



Diplomarbeit

Entwicklung eines Systems zur Positionserfassung eines absenkenden Kreissägeblatts

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplomingenieurs unter der Leitung von

a.o.Univ.-Prof. Dr. Kittl

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Matti Felsner

1025254 (066445)

Rittsteigstraße 18

Rekawinkel

Wien, Jänner 2018

Matti, Felsner

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einen Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Wien, Jänner 2018

Vorname, Nachname

Abstract

A specially developed actuator is to offer a new type of safety device for circular saws for wood-working. The underlying principle is based on the principle that when approaching with human limbs, the saw unit of the circular saw is lowered preventively into the inside of the machine itself. This master thesis deals with the development of a measuring system to determine the position of the circular saw blade during the lowering movement. The activities required for this purpose consisted of selecting a suitable principle from various measuring principles, finding the appropriate supplier and a corresponding product. The selected sensor was then checked for correct functioning in several system tests. The determination of the downtime of the actuator control loop and the time for the complete lowering of the saw blade has been carried out with the help of several test series. To determine a statistically verified result, these test series were evaluated using mathematical criteria. An additional, further development of a holding device for the sensor - consisting of the design, assembly instructions and a cost calculation - was also developed. This development is limited exclusively to the planning of the construction without any physical result.

Ein speziell entwickelter Aktuator soll eine neuartige Sicherheitsvorrichtung bei Kreissägen für die Holzbearbeitung bieten. Das zugrundeliegende Prinzip basiert darauf, dass bei der Annäherung von menschlichen Gliedmaßen das Sägeaggregat der Kreissäge präventiv in das Innere der Maschine abgesenkt wird.

Diese Diplomarbeit befasst sich dabei mit der Entwicklung eines Vermessungssystems zur Ermittlung der Position des Kreissägeblatts während der Absenkbewegung. Die dazu notwendigen Tätigkeiten bestanden darin, aus verschiedenen Messprinzipien ein geeignetes Prinzip auszuwählen, den passenden Lieferanten und ein zugehöriges Produkt zu finden. Der ausgewählte Sensor wurde anschließend in mehreren Systemtests auf korrekte Arbeitsweise kontrolliert. Dabei ist die Ermittlung der Totzeit des Aktuatorregelkreises und die Zeit zur vollständigen Absenkung des Sägeblatts mit Hilfe einiger Versuchsreihen durchgeführt worden. Zur Bestimmung eines statistisch gesicherten Ergebnisses wurden diese Versuchsreihen mit Hilfe mathematischer Kriterien ausgewertet. Eine zusätzliche, weiterführende Entwicklung einer Haltevorrichtung für den Messaufnehmer - bestehend aus der Konstruktion, Montagehinweisen und einer Kostenkalkulation - wurde ebenfalls erarbeitet. Diese Entwicklung beschränkt sich dabei ausschließlich auf die Planung der Konstruktion ohne physischem Resultat.

Inhaltsverzeichnis

I. Einleitung	6
1. Aufgabenstellung	7
2. Aufbau der Holzbearbeitungsmaschine	9
2.1. Aufbau der Kreissäge	9
2.2. Aufbau des Aktuators	9
II. Theoretische Betrachtungen	14
3. Messtechnik	15
3.1. Allgemeine Grundlagen	15
3.1.1. Begriffserklärungen	15
3.1.2. Definitionen von Einheiten	17
3.1.3. Abgeleitete Einheiten	17
3.2. Messabweichung	18
3.2.1. Systematische Messabweichungen	20
3.2.2. Zufällige Messabweichungen	21
3.3. Messkette	24
3.3.1. Aufnahme des Messsignals	24
3.3.2. Multiplex	25
3.3.3. Verstärkung	25
3.3.4. Abtastung und Haltung	27
3.3.5. Analog/Digital Wandlung	28
3.3.6. Anzeige und Verarbeitung	29
3.4. Messsignale	30
3.4.1. Klassifizierung	30
3.5. Messprinzipien	31
3.5.1. Potenziometrisches Messprinzip	32
3.5.2. Optoelektronische Messprinzipien	32
3.5.3. Akustisches Messprinzip	43
3.5.4. Induktives Messprinzip	44
III. Praktische Ausführung	49
4. Messkonzeptentwicklung	50
4.1. Sensorauswahl	50
5. Messsystemtests	54
5.1. Konzeptüberprüfung	54

5.2. Versuchsaufbau	54
5.3. Durchführung	55
5.4. Verarbeitung der Messergebnisse	61
5.5. Fazit	64
6. Entwicklung einer Sensorhaltevorrichtung	67
6.1. Anforderungen der Haltevorrichtung	67
6.2. Konzeptentwicklung der Vorrichtung	68
6.2.1. Planung der Vorrichtung - Erster Entwurf	68
6.2.2. Überarbeitung der Merkmale - Zweiter Entwurf	69
6.2.3. Finalisierung - Dritter Entwurf	70
6.3. Bauteilanforderungen	71
6.3.1. Einfache Lösbarkeit	71
6.3.2. Stufenlose Schwenkung des Sägeblatts	73
6.3.3. Steife Konstruktion	73
6.3.4. Bedienung bei laufender Maschine	74
6.3.5. Einfache Konstruktion	74
6.3.6. Ökonomisch vertretbar	74
6.4. Lieferantenpreise und Stückliste	75
6.5. Montagehinweise	75
7. Zusammenfassung	82
A. Anhang	90
A.1. Weiterführende Konzeptentwicklung	90
A.1.1. Einzelteilzeichnungen	90
A.1.2. Zusammenstellungszeichnungen	104
A.2. Betriebsanleitung	107
A.2.1. Messaufnehmer <i>MICRO-EPSILON ILD1420-500</i>	107
A.2.2. Speicheroszilloskop <i>PicoTechnology PicoScope® 3000 Series</i>	119
A.2.3. Differenzialtastkopf <i>PicoTechnology TA043</i>	123

Teil I.

Einleitung

1. Aufgabenstellung

Das Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik (IFT) der Technischen Universität Wien führt allein oder auch in Kooperation mit externen Firmen Projekte in unterschiedlicher Komplexität durch. Das hier beschriebene Projekt wird in Zusammenarbeit mit der Firma FELDER KG aus Hall in Tirol behandelt, einem der globalen Marktführer für Hightech-Holzbearbeitungsmaschinen, um die Sicherheit bei der Bedienung von Holzkreissägen zu erhöhen.

