellung.

Den Abschluss bildet Kapitel 4 in dem eine Zusammenfassung gezogen und eine neutrale Meinung zu den Ergebnissen getroffen wird.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit notwendigen Grundlagen erläutert. Um die Berechnungen und Ergebnisse verstehen zu können, muss zuvor geklärt werden was die FEM ist und wozu sie verwendet wird. Dabei werden nur die folgenden Bereiche der FEM verwendet: Statisches Verhalten, dynamisches Verhalten und das Schwingungsverhalten (Eigenwertanalyse). Anschließend wird auf die Grundlagen des Außenrund- und Flachsleifens eingegangen und ein Vergleich zwischen beiden Verfahren gezogen.

2.1 Die Finite-Elemente-Methode

Der Begriff Finite-Elemente-Methode (FEM) wurde das erste Mal auf einer öffentlichen Konferenz von R. Clough im Jahre 1960 benutzt. Seitdem hat die FEM eine große Entwicklung durchgemacht, die hauptsächlich dem Fortschritt des Personal Computers (PC's) zu verdanken ist. Das liegt unter anderem daran, dass bei komplexen Bauteilen sehr viel Rechenleistung gefordert wird. Die Finite-Elemente-Methode wird seit vielen Jahren im Ingenieurwesen benutzt um weitestgehend realitätsnahe Simulationen in der Entwicklung durch zu führen, damit Produktions- und Entwicklungszeit genauso wie deren Kosten eingespart werden können. Dadurch ist es möglich Produkte auf ihre Tauglichkeit zu testen, noch bevor diese gebaut werden, um etwaige Änderungen während des Entwicklungsprozesses ohne großen Aufwand vor zu nehmen. Es ist ein Verfahren, welches Erfahrung und ein gewisses Grundwissen im Ingenieurwesen voraussetzt, um effektiv eingesetzt werden zu können [2] [3] [4].

Häufige Fehler sind die unkorrekte Annahme der Randbedingungen, eine zu stark vereinfachte Körpergeometrie, die zu Spannungsspitzen führt, oder auch ein zu

grob gewähltes Netz durch welches man keine verlässlichen Aussagen treffen kann.

Die FEM ist ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Verschiebungen, welches auch als Matrizenverschiebungsverfahren bezeichnet wird. Zur Berechnung dieser Verschiebungen hält sich die FEM an das Hooke'sche Gesetz [2] [3] [4]:

$$F = k \cdot u \quad (2.1)$$

Es wird über ein vorhandenes 3D-CAD-Modell ein FE-Netz gelegt, welches aus Finiten-Elementen besteht, in Form von gerad- oder krummlinig begrenzten Dreiecken, Vierecken, oder höheren geometrischen Formen (Abbildung 2.1). Für jedes dieser Elemente werden Näherungsansätze getroffen [2] [4].

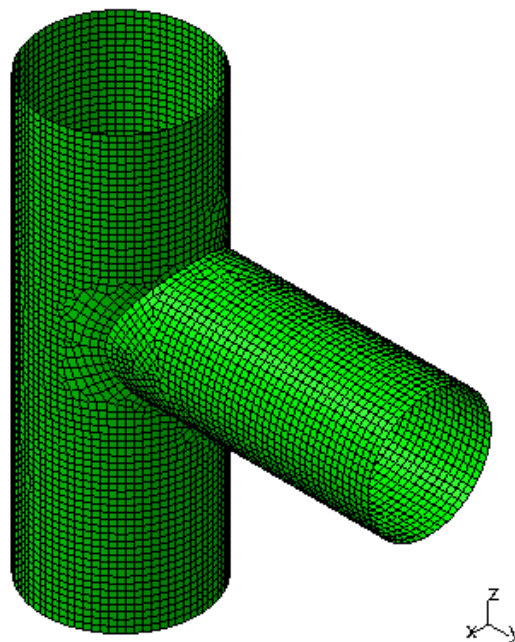


Abbildung 2.1: Beispiel eines FE-Netzes in Catia

Jedes einzelne dieser Elemente wird mit der zuvor genannten Federgleichung beschrieben. Diese „Federn“ finden sich in einem FE-Netz wieder, welches aus Knoten besteht, die jedes einzelne Element miteinander verbinden. Bei Verschiebungen sind diese Knoten die Unbekannten, die durch iterative oder direkte Gleichungslöser in folgender Matrizenform berechnet werden [2] [4].

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{m1} & k_{m2} & \cdots & k_{mn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Anschließend werden durch Materialgesetze die Spannungen in diesen Elementen abgeleitet [2] [4].

Diese Arbeit konzentriert sich nur auf die rechnerbasierte Form der FEM, die FE-Analyse.

2.1.1 Statisches Verhalten

Die häufigste Analyseart in der FEM-Berechnung ist die Statische Analyse. Dabei werden Verformungen und Spannungen unter einer gleichbleibenden Last und im Gleichgewichtszustand berechnet. Bauteilbelastungen können statischer oder dynamischer Natur sein. Zu den statischen Beanspruchungen gehören die Belastungen durch Eigengewicht, Momente, Drücke, oder statische äußere Kräfte [3].

2.1.2 Schwingungsverhalten

Mit dem Schwingungsverhalten ist das Verhalten von Systemen in einem Frequenzbereich gemeint. Bei jedem Körper der eine eigene Masse und eine eigene Steifigkeit besitzt, treten auch eigene Frequenzen auf. Mit dem Berechnen dieser Eigenfrequenzen, auch Modalanalyse genannt, wird das Schwingungsverhalten eines jeden Körpers ermittelt. Das Schwingungsverhalten ist abhängig davon wie stark eine Struktur in ihren Eigenfrequenzen angeregt wird. Die Schwingungsamplituden werden immer größer, je näher die Anregungsfrequenz bei einer Eigenfrequenz liegt und je niedriger die Dämpfung ist [3].

Die Berechnung von Eigenfrequenzen, ist mit der FE-Analyse meist ohne größeren Aufwand möglich und ist dabei von sehr großer Bedeutung. Dabei muss die Qualität der Vernetzung nicht unbedingt hoch sein. Wenn die Eigenfrequenz eines Produktes in der Nähe der Erregerfrequenz liegt, also ein Resonanzfall eintritt, reichen meist kleine konstruktive Änderungen nicht aus, um das Problem zu beheben. Es ist meist ein grundlegender Eingriff in die Steifigkeit der Struktur erforderlich. Bei Schwingungsproblemen sollte daher eine sehr frühe Simulation stattfinden, um rechtzeitig mit Änderungsmaßnahmen beginnen zu können [3].

2.1.3 Dynamisches Verhalten

Das dynamische Verhalten sagt aus, wie sich eine Struktur unter Einfluss einer angeregten Schwingung verhält. Eine Methode zur Untersuchung auf dynamisches Verhalten ist die Analyse mit einer harmonischen Anregung. Dabei wirken eine oder mehrere Belastungen in einem bestimmten Frequenzbereich, sinusförmig bzw. mit einem periodischen Zeitverlauf auf eine Struktur ein. Anschließend wird an einem bestimmten Punkt der Struktur das Antwortverhalten über der Frequenz aufgetragen und beurteilt. Dadurch lässt sich feststellen ob Eigenfrequenzen in einer Struktur vorhanden sind und wie stark das Schwingungsverhalten von der Anregung beeinflusst wird. Bei dieser Analyse spielt auch die Dämpfung eine wichtige Rolle. Sie dient der Minderung des Schwingungsverhaltens. Als Dämpfer in einer Struktur gelten Fügstellen, Schweißnähte, Schraubenverbindungen oder auch diskrete Dämpfer selbst [3].

Eine statische Analyse von dynamischen Verhalten dient unter anderem zur Lebensdauereinschätzung. Dabei werden Kräfte zeitlich veränderlich definiert, um so Aussagen über die ertragbaren Zyklen treffen zu können [3].

2.2 Flachsleifverfahren

Das Flachsleifen, auch Plansleifen genannt, wird zur Erzeugung von Flächen verwendet, die entweder in der Hauptvorschubrichtung geradlinigen verlaufen oder komplett eben sind. Zu den gängigen Flachsleifverfahren zählen in der Praxis das Umfangs-Quer-Sleifen und das Umfangs-Längs-Sleifen [1], zu sehen in Abbildung 2.2.

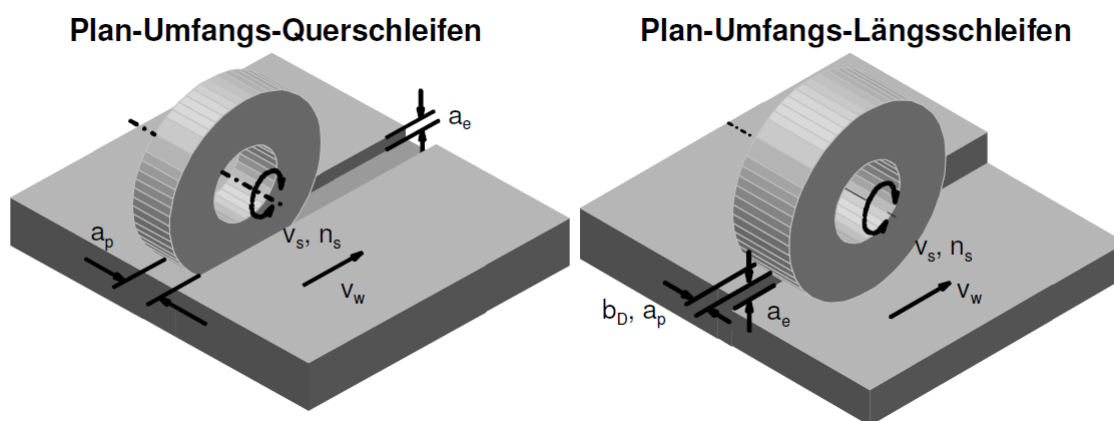


Abbildung 2.2: Eingriffsverhältnisse der beiden Flachsleifverfahren [1]

Der Schleifvorgang beim Plan-Umfangs-Querschleifen beginnt mit der Zustellung des Schleifwerkzeuges um den Zustellbetrag a_e orthogonal zum Maschinenaufspanntisch. Anschließend wird der Maschinentisch mit der Vorschubgeschwindigkeit v_w bewegt. Für das bezogene Zeitspannungsvolumen Q'_w gilt [1]:

$$Q'_w = a_e \cdot v_w \quad (2.3)$$

Um bei großen Querabmessungen ebene Flächen zu erzeugen, wird eher das Plan-Umfangs-Längsschleifen eingesetzt. Dieser Vorgang ist für diese Arbeit allerdings nicht relevant.

Bei beiden Flachsleifverfahren kann im Tiefschliff oder im Pendelschliff gearbeitet werden (Abbildung 2.3). Beim Tiefschleifen wird mit einer sehr großen Werkstückzustellung gearbeitet. Dabei wird das volle Material in einem Überlauf ge-

schliffen. Durch die erhöhte Zustellung a_e steigt die Kontaktlänge zwischen Werkstück und Schleifscheibe. Dabei dringt ungenügend Kühlschmierstoff in die Kontaktzone ein und der Abtransport der Schleifspäne wird erschwert. Als Lösung für diese Probleme wird beim Tiefschleifen mit offenporigen Schleifscheiben mit einer geringeren Härte gearbeitet und mit einer effektiveren Kühlschmierstoffzuführung. Die Vorteile des Tiefschleifens gegenüber dem Pendelschleifen sind eine bessere Oberflächengüte der Werkstücke, geringerer Schleifscheibenverschleiß und kürzere Schleifzeiten [1].

Mit welchem Verfahren geschliffen wurde, kann mit dem bloßen Auge erkannt werden, denn Pendelgeschliffene Werkstücke besitzen eine matte Oberfläche, während bei Tiefgeschliffenen Werkstücken eine glänzende Oberfläche entsteht [1].

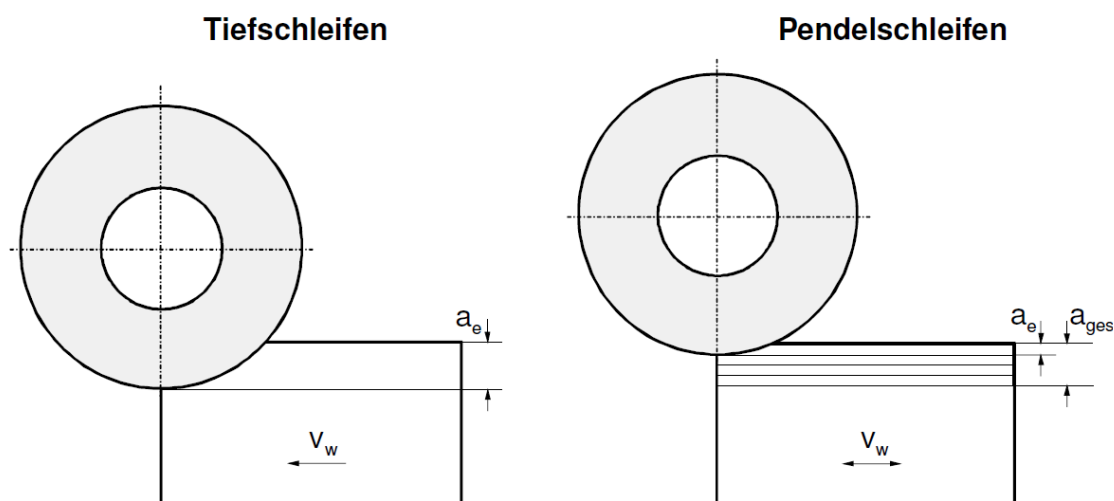


Abbildung 2.3: Schleifvorgang beim Tief- und Pendelschleifen [1]

Beim Flachsleifen werden ein oder mehrere Werkstücke auf einen Tisch aufgespannt und realisieren mit diesem die Vorschubbewegung. Andere notwendige Bewegungen werden von der Seite des Werkzeugs ausgeführt. Unterschieden wird dabei zwischen Maschinen mit senkrechter Hauptspindel für einen Stirnschliff und Maschinen mit waagerechter Hauptspindel für einen Umfangsschliff. Bei kleinen bis mittelgroßen Werkstücken erfolgt die Aufnahme, wie im Falle dieser Bachelor Arbeit, durch Magnetspannplatten. Im Falle von großen Werkstücken werden Spanneisen oder spezielle Vorrichtungen benutzt. Die verschiedenen Bewegungsrichtungen sind folgenden Achsen zugeordnet (siehe Abbildung 2.4) [1]:

- V-Achse -> Schleifscheibenzustellbewegung
- X-Achse -> Tischlängsbewegung
- Y-Achse -> Spindelstockhubbewegung
- Z-Achse -> Ständerquerbewegung

Die Schleifscheibe wird in der Regel von einem Drehstrommotor angetrieben, der bei einer konstanten Drehzahl von 1450 min^{-1} läuft [1].

Die Profimat MT408 ist eine von 6 Flachsleifmaschinen der Firma Blohm Jung GmbH, welche vom Hersteller als robuste und leistungsstarke Schleifmaschine für die Produktion beschrieben wird. Nennenswerte Eigenschaften sind hohe Geschwindigkeiten und vielseitige Einsatzmöglichkeiten. Was die Profimat MT Maschinen von Blohm gemeinsam haben, ist die hohe Schleifspindelleistung bis 60kW (Abbildung 2.6) und die Maximale Schnittgeschwindigkeit von 170 m/s. Das Modell MT408 ist die kleinste Variante der Profimat Schleifmaschinen und ist willkürlich gewählt [5], siehe Abbildung 2.5.

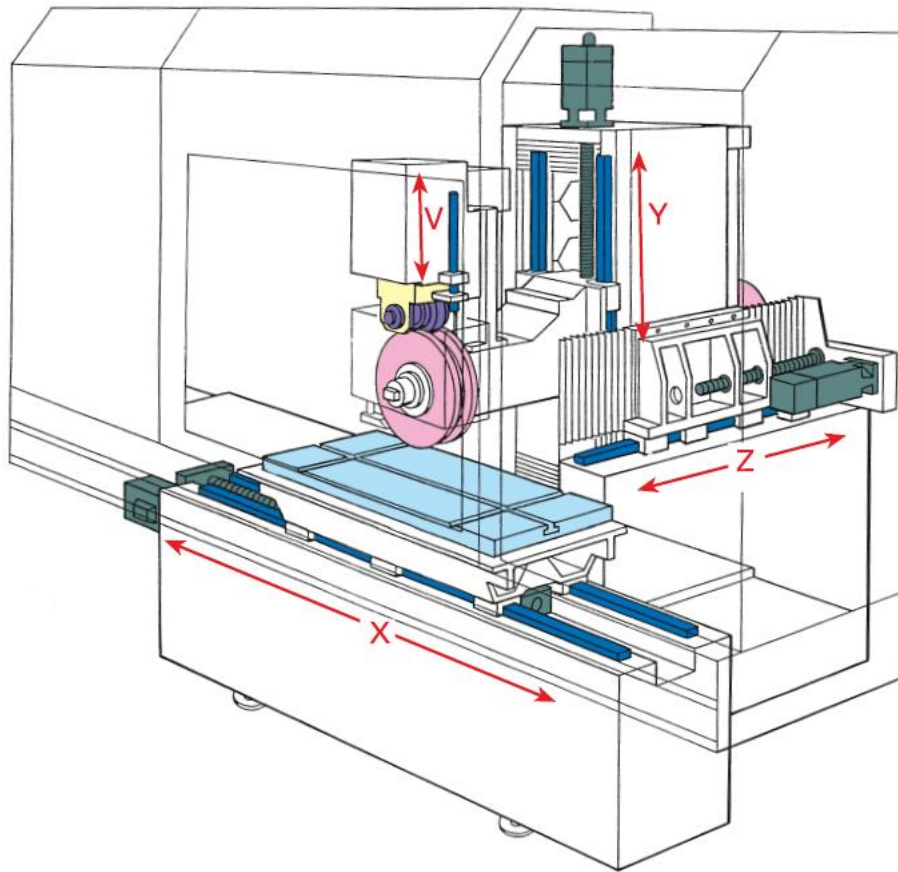


Abbildung 2.4: Isometrische Skizze einer Blohm Profimat Maschine [5]

Durch den Magnetspannfuß bei Flachsleifmaschinen ist es möglich verschiedene Arten von Zubehör in die Maschine einzubauen. „Durch ein umfassendes Angebot an Standardzubehör und speziellen Werkstückspann- und Handlingsystemen ist eine schnelle Anpassung an die kundenspezifischen Produktionsaufgaben bei hoher Wirtschaftlichkeit und Qualität gegeben“ [5].

