

# Aufgabenstellung

**Titel der Semesterarbeit:**

***Methode zur Analyse der Oszillationsfähigkeit von Galvanometerantrieben in Laserscannern***

**Inv.- Nr.:** 2012/054-S

**Verfasser:** Devin Basbilar

**Betreuer:** Markus Schweier

**Ausgabe:** 01.04.12

**Abgabe:** 30.09.12

**Ausgangssituation:**

Die heutige Entwicklung von leistungsfähigen Strahlquellen für die Makromaterialbearbeitung führt zu hohen Bestrahlungsintensitäten bei gleichzeitig sehr guter Strahlqualität und großem Arbeitsabstand. Durch moderne Scanneroptiken zur hochdynamischen Positionierung des Brennflecks auf der Bauteiloberfläche eröffnen sich neue Möglichkeiten zur Optimierung des Schweißprozesses, wie das Schweißen mit überlagerter Strahloszillation, bei welcher der Schweißvorschub mit einer oszillatorischen Bewegungskomponente überlagert wird.

**Zielsetzung:**

Um die Möglichkeiten moderner Systemtechnik für die Lasermaterialbearbeitung in vollem Umfang nutzen zu können ist es notwendig, die Galvanometerantriebe genau zu analysieren und deren Verhalten beschreiben zu können. Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung der dynamischen Eigenschaften von Scanneroptiken und die Bildung eines Modells, um die regelungstechnisch bedingte Amplitudendämpfung zu kompensieren. Hierfür werden unterschiedliche Versuche durchgeführt, um die verschiedenen Einflussgrößen auf die Dynamik zu ermitteln und mathematisch zu beschreiben.

### Vorgehensweise:

- Einarbeitung in das Themenfeld der Oszillationsfähigkeit von Galvanometerantrieben
- Durchführen von Versuchen zur Bestimmung der Leistungslimits der Scanneroptiken bei verschiedenen Amplituden
- Planung und Auswertung der Versuche mit Methoden der statistischen Versuchsplanung
- Modellierung des dynamischen Verhaltens

### Vereinbarung:

Diese Arbeit ist Eigentum des *iwb*. Eine Veröffentlichung der Arbeit oder eine Weitergabe an Dritte bedarf der Genehmigung durch den Lehrstuhlinhaber. Der Archivierung der Arbeit in der *iwb* eigenen und nur für *iwb* Mitarbeiter zugänglichen Bibliothek als Bestand und in der digitalen Diplomarbeiten-Datenbank des *iwb* als PDF-Dokument stimme ich zu.

Garching, den 01.04.12

M.Sc. M. Schweier

cand.-Ing. D. Basbilar

Prof. Dr.-Ing. M.F. Zäh

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>9</b>
3.1	Grundlagen der Strahloszillation	9
3.2	Grundlagen der statistischen Versuchsplanung	10
3.2.1	Versuchsplanung	10
3.2.1.1	Allgemein	10
3.2.1.2	Screening Versuchspläne	11
3.2.1.3	Versuchspläne für eine detaillierte Modellbildung	12
3.2.2	Kontrollverfahren zum Vergleich von Versuchsplänen	14
3.2.3	Modellbildung und Regressionsverfahren	15
3.2.4	Varianzanalyse	16
3.2.5	Modellqualität und -validierung	19
<b>4</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>21</b>
4.1	Prozesstechnik Strahloszillation	21
4.2	Systemtechnik Strahloszillation	22
4.2.1	Allgemeines/ Scanneroptiken	22
4.2.2	Galvanometer-Scanner	23
4.2.3	Resonanzscanner für hohe Pendelfrequenzen	24
4.2.4	Minispiegel mit Galvanometerantrieb	27
4.2.5	Laserstrahl-Mikroschweißen (mit Miniscannern)	29
4.2.6	Komponenten der Fa.C.T.	32
4.3	Verwendete Scannersysteme	33
<b>5</b>	<b>Bestimmung der Oszillationsfähigkeit</b>	<b>34</b>
5.1	Definition der Oszillationsfähigkeit	34
5.2	Vorversuche	36
5.3	Screening der Grenzfrequenz	37
5.3.1	Versuchsplanung	37
5.3.2	Signifikanzprüfung	38
5.3.3	Zusammenfassen der Faktoren Länge und Vorschubgeschwindigkeit zum Faktor Schweißzeit	43

5.4	Screening der Amplitudendämpfung .....	44
5.4.1	Versuchsplanung .....	44
5.4.2	Signifikanzprüfung .....	45
5.5	Detailanalyse und Modellbildung der Dämpfung .....	51
5.6	Detailanalyse und Modellbildung der Grenzfrequenz .....	55
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>62</b>
8.1	Hinweise .....	62
8.2	Daten Experimente .....	62
8.2.1	Screening Grenzfrequenz .....	62
8.2.2	Zeit zusammenfassen .....	64
8.2.3	Screening Dämpfung .....	66
8.2.4	Detailanalyse Dämpfung Rhino-Scanner.....	68
8.2.5	Detailanalyse Dämpfung Elephant-Scanner .....	70
8.2.6	Detailanalyse Grenzfrequenz Rhino-Scanner.....	74
8.2.7	Detailanalyse Grenzfrequenz Elephat-Scanner.....	76

# 1 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungskürzel	Bezeichnung
KI	Konvidenzintervall
CCD	Central-Composite-Design
ANOVA	ANalysis Of VAriance
MEMS	Mikroelektromechanisches System

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$\rho$	°	Vorschubwinkel
$\epsilon$		Restfehler
A	mm	Amplitude
$A_{\text{Ist}}$	mm	Ist-Amplitude
$A_{\text{Soll}}$	mm	Soll-Amplitude
b	mm	Halbdurchmesser der Fokulinse
c; $c_i$		Modellkonstante; Regressionskoeffizienten
DF		Degree of Freedom, Anzahl der Freiheitsgrade
$d_f$	mm	Brennfleckdurchmesser
$d_s$	mm	Strahldurchmesser
F		Faktorvarianzen
f	Hz	Frequenz, Oszillationsfrequenz
$f_{\text{Fokus}}$	mm	Fokusabstand
$f_{\text{Grenz}}$	Hz	Grenzfrequenz
$f(x_i, \beta)$		Sollwerte der Modelle
k		Anzahl der Faktoren
l	mm	Schweißnahtlänge
MS		Mean Square, Varianz
N		Anzahl der Versuche

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$n_m$		Anzahl der Modellkonstanten
$n_r$		Anzahl der Messungen
p		Bruchteil eines vollfaktoriellen Versuchsplan
p-Wert		Irrtumswahrscheinlichkeit
$R^2$		Bestimmtheitsmaß
$R^2_{adj}$		Korrigiertes oder adjustiertes Bestimmtheitsmaß
RMSE		Root Mean Squared Error; Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung
SSB		Sum of Squares Between Groups; quadratische Abweichung der Mittelwerte vom Gesamtmittelwert der Gruppen
SSE		Sum of Squared Errors of Prediction; Summe der Fehlerquadrate
SST		Sum of Total Squares; Summe der Quadratsummen Abweichung
SSW		Sum of Squares Within Groups; Summe der Quadrate innerhalb der Gruppe
t	s	Schweißzeit
v	m/min	Vorschubgeschwindigkeit
VIF		Varianz-Inflations-Faktor
x	mm	x-Koordinate
X		Koeffizientenmatrix
$x_i, x_j$		Beschreibende Variablen des Modells
y	mm	y-Koordinate
$y_i$		Messwerte, Qualitätsmerkmal
$\bar{y}$		Durchschnitt der Messwerte

## 2 Einleitung

Laserstrahlquellen zum Schweißen von metallischen Komponenten finden heute in vielen Bereichen der Industrie Verwendung (Berend et al. 2005). Besonders im Fahrzeugbau, sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie gewinnt die Laserschweißtechnik durch ihre gute Automatisierbarkeit (Berend et al. 2005) und der möglichen Gewichtseinsparungen bei der steigenden Nachfrage nach Leichtbaukonstruktionen stark an Bedeutung. Die hohe Strahlqualität erlaubt die Bearbeitung mit sehr geringem Fokusbereich und großem Arbeitsabstand (Remote-Laserstrahlschweißen), wodurch sich die Bearbeitungsgeschwindigkeit durch schnelles Positionieren der Laserstrahlung auf der Bauteiloberfläche erhöhen lässt (Goebel et al. 2000). Durch geringe Fokusbereich und hohe Intensitäten kann sich eine Dampfkapillare ausbilden. Dadurch erhöht sich die Energieabsorption der Laserstrahlung durch Mehrfachreflektionen an der Dampfkapillarwand und ein tieferer Nahtdurchgang ist möglich (Berend et al. 2005). Trotz steigender Laserleistung kann die Schweißgeschwindigkeit nicht beliebig gesteigert werden, da bei zunehmender Schweißgeschwindigkeit Schmelzbadinstabilität, wie z.B. „Humping-Effect“, auftreten und die Schweißgeschwindigkeit begrenzen. Beim Schweißen von Aluminiumwerkstoffen kann es durch die hohe Schmelzbaddynamik zum temporären „Dampfkapillaren-Zusammenbruch“ kommen, weshalb die aufwendige Doppelfokustechnologie angewendet werden muss. (Berend et al. 2005)

Beim Elektronenstrahlschweißen wird Strahloszillation zur Reduzierung der Schmelzbaddynamik und der Verbesserung der Schweißnahteigenschaften, wie z.B. größerer Nahtbreiten höherer Güte, schon lange eingesetzt (Berend et al. 2005). Hier wird Strahloszillation durch wechselnde Magnetfelder erzeugt (Schweier et al. 2011). Durch das Reduzieren der Schmelzbaddynamik ist auch eine Steigerung der Schweißgeschwindigkeit möglich. Materialien wie Kupfer und Aluminium, die wegen ihres hohen Reflektionsgrades und ihrer hohen Wärmeleitfähigkeit bisher nur schwer schweißbar waren, können durch Strahloszillation verschweißt werden (Gedicke et al. 2007; Kraetzsche et al. 2011). Auch das Schweißen verschiedener Materialkombinationen wie Aluminium und Kupfer, nichtrostender Stahl und Kupfer sowie Aluminium und Magnesium ist mit überlagerter Strahloszillation möglich (Standfuß et al. 2010a).

In den letzten Jahren wurde verstärkt daran geforscht, die aus dem Elektronenstrahlschweißen bekannten Vorteile der Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen zu übertragen (Berend et al. 2005). Hierzu wurden

Scanneroptiken entwickelt, welche die hochdynamische Positionierung des Brennflecks auf der Bauteiloberfläche ermöglichen und mittlerweile ähnliche Schweißergebnisse erzielen wie beim Elektronenstrahlschweißen (Standfuß et al. 2010a). Die Strahlauslenkung erfolgt hier durch Reflektion an hochdynamischen Spiegeln, welche in den meisten Systemen durch Galvanometer angetrieben werden.



### 3 Grundlagen

Für das Schweißen mit Strahloszillation wird der Vorschubbewegung eine Strahloszillation überlagert. Dabei wurde beobachtet, dass die resultierende Amplitude der Strahloszillation auf der Bauteiloberfläche (im folgenden Ist-Amplitude genannt) bei zunehmender Frequenz von der eingehenden Amplitude (im folgenden Soll-Amplitude genannt) abnimmt. Auch wurde beobachtet, dass bei bestimmten Parametereinstellungen der Oszillationsprozess unterbrochen wurde, um den Scanner vor Überhitzen zu schützen. Die Bildung eines analytischen Modells war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich, da viele für die Dynamik signifikante Parameter, wie z.B. die Stromstärken in den Spulen des Galvanometers oder die maximale Stromstärke, nicht gemessen werden konnten. Um die Dynamik der Scanneroptiken mit einem Modell beschreiben zu können, wurden daher Methoden der statistischen Versuchsplanung verwendet. Die statistische Versuchsplanung als Methode zur effizienten Planung und Auswertung von Versuchsreihen wurde in den Anfangsjahren des 20. Jahrhunderts entwickelt und wird mittlerweile in allen Ingenieursdisziplinen eingesetzt. Die statistische Versuchsplanung dient dazu, die Versuchsanzahl zu minimieren, maßgeschneiderte Versuchspläne zu erstellen, die Versuchsergebnisse zu interpretieren sowie der Unterscheidung von realen und scheinbaren Effekten. Sie ermöglicht die Erstellung von einfachen mathematischen Modellen zum Beschreiben komplexer Zusammenhänge mit vielen Eingangsgrößen, welche – wie in diesem Fall – analytisch oft nicht möglich ist. Durch den Einsatz von Computern sind viele Vorgehensweisen bereits standardisiert und erleichtern die Handhabung der statistischen Versuchsplanung deutlich. Im Folgendem werden die Grundlagen der Strahloszillation und der statistischen Versuchsplanung, welche zur Bildung des Modells zum Beschreiben der Dynamik von Scanneroptiken verwendet wurden, erläutert. (Siebertz et al. 2010, S. 1-2)

#### 3.1 Grundlagen der Strahloszillation

Für das Schweißen mit Strahloszillation wird der Vorschubbewegung eine Strahloszillation überlagert. Übliche Strahloszillationsformen sind das Längspendeln, das Querspendeln, das sinusförmige, rechteckförmige, trapezförmige, kreisförmige und das parabelförmige Pendeln. Zur Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit hat sich so z.B. beim Elektronenstrahlschweißen ein Springen des Strahls im Dreieck bewährt. (DVS 2006, S.16-18; Mavany 2010, S77)

Für eine konstante Vorschubgeschwindigkeit entlang der x-Richtung und Frequenz berechnen sich die Bewegungsformen für sinusförmiges und kreisförmiges Pendeln mit Gleichung ( 1 ) und Gleichung ( 2 ), wobei A die Amplitude, v die Vorschubgeschwindigkeit, t die Zeit, f die Frequenz und  $\varphi$  der Phasenverschiebungswinkel ist. (Schweier et al. 2011; Poprawe et al. 2009; Schmitt et al. 2008)

$$\begin{bmatrix} x_{sin}(t) \\ y_{sin}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot t \\ A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_y) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} x_{Kreis}(t) \\ y_{Kreis}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cdot t + A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_x) \\ A \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Im Gegensatz zur sinusförmigen Pendelbewegung können die Schweißbahnen der kreisförmigen Pendelbewegung überlappen. Bei einer Steigerung der Vorschubgeschwindigkeit reduziert sich der Überlapp und wird – wenn kein Überlapp mehr vorhanden ist – negativ. (Poprawe et al. 2009; Schmitt et al. 2010)

## 3.2 Grundlagen der statistischen Versuchsplanung

### 3.2.1 Versuchsplanung

#### 3.2.1.1 Allgemein

Das Ergebnis eines Versuches wird durch die Ziel- oder Antwortgröße beschrieben (Scheffler 1997). Die Zielgröße kann durch die Eingangsgrößen verändert werden. Die Menge aller Eingangsgrößen bezeichnet man als Parameter. Die im Versuchsplan enthaltenen Parameter heißen Faktoren. Sie besitzen auf Basis der Systemkenntnisse einen großen Einfluss auf das System, während die im Versuchsplan nicht untersuchten Parameter nur einen geringen Einfluss auf das System besitzen und möglichst konstant gehalten werden. Die Einstellungen der Faktoren werden Stufen genannt. Jeder Faktor wird auf mindestens zwei unterschiedlichen Stufen getestet. „Die Wirkung eines Faktors auf das System wird durch den sogenannten Effekt gekennzeichnet“ (Siebertz et al. 2010, S. 12). Der Effekt hängt dabei stark vom Stufenabstand ab. Kleine Stufenabstände haben in der Regel kleine Effekte zur Folge. Für die Größe der Faktorstufen gilt deshalb die Faustregel, dass in den frühen Phasen der Untersuchung ein großer Stufenabstand zu wählen ist, während

bei guten Vorkenntnissen über den Prozess umgekehrt ein kleiner Stufenabstand zur guten Näherung im optimalen Gebiet gewählt wird. Der Effekt eines Faktors auf die Zielgröße wird als Haupteffekt bezeichnet. „Hängt der Effekt eines Faktors von der Einstellung eines weiteren Faktors ab, so nennt man dies (...) einen Wechselwirkungseffekt“ (Siebertz et al. 2010). Um die Faktorstufen zu kennzeichnen ist es sinnvoll diese zu kodieren, z.B. mit -1/+1 oder -/+. Dies erhöht die Übersichtlichkeit und erleichtert die Auswertung der Versuche, da dimensionslose Kennzahlen verwendet werden und auch Auswertprogramme diese Kodierungen zur Erstellung und Auswertung verwenden. (Siebertz et al. 2010, S. 2 – 20)

Um die Wirkung der einzelnen Faktoren getrennt untersuchen zu können muss der Versuchsplan orthogonal und ausgewogen sein. Ausgewogen ist ein Versuchsplan dann, wenn die Versuchspunkte im Raum gleichmäßig verteilt sind. Ein Versuchsplan ist orthogonal, wenn alle Faktoren voneinander unabhängig sind. Wenn in einem Versuchsplan zwischen zwei Faktoren eine lineare Abhängigkeit herrscht, sind die Faktoren voneinander abhängig und korrelieren miteinander. Für ein Modell mit 3 Faktoren ( $x_1, x_2, x_3$ ) kann ein vereinfachtes Modell mit Gleichung ( 3 ) beschrieben werden. Wenn z.B.  $x_1$  und  $x_2$  linear abhängig sind (siehe Gleichung ( 4 )) können die Regressionskoeffizienten  $c_1$  und  $c_2$  nicht eindeutig geschätzt werden (siehe Gleichung ( 5 )) und korrelieren somit. (Fahrmeir et al. 2009; Siebertz et al. 2010)

$$y = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \quad (3)$$

$$x_1 = c \cdot x_2 \quad (4)$$

$$y = c_1 \cdot x_1 + c_2 \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 = (c \cdot c_1 + c_2) \cdot x_2 + c_3 \cdot x_3 \quad (5)$$

### 3.2.1.2 Screening Versuchspläne

**Screening Versuchspläne** haben die Aufgabe, mit möglichst geringem Versuchsaufwand möglichst viele Faktoren bei minimalem Informationsverlust zu untersuchen. Oft dienen sie dazu, Faktoren die keinen oder nur einen geringen Einfluss auf das System besitzen zu ermitteln und für spätere Untersuchungen zu eliminieren. So wird die Anzahl der Faktoren zur Beschreibung des Systems reduziert und die Modellkomplexität und die Versuchsanzahl sinken. Bei einem Vollfaktorplan auf 2 Stufen wird jeder Faktor mit jedem variiert, wodurch der Versuchsaufwand exponentiell mit der Faktorzahl ansteigt. Die Anzahl der Versuche  $N$  für  $k$  Faktoren berechnet sich mit Gleichung ( 6 ). Für

eine hohe Zahl von Faktoren ist der Vollfaktorplan nicht mehr durchführbar. Teilfaktorielle Versuche verringern bei gleicher Faktorzahl die Anzahl der Versuche. Dabei werden Haupt- und Wechselwirkungen miteinander vermischt. Die Versuchsanzahl berechnet sich mit Gleichung ( 7 ), wobei  $p$  den Bruchteil eines vollfaktoriellen Versuchsplans beschreibt. Neben den klassischen Teilfaktorplänen gibt es noch weitere Versuchspläne, mit welchen eine großen Anzahl an Faktoren mit geringer Versuchsanzahl untersucht werden können, wie z.B. die Verfahren nach Plackett-Burman, Verfahren nach Taguchi oder reguläre Felder nach dem Yates-Standard. Für deren genaue Beschreibung sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. (Siebertz et al. 2010)

$$N = 2^k \quad (6)$$

$$N = 2^{k-p} \quad (7)$$

### 3.2.1.3 Versuchspläne für eine detaillierte Modellbildung

Zur genauen Untersuchung nichtlinearen Prozessverhaltens sind die faktoriellen Pläne auf nur zwei Stufen nicht mehr ausreichend, da maximal eine Beschreibung von linearen Zusammenhänge mit Wechselwirkungen möglich ist.

Zum Beschreiben von quadratischen Zusammenhängen werden häufig **zentral zusammengesetzte Versuchspläne** (CCD) verwendet, da die Zahl der benötigten Versuchsläufe nur moderat mit der Faktorzahl ansteigt. Außerdem können bereits durchgeführte Voll- und Teilfaktorpläne leicht ergänzt werden und die Eigenschaften des CCD sind insgesamt gut. Das CCD baut auf den  $2^k$  und  $2^{k-p}$  Versuchsplänen auf und ergänzt die durch die  $2^k$  bzw.  $2^{k-p}$  gebildeten „Würfel“ durch einen über den „Würfel“ hinausragenden „Stern“, sowie einen Zentrumspunkt (siehe Abbildung 1). Falls diese Einstellungen des über den Würfel hinausragenden Sterns nicht durchführbar sind, greift man auf sogenannte face centered CCD zurück, wobei hier die quadratischen Effekte korrelieren.

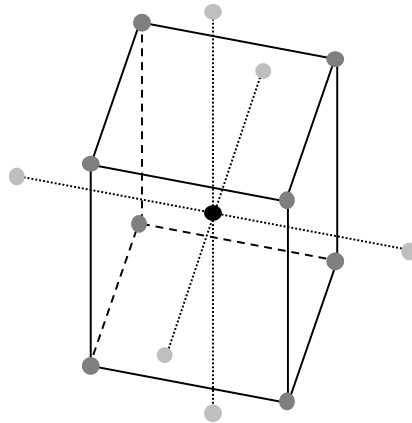


Abbildung 1: Zentral zusammengesetzter Versuchsplan nach (Siebertz et al. 2010)

Weitere Verfahren zum Beschreiben quadratischer Zusammenhänge sind das Box-Behnken-Design, welches besonders geeignet ist für den Fall, dass die Ecken des Faktorraums kritisch sind, und das Monte-Carlo-Verfahren, welches geeignet ist wenn die Anzahl der Versuche kaum eine Rolle spielt. Für die genaue Beschreibung der genannten Versuchspläne sei auf die einschlägige Literatur verwiesen. (Siebertz et al. 2010)

Häufig sind standardisierte Versuchspläne für bestimmte Problemstellungen, wie z.B. Einschränkungen des Versuchsraums oder eine Minimierung der Versuchszahl, ungeeignet. Für diese Anwendungen eignen sich **optimale Versuchspläne**, wie z.B. V-optimale, D-optimale, A-optimale und I-optimale Versuchspläne. Problematisch ist hierbei, dass der Anwender vor der Versuchsreihe sein Beschreibungsmodell festlegen muss, der Zusammenhang aber häufig erst nach den Versuchen bekannt ist. Falls das System gut bekannt ist, lassen sich dadurch im Vergleich zu konventionellen Plänen Versuche einsparen. (Siebertz et al. 2010)

Die Ergebnisse der Versuchsläufe bilden den Ergebnisvektor  $y$ . Das Beschreibungsmodell nähert den Ergebnisvektor  $y$  an und berechnet sich aus der Multiplikation der Koeffizientenmatrix  $X$  und der Modellkonstanten  $c$ , sowie einem Restfehler  $\varepsilon$  (siehe Gleichung ( 8 )). D-optimale und A-optimale Versuchspläne analysieren die Koeffizientenmatrix  $X$ . Um die Modellkonstanten  $c$  zu erhalten, muss Gleichung ( 9 ) gelöst werden. Ein D-optimaler Versuchsplan minimiert die Determinante des Terms  $(X'X)^{-1}$ . Dies entspricht einer Maximierung der Determinanten  $(X'X)$  und somit eine „Maximierung“ der Information, was auch zu einer Minimierung des Volumens des gemeinsamen Vertrauensbereichs des Vektors  $c$  führt. A-optimale Versuchspläne optimieren die mittlere Varianz der Regressionskoeffizienten durch minimieren der Summe der Hauptdiagonalelemente von  $(X'X)^{-1}$ . I-optimale und V-optimale Versuchspläne berück-

sichtigen für die Berechnung die mittlere Vorhersagegüte im Faktorraum. (Siebertz et al. 2010, S. 52-54)

$$y = Xc + \varepsilon \quad (8)$$

$$c = (X'X)^{-1}X'y \quad (9)$$

Um komplexere Zusammenhänge mit einer Funktion höherer Ordnung beschreiben zu können muss die Anzahl der Faktorstufen erhöht werden. Zur Erstellung möglichst gleichverteilter Testfelder gibt es in der Literatur verschiedene Verfahren, sogenannte „**Space Filling Desings**“, die in allen Bereichen des Faktorraums möglichst viele Informationen liefern. Die verschiedenen Algorithmen zur Erstellung von Space Filling Desings weisen den einzelnen Faktoren Primzahlen oder zufällige Zahlen zu, und berechnen auf dieser Basis die Versuchspunkte. Bekannte Space Filling Desings sind z.B. die Halton- und Hammerslye-Sequenz, die Sobol-Sequenz, Latin Hypercube Desings und Latin Hypercube Samplings sowie die quasi Monte-Carlo Testfelder. (Siebertz et al. 2010, S. 159-190)

### 3.2.2 Kontrollverfahren zum Vergleich von Versuchsplänen

Nachdem ein Versuchsplan erstellt wurde ist es sinnvoll, den Versuchsplan auf seine Effizienz und Eignung zu untersuchen und mit anderen Versuchsplänen zu vergleichen. Auch der Einfluss von Abweichungen vom geplanten Versuchsplan während der Versuchsdurchführung auf die Versuchsplaneigenschaften müssen berücksichtigt werden. Abweichungen können entstehen, wenn Versuche vergessen werden, die Faktoreinstellungen verwechselt wurden oder bestimmte Faktoreinstellungen nicht möglich waren und ein möglichst naher Versuchspunkt verwendet wurde.

