

Aus der Orthopädischen Klinik und Poliklinik  
der Universität Würzburg  
König-Ludwig-Haus

Direktor: Prof. Dr. med. J. Eulert

# **Optimierung der Schneidqualität oszillierender Knochensägen**

Inaugural – Dissertation  
zur Erlangung der Doktorwürde der  
Medizinischen Fakultät  
der  
Bayerischen Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von  
Michael Handwerker  
aus Würzburg

Würzburg, Juli 2002

Referent: Priv. Doz. Dr. med. C. Hendrich

Koreferent: Prof. Dr.-Ing. R. Thull

Dekan: Prof. Dr. med. V. ter Meulen

Tag der mündlichen Prüfung: 04.12.2002

Der Promovend ist Arzt.

Meinen Eltern

# Inhaltsverzeichnis

## Verzeichnis der Abkürzungen

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Material und Methoden</b>	
2.1	Material	
2.1.1.	Sägeblätter .....	3
2.1.2.	Berechnung der Eigenform .....	4
2.1.3.	Experimentelle Bestimmung der Eigenform .....	5
2.1.4.	Instrumente zur Beschleunigungsmessung im Knochen .....	6
2.1.5.	Software .....	7
2.1.6.	Knochenproben .....	7
2.2.	Methoden	
2.2.1.	Berechnung der Eigenform .....	8
2.2.2.	Experimentelle Bestimmung der Eigenform .....	9
2.2.3.	Beschleunigungsmessung im Knochen .....	12
<b>3.</b>	<b>Ergebnisse</b>	
3.1.	Berechnung der Eigenform .....	15
3.2.	Bestimmung der Eigenform .....	18
3.3.	Beschleunigungsmessung im Knochen .....	28
<b>4.</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>34</b>
<b>5.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>39</b>
<b>6.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>40</b>
<b>7.</b>	<b>Anhang</b>	

## Verzeichnis der Abkürzungen

[ $\mu\text{m}$ ]	Mikrometer
[cm]	Zentimeter
[g]	Gramm
[Hz]	Herz
[mm/s <sup>2</sup> ]	Millimeter pro Sekundequadrat
[mm]	Millimeter
[s]	Sekunde
a	Beschleunigung
Abb.	Abbildung
Amp.	Amplitude
C	Celsius
d.h.	das heißt
f	Frequenz
FE	Flächeneinheiten
FEM	Finite Elemente Methode
ggf.	gegebenenfalls
l x b x d	Länge x Breite x Dicke
max.	maximal
Max.	Maximum
min.	minimal
Min.	Minimum
Mw	Mittelwert
n	Anzahl
Stabw	Standardabweichung
t	Zeit
Tab.	Tabelle
tan	Tangens
u.s.w.	und so weiter
u.v.m.	und vieles mehr
z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

Grundvoraussetzung einer erfolgreichen zementlosen Endoprothesenverankerungen ist eine hohe Primärstabilität durch formschlüssige Implantation. Nach erfolgreicher Primärfixation entscheidet über die Langzeitfunktion neben der Verschleißsituation insbesondere die funktionelle Spannungsverteilung an der Implantatoberfläche und im angrenzenden Knochen.<sup>12</sup> Um optimale Bedingungen im Bereich der Grenzfläche zwischen Werkstoff und Biosystem zu schaffen, ist die präzise Präparation des Knochens entscheidend.<sup>25, 36, 37</sup>

Hierbei spielt neben dem Operateur und der Beschaffenheit des Knochens das verwendete System zur Zerspanung, bestehend aus der Säge und dem Sägeblatt, eine wichtige Rolle. Oszillierende Sägen werden neben der Gipsbehandlung ausschließlich bei der Knochenbearbeitung verwendet, wobei Fragestellungen zu Leistungs- und Qualitätssteigerung auftreten.

Ansatzpunkt ist unter anderem das Sägeblatt. Die Modellvielfalt der auf dem Markt erhältlichen Sägeblätter erschwert die richtige Auswahl. Bei verschiedenen Modellen und deren unterschiedlichen Ausführungen ist es schwierig, Vergleiche anzustellen und Verbesserungen einzuführen. Die Charakteristik eines Sägeblattes ist durch die Schärfe beschrieben, um eine schnelle Zerspanung des Knochens zu gewährleisten, und durch die Steifigkeit des Blattes, um eine möglichst geringe Abweichung aus der Sägelinie sicherzustellen.

Die Schärfe des Sägeblattes ist von der Zahnform und –geometrie abhängig. Die Steifigkeit ist abhängig von Material, Geometrie, Ausführung und Eigenschwingung/Eigenform des Blattes.

Modifikationen an diesem System führen auch zu einer veränderten Eigenform des Sägeblattes.

Die Eigenschwingung ist definiert als die Schwingung eines von aussen nicht beeinflussten und (abgesehen von einer ggf. vorhandenen Dämpfung) sich selbst überlassenen schwingungsfähigen Systems. Die Frequenz einer Eigenschwingung, die Eigenfrequenz, ist abhängig von den Abmessungen und Eigenschaften der schwingenden Glieder, bei mechanischen Schwingungen

z.B. von der Größe und Verteilung der an der Schwingung beteiligten Massen des Systems.<sup>30</sup>

In der folgenden Arbeit wurden verschiedene Ausführungen von Sägeblättern hinsichtlich ihrer Eigenform charakterisiert. In einem praktischen Versuch wurde versucht, den Einfluss des Sägeblattes auf die Vibration im Knochen von dem der Säge abzugrenzen.

Ziel der Studie war daher

- die Berechnung der Eigenform der Sägeblätter
- die experimentelle Überprüfung der Eigenform
- die Abgrenzung des Einflusses von Sägeblatt und Säge auf die Vibration beim Sägevorgang

## 2.1. Material

### 2.1.1. Sägeblätter

Im Rahmen der Studie wurden unterschiedliche Sägeblätter verschiedener Hersteller verwendet.

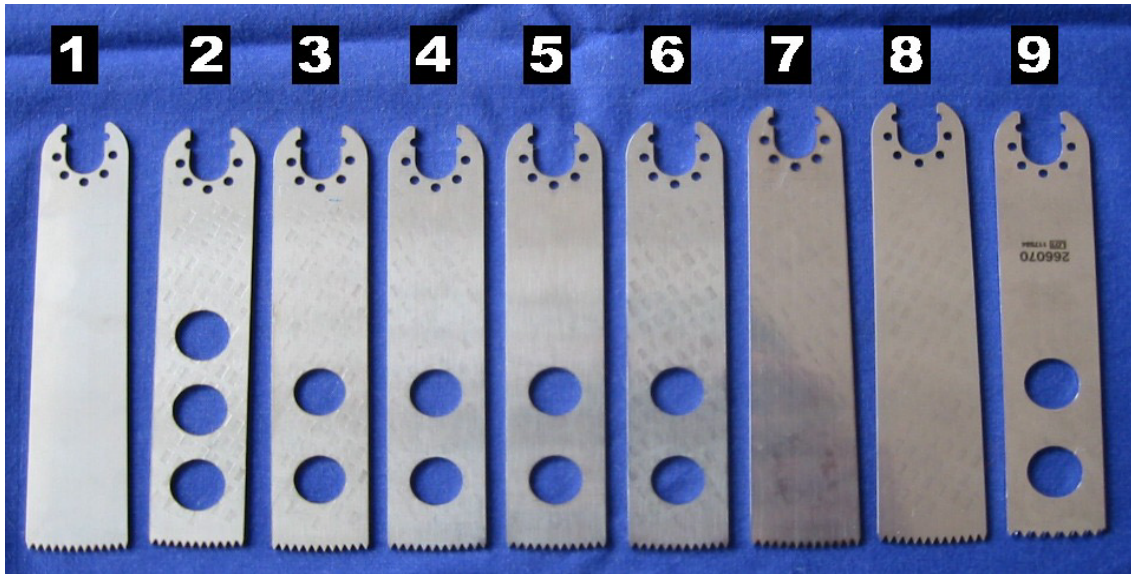


Abb. 1 – Sägeblatt 1–9

Tab. 1 gibt eine Übersicht über die Sägeblätter und ihre Eigenschaften.

Blatt	Prägedruck [bar]	Maße lxbxd [mm]	Gewicht [g]	Lochung	Schnittverfahren
1	Ø	110 x 24,0 x 1,00	18,527	Ø	Laser
2	90	110 x 22,5 x 1,20	17,095	3-Loch	Laser
3	90	110 x 22,5 x 1,20	18,801	2-Loch	Zähne drahterodiert
4	90	110 x 22,5 x 1,20	18,681	2-Loch	Laser
5	Ø	110 x 22,5 x 1,20	18,740	2-Loch	Laser
6	136	110 x 22,5 x 1,20	18,630	2-Loch	Laser
7	90	110 x 24,0 x 1,00	18,544	Ø	Laser
8	136	110 x 24,0 x 1,00	18,602	Ø	drahterodiert
9	Ø	110 x 22,5 x 1,15	18,465	2-Loch	unbekannt

Tab. 1 – Eigenschaften der Sägeblätter 1–9

Im Wesentlichen unterschieden sich die Sägeblätter in Material, Geometrie bzw. Maßen, Zahngeometrie und Oberflächenbeschaffenheit. Die Einzelheiten sind Tab. 1 zu entnehmen. Bei Blatt 3 wurden nur die Zähne drahterodiert; Blatt 8 wurde komplett drahterodiert. Alle anderen Blätter, ausser Blatt 9, über



dessen Material und Herstellungsart keine Informationen vorlagen, wurden mittels eines Lasers ausgeschnitten.

Für jeden Blatt-Typ standen jeweils 15 Blätter für die Versuchsreihen zur Verfügung. Die Blätter 2, 3, 4, und 7 wurden jeweils mit einer Prägung mit einem Prägedruck von 90 bar, Blatt 6 und 8 von 136 bar, versehen (siehe Abb. 2). Entsprechend Blatt 9 wurden die Blätter 3, 4, 5 und 6 mit 2 Löchern versehen; Blatt 2 zusätzlich mit einem 3. Loch.

Somit lassen sich die untersuchten Blätter in 3 Gruppen einteilen. Gruppe I bestehend aus Blatt 2, Gruppe II Blatt 1, 7, 8 und Gruppe III Blatt 3, 4, 5, 6, 9.



Abb. 2 - Prägung

### **2.1.2 Berechnung der Eigenform**

Die Berechnung der Eigenform erfolgte nach der Methode der Finiten Elemente (FEM) mit dem Programm ANSYS.

### 2.1.3. Experimentelle Bestimmung der Eigenform

Zur experimentellen Bestimmung der Eigenform wurden folgende Geräte eingesetzt:

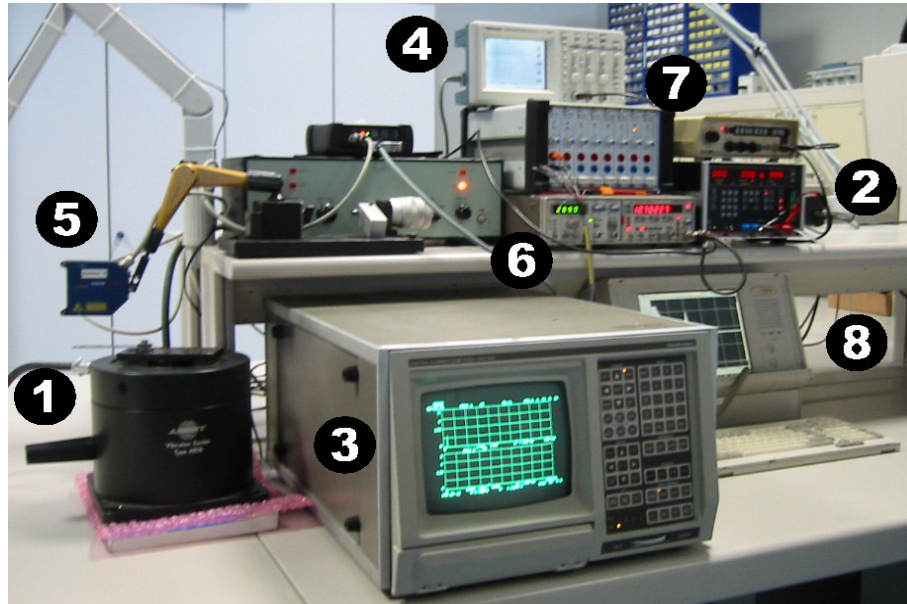


Abb. 3 – Prüfstand zur Eigenform-Berechnung

- ① „Shaker“, B & K Vibration Exciter Type 4808, Brüel&Kjær, Nærum, Denmark
- ② Arbitrary Generator, Programmable Power Supply TOE 8805, TOELLNER Test- und Messgeräte, Herdecke, Germany
- ③ Signal Analyzer SD 380 Scientific Atlanta. Spectral Dynamics, Kronberg, Germany
- ④ Two Channel Digital Real Channel Oscilloscope DS 220, Tektronix, Köln, Germany
- ⑤ „Laser“, Optronic Opto NCDT (2 x), MICRO-EPSILON Mess-Technik GmbH, Ortenburg, Germany
- ⑥ KBA, ISA 211, Signal Amplifier. Koenig&Bauer AG, Würzburg, Germany
- ⑦ KBA, Signal-Addierer, Koenig&Bauer AG, Würzburg, Germany
- ⑧ MEDA-Rechner, Wölfel GmbH&Co, Höchberg, Germany

#### 2.1.4. Instrumente zur Vibrationsmessung im Knochen

Abb. 4 zeigt den Sägeprüfstand zur Untersuchung des Sägevorgangs unter Praxisbedingungen.

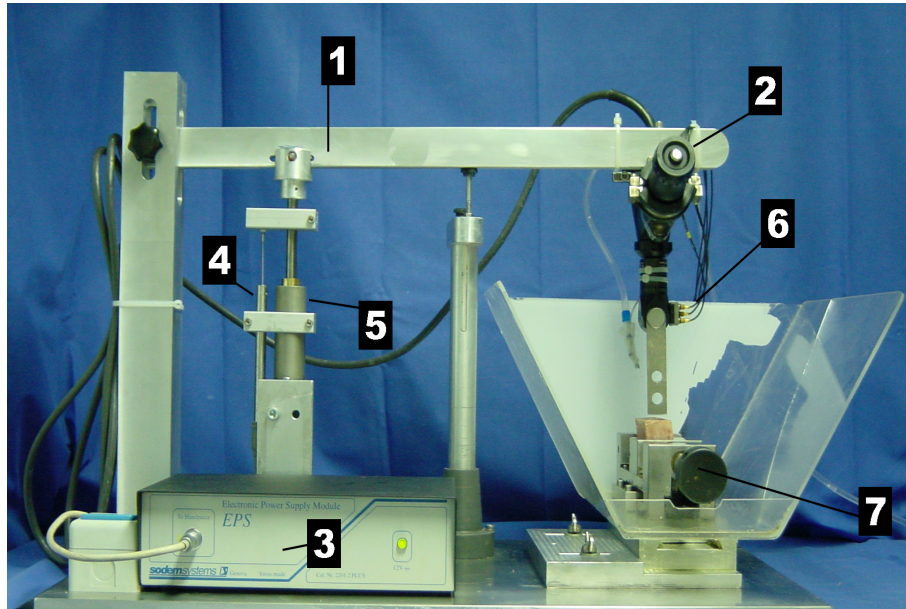


Abb. 4 – Sägeprüfstand

Folgende Geräte kamen zum Einsatz:

- ① Hebelarmkonstruktion
- ② Oszillierende Säge, Handstück Modell PN2000.2 PLUS, mit oszillierender Säge PN1506.1, Sulzer Orthopedics Ltd., Baar, Switzerland
- ③ EPS Power Supply PN2201.2PLUS, Sodem Systems, Geneva, Switzerland
- ④ Digitaler Wegaufnehmer HBM-KWS 3073, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, Germany
- ⑤ Ölbremsszylinder Festo YD-70, Festo KG, Esslingen, Germany
- ⑥ Triaxialer Vibrationssensor B&K Typ 4463, Brüel&Kjær, Nærum, Denmark
- ⑦ Präzisionsschraubstock

### **2.1.5. Software**

MEDA\_AD-V.:3.13, Rechner-gesteuerte Messdatenerfassung über die AD-Karte DAS20, Fa. Keithley Instruments, Fa. Wölfel Meßsysteme-Software GmbH&Co, Höchberg, Germany

FAMOS, Fast Analysis And Monitoring Of Signals Version 3.1 Rev. 7., IMC Meßsysteme GmbH, Berlin, Germany

SPSS für Windows, Release 9.0.1

### **2.1.6. Knochenproben**

Als Knochenproben dienten Würfel aus der Metaphyse des Humerus juveniler Rinder in den Abmessungen 3x3x3 cm. Die Präparation der Knochenwürfel erfolgte direkt nach der Schlachtung. Anschließend wurden die Knochenwürfel vakuumverpackt bei  $-40^{\circ}\text{C}$  tiefgefroren und für die Versuchsreihen auf Zimmertemperatur aufgetaut.