PROFIMAT MT		408	412	608	612	616	620
Schleifbereich (B x L)	mm	400 x 800	400 x 1.200	600 x 800	600 x 1.200	600 x 1.600	600 x 2.000
Tischaufspanfläche mit Zusatzflächen	mm	400 x 1.200	400 x 1.600	600 x 1.200	600 x 1.600	600 x 2.000	600 x 2.400
Abstand Tisch bis Spindelmitte	mm	150 ... 700 (Option 950)					
X-Achse, Tischlängsweg, max.	mm	900	1.300	900	1.300	1.700	2.100
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	15 ... 25.000					
Y-Achse, Schleifkopfsenkrechtweg	mm	550 (Option 800)					
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	4 ... 3.750					
Z-Achse, Ständerquerweg	mm	320	320	520	520	520	520
Vorschubgeschwindigkeit	mm/min	4 ... 4.000					
V-Achse, Hub des Kopfabrichtgerätes (Opt.)	mm	130					
Schleifspindeltrieb, AC-Motor, regelbar	kW/min ⁻¹	bis 60/8.000					
Schleifscheiben (D x B x d)	mm	bis 500 x 200 x 127 (203,2)					
Abmessungen Breite	mm	3.500	4.500	3.500	4.500	5.900	5.900
Tiefe	mm	2.400	2.400	2.800	2.800	2.800	2.800
Höhe	mm	2.850*	2.850*	2.850*	2.850*	2.850*	2.850*
Gewicht, inkl. Schaltschrank	kg	3.900	4.600	4.900	5.400	7.000	8.000

* 3.100 bei erhöhtem Ständer Technische Änderungen vorbehalten

Abbildung 2.5: Technische Daten der Blohm Profimat MT Reihe [5]

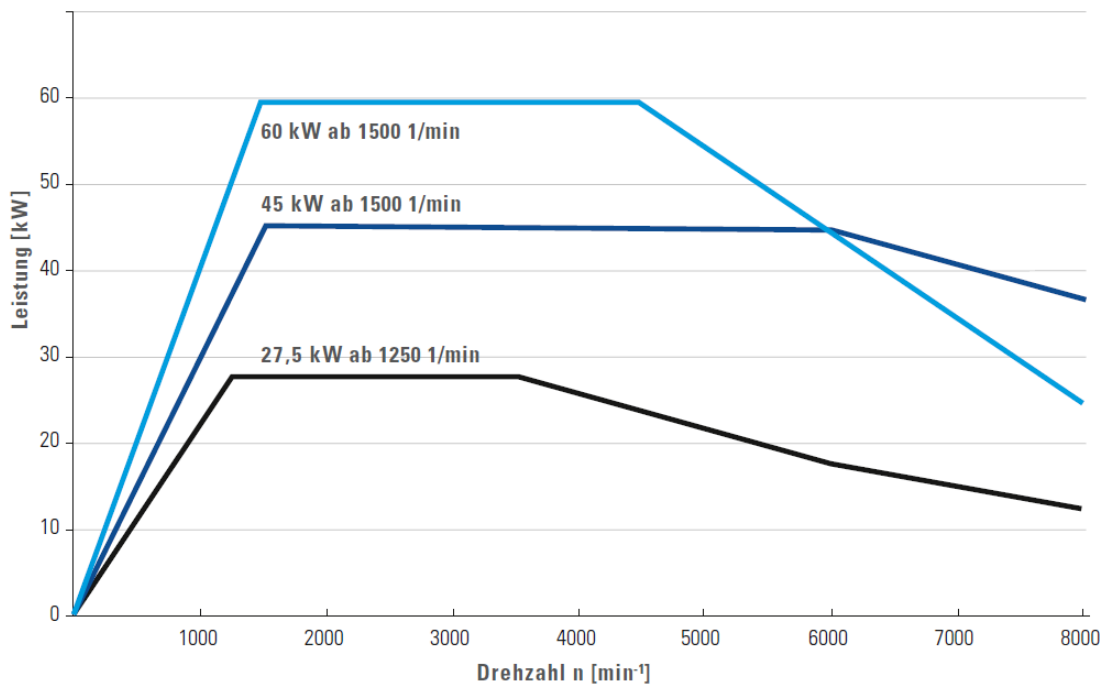


Abbildung 2.6: Leistungsverlauf der Blohm Profimat MT Maschinen [5]

2.3 Außenrundscheifverfahren

Mit dem genannten Außenrundscheifen ist in dieser Arbeit ausschließlich das „Außenrund-Umfangs-Querscheifen zwischen Spitzen“ nach DIN 8589 gemeint. Zwischen Spitzen bedeutet, dass das Werkstück auf einer Achse zwischen zwei sich drehenden Spitzen eingespannt wird (Abbildung 2.7). Außenrundscheifen ist ein Verfahren der Rundscheifmaschinen. Es wird überwiegend zur Bearbeitung von rotations-symmetrischen Werkstückkonturen eingesetzt. Es dient zur Bearbeitung von Lagersitzen, Wellenabsätzen und Nuten. Dabei wird das Werkstück in stirnseitige Zentrierungen eingespannt und durch einen Werkstückmitnehmer angetrieben. Die Zustellung erfolgt über die Schleifscheibe, welche radial zur Werkstückrotationsachse zum Werkstück bewegt wird. In der Regel wird bei diesem Verfahren im Gegenlauf gearbeitet. Im Gegenlauf sind die Vektoren von Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s und Werkstückumfangsgeschwindigkeit v_w in der Schleifkontaktzone entgegengerichtet. Das Gegenlaufscheifen bietet den Vorteil einer flacheren Korneingriffsbahn, was zu besseren Oberflächenqualitäten führt. Außerdem wird der Bereich in der die Oberfläche generiert wird an der Kontaktzone besser mit Kühlschmierstoff versorgt. Dieser Effekt ist allerdings nicht so stark ausgeprägt wie beim Flachscheifen und nimmt mit sinkender Zustellung a_c ab. Durch die Verringerung der Zerspanrate zu Prozessende hin steigert sich weiterhin die Oberflächenqualität [1].

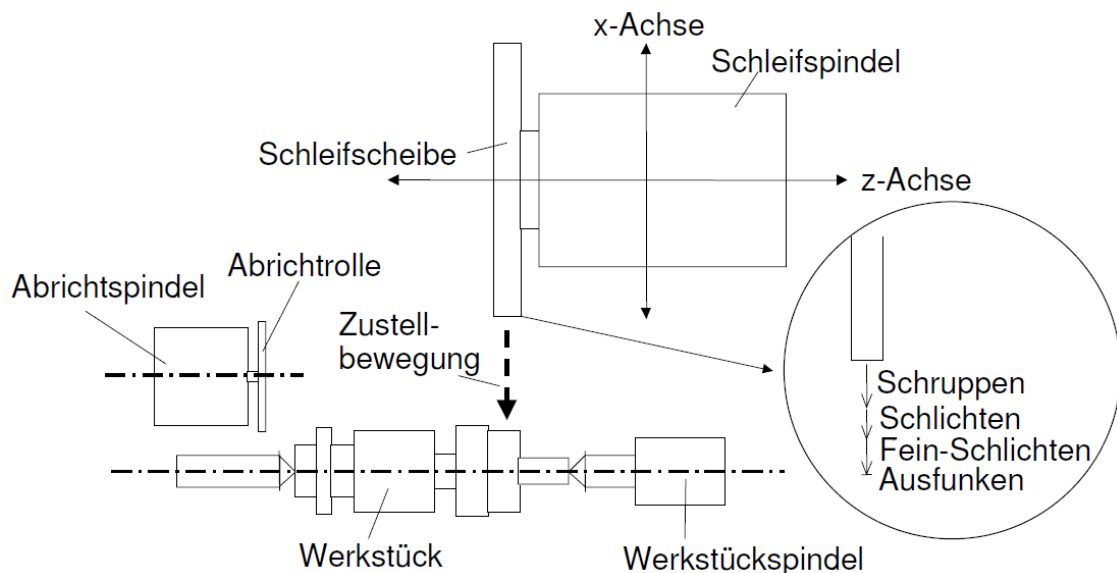


Abbildung 2.7: Skizze vom Außenrund-Umfangs-Querscheifverfahren [1]

Beim Außenrunds Schleifen im geraden Einstich wird das Zerspanungsvolumen wie folgt berechnet [1]:

$$V_w = \frac{\pi}{2} (d_{w0}^2 - d_w^2) \cdot b_{s\,eff} \quad (2.4)$$

Das Schleifaufmaß z liegt in der Regel im Bereich einiger zehntel Millimeter und ist im Vergleich zum Werkstückdurchmesser sehr klein. Für diesen Fall kann die Formel wie folgt vereinfacht werden [1]:

$$V_w = \frac{\pi}{2} \cdot d_w \cdot z \cdot b_{s\,eff} \quad (2.5)$$

Für d_w wird der Roh- bzw. Fertigteildurchmesser eingesetzt.

Das Zeitspannungsvolumen Q'_w ergibt aus der Division des Zerspanungsvolumens V_w durch die Breite des aktiven Schleifscheibenprofils mit Bezug auf die Schleifzeit t_c [1]:

Mit $v_{fr} = \frac{z}{2t_c}$

$$\begin{aligned} Q'_w &= \frac{\pi \cdot d_w \cdot z}{2 \cdot t_c} = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} = \pi \cdot d_w \cdot a_e \cdot n_w \\ &= a_e \cdot v_w \end{aligned} \quad (2.6)$$

Die Schleifscheibe und das Werkstück haben, wie in Abbildung 2.7 zu sehen, einen linienförmigen Kontakt. Dadurch ergibt sich die Überschliffzahl der Ausfunktzone U_a mit der Breite der Ausfunktzone b_{sa} und der Eingriffsbreite a_p [1]:

$$U_a = \frac{b_{sa}}{a_p} = \frac{b_{sa}}{f_a} \quad (2.7)$$

Beim Außenrunds Schleifen können besonders durch die Werkstückaufnahme Schwierigkeiten auftreten. Es ist von großer Bedeutung, dass beim Schleifen zwischen feststehenden Spitzen, sowohl die Spitzen als auch die Werkstückzentrierungen optimal ausgeführt sind, erst dann ist ein einwandfreier Rundlauf der Werkstücke gegeben. Außerdem ist darauf zu achten, dass unsymmetrische Mas-

senverteilung vermieden wird, welche bei hohen Drehzahlen zu Verlagerungen führen kann. Die Auswahl der Werkstückmitnahme hat beim Zwischen-Spitzen-Schleifen einen entscheidenden Einfluss auf die Prozessstabilität. Unter anderem muss darauf geachtet werden, dass das Antriebsmoment nicht querkraftfrei auf das Werkstück übertragen wird. Dies kann die Schleifkontaktzone beeinträchtigen und zu Kreisformfehlern führen [1].

Als Beispiel für eine Außenrundscheifmaschine wurde eine Studer S31 für diese Arbeit gewählt. Die Studer S31 ist eine typische CNC-Universal-Rundscheifmaschine. Sie besitzt eine Antriebsleistung von 7,5 kW und hat eine maximale Schnittgeschwindigkeit von 50 m/s (Abbildung 2.8). „Die vielseitige Universal-Rundscheifmaschine ist für das Schleifen von mittelgroßen Werkstücken in der Einzelteil-, Klein- und Großserienfertigung konzipiert. Sie wird in Serie gefertigt, ist ausbaufähig und lässt sich exakt an die gestellten Anforderungen anpassen: Diese Flexibilität gewährleistet ein optimales Preis- /Leistungsverhältnis“ [6].

Technische Daten

Hauptabmessungen

Spitzenweite	650/1000 mm
Spitzenhöhe	175 mm
Max. Werkstückgewicht zwischen Spitzen	80/120 kg

Querschlitten: X-Achse

Max. Weg	280 mm
Geschwindigkeit	0,001 – 10 000 mm/min

Auflösung

Rotatives Messsystem	0,0001 mm
Option: Lineares Messsystem	0,0001 mm
Führungsbahnabstand	280 mm

Längsschlitten: Z-Achse

Max. Weg	800/1150 mm
Geschwindigkeit	0,001 – 20 000 mm/min

Auflösung

Rotatives Messsystem	0,0001 mm
Option: Lineares Messsystem	0,0001 mm
Führungsbahnabstand	200 mm

Schleifspindelstock

Schwenkbereich	-15° bis +195°
Manuelle Schwenkachse	2,5° Hirth
Automatische Schwenkachse	1° Hirth
Feinverstellung	0,0001°
Aufnahmekonus	Ø 73 mm
Antriebsleistung	7,5 kW
Schleifscheibe links, Ø x Breite x Bohrung	500 x 63 (80F5) x 203 mm
Schleifscheibe rechts, Ø x Breite x Bohrung	500 x 63 (80F5) x 203 mm
Umfangsgeschwindigkeit	bis 50 m/s
Innenschleifvorrichtung für Hochfrequenzspindeln	
Aufnahmebohrung	Ø 120 mm
Drehzahlen	24 000 – 120 000 min ⁻¹

Werkstückspindelstöcke

	Zum Aussenschleifen mit fester Spitze oder zum Fliegenschleifen	
	Universal-Werkstückspindelstock MK4	Universal-Werkstückspindelstock IS 050
Drehzahlbereich	1–1500 min ⁻¹	1–1000 min ⁻¹
Aufnahmekonus/ zyl. Aussenaufnahme	MK 4 / Ø 70 mm	ISO50 / Ø 110 mm
Spindeldurchlass	Ø 26 mm	Ø 50 mm
Antriebsleistung	3 kW	4 kW
Belastung beim Fliegenschleifen	70 Nm	180 Nm
Rundheitsgenauigkeit beim Fliegenschleifen	0,0004 mm (Option: 0,0002 mm)	0,0004 mm
C-Achse zum Formerschleifen		
– Standard, indirektes Messsystem	0,0001°	0,0001°

	Zum Fliegenschleifen oder Aussenschleifen mit mitreißender Spitze	
	Futter-Werkstückspindelstock MK4	Futter-Werkstückspindelstock IS 050
Drehzahlbereich	1–1500 min ⁻¹	1–1000 min ⁻¹
Aufnahmekonus/ zyl. Aussenaufnahme	MK4 / Ø 70 mm	ISO50 / Ø 110 mm
Spindeldurchlass	Ø 26 mm	Ø 50 mm
Antriebsleistung	3 kW	4 kW
Belastung beim Fliegenschleifen	100 Nm	250 Nm
Rundheitsgenauigkeit beim Fliegenschleifen	0,0004 mm (Option: 0,0002 mm)	0,0004 mm

C-Achse zum Formerschleifen		
– Standard, indirektes Messsystem	0,0001°	0,0001°
– Hochgenau, direktes Messsystem	0,0001°	0,0001°

Reitstock

Aufnahmekonus	MK3/MK4
Pinolenweg	35 mm
Pinolendurchmesser	50 mm
Feinverstellung für Zylinderitätskorrekturen	±40 µm

Steuerung

Fanuc 31i-A

Garantierte Arbeitsgenauigkeit

Geradheit der Mantellinie	
Messlänge 650 mm	0,0025 mm
Messlänge 1000 mm	0,0030 mm

Anschlusswerte

Gesamtanschlusswert	20 kVA
Luftdruck	5,5–7 bar
Absaugkapazität für Kühlschmiermittelebel	
– Emulsion	1300 m ³ /h
– Öl	500–1000 m ³ /h

Gesamtgewicht

Spitzenweite 650 mm	5200 kg
Spitzenweite 1000 mm	6000 kg

Abbildung 2.8: Technische Daten der Studer S31 Rundschleifmaschine [6]

2.4 Vergleich der beiden Schleifverfahren

Bei Maschinen mit unterschiedlichen Schleifscheiben, Werkstücken etc. ist es dank der Kenngrößen möglich, diese unabhängig vom angewendeten Schleifverfahren miteinander zu vergleichen. Dafür werden prozessbeschreibende Kennzahlen benötigt, die verfahrensübergreifend gültig sind und einen Vergleich verschiedener Schleifstrategien ermöglichen. Kenngrößen bestehen aus den Eingangs-, Schleifprozess- und Ergebnisgrößen. Die wesentlichen Kenngrößen sind in Abbildung 2.9 dargestellt.

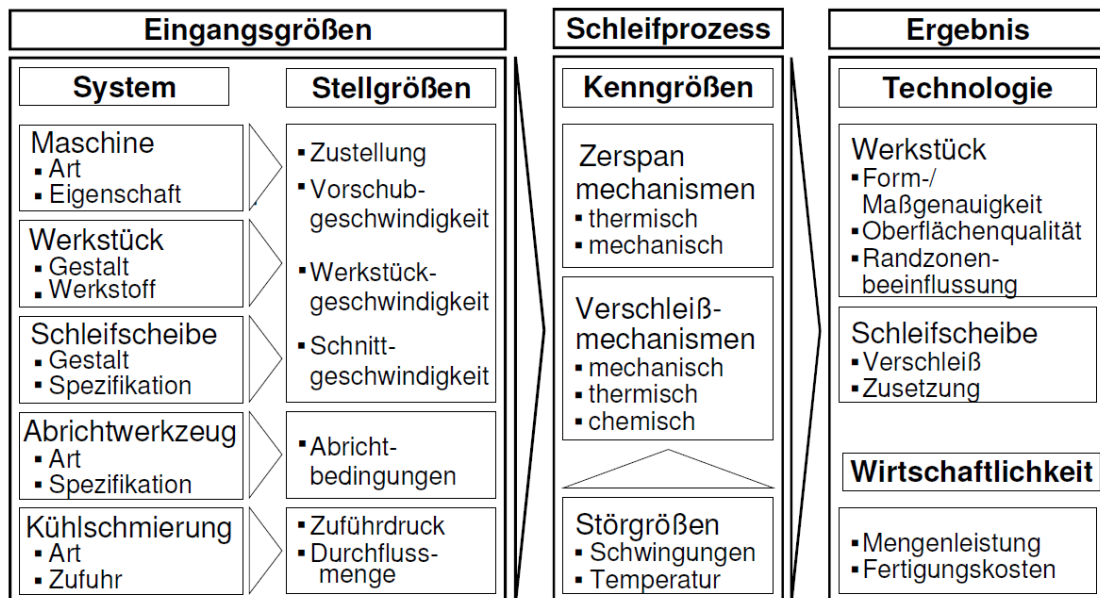


Abbildung 2.9: Wesentliche Kenngrößen beim Schleifvorgang [1]

Zwei wichtige Kenngrößen, die zur Charakterisierung der Schleifprozesse dienen, sind das Zerspanungs- und Zeitspannungsvolumen.

Durch das Zerspannungsvolumen V_w wird das bei der Schleifbearbeitung zerspannte Werkstückvolumen beschrieben. Bei wellenförmigen Bauteilen errechnet sich V_w in Abhängigkeit vom Rohteil Durchmesser d_{wA} , dem Enddurchmesser d_{wE} und der Schleiflänge l_w [1].

V_w beim Außenrunds Schleifen:

$$V_w = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{wA}^2 - d_{wE}^2) \cdot l_w \quad (2.8)$$

V_w beim Flachs Schleifen:

$$V_w = b_{s\,eff} \cdot l_w \cdot (h_{wA} - h_{wE}) = b_{s\,eff} \cdot l_w \cdot a_{e\,ges} \quad (2.9)$$

Ein Vergleich unterschiedlicher Schleifverfahren ist nur dann möglich, wenn eine von der Eingriffsbreite $b_{s\,eff}$ unabhängige Kenngröße vorhanden ist. Die geforderte Kenngröße ist das bezogene Zerspanungsvolumen V'_w [1].

$$V'_w = \frac{V_w}{b_{s\,eff}} \quad (2.10)$$

Das Zeitspannungsvolumen gibt an wieviel Werkstoffvolumen pro Zeiteinheit zerspannt wurde. Auch hier bezieht man sich auf die effektive Eingriffsbreite $b_{s\,eff}$ [1].

$$Q'_w = \frac{Q_w}{b_{s\,eff}} \quad (2.11)$$

Eine andere wichtige Kenngröße ist die geometrische Kontaktlänge l_g . Sie beschreibt den Eingriffsbogen zwischen Werkzeug und Werkstück.

$$l_g = \sqrt{a_e \cdot d_{eq}} \quad (2.12)$$

Da sich bei den verschiedenen Schleifverfahren trotz gleicher Zustellung unterschiedliche Kontaktverhältnisse bilden, ist wie Abbildung 2.10 deutlich macht, der äquivalente Schleifscheibendurchmesser d_{eq} eine notwendige Kenngröße, die diesen Umstand berücksichtigt [1].