Um die Korrelationen der Effekte darzustellen ist die **Korrelationsmatrix** geeignet (siehe Abbildung 2). Im Idealfall korrelieren die Effekte der Faktoren nur mit sich selbst, so dass die Hauptdiagonale den Wert 1 und alle anderen Werte den Wert 0 besitzen. Bei Teilfaktorplänen oder Versuchsplänen mit Einschränkungen korrelieren die Faktoren miteinander, so die Werte von 0 abweichen. Entscheidend ist der Betrag des Korrelationsfaktors in Verbindung mit der Effektstärke. Ein starker Haupteffekt kann einen schwachen Effekt bis zur Unkenntlichkeit überlagern, mitunter schon bei Korrelationskoeffizienten von 0,2 oder 0,3. (Siebertz et al. 2010) S. 60-61.

	MW	A	B	C	D
MW	1	0,25	0,25	0,25	0,25
A	0,25	1	0,25	0,25	0,25
B	0,25	0,25	1	0,25	0,25
C	0,25	0,25	0,25	1	0,25
D	0,25	0,25	0,25	0,25	1

Abbildung 2: Bsp. einer Korrelationsmatrix der Effekte nach (Siebertz et al. 2010)

„Bei einer großen Anzahl von Faktoren wird die Korrelationsmatrix unübersichtlich“, (Siebertz et al. 2010, S. 61). Der **Varianz-Inflations-Faktor** berechnet die Korrelationen der erklärenden Variablen untereinander mit Gleichung ( 10 ). Ein Wert von 1 entspricht dem Idealzustand, ab einem Wert von 5 ist Vorsicht geboten, da der betroffene Effekt kaum mehr auswertbar ist.  $R_j^2$  ist das Bestimmtheitsmaß (siehe Kapitel 3.2.5) einer erklärenden Variablen j in Bezug zu allen übrigen erklärenden Variablen. Für  $R_j^2 = 0$  ist die Variable j völlig unabhängig von allen anderen Variablen, für  $R_j^2 = 1$  ist der Effekt der Variablen j nicht mehr bestimmbar. (Siebertz et al. 2010, S. 61)

$$VIF = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (10)$$

### 3.2.3 Modellbildung und Regressionsverfahren

Bei der **Interpolation** wird jeder einzelne Datenpunkt mit seinem Nachbardatenpunkt linear oder quadratisch verbunden. Werte die zwischen diesen Datenpunkten Werte liegen werden interpoliert. Die Modellqualität ist theoretisch perfekt, da alle Datenpunkte durchlaufen werden. Allerdings werden somit auch alle Messfehler durchlaufen, wodurch die Modellaussagekraft deutlich sinken kann. Eine weitere Schwäche der Interpolation ist, dass die Extrapolation in den Bereich außerhalb des gemessenen Bereichs nicht möglich ist, da hier keine Messpunkte mehr vorhanden sind zwischen denen interpoliert werden kann. (MATLAB 2011)

Die **lineare Regression** ist aufgrund ihres geringen Aufwandes, ihrer großen Einsatzmöglichkeiten und oft ausreichenden Genauigkeit ein häufig verwendetes Verfahren zur Beschreibung von Zusammenhängen. Linear bedeutet, dass die Regressionskoeffizienten ( $c_i$ ) nur in ihrer ersten Potenz in das Regressionsmodell eingehen. Der einfachste Fall der linearen Regression ist die einfache lineare Regression bei der nur Haupteffekte in das Modell eingehen (siehe

Gleichung ( 11 )). Sind Wechselwirkungseffekte ebenfalls enthalten kann Gleichung ( 11 ) zu Gleichung ( 12 ) erweitert werden. Um quadratische Zusammenhänge oder Zusammenhänge höherer Ordnung zu beschreiben, wird ein polynomiales Beschreibungsmodell verwendet (siehe Gleichung ( 13 )).  $y_i$  ist dabei die zu beschreibende Variable,  $x_i$  und  $x_j$  die unabhängigen Einflussfaktoren,  $c_i$  die unbekannten Modellkonstanten und die Abweichung  $\varepsilon$ . (Scheffler 1997, S. 26-27)

$$y_i = c_0 + \sum_{i=1}^{n_f} c_i \cdot x_i \quad (11)$$

$$y_i = c_0 + \sum_{i=1}^{n_f} c_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^{n_f-1} \sum_{j=i+1}^{n_f} c_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \varepsilon \quad (12)$$

$$y = c_0 + c_1 \cdot x_{i1} + c_2 \cdot x_{i1}^2 + c_3 \cdot x_{i2} + c_4 \cdot x_{i2}^2 + c_k \cdot x_{i1} \cdot x_{i2} + \dots \quad (13)$$

Im Gegensatz zur linearen Regression beschreibt die **nichtlinearen Regression** einen nichtlinearen funktionellen Zusammenhang der Regressionsparameter. Der Zusammenhang kann z.B. quadratisch, kubisch, ein Polynom nten Grades, logarithmisch, exponentiell, sinusförmig oder eine Kombination verschiedener Funktionen sein. (Scheffler 1997)

### 3.2.4 Varianzanalyse

Die Varianzanalyse (ANalysis Of VAriance, ANOVA) nach Fisher berechnet die Wahrscheinlichkeitswerte, um wahre Effekte von scheinbaren Effekten zu unterscheiden. Außerdem liefert die Varianzanalyse zusätzliche Informationen zur Güte des Beschreibungsmodells. Im folgendem sind die einzelnen Schritte der ANOVA beschrieben:

1. Bildung der Quadratsumme der Abweichungen (Sum of Total Squares, SST) aller Messungen  $n_r$  des Gesamtmittelwertes  $\bar{y}$  von dem Qualitätsmerkmal  $y_i$ .

$$SST = \sum_{i=1}^{n_r} (y_i - \bar{y})^2 \quad (14)$$

2. Berechnen der quadratischen Abweichung der Mittelwerte vom Gesamtmittelwert der Gruppen (Sum of Squares Between Groups, SSB) mit Gleichung ( 15 ) nach (Scheffler 1997, S. 169). Diese beschreibt den durch Gruppenbeziehungsweise Faktorunterschiede (+/-) abgebildeten Anteil an der SST.



Dabei sind  $c_i$  die Anzahl der Versuche pro Stufe (z.B. für einen Faktor A der vier Mal die Einstellung -1 besitzt gleich vier),  $\bar{y}$  der Gesamtdurchschnitt,  $\bar{y}_i$  der Gruppenmittelwert und  $n$  die Anzahl der Stufen.

$$SSB = \sum_{i=1}^n c_i \cdot (\bar{y} - \bar{y}_i)^2 \quad (15)$$

SST und SSB sind über Gleichung ( 16 ) miteinander verknüpft, wobei SSW (Sum of Squares Within Groups) die Summe der quadratischen Differenz innerhalb der Gruppen ist. SSW beschreibt den Rest der Variabilität, der nicht durch Faktorunterschiede erklärt wird. SSW berechnet sich nach (Scheffler 1997, S. 169) mit Gleichung ( 17 ) aus der quadratischen Summe der Differenz der Gruppenmittelwerte  $\bar{y}_i$  und Zielgrößen der jeweiligen Gruppe  $y_{ij}$ . Dabei ist  $n$  die Anzahl der Gruppen.

$$SST = SSB + SSW \quad (16)$$

$$SSW = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^c (y_{ij} - \bar{y}_i)^2 \quad (17)$$

3. Abschätzen der Varianzen (Mean Square, MS) der einzelnen Faktoren als Quotient aus der quadrierten Abweichung und dem Freiheitsgrad (Degree of Freedom, DF), wobei der Freiheitsgrad mit Stufenanzahl minus eins berechnet wird. Für einen Versuchsplan mit nur zwei Einstellungen (+/-) beträgt der Freiheitsgrad somit eins.

$$MS = \frac{SSB}{DF} \quad (18)$$

4. Eliminieren der Faktoren mit dem geringsten MS und Bestimmen der Fehlervarianz  $MS_{Fehler}$ . Dabei ist  $SSB_{Fehler}$  die Summe der SSB welche eliminiert wurden und DF die Summe der abgezogenen Faktoren.

$$MS_{Fehler} = \frac{SSB_{Fehler}}{DF_{Fehler}} \quad (19)$$

5. Berechnen der Verhältnisse von Faktorvarianzen (F-Wert) und Fehlervarianz.

$$F = \frac{MS_{Faktor}}{MS_{Fehler}} \quad (20)$$

6. Die Punkte vier (4.) und fünf (5.) werden so oft wiederholt, bis ein vorher festgelegter kritischer F-Wert unterschritten wird. Bei kleinen Feldern gilt als

Signifikanzgrenze ein F-Wert von eins, für große Felder ein F-Wert von vier (Siebertz et al. 2010, S. 71)

Aus dem F-Wert kann die Irrtumswahrscheinlichkeit, der sogenannte p-Wert, berechnet werden. Die Berechnung des p-Wertes ist kompliziert und für das Verständnis der Varianzanalyse nicht relevant, weshalb hier nicht weiter auf die Berechnung eingegangen wird. Die Berechnung des p-Wertes ist nur gültig, wenn folgende Annahmen gelten: Die Faktoreinstellungen der Gruppen sind unabhängig voneinander, normalverteilt und jede Gruppe besitzt eine identische Varianz  $\sigma^2$ . Sind diese Bedingungen erfüllt, so unterstellt man dem Faktor, dass er keinen Effekt hat, was der Nullhypothese entspricht. Falls die Nullhypothese gilt, so folgt aus den genannten Annahmen, dass der Faktor einer sogenannten F-Verteilung folgt, mit dem sich der sogenannte p-Wert berechnen lässt. Die F-Verteilung ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung und kann z.B. in (Papula 2008) nachgeschlagen werden. Ist die Wahrscheinlichkeit klein, so verwirft man die Nullhypothese und geht von einem signifikanten Effekt des Faktors aus. Ist die Wahrscheinlichkeit groß, so geht man davon aus, dass die Nullhypothese wahr ist und entfernt den Faktor, da er mit hoher Wahrscheinlichkeit keinen Effekt hat. In der Praxis hat sich bewährt, p-Werte unter 0.05 als signifikant einzustufen (anwendungsabhängig teilweise auch 0.1 oder 0.01). Der p-Wert beschreibt somit das Risiko, einen nicht signifikanten Effekt fälschlicherweise als signifikant einzustufen (sogenanntes  $\alpha$ -Risiko). Unklar bleibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein wahrer Effekt irrtümlich als scheinbarer Effekt eingestuft wird und somit im Beschreibungsmodell verloren geht (sogenanntes  $\beta$ -Risiko). Zum eliminieren nicht relevanter Faktoren hat sich bewährt, Wechselwirkungen hoher Ordnung zuerst zu entfernen, danach Wechselwirkungen niedriger Ordnung und zum Schluss nichtsignifikante Haupteffekte. Dabei ist zu beachten, dass nicht signifikante Faktoren auch erhalten bleiben müssen, wenn sie in Wechselwirkungen höherer Stufe auftauchen. Für die meisten Versuche streuen die Messwerte in Form einer Normalverteilung. Somit kann der wahre Wert eines Effektes nicht genau angegeben werden, sondern nur, mit welcher Wahrscheinlichkeit er sich in einem bestimmten Bereich befindet. Das sogenannte Konfidenzintervall ist der Bereich, in dem sich der wahre Wert des Effektes mit der Wahrscheinlichkeit eins minus p-Wert befindet. Die genaue Berechnung des Konfidenzintervalls kann z.B. in (Fahrmeir et al. 2009) nachgeschlagen werden. (Siebertz et al. 2010, S. 94-130; Scheffler 1997)

### 3.2.5 Modellqualität und -validierung

Um verschiedenen Modelle bezüglich ihrer Aussagekraft miteinander vergleichen zu können werden Modellqualitätskennzahlen benötigt.

Eine Qualitätskennzahl ist die **Summe der Fehlerquadrate (SSE)**. Die Summe der Fehlerquadrate wird mit Gleichung ( 21 ) berechnet, wobei  $y_i$  die einzelnen Messwerte und  $f(x_i, \beta)$  den Modellwerten entspricht. Je kleiner die SSE, desto besser nähert das Modell die Messwerte an. Im optimalen Fall gibt es keine Abweichung zwischen Modell und Messwerten, womit die SSE null beträgt. Durch das Quadrieren werden große Abweichungen stärker berücksichtigt als kleine. (MATLAB 2011)

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \beta))^2 \quad (21)$$

Die **Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung** (Root Mean Squared Error, kurz **RMSE**) ist eine Kennzahl die angibt, wie groß die Differenz zwischen den von dem Modell vorherbestimmten Werten und den tatsächlich gemessenen Werten beträgt. Die RMSE berechnet sich mit Gleichung ( 22 ), wobei SSE die Summe der kleinsten Fehlerquadrate aus Gleichung ( 21 ) und n die Anzahl der Messungen ist. Je geringer die RMSE, desto genauer werden die Messwerte von dem Modell angenähert. (MATLAB 2011)

$$RMSE = \sqrt{\frac{SSE}{n}} \quad (22)$$

Eine weitere Qualitätskennzahl ist das **Bestimmtheitsmaß  $R^2$** . Es setzt sich aus dem Quotienten von SSB und TSS zusammen und bezeichnet den Anteil der Gesamtvariabilität der Daten, den ein Regressionsmodell erklärt. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  nimmt Werte zwischen null (kein linearer Zusammenhang) und eins (perfekter linearer Zusammenhang) an. Dabei ist zu beachten, dass sich mit zunehmender Anzahl der unabhängigen Variablen das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  dem Wert eins annähert, was zu der Fehlinterpretation führen kann, durch ein Modell mit einer größeren Anzahl an Variablen die Messwerte genauer zu beschreiben. (Siebertz et al. 2010, S. 117-118)

$$R^2 = \frac{SSB}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (23)$$

Je mehr unabhängige Parameter in dem Modell enthalten sind, desto stärker nähert sich  $R^2$  der eins. Um die Verfälschung durch Verwendung eines Mo-

dells mit zu vielen unabhängigen Variablen zu berücksichtigen wird das **korrigierte oder adjustierte Bestimmtheitsmaß**  $R^2_{adj}$  verwendet. Es berechnet sich nach Gleichung ( 24 ), wobei  $n_r$  die Anzahl der Messwerte und  $n_m$  die Anzahl der Modellkonstanten beschreibt. Genau wie das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  variiert das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{adj}$  zwischen null und eins, wobei es sich bei zunehmender Genauigkeit dem Wert eins nähert. (Siebertz et al. 2010, S. 118)

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\frac{SSW}{n_r - n_m}}{\frac{SST}{n_r - 1}} = 1 - \frac{n_r - 1}{n_r - n_m} \cdot (1 - R^2) \quad ( 24 )$$

## 4 Stand der Technik

### 4.1 Prozesstechnik Strahloszillation

Im Elektronenstrahlschweißen wird Strahloszillation schon seit den sechziger Jahren angewendet. Die Strahloszillation wird hier durch wechselnde Magnetfelder erzeugt. Die Vorteile der Strahloszillation sind:

- Reduzieren der Schmelzbaddynamik und damit Verbesserung der Nahtqualität bezüglich Porenbildung
- Steigerung der Schweißgeschwindigkeit durch das Reduzieren der Schmelzbaddynamik
- Schweißen von Materialien mit hohem Reflektionsgrad wie Kupfer und Aluminium
- Schweißen von Materialkombinationen wie Kupfer und Aluminium, nicht-rostender Stahl und Kupfer sowie Aluminium und Magnesium ist möglich
- Geringe Energieeinbringung in das Material

In den letzten Jahren wurde verstärkt daran geforscht, die Vorteile der Strahloszillation auf Laserstrahlquellen zu übertragen. Die Positionierung des Brennflecks auf der Bauteiloberfläche erfolgt hier durch Scanneroptiken, in denen die Strahlauslenkung durch Reflektion an hochdynamischen Spiegeln erfolgt. Ein Vorteil der Strahloszillation mit Scanneroptiken im Vergleich zum Elektronenstrahlschweißen sind niedrigere Gerätekosten. Außerdem wird kein Vakuum benötigt. Mit modernen Laserstrahlquellen kann eine sehr hohe Strahlqualität, mit niedrigem Strahldurchmesser von 0,015 – 0,05 mm bei weniger Energieeintrag erreicht werden. Durch die brillianten Laserstrahlquellen und die modernen Scanneroptiken können Strahloszillationen ähnlich dem Elektronenstrahlschweißen erreicht werden. (DVS 2006; Mavany 2010; Gedicke et al. 2007; Kraetzsch et al. 2011; Standfuß et al. 2010b)

## 4.2 Systemtechnik Strahloszillation

### 4.2.1 Allgemeines/ Scanneroptiken

Zur Realisierung der für die Strahloszillation nötigen Frequenzen werden moderne Scanneroptiken verwendet, welche eine hochdynamische Positionierung des Brennflecks auf der Bauteiloberfläche ermöglichen. Scanneroptiken bestehen aus einer strahlführenden Einheit welche den Brennfleck im Scannerfeld positioniert, und einer strahlformenden Einheit, welche den Laserstrahl fokussiert. Die Strahlführung erfolgt durch Reflektion der Laserstrahlung an Spiegeln innerhalb der Optik. Um eine hohe Dynamik zu ermöglichen, sind die Spiegel möglichst leicht, um so wenig Masse wie möglich bewegen zu müssen. Bei der Bearbeitung wird der kleinere Spiegel vom Laserstrahl zuerst getroffen und reflektiert die Strahlung auf den größeren Spiegel. Der Fokus der Scanneroptik liegt im nicht ausgelenkten Zustand genau im Zentrum des Scannerfeldes. Durch das Auslenken des Laserstrahls aus dem Zentrum des Scannerfeldes muss die Laserstrahlung eine längere Strecke von der Optik zur Bauteiloberfläche zurücklegen, wodurch der Fokus von der Bauteiloberfläche abhebt. Um die Verlängerung der Strecke auszugleichen muss der Fokuspunkt verschoben werden. Dies kann nach der Strahlführung („pre-objective scan system“) oder vor der Strahlführung („post-objective scan system“) geschehen, siehe Abbildung 3. Beim „pre-objective scan system“ wird die Fokussierung durch Brechung an einer speziell geformten Linse, der sogenannten F-Theta Linse, unabhängig von der Strahlauslenkung durchgeführt. Die F-Theta Linse ist gewöhnlich komplexer und größer als die Linse beim „post-objective scanning“, erlaubt aber eine bessere Korrektur der Feldkrümmung (Schmitt et al. 2008). Beim „post-objective scan system“ geschieht die Fokussierung durch eine bewegte Fokuslinse vor der Strahlauslenkung. Der Vorteil des „post-objective scanning“ ist eine kompakte Fokuslinse die chromatische Korrekturen ermöglicht, allerdings ist das System anfälliger für Staub- und Partikelverschmutzung (Schmitt et al. 2008). Durch das Anpassen der Bewegung der Fokuslinse kann das „post-objective scan system“ auch für 3D-Anwendungen entsprechend fokussieren. (Zaeh et al. 2010)

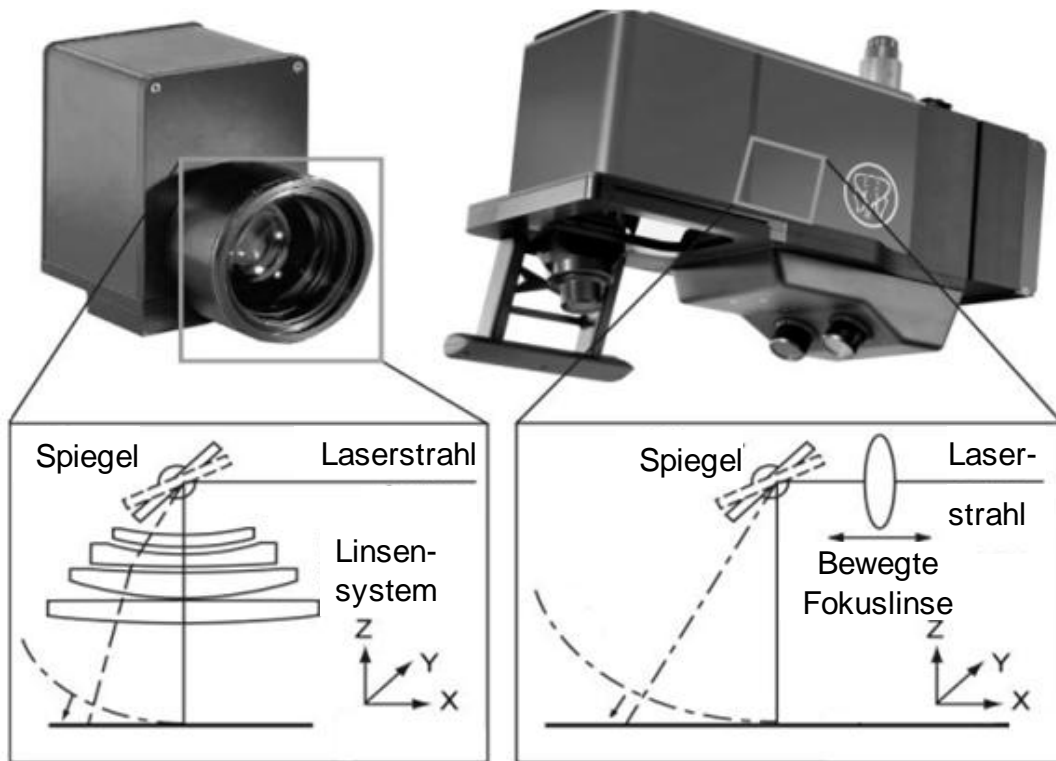


Abbildung 3: Pre-objective scan system (links) und post-objective scan system (rechts) (Zaeh et al. 2010)

#### 4.2.2 Galvanometer-Scanner

Um die aus dem Elektronenstrahlschweißen bekannten Vorteile der Strahloszillation auf Faserlaser zu übertragen wurde ein Galvanometerscanner entwickelt, welcher Frequenzen bis zu 1500 Hz erreicht (DVS 2006; Berend et al. 2005). Der Galvanometerantrieb wurde vom Hersteller so optimiert, dass bei kleinen Sprungantwortzeiten bei kleinen Amplituden hohe Frequenzen erzielt werden können. Das Substrat für den Spiegel wurde im Laser Zentrum Hannover speziell beschichtet, um für verschiedene Laserstrahlquellen für die Wellenlänge  $\lambda=1030\text{nm}$  und für  $\lambda=1064\text{nm}$  mit Transmissionsverlusten unter 0,3 % arbeiten zu können. Zur besseren Kühlung des Spiegels wurde eine Gasstromspülung über die Scannerachse integriert. In Abbildung 4 ist der Galvanometerscanner schematisch dargestellt.