## 2.2. Methoden

### 2.2.1. Berechnung der Eigenform

Die Berechnung der Eigenform der Sägeblätter erfolgte nach der Methode der Finiten Elemente. Hierbei handelt es sich um eine Modalanalyse. Zur Berechnung der FEM wurde das Programm ANSYS verwendet.

Die Methode der Finiten Elemente stellt ein rechnerisches Simulationsverfahren dar, das geometrische Formen in endlich kleine Grundformen mit Übergängen („Knoten“), die der Kraftübertragung dienen, strukturiert. Durch das Hinzufügen der Materialeigenschaften, wie Dichte und E-Modul, lassen sich Berechnungen über Festigkeit, Verformung, Spannungen und Schwingungsverhalten im Rechner durchführen, ohne dass das Bauteil oder die Baugruppe real existieren.

Mit dieser Methode wurden die Eigenformen der einzelnen Sägeblätter bei verschiedenen Anregungsfrequenzen berechnet. Für die verschiedenen Blattgeometrien wurden entsprechende Berechnungen erstellt und wie in Abb. 5 und Abb. 6 dargestellt aufbereitet.

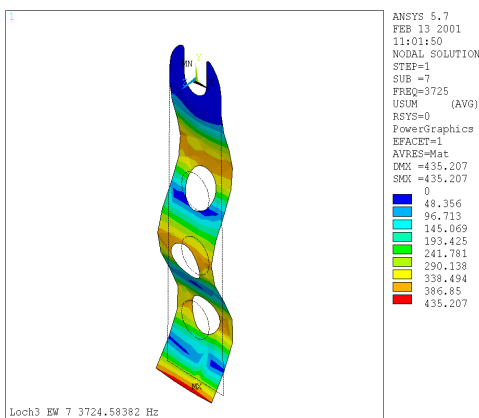


Abb. 5 – Beispiel Eigenformberechnung I  
Dargestellt ist der Schwingweg des Sägeblattes bei einer definierten Anregungsfrequenz. Abgebildet ist Blattgruppe I.

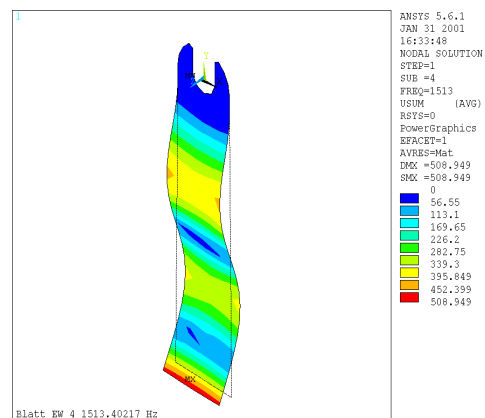


Abb. 6 – Beispiel Eigenformberechnung II  
Dargestellt ist der Schwingweg des Sägeblattes bei einer definierten Anregungsfrequenz. Abgebildet ist Blattgruppe II.

### 2.2.2. Experimentelle Bestimmung der Eigenform

Die in 2.1.3., Abb. 3 gezeigte Versuchsanordnung diente zur experimentellen Bestimmung der Eigenform der Sägeblätter. Hierbei wurde mittels des Arbitrary-Generator (2.1.3., Abb.3, ②) ein Frequenzspektrum von 11 – 270 Hz in einem Zeitfenster von 100 Sekunden programmiert. Dieses Frequenzspektrum simuliert die Anregungsfrequenz einer Säge, mit der das Sägeblatt während eines Sägevorgangs angeregt wird. Das Frequenzmuster wurde an den Vibration Exciter Type 4808 – „Shaker“ – (2.1.3., Abb.3, ①) übertragen, um das Sägeblatt entsprechend anzuregen. Mit diesem Aufbau ist eine experimentelle Anregung des Sägeblattes ohne zusätzliche Schwingungen aus der Säge, den Getriebeteilen u.s.w. möglich.

Mittels Laser 1 (2.1.3., Abb.3, ⑤) konnten die Amplitude der Auslenkung des Sägeblattes und mit dem Laser 2 (2.1.3., Abb.3, ⑥) die Eigenschwingung des „Shakers“ aufgezeichnet werden.

Versuchsmessungen haben gezeigt, dass bei Verwendung nur eines Laser auch die Eigenschwingung des Shakers mit aufgezeichnet wurde. Dies führte zu Irritationen in der graphischen Darstellung der Diagramme und erschwerte ihre Interpretation.

Unter Verwendung des KBA Signal-Addierers (2.1.3., Abb.3, ⑦) wurde das Signal von Laser 1 von Laser 2 phasengleich subtrahiert. Somit war die Darstellung der Amplitude des Sägeblattes bei einer definierten Anregungsfrequenz möglich.

Die Speicherung und Weiterverarbeitung der Messwerte erfolgte mit der Mess-Software MEDA (2.1.3., Abb.3, ⑧). Abb. 7 zeigt ein Hochlauf-Diagramm, in dem die Messwerte wie oben beschrieben dargestellt sind.

Diagramm **V1/K1/1aus/Vorgabe** zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary-Generators (2.1.3., Abb.3, ②), mit dem der Sägevorgang simuliert wird. Auf der Ordinate ist die Frequenz  $f$  [Hz] aufgetragen, auf der Abszisse die Zeit  $t$  [s].

Diagramm **V1/K2/1aus/Laser** zeigt die von Laser 1 und Laser 2 nach Subtraktion durch den Signal-Addierer gemessene Schwingung des Sägeblattes. Die Ordinate zeigt die Amplitude Amp. [ $\mu\text{m}$ ] des Sägeblattes, die Abszisse die

Zeit  $t$  [s]. **Statistik-Liste:V1/K2/1aus/Laser** zeigt die in MEDA berechneten statistischen Kenngrößen.

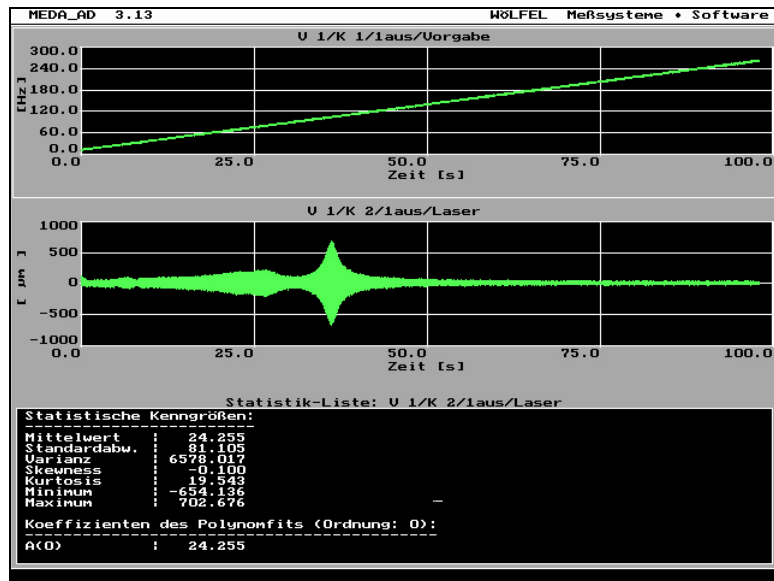


Abb. 7 – Beispiel Hochlauf-Diagramm  
V1/K1/1aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
V1/K2/1aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
In der Statistik-Liste:V1/K2/1aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

Zur weiteren graphischen Darstellung wurden die beiden Diagramme **V1/K 1/1aus/Vorgabe** und **V1/K2/1aus/Laser** in einem Wasserfall-Diagramm dargestellt (Abb. 8).

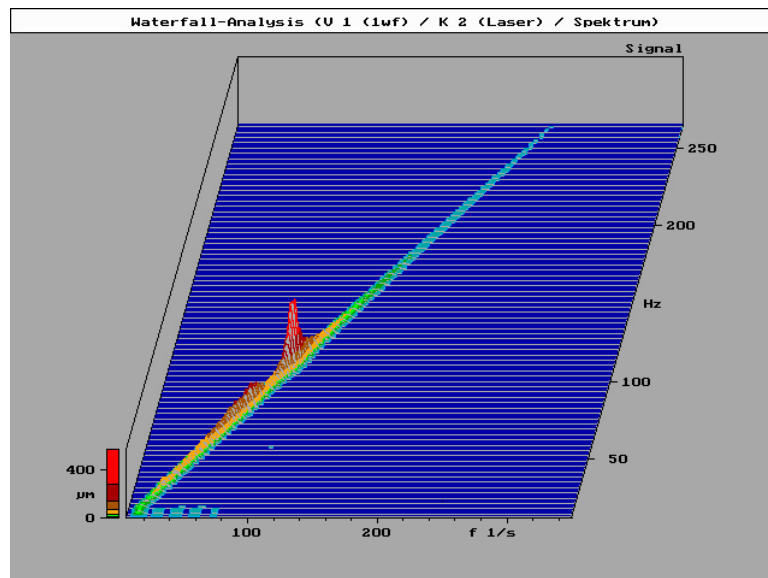


Abb. 8 – Beispiel Wasserfall-Diagramm aus V1/K 1/1aus/Vorgabe und V1/K2/1aus/Laser

Die Ordinate zeigt die Amplitude/Weg des Sägeblattes Amp. [ $\mu\text{m}$ ] aus **V1/K1/1aus/Vorgabe**, die Abszisse die Anregungsfrequenz aus **V1/K1/1aus/Vorgabe** Frequenz  $f$  [Hz]. In z-Richtung ist die Reaktionsfrequenz (Eigenform) des Sägeblattes dargestellt.

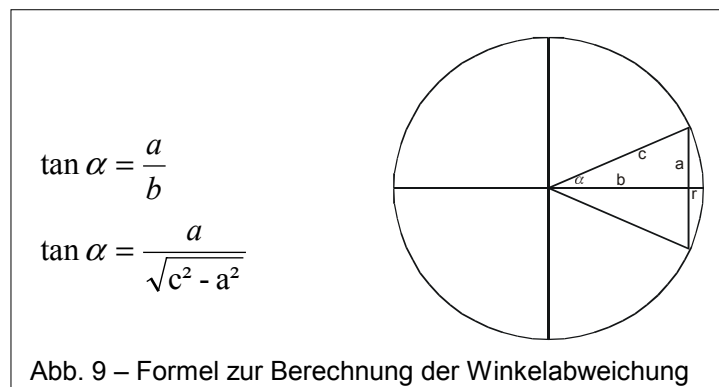
Die Minimal- und Maximalwerte der Amplitude aus Statistik-Liste: **V1/K2/1aus/Laser** sind in Tab. 3, Kap. 3.2. dargestellt.



### 2.2.3. Vibrationsmessung im Knochen

Grundgedanke der Konstruktion war die Simulation eines Sägevorganges unter klinischen Bedingungen. Hierfür wurde die Säge an der in 2.1.4, Abb. 4. gezeigten Hebelarm-Konstruktion befestigt.

Die Handhabung einer Säge während einer Operation erfolgt zwar in der Regel mit beiden Händen. Dabei bewerkstelligt eine Hand hauptsächlich die Haltearbeit und die grobe Führung, die andere Hand dient zur Feinsteuerung und Unterstützung. Um eine solche Situation möglichst real zu simulieren, wurde eine Halteapparatur konstruiert, die dem Prinzip eines Hebelarmes folgt. Der Hebelarm simuliert zum einen eine einhändige Führung, bewerkstelligt aber durch eine feste Montage der Säge gleichzeitig auch die Präzisionssteuerung. Bei der Konstruktion wurde unter Berücksichtigung der Winkelabweichung eine Hebelarmlänge von 57 cm gewählt, was einer Winkelabweichung des Sägeblattes von 2° entspricht. Die Berechnung erfolgte gemäß der in Abb. 9 dargestellten Formel.



Eine regulierbare Vorschubgeschwindigkeit wurde durch Montage eines Ölbremiszylinders gewährleistet (siehe 2.1.4., Abb.4 ⑤). So konnten verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten simuliert werden. Zur Dämpfung

rückgekoppelter Schwingungen wurden die Grundsäule des Hebelarmes, der Ölbremsszylinder und die gesamte Konstruktion auf einer Gummimatte gelagert. Zur Vorbereitung der Messung wurde ein 30 mm breiter Knochenwürfel, wie in Abb. 10 gezeigt, zentriert unter dem Sägeblatt auf dem Schraubstock fixiert, so dass das Blatt an beiden äußeren Seiten des Knochenwürfels austreten konnte.

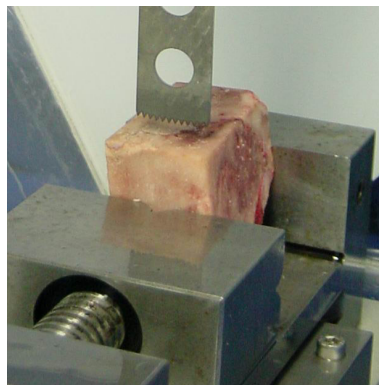


Abb. 10 – Knochenblock

Der Sägevorgang wurde zeitgleich mit der Messelektronik gestartet. Der triaxiale Vibrationssensor (Abb. 11, Pfeil) liefert die Beschleunigungswerte in den 3 Raumrichtungen x, y und z. Mit dem digitalen Wegaufnehmer (2.1.4., Abb. 4 ④) wurde der Weg der Säge aufgezeichnet.

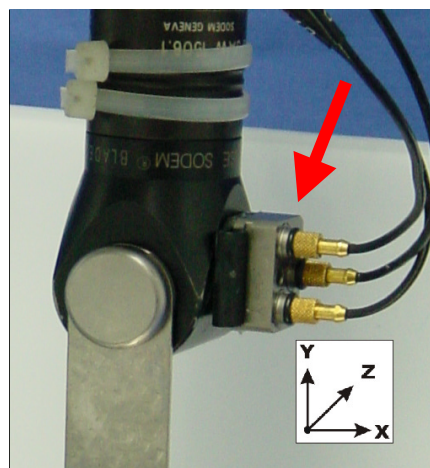


Abb. 11 – Vibrationssensor

Die so gewonnenen Messwerte wurden in MEDA gespeichert und später zur Auswertung in FAMOS weiterverarbeitet. Die graphische Darstellung der

aufgezeichneten Beschleunigungswerte erfolgte in einem Orbital-Diagramm, wie in Abb. 12 gezeigt. Die Ordinate zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] der z-Richtung (= in Richtung des Sägeschnittes), die Abszisse die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] der x-Richtung (= senkrecht zum Sägeschnitt).