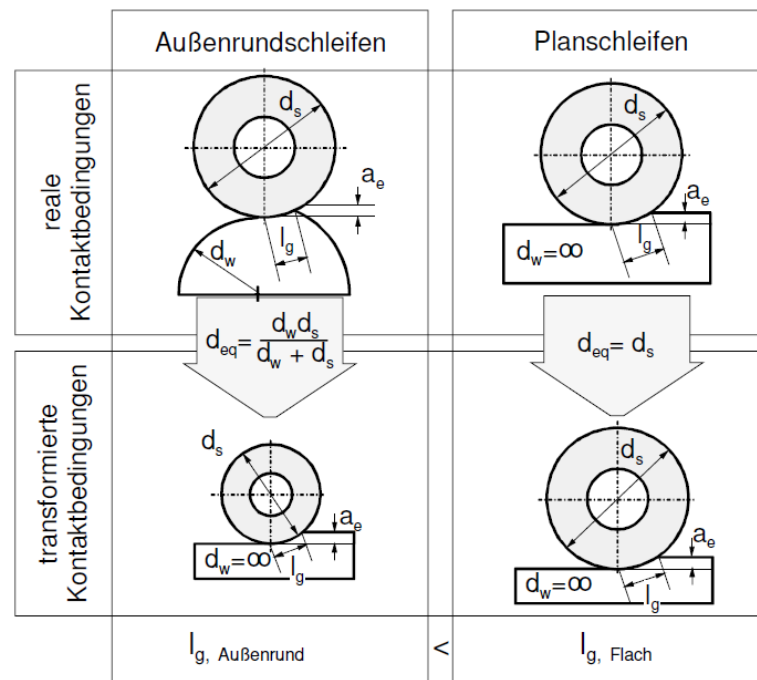


Abbildung 2.10: Kontaktbedingungen beim Plan- und Außenrundscheifen [1]

Die Abbildung 2.11 und Abbildung 2.12 geben einen Überblick über die verschiedenen Schleifverfahren und ihrer zugehörigen Kenngrößen.

	Rund			Plan	Dreh
	Außenrund		Innenrund		
	Zw. Spitzen	Spitzenlos			
Umfangs- Quer- Schleifen					
Umfangs- Längs- Schleifen					
Seiten- Quer- Schleifen					

Abbildung 2.11: Verschiedene Schleifverfahren und ihre Kenngrößen [1]

	Rund			Plan	Dreh
	Außenrund		Innenrund		
	Zw. Spitzen	Spitzenlos			
$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $Q'_w = \frac{Q_w}{b_s \text{ eff}}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = b_s = b_s \text{ eff}$	$Q_w = 1/2 \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot b_s$ $n_w = n_r \cdot \frac{d_r}{d_w}$ $v_{fr} = a_e \cdot n_r$ $a_p = b_s = b_s \text{ eff}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = b_s = b_s \text{ eff}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $a_p = b_s = b_s \text{ eff}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_p = \frac{d_{wa} - d_{wi}}{2} = b_s \text{ eff}$
Umfangs- Längs- Schleifen	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = a_p \cdot n_w$ $a_p = b_s \text{ eff}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = n_r \cdot \pi \cdot d_w \cdot \sin \alpha_r$ $a_p = b_s \text{ eff}$	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fa} \cdot a_e$ $v_{fa} = a_p \cdot n_w$ $a_p = b_s \text{ eff}$	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $a_p = b_s \text{ eff}$	$Q_w = a_e \cdot a_p \cdot v_w$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $a_p = \frac{v_{fa}}{n_w} = b_s \text{ eff}$
Seiten- Quer- Schleifen	$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot v_{fr} \cdot a_p$ $v_{fr} = a_e \cdot n_w$ $a_e = b_s \text{ eff}$			$Q_w = a_e \cdot b_w \cdot v_{fa}$ $b_s \text{ eff}$ nicht definierbar	$Q_w = v_w \cdot a_p \cdot a_e$ $v_w = \pi \cdot d_w \cdot n_w$ $a_e = \frac{d_{wa} - d_{wi}}{2}$ $a_p = \frac{v_{fr}}{n_w} = b_s \text{ eff}$

Abbildung 2.12: Kenngrößen mit den zugehörigen Formeln [1]

Schnittgeschwindigkeit

Es wird davon ausgegangen, dass Schleifscheibe und Werkstück gleich bleiben. Ebenso die Zustellung, Vorschubgeschwindigkeit und Werkstückgeschwindigkeit werden in sich als gleich angenommen.

Prozesskenngrößen sowie das Schleifergebnis werden durch die Stellgrößen eines Schleifprozesses bestimmt. Die für diese Arbeit entscheidende Stellgröße, ist die Schnittgeschwindigkeit v_c .

Durch eine erhöhte Schnittgeschwindigkeit bei gleich bleibendem Zeitspannungsvolumen werden Schnittkräfte, Verschleiß und Oberflächengüte positiv beeinflusst. Die Möglichkeit der Formfehler wird verringert, das Zeitspanverhältnis ist größer, die Schnittkräfte nehmen ab und die Werkstückrauheiten sind qualitativ hochwertiger. Allerdings nehmen die Schnittleistung, sowie die in das Werkstück eingebrachte Wärmeenergie zu, was zu einer thermischen Schädigung am Bauteil führen kann. Daraus resultiert die Notwendigkeit erhöhter Sicherheitsmaßnahmen. Hochgeschwindigkeitsschleifen wird eingesetzt, um die Bearbeitungszeiten bei gleichbleibender Qualität zu verkürzen oder um die Werkstückqualität bei konstantem Zeitspannungsvolumen zu verbessern. Dieses genannte Verhalten der erhöhten Schnittgeschwindigkeit macht Abbildung 2.13 nochmal deutlich [1].

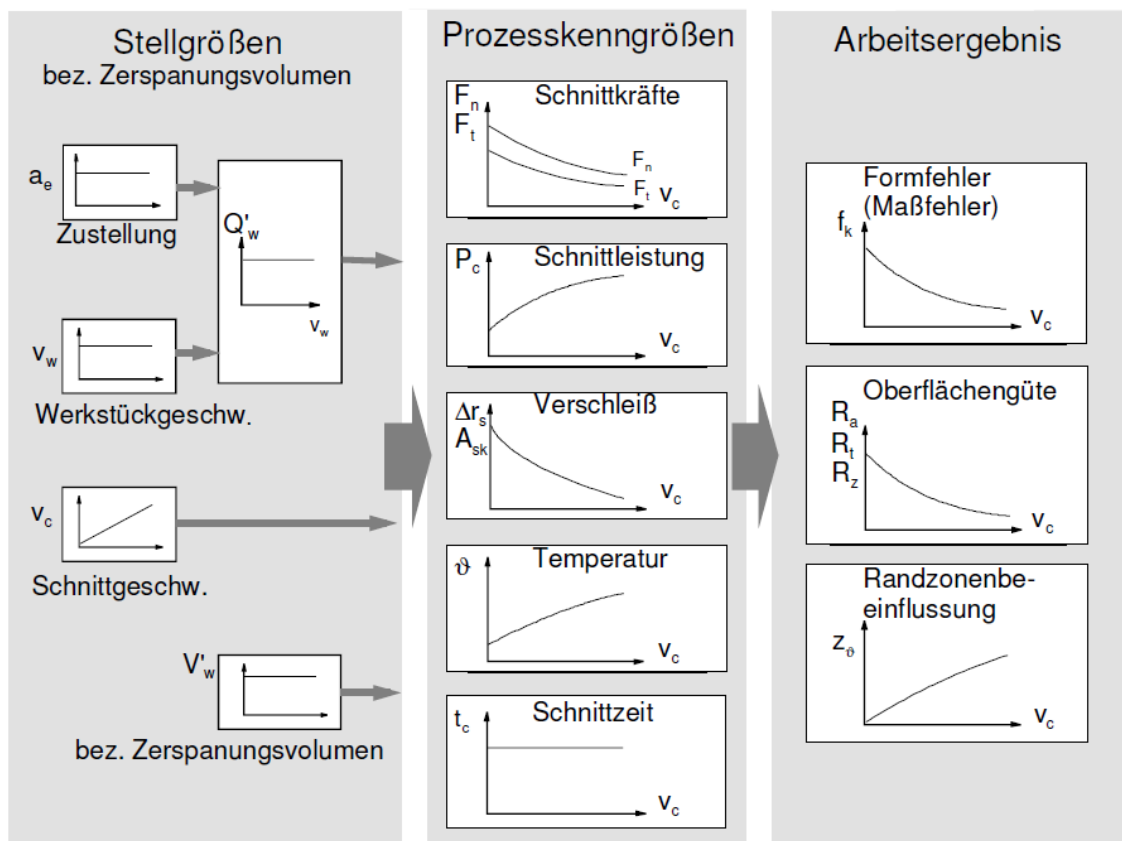


Abbildung 2.13: Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf Arbeitsergebnis [1]

Abbildung 2.14 bis Abbildung 2.17 dienen dem Veranschaulichen der Auswirkung von erhöhter Schnittgeschwindigkeit auf den Schleifprozess. Diese Abbildungen sind mit beispielhaften Werkstückstoffen, Schleifscheiben, Schleifparametern und Kühlschmierstoffen versehen. Je nachdem mit welchen Stoffen gearbeitet wird, können diese Abbildungen leicht variieren. In Abbildung 2.14 erkennt man, wie sich das Zeitspanvolumen bei einer höheren Schnittgeschwindigkeit verhält. Durch die kleinere kinematische Schneidenzahl und den abnehmenden Spannungsquerschnitt nimmt auch die Schnittkraft ab. Abhängig vom Werkstückstoff können die Kurven flacher oder steiler werden. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit bedeutet eine Verringerung der Tangential- und Normalkraft. Somit hängt die Schnittleistung davon ab, ob die Schnittgeschwindigkeitszunahme die Schnittkraftverringerung ausgleichen kann. Im Normalfall erhöht sich die Schnittleistung bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1].

Der Parameter q beschreibt das Geschwindigkeitsverhältnis der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit v_s und der Werkstückumfangsgeschwindigkeit v_w .

$$q_s = \frac{v_s}{v_w} \quad (2.13)$$

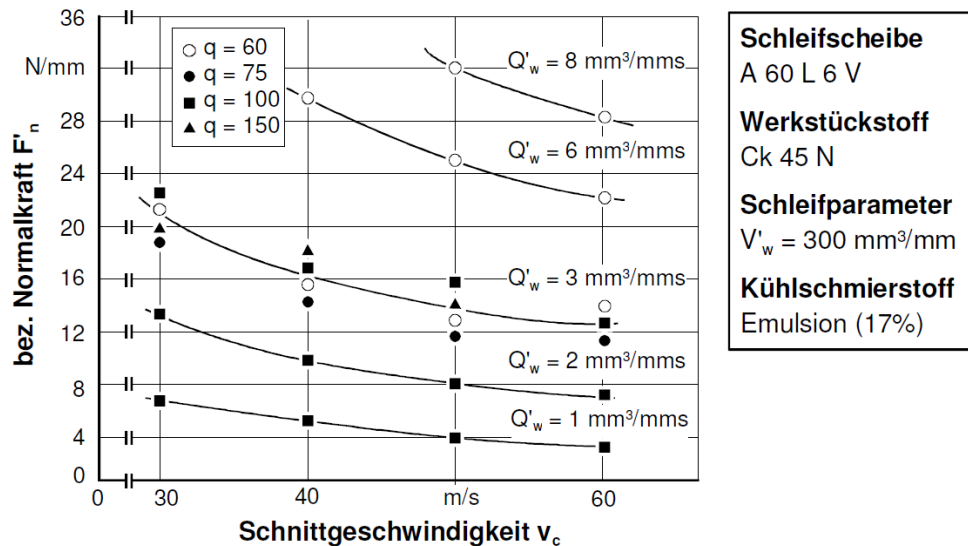


Abbildung 2.14: Normalkraft bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]

Wie in Abbildung 2.15 zu sehen ist, tritt aufgrund höherer Schnittgeschwindigkeiten weniger Verschleiß auf. Die mechanische Belastung an der Schleifscheibe wird kleiner. Die Eingriffsfrequenz und die Reibgeschwindigkeit sind ebenso von der Schnittgeschwindigkeit betroffen. Sie werden durch die kürzeren Eingriffszeiten und den kleineren Kontaktdruck überkompensiert. Durch das Ansteigen der Schnittleistung mit der Schnittgeschwindigkeit entstehen höhere Temperaturen. Dabei haben verschiedene Kühlschmierstoffe unterschiedliche Auswirkungen auf die Maximaltemperatur (Abbildung 2.16). Die Kombination aus erhöhter Schnittgeschwindigkeit, verringerten Schnittkräften und weniger Schleifscheibenverschleiß führt zu weniger Form- und Maßfehlern sowie einer verringerten Rauheit an der Werkstückoberfläche wie Abbildung 2.17 zeigt [1].

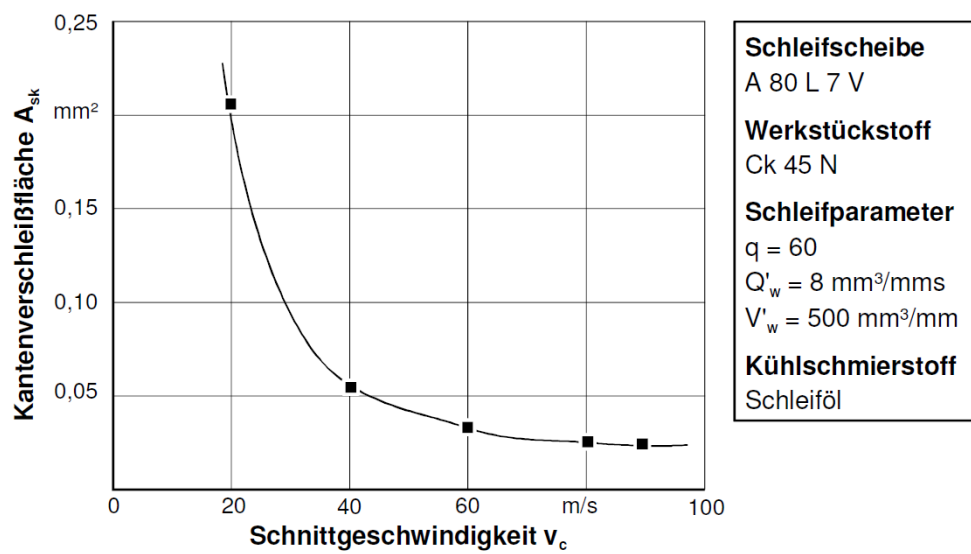


Abbildung 2.15: Verschleiß bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]

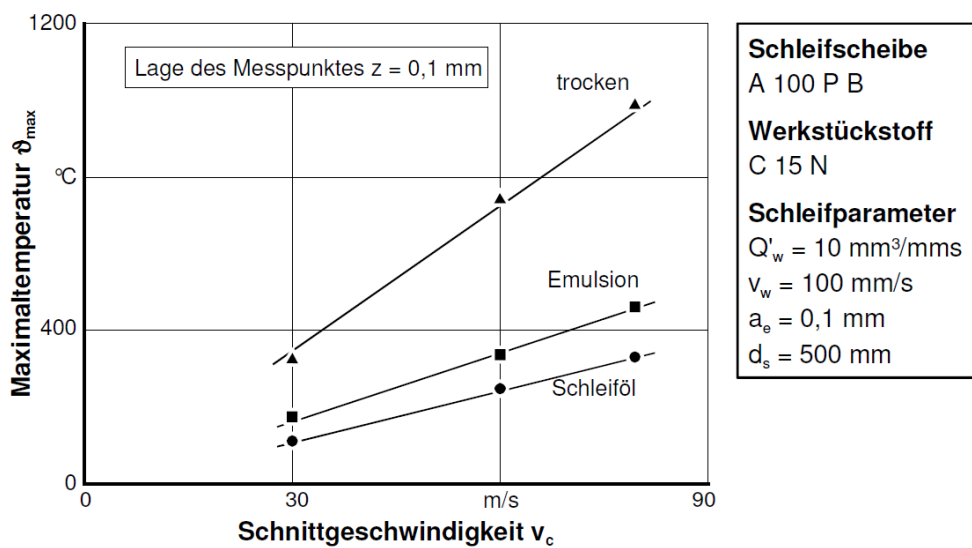


Abbildung 2.16: Temperaturverlauf bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]

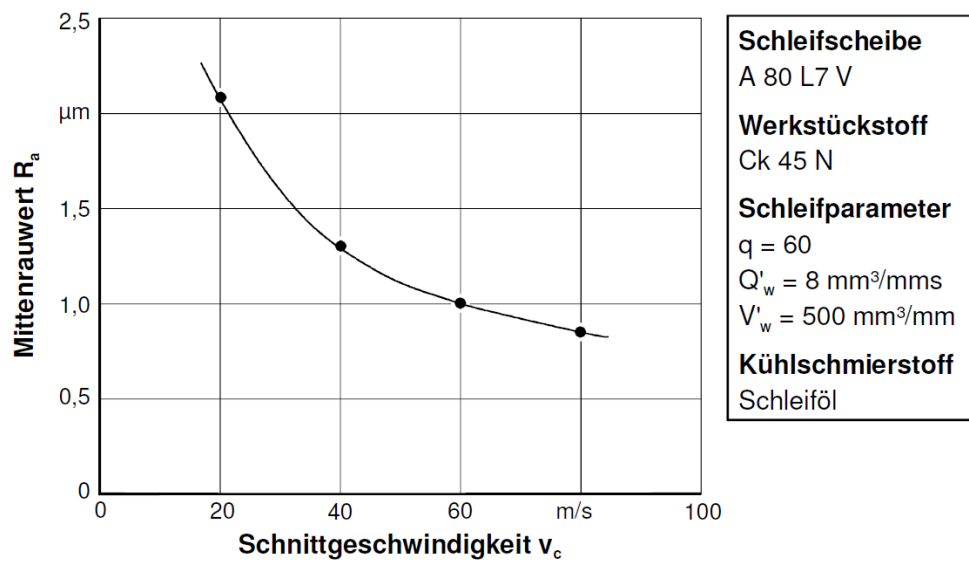


Abbildung 2.17: Oberflächenrauheit bei steigender Schnittgeschwindigkeit [1]

3 Auswertung der Ergebnisse

Dieses Kapitel beginnt mit einer Recherche nach einer geeigneten rotatorischen Rundschleifvorrichtung.

Daraufhin wird die Erstellung des 3D-CAD-Modells in Catia V5 näher erörtert, um sich dann schließlich dem Kern dieser Arbeit, den FEM Analysen zu widmen. Die FEM Analyse in diesem Kapitel teilt sich in die 3 wichtigsten Bereiche. Die statische-, dynamische- und Eigenwertanalyse. Für die dynamische Analyse wird das Modell mit einer harmonischen Anregung in Schwingung versetzt. Nicht lineare Belastungsfälle werden in dieser Arbeit nicht näher thematisiert, da sie eine zu hohe Komplexität aufweisen.

In Kap. 3.4 wird das Thema Optimierung behandelt. Dieser Punkt basiert auf den aus Kap. 3.3 erhaltenen FEM Daten und spricht mögliche Bereiche der Rundschleifvorrichtung an, die für eine verbesserte Funktionsweise geändert werden können.

Zum Schluss wird in Kapitel 3.5 eine Kostenanalyse durchgeführt. Diese soll zeigen, wie sich die Anschaffung einer Rundschleifvorrichtung gegenüber dem Kauf einer neuen Rundschleifmaschine unterscheidet.

3.1 Rechercheergebnisse

Zuerst muss die Frage geklärt werden, ob eine bestimmte Schleifmaschine aus- bzw. umbaubar ist. Diese Frage stand zu Beginn dieser Arbeit noch offen. Rundschleifen wird in der Produktion, wie andere Schleifverfahren auch, mit den dafür vorgesehenen Maschinen betrieben. Eine Schleifmaschine umzubauen ist nur in Einzelfällen sinnvoll, wenn überhaupt Lohnenswert. Im Bereich der Forschung und Entwicklung, wo jeden Tag bei einem kleinen Budget verschiedene Schleifverfahren ausprobiert und getestet werden müssen, ist es natürlich kostengünstig und ebenso platzsparend nur eine Maschine zu besitzen, die so viele Schleifverfahren beherrscht wie möglich.