Da dieser Aspekt der Arbeitssicherheit der Firma FELDER KG ein besonderes Anliegen ist, wurde am IFT ein spezieller Aktuator entwickelt, der eine neuartige Sicherheitsfunktion bieten soll. Dieser Aktuator wird - bei zu rascher Annäherung und einer Unterschreitung des Mindestabstandes von menschlichen Gliedmaßen zum Sägeblatt - ausgelöst, wodurch das Kreissägeaggregat parallel zum Kreissägeblatt in das Innere der Maschine abgesenkt wird. Der Absenkungsvorgang bewegt sich dabei im Hundertstelsekunden-Bereich.

Die Aufgabenstellung der Diplomarbeit bezieht sich auf die Entwicklung eines Vermessungssystems zur Positionsermittlung eines applikationsspezifischen, hochdynamischen Aktuators. Grundsätzlich ist das Thema in drei Blöcke unterteilt: Aufbau der Holzbearbeitungsmaschine, theoretische Ausarbeitung und praktische Durchführung. Im Folgenden wird darauf näher eingegangen:

- **Aufbau der Holzbearbeitungsmaschine**

- Aufbau der Kreissäge:

- Die Firma FELDER KG stellte dem IFT für die Entwicklung des Aktuators eine Holzkreissäge *FORMAT 4 Kappa 550* zur Verfügung. Dabei soll der grundsätzliche Aufbau der Maschine beschrieben.

- Aufbau des Aktuators:

- Der speziell entwickelte Aktuator stellt eine neuartige Sicherheitseinrichtung der Maschine dar. Da die Entwicklung patentrechtlich geschützt ist, kann die Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise des Aktuators nur sehr oberflächlich erfolgen.

- **theoretische Ausarbeitung**

- Grundlagen der Messtechnik:

- Dabei sollen - auf den Vorschriften der DIN 1313, DIN 1319-1 und VDI 2622-1 basierend - die in der theoretischen Ausarbeitung verwendeten Begriffe näher definiert und beschrieben werden.

- Aufbau einer Messkette:

- Im Allgemeinen bestehen Messketten zur Ermittlung, Verarbeitung und Weiterleitung von Eingangsgrößen stets aus denselben Geräten und Bauteilen. Dabei werden speziell Multiplexer, Verstärker, Signalabtaster, Analog-Digital Wandler (ADW) und die Anzeige bzw. Ausgabe des Signals näher erklärt.

- Messabweichungen:
Jede Messung wird von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst, weshalb die Einflüsse qualitativ und quantitativ bewertet werden müssen, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Die zugrundeliegenden Fehlerquellen können dabei zufälliger oder systematischer Natur sein, worauf näher eingegangen werden muss.
- Arten von Messaufnehmern:
Da dieses Projekt sich ausschließlich mit der Ermittlung der Position des Sägeblatts befasst, werden nur ausgewählte Sensorprinzipien zur Ermittlung des Abstandes bzw. des Weges näher beschrieben.

- **praktische Durchführung**

- Konzeptentwicklung:
Für die Entwicklung eines geeigneten Konzepts - auf Prinzipien der VDI 2221 basierend - ist die vorhandene Situation zu evaluieren und daraus spezifische Anforderungen abzuleiten. Anhand der definierten Anforderungen ist die Auswahl eines geeigneten Messaufnehmer durchzuführen. Da die anschließenden Messungen bei einem rotierenden Werkzeug - in dem Fall dem Kreissägeblatt - durchgeführt werden sollen, ist die Sicherheit der Messdurchführung ebenfalls von hoher Wichtigkeit, weshalb bsp. berührungslose Messprinzipien einen eindeutigen Vorteil bieten.
- Machbarkeitsüberprüfung des Messprinzips:
Die Überprüfung auf korrekte Arbeitsweise des Messaufnehmers muss unbedingt erfolgen, damit der Aktuator auf dessen Funktion ebenfalls überprüft werden kann. Die Überprüfung des Messaufnehmers erfolgt über eine Positionserfassung des Sägeaggregats, bei einer definierten Zeit und einer genau vorgegebenen Konfiguration der Arbeitsmaschine (vertikaler Schnittwinkel und stillstehender Motor). Die Auslösung der Sicherheitsvorrichtung soll manuell, mit Betätigung eines Schalters, erfolgen. Ein - mit dem Sensor verbundenes - Speicheroszilloskop detektiert dabei die Spannungsänderung aufgrund der Absenkbewegung und speichert die Daten digital ab. Die Auswertung der Daten (**Abstand über der Zeit**) kann mit Hilfe geeigneter Tabellenkalkulationsprogramme wie bsp. EXCEL durchgeführt werden. Die zu ermittelnden Zeiten sind einerseits die Totzeit (Zeit von der manuellen Schalterbetätigung bis zur Auslösung der Sicherheitsvorrichtung) und die Absenkzeit (Zeit von der manuellen Schalterbetätigung bis zu Erreichen der eingestellten Schnitttiefe).
- Entwicklung einer geeigneten Haltevorrichtung:
Eine genaue Überprüfung des Aktuators ist erst mit Hilfe einer geeigneten Haltevorrichtung für den Messaufnehmer möglich. Die Vorrichtung soll dabei stufenlos schwenkbar, auf mehreren Maschinen verwendbar, einfach zu bedienen, niedrige Komplexität aufweisen, über hohe Steifigkeit verfügen und ökonomisch vertretbar sein. In einem geeigneten CAD-System muss somit die Konstruktion der Haltevorrichtung anforderungsspezifisch erfolgen. Genauere Angaben zur Montage und Kostenkalkulation sind ebenfalls darzustellen. Dieser Schritt erfolgt rein virtuell ohne der Herstellung des physischen Produkts.

2. Aufbau der Holzbearbeitungsmaschine

Die beiden wichtigsten, bereits vorhandenen Einheiten der Holzbearbeitungsmaschine sind die Kreissäge und der Aktuator. Die Maschine wird bereits gewerblich verkauft und benutzt. Der Aktuator soll als Nachrüsteinheit nicht nur bei diesem Modell, sondern auch bei allen anderen Kreissägen einsetzbar sein, wobei der Aufbau der Maschinen grundsätzlich gleich sein muss.