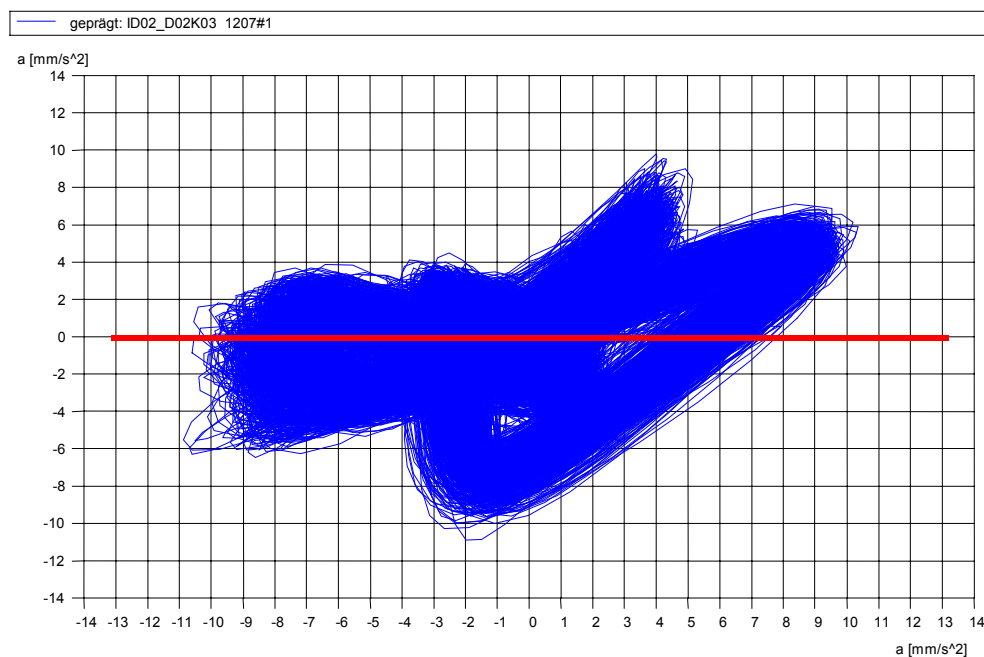


Abb. 12 – ID02\_D02K02 1207#1

Auf der Ordinate sind die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] in z-Richtung, auf der Abszisse die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] in x-Richtung dargestellt.

Das Orbital-Diagramm liefert eine grafische Darstellung der Beschleunigung des Sägekopfes in Richtung des Sägeschnittes und senkrecht dazu. Die Auswertung der so dargestellten Orbits erfolgte nach einem grafischen Integrationsverfahren.<sup>5</sup> Hierbei wurden jeweils die mindestens zu 50% überdeckten Flächeneinheiten des Rasters ausgewertet um die räumliche Ausdehnung der Beschleunigungen des Sägekopfes zu quantifizieren. Zum Vergleich der ermittelten Mittelwerte und der Standardabweichungen diente der t-Test für unabhängige Stichproben.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1. Berechnung der Eigenform der Sägeblätter

Für die einzelnen Blattgeometrien wurden die folgenden Diagramme errechnet:

##### Gruppe I (Blatt 2)

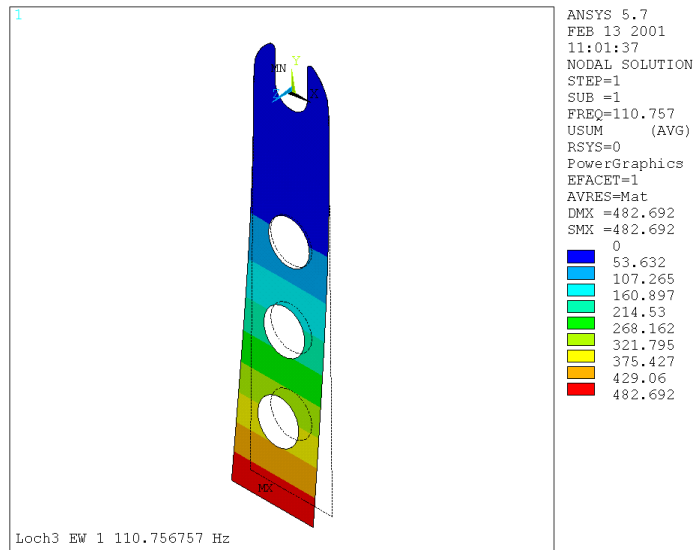


Abb. 13 – Eigenformberechnung Blattgruppe I – Step 01 - 110,75 Hz  
Dargestellt ist der Schwingweg der Blattgruppe I.

##### Gruppe II (Blatt 1, 7, 8)

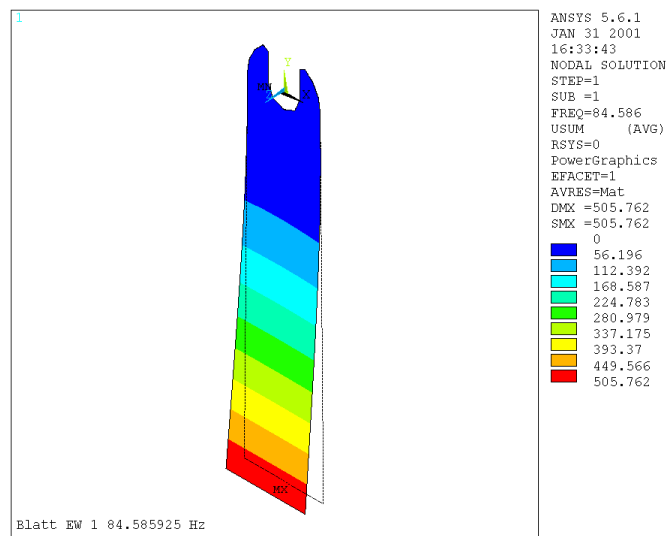


Abb. 14 – Eigenformberechnung Blattgruppe II - Step 01 - 84,58 Hz  
Dargestellt ist der Schwingweg der Blattgruppe II.

### Gruppe III (Blatt 3, 4, 5, 6, 9)

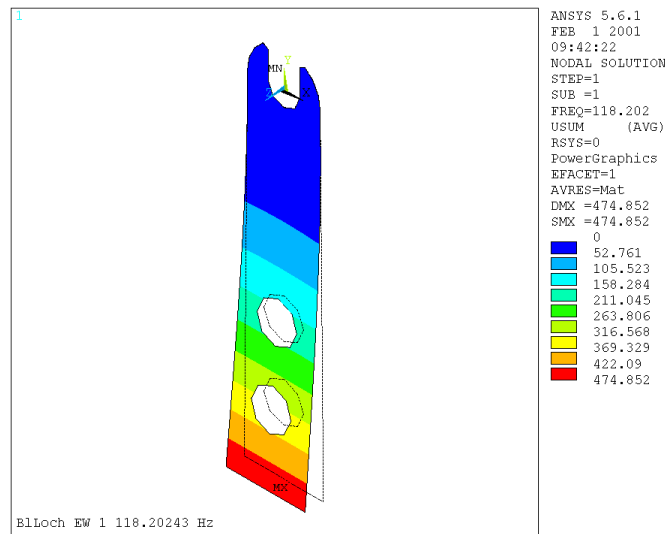


Abb. 15 – Eigenformberechnung Blattgruppe III – Step 01 – 118,20 Hz  
 Dargestellt ist der Schwingweg der Blattgruppe III.

	Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III
Eigenform	Frequenz (Hz)	Frequenz (Hz)	Frequenz (Hz)
Step 01	110,76	84,59	118,20
Step 02	683,43	537,16	679,00
Step 03	824,13	671,12	870,71
Step 04	1.888,78	1.513,40	1.925,58
Step 05	1.916,00	1.858,00	1.958,69
Step 06	2.621,13	2.131,82	2.640,53
Step 07	4.599,34	2.977,23	3.794,06
Step 08	6.266,49	3.755,86	4.711,17
Step 09	6.852,06	4.932,56	6.404,28
Step 10		5.645,03	7.239,80
Step 11		7.358,62	9.518,82
Step 12		7.869,07	10.200,21
Step 13		9.079,94	10.286,68
Step 14		10.123,44	11.152,05
Step 15		10.151,92	13.187,97
Step 16		10.471,04	13.318,98
Step 17		10.526,97	13.473,83
Step 18		11.816,87	13.568,44
Step 19		13.342,18	15.346,30
Step 20		13.480,10	17.486,01

Tab. 2 – Übersicht der Eigenformberechnungen Blattgruppe I–III

Es wurden Berechnungen im Frequenzbereich von 0 bis 18.000 Hz durchgeführt (Tab. 2). Da die Anregungsfrequenz der Säge jedoch im Bereich von 0 – 270 Hz liegt, wurde an dieser Stelle auf die Darstellung der Eigenformen über 300 Hz verzichtet. Probesägungen haben gezeigt, dass die Amplituden der Schwingungen bei steigender Frequenz kleiner werden. Die Dämpfungseigenschaften des Knochens machen diese Wege für die vorliegende Arbeit uninteressant.

Die Abb. 13, 14 und 15 zeigen die berechneten Eigenformen der 3 Blattgeometrien. Die Abb. 13 ist Blatt 2, Abb. 14 den Blättern 1, 7 und 8, Abb. 15 den Blättern 3, 4, 6 und 9 zuzuordnen.

Entsprechend wurden die Eigenformen in dem von der Säge verwendeten Frequenzspektrum 0 – 265 Hz berechnet.

Nach den vorliegenden Berechnungen fällt Blatt 2 bei einer Anregungsfrequenz von 110,75 Hz, die Blätter 1, 7, 8 bei 84,58 Hz und die Blätter 3, 4, 6, und 9 bei 118,20 Hz in die entsprechende Eigenform.

Die Konsequenz für den Sägevorgang ist, dass bei den genannten Anregungsfrequenzen die Sägeblätter nicht der Schwingung der Säge folgen, sondern, wie in den Abb. 13, 14 und 15 dargestellt, durch ihre Eigenform aus der optimalen Sägelinie ausgelenkt werden. Eine Aussage über den Weg der Auslenkung kann aufgrund fehlender Kraftangaben nicht getroffen werden.

Die Bestimmung der Amplitude der Auslenkung der Sägeblätter erfolgte wie unter Kapitel 3.2. angeben.

### 3.2. Bestimmung der Eigenform

Im Folgenden werden die in Kapitel 2.2.2. beschriebenen Hochlauf- und Wasserfalldiagramme der Sägeblätter 1–9 (Abb. 17–34) gezeigt.

Die ermittelten statistischen Kennwerte sind in Tab. 3 zusammengefasst und grafisch in Abb. 16 dargestellt.

Tab. 3 zeigt die Zuordnung der Diagramme zu den Sägeblättern, sowie die Minimal- und Maximal-Amplitude in [ $\mu\text{m}$ ] der Sägeblätter 1–9 aus den entsprechenden Hochlauf-Diagrammen. Diese Werte sind in Abb. 16 als Balkendiagramm dargestellt.

	<u>Blatt 1</u>	<u>Blatt 2</u>	<u>Blatt 3</u>	<u>Blatt 4</u>	<u>Blatt 5</u>	<u>Blatt 6</u>	<u>Blatt 7</u>	<u>Blatt 8</u>	<u>Blatt 9</u>
<b>Hochlauf</b>	Abb. 17	Abb. 19	Abb. 21	Abb. 23	Abb. 25	Abb. 27	Abb. 29	Abb. 31	Abb. 33
<b>Wasserfall</b>	Abb. 18	Abb. 20	Abb. 22	Abb. 24	Abb. 26	Abb. 28	Abb. 30	Abb. 32	Abb. 34
<b>Max [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	702,676	980,903	914,862	922,632	928,459	786,315	724,509	732,278	1013,924
<b>Min [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	-654,136	-1111,043	-959,537	-945,940	-955,652	-730,258	-751,702	-751,702	-1015,866

Tab. 3 – Minimal- und Maximalwerte der Hochlauf-Diagramme Blatt 1–9

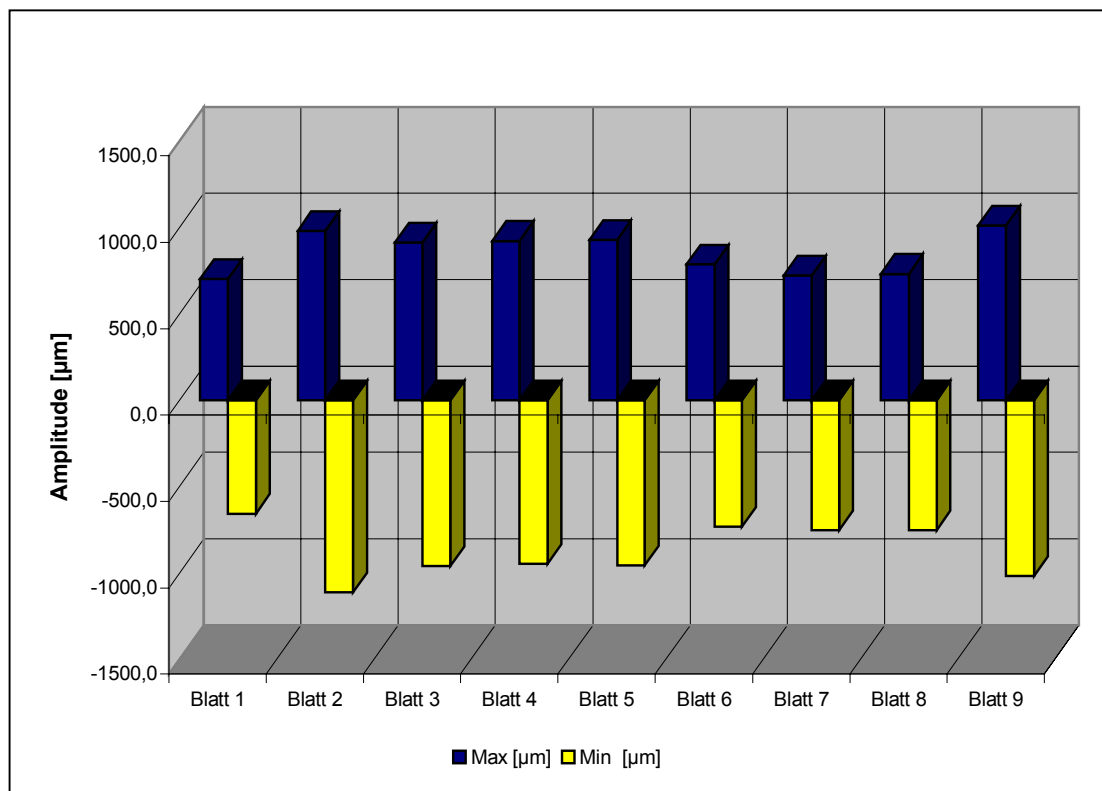


Abb. 16 – Minimal- und Maximalwerte der Amplitude der Blätter 1–9

# Blatt 1

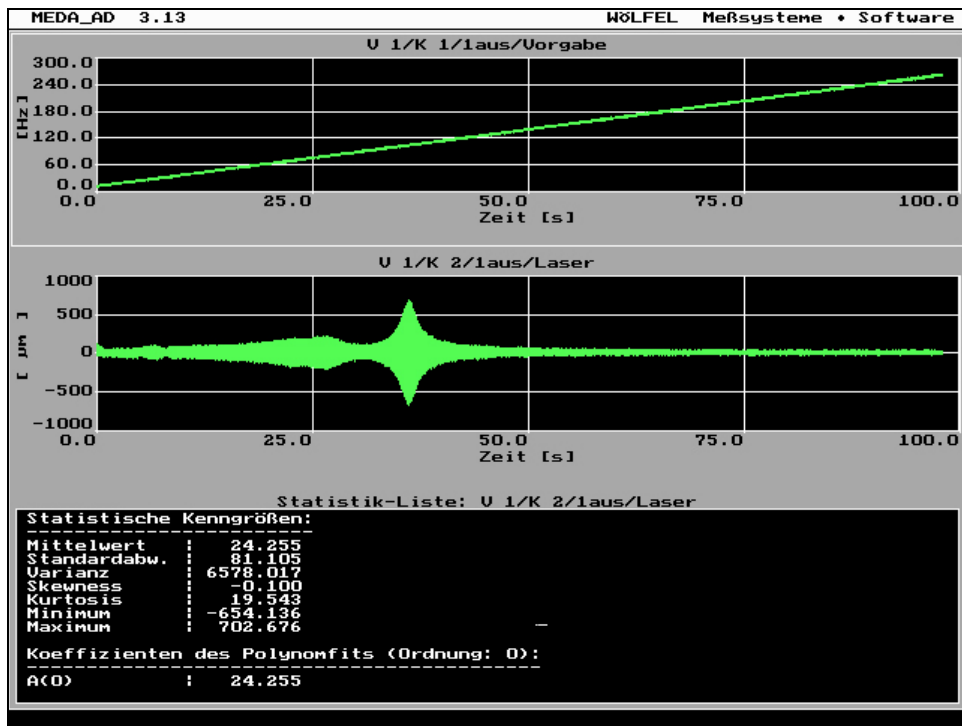


Abb. 17 – Hochlauf-Diagramm Blatt 1  
 V1/K1/1aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/1aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/1aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