Die Flachsleifmaschinen der Produktreihe Profimat MT der Firma Blohm bieten zwar die Möglichkeit an in zahlreicher Form ausgebaut zu werden, wie dies geschieht ist jedoch dem Besitzer der Maschine überlassen. Die KW-Abrichttechnik GmbH, Peter Lehmann AG oder Steinmetz Schleiftechnik GmbH & Co. KG sind nur einige von vielen Herstellern, die sich darauf spezialisiert haben Produkte herzustellen, mit denen man Schleifmaschinen um andere Funktionen erweitern kann.

Da diese Form von Maschinenausbau untypisch ist, hat sich die Suche nach einem geeigneten rotatorischen Werkstückantrieb als recht schwierig erwiesen. Durch Gespräche mit Fachpersonal der Firma Blohm hat sich herausgestellt, dass es nicht bekannt ist, ob die Möglichkeit besteht, ihre Flachsleifmaschine um die Außenrundschleifoption zu erweitern.

Nach einer mehrwöchigen Recherchephase hat sich ergeben, dass die Firma Steinmetz Schleiftechnik GmbH & Co. KG ein Modul besitzt, welches größtenteils den benötigten Anforderungen entspricht. Auf dieser Grundlage basieren die nachfolgenden CAD-Modelle und FEM Analysen.

3.2 CAD-Modell der Rundschleifvorrichtung

Zur Erstellung eines 3D-CAD-Modells wurde das Programm Catia V5 R19 benutzt. Anhand der von der Firma Steinmetz zur Verfügung gestellten technischen Zeichnung, war es möglich ein Detailgetreues CAD-Modell der Rundschleifvorrichtung zu konstruieren (Abbildung 3.1).

Damit die spätere FE-Analyse praxisnahe Werte liefern kann, ist bei dem CAD-Modell darauf zu achten, dass es so Detailgetreu wie möglich erstellt wird. Es reicht nicht ein nur auf den äußeren Abmaßen basierendes Modell zu erstellen. Besonders Bohrungen und Kanten können zu Materialermüdung und daraus resultierenden Schäden führen. Zugleich muss darauf geachtet werden nicht zu viele Teile zu konstruieren, die einen unnötig hohen Speicherverbrauch bei der FE-Analyse verbrauchen. Bei Flächen reicht es vollkommen aus Kontaktbedingungen zu setzen. Somit spart man sich die Modellierung von Schrauben, Passfedern, Führungen usw. Solche Bauteile können die FE-Netz Erstellung stark erschweren und bei ungenauer Anbringung sogar zu verfälschten Ergebnissen führen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf zuvor genannte Elemente verzichtet.

Das CAD-Modell der Rundschleifvorrichtung wird aus Einzelteilen erstellt, den so genannten SOLIDS im Programm Modus „Part Design“ von Catia V5. Die größte Belastung am Bauteil findet bei maximal ausgefahrenen Einspannsitzen statt (Abbildung 3.4). Deswegen wird das CAD-Modell in dieser Form konstruiert und anschließend analysiert.

Das System der Rundschleifvorrichtung besteht aus 3 Teilen. Der Rundschleifvorrichtung der Firma Steinmetz selbst, dem Werkstück und einer Welle die als Verbindung zwischen Werkstück und Aufnehmer dient. Alle 3 Komponenten werden für diese Arbeit konstruiert und am Ende zu einem Modell zusammengefügt. Anschließend wird das zusammengesetzte Modell zur FE-Analyse übertragen.

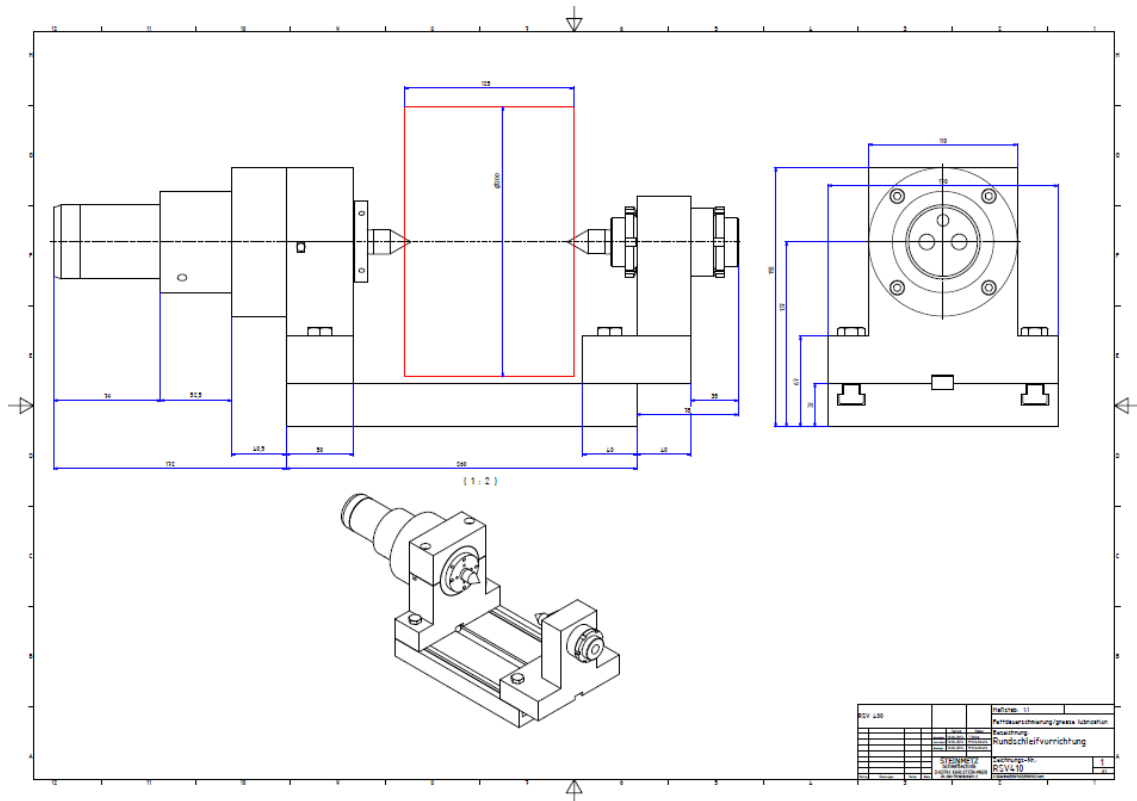


Abbildung 3.1: Technische Zeichnung der Rundschleifmaschine RSV410

Rundschleifvorrichtung

Die Rundschleifvorrichtung der Firma Steinmetz mit der Modellbezeichnung RSV410 wird in Einzelteilen konstruiert. Die Vorrichtung besteht aus einer Bodenplatte, einem kleinen und einem großen Reitstock mit Spitzen.

Zuerst wird die Bodenplatte konstruiert (Abbildung 3.2). Diese wird anschließend mit Nuten versehen die für Passfedern und Schrauben vorgesehen sind.

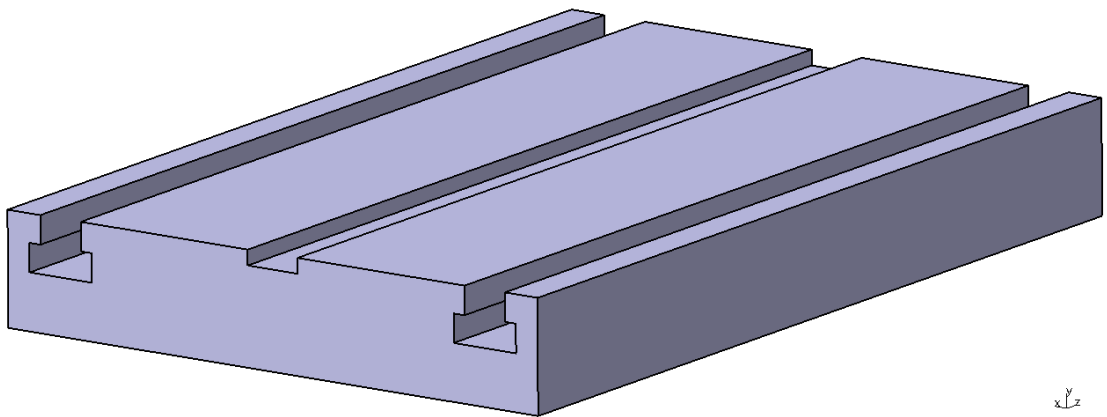


Abbildung 3.2: Bodenplatte der Drehvorrichtung

Der kleine Reitstock dagegen ist ein etwas komplexeres Gebilde (Abbildung 3.3). Hier werden Spitze, Lagerung und Halterung als getrennte Modelle erstellt und anschließend zu einem Solid zusammen gefügt. Selbiges wurde auch beim großen Reitstock durchgeführt.

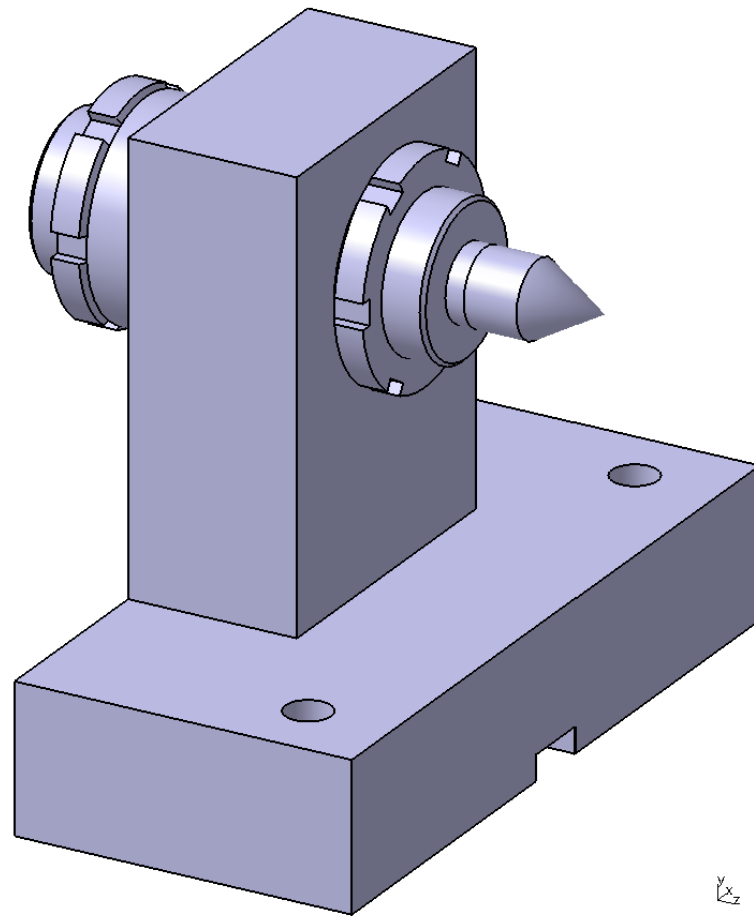


Abbildung 3.3: Kleiner Reitstock vom RSV410

Die Drehvorrichtung RSV410 von Steinmetz wird beim Kauf mit samt Hydraulikmotor ausgeliefert. Da der Motor und die Halterungshülse aber keine Kräfte übertragen, werden sie für die Analyse nicht berücksichtigt und somit auch nicht modelliert.

Abschließend werden die konstruierten CAD-Modelle zu einem einzigen CAD-Modell verbunden. Es ist entscheidend, dass das CAD-Modell welches einer FEM Analyse unterzogen werden soll, aus einem einzigen SOLID besteht. Erst durch das zusammenfügen entsteht eine Verbindung zwischen den einzelnen Modellen. Diese Verbindung sorgt dafür, dass bei der Netzerstellung alle Knoten miteinander verbunden sind. Dank dieser Verbindung werden die Bewegungen und Kräfte auf das gesamte Modell verteilt. Besteht diese Verbindung nicht, bilden sich zwischen den Flächen der Modelle Lücken, wodurch der Kraftfluss nicht weitergeleitet wird. In diesem Fall wäre eine Finite Elemente Analyse unmöglich.

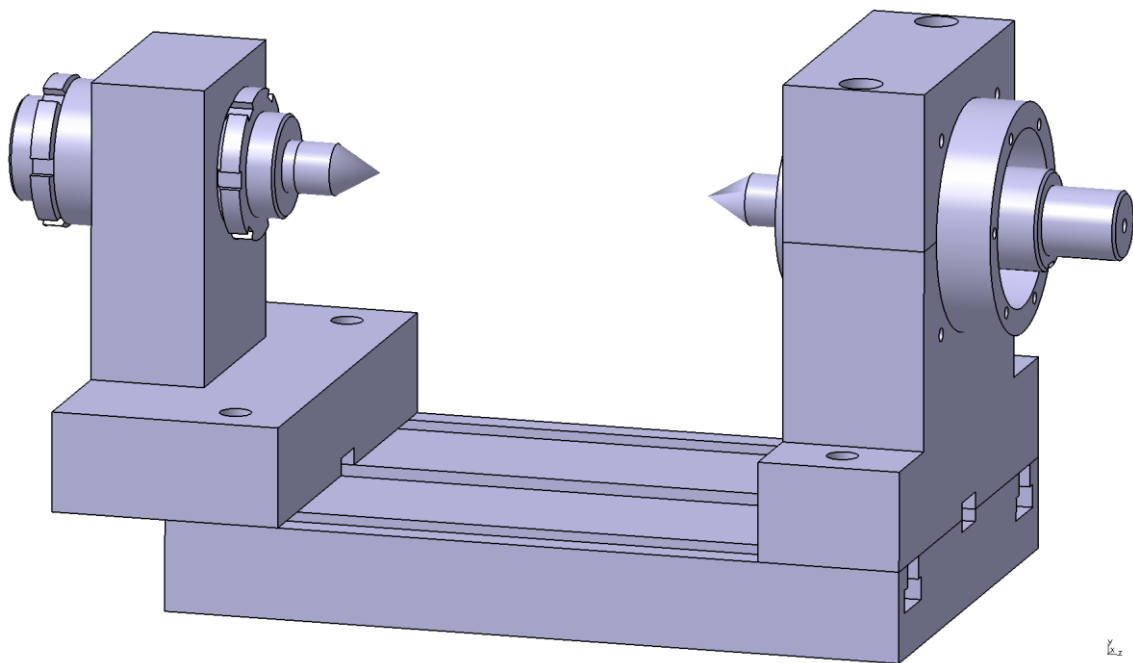


Abbildung 3.4: Fertiges CAD-Modell der Werkstückdrehvorrichtung

Werkstücke

Die Schleifvorgänge zur Prüfung der Oberflächengüte werden bei der Firma Saint-Gobain an Kreisförmigen Stahlscheiben durchgeführt. Anschließend werden diese Werkstücke untersucht und die unterschiedlichen Schleifergebnisse miteinander verglichen. Diese Werkstücke werden auch in dieser Arbeit verwendet und besitzen dieselben Maße und Geometrien. Die Stahlscheiben haben eine Breite von 8mm (Abbildung 3.5).

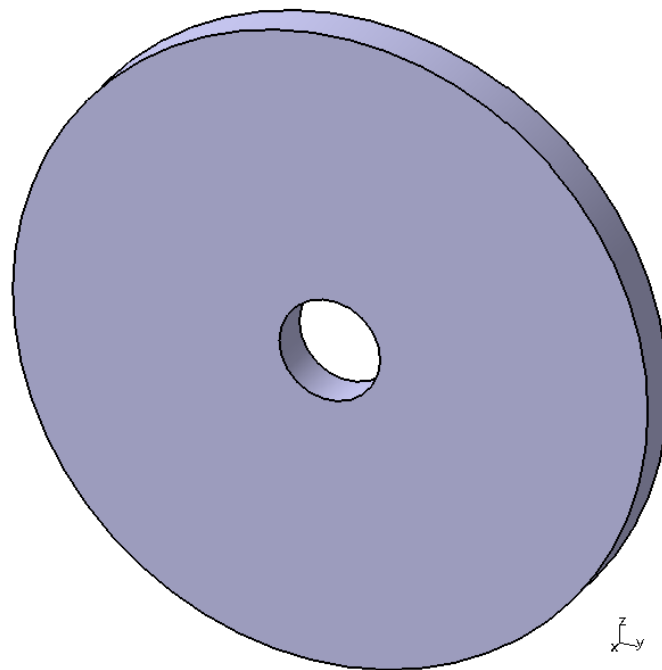


Abbildung 3.5: Die Stahlscheibe welche als Werkstück dient

Werkstückwelle

Wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist, werden die 2 Werkstücke über eine Welle eingespannt. Für die Erstellung dieser Welle wurde eine in der Realität existierende Welle nachkonstruiert. Diese aus Stahl bestehende Welle kann maximal 2 Werkstücke aufnehmen. Die Werkstücke werden durch einen Abstandhalter voneinander getrennt, damit bei den Schleifvorgängen eine separate Bearbeitung möglich ist. Nach einem abgeschlossenen Schleifvorgang kann ohne Umbaumaßnahmen die zweite bereits eingespannte Scheibe bearbeitet werden. Dadurch ergeben sich ein geringerer Arbeitsaufwand und eine erhöhte Zeitersparnis. Am anderen Ende der Welle befindet sich eine Mutter, die durch ein Gewinde die Werkstücke fest mit der Welle verschraubt. An beiden Enden dieser Welle befinden sich kegelförmige Bohrungen, damit die Welle passgenau zwischen die Spitzen der Rundschleifvorrichtung festgespannt werden kann.

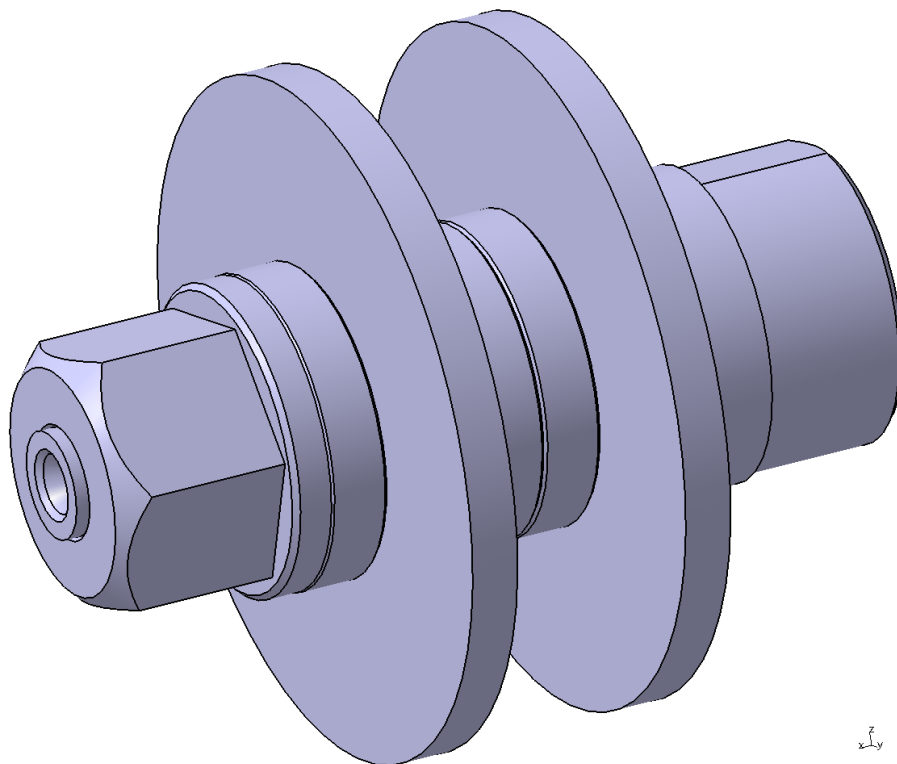


Abbildung 3.6: Welle mit zwei Werkstücken

Nach der Konstruktion aller benötigten CAD-Modelle, werden sie zu einem Modell zusammengefügt (Abbildung 3.7). Dabei wird darauf geachtet, dass die Kontaktbedingungen richtig gesetzt sind und keine Lücken vorhanden sind.