Die tatsächliche Amplitude des Brennflecks wurde mit Hilfe des Positionierungslasers auf einer weißen Kunststoffoberfläche, auf der ein 0,1 mm Raster beschriftet war, vermessen. Eine weitere verwendete Methode zur Bestimmung der tatsächlichen Ist-Amplitude in Abhängigkeit der Frequenz (bei verschiedenen Soll-Amplituden bei verschiedenen Frequenzen) ist das Einbrennen auf einer oxidierten Aluminiumfläche und anschließendem Vermessen mit

einem Mikroskop. Die Höhe des Pendelhubes hängt von der Amplitude des Galvanometerverstärkers ab, siehe Abbildung 5. Werte zwischen den gemessenen Ist-Amplituden wurden linear interpoliert. (DVS 2006; Berend et al. 2005). Ab Frequenzen von über 1500 Herz war keine messbare Amplitude mehr zu realisieren. Um verschiedene Brennfleckdurchmesser zu ermöglichen wurde ein Abbildungsverhältnis von 1:2 (Brennfleckdurchmesser von  $d_f=0,3$  mm, Fokusabstand  $f=200$ mm) und 1:4 (Brennfleckdurchmesser von  $d_f=0,6$  mm, Fokusabstand  $f=400$ mm) gewählt. (DVS 2006; Berend et al. 2005)

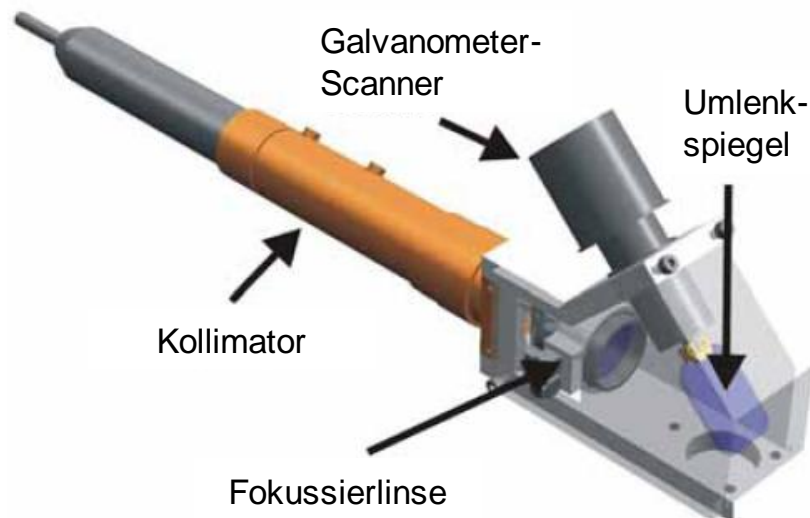


Abbildung 4: Einzelne Komponenten des Galvanometer-Scanners nach (Berend et al. 2005; DVS 2006)

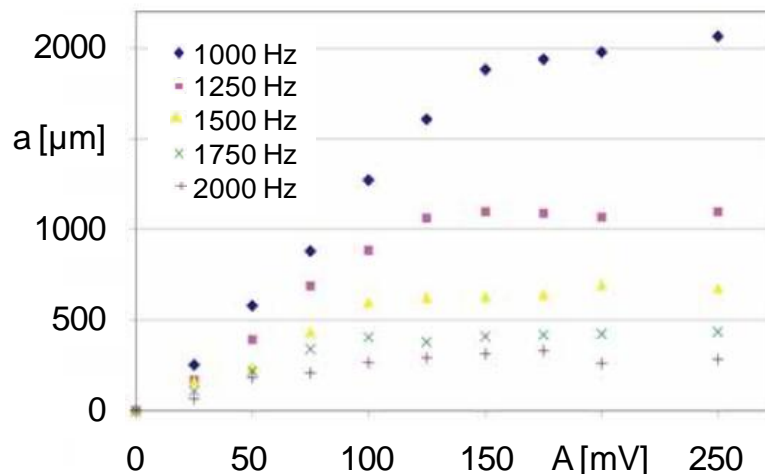


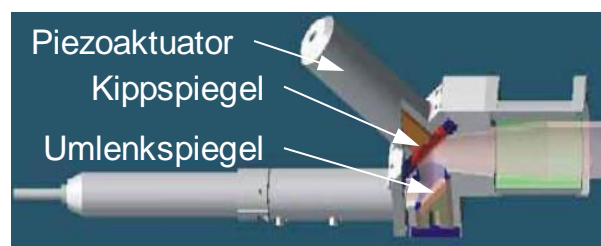
Abbildung 5: Pendelhub  $a$  bei Amplitude  $A$  des Galvanometerverstärkers bei Fokusbrennweite  $f=400$  mm (DVS 2006)

#### 4.2.3 Resonanzscanner für hohe Pendelfrequenzen

Da beim Galvanometer-Scanner erst ab 1500 Hz Verbesserungen der Nahtigenschaften beobachtet werden konnten, wurde ein Resonanzscanner zum



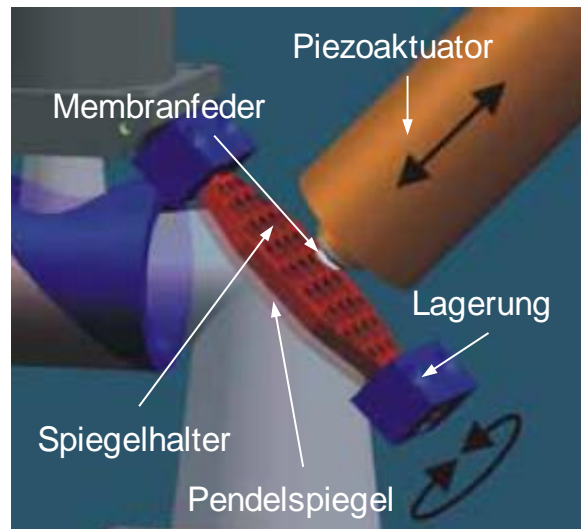
Erreichen von Frequenzen höher als 5 kHz konstruiert. Dabei wurde eine kompaktere Bauweise mit einer verbesserten Anordnung der Spiegel gewählt, wodurch die Störkontur des Bearbeitungskopfes verkleinert und das Verhältnis von Pendelhub zu Spiegelkippwinkel erhöht werden konnte. Da geringe Kippwinkel kleinere Aberrationsfehler hervorrufen, wurde der Kippspiegel im Strahlengang nach dem Umlenkspiegel positioniert. Das machte einen größeren und schwereren Kippspiegel erforderlich, der allerdings für das Resonanzverhalten des Kippspiegels vorteilhaft ist. Die hohen mechanischen Belastungen durch die Resonanzanregung und die thermisch induzierten Scherbelastungen belasten die Spiegelbeschichtung stark. Die thermisch induzierten Scherbelastungen nehmen mit kleinerem Spiegeldurchmesser quadratisch zu. Daher wurde der kleinere Umlenkspiegel an der Rückseite mit einem Kühlkörper versehen. Beim Kippspiegel ist eine solche Wärmeabfuhr nicht möglich ohne das Resonanzsystem negativ zu beeinflussen. Der Strahlengang durch den Resonanzscanner ist in Abbildung 6 und dargestellt. (DVS 2006)



*Abbildung 6: Strahlengang durch den Resonanzscanner (DVS 2006)*

Zur Schwingungserzeugung des Kippspiegels wird ein Piezoaktor verwendet, siehe Abbildung 7. Dieser wirkt über eine auf die Resonanzfrequenz abgestimmte Membranfeder direkt auf den Pendelspiegel. Der Pendelspiegel wird in einer Lagerung mit hoher Steifigkeit und eliminiertem Betriebsspiel geführt. Die Spiegelhalterung, in der das dielektrisch beschichtete Quarzsubstrat enthalten ist, ist zur Erhöhung der Steifigkeit bei minimaler Masse und Massenträgheitsmoment in einer wabenförmigen Struktur aus der Magnesiumlegierung AZ91 ausgeführt. Durch die hohen Frequenzen erwärmt sich der Piezokristall und kann dadurch deutlich an Nutzhub verlieren, weshalb ein temperaturstabiler Kristall gewählt wurde. Je höher die Frequenzen und Spannungshübe werden, desto höher steigt der Leistungsbedarf des Piezoantriebs. Daher wurde ein Piezoantrieb mit interner Energierückgewinnung gewählt. Weitere Anforderungen an den Piezoantrieb waren hohe Steifigkeit und niedriger Verlust durch Reibung, besonders bei hohen Frequenzen. Außerdem muss die Eigenfrequenz des Piezoelements deutlich über der zu erzielenden Hubfrequenz liegen. Obwohl der Kippspiegel möglichst steif ausgelegt wurde, entstehen durch die starken Beschleunigungen Verformungen des Spiegelhal-

ters, was zu einer Verschlechterung der Strahlqualität führt. Bei hohen Frequenzen ist so optisch kein Nutzpendelhub mehr feststellbar. Auch durch Verstärkungsmaßnahmen des Spiegels konnte keine signifikante Verbesserung des Nutzpendelbuges erreicht werden. Durch eine genaue Untersuchung der Verformung mit einem Triangulationssensor wurde festgestellt, dass trotz Spiegelverstärkung die Verformung so stark ist, dass die Wirkung im Brennfleck auf die Verformung und nicht auf die Hubfrequenz zurückzuführen ist. (DVS 2006)



*Abbildung 7: Aufbau des Kippspiegels mit Piezoaktuator (DVS 2006)*

Da durch die Spiegelverformung nur geringe Pendelbewegungen möglich waren, wurde ein neuer Kippspiegel mit indirekter Anregung, welche keine Zwangskräfte überträgt, entwickelt (siehe Abbildung 8). Der Kippspiegel wurde aus einem Stück gefertigt und die dielektrische Beschichtung direkt auf den Spiegelhalter aufgebracht. Hierdurch konnte die Masse des Spiegels und die notwendigen Antriebskräfte reduziert werden. Durch die kleineren Antriebskräfte wird die Gefahr der Spiegelverformung weiter reduziert. Der Piezoantrieb wirkt nun auf ein Koppellement, das über ein Festkörpergelenk mit dem Hebel verbunden ist, der auf die Achse des Spiegels wirkt. Wird die Spiegelachse durch den Piezohub gedreht, neigt sich auch die Spiegelfläche. Um die Steifigkeit zu erhöhen wurde die Spiegelrückseite mit Rippen versehen. Mit einer speziellen Beschichtung konnte ein Reflexionsgrad von über 99,8% für Wellenlängen von  $\lambda=1030\text{nm}$  und  $\lambda=1064\text{nm}$  erreicht werden.

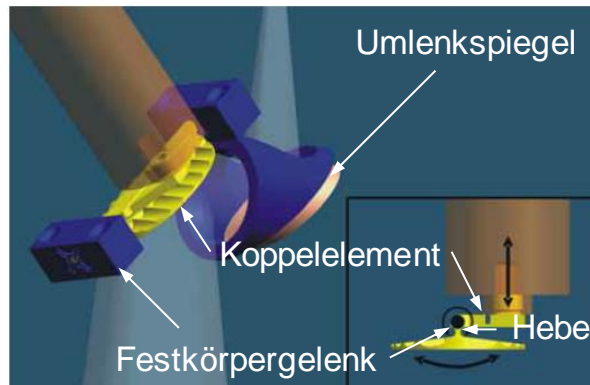


Abbildung 8: Funktionsweise des Kippspiegels mit indirekter Anregung (DVS 2006)

Bei größerer Fokusbrennweite erhöht sich auch der maximal mögliche Pendelhub. Dabei nimmt die erreichbare Amplitude mit zunehmender Frequenz ab. Bei der Frequenz von 3,71 kHz konnte der größte Pendelhub gemessen werden. Bei einer Fokusbrennweite von  $f_{\text{Fokus}}=150$  mm konnte so eine maximale Pendelamplitude  $a = 1,1$  mm realisiert werden. Bei höherer Fokusbrennweite konnte sogar eine Pendelamplitude von bis über 2 mm realisiert werden. Der Scanner wurde für Laserleistungen von bis zu 4 kW ausgelegt. (DVS 2006)

#### 4.2.4 Minispiegel mit Galvanometerantrieb

Das Ziel war die Entwicklung einer Scanneroptik mit hoher Strahlpositionierungsgenauigkeit für das 2D Oszillationsschweißen. Hierzu wurde in einem ersten Schritt ein Prototyp mit dem Namen „Lasertronic®SAO-fast 1.0x (1D)“ mit einer entsprechenden Software zur Scannersteuerung entwickelt (siehe Abbildung 9 a). Die speziell entwickelte Software erlaubt eine Leistungssteuerung bei bis zu 2,5 kHz. Ohne Leistungssteuerung sind Frequenzen von bis zu 5 kHz möglich. Durch die Leistungssteuerung ist eine gleichmäßigere Verteilung der Energie auf dem Bauteil möglich (siehe Abbildung 9 b-e), da in den Wendepunkten, wo die Laserstrahlung länger verweilt, die Laserleistung herabgesetzt wird. Für die hohe Dynamik von bis zu 5 kHz müssen die Spiegel klein und leicht gefertigt werden (Standfuß et al. 2010b). Um die hohen Strahloszillationen zu erreichen wurde ein Galvanometerantrieb zum Auslenken der Spiegel verwendet. Durch die Kühlung der integrierten Spiegel kann der Scanner bei Laserleistungen von bis zu 5 kW operieren. (Kraetzsch et al. 2011)

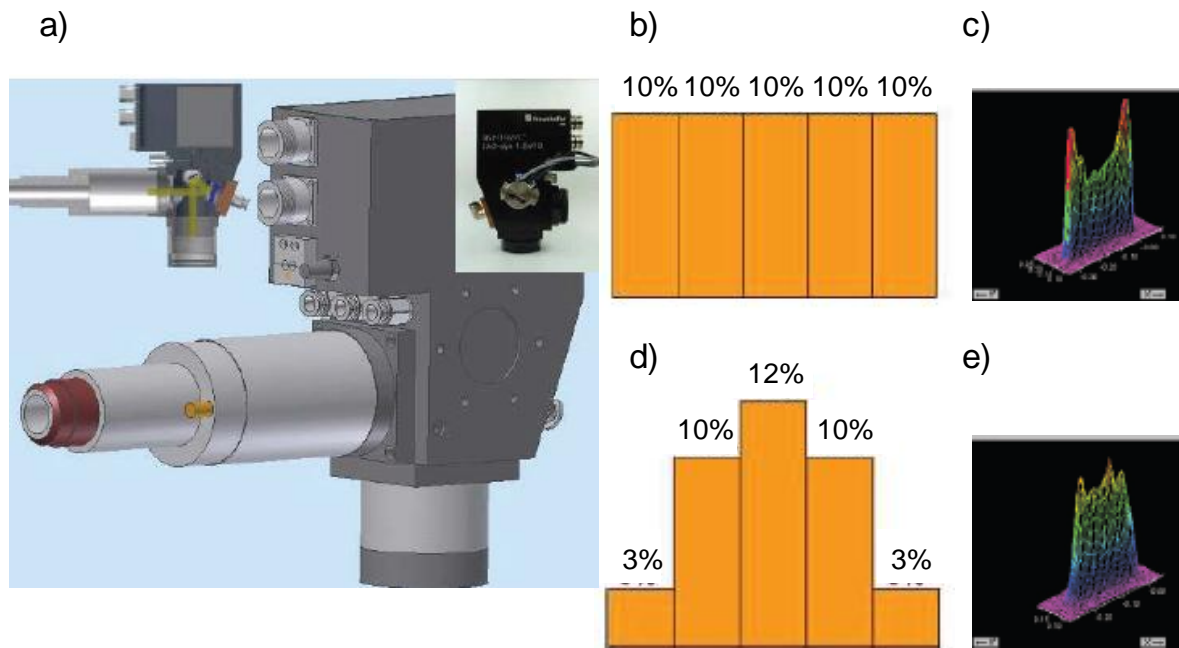


Abbildung 9: a) Prototypensystem für hochfrequente Strahloszillation „Lasertronic®SAO-fast 1.0x (1D)“. b-e) Einfluss des Oszillationsschweißens mit Leistungssteuerung (d, e) und ohne Leistungsregulierung (b, c) auf das Intensitätsprofil bei einer Frequenz von 1500 Hz und einer Amplitude von 0,5 mm (Kraetzsch et al. 2011)

In einem zweiten Schritt wurde der „Lasertronic®SAO-fast 1.0x (1D)“ zu einem 2D-Scanner „SCANLAB intelliSCAN® 20 FC“ weiterentwickelt (siehe Abbildung 10). Hierbei wurde auf eine genauere Laserstrahlpositionierung und höhere Reproduzierbarkeit der Prozesse geachtet. Der „SCANLAB intelliSCAN® 20 FC“ erlaubt Oszillationsfrequenzen von über 2 kHz in einem Scannerfeld von 10 x 10 mm<sup>2</sup>. Allerdings beträgt das Feld, in dem hohe Oszillationen möglich sind, nur 1,5 x 1,5 mm<sup>2</sup>. Die maximal möglichen Leistungen betragen 4 kW (single mode) im Wellenlängenbereich von  $\lambda = 1030\text{nm} - 1090\text{ nm}$ . Der Fokusabstand  $f$  beträgt 245 mm, der Fokusbereich 36  $\mu\text{m}$ . (Kraetzsch et al. 2011; Standfuß et al. 2010b)

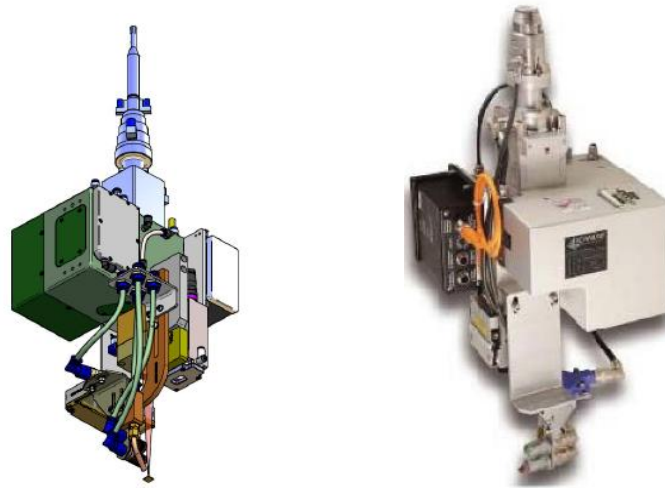


Abbildung 10: SCANLAB intelliSCAN® 20 FC“ (2D) (Kraetzsch et al. 2011)

#### 4.2.5 Laserstrahl-Mikroschweißen (mit Miniscannern)

Für das Laserstrahl-Mikroschweißen dünner Metallfolien werden Amplituden zwischen 0,05 – 0,1 mm bei Vorschubgeschwindigkeiten größer 150 mm/s benötigt, welche bei Laserleistungen bis 100 W (cw) arbeiten. Der Fokusbereich soll dabei weniger als 20 µm betragen. Um einen Überlappungsgrad größer 80 % zu erzielen, werden hierfür Oszillationsfrequenzen größer 20 kHz benötigt. Der Scanner soll die Laserstrahlung in verschiedenen Geometrien flexibel vorwärtsbewegen können. (Schmitt et al. 2010)

Um dies zu ermöglichen muss die **Fokuslinse** im gesamten Scannerfeld den Fokusbrennpunkt auf die Bauteiloberfläche auf einer Feldgröße von 30 x 30 mm<sup>2</sup> fokussieren. Der Fokusbereich soll dabei maximal 20 µm betragen. Die F-Theta Linse erlaubt eine bessere Korrektur der Feldkrümmung und wurde deshalb trotz komplexeren Aufbaus gewählt. (Schmitt et al. 2008)

Da für das Realisieren der geforderten Frequenzen kein geeignetes System existierte, wurden in einer Machbarkeitsanalyse mechanische Scanner, Galvanometerscanner, piezogetriebene Kippspiegel, mikroelektromechanische Scanner (MEMS) und akustooptische Deflektoren auf ihre Eignung hin analysiert. Elektrooptische Systeme, Polygonscanner und die Auslenkung mittels Ultraschallanregung schieden aus verschiedenen Gründen aus. (Schmitt et al. 2008; Poprawe et al. 2009; Schmitt et al. 2010)

Zur Untersuchung der Eignung von **Galvanometerscanner** zum Erreichen hoher Frequenzen wurden die Galvanometerscanner „SK 1020®“ und „Scancube 7®“ auf ihre dynamischen Eigenschaften untersucht. Abbildung 11 zeigt die Abweichung der eingestellten Amplitude von einem Millimeter zur

gemessenen Amplitude in Abhängigkeit zur Vorschubgeschwindigkeit und der Oszillationsfrequenz. Dabei ist die höhere Dynamik des „Scancube 7®“ auch auf die kleineren Spiegeldurchmesser zurückzuführen. Bei einer Oszillationsfrequenz von 5 kHz wird die Amplitude um 50 % zur eingestellten Amplitude reduziert, beim „SK 1020®“ wird die Amplitude bereits bei einer Oszillationsfrequenz von 1000 Hz um 40% reduziert, bei 1500 Hz um 55 %. Galvanometerscanner weisen aufgrund ihrer Geometrieflexibilität und durch die Möglichkeit, Vorschubbewegung und Oszillationsbewegung kombiniert zu realisieren ein hohes Potential für das Laserstrahl-Mikroschweißen auf. Allerdings sind Galvanometerscanner in ihrer Dynamik eingeschränkt. (Poprawe et al. 2009)

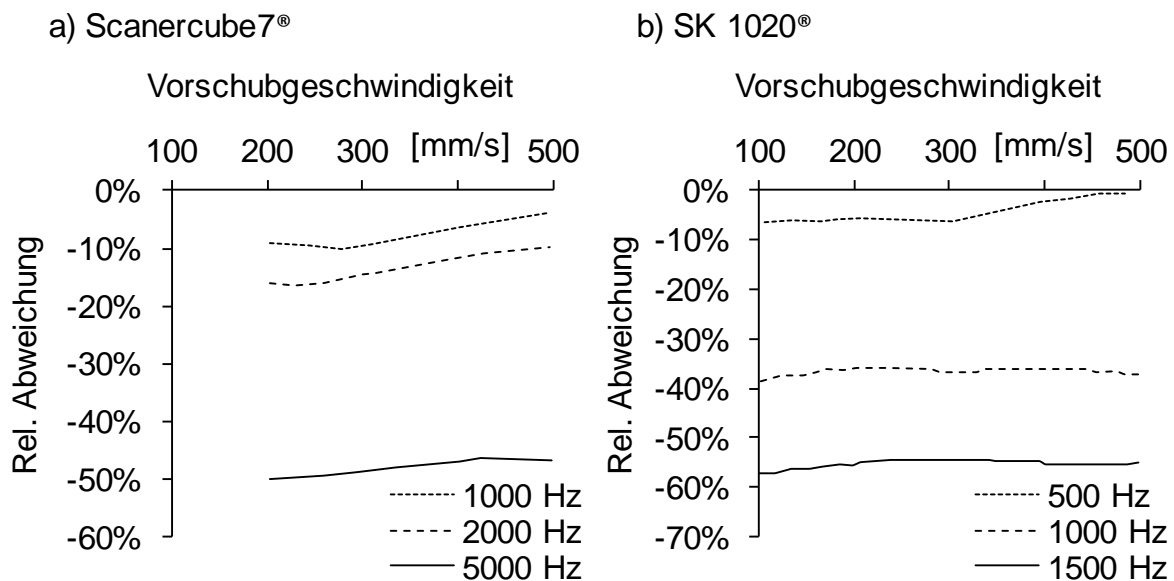


Abbildung 11: Abweichung der eingestellten Amplitude (0,1 mm) zur gemessenen Amplitude in Abhängigkeit zur Vorschubgeschwindigkeit und Oszillationsfrequenz (a): Scancube 7®, b): SK 1020®) (Poprawe et al. 2009)

Unter **mechanischen Scannern** werden reflektive Rotationssysteme verstanden, bei denen an eine Hochgeschwindigkeitsspindel eine spiegelnde Keilplatte montiert ist. Hierbei können Oszillationsfrequenzen von bis zu 16 kHz erzielt werden. Jedoch sind diese Systeme sehr anfällig gegen Unwuchtungen, welche sich aufgrund der Spiegelform zwingend ergeben. Auch die Geometrieflexibilität dieser Systeme ist aufgrund der Rotation des Elements ausschließlich auf kreis- und ellipsenförmige Geometrien beschränkt. (Poprawe et al. 2009).