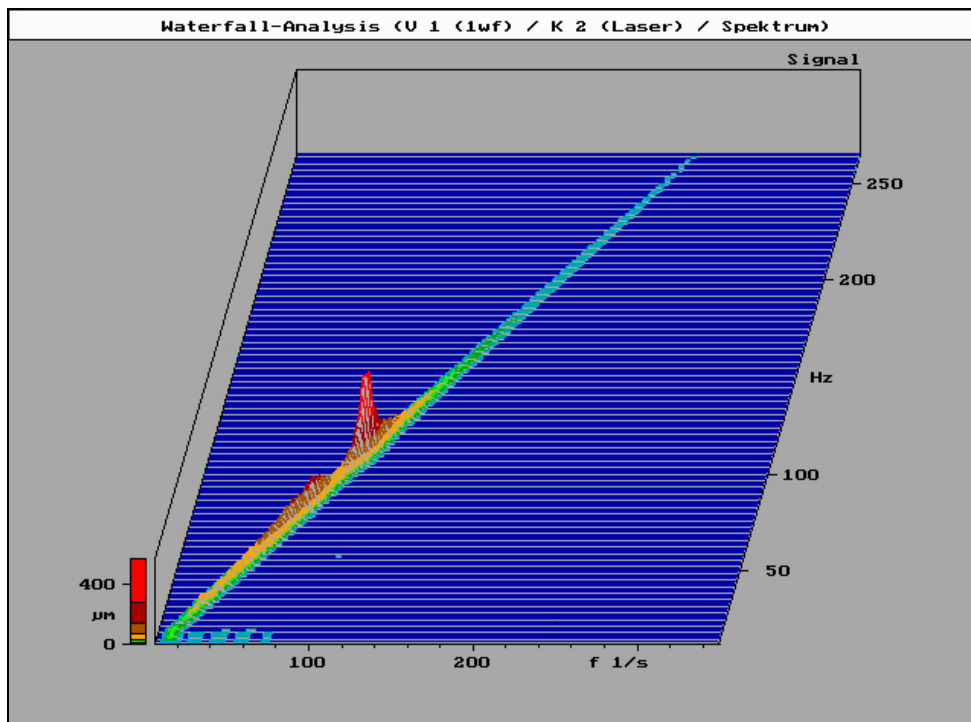


Abb. 18 – Wasserfall-Diagramm Blatt 1 aus V1/K1/1aus/Vorgabe und V1/K2/1aus/Laser



## Blatt 2

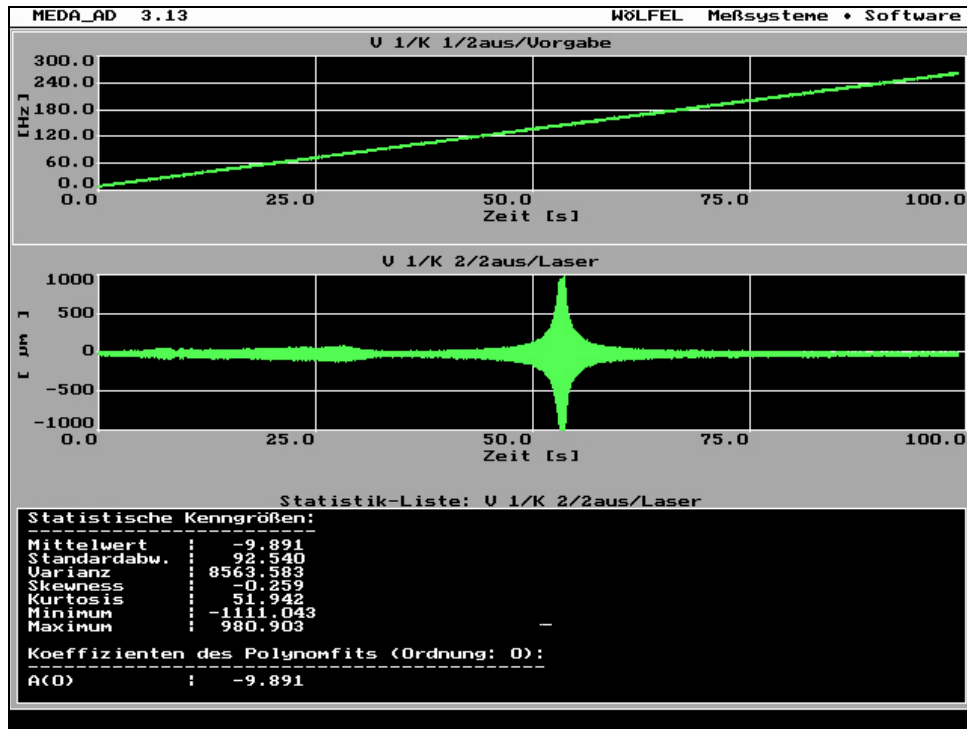


Abb. 19 – Hochlauf-Diagramm Blatt 2  
 V1/K1/2aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/2aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/2aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

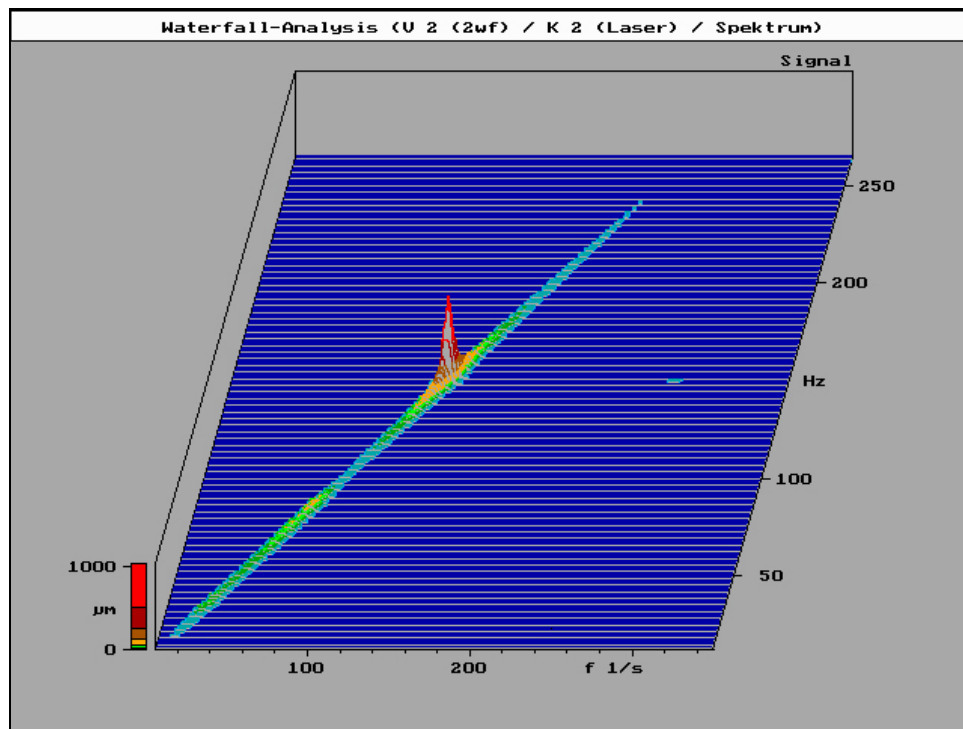


Abb. 20 – Wasserfall-Diagramm Blatt 2 aus V1/K1/2aus/Vorgabe und V1/K2/2aus/Laser

### Blatt 3

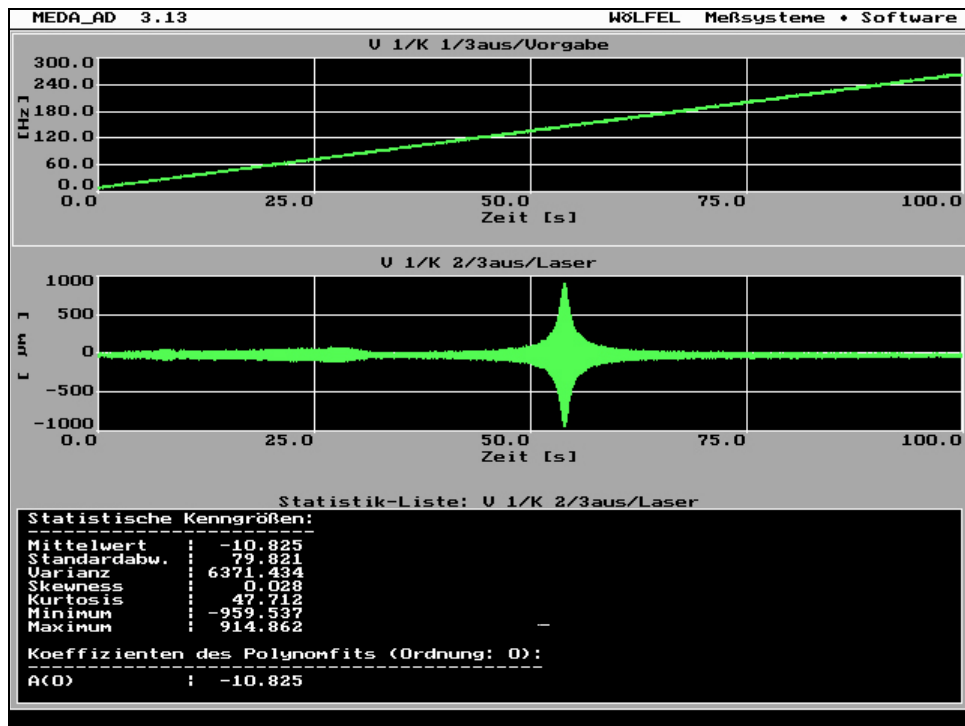


Abb. 21 – Hochlauf-Diagramm Blatt 3  
 V1/K1/3aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/3aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste: V1/K2/3aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

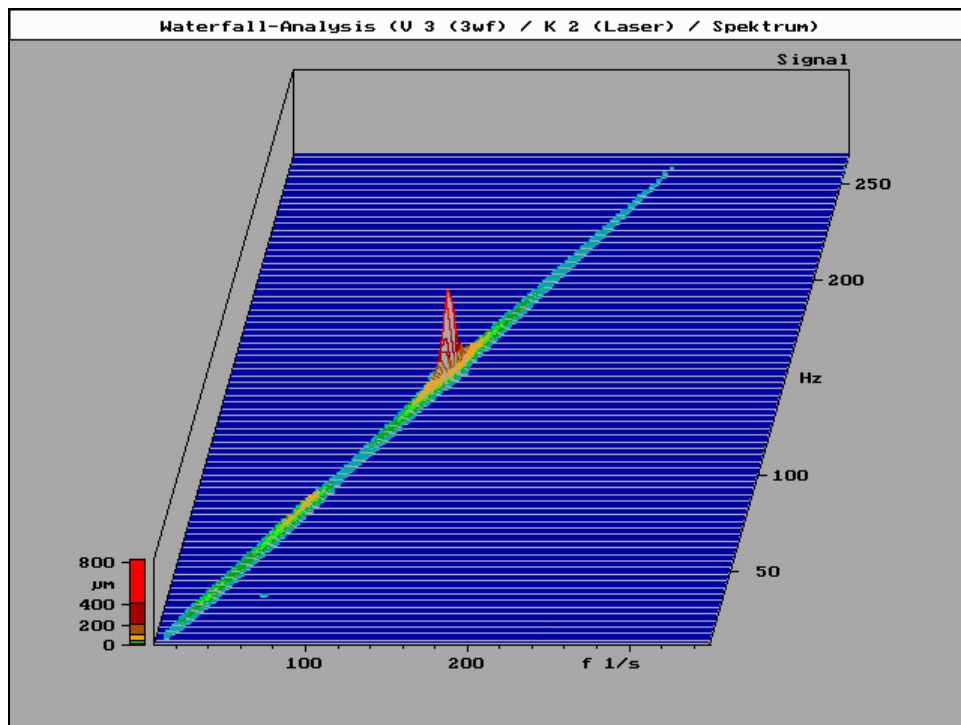


Abb. 22 – Wasserfall-Diagramm Blatt 3 aus V1/K1/3aus/Vorgabe und V1/K2/3aus/Laser

# Blatt 4

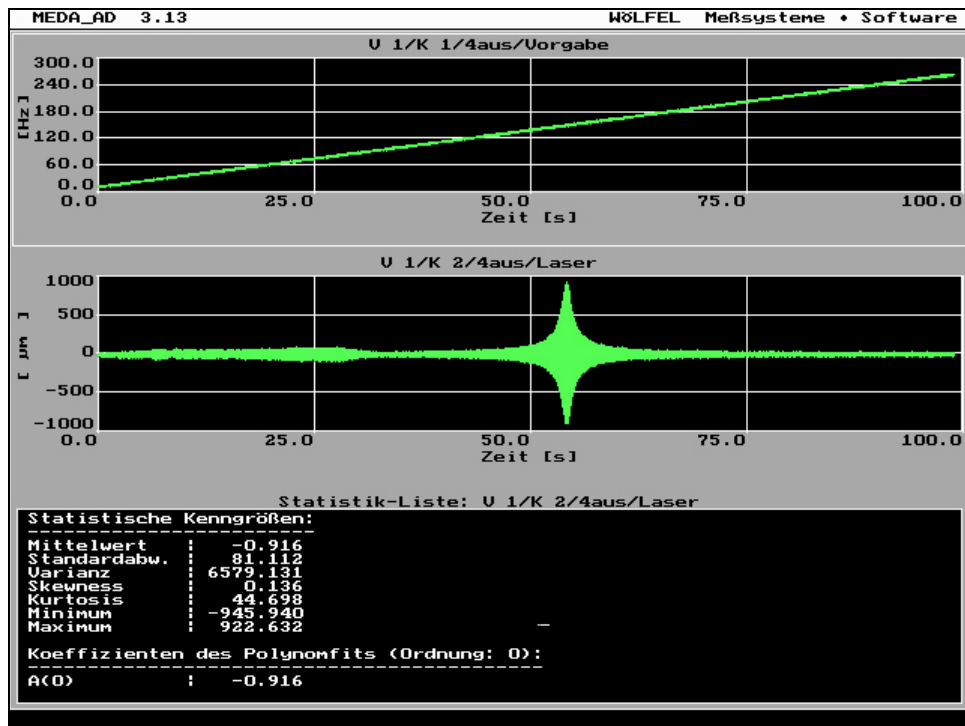


Abb. 23 – Hochlauf-Diagramm Blatt 4  
 V1/K1/4aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/4aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/4aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

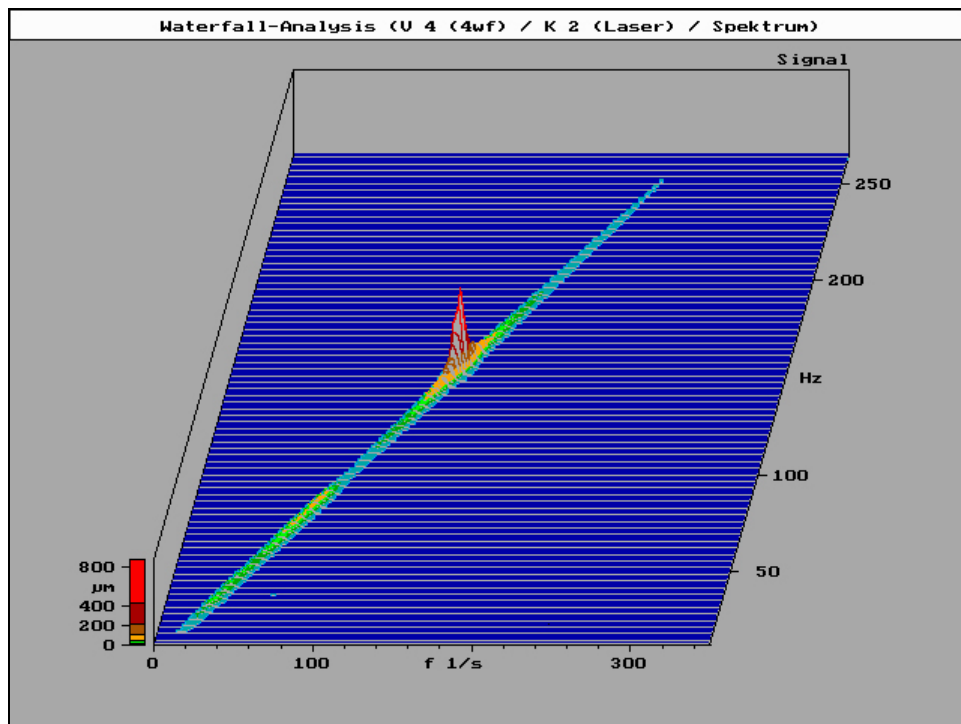


Abb. 24 – Wasserfall-Diagramm Blatt 4 aus V1/K1/4aus/Vorgabe und V1/K2/4aus/Laser