Als letzter Schritt wird dem Modell ein Material zugewiesen. Das ist ein notwendiger Schritt damit die FE-Analyse Ergebnisse liefern kann. Dieses Modell besteht komplett aus Stahl.

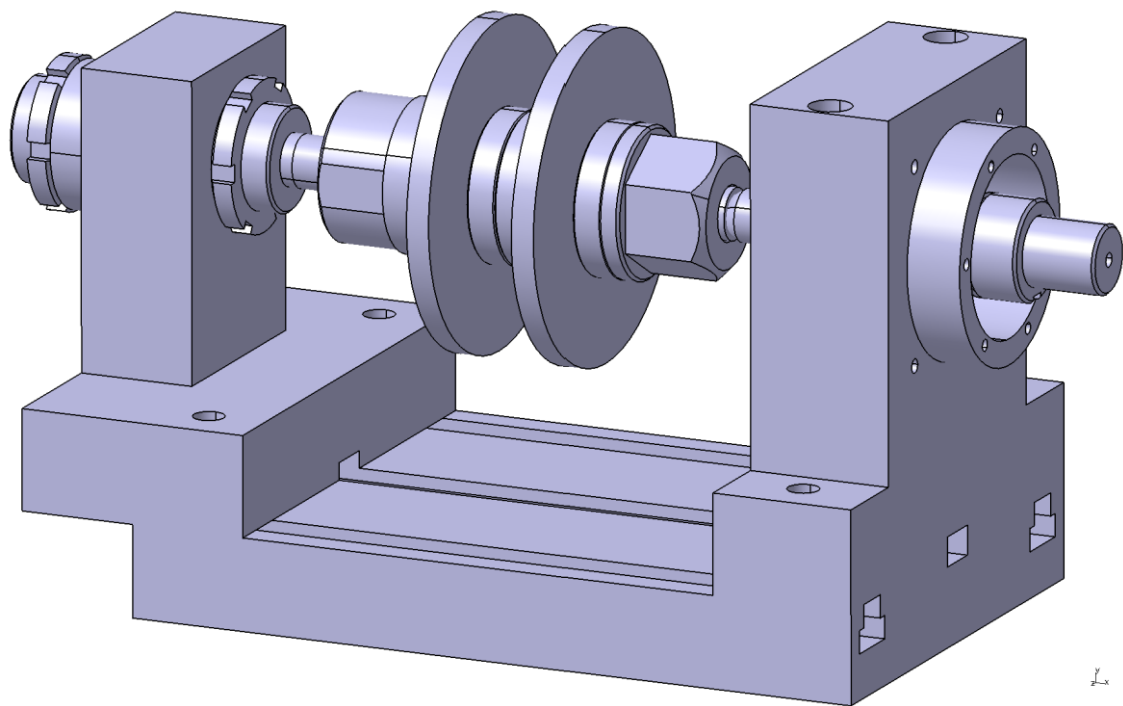


Abbildung 3.7: Zusammengesetzte CAD-Modelle

3.3 FE-Analyse der Rundschleifvorrichtung

Die FE-Analyse basiert auf der Grundlage der Finiten Elemente Methode. Sie wird in dieser Arbeit komplett mit der Software Catia V5 durchgeführt. Dabei wird das zuvor erstellte 3D Modell der Rundschleifvorrichtung geladen und anschließend die Arbeitsumgebung *Generative Structural Analysis* gestartet. Hier wird die FE-Analyse durchgeführt. Der nächste Schritt ist die Erstellung des FE-Netzes.

Die Netzgenerierung ist ein besonders wichtiger Teil der FE-Analyse und hat entscheidende Auswirkungen auf die Ergebnisse. Es setzt ein bestimmtes Maß an Grundwissen voraus, um bei der FE-Analyse zu brauchbaren Ergebnissen zu gelangen. Es ist dem Anwender überlassen welche Art von Netz er für seine Berechnungen verwendet und wie hoch die Qualitätsanforderung an das Netz gestellt ist. Zum einen gibt es die Möglichkeit das Netz als Schalenmodell (2D-Modell) oder als Tetraeder Modell (3D-Modell) zu erzeugen. Der Vorteil eines Schalenmodells ist die einfachere Struktur des Netzes. Es werden nur die Oberflächen von einem Netz belegt, welche sich einfacher und schneller berechnen lassen. Der Nachteil ist, dass alle 3D Elemente von einem Netz überzogen werden und dadurch Verschneidungen an den Kontaktpunkten der Bauteile entstehen. Ohne eine genaue Bearbeitung dieses Netzes kann es bei komplexen Geometrien zu Fehlern zwischen den Körpern kommen. Je komplexer ein Bauteil ist, desto mehr Sinn macht es sich für ein 3D-Netz zu entscheiden. Verschiedene zuvor erstellte Versuchsnetze haben ergeben, dass die Rundschleifvorrichtung in dieser Arbeit zu komplex für ein 2D-Netz ist. Aus diesem Grund wird die Netzgenerierung als 3D-Netz ausgeführt.

Die zweite notwendige Entscheidung fällt auf die Qualität des Netzes. Sie hat einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse. Ein grobes Netz lässt eine schnelle Berechnung und anschließende Analyse zu. Allerdings sind die Werte relativ ungenau und daher nicht zufriedenstellend. Bei einem feinen Netz kann von annähernd genauen Ergebnissen ausgegangen werden. Je feiner das Netz, also die Abstände zwischen den Knoten, desto genauer sind die Ergebnisse. Das Netz ist sehr detailliert, alle Ecken, Radien etc. sind nahezu identisch mit dem 3D Modell. Allerdings hat diese Genauigkeit ihren Nachteil in der Rechenzeit. Je kleiner die Knotenabstände in dem Netz sind, desto höher ist die Rechenleistung und –dauer, die vom Computer gefordert wird. Ab einem bestimmten Zeitpunkt wird das Netz immer feiner, aber die Unterschiede zwischen den Ergebnissen sind infinitesimal klein. Ab diesem Punkt wird unnötige Rechenzeit in Anspruch genom-

men. Deswegen muss ein guter Kompromiss zwischen einem feinem Netz und ausreichend genauen Ergebnissen eingegangen werden. Die Mischung aus Erfahrung und Zielsetzung entscheidet über die Qualität des FE-Netzes. Den Unterschied zwischen einem groben und einem feinen Netz macht Abbildung 3.8 deutlich. Die variablen Knotenabstände sind in Millimeter unter der Abbildung angegeben.

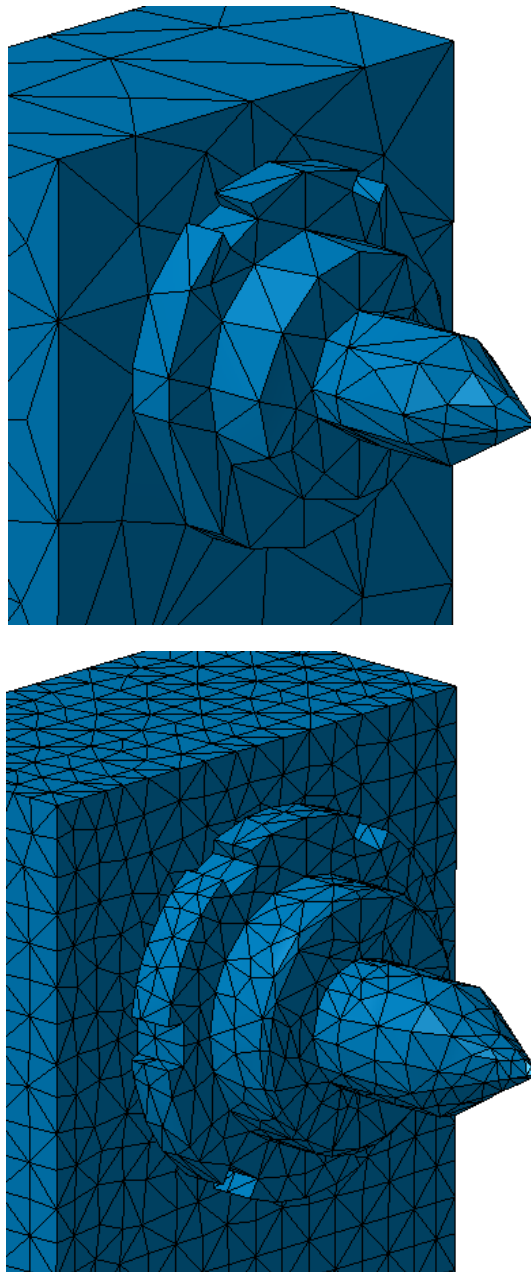


Abbildung 3.8: oben: grobes Netz (4-24mm), unten: feines Netz (0,5-5mm)

Die Netzgenerierung läuft in Catia automatisch ab und kann im Nachhinein vom Anwender bearbeitet werden. Catia erstellt ein nicht homogenes Netz. Das heißt, dass die Tetraeder Elemente aus denen das Netz besteht verschiedene Größen haben. Unter den Eigenschaften des zu erzeugenden Netzes gibt der Anwender an, welche minimalen und maximalen Elementgrößen das Netz haben soll. Auf großen und ebenen Bauteilkonturen werden große und einfache Netzelemente erstellt, die eine schnellere Berechnung erlauben. Bei komplexen Geometrien werden kleine Netzelemente erzeugt. Nur so ist es möglich kleine Konturen detailliert zu beschreiben. Diese bedeuten zwar eine längere Rechenzeit, dafür werden die Ergebnisse nicht durch grobe Geometrien verfälscht.

Nach mehreren Rechenläufen wurde entschieden das Netz auf eine Elementgröße zwischen 0,5 bis 5 mm festzulegen. Mit dieser Elementgröße werden ausreichend genaue Ergebnisse erzielt. In Abbildung 3.9 ist das finale FE-Netz zu sehen. Auf diesem Netz basieren die nachfolgenden Berechnungen.

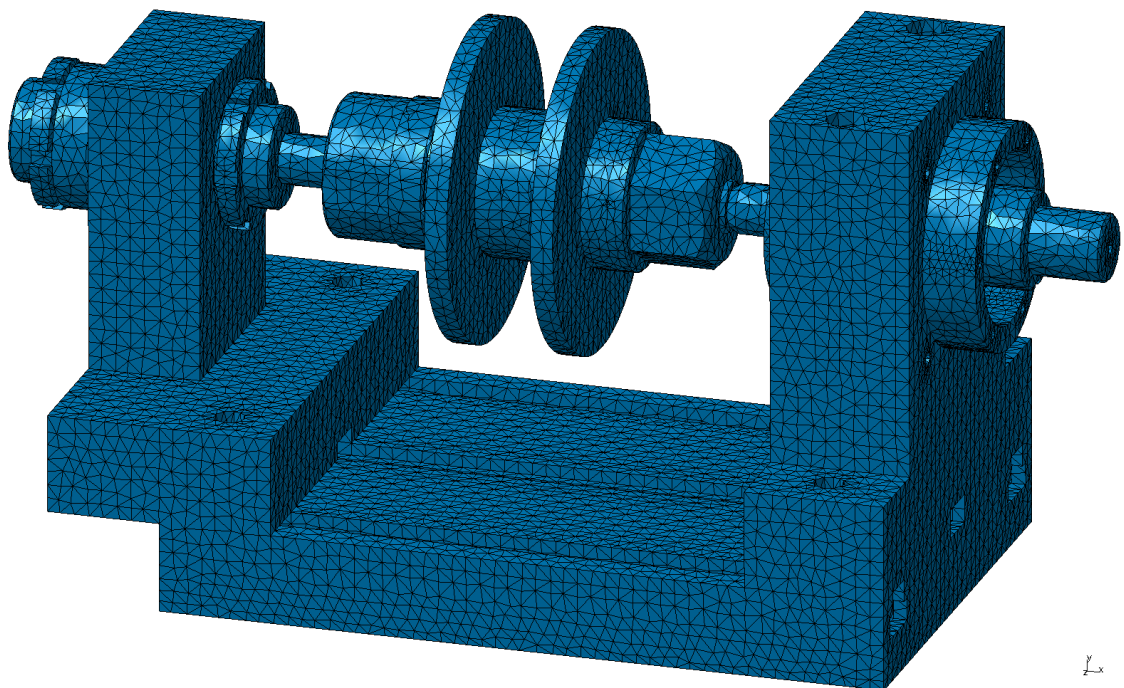


Abbildung 3.9: Finales FE-Netz

3.3.1 Statische Analyse

Die Kräfte, die auf das Modell wirken, ergeben sich aus den Schleifdaten der Flachsleifmaschine [5] und den Werten, die in diesem Kapitel berechnet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass die Schleifmaschine mit einer Schleifscheibe arbeitet, die einen Durchmesser von 500mm hat. Außerdem ist für diese Arbeit gefordert, dass die Maschine mit einer Schnittgeschwindigkeit von 170 m/s arbeitet.

$$v = d \cdot \pi \cdot n \quad (3.1)$$

Diese Formel wird nach n umgestellt, wodurch sich die Drehzahl der Maschine bestimmen lässt.

$$\begin{aligned} n_s &= \frac{v_s}{d_s \cdot \pi} = \frac{170}{0,5 \cdot \pi} = 108,23 \text{s}^{-1} \\ &= 6493,52 \text{min}^{-1} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Mit den geforderten Daten arbeitet die Schleifmaschine bei einer Nenndrehzahl von ungefähr 6500min^{-1} . Aus Abbildung 2.6 des Blohm Leistungsdiagramms lässt sich ablesen, dass eine bei 60kW laufende Profimat bei 6500min^{-1} eine Leistung von annähernd 40kW hat. Aus dieser Leistung lassen sich nun die Kräfte ableiten.

Bei kreisförmigen Bewegungen wird die Leistung mit folgender Formel berechnet.

$$P_s = M_s \cdot 2\pi \cdot n_s \quad (3.3)$$

Daraus ergibt sich das Umfangs-Drehmoment an der Schleifscheibe.

$$M_s = \frac{P_s}{2\pi \cdot n_s} = \frac{40000}{2\pi \cdot 108,23} = 58,8 \text{ Nm} \quad (3.4)$$

Daraus lässt sich die Tangentialkraft berechnen.

$$F_T = \frac{M_s}{r_s} = \frac{58,8}{0,25} = 235,2 \text{ N} \quad (3.5)$$

Während eines Schleifvorganges wirkt die Tangentialkraft zusammen mit der Normalkraft. Die Normalkraft wirkt senkrecht zum Magnetspanntisch der Schleifmaschine und ist somit direkt auf das Werkstück gerichtet. Die Normalkraft ist notwendig, damit ein Werkstück konstant geschliffen wird. Ist die Normalkraft zu gering, drückt das Werkstück die Schleifscheibe weg und es wird kein Material abgetragen.

Die Normalkraft berechnet sich aus der Tangentialkraft und einem Reibwert μ . Der Reibwert ist abhängig von verschiedenen Faktoren. Dazu zählen Werkstückmaterial, Schleifscheibenart und Kühlschmiermittel. Dieser Wert variiert sehr stark. Auf Grund dessen wird ein theoretischer Wert angenommen. Auf Nachfrage bei der Firma Blohm wurde ein Reibwert von $\mu = 0,5$ empfohlen. Damit lässt sich die Normalkraft wie folgt festlegen.

$$F_N = \frac{1}{\mu} \cdot F_T = \frac{1}{0,5} \cdot 235,2 = 470,4 \text{ N} \quad (3.6)$$

Beim Außenrundsleifen ist die Kontaktfläche zwischen Werkstück und Schleifwerkzeug nahezu linienförmig. Es stehen zwei Möglichkeiten zur Auswahl die errechneten Kräfte und Belastungen für die Analyse einzugeben.

Die Kräfte werden als verteilte Last auf 2 Knoten eingegeben und das Programm teilt sie selbst auf einer Linie auf, oder es werden die Streckenlasten ermittelt, welche auf die Kontaktlinie wirken. Um zu veranschaulichen, dass die Ergebnisse beider Varianten nicht gleich sind, werden diese Methoden zu Beginn miteinander verglichen.

Die Streckenlasten errechnen sich durch das aufteilen der Kräfte auf eine Strecke. In diesem Fall ist das die Kontaktlinie zwischen Werkstück und Schleifscheibe. Die Werkstückscheibe hat eine Breite von 8mm. Auf dieser Länge wird die Kraft wie folgt berechnet.

$$q = \frac{F}{l} \quad (3.7)$$

Für die Kraft in tangentialer Richtung gilt:

$$q(z) = q(F_T) = \frac{235,2}{0,008} = 29400 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (3.8)$$

Für die Kraft in radialer Richtung gilt:

$$q(y) = q(F_N) = \frac{470,4}{0,008} = 58800 \frac{\text{N}}{\text{m}} \quad (3.9)$$

Der Kraftangriffspunkt befindet sich an der obersten Stelle der Werkstückscheibe (Abbildung 3.10). Dabei ist F_T oder $q(F_T)$ auf der z-Achse und ist tangential zum Werkstück gerichtet. F_N oder $q(F_N)$ befindet sich auf der y-Achse und liegt in radialer Richtung. Nach Eingabe der Kräfte ist in Catia anschließend die Resultierende direkt am Werkstück sichtbar, siehe Abbildung 3.10.

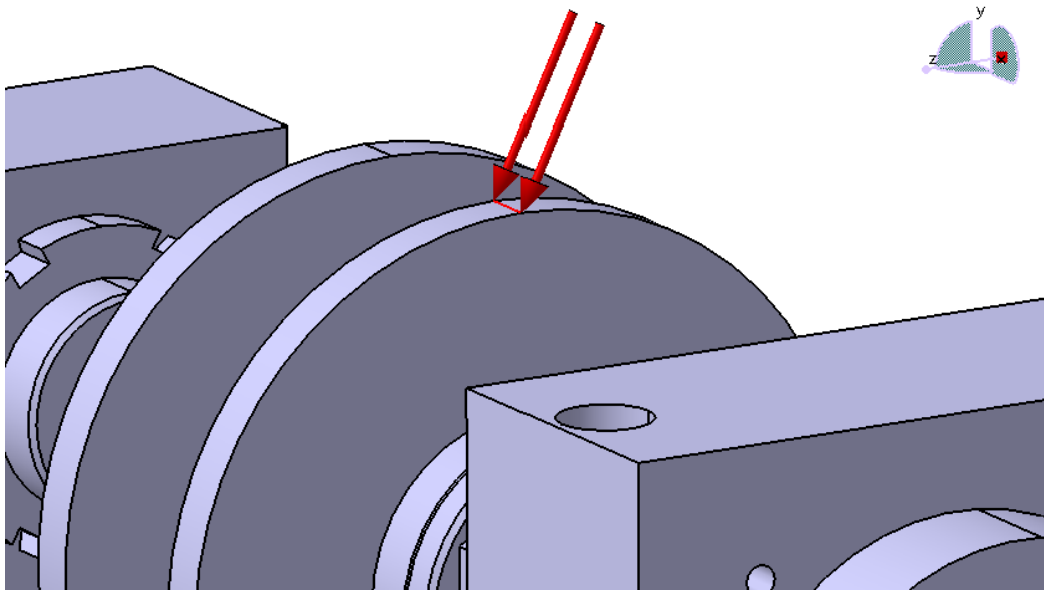


Abbildung 3.10: Kraftangriffspunkt am Werkstück

Zuerst wird eine Netzgenerierung mit den einzelnen Kräften gestartet. Dem System wird hierzu an der Unterseite eine Feste Einspannung zugewiesen. Nun werden F_N und F_T als Lasten eingetragen und die Berechnung gestartet (Abbildung 3.11 oben). Anschließend werden die Streckenlasten $q(F_T)$ und $q(F_N)$ eingegeben und eine erneute Berechnung gestartet (Abbildung 3.11 unten).