Bei **piezoangetriebenen Kippspiegeln** werden die Spiegelflächen mittels zwei oder mehr Stapelaktoren gekippt. Ohne Spiegelmasse erreichen kommerzielle Systeme Resonanzfrequenzen von bis zu 9 kHz bei einachsiger Strahlableitung (1D). Für Anwendungen mit Spiegel sind diese Systeme nur bei maximal 80 % der Resonanzfrequenz nutzbar, so das einachsige Oszillati-

onsfrequenzen maximal 6 kHz erreichen. 2D-Kippsysteme erreichen nur Resonanzfrequenzen im Bereich von 1 kHz. Die Lebensdauer der piezotriebenen Kippspiegel ist auf  $10^{10}$  Zyklen beschränkt, was bei einer Oszillationsfrequenz von 5 kHz einer maximalen Betriebsdauer von 555 Stunden entspricht. Außerdem treten bei zunehmender Betriebsdauer Ermüdungserscheinungen wie Mikrorisse im Piezokristall auf, wodurch sich dessen Eigenschaften verschlechtern. (Poprawe et al. 2009).

**Akustooptische Deflektoren** erzeugen ein Gitter mittels Ultraschall-Transducer-Schallwellen, die in einen Kristall eingekoppelt werden. Die Zeit zum ändern des Winkels hängt von der Schallgeschwindigkeit im Medium und dem Laserstrahldurchmesser ab, so dass Winkeländerungen im Megahertz-Bereich erfolgen können. Leider ist die Beugungseffizienz der AODs mit 50 % - 70 % sehr schlecht, was bei zwei in Reihe geschalteten AODs eine maximale Effizienz von 49% ermöglicht. Die Beugungseffizienz variiert auch über den Ablenkwinkel. Dadurch verändert sich die Intensität des Laserstrahls, was z.B. durch Leistungsmodulation angepasst werden müsste. (Poprawe et al. 2009).

**Mikroelektromechanische Scanner** (MEMS) weisen eine geringe Masse und ein hohes Potential für große Resonanzfrequenzen größer 20 kHz auf. Die Herstellung ist kostengünstig und es können sehr feine und dünne Strukturen erzeugt werden. Die Abmessungen der Spiegelflächen können zwischen einigen 100  $\mu\text{m}$  und mehreren Millimetern variieren, bei einer Spiegeldicke im Bereich von 100  $\mu\text{m}$ . Durch die Aufhängung über dünne Federstrukturen ( $<30 \mu\text{m}$ ) kann mit einem einzigen optischen Element eine zweidimensionale Ablenkung realisiert werden. Die Auslenkung wird gewöhnlich durch elektromagnetische oder elektrostatische Kräfte erzeugt. Die Resonanzfrequenzen und der Winkelbereich hängen stark von der Steifigkeit des Systems und der Masse des Spiegels ab. Da MEM-Scanner für den Einsatz in Projektoren entwickelt wurden, gibt es kaum Erfahrung mit Laserleistungen im Bereich von 100 W. Ein derartiger MEMS-Scanner wurde am Zentrum für Mikrotechnologien der TU Chemnitz hergestellt und ist in Abbildung 12 dargestellt. Das System besteht unter anderem aus einer Strahleinkopplung für die Faserlaserstrahlung, einer Halterung für den MEMS-Spiegel und einem telezentrisch korrigierten Objektiv mit einem Arbeitsfeld von  $2 \times 2 \text{ mm}^2$  bei einem Arbeitsabstand von 50 mm. Der Spiegel besitzt einen Durchmesser von 3 mm und eine Resonanzfrequenz von 940 Hz. Der Reflektionsgrad wurde für Wellenlängen im Bereich 500 – 2500 nm für eine Goldbeschichtung und eine dielektrische Beschichtung getestet. Im Bereich zwischen 1000 – 1100 nm besitzt die dielektrische Beschichtung einen Reflektionsgrad von 99%, die Goldbeschichtung



von 96%. Bei einer kurzzeitigen Bestrahlung ist keine Temperaturerwärmung des Spiegels messbar, allerdings erwärmen sich die Federstrukturen an denen der Spiegel aufgehängt ist bei 90 W Laserleistung in 3 Sekunden um über 120 K. Die genauen Eigenschaften des Spiegels beim Erwärmen müssen in weiteren Untersuchungen ermittelt werden. Hinsichtlich Oszillationsfrequenzen im Bereich von 100 kHz besitzen diese Systeme das größte Potential. (Poprawe et al. 2009; Schmitt et al. 2008; Schmitt et al. 2010)



*Abbildung 12: Explosionszeichnung der 3D-Konstruktion (links); Prototyp (rechts) (Poprawe et al. 2009)*

#### 4.2.6 Komponenten der Fa.C.T.

Der industrielle Anbieter von Scannerelementen Cambridge Technology hat laut eigenen Angaben geschafft, Resonanzscanner zu entwickeln, die eine Frequenz von bis zu 12 kHz erreichen. Der Spiegeldurchmesser für den 4 kHz Scanner beträgt 10 mm, der für den 8 kHz Scanner 4,7 mm. Für die Oberfläche der Spiegel wurde eine Berylliumlegierung verwendet, da Beryllium ein hohes Steifigkeits- zu Gewichtverhältnis besitzt. Durch Zugabe von Aluminium und Silber kann der Reflektionsgrad weiter verbessert werden. Leider sind die von Cambridge Technology entwickelten Resonanzscanner nicht für Schweißprozesse ausgelegt, sondern für Drucken, Scannen von Bildern und andere Anwendungen, wo nur geringe Laserintensitäten auftreten. Cambridge Technology bietet auch Scannerelemente für das Schweißen mit Laserstrahlung an, allerdings sind diese Systeme nicht für Oszillationsschweißen ausgelegt, so dass für die Eigenschaften der Scanner bezüglich des Oszillationsschweißens keine Aussage getroffen werden kann (Galvos|Scanning Mirrors|Optical Scanners 2011)



### 4.3 Verwendete Scannersysteme

	Einheit	Rhino-Scanner	Elephant-Scanner
Arbeitsabstand	mm	372	500
Abbildungsverhältnis	-	1,66	1,66
Fokussierung	-	pre-objective scan system	post-objective scan system
Feldgröße	mm <sup>2</sup>	180x180	450x450
Apertur	mm	32	36

## 5 Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

### 5.1 Definition der Oszillationsfähigkeit

Die Oszillationsfähigkeit eines Scanners beschreibt das Systemverhalten und die dynamische Leistungsfähigkeit des Scanners im Kleinwinkelbereich. Das Systemverhalten beschreibt die Ist-Werte (gemessene Faktorwerte), die man bei der Eingabe der Soll-Werte (eingegebene Faktorwerte) erhält. Die im Folgenden verwendeten Faktorwerte sind in Abbildung 13 dargestellt. So weicht z.B. die Ist-Amplitude mit zunehmender Frequenz immer stärker von der Soll-Amplitude ab (siehe Abbildung 14). Der Grund für diese Abnahme der Ist-Amplitude, im Folgenden „Dämpfung“ genannt, liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der Regelung des Galvanometerantriebs.

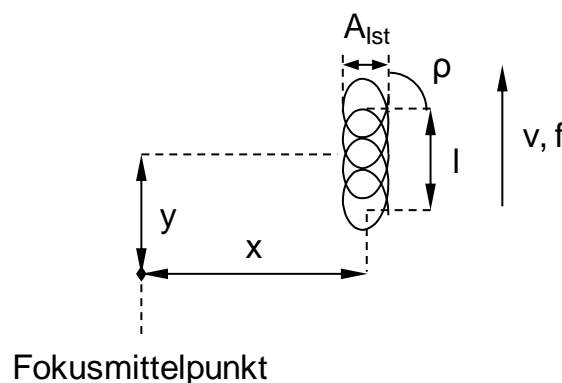


Abbildung 13: Faktorraum beim Oszillationsschweißen

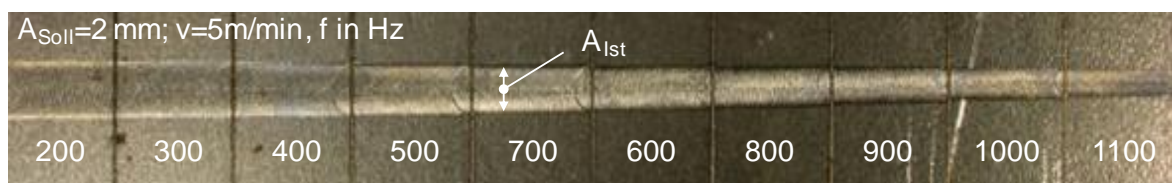


Abbildung 14: Verhalten eines Scanners in Abhängigkeit der Frequenz bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min

Die Leistungsfähigkeit des Scanners beschreibt, welche Soll-Werte eingestellt werden können, ohne dass die Schutzmechanismen des Scanners den Prozess unterbrechen. Die Schutzmechanismen des Scanners kontrollieren die Temperatur im Scanner, den Verlauf der Stromstärke in der Spule des Galvanometers in einer bestimmten Zeit und die maximale Stromstärke. Wenn bestimmte Grenzwerte überschritten werden wird der Prozess unterbrochen, um den Scanner vor Überhitzen zu schützen. Für den Verwender des Scanners ist dabei vor allem relevant, welche maximale Frequenz bei festgelegter Soll-

Amplitude, Vorschubgeschwindigkeit und Schweißnahtlänge ohne Unterbrechung möglich ist. Die maximal mögliche Frequenz in Abhängigkeit der Soll-Werte wird im Folgenden als Grenzfrequenz bezeichnet. Je kleiner die Soll-Amplitude und die Dauer der Oszillation, desto höher die Grenzfrequenz. Dabei wurde die Beobachtung gemacht, dass wenn die Schutzmechanismen des Elephant-Scanners bei 1100 Hz (bei Elephant-Scanner 1150 Hz) den Prozess noch nicht unterbrochen haben, dann werden sie den Prozess auch bei beliebig höheren Frequenzen nicht mehr unterbrechen. Eine Erklärung hierfür wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht gefunden.

Das Ziel der Analyse der Oszillationsfähigkeit ist es, mit einem Regressionsmodell bestimmen zu können, welche Soll-Amplitude eingestellt werden muss, um die gewünschte Ist-Amplitude, mit der geschweißt werden soll, zu erhalten (Kompensationsmodell) und mit einem weiteren Modell zu kontrollieren, ob diese Einstellung möglich ist (Grenzfrequenzmodell). Das Vorgehen zum Bestimmen der Oszillationsfähigkeit ist in Abbildung 15 dargestellt.

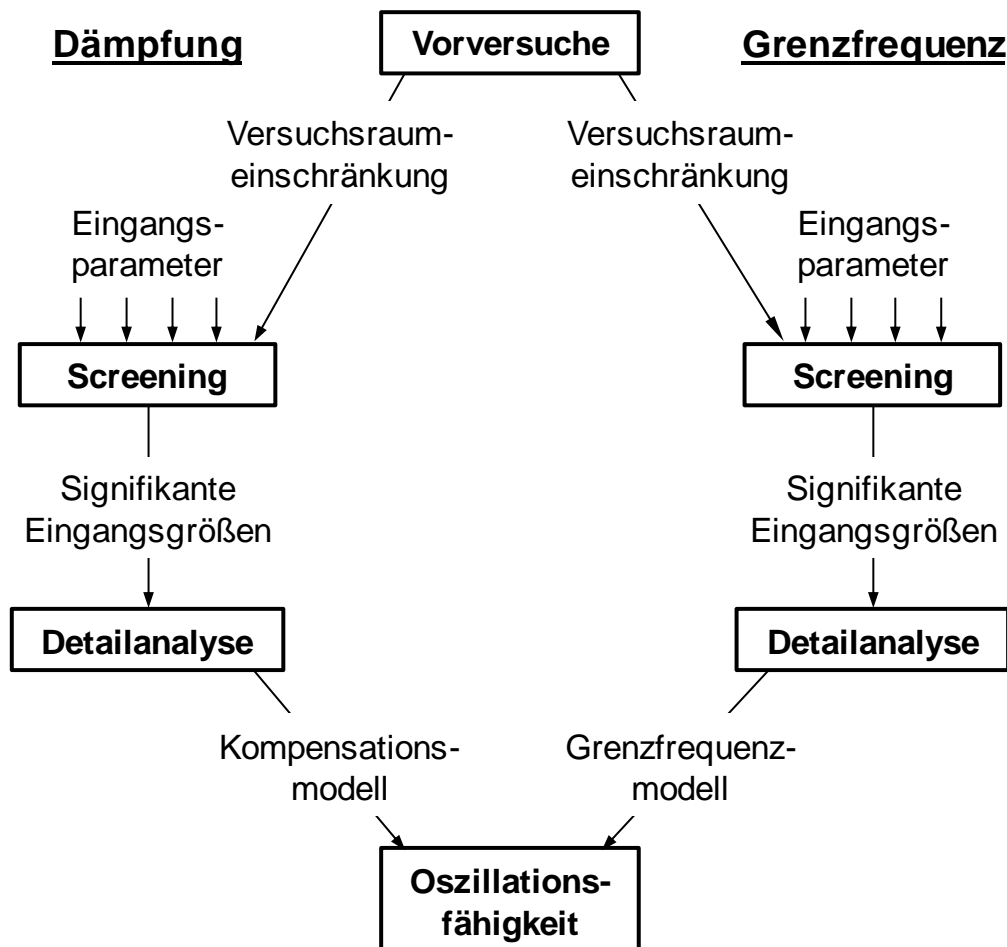


Abbildung 15: Vorgehen zur Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

## 5.2 Vorversuche

Die Grenzfrequenz schränkt den Versuchsraum ein, da nicht bei jeder Soll-Amplitude jede Frequenz möglich ist und somit in diesen Versuchspunkten keine Ist-Amplitude gemessen werden kann. Durch Bestimmen der Grenzfrequenz über der Soll-Amplitude bei minimaler Schweißzeit erhält man den größtmöglichen Versuchsraum, denn bei größeren Schweißzeiten liegt die Grenzfrequenz bereits bei geringeren Soll-Amplituden und verkleinert damit den Versuchsraum (siehe Abbildung 16). Für die durchgeführten Versuche wurde die maximale Vorschubgeschwindigkeit mit  $v = 10 \text{ m/min}$  und die minimale Schweißlänge mit  $l = 20 \text{ mm}$  festgelegt, wodurch sich eine minimale Schweißzeit von  $t = 0,12 \text{ s}$  ergibt. Um die Grenzfrequenzen zu ermitteln wurde bei konstanten Soll-Werten eine Frequenz getestet. Falls die Schutzmechanismen den Prozess nicht unterbrochen haben, wurde – nach einer Pause von etwa 20 Sekunden um ein Überhitzen des Scanners zu vermeiden – die Frequenz so oft um 20 Hz erhöht, bis die Schutzmechanismen den Prozess unterbrochen und somit die entsprechende Grenzfrequenz gefunden war. Damit beträgt die Tastgenauigkeit der Grenzfrequenz 20 Herz. Die Schutzmechanismen des Elephant-Scanners unterbrechen den Prozess bei gleicher Frequenz erst bei deutlich höheren Soll-Amplituden, wie die Schutzmechanismen des Rhino-Scanners, siehe Abbildung 16. Damit besitzt der Elephant-Scanner einen deutlich größeren Versuchsraum wie der Rhino-Scanner. Für das spätere Schweißen mit Strahloszillation sind nur Ist-Amplituden von maximal 1,5 Millimeter relevant, da größere Ist-Amplituden für das Oszillationsschweißen nicht verwendet werden. Bei konstanter Soll-Amplitude nimmt die Ist-Amplitude mit zunehmender Frequenz ab. Beim Einstellen der Grenzfrequenz erreicht somit jede Soll-Amplitude ihre minimal mögliche Ist-Amplitude. Falls diese minimale Ist-Amplitude größer als 1,5 Millimeter ist, dann ist die entsprechende Soll-Amplitude für spätere Versuche zu groß und damit nicht von Bedeutung. Hierdurch kann die Einstellung der Stufengröße für die größte Soll-Amplitude für alle Versuchspläne zur Analyse der Oszillationsfähigkeit bestimmt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dieser Zusammenhang erst nach dem Durchführen einiger Screening-Versuchspläne erkannt. Für diese durchgeführten Screening-Versuchspläne wurden möglichst große Stufenabstände gewählt, da „für die frühe Phase der Untersuchung möglichst große Stufenabstände zu wählen sind“ (Siebertz et al. 2010). Ob ein Faktor einen Effekt hat hängt allerdings nicht vom Stufenabstand ab. Der Stufenabstand ist nur für die Effektgröße verantwortlich. Somit sind die Ergebnisse der Screening Versuche weiterhin gültig.

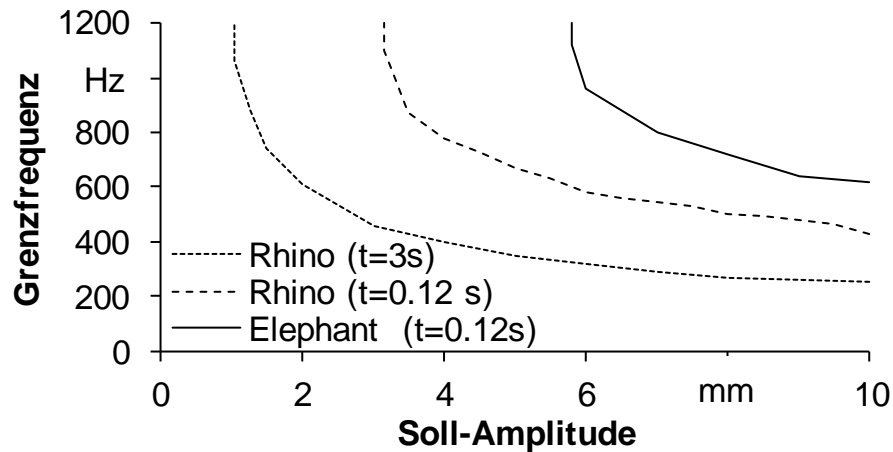


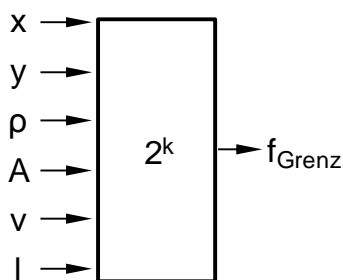
Abbildung 16: Ergebnis der Vorversuche zur Bestimmung der Grenzfrequenz über der Soll-Amplitude für den Elephant-Scanner und den Rhino-Scanner für verschiedene Schweißzeiten

## 5.3 Screening der Grenzfrequenz

### 5.3.1 Versuchsplanung

Im Screening wurden die signifikanten Faktoren der Grenzfrequenzen mit einem  $2^k$ -Faktorplan (siehe Abbildung 17 a) ermittelt. Mögliche Faktoren sind der Ort (x und y), die Vorschuborientierung ( $\rho$ ), die Soll-Amplitude (A), die Vorschubgeschwindigkeit (v) und die Schweißnahtlänge (l) (Faktorraum siehe Abbildung 13). Das Scannerfeld des Elephant-Scanners ist dabei deutlich größer als das Scannerfeld des Rhino-Scanners (siehe Abbildung 16). Für die Vorschubgeschwindigkeit wurden Geschwindigkeiten gewählt, welche für das Schweißen üblich sind.

a) Screening  
Versuchsplan



b) Screening Rhino

	-	+
x [mm]	0	60
y [mm]	0	60
$\rho$ [°]	0	90
A [mm]	2	10
v [m/min]	2	10
l [mm]	20	50

c) Screening Elephant

	-	+
x [mm]	0	200
y [mm]	0	200
$\rho$ [°]	0	90
A [mm]	6	10
v [m/min]	2	10
l [mm]	20	50

Abbildung 17: a) Mögliche Einflussgrößen der Grenzfrequenz; b) Einstellparameter für Screening Rhino; c) Einstellparameter für Screening Elephant

Der genaue Screening-Versuchsplans befindet sich im Anhang (Kapitel 8.2.1). Durch einen  $2^k$ -Faktorplan lässt sich ein lineares Modell mit Haupteffekten nach Gleichung ( 11 ) bestimmen. Falls Wechselwirkungen ebenfalls berücksichtigt werden wird das Modell nach Gleichung ( 12 ) gebildet. Die signifikanten Faktoren wurden mittels einer Varianzanalyse (ANOVA) ermittelt. Die ANOVA wurde mit der Software Matlab durchgeführt und mit der Software Visual-XSel 12.0 überprüft, wobei ein Faktor mit einem p-Wert  $\leq 0,05$  als signifikant angenommen wurde. Das Vorgehen zum Durchführen der ANOVA und Eliminieren nicht signifikanter Faktoren erfolgte analog Kapitel 3.2.4. Im Folgenden werden nur die ANOVA-Tabellen der als signifikanten ermittelten Faktoren dargestellt. Die kompletten ANOVA-Tabellen vor dem Eliminieren der nichtsignifikanten Faktoren befinden sich im Anhang.

### 5.3.2 Signifikanzprüfung

#### Auswertung für lineares Modell der Haupteffekte

Tabelle 1 (Rhino-Scanner) und Tabelle 2 (Elephant-Scanner) zeigen die signifikanten Faktoren der Grenzfrequenz der beiden Scanner für ein Modell mit Hauptfaktoren ohne Wechselwirkungen. Die signifikanten Faktoren werden mit Gleichung ( 25 ) beschrieben. Die Faktoren Ort (x, y) und Vorschubrichtung ( $\rho$ ) sind nicht signifikant und wurden deshalb aus dem Regressionsmodell eliminiert. Die Werte der Regressionskoeffizienten und deren Konfidenzintervalle sind in Tabelle 3 aufgelistet. In Abbildung 18 bis Abbildung 20 ist die Effektstärke der signifikanten Hauptfaktoren dargestellt.