2.1. Aufbau der Kreissäge

Bei der von *FELDER KG* dem IFT zur Verfügung gestellten Holzbearbeitungsmaschine handelt es sich um eine Kreissäge des Modells *FORMAT 4 Kappa 550* - wie in Abbildung 2.1 illustriert. Das Gerät verfügt über einen Arbeitstisch aus Stahlguss für hohe Steifigkeit und Verschleißfestigkeit; weiters über das eigentliche Werkzeug - in diesem Fall ein Kreissägeblatt -, welches in einem eigenen Gehäuse untergebracht ist. Das Sägeaggregat (in Abbildung 2.2) - bestehend aus dem Sägeblatt, dem Spaltkeil und dem damit verbundenen Elektromotor - lässt sich direkt über einen Linearantrieb schwenken - in Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4 gezeigt. Damit können unterschiedliche Schnittwinkel bei der Bearbeitung von Holz erreicht werden. Eine vertikale Positionsänderung des Arbeitsaggregats wird ebenfalls mit Hilfe von Linearantrieben erreicht, wodurch variable Schnitttiefen erzeugt werden können. Die Drehachse des Aggregats befindet sich auf der Schnittlinie zwischen der Stirnebene des Kreissägeblatts und der Auflageebene des Arbeitstisches. Zusätzlich verfügt die Maschine über einen Werkstückschlitten auf der Stirnseite. Dieser ist auf Schienen gelagert und erleichtert dem Anwender das Arbeiten mit dem Gerät. Wie jede Holzbearbeitungsmaschine verfügt auch die Kreissäge über eine integrierte Span- und Staubabsaugereinrichtung, die am unteren Ende des Sägeblattgehäuses angebracht ist. Die Priorität der Einstellung beginnt mit der Schwenkung, gefolgt von der Absenkung - d.h. wird das Kreissägeblatt in einer geschwenkten Position abgesenkt, so bewegt sich das Sägenaggregat um den angegebenen Wert entlang der Linearführung, also parallel des Sägeblatts und nicht senkrecht zum Maschinentisch.

Alle Angaben über Veränderungen, wie Schnitttiefe und Schnittwinkel, können am integrierten Touchscreen des Rechnerpaneels - wie in Abbildung 2.5 dargestellt - eingegeben und bestätigt werden.

2.2. Aufbau des Aktuators

Der Aktuator stellt im in der Maschine installierten Zustand eine wichtige und gleichzeitig neuartige Sicherheitsfunktion dar. Bisher war es für Holzkreissägen Standard, dass das Sägeblatt bei Kontakt von biologischem Material - also Haut, Knochen und Muskel - automatisch in den Stillstand versetzt wird. Derartige Sicherheitseinrichtung waren aber nur auf einmaliges Benutzen ausgelegt, da das zugehörige Aggregat zum Stoppen des Sägeblatts dabei irreversibel deformiert wurde. Um eine erneute Sicherheitsfunktion zu gewährleisten, musste ein neues Aggregat verbaut werden.



Abbildung 2.1.: Kreissäge *Felder Format 4 Kappa 550* am IFT. Die Kreissäge besteht dabei aus dem Rechnerpanel (1), der Staubabsaugereinrichtung (2), dem Arbeitstisch (3) aus Stahl, dem abzusenkenden Kreissägeblatt (4) und dem Vorschubtisch (5).
[Foto: Matti Felsner]

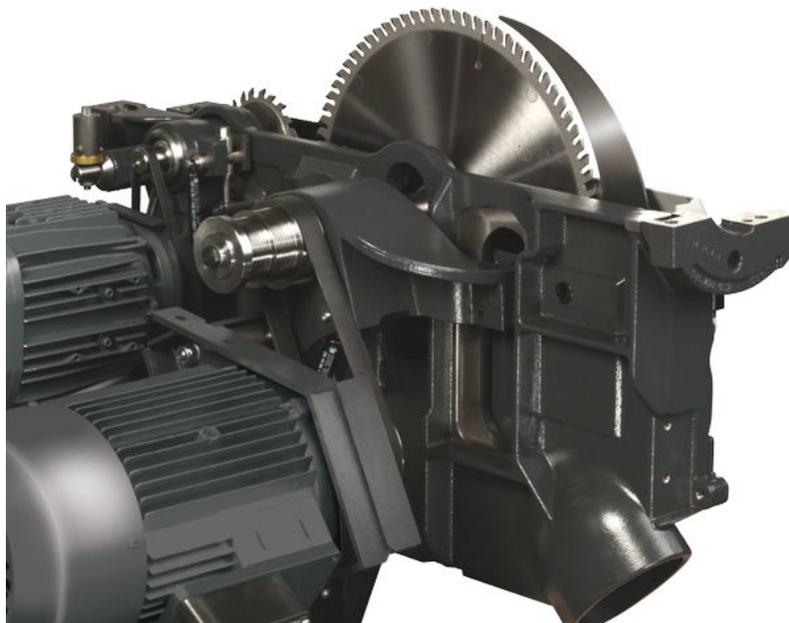


Abbildung 2.2.: Darstellung des *Felder Kreissägenmoduls 133* [1]

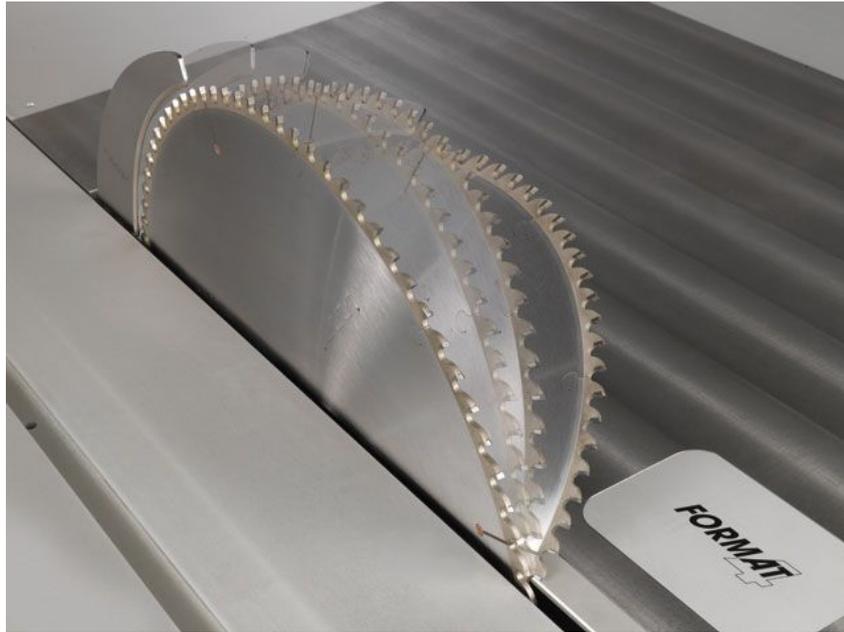


Abbildung 2.3.: Schwenkmöglichkeit des Kreissägeblatts . Bei der *Felder Format 4 Kappa 550* ist eine Schnittwinkeländerung von max. 50° möglich. [1]