Es gibt mehrere Methoden die Spannungen in einem Bauteil berechnen zu lassen. Die im Maschinenbau und Bauwesen am häufigsten verwendete Methode ist die Vergleichsspannung nach von Mises, auch Gestaltänderungshypothese (GEH) genannt. Sie wird bei zähen Materialien wie Stahl und Aluminium eingesetzt. Bei der GEH werden Vergleichsspannungen mit dem Betrag Null als blaues Netz angezeigt. Dies kommt vor, wenn die Spannungen innerhalb des Bauteils in alle drei Achsrichtungen gleich groß sind [3].

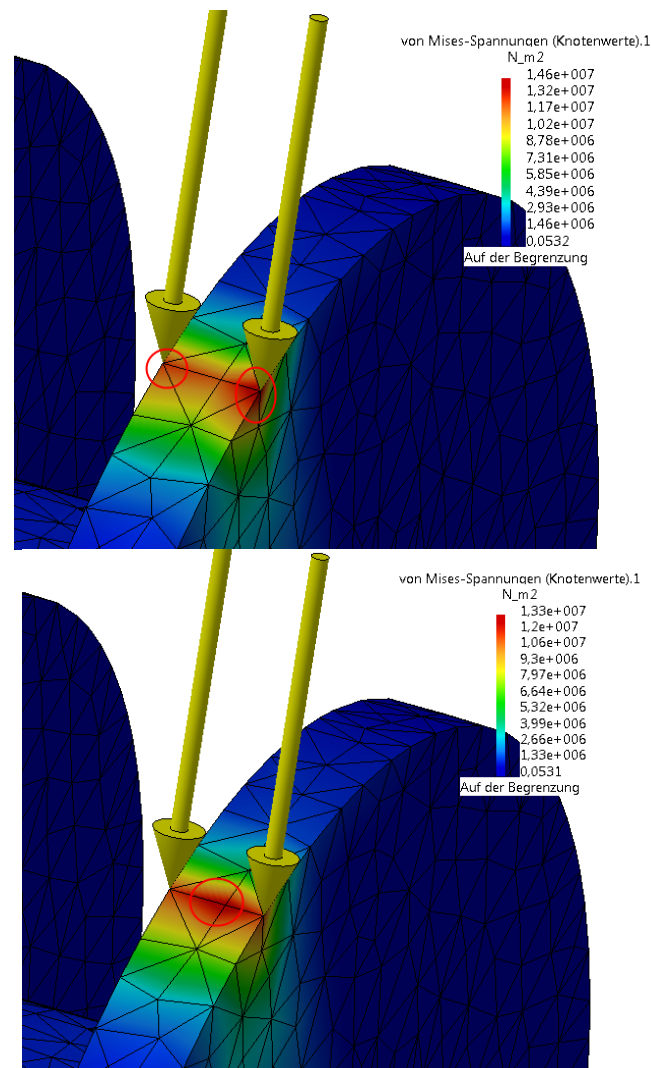


Abbildung 3.11: oben: Verteilte Last, unten: Streckenlast

Es wird davon ausgegangen, dass beide Möglichkeiten der Krafteingabe dieselben Ergebnisse liefern. Im direkten Vergleich ist jedoch deutlich zu erkennen, dass dies nicht der Fall ist. Bei der verteilten Last liegt das Spannungsmaximum bei $1,46 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$. Wobei hingegen bei der Streckenlast das Spannungsmaximum niedriger ist, nämlich $1,33 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2$.

Obwohl in beiden Fällen für den Kraftangriff eine Strecke gewählt wurde, sind die Ergebnisse verschieden. Das lässt sich darauf zurückführen, dass Catia bei der Eingabe der Kräfte F_N und F_T diese nicht wie gedacht auf einer Linie verteilt, sondern an den beiden äußersten Knoten anbringt. Auf das Werkstück wirkt eine Resultierende, die in zwei einzelne Kräfte aufgeteilt wird. Es herrscht an zwei Stellen eine Punktbelastung (Abbildung 3.11, oben).

Punktbelastungen sind bei der FEM meistens von Nachteil, weil die gesamten Kräfte auf einen Punkt wirken. Dadurch ergeben sich unrealistische Werte, die in der Praxis kaum vorkommen. In Extremfällen führen Kräfte, die sich einen Punkt hin zuspitzen zu Singularitäten. Die Kraft ist dann in dem einen Punkt unendlich groß und es kann keine Berechnung stattfinden. Aus diesem Grund werden Kräfte meist auf Strecken oder Flächen verteilt.

Bei der Analyse mit der Streckenlast hingegen wurde die Kraft homogen auf die gesamte Breite des Werkstücks verteilt (**Abbildung 3.11**, unten). Das Spannungsmaximum liegt verteilt auf der Werkstückbreite.

Dieser Vergleich ist ein gutes Beispiel dafür, dass für die Anwendung der FEM ein gewisses Maß an Grundwissen und Erfahrung vorhanden sein muss. Es ist möglich die Kräfte als Verteilte Lasten anzugeben und damit zu rechnen. Da keine Fehler angezeigt werden, wird davon ausgegangen, dass die Berechnungen richtig sind. Dies ist allerdings ein Trugschluss. Es ist bekannt, dass bei einem Schleifvorgang wie in dieser Arbeit Linienkontakt herrscht. Darum muss dieser auch so in einer FEM-Analyse angegeben werden. Dementsprechend basieren die nachfolgenden Ergebnisse der statischen Analyse auf der Anwendung von Streckenlasten.

Für die statische Analyse werden zuerst die Randbedingungen festgelegt. In diesem Teil der Analyse wird davon ausgegangen, dass die Rundschleifvorrichtung in der Schleifmaschine von Blohm auf einen Magnetspanntisch aufgespannt ist und die Kräfte von der Schleifscheibe übertragen werden. Dem zufolge wird die gesamte untere Fläche des Modells als Feste Einspannung festgelegt. Bei einem Schleifvorgang wird jeweils ein Werkstück zur Zeit bearbeitet. Somit wird während der statischen FEM-Analyse jeweils nur eine der beiden Scheiben durch eine Streckenlast belastet (**Abbildung 3.12**).

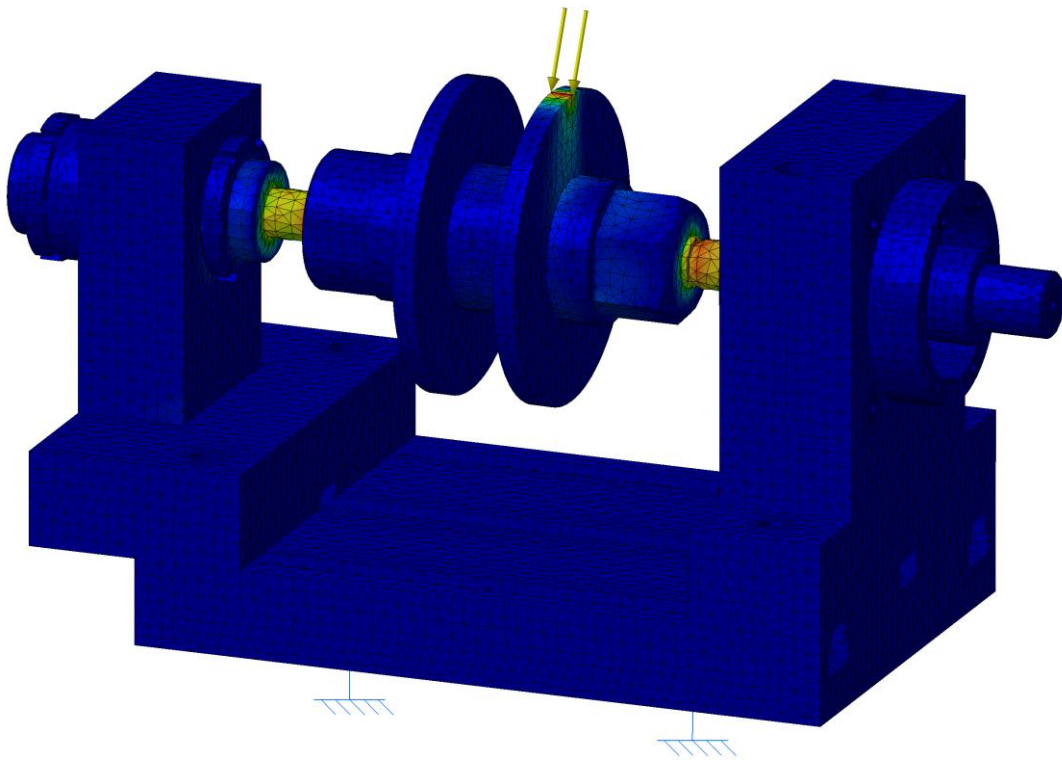


Abbildung 3.12: Verhalten des Systems bei genannter Belastung

Abbildung 3.13 ist eine vergrößerte Ansicht der Einspannsitzen. Man sieht in diesen Abbildungen wie sich die Spannungen in den Spitzen verteilen und auf die Rundschleifvorrichtung übertragen werden.

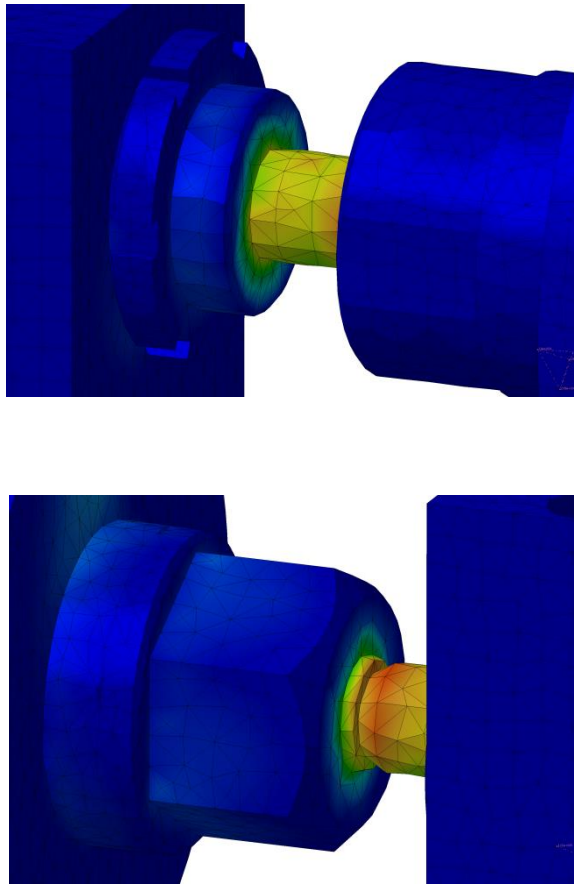


Abbildung 3.13: Vergrößerte Darstellung der Belastung an den Spitzen

In Abbildung 3.14 ist der Spannungsverlauf im Werkstück deutlich sichtbar. Die Last der Schleifscheibe wird über das Werkstück an die Welle und anschließend in die Rundschleifvorrichtung übertragen.

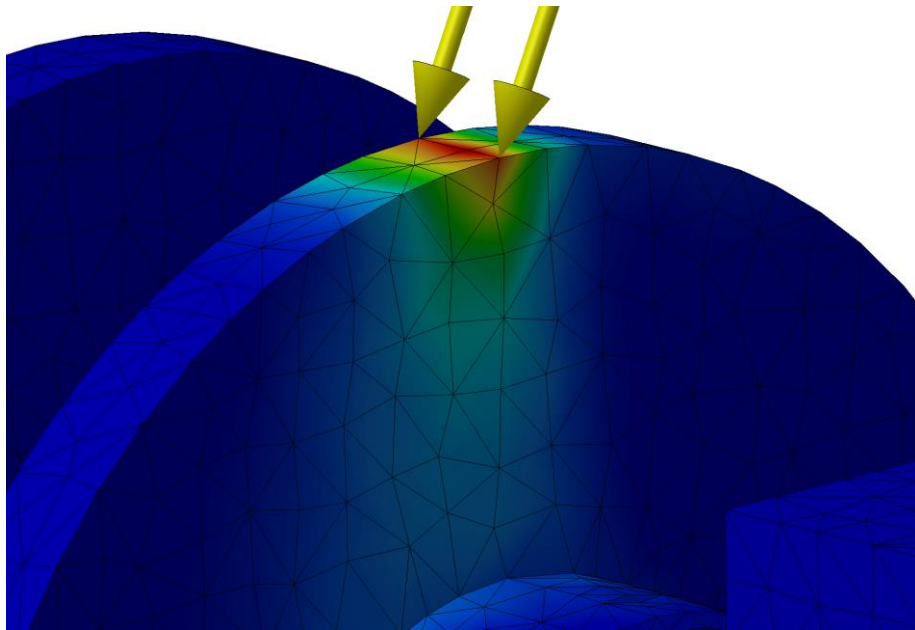


Abbildung 3.14: Spannungsverlauf in der Werkstückscheibe

3.3.2 Eigenwertanalyse

Die Eigenwertanalyse basiert auf dem in Kapitel 3.3 erstellten Netz.

Mittels der Eigenwertanalyse werden die kritischen Frequenzen ermittelt, bei denen sich das Bauteil unter Arbeitsbedingungen auf keinen Fall befinden darf. Jedes Bauteil hat auf Grund seiner Geometrie Eigenfrequenzen. Wird das Bauteil innerhalb dieser Frequenzen durch externe Kräfte angeregt, führt dies zu Resonanzfällen. Im schlimmsten Fall führen solche Resonanzen zu Beschädigungen oder Zerstörung von Bauteil und/oder Maschine. Aus diesem Grund werden frühzeitig die Eigenfrequenzen ermittelt und nötige Änderungen am Modell durchgeführt.

Eigenwertanalysen können an fest eingespannten oder freien beweglichen Bauteilen durchgeführt werden. Die Rundschleifvorrichtung befindet sich zur Betriebszeit in einer festen Einspannung. Diese wird für die Eigenwertanalyse als Randbedingung festgelegt.

Die Randbedingung befindet sich, wie bereits bei der statischen Analyse, an der Unterseite der Rundschleifvorrichtung. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 3.15.

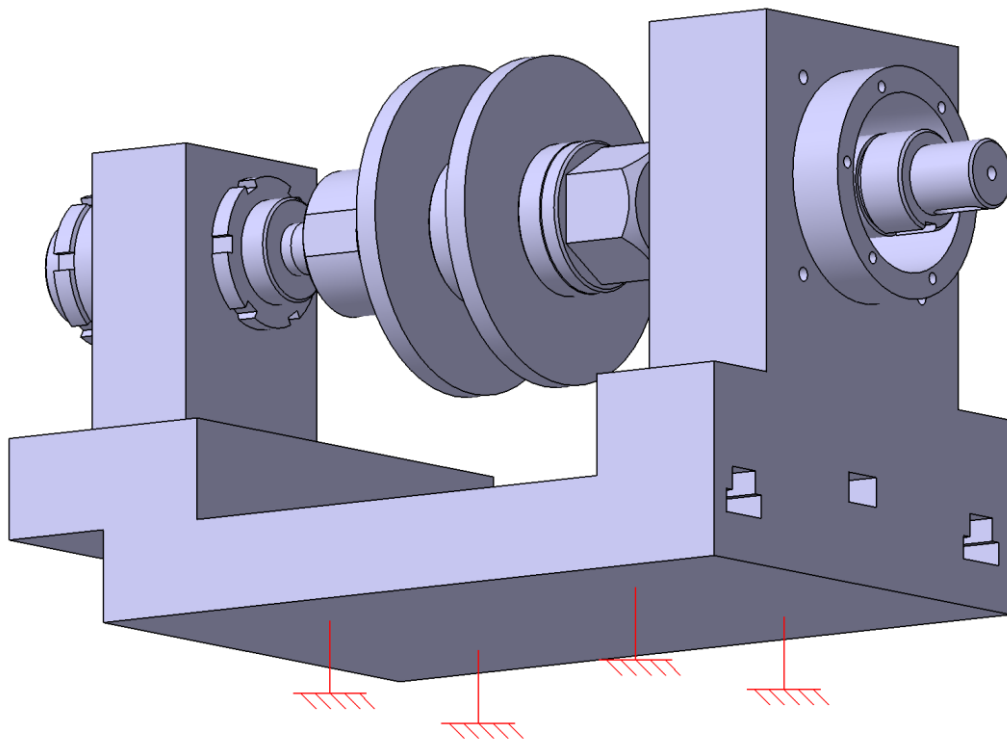


Abbildung 3.15: Feste Einspannung am Boden des CAD-Modells

Anschließend werden die ersten 10 Eigenfrequenzen der Rundschleifvorrichtung ermittelt (Abbildung 3.16).

Frequenznummer	Frequenzwertwert
1	802,01Hz
2	1029,56Hz
3	1284,09Hz
4	1475,72Hz
5	2141,11Hz
6	2386,06Hz
7	2580,36Hz
8	2832,99Hz
9	3089,06Hz
10	3121,31Hz

Abbildung 3.16: Tabellarische Abbildung der Eigenfrequenzen

Von den ersten 6 Eigenfrequenzen werden zur Veranschaulichung die Eigenformen erstellt.

Eigenform 1

Die Eigenfrequenz liegt bei 802,008 Hz. Bei dieser Frequenz wird die Welle die zum Aufnehmen der Werkstücke dient, in eine Rotation um die eigene Achse versetzt. Die größten Spannungen entstehen an der linken Einspannspitze der Rundschleifvorrichtung. Dort wird eine maximale Spannung von $9,52 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ erreicht (Abbildung 3.17).

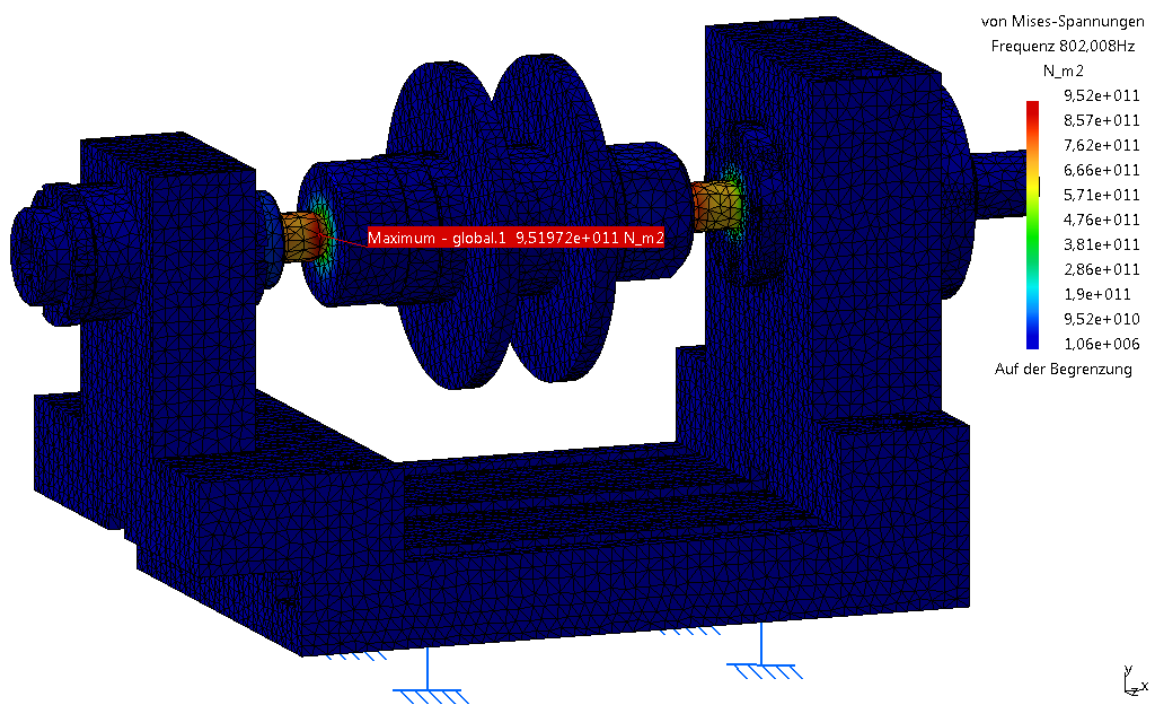


Abbildung 3.17: Eigenform 1 bei 802,008 Hz

Eigenform 2

Die Eigenfrequenz liegt bei 1029,56 Hz. Beim Erreichen dieser Frequenz wird der rechte (große) Steg in Schwingung versetzt. Es entstehen Vibrationen in axialer Richtung am gesamten System. Die maximale Spannung liegt bei $4,09 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ und befindet sich an der rechten Einspannungspitze. Im Vergleich zur ersten Eigenform ist hier die maximale Spannung geringer, weil sich die Spannungen im gesamten System verteilen (Abbildung 3.18).