	DF	SSB	MS	F	p-Wert
A	1	28355625	28355625	287,51	0
v	1	2325625	2325625	23,58	0
l	1	2030625	2030625	20,59	0
Error	60	5917501	98625		
Total	63	38629376			
R <sup>2</sup>	0,847	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,839	RMSE	314

*Tabelle 1: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte des Screening-Versuchsplans für die Grenzfrequenz des Rhino-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

## Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
A	1	1802306	1802306	415	0
v	1	273006	273006	62,86	0
l	1	120756	120756	27,81	0
Error	60	260575,8	4343		
Total	63	2456643,8			
R <sup>2</sup>	0,894	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,889	RMSE	65,9

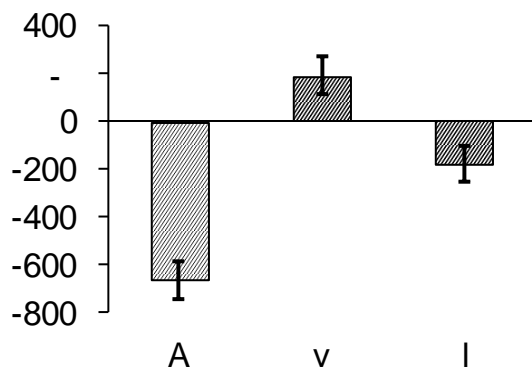
*Tabelle 2: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte des Screening-Versuchsplans für die Grenzfrequenz des Elephant-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

$$f_{\text{Grenz}} = c_0 + c_A \cdot A + c_v \cdot v + c_l \cdot l \quad (25)$$

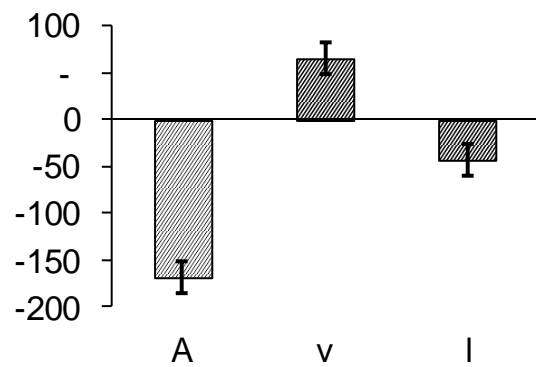
Konst.	Einheit	Rhino			Elephant		
		-KI	Wert	+KI	-KI	Wert	+KI
c <sub>0</sub>	Hz	1877,7	2137,5	2397,3	1241,2	1323,1	1405
c <sub>A</sub>	Hz/mm	-186	-166,4	-146,8	-92,1	-83,9	-75,7
c <sub>v</sub>	$\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{m}}$	28	47,7	67,3	12,2	16,3	20,4
c <sub>l</sub>	Hz/mm	-17,1	-11,9	-6,6	-4	-2,9	-1,8

*Tabelle 3: Werte des Regressionskoeffizienten beider Scanner (Wert) sowie deren Konfidenzintervall KI*

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner



*Abbildung 18: Effektstärke der normierten Hauptfaktoren mit Konfidenzintervall für Rhino-Scanner (a); Elephant-Scanner (b)*

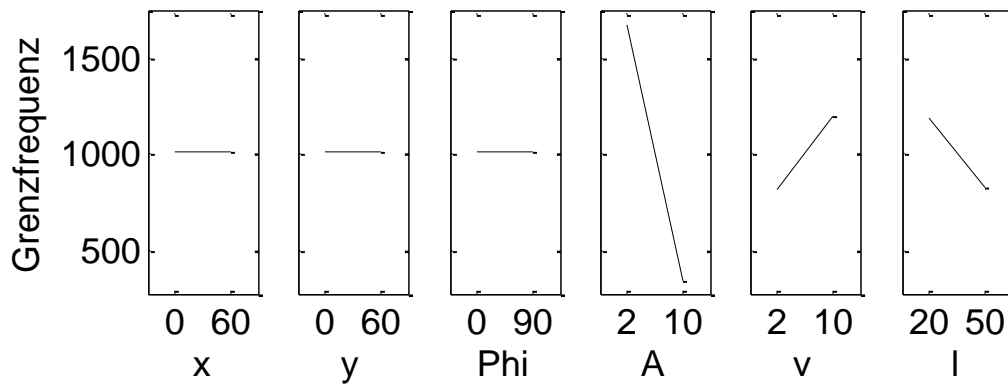


Abbildung 19: Effektstärke der Einflussfaktoren auf die Grenzfrequenz des Rhino-Scanners

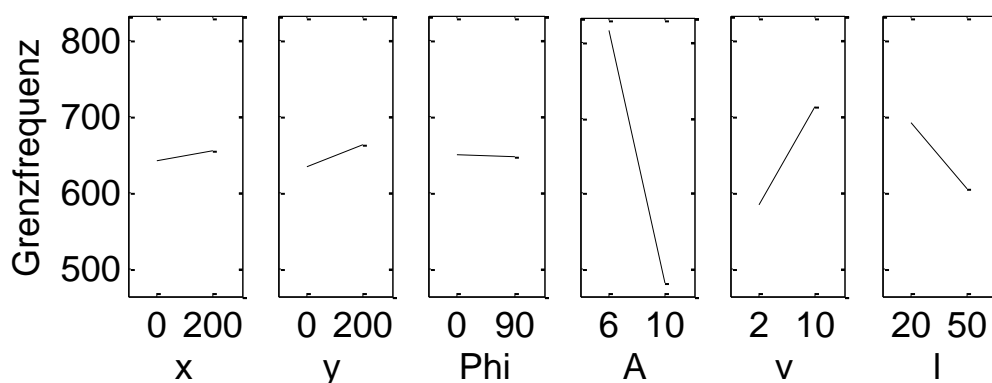


Abbildung 20: Effektstärke der Einflussfaktoren auf die Grenzfrequenz des Elephant-Scanners

### Auswertung für ein Modell mit Wechselwirkungen

Für ein Modell, welches Haupteffekte und Wechselwirkungen berücksichtigt, werden deutlich mehr Modellparameter verwendet, wodurch weniger Raum für Fehler (Error) bleibt. Dadurch ist auch die Modellqualität der linearen Regressionsmodelle (siehe Gleichung ( 26 ) und Gleichung ( 27 )) besser als die der Regressionsmodelle der Haupteffekte ohne Wechselwirkungen (Vergleich z.B. Tabelle 2 und Tabelle 5). Die beschreibenden Regressionskoeffizienten und deren Konfidenzintervalle befinden sich in Tabelle 6. Die quadratische Abweichung des Mittelwerts vom Gesamtmittelwert des Fehlers (Error)  $SSB_{\text{Error}}$  und die Varianz des Fehlers  $MS_{\text{Error}}$  verringern sich im Vergleich zu einem Modell, welches nur Haupteffekte berücksichtigt (Vergleich Tabelle 2 und Tabelle 5). Hierdurch erhöhen sich die Faktorvarianzen  $F$  der Faktoren (siehe Gleichung ( 20 )), womit der p-Wert der einzelnen Faktoren sinkt. Dadurch können Faktoren, die für ein Modell ohne Wechselwirkungen einen p-Wert  $> 0,05$  besitzen und somit nicht signifikant sind, einen p-Wert  $\leq 0,05$  erhalten, womit sie als signifikant angenommen werden müssen. Für den Elephant-Scanner ist der Faktor  $y$  nun ebenfalls signifikant (siehe Tabelle 5). Der Faktor  $x$  besitzt



zwar einen p-Wert > 0,05, da aber die Wechselwirkungen x\*y signifikant ist kann auch der Faktor x nicht eliminiert werden.

Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
A	1	28655625	28355625	994	0
v	1	2325625	2325625	82	0
l	1	2030625	2030625	71	0
A*v	1	1155625	1155625	41	0
A*l	1	1380625	1380625	48	0
v*l	1	1755625	1755625	62	0
Error	57	1325625	28519		
Total	63	38629375			
R <sup>2</sup>	0,958	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,953	RMSE	169

*Tabelle 4: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Grenzfrequenz des Rhino-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

$$f_{Grenz} = c_0 + c_A \cdot A + c_v \cdot v + c_l \cdot l + c_{Av} \cdot A \cdot v + c_{Al} \cdot A \cdot l + c_{vl} \cdot v \cdot l \quad (26)$$

$$f_{Grenz} = c_0 + c_x \cdot x + c_y \cdot y + c_A \cdot A + c_v \cdot v + c_l \cdot l + c_{xy} \cdot x \cdot y + c_{Av} \cdot A \cdot v + c_{Al} \cdot A \cdot l + c_{vl} \cdot v \cdot l \quad (27)$$

## Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

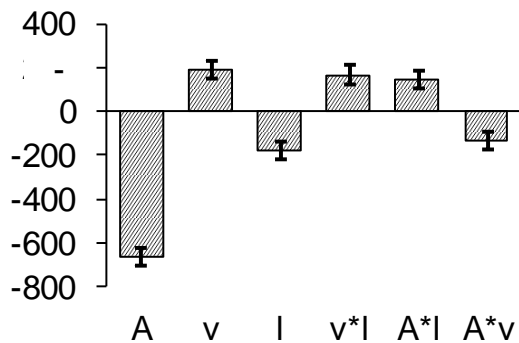
Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
x	1	2756	2756	1,5	0,22
y	1	13806	13806	7,5	0,01
A	1	1802306	1802306	977,6	0
v	1	273006	273006	148,1	0
l	1	120756	120756	65,5	0
x*y	1	54056	54056	29,3	0
A*v	1	24806	24806	13,5	0
v*l	1	63756	63756	34,6	0
Error	55	90462,5	1843,5		
Total	63	2456643,8			
R <sup>2</sup>	0,959	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,953	RMSE	42,9

*Tabelle 5: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Grenzfrequenz des Elephant-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

Konst.	Einheit	Rhino			Elephant		
		-KI	Wert	+KI	-KI	Wert	+KI
c <sub>0</sub>	Hz	2659,9	2928,9	3197,9	1008,6	1102,3	1196
c <sub>x</sub>	Hz/mm				-0,4	-0,2	-0,1
c <sub>y</sub>	Hz/mm				-0,3	-0,1	0
c <sub>A</sub>	Hz/mm	-232,9	-201,7	-170,5	-78,8	-69,1	-59,4
c <sub>v</sub>	$\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{m}}$	-29,7	1,4	32,6	41,7	54,4	67,2
c <sub>l</sub>	Hz/mm	-49,7	-43,1	-36,5	-1	0,3	1,6
c <sub>xy</sub>	$\frac{\text{Hz}}{\text{mm} \cdot \text{mm}}$				0	0	0
c <sub>Av</sub>	$\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{m} \cdot \text{mm}}$	-11	-8,4	-5,8	-3,8	-2,5	-1,1
c <sub>Al</sub>	$\frac{\text{Hz}}{\text{mm} \cdot \text{mm}}$	1,7	2,4	3,2			
c <sub>vl</sub>	$\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{m} \cdot \text{mm}}$	2,1	2,8	3,5	-0,7	-0,5	-0,3

*Tabelle 6: Werte des Regressionskoeffizienten beider Scanner (Wert) sowie deren Konfidenzintervall KI*

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner

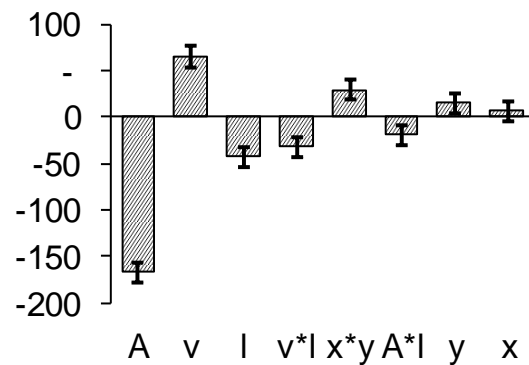


Abbildung 21: Effektstärke der normierten Hauptfaktoren mit Wechselwirkungen und Konfidenzintervall für Rhino-Scanner (a) und Elephant-Scanner (b)

### Diskussion der gezeigten Ergebnisse

Wenn für das Screening der Grenzfrequenz nur ein Modell der Haupteffekte verwendet wird, so sind nur die Faktoren Amplitude (A), Länge (l) und Vorschubgeschwindigkeit (v) signifikant. Bei Verwendung eines Modells, welches Wechselwirkungen ebenfalls berücksichtigt, werden für den Elephant-Scanner auch die Faktoren x und y signifikant. Durch Betrachten von Abbildung 20 wird allerdings deutlich, dass die Effektstärke der Faktoren x und y im Vergleich zu den Faktoren A, v und l deutlich niedriger sind und damit vernachlässigt werden können. Abbildung 21 zeigt, dass das Konfidenzintervall von x und y im Bereich von null ist, womit die Wahrscheinlichkeit, dass es sich bei x und y um signifikante Faktoren handelt, gering ist und somit für eine detaillierte Untersuchung nur die Faktoren Amplitude, Länge und Vorschubgeschwindigkeit signifikant sind.

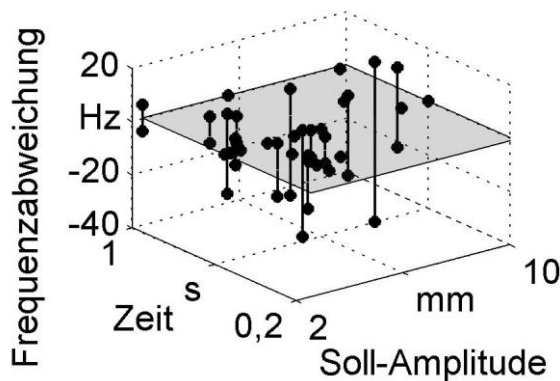
### 5.3.3 Zusammenfassen der Faktoren Länge und Vorschubgeschwindigkeit zum Faktor Schweißzeit

Die Faktoren Vorschubgeschwindigkeit und Schweißnahtlänge könnten mit Gleichung ( 28 ) zu einem Faktor Schweißzeit (t) zusammengefasst werden, wodurch der Versuchsaufwand erheblich reduzieren werden kann und ein einfacheres Regressionsmodell möglich wird. Um zu überprüfen, ob das Zusammenfassen der beiden Faktoren zulässig ist, wurden bei verschiedenen Soll-Amplituden die Zeiten bei gleichzeitigem Variieren der Schweißnahtlänge und der Vorschubgeschwindigkeit mit Gleichung ( 28 ) konstant gehalten (siehe Abbildung 22). Da die durch das Zusammenfassen entstehenden Frequenzunterschiede maximal 40 Hz betragen, wurden die Faktoren Schweißzeit und

Vorschubgeschwindigkeit zusammengefasst. Die maximale Schweißzeit wurde für den Rhino-Scanner auf  $t_{\text{Max}} = 1$  Sekunde und für den Elephant-Scanner auf  $t_{\text{Max}} = 1,5$  Sekunden begrenzt, da bei größeren Schweißzeiten keine hohen Ist-Amplituden bei Frequenzen über 1000 Hz mehr möglich waren, und die damit realisierbaren Schweißlängen und Vorschubgeschwindigkeiten den geforderten Anforderungen genügten.

$$t = \frac{l}{v} \quad (28)$$

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner

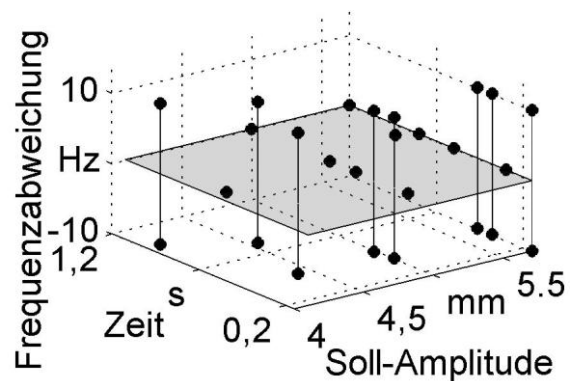
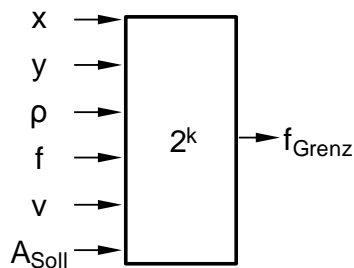


Abbildung 22: Frequenzabweichung verschiedener Soll-Amplituden bei verschiedenen Schweißzeiten für den Rhino-Scanner (a) und Elephant-Scanner (b)

## 5.4 Screening der Amplitudendämpfung

### 5.4.1 Versuchsplanung

Im Screening der Dämpfung wurden anschließend signifikante Faktoren der Dämpfung ebenfalls mit einem  $2^k$ -Faktorplan untersucht, (siehe Abbildung 23). Mögliche Faktoren sind der Ort (x und y), die Vorschubrichtung (p), die Frequenz (f), die Vorschubgeschwindigkeit (v) und die Soll-Amplitude ( $A_{\text{Soll}}$ ) (Faktorraum siehe Abbildung 13).

a) Screening  
Versuchsplan

## b) Screening Rhino

	-	+
x [mm]	-90	90
y [mm]	-90	90
ρ [°]	0	90
f [Hz]	200	800
v [m/min]	2	10
A <sub>Soll</sub> [mm]	1	4

## c) Screening Elephant

	-	+
x [mm]	0	200
y [mm]	0	200
ρ [°]	0	90
f [Hz]	100	700
v [m/min]	2	10
A <sub>Soll</sub> [mm]	1	6

Abbildung 23: a) Mögliche Einflussgrößen der Dämpfung; b) Einstellparameter für Screening Rhino-Scanner; c) Einstellparameter für Screening Elephant-Scanner

Der genaue Screening-Versuchsplan befindet sich im Anhang (Kapitel 8.2.3). Durch den  $2^k$ -Faktorplan lässt sich wie beim Screening der Grenzfrequenz ein lineares Modell nach ( 12 ) mit Haupteffekten und Wechselwirkungen bestimmen. Die signifikanten Faktoren wurden mittels einer Varianzanalyse (ANOVA) analog Kapitel 5.3 bestimmt und dargestellt.

## 5.4.2 Signifikanzprüfung

### Auswertung lineares Modell

Die signifikanten Faktoren der Dämpfung (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8) lassen sich für beide Scanner mit Gleichung ( 29 ) beschreiben (Regressionskoeffizienten mit Konfidenzintervall siehe Tabelle 9). Für beide Scanner sind für ein lineares Regressionsmodell nur die Faktoren Frequenz  $f$  und Amplitude  $A$  signifikant. In Abbildung 24 bis Abbildung 26 ist die Effektstärke der Faktoren dargestellt.

$$f_{Grenz} = c_0 + c_f \cdot f + c_A \cdot A \quad ( 29 )$$

## Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
f	1	7	7	125	0
A	1	102,5	102,5	1842	0
Error	61	3,4	0,056		
Total	63	112,853			
R <sup>2</sup>	0,97	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,969	RMSE	0,236

*Tabelle 7: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Dämpfung des Rhino-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

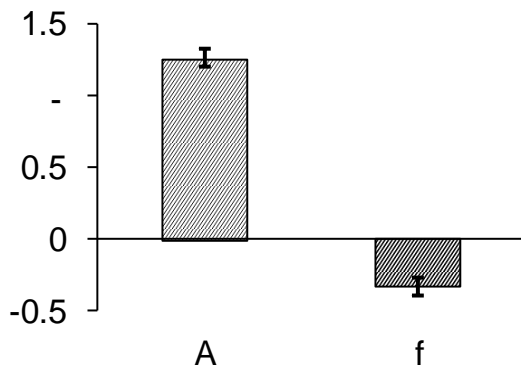
Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
f	1	14,7	14,7	108	0
A	1	266,5	266,5	1961	0
Error	61	8,29	0,136		
Total	63	289,557			
R <sup>2</sup>	0,971	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,97	RMSE	0,369

*Tabelle 8: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Dämpfung des Elephant-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

Konst.	Einheit	Rhino			Elephant		
		-KI	Wert	+KI	-KI	Wert	+KI
c <sub>0</sub>	Hz	0,45	0,6009	0,7519	0,4415	0,6421	0,8426
c <sub>f</sub>	-	-0,0013	-0,0011	-0,0009	-0,0019	-0,0016	-0,0013
c <sub>A</sub>	Hz/mm	0,8042	0,8435	0,8828	0,7794	0,8163	0,8531

*Tabelle 9: Werte des Regressionskoeffizienten beider Scanner (Wert) sowie deren Konfidenzintervall KI*

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner

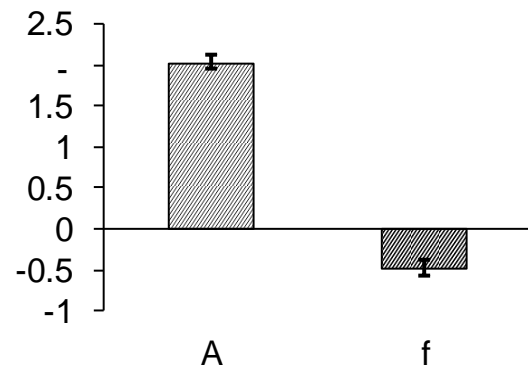


Abbildung 24: Effektstärke der Hauptfaktoren mit Konfidenzintervall für a) Rhino-Scanner; b) Elephant-Scanner

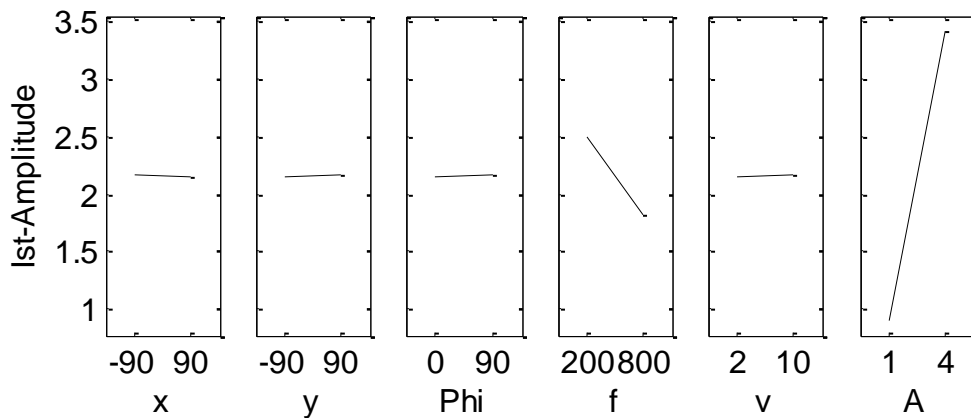


Abbildung 25: Effektstärke der Einflussfaktoren auf die Dämpfung des Rhino-Scanners

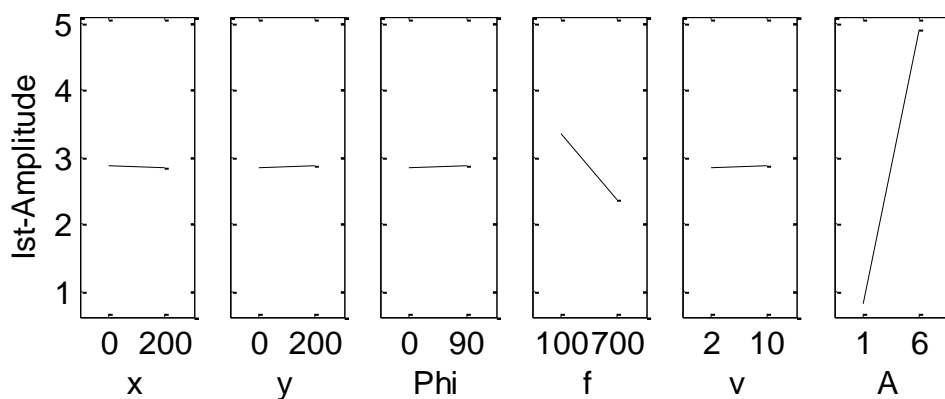


Abbildung 26: Effektstärke der Einflussfaktoren auf die Dämpfung des Elephant-Scanners

### Auswertung für ein Modell mit Wechselwirkungen

Zur genauen Analyse der signifikanten Faktoren wurde analog zu Kapitel 5.3.2 auch ein Modell mit Wechselwirkungen betrachtet. Zur Beschreibung der