# Blatt 5

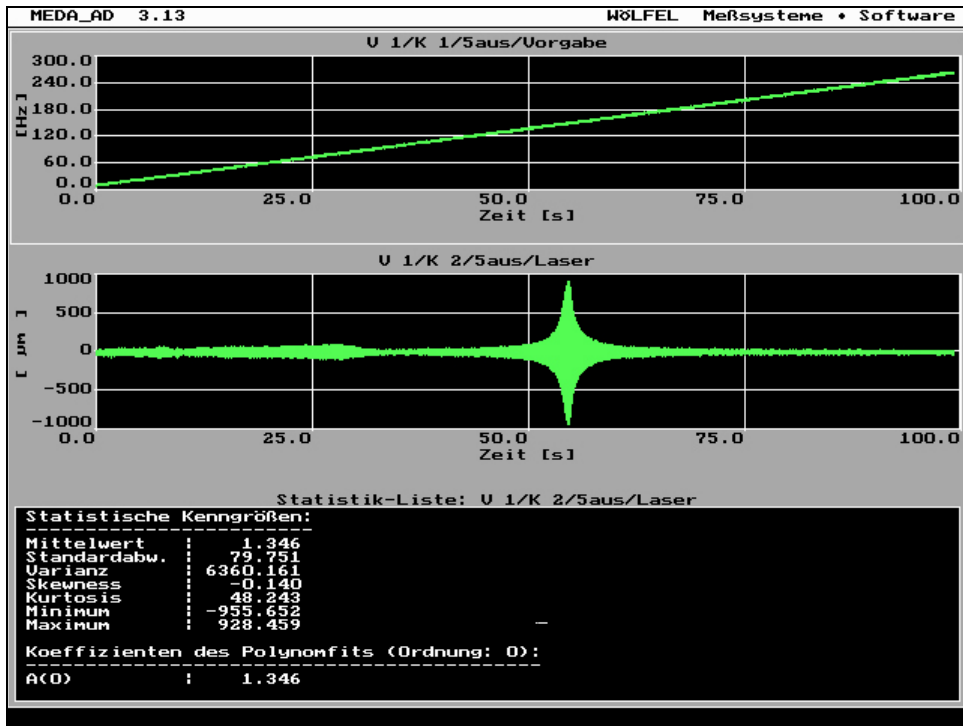


Abb. 25 – Hochlauf-Diagramm Blatt 5  
 V1/K1/5aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/5aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/5aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

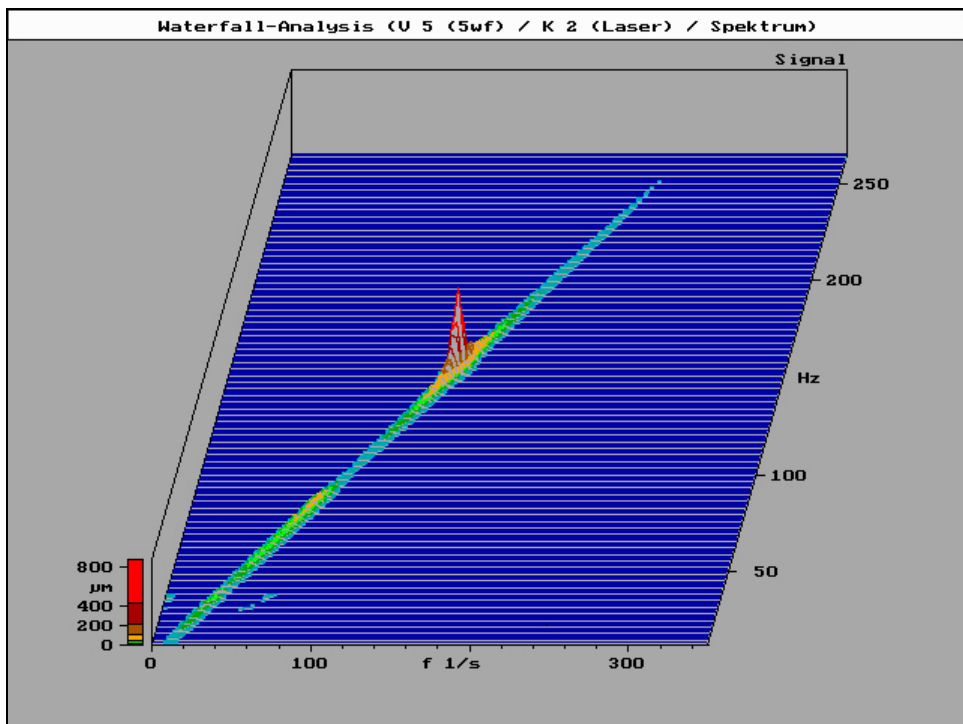


Abb. 26 – Wasserfall-Diagramm Blatt 5 aus V1/K1/5aus/Vorgabe und V1/K2/5aus/Laser

# Blatt 6

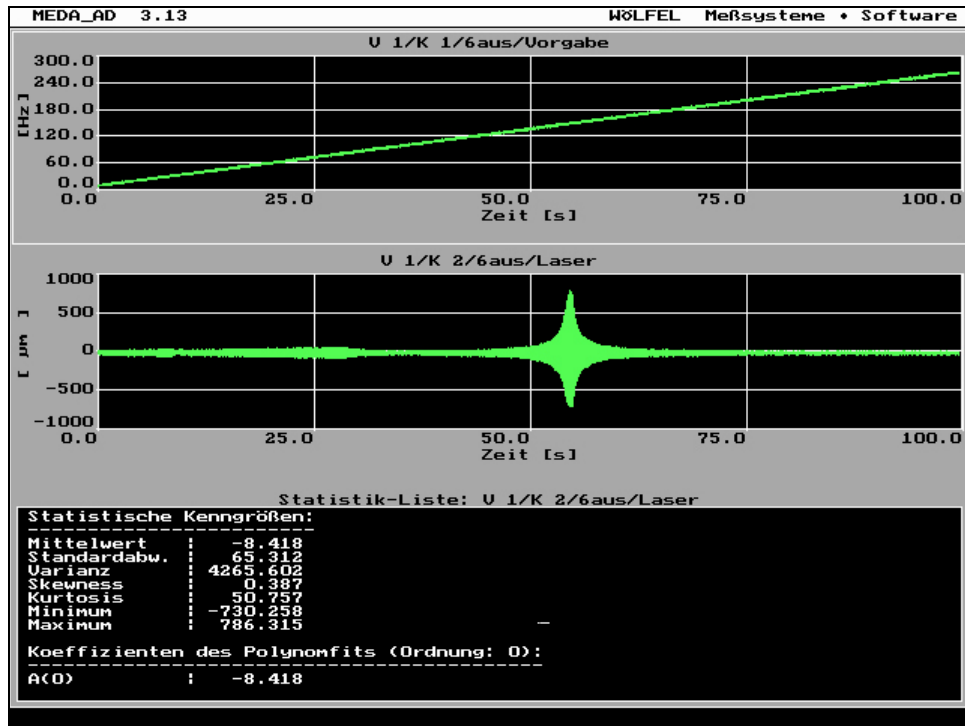


Abb. 27 – Hochlauf-Diagramm Blatt 6  
 V1/K1/6aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/6aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/6aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

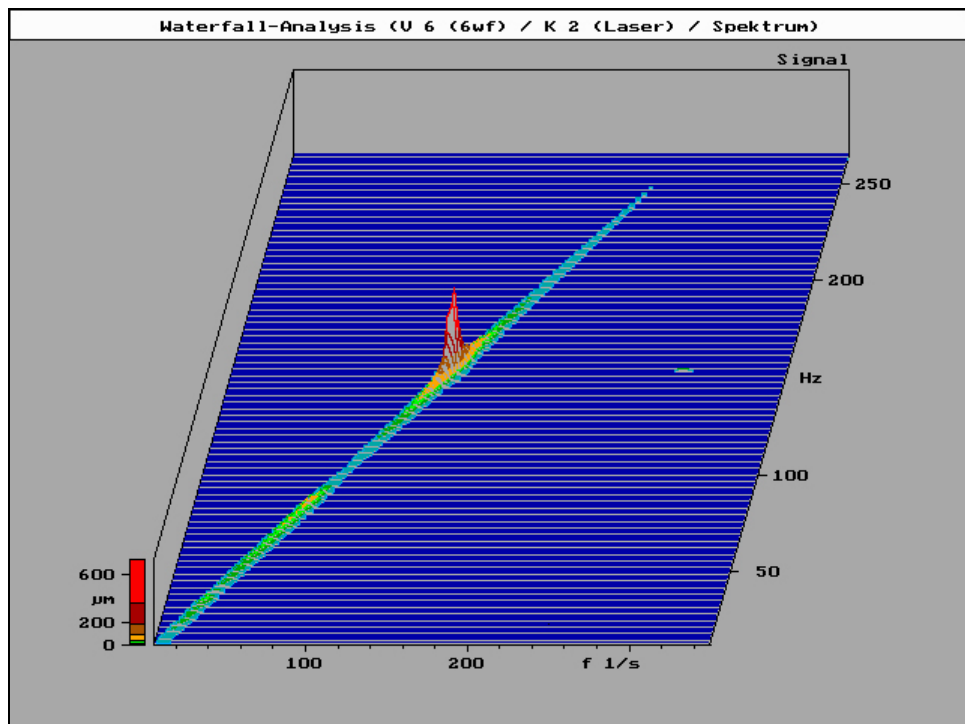


Abb. 28 – Wasserfall-Diagramm Blatt 6 aus V1/K1/6aus/Vorgabe und V1/K2/6aus/Laser

# Blatt 7

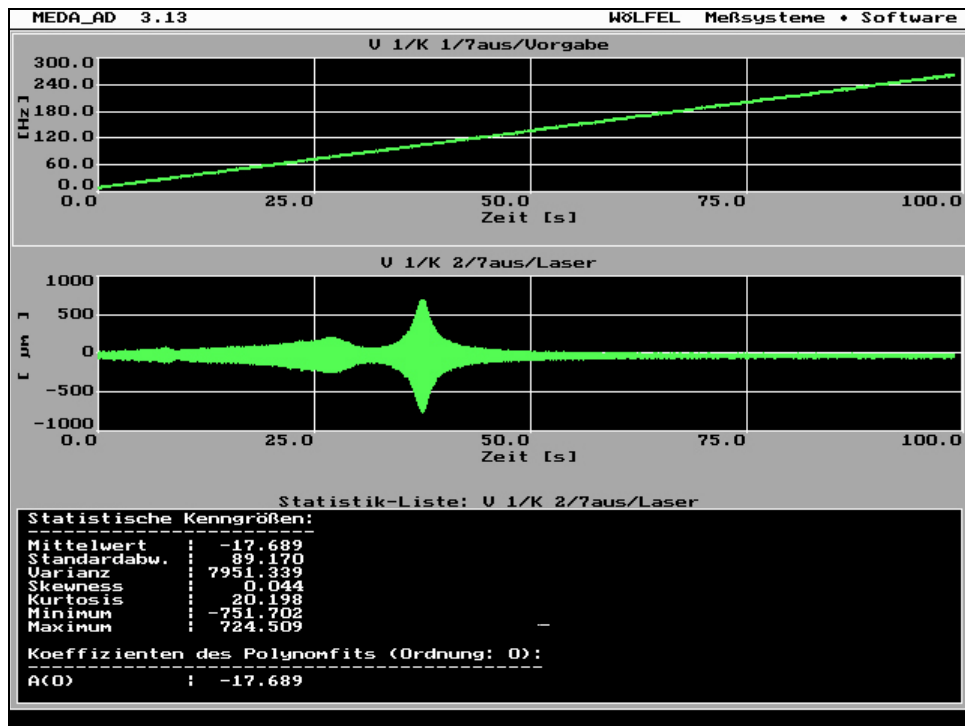


Abb. 29 – Hochlauf-Diagramm Blatt 7  
 V1/K1/7aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/7aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/7aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

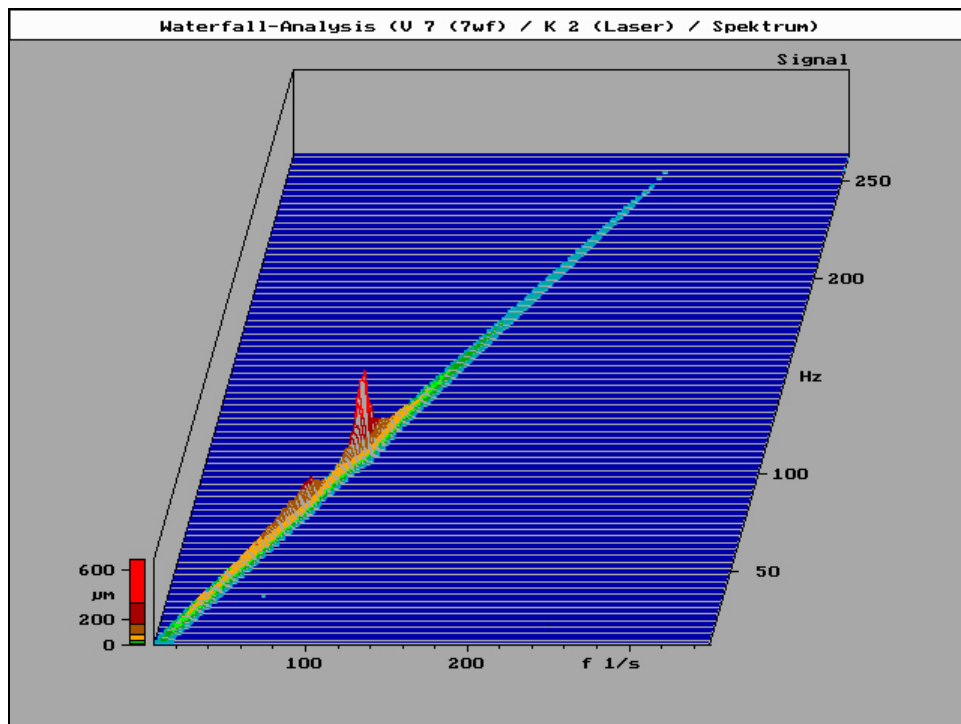


Abb. 30 – Wasserfall-Diagramm Blatt 7 aus V1/K1/7aus/Vorgabe und V1/K2/7aus/Laser

# Blatt 8

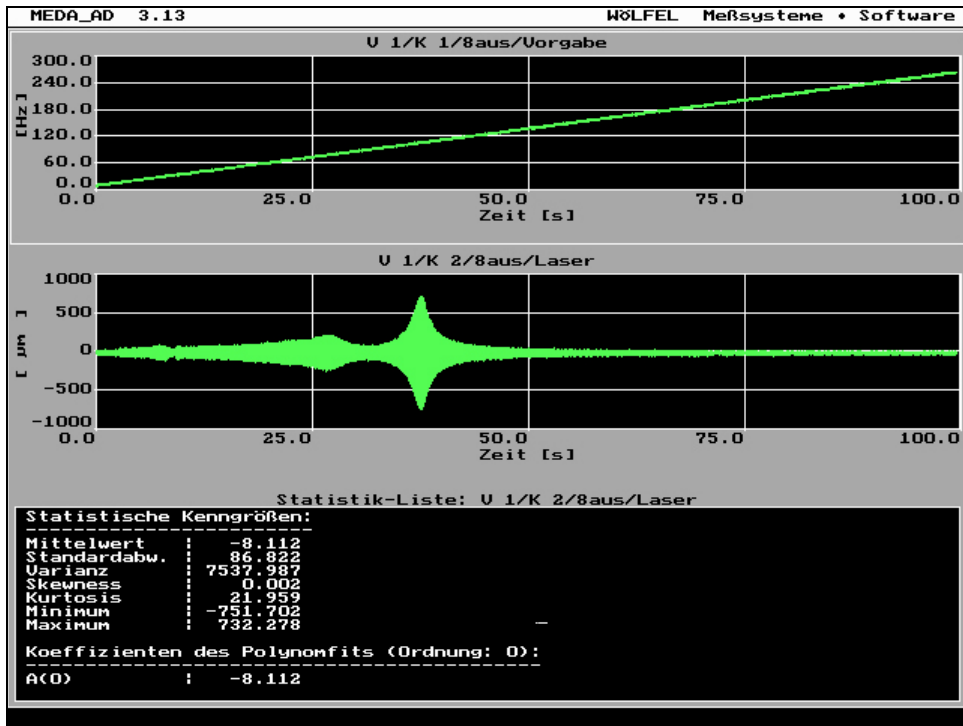


Abb. 31 – Hochlauf-Diagramm Blatt 8  
 V1/K1/8aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/8aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/8aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