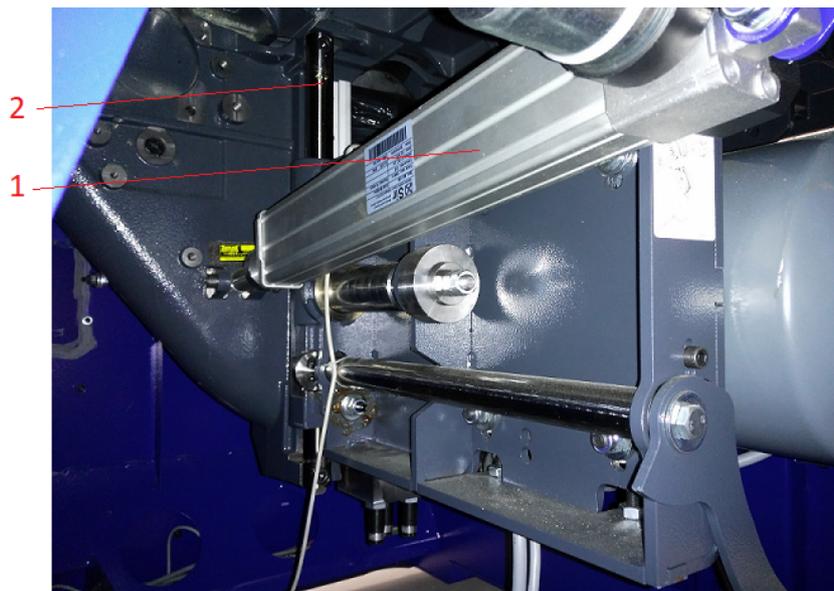


Abbildung 2.4.: Sägenaggregat mit dem Schwenkmechanismus innerhalb der *Felder Format 4 Kappa 550*: Ein translatorischer Aktuator (1) schwenkt das gesamte Kreissägeaggregat gegenüber dem Arbeitstisch. Das Kreissägeaggregat ist über Linearführungen (2) am Kreissägemodul befestigt. [Foto: Matti Felsner]

Der Gedanke eines neuartigen, mehrmals nutzbaren Systems ist somit nicht nur ein sicherheitstechnischer, sondern auch ein wettbewerbsorientierter Schritt.

Die Firma *FELDER* hat bereits zahlreiche Innovationen auf den Markt gebracht, wobei das



Abbildung 2.5.: Integriertes Rechnerpaneel der *FELDER FORMAT 4 Kappa 550*: Die dabei wichtigsten Einstellungen sind die Schnitttiefe (1), der Schnittwinkel (2), die Drehzahl (3) und der Parallelanschlag des Sägeblatts. [Foto: Matti Felsner]

Thema Sicherheit stets hohe Priorität genießt. In diesem Fall besteht die Kooperation zwischen der Firma *FELDER* und dem IFT für die Entwicklung des neuen Sicherheitskonzepts.

Der elektro-dynamische Aktuator (1) ist genau zwischen dem Linearantrieb für die Absenkeinstellung und der Befestigung am Blattgehäuse montiert, wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist. Somit kann im normalen Betrieb die Schnitttiefe wie gehabt eingestellt werden, da beide Hälften des Aktuators zusammengehalten werden. Wird jedoch die Sicherheitseinrichtung aktiviert, erzeugt der Aktuator zwischen seinen beiden Elementen eine starke abstoßende Kraft, die dazu führt, dass das gesamte Arbeitsaggregat innerhalb kurzer Zeit (einiger Hundertstelsekunden) entlang der Linearführungen ins Innere der Maschine abgesenkt wird. Somit entkoppelt der Aktuator das Sägeaggregat vom Kreissägemodul. Um Beschädigungen und zu starke Schwingungen an der Maschine zu vermeiden, reduzieren eingebaute Stoßdämpfer (2) die kinetische Energie des bewegten Aggregats bevor der maximale Verschiebeweg erreicht wird.

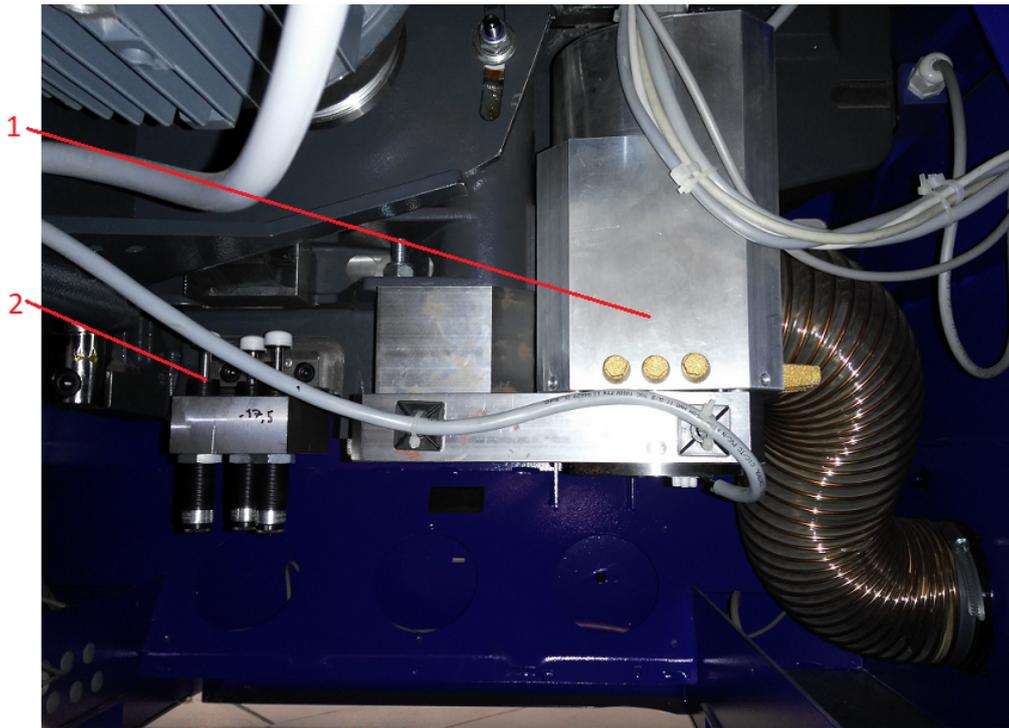


Abbildung 2.6.: Darstellung des montierten Aktuators (1) zwischen Kreissägenmodul und dem Sägenaggregat und der installierten Stoßdämpfer (2) in der *FELDER FORMAT 4 Kappa 550* [Foto: Matti Felsner].