Dämpfung des Elephant-Scanners (siehe Gleichung ( 30 )) und des Rhino-Scanners (siehe Gleichung ( 31 )) sind demnach auch die Faktoren Ort (x und y) signifikant. Außerdem ist für den Elephant-Scanner auch die Vorschubrichtung (ρ) und für den Rhino-Scanner die Vorschubgeschwindigkeit (v) signifikant. Die Werte und die Konfidenzintervalle der Regressionskoeffizienten von Gleichung ( 30 ) und Gleichung ( 31 ) befinden sich in Tabelle 12. Die Effektstärke der signifikanten Faktoren sind in Abbildung 27 dargestellt.

$$A_{ist} = c_0 + c_x \cdot x + c_y \cdot y + c_\rho \cdot \rho + c_f \cdot f + c_A \cdot A + c_{y\rho} \cdot y \cdot \rho + c_{yA} \cdot y \cdot A + c_{\rho f} \cdot \rho \cdot f + c_{fA} \cdot f \cdot A \quad (30)$$

$$A_{ist} = c_0 + c_x \cdot x + c_y \cdot y + c_f \cdot f + c_v \cdot v + c_A \cdot A + c_{yA} \cdot y \cdot A + c_{fA} \cdot f \cdot A + c_{vA} \cdot v \cdot A \quad (31)$$

Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
x	1	0,033	0,033	11,6	0
y	1	0	0	0	0,89
ρ	1	0,025	0,025	8,9	0
f	1	14,741	14,741	5248,7	0
A	1	266,526	266,526	94900	0
y*ρ	1	0,014	0,014	5	0,02
y*A	1	0,021	0,021	1,2	0,01
ρ*f	1	0,044	0,044	15,8	0
f*A	1	8,02	8,02	2855,5	0
Error	54	0,152	0,003		
Total	63	289,557			
R <sup>2</sup>	1	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	0,999	RMSE	0,0499

*Tabelle 10: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Dämpfung des Elephant-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

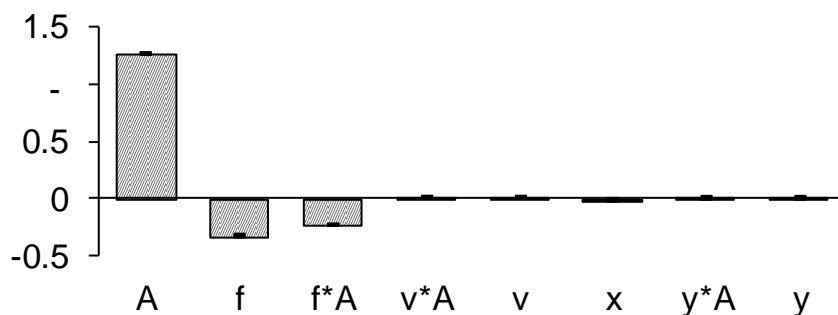


## Bestimmung der Oszillationsfähigkeit

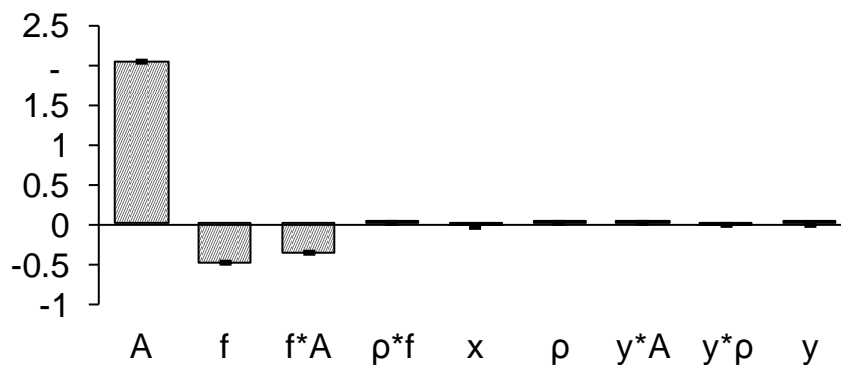
Faktor	DF	SSB	MS	F	p-Wert
x	1	0,008	0,008	14,2	0
y	1	0,001	0,001	1,3	0,25
f	1	6,996	6,996	12293,3	0
v	1	0,012	0,012	20,3	0
A	1	102,465	102,465	180050,3	0
y*A	1	0,006	0,006	9,9	0
f*A	1	3,322	3,322	5836,5	0
v*A	1	0,013	0,013	23,2	0
Error	55	0,031	0,001		
Total	63	112,853			
R <sup>2</sup>	1	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub>	1	RMSE	0,0239

*Tabelle 11: ANOVA für die signifikanten Haupteffekte mit Wechselwirkungen des Screening-Versuchsplans für die Dämpfung des Rhino-Scanners sowie die damit erreichbare Modellqualität*

### a) Rhino-Scanner



### b) Elephant-Scanner



*Abbildung 27: Effektstärke der normierten Hauptfaktoren mit Konfidenzintervall für den Rhino-Scanner (a) und den Elephant-Scanner (b)*

Konst.	Einheit	Rhino			Elephant		
		-KI	Wert	+KI	-KI	Wert	+KI
$c_0$	Hz	-0,0446	-0,0161	0,0124	-0,0211	0,0288	0,0787
$c_x$	Hz/mm	-0,0002	-0,0001	-0,0001	-0,0004	-0,0002	-0,0001
$c_y$	Hz/mm	-0,0003	-0,0001	0	-0,0003	-0,0001	0,0002
$c_p$	Hz/°				-0,0006	0	0,0005
$c_f$	-	0,0001	0,0002	0,0002	-0,0001	0	0
$c_v$	$\frac{\text{Hz} \cdot \text{min}}{\text{m}}$	-0,0055	-0,0026	0,0003			
$c_A$	Hz/mm	1,0725	1,0823	1,0921	0,9881	0,9979	1,0076
$c_{yp}$	$\frac{\text{Hz}}{\text{mm} \cdot ^\circ}$				0	0	0
$c_{yA}$	$\frac{\text{Hz}}{\text{mm} \cdot \text{mm}}$	0	0,0001	0,0001	0	0,0001	0,0001
$c_{pf}$	Hz/°				0	0	0
$c_{fA}$	Hz/mm	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005	-0,0005
$c_{vA}$	$\frac{\text{Hz}}{\text{mm} \cdot \text{mm}}$	0,0014	0,0024	0,0034			

Tabelle 12: Werte des Regressionskoeffizienten beider Scanner (Wert) sowie deren Konfidenzintervall KI

### Diskussion der gezeigten Ergebnisse

Für ein lineares Regressionsmodell mit Hauptfaktoren sind nur die Faktoren Frequenz und Amplitude signifikant. Falls Wechselwirkungen in dem Modell ebenfalls berücksichtigt werden, sind für den Elephant-Scanner auch die Faktoren Ort (x und y) und Vorschubgeschwindigkeit und für den Rhino-Scanner die Faktoren Ort (x und y) und Vorschubrichtung signifikant. Allerdings wird auch hier durch Betrachten der Effektstärke der Faktoren (siehe Abbildung 25, Abbildung 26 und Abbildung 27) klar, dass im Vergleich zu den Faktoren Frequenz und Amplitude die übrigen Faktoren vernachlässigt werden können. Da die Konfidenzintervalle der Faktoren Ort, Vorschubrichtung und Vorschubgeschwindigkeit ebenfalls im Bereich von null sind, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es sich hierbei um signifikante Faktoren handelt gering (siehe Abbildung 27). Für eine detaillierte Untersuchung sind somit nur die Faktoren Amplitude und Frequenz signifikant.

## 5.5 Detailanalyse und Modellbildung der Dämpfung

Das Screening hat gezeigt, dass zum Bestimmen der Ist-Amplitude nur die Faktoren Frequenz und Soll-Amplitude signifikant sind. Für das Schweißen mit Strahloszillation sind nur Ist-Amplituden von maximal  $A_{\text{Ist}} = 1,5$  mm relevant. Die in den Vorversuchen und Screenings ermittelten Daten zeigen, dass zum Erreichen dieser Ist-Amplituden für den Rhino-Scanner maximale Soll-Amplituden von  $A_{\text{Soll}} = 3$  mm und für den Elephant-Scanner die maximale Soll-Amplitude von  $A_{\text{Soll}} = 5,7$  mm notwendig sind. Für diese Soll-Amplituden gibt es bei der Einstellung minimaler Zeit keine Grenzfrequenzen, was einen Versuchsplan ohne Einschränkungen ermöglicht. Um die genaue Abhängigkeit der Ist-Amplitude von der Soll-Amplitude und der Frequenz zu bestimmen wurde ein Versuchsplan mit einem „Space filling Design“ erstellt. Um den Versuchsplan noch weiter zu verbessern und die Korrelationen zu reduzieren wurde dieser mit einem optimalen Versuchsplan ergänzt, wobei als Modell zur Bestimmung des optimalen Versuchsplans ein quadratisches Modell als Ausgangsmodell verwendet wurde. Auch wenn später kein quadratisches Modell verwendet wird, so ist der Vorteil vom Ergänzen des „Space filling Designs“ mit einem optimalen Versuchsplan, dass hierdurch die Ecken und Ränder des Versuchsplans besser ausgefüllt werden (Versuchsplan siehe Abbildung 28 und Anhang Kapitel 8.2.4 und 8.2.5).

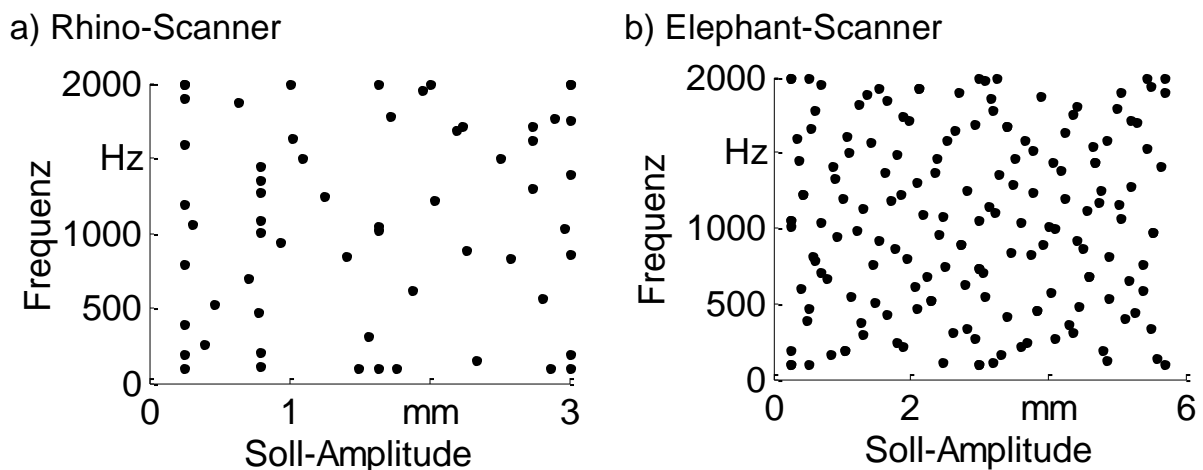


Abbildung 28: Versuchsplan der Dämpfung für Rhino-Scanner (a) und Elephant-Scanner (b)

Das Regressionsmodell muss den Zusammenhang zwischen Frequenz, Soll- und Ist-Amplitude richtig wiedergeben. Lineare Regressionsmodelle wie Polynome können die Messwerte teilweise sehr gut annähern, wenn als Gütekriterium nur das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{adj}}$  verwendet wird. Allerdings beschreiben sie den Zusammenhang in vielen Bereichen der Funktion physi-

kalisch nicht richtig. So können negative Ist-Amplituden entstehen, in der Mitte des Versuchsraums liegen lokale Minima und Maxima, es bilden sich systematisch Fehler (Bereiche in denen die Funktion z.B. über allen Messwerten liegt, also zu große Werte berechnet werden) und im extrapolierten Bereich liegen physikalisch nicht erklärbare Maxima und Minima, da der Scheitel der Polynome oft am Rand des Versuchsraums liegt. Die Daten wurden daher mit einem nichtlinearen Regressionsmodell angenähert. Es hat sich gezeigt, dass vor allem gaußförmige Funktionen die Messwerte gut annähern können (siehe Tabelle 13). Um die Güte verschiedener Funktionen zu vergleichen, wurde das adjustierte Bestimmtheitsmaß  $R^2_{\text{adj}}$  verwendet. Gleichung ( 32 ) hat bei alleiniger Betrachtung des adjustierten Bestimmtheitsmaßes die beste Güte, allerdings können die Konstanten  $a$  und  $c$  physikalisch nicht erklärt werden. Die Konstante  $a$  würde mathematisch bedeuten, dass auch für den Fall, dass die Soll-Amplitude 0 ist eine Ist-Amplitude erhalten wird. Für den Fall, dass die Frequenz = 0 ist, sollte die Frequenz keinen Einfluss auf die Dämpfung haben. Die Konstante  $c$  würde allerdings das Maximum der Gaußfunktion verschieben und damit für diesen Fall die Dämpfung beeinflussen, weshalb  $c = 0$  sein muss. Aufgrund der besseren Modellgüte wurde Gleichung ( 33 ) als Beschreibungsfunktion gewählt. Die Konstante  $b$  ist dabei so zu interpretieren, dass die vom Laserhersteller eingestellte Soll-Amplitude nicht der tatsächlich vom Scanner durchgeführten Ist-Amplitude entspricht und im Scanner falsch eingestellt wurde. Die Werte der entsprechenden Regressionskonstanten sind für beide Scanner in Tabelle 14 gegenübergestellt.

Beide Scanner können mit einem Modell beschrieben werden, deren Koeffizienten fast identisch sind. Der Elephant-Scanner ist dabei deutlich leistungsfähiger. Eine mögliche Erklärung für das ähnliche Systemverhalten ist die Tatsache, dass beide Scanner Galvanometer-Elemente zum Antreiben der Spiegel verwenden und sich diese auch bei verschiedener Ausführung ähnlich verhalten. Das Regressionsmodell (Gleichung ( 33 )) und die gemessenen Ist-Amplituden über der Soll-Amplitude und der Frequenz sind in Abbildung 29 (Elephant-Scanner) und Abbildung 30 (Rhino-Scanner) dargestellt.

Funktion	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> Elephant	R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> Rhino
$A_{ist} = a + b \cdot A_{soll} \cdot e^{-\left(\frac{Frequenz-c}{d}\right)^2}$ ( 32 )	0.9989	0.9988
$A_{ist} = b \cdot A_{soll} \cdot e^{-\left(\frac{Frequenz}{d}\right)^2}$ ( 33 )	0.9988	0.9975
$A_{ist} = A_{soll} \cdot e^{-\left(\frac{Frequenz}{d}\right)^2}$ ( 34 )	0.9984	0.9969

Tabelle 13: Verschiedene gaußförmige Funktionen und deren Güte

Konst.	Einheit	Rhino			Elephant		
		-KI	Wert	+KI	-KI	Wert	+KI
b	-	0.9728	0.9818	0.9908	0.9785	0.9831	0.9876
d	Hz	1239	1254	1270	1137	1143	1149

Tabelle 14: Koeffizienten mit Konfidenzintervall der Gleichung ( 33 ) für beide Scanner

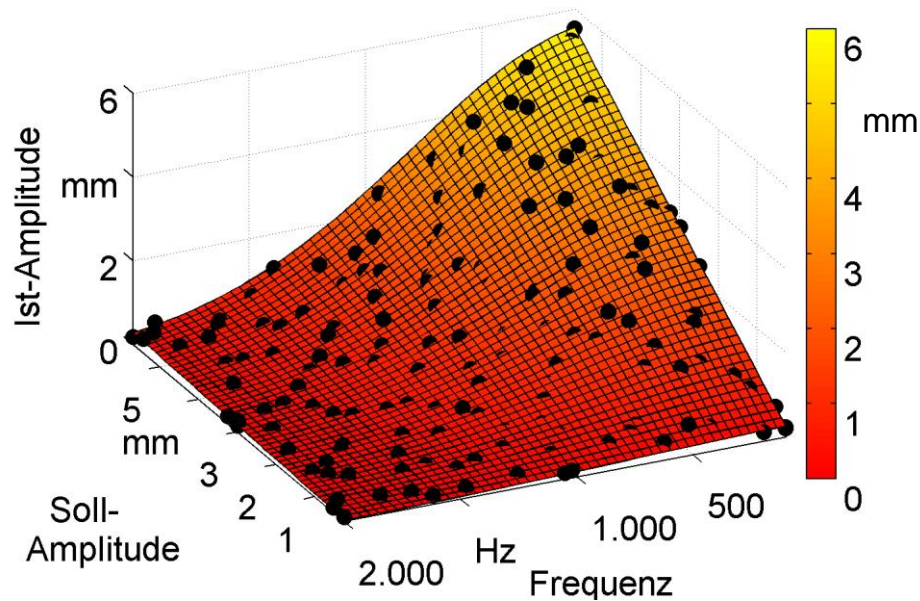


Abbildung 29: Modell (Gleichung ( 33 )) mit Messwerten für den Elephant-Scanner

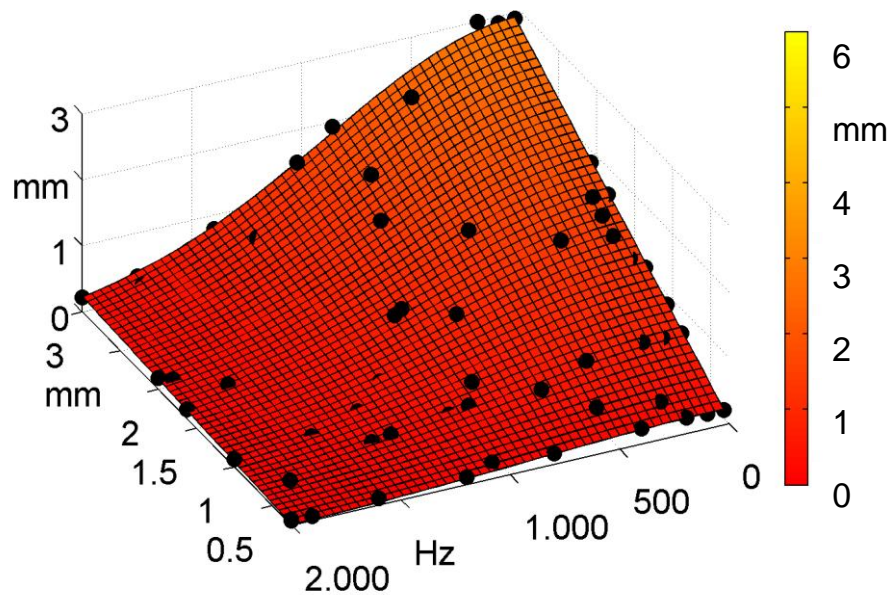
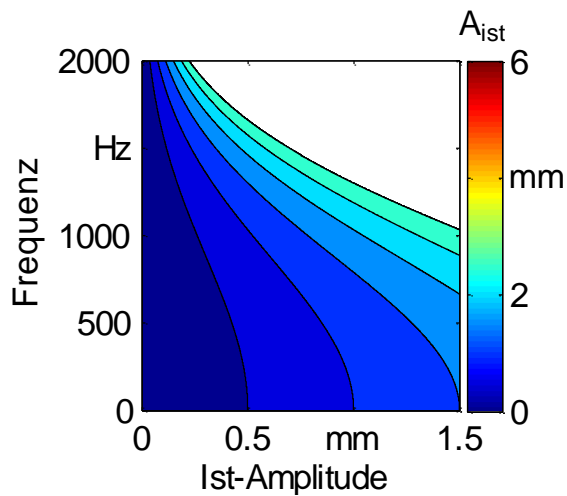


Abbildung 30: Modell (Gleichung ( 33 )) mit Messwerten für den Rhino-Scanner

Für den Anwender ist weniger relevant, welche Ist-Amplitude er erhält, wenn er eine bestimmte Soll-Amplitude einstellt, sondern er will wissen, welche Soll-Amplitude er einstellen muss, um seine gewünschte Ist-Amplitude zu erhalten. Hierfür muss Gleichung ( 33 ) zu Gleichung ( 35 ) umgestellt werden. In Abbildung 31 können die zum realisieren der Ist-Amplitude nötigen Soll-Amplituden bei gewünschter Frequenz der Farbskala entnommen werden. Der weiße Bereich resultiert aus der begrenzten Leistungsfähigkeit der Scanneroptiken.

$$A_{soll} = \frac{A_{ist}}{b} \cdot e^{\left(\frac{\text{Frequenz}}{d}\right)^2} \quad ( 35 )$$

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner

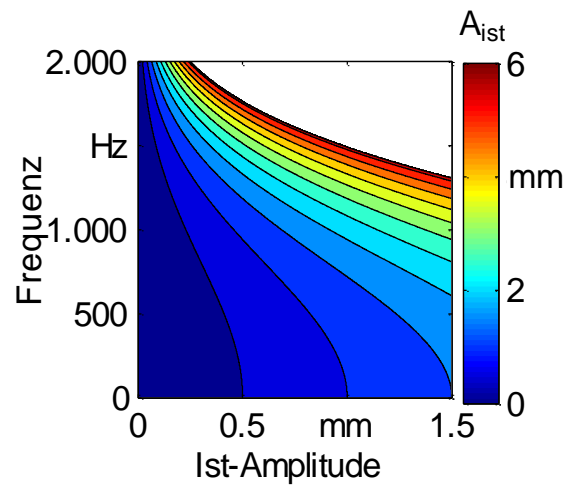


Abbildung 31: Ist-Amplituden über die Frequenz; die zum Realisieren der Ist-Amplitude nötigen Soll-Amplituden können der Farbskala entnommen werden.  
a) Rhino-Scanner; b) Elephant-Scanner

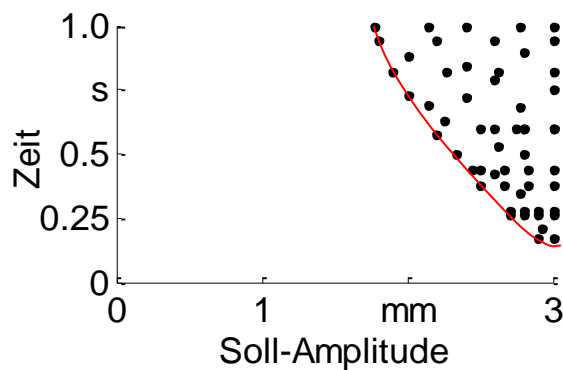
## 5.6 Detailanalyse und Modellbildung der Grenzfrequenz

Mit Gleichung ( 35 ) und Abbildung 31 kann bestimmt werden, welche Soll-Amplituden bei gewünschter Frequenz eingestellt werden müssen, um die gewünschten Ist-Amplituden zu erhalten. Allerdings berücksichtigt Gleichung ( 35 ) nicht, ob die bestimmte Soll-Amplitude überhaupt möglich ist, denn Gleichung ( 35 ) wurde bei minimaler Schweißzeit bestimmt. Für größere Schweißzeiten sind nicht mehr alle Einstellungen möglich, da hier Grenzfrequenzen auftreten (siehe Abbildung 32). Es wird ein Modell benötigt, welches in Abhängigkeit der Soll-Werte überprüft, ob diese überhaupt möglich sind. Im Screening der Grenzfrequenz wurde ermittelt, dass die Grenzfrequenz nur von den Parametern der Soll-Amplitude und der Schweißzeit abhängt. Allerdings tritt die Grenzfrequenz nicht bei jeder Soll-Amplitude und Schweißzeit auf, sondern nur bei langen Schweißzeiten und großen Soll-Amplituden (siehe Abbildung 32).