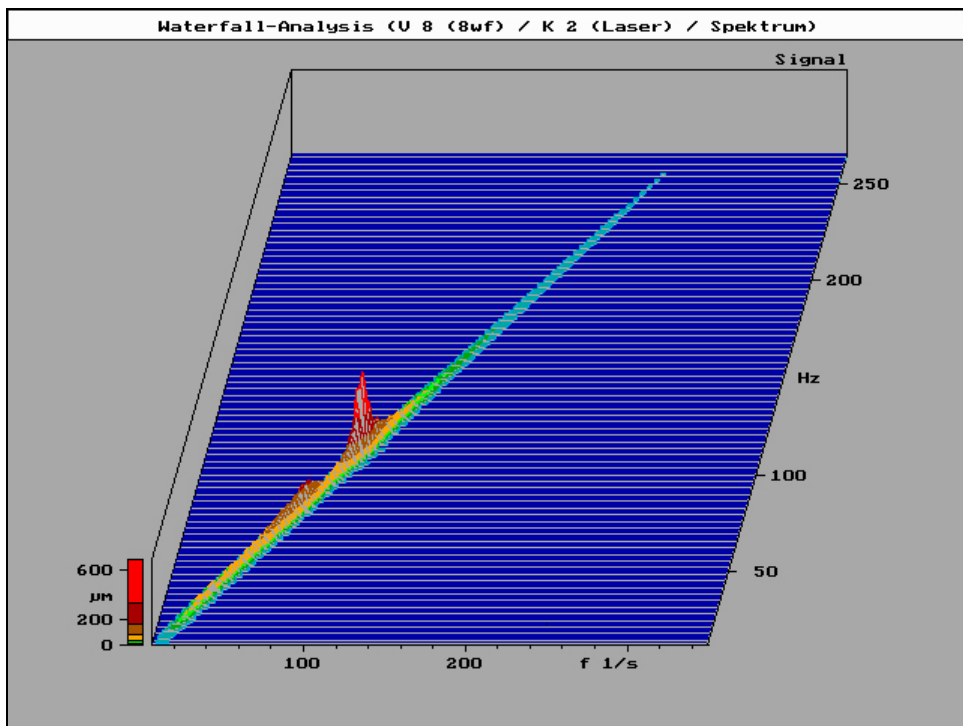


Abb. 32 – Wasserfall-Diagramm Blatt 8 aus V1/K1/8aus/Vorgabe und V1/K2/8aus/Laser

# Blatt 9

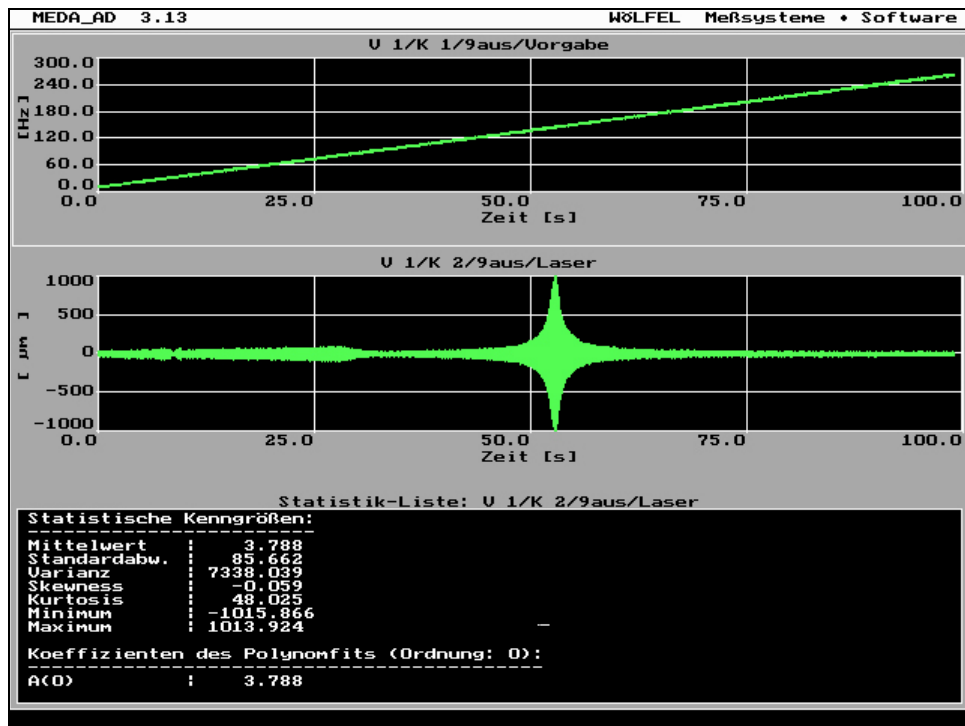


Abb. 33 – Hochlauf-Diagramm Blatt 9  
 V1/K1/9aus/Vorgabe zeigt das Frequenzspektrum des Arbitrary Generators,  
 V1/K2/9aus/Laser zeigt die Schwingung des Sägeblattes.  
 In der Statistik-Liste:V1/K2/9aus/Laser sind die statistischen Kenngrößen dargestellt.

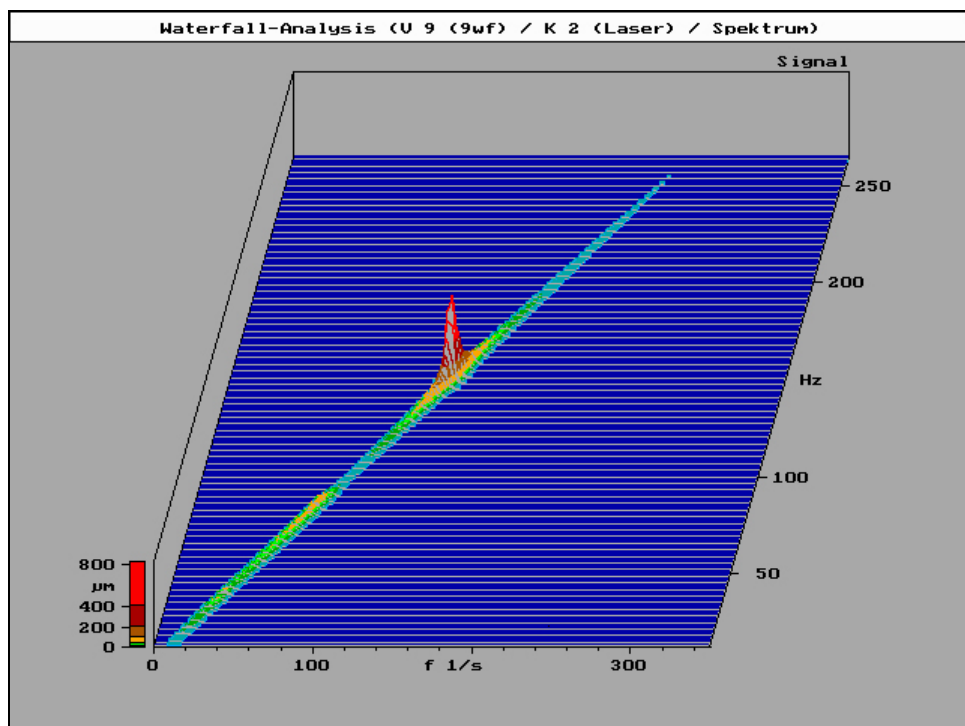


Abb. 34 – Wasserfall-Diagramm Blatt 9 aus V1/K1/9aus/Vorgabe und V1/K2/9aus/Laser



### **3.3. Beschleunigungsmessung im Knochen**

Um den Einfluss des Sägeblattes auf die Säge darzustellen erfolgte zunächst eine Messung der Beschleunigung ohne und mit Blatt im Leerlauf (Abb. 36).

Aufgrund der in Kap. 3.2. gewonnenen Erkenntnisse über das Schwingverhalten der Blätter 5 und 6, bzw. über den Einfluss der Prägung wurden insgesamt 2 Versuchsserien mit jeweils 25 Versuchen mit den Blättern 5 und 6 durchgeführt, um den Unterschied bzw. den Einfluss der Prägung auf das Verhalten beim Sägen im Knochen darzustellen. Beide Blätter sind in Material, Geometrie und Zahnform identisch, Blatt 6 weist im Gegensatz zu Blatt 5 eine Prägung mit 136 bar auf.

Die entsprechenden Orbital-Diagramme der Sägeblätter 5 (Abb. 37) und 6 (Abb. 38) sind dargestellt. Die Auswertung erfolgte durch eine grafische Integration, wie in Kapitel 2.2.3. beschrieben. Hierbei wurden alle Flächeneinheiten des Rasters, die mindestens zu 50 % überdeckt sind, gezählt und für Blatt 6 in Tab. 4, für Blatt 5 in Tab. 5 zusammengefasst. Anhand der räumlichen Ausdehnung der Orbits wurden die Beschleunigungen des Sägekopfes in den Raumrichtungen z und x dargestellt. Für beide Versuchsreihen wurden Mittelwert und Standardabweichung der grafischen Integration (siehe Kap. 2.2.3.) bei einer Anzahl von 25 Versuchen berechnet und in Abb. 39 zusammengefasst.

## Säge mit und ohne Blatt im Leerlauf

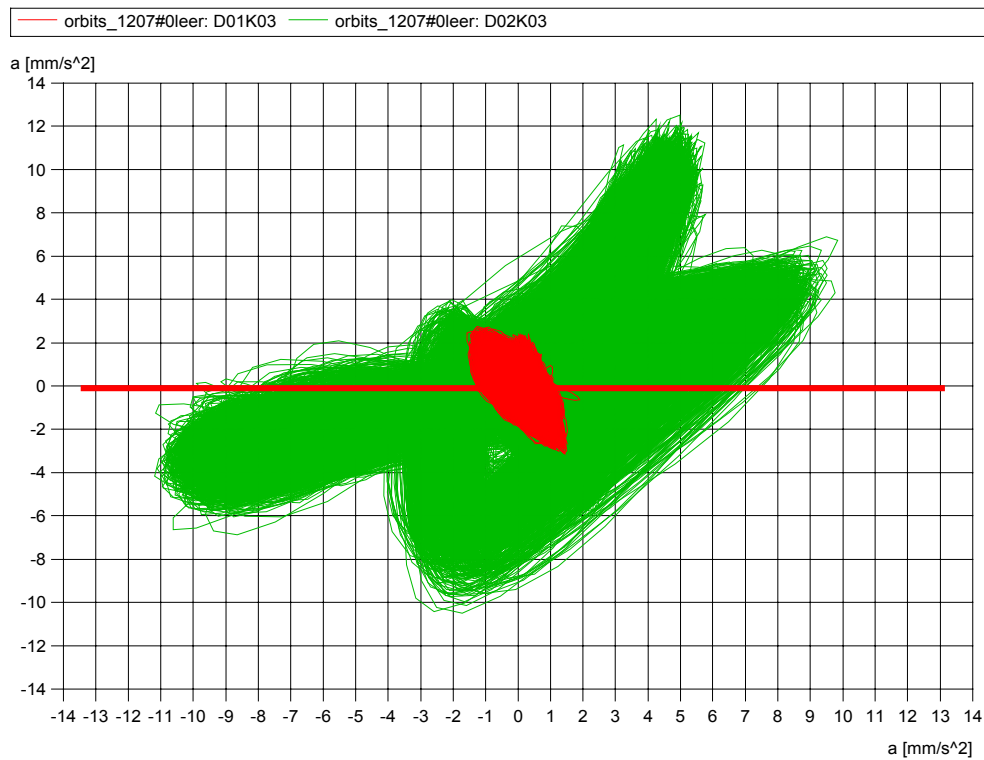


Abb. 36 – orbits\_1207#0leer:D01K03 orbits\_1207#0leer:D02K03

Die Ordinate des Diagrammes orbits\_1207#0leer:D01K03 zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] des Sägekopfes ohne Blatt im Leerlauf in der x-Richtung, die Abszisse zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] in der z-Richtung.

Die Ordinate des Diagrammes orbits\_1207#0leer:D02K03 zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] des Sägekopfes mit Blatt im Leerlauf in der x-Richtung, die Abszisse zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] in der z-Richtung.

## Orbital-Diagramm Blatt 6 (Prägung 136 bar)

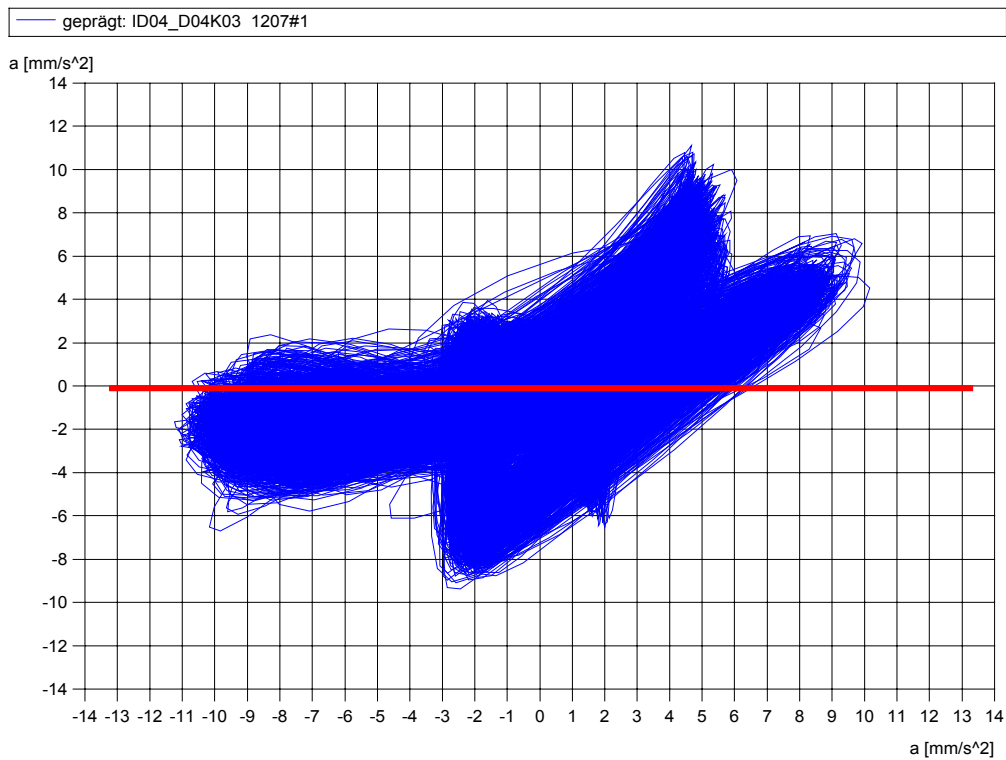


Abb. 37 – ID04\_D04K03 1207#01 (Blatt 6)

Die Ordinate des Diagrammes zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] des Sägekopfes unter Verwendung von Blatt 6 (Prägung 136 bar) in der x-Richtung, die Abszisse zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [mm/s<sup>2</sup>] in der z-Richtung.