Teil II.

Theoretische Betrachtungen

3. Messtechnik

Die unterschiedlichen Anwendungen der Messtechnik spielen nicht mehr nur im Labor eine wichtige Rolle, sondern haben große Teile des alltäglichen Lebens erreicht, wodurch vieles ohne die Messtechnik gar nicht mehr möglich bzw. wegzudenken wäre. Vor allem in wissenschaftlichen Bereichen - wie bsp. Chemie und Maschinenbau - nimmt die Messtechnik neben dem tatsächlichen Messen und Überprüfen diverser physikalischer Größen ebenfalls das Nachweisen verschiedenster Theorien und Experimente einen wichtigen Platz ein. Beispielsweise sind Verbesserungen von Produkten, aber auch Prozessen erst durch die Messung spezieller Größen möglich. Die Anforderungen an die Messtechnik lassen sich wie folgend, sehr allgemein bestimmen.

- **Objektivität:** Die Messung physikalischer Größen muss von den subjektiven Sinnesorganen des Menschen unabhängig sein.
- **Reproduzierbar:** Wie jedes Experiment muss ebenso die dazugehörige Messung reproduzierbar und kontrollierbar sein.
- **Quantität:** Erst durch die Angabe einer numerischen Zahl mit Einheit, ist ein qualitativer Vergleich mit anderen Zuständen möglich.

In der modernen Messtechnik werden nicht-elektrische Größen anhand von physikalischen Effekten und mit Hilfe von Sensoren in elektrische Signale umgewandelt, die anschließend übertragen und weiterverarbeitet werden müssen. Der große Vorteil liegt dabei in der leistungsarmen Erfassung, schnellen Verarbeitung und unkomplizierteren Übertragung der Messwerte, selbst über lange Strecken. Die zugrundeliegenden Effekte sind meist bereits seit Jahrzehnten bzw. Jahrhunderten bekannt und nutzbar, dennoch erst durch die Möglichkeiten der modernen Elektronik, EDV-, Steuerungs- und Regelungstechnik, aber auch durch die Entwicklung von Mikrocontrollern möglich und effizient. Gerade durch die immer rasanter zunehmende Digitalisierung wird auch die Verarbeitung und Umwandlung immer mehr auf Rechnern erledigt. Dabei ist die Präzision bei gleichzeitig niedrigen Kosten von sehr hoher Wichtigkeit, sodass die einzelnen Systeme immer effizienter werden.

[2, Seiten 12 -13]

3.1. Allgemeine Grundlagen

3.1.1. Begriffserklärungen

Das **Messobjekt** stellt den Träger der Messgröße dar und kann ein Körper, ein Zustand oder ein Vorgang sein.

Die **Messgröße** ist eine physikalische Größe, welche anhand der Messung bestimmt werden soll und besteht dabei aus einem numerischen Wert und einer Einheit. Dies ist in der DIN 1313 folgendermaßen definiert:

„Nach Wahl einer Einheit e für jeden Größenwert x sein Verhältnis x/e zur Einheit. Der zur

Einheit e gehörige Zahlenwert eines Größenwertes x wird auch mit $\{x\}_e$ bezeichnet. Wenn die Einheit aus dem Zusammenhang ersichtlich ist, so wird auch kurz $\{x\}$ für den Zahlenwert und dann $[x]$ für die Einheit geschrieben. “ [3, Seite 4]

„Jeder Größenwert x kann als das Produkt von Zahlenwert und Einheit dargestellt werden.“ Daher gilt:

$$x = (x/e) \cdot e = \{x\}_e \cdot e = \{x\} \cdot [x]$$

[3, Seite 5]

Das **Messgerät** ist die für die Messung einer Größe konstruierte Apparatur. Das Gerät kann über eine eigene Anzeige verfügen oder die Messgröße umwandeln und bearbeiten.

Eine **Messeinrichtung** besteht aus mindestens einem Messgerät und den für die Messung notwendigen Peripheriegeräten, wie Messverstärker und Wandler.

Der **Messgrößenaufnehmer** ist der eigentliche Sensor und somit ein Teil des Messgerätes oder der Messeinrichtung. Jeder Messaufnehmer arbeitet auf einem speziellen physikalischen Prinzip der ein Ausgangssignal generiert, welches weiterverarbeitet werden kann. Somit ist der Sensor das erste Glied der Messkette.

Im Gegensatz zur Messgröße handelt es sich beim **Messwert** x_i um den bei der Messung tatsächlich gewonnenen Wert einer physikalischen Größe. Dieser besteht (trotzdem) auch aus einem Größenwert und einer Einheit.

Der **Wahre Wert** x_w ist der tatsächlich existierende Wert jeder Messung, wobei dieser jedoch in der Regel nicht erfassbar ist, da jede Messung gewisse Ungenauigkeiten beinhaltet.

Der **Richtige Wert** stellt einen bekannten Wert dar, dessen Abweichungen zum Wahren Wert als vernachlässigbar erachtet werden können. Im Allgemeinen wird der Richtige Wert mit dem Wahren Wert gleichgesetzt.

Das **Messergebnis** kann einerseits ein einziger, berichtiger Wert sein oder aus mehreren Messwerten anhand einer definierten Rechenvorschrift ermittelt werden (arithmetisches bzw. geometrisches Mittel, statistisches Mittel, usw.).

Die **Messunsicherheit** bildet ein Intervall um den Messwert, in dem mit gewisser Wahrscheinlichkeit der Wahre Wert liegt.

Für die eigentliche Messung – also der quantitativen Bestimmung einer physikalischen Größe – gibt es zusätzliche Tätigkeiten, die zum Ergebnis beitragen bzw. begleitende Effekte besitzen:

Das **Prüfen** stellt eine qualitätssichernde Aufgabe dar. Dabei werden unterschiedlichste Bedingungen auf deren Erfüllung geprüft, wobei das Ergebnis stets eine ja/nein Entscheidung darstellt. Beispielweise müssen die einzelnen Komponenten der Messeinrichtung auf deren Funktion geprüft werden.