Das bedeutet für das Erstellen des Versuchsplans für die Detailanalyse der Grenzfrequenz, dass zuerst die Versuchsräumeinschränkungen ermittelt werden müssen (siehe rote Linie Abbildung 32). Hierfür wurde für die maximale Soll-Amplitude die Schweißzeit ermittelt, bei der die Grenzfrequenz etwa 1060 bis 1150 Herz beträgt. Die Grenzfrequenz 1060 bis 1100 (Rhino-Scanner) beziehungsweise 1150 Herz (Elephant-Scanner) wurde festgelegt, da die folgende Beobachtung gemacht wurde: wenn die Schutzmechanismen den Prozess

bis zu dieser Frequenz nicht unterbrochen haben, dann werden sie den Prozess auch bei höheren Frequenzen nicht mehr unterbrechen. Eine Erklärung hierfür wurde jedoch nicht gefunden. Nachdem der Versuchsraum, in dem Grenzfrequenzen auftreten, bestimmt war, wurde wieder ein Versuchsplan mit einem Space filling Design und anschließendem optimalen Versuchsplan erstellt und die Grenzfrequenzen in diesem Bereich bestimmt (Versuchsplan siehe Anhang).

a) Rhino-Scanner



b) Elephant-Scanner

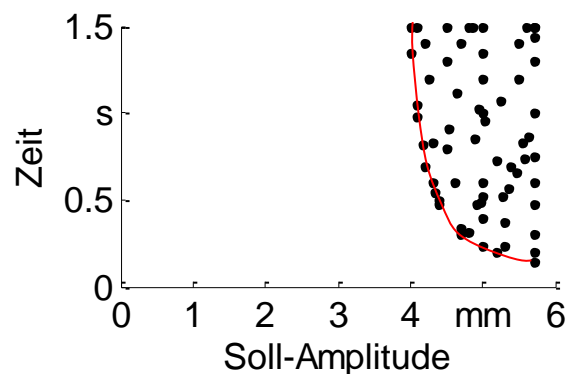


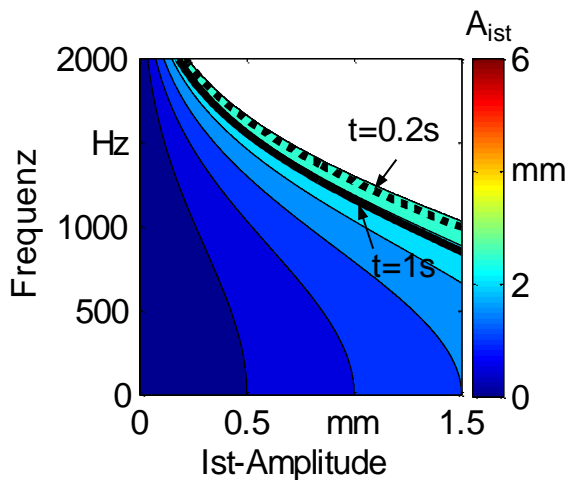
Abbildung 32: Bereich des Rhino-Scanners (a) und des Elephant-Scanners (b), in dem Grenzfrequenzen in Abhängigkeit der Soll-Amplitude und der Schweißzeit auftreten

Um die Grenzfrequenz mit einem Regressionsmodell zu beschreiben wurden verschiedene Gleichungen auf ihre Eignung überprüft. Dabei konnte keine Gleichung gefunden werden, die für den Rhino-Scanner und den Elephant-Scanner gleichzeitig ein adjustiertes Bestimmtheitsmaß von besser 0,9 erreichen kann (siehe Abbildung 34). Ein Grund hierfür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit, dass die Schutzmechanismen der beiden Scanner verschieden sind, und auch in jedem Scanner mehrere Schutzmechanismen integriert sind. Einige Gleichungen konnten für einen einzelnen Scanner eine Güte des adjustierten Bestimmtheitsmaßes  $R^2_{\text{adj}}$  von über 0,95 erreichen, wie z.B. Gleichung ( 36 ) für den Elephant-Scanner. Allerdings besitzen diese Gleichungen einen systematischen Fehler. Das heißt, in bestimmten Bereichen wurden immer höhere Grenzfrequenzen berechnet als im Versuch gemessen wurden, während in anderen Bereichen immer zu niedrige Grenzfrequenzen berechnet wurden. Ein weiteres Problem bei Verwendung von mathematischen Gleichungen ist, dass diese außerhalb des Bereichs, in dem Grenzfrequenzen auftreten (siehe Abbildung 32), ebenfalls Grenzfrequenzen berechnen können. Da kein geeignetes Regressionsmodell gefunden wurde, das den geforderten Ansprüchen gerecht wird, wurde die Grenzfrequenz mit einem linearen Inter-



polationsmodell in Matlab modelliert. Der Vorteil bei der Verwendung des Interpolationsmodells ist, dass außerhalb des Versuchsraums nicht extrapoliert werden kann und somit in Bereichen, in denen keine Grenzfrequenz auftritt auch keine Grenzfrequenz berechnet werden kann. Außerdem sind die Grenzfrequenzen sehr gut reproduzierbar, d.h. bei mehrmaligem Wiederholen bei denselben Einstellungen der Schweißzeit und der Soll-Amplitude weichen die Grenzfrequenzen nur selten voneinander ab. Den Einfluss der Grenzfrequenz auf die maximal möglichen Ist-Amplituden ist in Abbildung 33 dargestellt. Die Grenzfrequenz verhindert, dass für längere Schweißzeiten hohe Ist-Amplituden möglich sind.

a) Rhino-Scanner: Erreichbare Ist-Amplitude für Grenzfrequenz für  $t=0.2\text{s}$  (gepunktet) und  $t=1.0\text{s}$  (Linie)



b) Elephant-Scanner: Erreichbare Ist-Amplitude für Grenzfrequenz für  $t=0.2\text{s}$  (gepunktet) und  $1.5\text{s}$  (Linie)

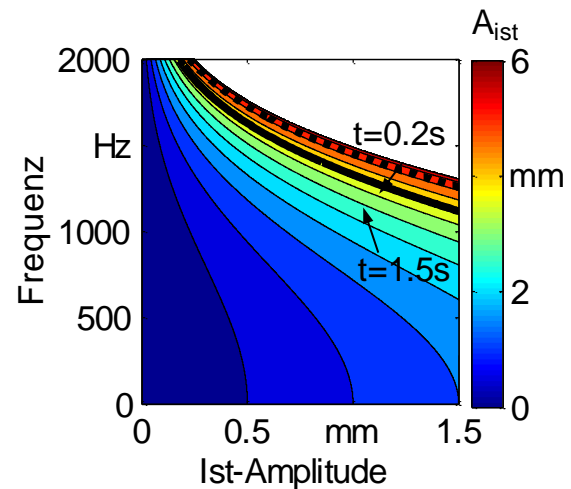


Abbildung 33: Mögliche Ist-Amplituden bei Beachten der Grenzfrequenz

Funktion	$R^2_{\text{adi}}$ Elephant	$R^2_{\text{adj}}$ Rhino
$y = a + b \cdot A + d \cdot A^2 + \frac{c}{t}$	0.9406	0.6885
$y = a + b \cdot A + d \cdot A^2 + \frac{c}{t} + \frac{e \cdot A}{t}$	0.9662	0.8
$y = a + b \cdot A + d \cdot A^2 + \frac{c}{t} + \frac{f}{t^2}$	0.9409	0.7843
$y = a + b \cdot A + d \cdot A^2 + \frac{c}{t} + \frac{f}{t^2} + \frac{e \cdot A}{t}$	0.9747	0.8225

Funktion	$R^2_{\text{adj}}$ Elephant	$R^2_{\text{adj}}$ Rhino
$y = a + b \cdot t + d \cdot t^2 + \frac{c}{A}$	0.9037	0.8258
$y = a + b \cdot t + d \cdot t^2 + \frac{c}{A} + \frac{f}{A^2} + \frac{e \cdot A}{A} + \frac{g}{A^3}$	-7.189	0.8909
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{d}{A}$	0.9357	0.6211
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{d}{A} + \frac{f}{t \cdot A}$	0.9473	0.8166
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} + \frac{d}{A} + \frac{e}{A^2}$ ( 36 )	0.9415	0.7866
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} + \frac{d}{A} + \frac{e}{A^2} + \frac{f}{t \cdot A}$	0.9788	0.8317
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} + \frac{d}{A} + \frac{e}{A^2} + \frac{g}{t^2 \cdot A^2}$	0.9717	0.8038
$y = a + \frac{b}{t} + \frac{c}{t^2} + \frac{d}{A} + \frac{e}{A^2} + \frac{f}{t \cdot A} + \frac{g}{t^2 \cdot A^2}$	0.9784	0.8697

Abbildung 34: Verschiedene Gleichungen zum Beschreiben der Grenzfrequenz

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung ein Regressionsmodell entwickelt, mit der die Oszillationsfähigkeit von Galvanometerscannern beschrieben werden kann. Hierfür wurden die für die Oszillationsfähigkeit signifikanten Faktoren mit Methoden der statistischen Versuchsplanung ermittelt und untersucht. Die Oszillationsfähigkeit setzt sich aus dem Systemverhalten und der dynamischen Leistungsfähigkeit des Galvanometerscanners zusammen. Das Systemverhalten beschreibt die Abhängigkeit der Ist-Amplitude von den Eingangsfaktoren Soll-Amplitude und Oszillationsfrequenz mit einem gaußförmigen Modell. Dabei wird die Ist-Amplitude umso stärker gedämpft, je größer die Oszillationsfrequenz ist. Die Leistungsfähigkeit hängt von den Faktoren Soll-Amplitude und Schweißzeit ab und beschreibt, welche maximalen Frequenzen bei den geforderten Eingangsgrößen möglich sind. Da keine Gleichung die Leistungsfähigkeit mit den geforderten Anforderungen beschreiben kann, wurde zum Beschreiben der Leistungsfähigkeit ein lineares Interpolationsmodell mit Hilfe von Matlab gebildet. Mit der erarbeiteten Methode kann der Nutzer mit der gewünschten Ist-Amplitude und Frequenz die dafür nötige einzustellende Soll-Amplitude berechnen oder graphisch bestimmen. In einem weiteren Schritt kann dann überprüft werden, ob die dynamische Leistungsfähigkeit des Scanners bei den gewünschten Einstellungen möglich ist. In dieser Arbeit wurde die Oszillationsfähigkeit von dem Rhino-Scanner und dem Elephant-Scanner bestimmt und miteinander verglichen. Das Systemverhalten der beiden Scanner ist dabei fast identisch. Die Leistungsfähigkeit des Elephant-Scanners ist allerdings deutlich höher wie die des Rhino-Scanners.

Die Auslenkung von Galvanometerelementen erfolgt in Abhängigkeit zur eingehenden Stromstärke und der Oszillationsfrequenz. Da die genaue Position des Galvanometerelements für die Regelung des Scanners benötigt wird und somit ohnehin aufgezeichnet wird, könnte durch Messen der eingehenden Stromstärken und durch Berechnen der Ist-Amplitude aus der Position des Galvanometerelements eine Methode entwickelt werden, mit der sich die Oszillationsfähigkeit von Galvanometerelementen computergesteuert bestimmen lässt. In einem Folgeschritt könnten die Erkenntnisse in einem Modell in den Scanner so implementiert werden, dass der Nutzer des Galvanometerscanners die gewünschte Ist-Amplitude eingibt und von dem Modell die dafür nötigen Stromstärken berechnet werden.

## 7 Literaturverzeichnis

Galvos|Scanning Mirrors|Optical Scanners 2011

Galvos|Scanning Mirrors|Optical Scanners (2011).  
<http://www.camtech.com/index.html>, 07.11.2012.

Berend et al. 2005

Berend, O.; Haferkamp, H.; Meier, O.; Engelbrecht, L. (2005): High-frequency beam oscillating to increase the process stability during laser welding with high melt pool dynamics. In: LIA (Hg.): Congress proceedings of ICALEO 2005: Laser Institute of America, S. 1032–1041.

DVS 2006

DVS (Hg.) (2006): Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 13600 N. Hochfrequentes Strahlpendeln zur Erhöhung der Prozessstabilität beim Laserstrahlschweißen mit hoher Schmelzbaddynamik (DVS-Nr.: 6.049).

Fahrmeir et al. 2009

Fahrmeir, Ludwig; Kneib, Thomas; Lang, Stefan (2009): Regression. Modelle, Methoden und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin ;, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-01836-7.

Gedicke et al. 2007

Gedicke, J.; Olowinsky, A.; Artal, J.; Gillner, A. (2007): Influence of temporal and spatial laser power modulation on melt pool dynamics. In: LIA (Hg.): Congress proceedings of ICALEO 2007. Orlando, Fla: Laser Institute of America, S. 816–822.

Goebel et al. 2000

Goebel, Gunther; Havrilla, David; Wetzig, Andreas; Beyer, Eckhard (2000): Laser Welding with Long Focal Length Optics. In: LIA (Hg.): Congress proceedings of ICALEO 2000. Dearborn: Laser Institute of America, S. 28–37.

Kraetzsch et al. 2011

Kraetzsch, M.; Standfuss, J.; Klotzbach, A.; Kaspar, J.; Brenner, B.; Beyer, E. (2011): Laser Beam Welding with High-Frequency Beam Oscillation: Welding of Dissimilar Materials with Brilliant Fibre Lasers. In: M. Schmidt, M. F. Zaeh, T. Graf und A. Ostendorf (Hg.): LiM - Lasers in Manufacturing 2011. Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing, Bd. 6. München, S. 142–149.

MATLAB 2011

MATLAB (2011): Goodness-of-Fit Statistics. In: MATLAB (Hg.): Hilfe. MATLAB R2011b.

Mavany 2010

Mavany, Michael (2010): Diplomarbeit im Bereich Elektronenstrahlschweißen

Papula 2008

Papula, Lothar (2008): Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 5. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner. ISBN: 978-3-8348-0225-5

Poprawe et al. 2009

Poprawe, R.; Schmitt, F.; Mehlmann, B.; Olowinsky, A.; Gillner, A. (2009): Systemtechnik zur örtlichen Leistungsmodulation beim Laserstrahl-Mikroschweißen. In: F. Vollertsen, S. Büttgenbach, O. Kraft und W. Michaeli (Hg.): 4. Kolloquium Mikroproduktion. Bremen: BIAS-Verlag.

Scheffler 1997

Scheffler, Eberhard (1997): Statistische Versuchsplanung und -auswertung. Eine Einführung für Praktiker ; 186 Tabellen. 3. Aufl. Stuttgart: Dt. Verl. für Grundstoffindustrie. ISBN 3-342-00366-9

Schmitt et al. 2008

Schmitt, F.; Funck, M.; Boglea, A.; Poprawe, R. (2008): Development and application of miniaturized scanners for laser beam micro-welding. In: *Microsyst Technol* 14 (12), S. 1861–1869.

Gedicke et al. 2007

Schmitt, F.; Mehlmann, B.; Gedicke, J.; Olowinsky, A.; Gillner, A.; Poprawe, R. (2010): Laser Beam Micro Welding With High Brilliant Fiber Lasers. In: *JLMN-Journal of Laser Micro/Nanoengineering Vol. 5, No. 3, 2010* (Vol. 5, No. 3),

Schweier et al. 2011

Schweier, M.; Zaeh, Michael F.; Reppich, J.; Hatwig, J. (2011): Single Mode Fiber Laser Beam Welding with Superposed Beam Oscillation. In: Laser Institute of America (Hg.): Proceedings of the 30th International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. ICALEO 2011. Orlando, FL, 23.-27.10.2011. Orlando: LIA, S. 536–546.

Siebertz et al. 2010

Siebertz, Karl; van Bebber, David Theo; Hochkirchen, Thomas (2010): Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DOE). 1. Aufl. Heidelberg, Dordrecht [u.a.]: Springer. ISBN 978-3-642-05492-1

Standfuß et al. 2010a

Standfuß, J.; Klotzbach, A.; Heitmanek, M.; Krätzsche, M. (2010a): Laser beam welding with high-frequency beam oscillation. welding of dissimilar materials with brilliant fiber lasers. In: Fraunhofer-Institut Werkstoff- und Strahltechnik (Hg.): Internationales Laser-Symposium Fiber and Disc (FiSC 2010). 6. Internationaler Workshop "Faserlaser". Stuttgart: Fraunhofer Verlag.

Zaeh et al. 2010

Zaeh, M. F.; Musiol, J.; Moesel, Johannes (2010): Methodical Qualification of Scanner Systems for Remote Laser Cutting. In: LIA (Hg.): Congress proceedings of ICALEO 2010. Orlando, Fla: Laser Institute of America (LIA pub #613).

## 8 Anhang

### 8.1 Hinweise

Bei den Frequenzen  $f = 100 \text{ Hz}$  und  $f = 1000 \text{ Hz}$  wurden Sprünge in der Ist-Amplitude im Vergleich zu größeren und kleineren Frequenzen beobachtet. Das heißt, dass sich bei einer Soll-Amplitude von z.B. 3 mm bei 999 Hz und bei 1001 Hz komplett verschiedene Amplituden wie bei 1000 Hz ergeben. Eine mögliche Ursache ist eine fehlerhafte Programmierung mit einem größer- bzw. kleiner Zeichen (</>).

Nach dem Durchführen einer Oszillation beendet die Arges Software zwar die Vorschubbewegung und Laserleistung, allerdings hört der Scanner nicht mit dem „wobbeln“ auf und fährt weiter mit der zuletzt eingegebenen Frequenz und Soll-Amplitude auf einem Punkt, was zum Überhitzen des Scanners führen kann. Daher wird geraten, nach jeder Oszillation eine Gerade ohne Oszillation anzufügen, damit die letzte gefahrene Strecke ohne Oszillation ist und der Scanner sich danach nicht mehr mit einer Frequenz bewegt.

### 8.2 Daten Experimente

#### 8.2.1 Screening Grenzfrequenz

Scanner	Rhino		Elephant	
Stufe	-	+	-	+
x [mm]	0	60	0	200
y [mm]	0	60	0	200
$\rho$ [°]	0	90	0	90
A [mm]	2	10	6	10
v [m/min]	2	10	2	10
l [mm]	20	50	20	50

Nr	x	y	$\rho$	A	v	l	F <sub>Grenz</sub> [Hz] Rhino	f <sub>Grenz</sub> [Hz] Elephant
Nr.1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	2000	720
Nr.2	-1	1	-1	-1	-1	-1	2000	760

Nr	x	y	$\rho$	A	v	l	F <sub>Grenz</sub> [Hz] Rhino	f <sub>Grenz</sub> [Hz] Elephant
Nr.3	1	1	-1	-1	-1	-1	2000	780
Nr.4	1	-1	-1	-1	-1	-1	2000	740
Nr.5	-1	-1	-1	-1	-1	1	700	680
Nr.6	-1	1	-1	-1	-1	1	700	720
Nr.7	1	1	-1	-1	-1	1	700	760
Nr.8	1	-1	-1	-1	-1	1	700	700
Nr.9	-1	-1	-1	-1	1	-1	2000	960
Nr.10	-1	1	-1	-1	1	-1	2000	1020
Nr.11	1	1	-1	-1	1	-1	2000	1000
Nr.12	1	-1	-1	-1	1	-1	2000	960
Nr.13	-1	-1	-1	-1	1	1	2000	780
Nr.14	-1	1	-1	-1	1	1	2000	820
Nr.15	1	1	-1	-1	1	1	2000	860
Nr.16	1	-1	-1	-1	1	1	2000	820
Nr.17	-1	-1	-1	1	-1	-1	325	500
Nr.18	-1	1	-1	1	-1	-1	325	360
Nr.19	1	1	-1	1	-1	-1	325	540
Nr.20	1	-1	-1	1	-1	-1	325	360
Nr.21	-1	-1	-1	1	-1	1	250	480
Nr.22	-1	1	-1	1	-1	1	250	360
Nr.23	1	1	-1	1	-1	1	250	520
Nr.24	1	-1	-1	1	-1	1	250	360
Nr.25	-1	-1	-1	1	1	-1	425	600
Nr.26	-1	1	-1	1	1	-1	425	580
Nr.27	1	1	-1	1	1	-1	425	600
Nr.28	1	-1	-1	1	1	-1	425	580
Nr.29	-1	-1	-1	1	1	1	375	540
Nr.30	-1	1	-1	1	1	1	375	380
Nr.31	1	1	-1	1	1	1	375	560
Nr.32	1	-1	-1	1	1	1	375	380
Nr.33	-1	-1	1	-1	-1	-1	2000	720
Nr.34	-1	1	1	-1	-1	-1	2000	760
Nr.35	1	1	1	-1	-1	-1	2000	780
Nr.36	1	-1	1	-1	-1	-1	2000	740
Nr.37	-1	-1	1	-1	-1	1	700	680
Nr.38	-1	1	1	-1	-1	1	700	720
Nr.39	1	1	1	-1	-1	1	700	740
Nr.40	1	-1	1	-1	-1	1	700	700

Nr	x	y	$\rho$	A	v	l	F <sub>Grenz</sub> [Hz] Rhino	f <sub>Grenz</sub> [Hz] Elephant
Nr.41	-1	-1	1	-1	1	-1	2000	960
Nr.42	-1	1	1	-1	1	-1	2000	1040
Nr.43	1	1	1	-1	1	-1	2000	1000
Nr.44	1	-1	1	-1	1	-1	2000	960
Nr.45	-1	-1	1	-1	1	1	2000	780
Nr.46	-1	1	1	-1	1	1	2000	820
Nr.47	1	1	1	-1	1	1	2000	840
Nr.48	1	-1	1	-1	1	1	2000	800
Nr.49	-1	-1	1	1	-1	-1	325	500
Nr.50	-1	1	1	1	-1	-1	325	360
Nr.51	1	1	1	1	-1	-1	325	540
Nr.52	1	-1	1	1	-1	-1	325	360
Nr.53	-1	-1	1	1	-1	1	250	480
Nr.54	-1	1	1	1	-1	1	250	380
Nr.55	1	1	1	1	-1	1	250	500
Nr.56	1	-1	1	1	-1	1	250	360
Nr.57	-1	-1	1	1	1	-1	425	600
Nr.58	-1	1	1	1	1	-1	425	580
Nr.59	1	1	1	1	1	-1	425	600
Nr.60	1	-1	1	1	1	-1	425	580
Nr.61	-1	-1	1	1	1	1	375	520
Nr.62	-1	1	1	1	1	1	375	380
Nr.63	1	1	1	1	1	1	375	560
Nr.64	1	-1	1	1	1	1	375	380

## 8.2.2 Zeit zusammenfassen

### Elephant-Scanner

Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]	Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]
Nr.1	5,7	980	0,15	Nr.23	5	840	0,6
Nr.2	5,7	1000	0,15	Nr.24	5	840	0,6
Nr.3	5	960	0,3	Nr.25	5,7	740	0,6
Nr.4	5	960	0,3	Nr.26	5,7	740	0,6
Nr.5	5,7	820	0,3	Nr.27	5,7	740	0,6
Nr.6	5,7	820	0,3	Nr.28	5,7	740	0,6
Nr.7	5	920	0,38	Nr.29	5,7	740	0,6



Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]	Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]
Nr.8	5	900	0,38	Nr.30	4,2	1100	0,7
Nr.9	5,7	800	0,38	Nr.31	4,2	1100	0,7
Nr.10	5,7	780	0,38	Nr.32	5,7	740	0,8
Nr.11	4,4	1120	0,45	Nr.33	5,7	740	0,8
Nr.12	4,4	1100	0,45	Nr.34	5	820	0,75
Nr.13	5,7	760	0,465	Nr.35	5	820	0,75
Nr.14	5,7	780	0,465	Nr.36	5,58	740	0,84
Nr.15	4,98	860	0,48	Nr.37	5,58	740	0,84
Nr.16	4,98	880	0,48	Nr.38	4,1	1080	1
Nr.17	4,3	1060	0,6	Nr.39	4,1	1060	1
Nr.18	4,3	1040	0,6	Nr.40	5	800	1,2
Nr.19	4,3	1040	0,6	Nr.41	5	800	1,2
Nr.20	5	840	0,6	Nr.42	5,7	720	1,2
Nr.21	5	840	0,6	Nr.43	5,7	720	1,2
Nr.22	5	840	0,6				