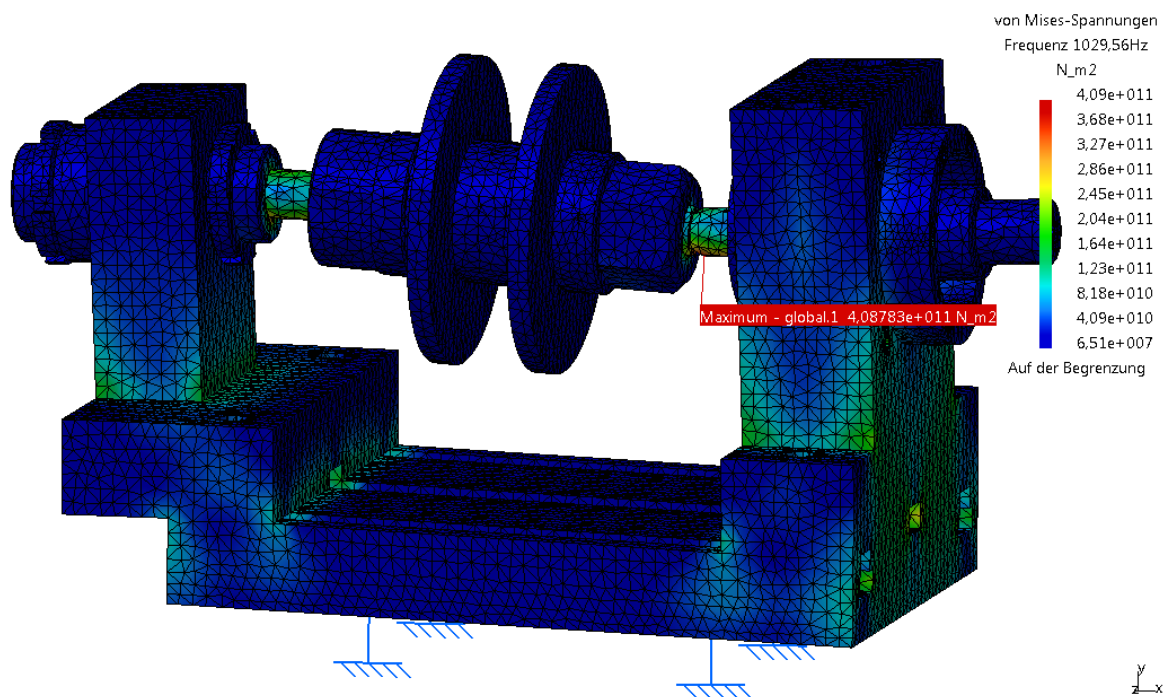


Abbildung 3.18: Eigenform 2 bei 1029,56 Hz

Eigenform 3

Die Eigenfrequenz liegt bei 1284,09 Hz. Bei dieser Frequenz bewegt sich die Aufnehmerwelle radial auf der z-Achse. Das Spannungsmaximum befindet sich an der Kontaktstelle zwischen Einspannspitze und Aufnehmerwelle. Die größte Spannung hat einen Wert von $8,6 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ (Abbildung 3.19).

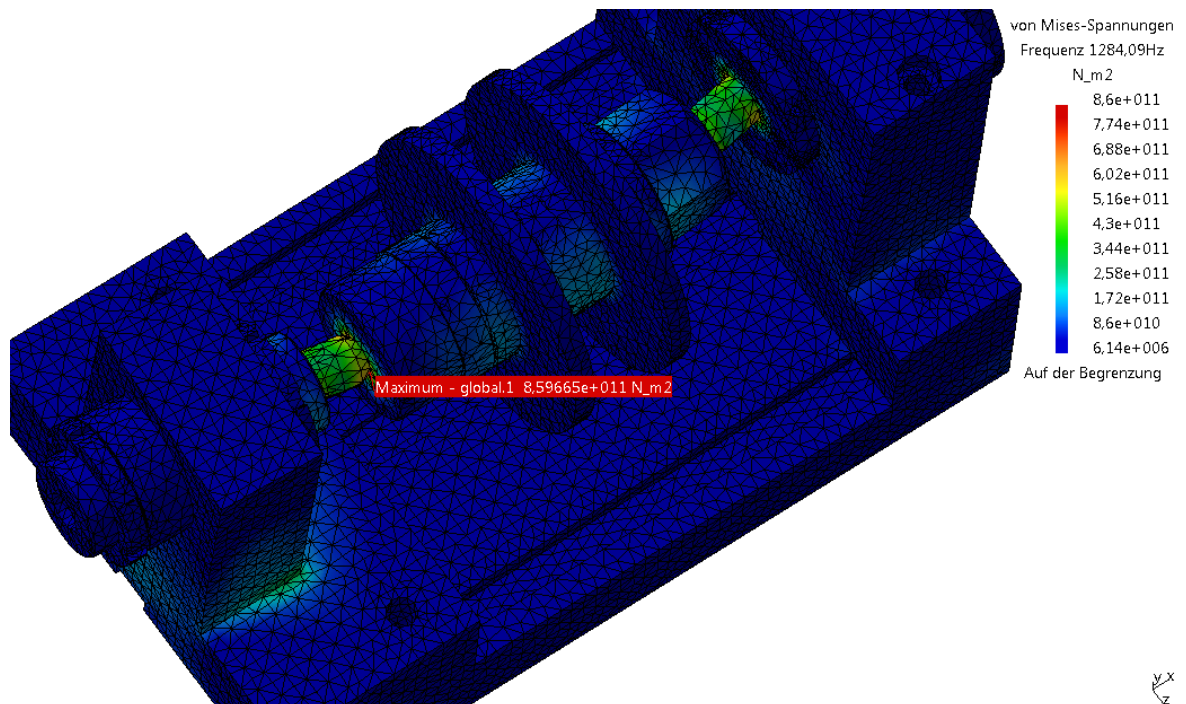


Abbildung 3.19: Eigenform 3 bei 1284,09 Hz

Eigenform 4

Die Eigenfrequenz liegt bei 1475,72 Hz. In dieser Frequenz bewegt sich die Aufnahme­welle in radialer Richtung auf der y-Achse. Die maximale Spannung liegt bei $1,51 \cdot 10^{12}$ N/m² und befindet sich beim Übergang vom kleinen Steg zur linken Einspanns­pitze. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 3.20.

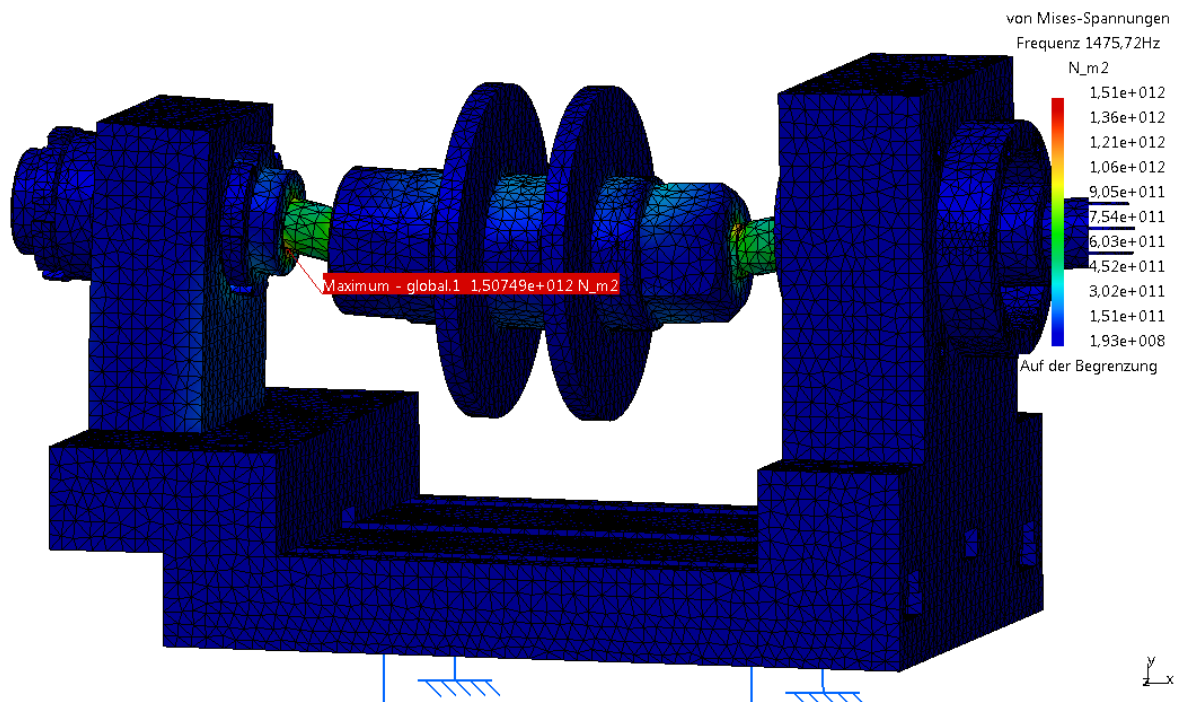


Abbildung 3.20: Eigenform 4 bei 1475,72 Hz

Eigenform 5

Die Eigenfrequenz liegt bei 2141,11 Hz. Bei dieser Frequenz schwingt die Werkstückwelle auf der x-z-Ebene um den eigenen Schwerpunkt. Die maximale Spannung beträgt $1,15 \cdot 10^{12}$ N/m² und befindet sich im Kontaktpunkt zwischen der rechten Einspannspitze und der Werkstückwelle. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 3.21.

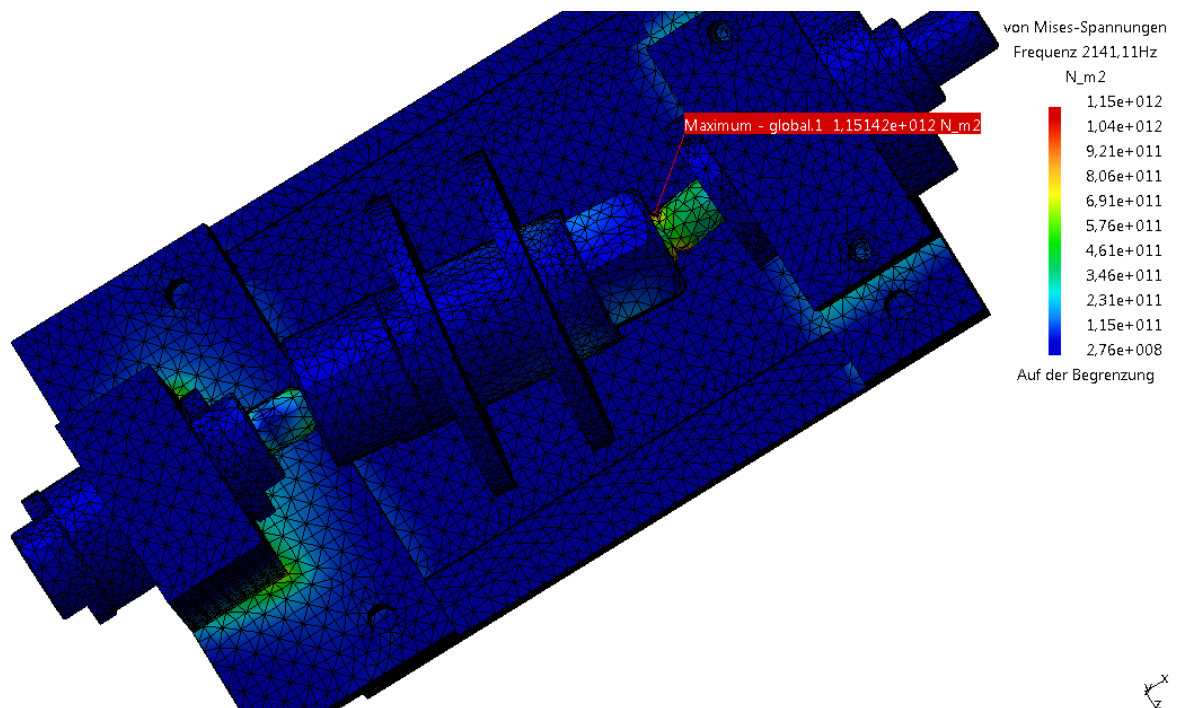


Abbildung 3.21: Eigenform 5 bei 2141,11 Hz

Eigenform 6

Die Eigenfrequenz liegt bei 2386,06 Hz. Bei dieser Eigenfrequenz gerät die Einspannschraube im großen Steg auf der x-z-Ebene in Bewegung. Dabei entsteht an der Kontaktstelle zwischen Einspannschraube und Werkstückwelle eine maximale Spannung von $8,55 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$. Zur Veranschaulichung dient Abbildung 3.22.

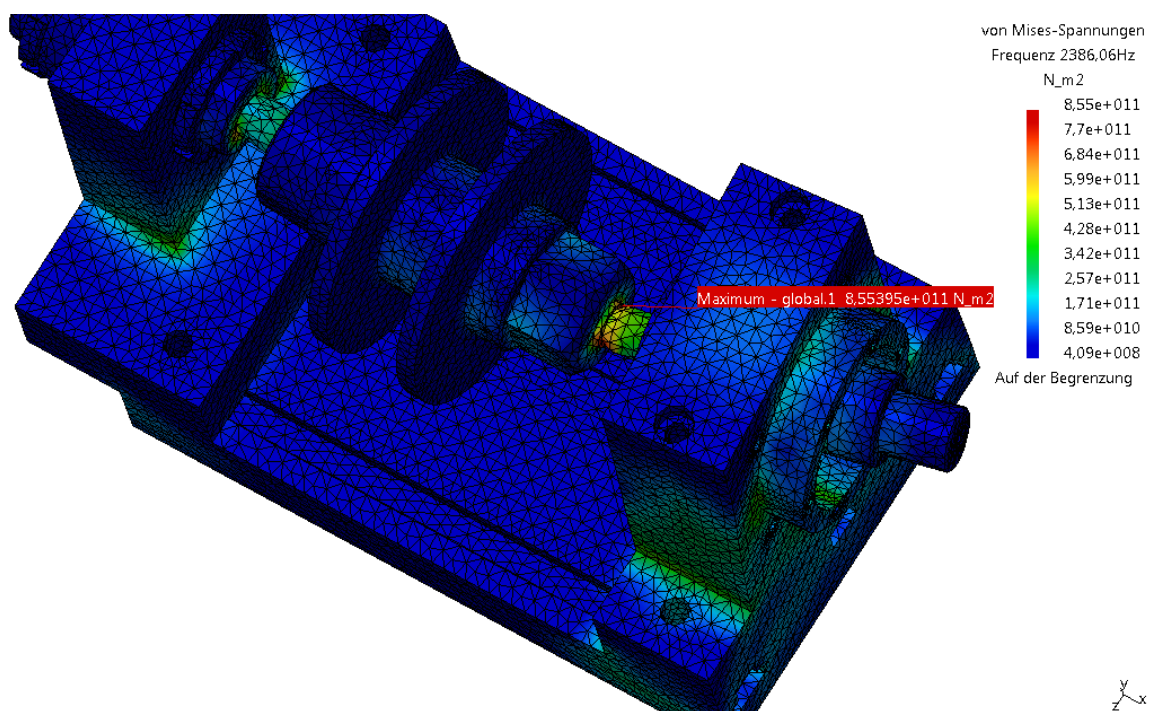


Abbildung 3.22: Eigenform 6 bei 2386,06 Hz

3.3.3 Dynamische Analyse

Bei der dynamischen FEM-Analyse wird die Rundschleifvorrichtung mit aufgespannten Werkstücken einer harmonischen Anregung unterzogen. Als Randbedingung gilt wie in den Kapiteln zuvor die Unterseite des CAD-Modells als Fest eingespannt. Als Belastung wird die Streckenlast aus Kapitel 3.3.1. gewählt die an derselben Stelle das Bauteil belastet. Jedoch ist Streckenlast in diesem Fall keine statische Belastung sondern dient der harmonischen Anregung.

Das Modell wird in einem Frequenzbereich von 0 – 2000 Hz harmonisch angeregt. Dieser Frequenzbereich wurde gewählt um die Reaktion des Moduls bei Erreichen der ersten vier Eigenfrequenzen zu untersuchen. Als Ergebnis werden die Auslenkung in Meter, die Auslenkgeschwindigkeit in m/s und die Auslenkbeschleunigung in m/s^2 ermittelt.

Beim Schleifvorgang wird mit einer Nenndrehzahl von 108 s^{-1} gearbeitet. Diese Drehzahl entspricht einer Frequenz von 108 Hz. Aus diesem Grund wird die harmonische Anregung bei der Frequenz von 108Hz mit dem Faktor 5 multipliziert, um die Auswirkung der Belastung deutlicher zu machen. Dies dient einzig und allein der Kennzeichnung der Betriebsfrequenz. Der tatsächliche Wert bei dieser Frequenz liegt auf Höhe der Frequenzen, die sich um 108Hz befinden.

Nach einem erfolgreichen Berechnungsdurchlauf wird ein beliebiger Knotenpunkt auf dem FE-Netz ausgewählt und markiert (Abbildung 3.23). Für die dynamische Analyse in dieser Arbeit wird der Knoten ausgewählt, an dem auch die Belastung durch Streckenlast erfolgt. An dieser Stelle findet auf Grund der Belastung und Geometrie des Bauteiles die größte Bewegung statt. Anschließend werden 3 Graphen ausgegeben, welche die Auslenkungen darstellen. Die Graphen zeigen das Verhalten der Rundschleifvorrichtung, wenn eine Belastung unter Einfluss bestimmter Frequenzen stattfindet. Für die genauen Werte, wurden die Daten der Graphen aus Catia exportiert.