Das **Kalibrieren** stellt die Bestimmung der Messabweichung e – in Kapitel 3.2 genauer beschrieben – dar. Dabei verändert sich die Messeinrichtung aber nicht; diese ist nach der Kalibrierung im selben Zustand wie zuvor. Das Ziel dabei ist, die Messeinrichtung auf deren Genauigkeit zu überprüfen. Allerdings lässt sich durch den Prozess der Kalibrierung eine Tabelle erstellen, die zur Berichtigung der Abweichung genutzt werden kann. [4], [5]

Mit Hilfe des **Justierens** werden die Messwerte mit den richtigen Werten abgeglichen, da es zu einem bleibenden Eingriff in das System kommt. Dadurch wird die Genauigkeit der Messeinrichtung verändert und die Messabweichung - vor allem die systematische Messabweichung - reduziert. [5]

Das **Eichen** ist eine amtliche Prüfung des Messgerätes nach gesetzlichen Vorschriften und Anforderungen. Dabei soll festgestellt werden, ob die Genauigkeit des Messgerätes innerhalb der Eichtoleranzen liegt. Wie bereits erwähnt, ist das Eichen ein amtlicher Vorgang der nur von autorisierten Prüfstellen durchgeführt werden darf. In niedergeschriebenen Gesetzen sind die Regeln des Eichens, deren Geräte und Prozesse streng vorgegeben. [5]

Im umgangssprachlichen Gebrauch wird sehr oft unter Eichen, Kalibrieren und Abgleichen dasselbe verstanden.

[2, Seiten 13 - 17], [3, Seiten 2 ff.], [4, Seiten 4 ff.], [5, Seiten 2 ff.]

3.1.2. Definitionen von Einheiten

Bei der 11. Generalkonferenz für Maß und Gewicht (franz. Conférence Générale des Poids et Mesures – CGPM) im Jahr 1960 wurde das Internationale Einheitensystem - franz. SI - beschlossen und gleichzeitig eingeführt. Die Zusammenstellung der einzelnen Basisgrößen ist seitdem unverändert, dennoch haben sich deren Definitionen im Lauf der Jahre verändert; wie beispielsweise bei der Definition des Meters: statt zehnmillionster Teil des Erdmeridianquadranten, ist es nun eine lichtgeschwindigkeits-basierende Konstante. Die SI-Einheiten werden als kohärent bezeichnet, da sie ein System bilden, das ausschließlich auf Einheiten mit dem Faktor 1 durch Division oder Multiplikation verbunden sind. Gleichzeitig ist der internationale Beschluss des CGPM in den Normen ISO 1000 und DIN 1301 festgelegt worden.

In der Tabelle 3.1 sind alle SI-Einheiten mit deren Bezeichnung, Einheit und üblichen Variablen zu sehen. Die Tabelle 3.2 darunter stellt einen Auszug der SI-Präfixe dar. Es existieren noch weitere, dennoch sind die in der Tabelle aufgelisteten für die meisten Anwendungen ausreichend.

[2], [6, Seiten 111 ff.], [7, Seiten 2 ff.]

3.1.3. Abgeleitete Einheiten

Abgeleitete Einheiten bestehen stets aus einem Produkt aller SI-Einheiten mit unterschiedlichen Potenzzahlen. Einige abgeleitete Einheiten besitzen eigene Einheitenennamen - wie in Tabelle 3.4 - manchmal sogar mehrere, beispielsweise wie die Definition der mechanischen Energie Joule ($J = N \cdot m$) ebenso die des Kraftmoments ($N \cdot m$). Andere abgeleitete Einheiten - in Tabelle 3.3 zu sehen - bestehen ebenfalls aus einem Produkt der SI-Einheiten und repräsentieren, trotz

Basisgröße	Zeichen der Variable	Zeichen der Basiseinheit	Basiseinheit
Länge	$l, x, r, s, usw.$	m	Meter
Masse	m	kg	Kilogramm
Zeit	t	s	Sekunden
elektrische Stromstärke	I, i	A	Ampere
Lichtstärke	I_v	cd	Candela

Tabelle 3.1.: SI-Basiseinheiten [6], [7]

Faktor	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^3	10^6	10^9
Bezeichnung	Pico	Nano	Micro	Milli	Kilo	Mega	Giga
Präfix	p	n	μ	m	k	M	G

Tabelle 3.2.: SI-Präfixe für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten [6], [7]

fehlenden Eigennamens, physikalische Größen. Beide Tabellen zeigen nur einen kleinen Auszug von verschiedensten abgeleiteten Einheiten.

[2], [6, Seiten 111 ff.], [7, Seiten 2 ff.], [8, Seiten 2 ff.]

phys. Größe	Zeichen der Variable	Zeichen der Basiseinheit	Basiseinheit
Fläche	A	m^2	Quadratmeter
Geschwindigkeit	v, \vec{V}	m/s	Meter pro Sekunde
Beschleunigung	a, \vec{a}	m/s^2	Meter pro Quadratsekunde
elekt. Stromdichte	j	A/m^2	Ampere pro Quadratmeter
elekt. Feldstärke	E, \vec{E}	V/m	Volt pro Meter
magn. Feldstärke	H, \vec{H}	A/m	Ampere pro Meter
Leuchtdichte	L_v	cd/m^2	Candela pro Quadratmeter

Tabelle 3.3.: Beispiele für aus den kohärenten SI-Einheiten abgeleitete Größen [6], [7], [8]

3.2. Messabweichung

Das grundsätzliche Ziel jeder Messung ist die Erhebung eines quantitativen Wertes einer physikalischen Größe. Jeder Messwert wird durch die Ungenauigkeit der Messmethode, der Apparatur, der Umweltbedingungen und der Ablesefehler durch den Menschen beeinflusst. Die Einschätzung des Ergebnisses - also Genauigkeit - ist ebenfalls ein wichtiger Teil der Messung.

Die **Messabweichung** e beschreibt die Differenz vom gemessenen Wert x_i zum wahren Wert x_w . Diese Differenz kann einerseits absolut (Gleichung 3.1) oder aber auch relativ (Gleichung 3.2) angegeben werden.

phys. Größe	häufige Variablen	Einheit	Ausdruck durch Basiseinheiten	Einheitsbezeichnung
Frequenz	f, ν	Hz	s^{-1}	Hertz
Energie, Arbeit	E, W	J	$kg\ m^2\ s^{-2}$	Joule
Leistung	P	W	$kg\ m^2\ s^{-3}$	Watt
elekt. Ladung	Q	C	A s	Coulomb
elekt. Spannung	$U, u(t)$	V	$kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-1}$	Volt
Kapazität	C	F	$kg^{-1}\ m^{-2}\ s^4\ A^2$	Farad
elekt. Widerstand	R	Ω	$kg\ m^2\ s^{-3}\ A^{-2}$	Ohm
magn. Fluss	Φ	Wb	$kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-1}$	Weber
magn. Flussdichte	B, \vec{B}	T	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$	Tesla
Induktivität	L	H	$kg\ m^2\ s^{-2}\ A^{-2}$	Henry
Lichtstrom	Φ_V	lm	cd	Lumen
Beleuchtungsstärke	E_V	lx	$cd\ m^{-2}$	Lux