## Orbital-Diagramm Blatt 5 (ohne Prägung)

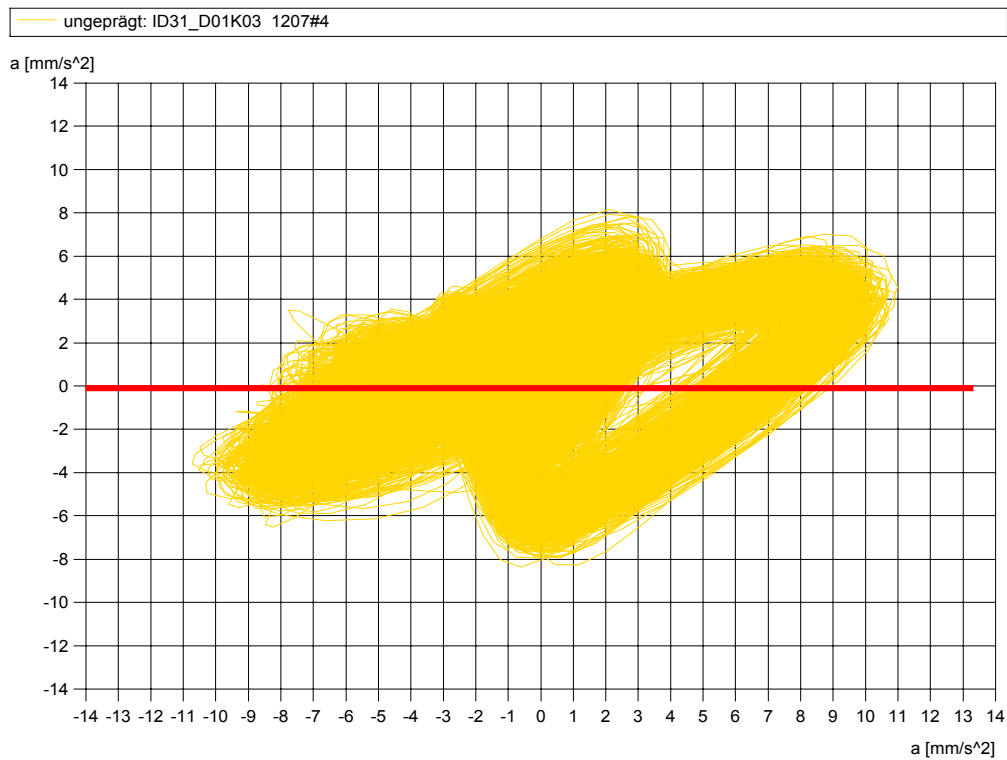


Abb. 37 – ID31\_D01K03 1207#04 (Blatt 5)

Die Ordinate des Diagrammes zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] des Sägekopfes unter Verwendung von Blatt 5 (ohne Prägung) in der x-Richtung, die Abszisse zeigt die Beschleunigungswerte  $a$  [ $\text{mm/s}^2$ ] in der z-Richtung.

Die Auswertung der grafischen Integration ist für Blatt 5 in Tab. 4, für Blatt 6 in Tab. 5 dargestellt. Die Tabellen zeigen die Anzahl der zu mindestens 50 % überdeckten Flächeneinheiten des Rasters der Orbital-Diagramme. Die Anzahl der Felder der Zeilen 1-14 der Orbital-Diagramme ist für jedes Diagramm als Summe aufgeführt. Es erfolgte eine Addition der Werte pro Zeile. Anschließend wurden der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet.

### Grafische Integration der Orbital-Diagramme für Blatt 5

	ID01_D01K03	ID03_D03K03	ID05_D05K03	ID07_D07K03	ID09_D09K03	ID11_D11K03	ID13_D13K03	ID15_D15K03	ID17_D17K03	ID19_D19K03	ID21_D21K03	ID23_D23K03	ID25_D25K03	ID27_D27K03	ID29_D29K03	ID31_D31K03	ID33_D33K03	ID35_D35K03	ID37_D37K03	ID39_D39K03	ID41_D41K03	ID43_D43K03	ID45_D45K03	ID47_D47K03	ID49_D49K03	
Zeile 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zeile 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0	0	
Zeile 3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	
Zeile 4	3	2	3	0	0	0	0	6	2	0	2	0	0	0	0	3	0	10	6	0	16	6	5	6	0	
Zeile 5	8	6	7	7	7	8	6	12	7	7	9	7	9	6	12	11	15	15	13	20	14	14	15	10		
Zeile 6	13	14	15	11	16	13	12	13	13	13	14	12	12	11	13	16	17	19	19	15	21	14	15	16	14	
Zeile 7	16	16	17	15	16	16	15	16	16	14	14	12	13	15	15	17	18	20	18	17	23	15	16	16	18	
Zeile 8	17	16	16	14	15	15	15	16	15	13	14	14	13	15	13	17	18	20	18	16	21	16	16	15	15	
Zeile 9	16	14	15	13	13	13	15	15	15	12	13	12	13	13	12	16	16	18	16	14	17	14	15	15	14	
Zeile 10	11	10	11	9	7	6	14	14	11	8	11	10	11	11	8	12	11	14	15	12	16	12	13	13	6	
Zeile 11	6	5	4	2	2	3	3	6	5	3	5	3	2	0	1	3	3	27	6	4	3	3	4	4	4	
Zeile 12	3	0	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	
Zeile 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zeile 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Σ</b>	<b>95</b>	<b>83</b>	<b>88</b>	<b>71</b>	<b>76</b>	<b>76</b>	<b>74</b>	<b>101</b>	<b>84</b>	<b>70</b>	<b>85</b>	<b>70</b>	<b>73</b>	<b>71</b>	<b>68</b>	<b>96</b>	<b>94</b>	<b>143</b>	<b>116</b>	<b>91</b>	<b>152</b>	<b>94</b>	<b>98</b>	<b>100</b>	<b>81</b>	
<b>MW = 90 ; Stabw = 21</b>																										

Tab. 4 – Grafische Integration der Orbital-Diagramme für Blatt 5

### Grafische Integration der Orbital-Diagramme Blatt 6

	ID02_D02K03	ID04_D04K03	ID06_D06K03	ID08_D08K03	ID10_D10K03	ID12_D12K03	ID14_D14K03	ID16_D16K03	ID18_D18K03	ID20_D20K03	ID22_D22K03	ID24_D24K03	ID26_D26K03	ID28_D28K03	ID30_D30K03	ID32_D32K03	ID34_D34K03	ID36_D36K03	ID38_D38K03	ID40_D40K03	ID42_D42K03	ID44_D44K03	ID46_D46K03	ID48_D48K03	ID50_D50K03	
Zeile 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zeile 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	
Zeile 3	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	6	6	0	0	0	
Zeile 4	3	4	0	1	0	0	5	7	1	0	0	2	1	0	0	3	5	7	11	0	8	8	4	3	1	
Zeile 5	9	11	3	11	5	9	10	12	7	5	8	11	7	5	6	13	14	13	15	12	16	16	14	7	10	
Zeile 6	16	12	18	17	15	12	14	14	13	13	13	12	11	11	17	18	18	16	15	18	17	15	14	13		
Zeile 7	18	17	16	17	17	16	15	17	15	17	15	11	13	14	9	14	19	19	18	16	18	16	16	14	13	
Zeile 8	17	16	15	15	15	16	16	16	15	14	14	13	12	14	15	15	19	18	18	16	16	16	15	14	15	
Zeile 9	15	15	12	15	13	14	15	15	15	12	12	12	12	13	14	16	18	16	15	17	15	14	14	14		
Zeile 10	11	10	6	12	10	10	14	14	10	11	10	10	11	8	9	12	14	13	15	11	14	13	9	8	6	
Zeile 11	6	3	3	4	1	3	6	6	5	3	3	3	1	2	0	4	5	4	6	4	5	5	4	0	3	
Zeile 12	3	1	0	2	0	0	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zeile 13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Zeile 14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Σ</b>	<b>98</b>	<b>93</b>	<b>73</b>	<b>94</b>	<b>76</b>	<b>80</b>	<b>98</b>	<b>104</b>	<b>81</b>	<b>75</b>	<b>75</b>	<b>74</b>	<b>68</b>	<b>67</b>	<b>64</b>	<b>94</b>	<b>112</b>	<b>108</b>	<b>124</b>	<b>89</b>	<b>118</b>	<b>112</b>	<b>91</b>	<b>74</b>	<b>75</b>	
<b>MW = 89; Stabw = 17</b>																										

Tab. 5 – Grafische Integration der Orbital-Diagramme für Blatt 6

Mittelwert und Standardabweichungen für die Sägeblätter 5 und 6 sind in Abb. 38 dargestellt. Die Zahl der überdeckten Flächeneinheiten betrug für das Blatt 5  $90 \pm 21$ , für das Blatt 6  $89 \pm 17$ . Der Unterschied war nicht signifikant.

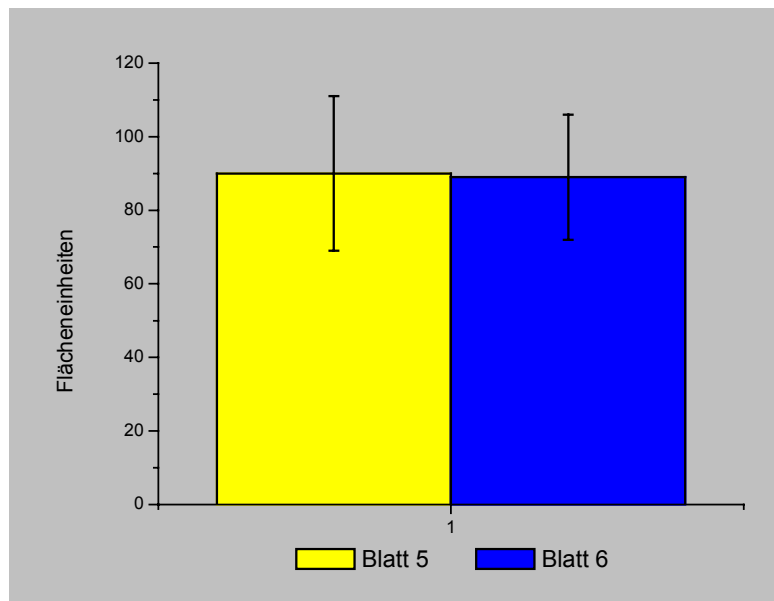


Abb. 38 – Mittelwert und Standardabweichung der Flächeneinheiten der Orbital-Diagramme Blatt 5 und 6. Die Ordinate zeigt die Mittelwerte und die Standardabweichung der Flächeneinheiten aus den Orbital-Diagrammen der Blätter 5 und 6. Die gelbe Säule zeigt die Ergebnisse von Blatt 5, die blaue Säule zeigt die Ergebnisse von Blatt 6. Blatt 5: MW  $90 \pm 21$ , Blatt 6: MW  $89 \pm 17$ . Der t-Test ergab keine Signifikanz ( $p=0,854$ )

## 4. Diskussion

Ziel der vorliegenden Studie war, den Unterschied der Sägequalität zwischen einem geprägten und einem nicht-geprägten Sägeblatt bei gleichen äußeren Abmessungen darzustellen. Dazu wurde insbesondere der Einfluss der Prägung auf die Eigenform untersucht. Anzahl und Ausprägung der Eigenformen beeinflussen Schwingungsverhalten des Sägeblattes, und damit die Qualität des Knochenschnittes.

Bisherige Optimierungsversuche konnten anhand der Literatur in folgenden Punkten angreifen:

In früheren Studien wurden verschiedene Aspekte oszillierender Sägen untersucht. Der Temperaturentwicklung bei der Zerspanung von Knochen wird in der klinischen Praxis eine wichtige Rolle zugesprochen. <sup>6, 7, 8, 9, 10, 11, 16, 17, 19, 23, 24, 26, 27, 28, 35, 40, 41, 42</sup>

Es konnten Auswirkung und Grenzwerte hinsichtlich der beim Zerspanen von Knochen entstehenden Temperaturen und deren Einfluss auf die Entstehung von Nekrosen gezeigt werden. Ferner wurden Methoden zur Reduzierung der Temperatur aufgezeigt. Diese umfassten Aspekte zur Optimierung von Sägeblättern hinsichtlich Zahngeometrie, Haltbarkeit und Schnittgeschwindigkeit. <sup>1, 2, 3, 7, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 31, 32, 36, 37, 38, 39, 43, 44</sup>

Neben oszillierenden Sägen wurden auch andere Schnittverfahren wie die Verwendung von Ultraschall beschrieben. Untersucht wurde u.a. die Einsatzfähigkeit zum Trennen und Schweissen von Knochen, sowie die Temperatureinflüsse bei diesen Prozessen. Als positiv wurden Handhabung der Instrumente und Oberflächenbeschaffenheit der Knochenspäne hervorgehoben. Aufgrund der hohen Temperaturentwicklung kann der Einsatz von Ultraschallgeräten zum Trennen und Schweissen von Knochen für die Praxis jedoch nicht empfohlen werden. <sup>4, 18, 29, 33, 34</sup>

In vorliegender Arbeit wurde erstmals die Messung der Eigenform zur Qualifizierung von Sägeblättern herangezogen. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Resultate stellen sich wie folgt dar:

Zwischen den 3 Gruppen der Sägeblätter bestehen Unterschiede hinsichtlich der Eigenform. Alle 3 Gruppen weisen in einem schmalen Frequenzbereich eine Eigenform mit deutlicher Amplitude auf. Auch in höheren Frequenzbereichen treten Eigenformen auf, diese sind aber hinsichtlich ihrer Amplitude nicht signifikant, da mit höher werdender Frequenz die Amplitude immer geringer wird. Eine Untersuchung der Säge hat gezeigt, dass die Anregungsfrequenz bei 230 Hz liegt. Somit wurden nach einigen Voruntersuchungen der Säge sowie der Sägeblätter ein Frequenzband von 10-270 Hz gewählt. Durch das mathematische Verfahren der Finiten Elemente (ANSYS) konnten die einzelnen Frequenzen ermittelt werden. Diese Frequenzen wurden im Shakerversuch wiederholt und dabei die Amplituden bestimmt. Hier hat sich gezeigt, dass höhere Frequenzen im Frequenzgang aufgrund der Amplituden nicht relevant sind. Bei dem mathematischen Verfahren ANSYS konnten die Wege nicht bestimmt werden, da keinerlei Abschätzung der Anregungskräfte bekannt waren. Somit stellen die Eigenform-Diagramme die einzelnen Schwingformen dar.

Im Shakerversuch wurden diese Frequenzen über den beschriebenen Messaufbau konstant angeregt. Die bestimmten Amplituden wurden zur besseren Übersicht als Wasserfall-Diagramm dargestellt. Hier tritt in einem schmalen Frequenzbereich die erste Eigenformen mit hoher Amplitude auf.

In der Blattgruppe I treten in einem breiten Frequenzbereich bis zum Erreichen der ersten Eigenform konstante Schwingungen geringerer Amplitude auf. Für die Blattgruppe I wurde die erste Eigenform bei 110,75 Hz berechnet. In den Blattgruppen II und III liegen die ersten Eigenformen bei 84,58 Hz und 118,20 Hz. Hier treten keine Grundschnwingungen bis zur ersten Eigenform auf.

Im Folgenden ist der Einfluss verschiedener technischer Besonderheiten der Sägeblätter auf das Schwingungsverhalten dargestellt.

Ein Sägeblatt ohne Lochung hat im niedrigen Frequenzband ein konstantes Schwingverhalten. Das Blatt schwingt hier kontinuierlich bis zum Erreichen seiner ersten Eigenform. Dies ist ungünstig, da diese Blätter keinen Ruhebereich bei geringerer Anregung besitzen, und somit immer zum



Schwingen neigen.

Ein Blatt mit Löchern schwingt im Gegensatz zu den Blättern ohne Loch sehr schmalbandig und weist eine typische erste Eigenform auf.

Das Ausschneiden des Materials mittels Drahterosion oder Laser nimmt keinen Einfluss auf die Eigenform. Dies zeigen die Diagramme und Messwerte der Blätter 3 und 4.

Eine Prägung hat keinen Einfluss auf die Eigenform der Blätter ohne Loch

Bei den gelochten Blättern zeigt der verwendete Druck zur Prägung des Sägeblattes bei 90 bar keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Steifigkeit des Blattes.

Dagegen zeigen die mit 136 bar geprägten Sägeblätter deutliche Unterschiede zu den ungeprägten bzw. den mit 90 bar geprägten Sägeblättern.

Die Eigenform von Blatt 6 weist Amplituden im Bereich von  $-730,26$  bis  $786,32$   $\mu\text{m}$  auf. Die Amplitude der Eigenform von Blatt 5 liegt im Bereich von  $-955,65$  bis  $928,46$   $\mu\text{m}$ . Somit besteht ein deutlicher Unterschied zugunsten Blatt 6 hinsichtlich der Eigenform im Vergleich zu Blatt 5 von 15,3 % in der Maximum-Amplitude und 23,5 % in der Minimum-Amplitude.