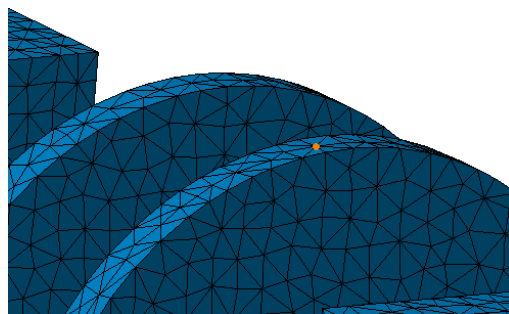


Abbildung 3.23: Ausgewählter Knotenpunkt

Auslenkamplitude

In Abbildung 3.24 ist der Belastungsverlauf von 0 bis 2000Hz abgebildet. Auf der Abszissenachse befindet sich die Frequenz in Hz und auf der Ordinatenachse ist die dazu gehörende Auslenkung in Meter. Die blaue Amplitude zeigt die Auslenkung auf der z-Achse, das ist die Bewegung in tangentialer Richtung zur Werkstückwelle. Die grüne Amplitude ist die Auslenkung auf der y-Achse. Sie zeigt die Auslenkung des Knotenpunktes in radialer Richtung zur Werkstückwelle. Die rote Amplitude zeigt die Verschiebung auf der x-Achse, welche in axialer Richtung zur Werkstückwelle liegt. Durch die harmonische Anregung treten wie erwartet große Auslenkung direkt an den Eigenfrequenzen auf. Die Frequenz, die unter Arbeitsbedingungen auf die Rundschleifvorrichtung wirkt, liegt bei 108Hz. Um die Frequenz erkennbarer zu machen, wurde dort die 5-fache Belastung angenommen.

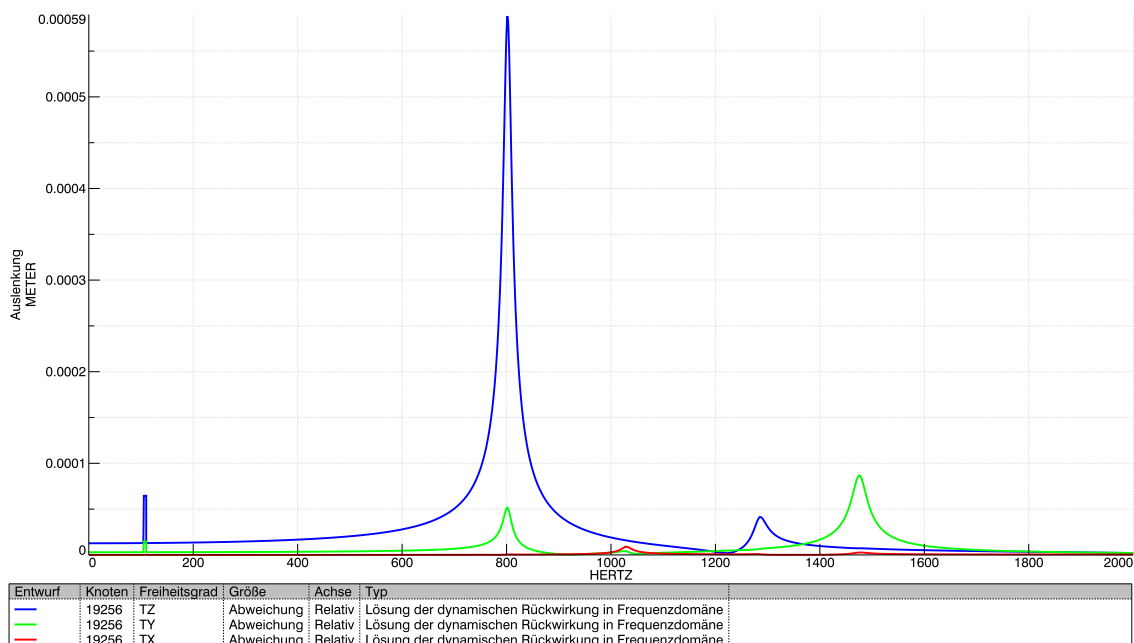


Abbildung 3.24: Auslenkung in m

Zu sehen ist wie stark eine Bewegung stattfindet, wenn die Rundschleifvorrichtung in ihren Eigenfrequenzen betrieben wird. Bei Schleifvorgängen in der Betriebsfrequenz von 108Hz, treten Abweichungen von $1,28 \cdot 10^{-5} \text{ m}$ auf. Das entspricht 0,01mm. Dieser Wert ist so klein, dass er im Betriebszustand vernachlässigt werden kann. Die maximale Auslenkung sind $5,88 \cdot 10^{-4} \text{ m}$ und befinden sich bei wie erwartet bei der ersten Eigenfrequenz von 802Hz. Das entspricht 0,5mm. Diese Auslenkung ist um ein 50-faches größer als die Auslenkung im Betriebszustand.

Auslenkgeschwindigkeit

Dieser Graph (Abbildung 3.25) zeigt mit welcher Geschwindigkeit die Auslenkung bei bestimmten Frequenzen erfolgt. Hier ist wieder deutlich zu erkennen, dass die Amplituden auf den Eigenfrequenzen der Rundschleifvorrichtung liegen. Die Auslenkung bei 108Hz liegt an der temporären erhöhten Belastung und dient der Markierung der Betriebsfrequenz. Die am stärksten ausgeprägte Amplitude liegt bei 802Hz. Bei dieser Frequenz hat die Auslenkung eine Geschwindigkeit von 2,964 m/s. Bei der Betriebsfrequenz von 108Hz beträgt die Auslenkgeschwindigkeit 0,008 m/s.

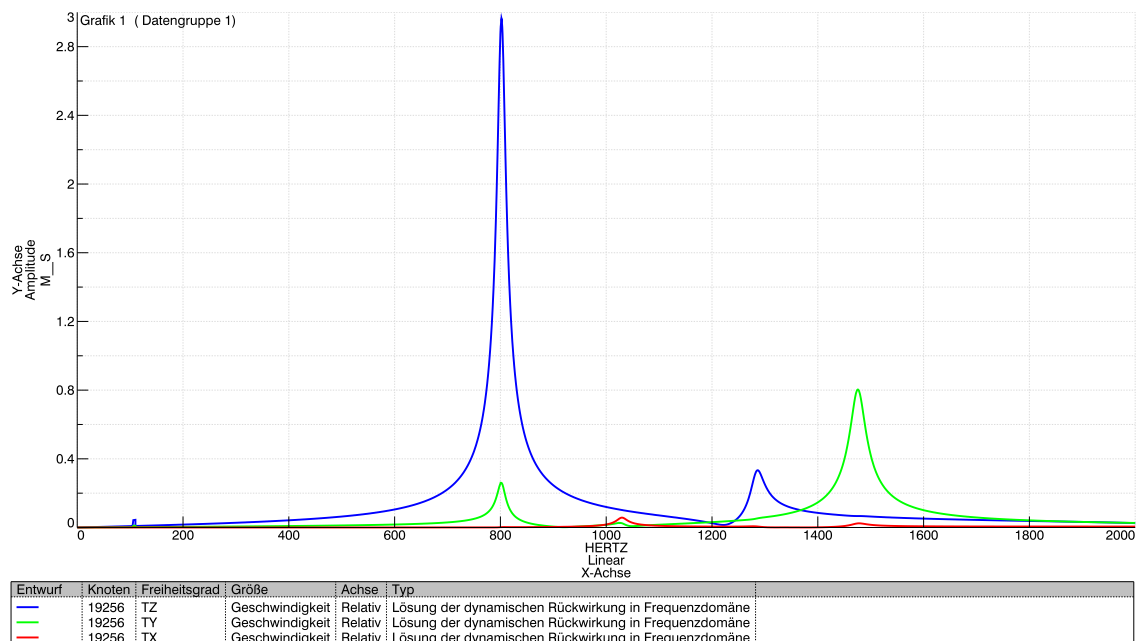


Abbildung 3.25: Auslenkung in m/s

Auslenkbeschleunigung

In diesem Graphen (Abbildung 3.26) sind die Auslenkbeschleunigungen in m/s^2 bei bestimmten Frequenzen abgebildet. Erneut ist sichtbar, dass sich die maximalen Amplituden auf den Eigenfrequenzen befinden. Die Auslenkbeschleunigung im Betriebszustand beträgt $5,62 \text{ m/s}^2$ und liegt bei 108 Hz . Die Auslenkbeschleunigung hat ihren Höchstwert auf der z-Achse bei 802 Hz . Sie beträgt $14937,13 \text{ m/s}^2$.

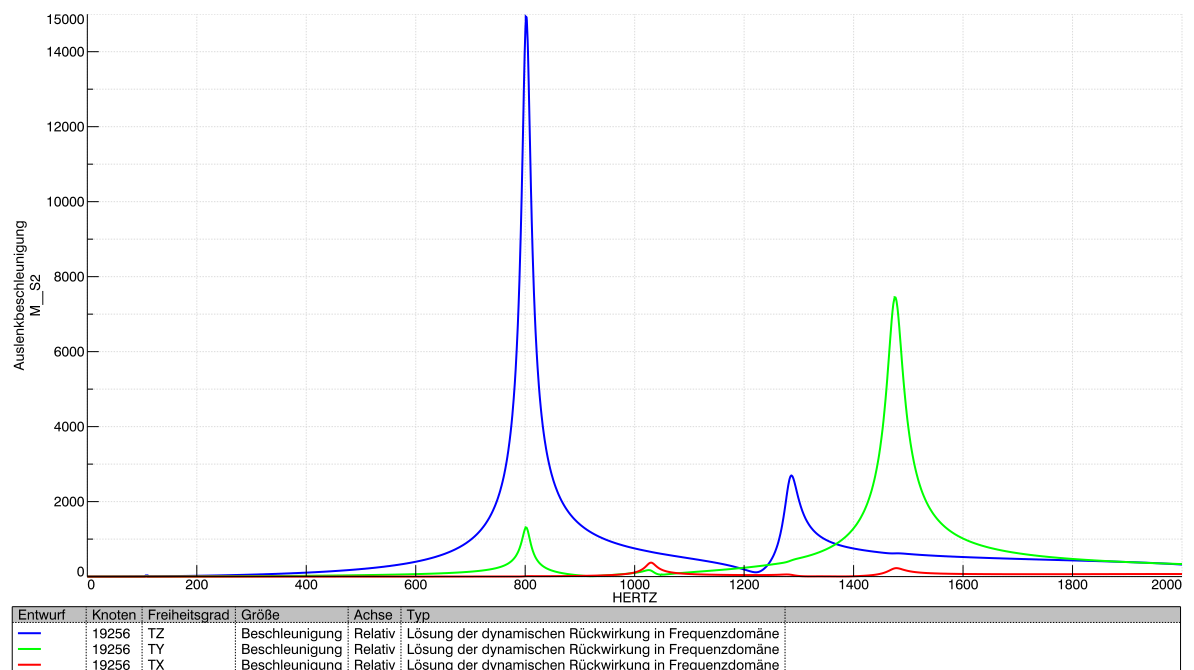


Abbildung 3.26: Auslenkbeschleunigung in m/s^2

3.4 Optimierung

In diesem Kapitel wird die mögliche Optimierung der Rundscheifvorrichtung durchgegangen. Dafür wird das analysierte Modell angeschaut und Bereiche aufgezählt die man zur Erhöhung der Sicherheit und Stabilität verändern könnte.

Da die Rundscheifvorrichtung RSV410 ein Produkt ist welches zum Verkauf steht, ist am Modul selbst schon alles mit Bedacht konstruiert worden um direkt so eingesetzt werden zu können wie vorgesehen. Nichts desto trotz können Änderungen am Modell vorgenommen werden, um andere Belastungsfälle simulieren zu können oder um die vorhandenen Belastungen noch besser zu verteilen.

In Abbildung 3.12 ist erstmalig zu sehen, dass die kritischen Stellen des Moduls, die Einspannsitzen sind. Durch die Vergrößerung der Spitzen im Durchschnitt oder die Verkürzung ihrer Länge kann ein Großteil der Spannungen verlagert werden.

Eine andere Möglichkeit der Optimierung wäre die Wahl eines anderen Materials. In den Analysen aus Kapitel 3.3 wurde dem gesamten Bauteil, Stahl als Material zugewiesen. Da das CAD-Modell aus einem einzigen SOLID besteht ist es nicht möglich verschiedenen Bereichen unterschiedliche Materialien zuzuweisen. Hier wäre es von Vorteil für die Einspannsitzen ein härteres Material anzunehmen als Stahl. Dadurch wird sichergestellt dass die Einspannsitzen nicht überbelastet werden und die Spannungen innerhalb des Systems sich auf die Stege ausbreiten.

3.5 Kostenanalyse

In diesem Kapitel werden die Kosten aufgezählt, die für die Anschaffung der Maschinen anfallen. Dadurch wird gezeigt wieviel günstiger ein Umbau im Gegensatz zu der Neuanschaffung einer Schleifmaschine ist.

In den meisten Fällen sind Preise für neue Industriemaschinen nur auf Nachfrage erhältlich. Für die in dieser Arbeit vorkommenden Maschinen war es allerdings nicht möglich die aktuellen Preise festzustellen. Aus diesem Grund wird der Preis für die Blohm Profimat MT408 und die Studer S31 grob geschätzt. Das reicht auch völlig aus und eine treffende Aussage über die Rentierbarkeit eines Maschinenumbaus zu treffen.

Auf der Internetseite der Firma Blohm steht eine Maschine mit samt Preisangabe zum Verkauf. Die Blohm Orbit 25. Sie zählt zu den günstigeren Flach- und Profilschleifmaschinen und kostet mindestens 95000€ [7]. In der Recherchephase wurde weiterhin in Erfahrung gebracht dass die Preise für Industriemaschinen, sich auf mehreren hunderttausend Euro belaufen können. Die Studer S31 wird als komplexere Maschine eingestuft, wodurch sie einen weit höheren Anschaffungspreis hat als die Orbit 25.

Für die Rundschleifvorrichtung RSV410 hat die Firma Steinmetz eine Preisangabe weitergegeben. Die gesamten Kosten für die Vorrichtung RSV410 belaufen sich auf 12000€. Durch etwaige Umbaumaßnahmen an der Profimat können diese Kosten auch etwas höher gesetzt werden.

Demnach ist es offensichtlich dass die Kosten für eine neue Rundschleifmaschine um ein vielfaches höher sind als der Umbau einer bereits vorhandenen Maschine.

4 Zusammenfassung

Die Recherchephase in Kapitel 3.1, war ein Prozess der über mehrere Wochen verlief. Zu Beginn waren die Aussichten auf ein passendes Erweiterungsmodul schlecht. Ein möglicher Grund kann sein, dass diese Art von Umbau selten vorkommt. Es haben sich nur eine Hand voll Firmen gefunden, welche sich auf die Erweiterung von Maschinen spezialisiert haben. Von denen besaß nur eine, ein zu dieser Arbeit passendes Modul. Zudem handelt es sich um ein Auslaufmodell, welches nur auf Anfrage bestellbar ist.

In Kapitel 3.2 wurde das Modul als CAD-Modell konstruiert und anschließend einer FE-Analyse unterzogen. Während der Konstruktion sind keinerlei Schwierigkeiten aufgetreten. Dabei wurde auf nicht brauchbare Teile verzichtet. Der Grund liegt in der Minderung der Fehlerquellen. Gleichzeitig vereinfachten sich Geometrie und Netz. Somit handelt es sich um ein realitätsnahes 3D-CAD-Modell. Als Vorlage diente eine technische Zeichnung, sowie Abbildungen welche mir die Firma Steinmetz zukommen ließ.

Den Kern dieser Bachelorarbeit bildet das Kapitel 3.3. Aus dem CAD-Modell wurde ein 3D FE-Netz erstellt. Dabei wurde bewiesen, dass sowohl Erfahrung als Annäherung durch Ausprobieren notwendig sind, um bei der FE-Analyse brauchbare Ergebnisse zu erhalten. Bis die aktuellen Ergebnisse erreicht wurden, sind fünf unterschiedliche Netze analysiert worden. Bereits kleine Unterschiede im Netz oder der Anbringungsart von Belastungen verändern das Ergebnis. Dank der Erfahrung die ich während des Studiums gesammelt wurde, konnte die Qualität des FE-Netzes gut abgeschätzt werden. Bei den Belastungen, die auf das Netz wirken, wurde von den maximal möglichen Kräften ausgegangen, die von einer Schleifmaschine ohne Sicherheiten und Verluste auf das Modul wirken können. Die Ergebnisse haben realitätsnahe Werte ausgegeben.

In Kapitel 3.3.3 wurde eine dynamische Analyse durchgeführt, die deutlich macht, welche Folgen eine Anregung innerhalb der Eigenfrequenzen hat. Es wurden Auslenkbeschleunigungen von 15000 m/s^2 erreicht. Außerdem haben die Auslenkun-

gen das fünfzig fache der im Betriebszustand befindlichen Werte ergeben. Solche starken Auslenkungen führen zu Schäden an Bauteil und Maschine. Dies ist ein gutes Beispiel, welches auf alle konstruierbaren Teile angewendet werden kann und auch sollte. Es muss stets vermieden werden technische Bauteile während Ihrer Eigenfrequenzen anzuregen. Hier wird die Bedeutung der FEM in der Industrie sehr deutlich. Eine virtuelle Analyse an einem Bauteil kann nicht nur Kosten und Zeit sparen, sondern auch im Vorfeld mögliche Schwachstellen und Gefahrenursachen beseitigen.

Da bei der Berechnung der Kräfte von den maximal möglichen Belastungen ausgegangen wurde, befindet sich die Betriebsfrequenz des Moduls auf einem noch niedrigeren Wert als er ohnehin schon ist. Die errechnete Betriebsfrequenz befindet sich weit unterhalb der ersten Eigenfrequenz. Das heißt, es besteht keine Möglichkeit die Rundschleifvorrichtung in den Eigenfrequenzen zu betreiben.

Optimierungspotential gibt es bei der Zuweisung des Materials. In Catia V5 ist es nur dann möglich eine FE-Analyse durchzuführen, wenn das Modell aus einem einzigen SOLID besteht. Wenn allerdings nur ein SOLID vorhanden ist, dann kann auch nur ein Material zugewiesen werden. Allerdings hat die Rundschleifvorrichtung gehärtete Einspannspitzen, um Belastungen besser Stand zu halten. Das konnte in dieser Arbeit leider nicht berücksichtigt werden. Dieser Umstand wird aber eher als positiv gesehen, denn selbst mit nicht gehärtetem Stahlspitzen, hält das System unter Betriebsbedingungen den Belastungen Stand.

Die Kostenaufstellung zeigt, dass der Umbau einer Schleifmaschine sehr viel kostengünstiger ist, als die Anschaffung einer zweiten neuen Maschine.

Die FE-Analysen und deren Auswertung haben gezeigt, dass die Rundschleifvorrichtung RSV410 ohne Einschränkungen in einer Flachsleifmaschine Typ Blohm Profimat MT408 eingesetzt werden kann.

Literaturverzeichnis

- [1] F. Klocke und W. König, Fertigungsverfahren 2 - Schleifen, Honen, Läppen 4. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [2] F. Rieg und R. Hackenschmidt, Finite Elemente Analyse für Ingenieure 3. Auflage, München Wien: Hanser Verlag, 2009.
- [3] C. Gebhardt, Praxisbuch - FEM mit Ansys Workbench, München: Hanser Verlag, 2011.
- [4] B. Klein, FEM - Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau 7. Auflage, Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag, 2007.
- [5] Blohm, „www.blohmgbh.com,“ 2015. [Online]. Available: http://cdn.blohmgbh.com/uploads/media/PROFIMAT_MT_DE_ds.pdf. [Zugriff am 20 Februar 2015].
- [6] Studer, „www.studer.com,“ 2015. [Online]. Available: http://cdn.studer.com/uploads/media/S31_DE.pdf. [Zugriff am 20 Februar 2015].
- [7] Blohm, „www.blohmgbh.com,“ 2015. [Online]. Available: http://cdn.blohmgbh.com/fileadmin/content/www.blohm.com/02_pdf/03_products/Angebot_ORBIT.pdf. [Zugriff am 20 Februar 2015].
- [8] M. Weck und C. Brecher, Werkzeugmaschinen - Maschinenarten und Anwendungsbereiche 6. Auflage, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [9] A. Hirsch, Werkzeugmaschinen - Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele 2. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.