Tabelle 3.4.: Beispiele für aus den kohärenten SI-Einheiten abgeleitete Größen mit Eigennamen [6], [7], [8]

Naturkonstante	Variable	Numerischer Wert	Einheit
Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	c_0	299.792.458	m / s
magnetische Feldkonstante	μ_0	$1,2566 \cdot 10^{-6}$	V s / A m
Plancksches Wirkungsquantum	h	$6,6262 \cdot 10^{-34}$	J s

Tabelle 3.5.: Auflistung einiger Naturkonstanten [2, Seite 23]

$$e = x_i - x_w \quad (3.1)$$

$$e_{rel} = \frac{e}{x_w} = \frac{x_i - x_w}{x_w} = \frac{x_i}{x_w} - 1 \quad (3.2)$$

Dabei hat die Angabe der absoluten Differenz immer dieselbe Dimension wie der Messwert, hingegen ist relative Differenz stets einheitenlos bzw. auch eine Angabe in Prozent.

Beim Konzept des **Messfehlers** ging man früher von der Annahme aus, dass ein Fehler bezüglich der Informationen zu einer detektierbaren Differenz zwischen dem Messwert und dem Wahren Wert führt. Wie bereits erwähnt, ist es in der Regel nicht möglich den Wahren Wert zu bestimmen. Dieser kann jedoch durch Vergleiche mit einem Normal oder durch eine mathematische Kalkulation bestimmt werden. Die frühere Aussage ist grundsätzlich korrekt, dennoch wird heutzutage der Messfehler als das Nichteinhalten von definierten Anforderungen verstanden.

Die mathematische Behandlung des *Fehlers* geht auf den deutschen Mathematiker *Carl Friedrich Gauß* (1777-1855) zurück und liegt in der Wahrscheinlichkeitstheorie begründet. Dies setzt

eine strikte Reproduzierbarkeit bei definierten Bedingungen voraus, was jedoch nicht immer möglich ist. Im Allgemeinen wird unter den Begriffen Messfehler und Messabweichung dasselbe verstanden.

Die **Ursachen der Messunsicherheit** haben - wie bereits erwähnt - mehrere Gründe. Zum Einen entstehen unterschiedliche Rückwirkungen von der vorhandenen Messeinrichtung auf das zugehörige Messobjekt. Diese sind selten vermeidbar, somit müssen die Rückwirkungserscheinungen durch passende Maßnahmen auf einen tolerierbaren Anteil reduziert werden. Zum Anderen müssen Umwelteinflüsse nicht unbedingt überlagerte Störungen des Messsignals erzeugen (bsp. Temperatur bei Spannungsmessung), können aber trotzdem maßgeblichen Einfluss auf die Messung bzw. die Messergebnisse haben (bsp. Temperaturunterschiede bei Luftdruckmessung). Die Unvollkommenheit der Messeinrichtung selbst ist der dritte Einflussfaktor für die Messabweichung. Dabei spielen Nichtlinearitäten, Quantisierung bei digitalen Systemen und Hintergrundrauschen bei Messsignalen eine Rolle.

Man kann grundsätzlich zwischen zwei verschiedene Arten von Messabweichungen unterscheiden: *Systematische Messabweichungen* haben eine determinierte Ursache, daher liefern sie - bei gleichen Randbedingungen - stets gleiche Ergebnisse. Bei *zufälliger Messabweichung* werden - bei wiederholten Messungen - die Messwerte nach einer statistischen Verteilung platziert.

[2, Seiten 30 - 32], [9, Seiten 2 ff.], [10, Seiten 2 ff.], [11, Seiten 589 - 593]

3.2.1. Systematische Messabweichungen

Während der Messung verfügt die Systematische Messabweichung entweder über einen konstanten bzw. gleichbleibenden Betrag mit definiertem Vorzeichen oder ändert sich nur sehr langsam. Dies führt zu einer zeitlich konstanten Differenz zwischen Wahrem Wert und dem tatsächlichen Messwert. Wie bereits erwähnt, kann die Abweichung - aufgrund determinierter Ursachen - nicht durch Wiederholtes Messen erkannt werden.

Bekannte systematische Messabweichungen

Ist der Betrag und das Vorzeichen der systematischen Abweichung $e_{sys,b}$ bekannt, so ist es möglich eine Korrektur vorzunehmen. Durch eine Kalibrierung des Messgerätes ist die Erstellung einer Kalibriertabelle möglich, anhand derer die einzelnen Messwerte korrigiert werden können. Der Korrekturfaktor K entspricht somit dem Negativen der bekannten systematischen Abweichung, wie in der Gleichung 3.3 zu erkennen ist.

$$K = -e_{sys,b} \quad (3.3)$$

Somit ergibt sich der berichtigte Wert:

$$x_{korr} = x + K \quad (3.4)$$

Unbekannte systematische Messabweichungen

Bei nicht eindeutiger Angabe von Betrag und/oder Vorzeichen der systematischen Abweichung muss diese geschätzt oder gedeutet werden. In einigen Fällen ist ein gewisser Anteil der Abweichung abschätzbar und somit ist eine Korrektur möglich. Falls dies jedoch nicht möglich ist, sind diese Abweichungen als zufällig einzustufen. Beispiele für unbekannt systematische Abweichungen wären die Temperaturabsenkung durch einen Messfühler oder die Alterung elektrischer Bauteile.

[2, Seiten 32 - 33], [11, Seiten 593]

3.2.2. Zufällige Messabweichungen

Zufällige Messabweichung entstehen bei der Messung durch nicht voraussehbare bzw. nicht beherrschbare Einflüsse. Wiederholt man die Messung am selben Messobjekt und unter denselben Rahmenbedingungen, entsteht eine natürliche statistische Streuung der Messwerte. Dies bezeichnet man als das sogenannte *unsichere Messergebnis*. Wie bereits erwähnt, ist die Trennung von zufälliger und unbekannter systematischer Abweichung oft sehr schwer.

Zur Beschreibung der zufälligen Messabweichung wird die Messgröße X als Zufallsgröße aufgefasst, wobei die Annahme gilt, dass alle bekannten systematischen Abweichungen korrigiert wurden.

Für die allgemeine Beschreibung der Wahrscheinlichkeitsverteilung werden die Verteilungsdichtefunktion $f(x)$ und die Verteilungsfunktion $F(x)$ verwendet.