Im Vergleich zu den anderen Blätter mit 2 Löchern weist Blatt 9 die stärkste Amplitude der Eigenform auf. Die Minimum-Amplitude liegt bei  $-1015,87$   $\mu\text{m}$ , die Maximum-Amplitude bei  $1013,92$   $\mu\text{m}$ . Bei diesem Blatt war das Material unbekannt und die Zahnform unterschiedlich. Im Vergleich zu Blatt 6 zeigt sich eine Differenz der Minimal-Amplitude von 71,8 % und der Maximum-Amplitude von 77,5 %.

Ein drittes Loch, wie bei Blatt 2, verschlechtert die Amplituden der Eigenform. Hier zeigt sich ein Unterschied von 80 % für die Maximal- und 65 % für die Minimal-Amplitude zu Blatt 6.

Insgesamt lassen sich mit der Eigenform signifikante Unterschiede zwischen den Sägeblätter 1–9 nachweisen. Wiederholungen der Messungen zeigten identische Werte für die einzelnen Sägeblätter. Der entscheidende Befund ist der deutliche Einfluss der Oberflächenprägung auf die Eigenform.

Um den Einfluss der Sägeblätter auf die Beschleunigung im Knochen von dem der Säge abzugrenzen erfolgte die Beschleunigungsmessung in einem Sägeprüfstand. Die Auswertung der Orbital-Diagramme erfolgte unter Zuhilfenahme des grafischen Integrationsverfahrens.

Die Auswertung ergab für Blatt 5 bei einer Anzahl  $n=25$  einen Mittelwert von 90 FE mit einer Standardabweichung von 21. Blatt 6 lieferte im Mittel 89 FE, mit einer Standardabweichung von 17 bei gleicher Anzahl von  $n=25$ . Der t-Test ergab eine Signifikanz von  $p=0,854$ .

Die statistische Analyse zeigt keinen signifikanten Unterschied für Blatt 5 und 6 bei der Beschleunigungsmessung im Knochen ( $p=0,854$ ). Somit ist die Messung der Vibration beim Sägen in Knochen kein geeignetes Mittel zur Darstellung des Einflusses von Sägeblatt und Säge. Als eine Ursache könnte die Inhomogenität der Knochenwürfel bezüglich ihrer Dichte verantwortlich sein, zum anderen erfolgte die Beschleunigungsaufzeichnung an dem Sägekopf und nicht an dem Sägeblatt selbst. Eine solitäre Aufzeichnung der Beschleunigungswerte des Sägeblattes war somit nicht möglich. Die aufgezeichneten Werte resultieren aus der Summe der Beschleunigungen im Sägekopf. Neben dem Sägeblatt wurden hier auch die Beschleunigungswerte der Getriebeteile des Sägekopfes registriert. Aufgrund dieser Störfaktoren und der Inhomogenität des Knochens erlaubt die Auswertung der Beschleunigungsmessung nur bedingt Aussagen über das Schwingungsverhalten des Sägeblattes während des Sägevorganges.

Eine Messung der Beschleunigungen des Sägekopfes ohne Sägeblatt zeigte, dass der Sägekopf der Schwingung des Sägeblattes folgt. Somit konnte hinsichtlich der Positionierung des Beschleunigungssensors die Montagestelle als die einzig mögliche charakterisiert werden.

Eine weitere Verbesserung durch den Einsatz optischer Instrumente z.B. eine Abtastung mittels Laser ähnlich des in Kap. 2.2.2. beschriebenen Versuchsaufbaus könnte hier die exakten Messwerte liefern.

Zur Beurteilung der Qualität der Sägeblätter ist daher die Schwingungsanalyse die entscheidende Methode.

## 5. Zusammenfassung

Oszillierende Sägen werden vorwiegend in der Knochenchirurgie eingesetzt. Ein exakter Sägeschnitt ist die Voraussetzung für einen optimalen Implantat-Knochen-Kontakt. Ziel der vorliegenden Studie war die Charakterisierung des Schwingungsverhaltens von Sägeblättern für die Knieendoprothetik.

9 verschiedene Sägeblätter unterschiedlicher Form und Geometrie wurden untersucht. Zunächst wurde eine Eigenformberechnung mittels der Finiten Elemente Methode durchgeführt. Anschließend erfolgte die Eigenformbestimmung im Shakerversuch. Um den Einfluss der Sägeblätter auf die Beschleunigung im Knochen von dem der Säge abzugrenzen erfolgte die Beschleunigungsmessung in einem Sägeprüfstand.

Bezüglich des Eigenschwingungsverhalten konnten die Sägeblätter drei Gruppen zugeordnet werden.

Sowohl die Form als auch die Lochung haben einen wesentlichen Einfluss. Die Zahngeometrie und das Herstellungsverfahren (Laser versus Drahterosion) haben keinen Einfluss auf das Schwingungsverhalten.

2 Löcher sind hinsichtlich der Eigenformentwicklung am günstigsten, eine zusätzliche Oberflächenprägung verbessert das Schwingungsverhalten.

Als optimal erweist sich anhand der Eigenformberechnung und -bestimmung ein Sägeblatt mit 2 Löchern und einer Prägung von 136 bar. Hier zeigte sich eine Reduzierung der Maximal-Amplitude von 15,3 % und der Minimal-Amplitude von 23,5 %.

Die Optimierung der Sägeblätter bezüglich ihres Schwingungsverhaltens ist in der Literatur bisher nicht beschrieben. Für die Knieendoprothetik ist ein Blatt mit 2 Löchern und einer zusätzlichen Oberflächenprägung als ideal anzusehen.

Da sich bei Beschleunigungsmessungen im Knochen keine Unterschiede zwischen den Blättern herausarbeiten ließ, ist die Schwingungsanalyse die Methode der Wahl zur Optimierung des Sägeblattes. Als mögliche Weiterentwicklung ist in Zukunft eine Abstimmung von Säge und Sägeblatt denkbar.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Ark T.W., Thacker J.G., McGregor W., Rodeheaver G.T., Edlich R.F. - 1997  
Durability of Oscillating Saw Blades  
J of Long-Term Effects of Med Implants 7: 271-278
  
- [2] Ark T.W., Thacker J.G., McGregor W., Rodeheaver G.T., Edlich R.F. - 1997  
A Technique for Quantifying the Performance of Oscillating Bone Saw Blades  
J of Long-Term Effects of Med Implants 7: 255-270
  
- [3] Ark T.W., Thacker J.G., McGregor W., Rodeheaver G.T., Edlich R.F. - 1997  
Innovations in Oscillating Bone Saw Blades  
J of Long-Term Effects of Med Implants 7: 279-286
  
- [4] Aro H., Kallionieme H., Aho A. J., Kellokumpu-Lehtinen P. - 1981  
Ultrasonic Device In Bone Cutting, A Histological and Scanning Electron  
Microscopical Study  
Acta Orthop Scand 52: 5-10
  
- [5] Beitz W., Küttner K.-H. - 1981  
Dubbel, Taschenbuch für den , 106, 10.6.2.  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
  
- [6] Berg R. - 1976  
Thermometrische Untersuchung beim Bohren in menschlicher Kompakta  
Diss Gießen
  
- [7] Brinckmann P., Krenz J., Ruck W. - 1975  
Gekühlte Säge zum Einsatz in der Knochenchirurgie  
Biomed Techn 20: 198
  
- [8] Bruun C., Andersen E. - 1987  
Heat generation during drilling in cancellous bone.  
Acta Orthop Scand 58: 705

- [9] Eriksson A.R., Albrektsson T., Albrektsson B. - 1984  
Heat caused by drilling cortical bone. Temperature measured in vivo in patients and animals.  
Acta Orthop Scand 55(6): 629-31
- [10] Eriksson A.R. - 1984  
Heat induced bone tissue injury. An in vivo investigation of heat tolerance of bone tissue and temperature rise in the drilling of cortical bone.  
Thesis, University of Gothenburg, Göteborg, Sweden
- [11] Eriksson R.A., Albrektsson T. - 1984  
The effect of heat on bone regeneration: An experimental study in the rabbit using the bone growth chamber  
J Oral Maxillofac Surg 42: 705-711
- [12] Eulert J., Hassenpflug J. - 2000  
Praxis der Knieendoprothetik: S. 31  
Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York
- [13] Fuchsberger A.  
Beitrag zur Konstruktion spanender Werkzeuge für die Medizin am Beispiel des Spiralbohrers  
Med.-orthop.-Technik
- [14] Fuchsberger A. - 1986  
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen  
iwv-Forschungsberichte, Bd. 2, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York  
Tokyo
- [15] Fuchsberger A. - 1987  
Die Bearbeitung von Knochen mit Sägewerkzeugen  
Biomed Technik 32: 214-225
- [16] Fuchsberger A.  
Die schädigende Temperatur bei der spanenden Knochenbearbeitung  
Unfallchirurgie

- [17] Fuchsberger A. - 1987  
Temperatureinwirkung auf die Kompakta beim Sägen in Abhängigkeit von den Einsatzbedingungen.  
Zent bl Chir 112: 793-804
- [18] Horton J.E., Tarpley, T.M., Wood L.D. - 1975  
The healing of surgical defects in alveolar bone produced with ultrasonic instrumentation, chisel and rotary bur.  
J Oral Surg 39: 536-545
- [19] Huiskes R. - 1980  
Some fundamental aspects of human joint replacement: analyses of stresses and heat conduction in bone-prosthesis structures.  
Acta Orthop Scand (Suppl 5) 1: 185
- [20] Jacobs C.H., Pope M.H., Berry J.T., Hoaglund F. - 1974  
A study of the bone machining process - orthogonal cutting  
J Biomechanics 7: 131-136
- [21] Klip E.J. - 1976  
Sawing in bone.  
Report no. 1. Department of Orthopaedic Surgery and the Institute of Technology, Linköping, Sweden
- [22] Krause W.R. - 1987  
Orthogonal bone cutting: saw design and operating characteristics  
J Biomechanical Engineering 109: 263-271
- [23] Krause W.R., Bradbury D.W., Kelly J.E., Lunceford E.M. - 1982  
Temperature elevations in orthopaedic cutting Operations.  
J Biomech 15(4): 267-75.
- [24] Labitzke R., Paulus M. - 1974  
Intraoperative Temperaturmessungen in der Hüftchirurgie während der Polymerisation des Knochenzementes Palacos.  
Arch Orthop Unfall-Chir 79: 341

- [25] Lennox D.W., Cohn B.T., Eschenroeder H.C. Jr. - 1988  
The effects of inaccurate bone cuts on femoral component position in total knee arthroplasty  
Orthopedics 11: 257
- [26] Ludewig R. - 1971  
Temperaturmessungen Beim Knochensägen.  
Dissertation der Medizinischen Fakultät der Justus Liebig Universität Giessen, Giessen
- [27] Lundskog J. - 1972  
Heat and bone tissue  
Scand J Plas Reconstr Surg Suppl 9: 5-80.
- [28] Matthews L.S, Hirsch C. - 1972  
Temperatures measured in human cortical bone when drilling.  
J Bone Joint Surg (Am) 54-A :297-308.
- [29] McFall T.A., Yamane G.M., Burnett G.W. - 1961  
Comparison of the cutting effect on bone of an ultrasonic device and rotare burs  
J Oral Surg 19: 200-209
- [30] Meyers Enzyklopädisches Lexikon  
Band 7: Div – Eny und 2. Nachtrag: 491
- [31] Milberg J., Fuchsberger A. - 1986  
Erstellung von Richtwerten für die Werkzeuggeometrie und Technologie bei der spanenden Bearbeitung von Knochen.  
DFG-Schlußbericht, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, TU München
- [32] Milberger J., Fuchsberger A. - 1987  
Optimierung der Werkzeuggeometrie oszillierender Sägen für den Einsatz in der Medizin  
Z Orthop 125: 430-439



- [33] Picht U., Schumpe G., Milachowski K. - 1977  
Sägen und Schweissen mit Ultraschall  
Z Orthop 115: 82-89
- [34] Polyakov V., Nikolaev G., Volkov M., Loshchilov, V., Petrov V. - 1971  
Ultrasonic bonding of bones and cutting of live biological tissues  
Mir Publishers, Moscow
- [35] Schmidt A.O. - 1950  
Heat in metal cutting.  
Machining-theory and practice. American Society for Metals, Cleveland 218
- [36] Stoll P., Niederedelmann, Hültenschmitt - 1983  
Moderne chirurgische Sägeverfahren im tierexperimentellen Vergleich  
Fortschr. der Kiefer- und Gesichtschirurgie Bd. 28: 28-31
- [37] Toksvig-Larsen S., Kroon P., Ryd L. - 1994  
Improved bone cutting using a semirotating saw  
Acta Orthop Scand 65 (4): 412-414
- [38] Toksvig-Larsen S. - 1992  
On bone cutting  
Thesis, University of Lund, Lund Sweden
- [39] Toksvig-Larsen S., Ryd L. - 1991  
Surface flatness after bone cutting: a cadaver study of tibial condyles  
Acta Orthop Scand 62: 15
- [40] Toksvig-Larsen S., Ryd L. - 1989  
Temperature elevation during knee arthroplasty.  
Acta Orthop Scand 60(4): 439-42
- [41] Toksvig-Larsen S., Ryd L., Lindstrand A. - 1991  
On The Problem Of Heat Generation in Bone Cutting  
J Bone Joint Surg 73-B; 1: 13-15

- [42] Toksvig-Larsen S., Ryd L., Lindstrand A. - 1990  
An internally cooled saw blade for bone cuts  
Acta Orthop Scand 61 (4): 321-323
- [43] Wevers H.W., Espin E., and Cooke, T.D.V. - 1987  
Orthopedic Sawblades  
J Arthroplasty 2: 43-46
- [44] Wiggins K.L., Malkin S. - 1989  
Orthogonal machining of bone:  
ASME 100: 122



## **Danksagung**

Meinem sehr verehrten Chef und Lehrer, Herrn Prof. Dr. med. J. Eulert, Ärztlicher Direktor der Klinik und Poliklinik für Orthopädie der Julius-Maximilians-Universität Würzburg, König-Ludwig-Haus, danke ich für die Möglichkeit, diese Arbeit in seiner Abteilung durchführen zu können.

Meinem Doktorvater, Herrn Priv. Doz. Dr. med. C. Hendrich, möchte ich für die Überlassung des interessanten Themas und die Betreuung der Arbeit an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. R. Thull, Lehrstuhl für Funktionswerkstoffe der Medizin und Zahnheilkunde, danke ich für die Übernahme des Koreferates und die Einrichtung des Sägeprüfstandes in seiner Abteilung. Bei seinem Team Feinmechaniker-Meister Herrn A. Hümpfer und Herrn H. Hofmann, und Herrn Dipl.-Ing. G. Kappelt danke ich für die Hilfe bei Aufbau und Montage des Sägeprüfstandes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Ing. H.-B. Bolza-Schünemann, Senior-Vorstandsvorsitzender der Koenig&Bauer AG, Würzburg, für die großzügige Überlassung der Messinstrumente und technische Beratung.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. R. Gross, Abteilung Forschung&Entwicklung, Koenig&Bauer AG, Würzburg, der mir während der Durchführung der Versuche und deren Auswertung immer mit Rat und Tat zur Seite stand.

Herrn Metzgermeister R. Hollerbach, Rimpar, danke ich für die großzügige Überlassung des Knochenmaterials.

Meiner lieben Familie danke ich für die immerwährende moralische Unterstützung.

## **Lebenslauf**

### **Persönliche Daten**

Name Michael Handwerker  
Anschrift Brettreichstrasse 5b  
97074 Würzburg  
Geburtstag und –ort: 06.06.1974 in Würzburg

### **Schule**

1980 – 1986 Grundschule Rimpar  
1986 – 1994 Friedrich-Koenig-Gymnasium, Würzburg

### **Studium**

Studium der Humanmedizin an den Universitäten  
Budapest, Dresden, Marburg, Würzburg  
07/1996 Physikum  
04/1999 I. Staatsexamen  
04/2000 II. Staatsexamen  
05/2001 III. Staatsexamen

### **Berufstätigkeit**

seit 06/2001 Arzt im Praktikum an der Orthopädischen Klinik und  
Poliklinik der Universität Würzburg, König-Ludwig-  
Haus

*Michael Handwerker*

Würzburg, Juli 2002