## Rhino-Scanner

Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]	Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]
Nr.1	2,4	1040	0,6	Nr.39	6	500	0,75
Nr.2	2,4	1040	0,6	Nr.40	6	500	0,75
Nr.3	2,4	810	1	Nr.41	7	460	0,6
Nr.4	2,4	800	1	Nr.42	7	460	0,6
Nr.5	2,5	1000	0,6	Nr.43	7	430	0,6
Nr.6	2,5	970	0,6	Nr.44	8	430	0,6
Nr.7	2,75	860	0,6	Nr.45	8	430	0,6
Nr.8	2,75	860	0,6	Nr.46	8	370	0,6
Nr.9	3	790	0,6	Nr.47	8	420	0,75
Nr.10	3	790	0,6	Nr.48	8	420	0,75
Nr.11	3	790	0,75	Nr.49	8	420	0,75
Nr.12	3	780	0,75	Nr.50	8	420	0,75
Nr.13	3	780	0,75	Nr.51	9	400	0,6
Nr.14	3	780	0,75	Nr.52	9	400	0,6
Nr.15	4	690	0,3	Nr.53	9,62	330	0,98
Nr.16	4	680	0,36	Nr.54	9,62	330	0,98
Nr.17	4	670	0,4	Nr.55	10	420	0,18
Nr.18	4	660	0,48	Nr.56	10	410	0,18

Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]	Nr	A <sub>Soll</sub> [mm]	f [Hz]	t [s]
Nr.19	4	640	0,6	Nr.57	10	380	0,6
Nr.20	4	640	0,6	Nr.58	10	380	0,6
Nr.21	4	600	0,75	Nr.59	10	340	0,75
Nr.22	4	590	0,75	Nr.60	10	370	0,75
Nr.23	4	590	0,75	Nr.61	10	370	0,75
Nr.24	4	600	0,75	Nr.62	10	370	0,75
Nr.25	5	580	0,375	Nr.63	10	340	0,9
Nr.26	5	580	0,375	Nr.64	10	330	0,9
Nr.27	5	570	0,45	Nr.65	10	320	0,9
Nr.28	5	560	0,45	Nr.66	2,6	910	0,6
Nr.29	5	560	0,52	Nr.67	2,6	910	0,6
Nr.30	5	570	0,52	Nr.68	2,6	910	0,6
Nr.31	5	560	0,6	Nr.69	2,7	1070	0,26
Nr.32	5	560	0,6	Nr.70	2,7	1030	0,26
Nr.33	5,6	450	1	Nr.71	2,8	760	0,6
Nr.34	5,6	450	1	Nr.72	2,8	750	0,6
Nr.35	6	500	0,6	Nr.73	2,83	880	0,4
Nr.36	6	500	0,6	Nr.74	2,83	860	0,4
Nr.37	6	500	0,75	Nr.75	2,9	930	0,26
Nr.38	6	460	0,75	Nr.76	2,9	910	0,26

### 8.2.3 Screening Dämpfung

Scanner	Rhino		Elephant	
Stufe	-	+	-	+
x [mm]	0	60	0	200
y [mm]	0	60	0	200
ρ [°]	0	90	0	90
f [Hz]	200	800	100	700
v [m/min]	2	10	2	10
A <sub>Soll</sub>	1	4	1	6

Nr	x	y	ρ	A <sub>Soll</sub>	v	A <sub>Soll</sub>	A <sub>ist</sub> [mm] Rhino	A <sub>ist</sub> [mm] Elephant
Nr.1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1,01	0,93
Nr.2	1	-1	-1	-1	-1	-1	1	0,92

Nr	x	y	$\rho$	$A_{\text{Soll}}$	v	$A_{\text{Soll}}$	$A_{\text{ist}}$ [mm] Rhino	$A_{\text{ist}}$ [mm] Elephant
Nr.3	-1	1	-1	-1	-1	-1	0,97	0,94
Nr.4	1	1	-1	-1	-1	-1	0,97	0,925
Nr.5	-1	-1	1	-1	-1	-1	0,99	0,94
Nr.6	1	-1	1	-1	-1	-1	1,02	0,95
Nr.7	-1	1	1	-1	-1	-1	1,01	0,93
Nr.8	1	1	1	-1	-1	-1	1,01	0,905
Nr.9	-1	-1	-1	1	-1	-1	0,8	0,755
Nr.10	1	-1	-1	1	-1	-1	0,78	0,555
Nr.11	-1	1	-1	1	-1	-1	0,78	0,625
Nr.12	1	1	-1	1	-1	-1	0,77	0,575
Nr.13	-1	-1	1	1	-1	-1	0,8	0,79
Nr.14	1	-1	1	1	-1	-1	0,79	0,685
Nr.15	-1	1	1	1	-1	-1	0,81	0,67
Nr.16	1	1	1	1	-1	-1	0,8	0,665
Nr.17	-1	-1	-1	-1	1	-1	1,03	0,95
Nr.18	1	-1	-1	-1	1	-1	1,01	0,95
Nr.19	-1	1	-1	-1	1	-1	1,01	0,97
Nr.20	1	1	-1	-1	1	-1	0,97	0,955
Nr.21	-1	-1	1	-1	1	-1	1,01	0,945
Nr.22	1	-1	1	-1	1	-1	0,96	0,97
Nr.23	-1	1	1	-1	1	-1	1,01	0,955
Nr.24	1	1	1	-1	1	-1	0,96	0,975
Nr.25	-1	-1	-1	1	1	-1	0,79	0,775
Nr.26	1	-1	-1	1	1	-1	0,78	0,66
Nr.27	-1	1	-1	1	1	-1	0,81	0,67
Nr.28	1	1	-1	1	1	-1	0,76	0,67
Nr.29	-1	-1	1	1	1	-1	0,83	0,915
Nr.30	1	-1	1	1	1	-1	0,79	0,68
Nr.31	-1	1	1	1	1	-1	0,77	0,705
Nr.32	1	1	1	1	1	-1	0,79	0,685
Nr.33	-1	-1	-1	-1	-1	1	3,94	5,715
Nr.34	1	-1	-1	-1	-1	1	3,92	5,7
Nr.35	-1	1	-1	-1	-1	1	3,97	5,83
Nr.36	1	1	-1	-1	-1	1	3,91	5,76
Nr.37	-1	-1	1	-1	-1	1	3,96	5,79
Nr.38	1	-1	1	-1	-1	1	3,94	5,66
Nr.39	-1	1	1	-1	-1	1	3,99	5,685
Nr.40	1	1	1	-1	-1	1	3,92	5,79
Nr.41	-1	-1	-1	1	-1	1	2,84	3,975

Nr	x	y	$\rho$	A <sub>Soll</sub>	v	A <sub>Soll</sub>	A <sub>ist</sub> [mm] Rhino	A <sub>ist</sub> [mm] Elephant
Nr.42	1	-1	-1	1	-1	1	2,87	3,935
Nr.43	-1	1	-1	1	-1	1	2,85	4,105
Nr.44	1	1	-1	1	-1	1	2,84	4,005
Nr.45	-1	-1	1	1	-1	1	2,8	4,05
Nr.46	1	-1	1	1	-1	1	2,82	4,125
Nr.47	-1	1	1	1	-1	1	2,91	4,145
Nr.48	1	1	1	1	-1	1	2,86	4,14
Nr.49	-1	-1	-1	-1	1	1	3,99	5,725
Nr.50	1	-1	-1	-1	1	1	4,01	5,68
Nr.51	-1	1	-1	-1	1	1	4,06	5,83
Nr.52	1	1	-1	-1	1	1	4,01	5,75
Nr.53	-1	-1	1	-1	1	1	4,01	5,77
Nr.54	1	-1	1	-1	1	1	4,01	5,7
Nr.55	-1	1	1	-1	1	1	4,07	5,755
Nr.56	1	1	1	-1	1	1	4,01	5,6
Nr.57	-1	-1	-1	1	1	1	2,87	3,99
Nr.58	1	-1	-1	1	1	1	2,88	3,965
Nr.59	-1	1	-1	1	1	1	2,89	4,1
Nr.60	1	1	-1	1	1	1	2,88	3,97
Nr.61	-1	-1	1	1	1	1	2,91	4,18
Nr.62	1	-1	1	1	1	1	2,81	4,135
Nr.63	-1	1	1	1	1	1	2,95	4,105
Nr.64	1	1	1	1	1	1	2,87	4,13

### 8.2.4 Detailanalyse Dämpfung Rhino-Scanner

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.1	0,63	1875	0,14
Nr.2	0,70	703,125	0,53
Nr.3	0,78	468,75	0,69
Nr.4	0,79	119	0,76
Nr.5	0,79	207	0,755
Nr.6	0,79	1004	0,41
Nr.7	0,79	1092	0,35
Nr.8	0,79	1269	0,245
Nr.9	0,79	1358	0,255

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.10	0,25	400	0,23
Nr.11	0,79	1446	0,205
Nr.12	0,94	938	0,545
Nr.13	1	2000	0,125
Nr.14	1,02	1640	0,17
Nr.15	1,09	1496	0,285
Nr.16	1,25	1250	0,435
Nr.17	1,41	844	0,95
Nr.18	0,25	800	0,165
Nr.19	1,56	312,5	1,475
Nr.20	1,64	1016	0,885
Nr.21	1,72	1781	0,235
Nr.22	1,88	625	1,49
Nr.23	1,95	1953	0,175
Nr.24	2	2000	0,175
Nr.25	2,03	1219	0,73
Nr.26	2,19	1688	0,305
Nr.27	0,25	1200	0,11
Nr.28	2,24	1711,5	0,295
Nr.29	2,27	891	1,38
Nr.30	2,34	156	2,245
Nr.31	2,5	1500	0,54
Nr.32	2,58	828	1,67
Nr.33	2,73	1623	0,45
Nr.34	2,73	1711	0,37
Nr.35	2,73	1297	0,905
Nr.36	2,81	563	2,365
Nr.37	0,25	1600	0,1
Nr.38	2,89	1766	0,365
Nr.39	2,97	1031	1,55
Nr.40	3	1400	0,79
Nr.41	3	1750	0,35
Nr.42	3	2000	0,225
Nr.43	3,00	195	3
Nr.44	3,00	2000	0,225
Nr.45	2,86	100	2,72
Nr.46	0,25	100	0,225
Nr.47	0,25	2000	0,09
Nr.48	3,00	100	2,91

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.49	1,76	100	1,73
Nr.50	0,25	1905	0,065
Nr.51	1,63	100	1,605
Nr.52	1,49	100	1,46
Nr.53	1,63	1050	0,825
Nr.54	0,25	2000	0,075
Nr.55	1,63	2000	0,135
Nr.56	0,25	195	0,245
Nr.57	3,00	860	1,93
Nr.58	0,31	1062,5	0,16
Nr.59	0,39	265,625	0,37
Nr.60	0,47	531,25	0,4

### 8.2.5 Detailanalyse Dämpfung Elephant-Scanner

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.1	2,98	1050	1,285
Nr.2	0,25	101	0,2
Nr.3	5,70	101	5,53
Nr.4	0,25	1999	0,12
Nr.5	5,70	1999	0,175
Nr.6	0,25	1050	0,145
Nr.7	2,98	101	2,9
Nr.8	2,98	734	1,945
Nr.9	1,61	1366	0,365
Nr.10	4,34	312	4,015
Nr.11	0,93	945	0,4
Nr.12	3,66	1577	0,5
Nr.13	2,29	523	1,86
Nr.14	5,02	1155	1,805
Nr.15	0,59	1788	0,125
Nr.16	3,32	171	3,185
Nr.17	1,95	804	1,16
Nr.18	4,68	1437	0,945
Nr.19	1,27	382	1,14
Nr.20	4,00	1015	1,76
Nr.21	2,63	1648	0,35
Nr.22	5,36	593	4,085

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.23	0,42	1226	0,165
Nr.24	3,15	1858	0,265
Nr.25	1,78	242	1,695
Nr.26	4,51	874	2,435
Nr.27	1,10	1507	0,175
Nr.28	3,83	452	3,28
Nr.29	2,46	1085	0,95
Nr.30	5,19	1718	0,56
Nr.31	0,76	663	0,495
Nr.32	3,49	1296	0,94
Nr.33	2,12	1929	0,19
Nr.34	4,85	124	4,655
Nr.35	1,44	757	0,855
Nr.36	4,17	1390	0,925
Nr.37	2,80	335	2,515
Nr.38	5,53	968	2,615
Nr.39	0,34	1601	0,125
Nr.40	3,06	546	2,415
Nr.41	1,70	1179	0,55
Nr.42	4,42	1812	0,345
Nr.43	1,02	195	0,97
Nr.44	3,74	827	2,12
Nr.45	2,38	1460	0,445
Nr.46	5,10	406	4,45
Nr.47	0,68	1038	0,25
Nr.48	3,40	1671	0,43
Nr.49	2,04	617	1,485
Nr.50	4,76	1249	1,36
Nr.51	1,36	1882	0,15
Nr.52	4,08	265	3,77
Nr.53	2,72	898	1,37
Nr.54	5,44	1530	0,855
Nr.55	0,51	476	0,49
Nr.56	3,23	1109	1,13
Nr.57	1,87	1741	0,2
Nr.58	4,59	687	3,09
Nr.59	3,25	1999	0,185
Nr.60	0,25	196	0,22
Nr.61	0,25	1999	0,105

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.62	5,43	1999	0,345
Nr.63	2,98	101	2,89
Nr.64	0,25	101	0,235
Nr.65	0,52	1999	0,125
Nr.66	0,25	1050	0,145
Nr.67	0,52	101	0,51
Nr.68	5,70	1904	0,42
Nr.69	2,98	1999	0,165
Nr.70	2,98	734	1,92
Nr.71	2,29	523	1,855
Nr.72	4,68	1437	0,955
Nr.73	0,42	1226	0,125
Nr.74	3,83	452	3,275
Nr.75	2,12	1929	0,145
Nr.76	5,53	968	2,65
Nr.77	1,02	195	0,98
Nr.78	3,40	1671	0,435
Nr.79	2,72	898	1,385
Nr.80	4,59	687	3,135
Nr.81	0,85	1413	0,185
Nr.82	4,25	1202	1,41
Nr.83	1,66	429	1,425
Nr.84	5,06	1905	0,35
Nr.85	1,31	1132	0,43
Nr.86	3,19	109	3,1
Nr.87	2,51	1585	0,355
Nr.88	4,89	812	2,865
Nr.89	0,38	601	0,32
Nr.90	3,78	1515	0,695
Nr.91	2,08	1304	0,525
Nr.92	5,49	343	5,03
Nr.93	1,23	1819	0,15
Nr.94	3,61	1046	1,52
Nr.95	2,93	273	2,75
Nr.96	4,36	1749	0,405
Nr.97	0,61	788	0,3
Nr.98	4,02	577	3,1
Nr.99	1,80	1491	0,32
Nr.100	5,21	1280	1,515



Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.101	1,46	507	1,17
Nr.102	3,08	1983	0,195
Nr.103	2,40	960	1,115
Nr.104	4,78	187	4,56
Nr.105	0,53	1663	0,13
Nr.106	3,93	890	2,09
Nr.107	2,23	679	1,53
Nr.108	5,64	1405	1,245
Nr.109	1,00	1194	0,315
Nr.110	3,38	421	2,93
Nr.111	2,70	1897	0,19
Nr.112	4,57	1124	1,7
Nr.113	0,82	163	0,79
Nr.114	4,23	1640	0,525
Nr.115	1,76	866	0,92
Nr.116	5,17	656	3,595
Nr.117	1,42	1569	0,245
Nr.118	3,29	1359	0,755
Nr.119	2,61	314	2,42
Nr.120	5,00	1791	0,49
Nr.121	0,26	1017	0,16
Nr.122	3,67	244	3,49
Nr.123	1,96	1720	0,195
Nr.124	5,37	760	3,355
Nr.125	1,11	549	0,805
Nr.126	3,50	1463	0,675
Nr.127	2,82	1252	0,825
Nr.128	4,43	479	3,715
Nr.129	0,69	1955	0,135
Nr.130	4,09	994	1,815
Nr.131	1,88	221	1,78
Nr.132	5,28	1697	0,58
Nr.133	1,54	924	0,765
Nr.134	3,03	713	1,975
Nr.135	2,35	1377	0,515
Nr.136	4,73	1166	1,615
Nr.137	0,47	393	0,385
Nr.138	3,88	1869	0,33
Nr.139	2,18	1096	0,85

Nr.	Soll-Amplitude [mm]	Frequenz [Hz]	Ist-Amplitude [mm]
Nr.140	5,58	135	5,38
Nr.141	1,07	1611	0,17
Nr.142	3,45	838	1,91
Nr.143	2,77	627	2,015
Nr.144	4,65	1541	0,745
Nr.145	0,90	1330	0,24
Nr.146	4,31	369	3,845
Nr.147	1,64	1845	0,17
Nr.148	5,05	1072	2,09
Nr.149	1,30	299	1,18
Nr.150	3,18	1775	0,3
Nr.151	2,50	752	1,55
Nr.152	4,88	541	3,895
Nr.153	0,37	1455	0,14
Nr.154	3,77	1244	1,295
Nr.155	2,07	471	1,75
Nr.156	5,48	1947	0,4
Nr.157	1,22	986	0,52
Nr.158	3,60	213	3,405
Nr.159	2,92	1689	0,325
Nr.160	4,41	916	2,195
Nr.161	0,67	705	0,425
Nr.162	4,07	1431	0,87
Nr.163	1,86	1221	0,64
Nr.164	5,26	447	4,465
Nr.165	1,52	1923	0,13
Nr.166	3,13	1150	1,115
Nr.167	2,45	106	2,38
Nr.168	4,84	1582	0,69
Nr.169	0,58	809	0,345

### 8.2.6 Detailanalyse Grenzfrequenz Rhino-Scanner

Nr	Soll-Amplitude [mm]	l [mm]	v [m/min]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.1	3	20	7.20	0.17	980
Nr.2	3	20	4.67	0.26	890
Nr.3	3	47	10.00	0.28	880

Nr	Soll-Amplitude [mm]	l [mm]	v [m/min]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.4	3	47	7.33	0.38	830
Nr.5	3	73	10.00	0.44	820
Nr.6	3	20	2.00	0.60	790
Nr.7	3	47	4.67	0.60	790
Nr.8	3	100	8.00	0.75	720
Nr.9	3	100	7.33	0.82	670
Nr.10	3	73	4.67	0.94	620
Nr.11	3	100	6.00	1.00	640
Nr.12	2.93	26	7.43	0.21	960
Nr.13	2.9	20	7.20	0.17	1010
Nr.14	2.9	20	4.67	0.26	930
Nr.15	2.9	47	10.00	0.28	910
Nr.16	2.83	47	7.33	0.38	880
Nr.17	2.83	73	10.00	0.44	860
Nr.18	2.8	20	4.67	0.26	980
Nr.19	2.8	47	10.00	0.28	950
Nr.20	2.8	47	5.67	0.50	840
Nr.21	2.8	73	7.33	0.60	760
Nr.22	2.8	20	2.00	0.60	750
Nr.23	2.8	68	4.53	0.90	640
Nr.24	2.78	77	4.62	1.00	680
Nr.25	2.77	22	3.77	0.35	940
Nr.26	2.77	40	3.56	0.68	720
Nr.27	2.75	20	2.00	0.60	860
Nr.28	2.7	20	4.67	0.26	1070
Nr.29	2.7	47	10.00	0.28	1030
Nr.30	2.67	47	7.33	0.38	950
Nr.31	2.67	73	10.00	0.44	930
Nr.32	2.63	55	6.23	0.53	920
Nr.33	2.63	100	7.33	0.82	710
Nr.34	2.6	47	6.67	0.42	910
Nr.35	2.6	20	2.00	0.60	910
Nr.36	2.6	73	4.67	0.94	690
Nr.37	2.59	50	3.78	0.79	780
Nr.38	2.5	47	7.33	0.38	1070
Nr.39	2.5	73	10.00	0.44	1030
Nr.40	2.5	100	10.00	0.60	950
Nr.41	2.45	22	3.01	0.44	1090

Nr	Soll-Amplitude [mm]	l [mm]	v [m/min]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.42	2.4	86	7.14	0.72	860
Nr.43	2.4	67	4.79	0.84	760
Nr.44	2.4	50	3.00	1.00	800
Nr.45	2.34	28	3.39	0.50	1080
Nr.46	2.27	100	7.33	0.82	810
Nr.47	2.25	38	3.62	0.63	980
Nr.48	2.2	36	3.70	0.58	1020
Nr.49	2.2	73	4.67	0.94	800
Nr.50	2.15	40	3.50	0.69	1020
Nr.51	2.14	26	1.56	1.00	900
Nr.52	2	47	3.84	0.73	1040
Nr.53	2	96	6.55	0.88	920
Nr.54	1.9	100	7.33	0.82	1010
Nr.55	1.8	73	4.67	0.94	1010
Nr.56	1.77	54	3.24	1.00	1040

### 8.2.7 Detailanalyse Grenzfrequenz Elephat-Scanner

Nr	Soll-Amplitude [mm]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.1	4	1,35	1100
Nr.2	4	1,50	1100
Nr.3	4,09	1,50	1020
Nr.4	4,1	0,98	1060
Nr.5	4,1	1,05	1080
Nr.6	4,17	0,82	1060
Nr.7	4,2	0,69	1100
Nr.8	4,2	1,40	980
Nr.9	4,25	1,20	980
Nr.10	4,3	0,60	1040
Nr.11	4,3	0,83	1000
Nr.12	4,34	0,55	1120
Nr.13	4,4	0,49	1060
Nr.14	4,4	0,48	1060
Nr.15	4,5	0,80	920
Nr.16	4,5	1,30	880
Nr.17	4,5	1,50	880
Nr.18	4,53	0,92	900

Nr	Soll-Amplitude [mm]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.19	4,6	0,60	920
Nr.20	4,65	1,12	880
Nr.21	4,7	0,30	1100
Nr.22	4,7	0,34	1020
Nr.23	4,7	1,40	840
Nr.24	4,8	1,50	820
Nr.25	4,8	0,32	1100
Nr.26	4,85	1,50	820
Nr.27	4,88	0,85	840
Nr.28	4,92	0,48	880
Nr.29	4,94	1,02	820
Nr.30	4,96	0,49	880
Nr.31	5	0,24	1040
Nr.32	5	0,40	900
Nr.33	5	0,52	860
Nr.34	5	0,60	840
Nr.35	5	1,00	820
Nr.36	5	1,20	800
Nr.37	5	1,34	800
Nr.38	5	1,50	800
Nr.39	5,02	0,96	820
Nr.40	5,19	0,72	800
Nr.41	5,2	0,20	1060
Nr.42	5,23	1,08	780
Nr.43	5,27	0,52	820
Nr.44	5,3	0,37	860
Nr.45	5,31	0,24	940
Nr.46	5,35	0,57	800
Nr.47	5,39	0,70	780
Nr.48	5,47	0,65	760
Nr.49	5,5	1,20	800
Nr.50	5,5	1,40	740
Nr.51	5,54	0,83	740
Nr.52	5,58	0,73	740
Nr.53	5,61	1,50	720
Nr.54	5,62	0,86	740
Nr.55	5,7	1,43	720
Nr.56	5,7	1,50	720
Nr.57	5,7	0,14	1080

Nr	Soll-Amplitude [mm]	t [s]	F <sub>Grenz</sub> [Hz]
Nr.58	5,7	0,20	880
Nr.59	5,7	0,30	820
Nr.60	5,7	0,48	760
Nr.61	5,7	0,60	740
Nr.62	5,7	0,75	740
Nr.63	5,7	1,00	720
Nr.64	5,7	1,30	720
Nr.65	5,7	1,50	720

**Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Garching, den 30.09.2012

(Devin Basbilar)