Der Wert der Verteilungsfunktion $F(x)$ entspricht der Wahrscheinlichkeit (*Prob*), dass die Messgröße bzw. Zufallsgröße X einen Wert annimmt, der gleich oder kleiner x ist - wie in Gleichung 3.5 gezeigt:

$$F(x) = Prob(X \leq x) \tag{3.5}$$

Der dabei höchste erreichbare Wert ist 1, was einer Wahrscheinlichkeit von 100% entspricht.

Für stetige Verteilungsfunktionen, mit kontinuierlichem Verlauf und ohne Sprünge, gilt die Verteilungsdichtefunktion, wie in Gleichung 3.6 definiert:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \tag{3.6}$$

Der Wert $f(x)$ entspricht dabei der Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsgröße X im Intervall x und $x + dx$ liegt. Aus der Gleichung 3.6 folgt Gleichung 3.7 und Gleichung 3.8

$$F(x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \tag{3.7}$$

$$F(x \rightarrow \infty) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) dt = 1 \tag{3.8}$$

Damit ergibt sich aus der Gleichung 3.8 die Wahrscheinlichkeit, dass die Zufallsgröße X im Intervall $(a, b]$ liegt.

$$Prob(a < x \leq b) = F(b) - F(a) = \int_a^b f(x)dx \quad (3.9)$$

Somit beschreiben die Verteilungs- und Verteilungsdichtefunktion vollständig die Zufallsgröße X . Für die meisten Anwendungen reicht die Bestimmung der Varianz und des Erwartungswertes. Bei den nachfolgenden Definitionen wird die Summenfunktion für diskrete Zufallswerte und das Integral für stetige Zufallswerte verwendet:

Erwartungswert

Der Erwartungswert μ gibt die Mitte der Verteilung an (vgl. arithmetisches Mittel). Dabei entspricht N der Anzahl an Elementen x_i , wie in Gleichung 3.10 zu erkennen ist.

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.10)$$

Der Erwartungswert kann - wie bereits erwähnt - für stetige Zufallsgrößen aus der Verteilungsdichtefunktion bestimmt werden, wie in Gleichung 3.11 zu erkennen ist.

$$\mu = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x)dx \quad (3.11)$$

Bei Korrektur der systematischen Abweichung $e_{sys,b}$ entspricht der Erwartungswert μ in Gleichung 3.12 dem Wahren Wert der Messgröße.

$$\mu = x_w \quad (3.12)$$

Varianz, Standardabweichung

Die Varianz σ^2 gibt die Streuung der Messwerte x_i um den Erwartungswert μ an. Für einzelne Messwerte dient die Gleichung 3.13 zur Berechnung, für stetige Zufallsgrößen die Gleichung 3.14.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2 \quad (3.13)$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 \cdot f(x)dx \quad (3.14)$$

Die Wurzel der Varianz bezeichnet man als die Streuung oder Standardabweichung σ und ist in Gleichung 3.15 zu finden. Diese entspricht der mittleren quadratischen Abweichung der Elemente vom Erwartungswert.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} \quad (3.15)$$

Normalverteilung

Die Gauß'sche Normalverteilung bildet in der Statistik eine der wichtigsten Formen der Verteilungen ab, da sie einerseits um einen Erwartungswert eine symmetrische Verteilungsdichtefunktion aufweist und andererseits werden durch die Normalverteilung die Überlagerung mehrerer Zufallszahlen ausgesprochen gut angenähert. Eine wichtige Voraussetzung ist dabei jedoch, dass keine Dominanz einer einzelnen Einflussgröße besteht, sondern dass das Ergebnis von mehreren Größen beeinflusst wird. Die Gleichung 3.16 stellt den Verlauf der Verteilungsdichtefunktion der Normalverteilung dar, welche in der Abbildung 3.1 illustriert wird:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (3.16)$$

Die Fläche unterhalb des Kurvenverlaufs $f(x)$ in Abbildung 3.1 entspricht somit der Wahrscheinlichkeit $F(x)$, dass ein spezieller Wert innerhalb eines Intervalls $(a, b]$ liegt. Der Wert $F(x)$ kann (wie in der Tabelle 3.6 angegeben) auch so interpretiert werden, dass ein relativer Anteil - anhand des Erwartungswerts und der Standardabweichung - aller Werte innerhalb des Intervalls liegen.

[2, Seiten 35 - 38], [11, Seiten 593 - 594], [12, Seiten 813 - 824], [13, Seiten 2 ff.], [14, Seiten 2 ff.], [15, Seiten 2 ff.]

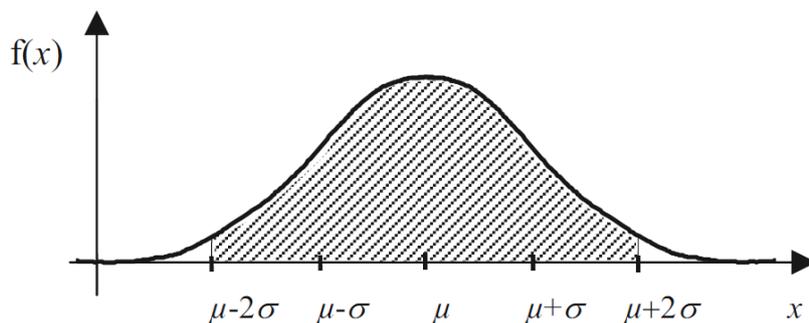


Abbildung 3.1.: Darstellung der Verteilungsdichtefunktion einer Normalverteilung [2, Seite 38]

68,3%	aller Werte liegen im Intervall	$\mu \pm \sigma$
95,0%	aller Werte liegen im Intervall	$\mu \pm 1,96\sigma$
99,0%	aller Werte liegen im Intervall	$\mu \pm 2,58\sigma$
99,7%	aller Werte liegen im Intervall	$\mu \pm 3\sigma$

Tabelle 3.6.: Wahrscheinlichkeiten der Normalverteilung anhand der Standardabweichung [2, Seite 38]

3.3. Messkette

Wie bereits erwähnt, werden in der Messtechnik nicht-elektrische Messgrößen gemessen. Diese müssen anhand von verschiedensten physikalischen Effekten in eine elektrische Größe gewandelt werden, um eine Vereinfachung der Messung zu erzielen. Eine Reihe an Geräten und Aktivitäten sind daher erforderlich, um von der Messgröße zum Messergebnis zu gelangen. Dies bezeichnet man im Allgemeinen als Mess- oder auch umgangssprachlich bekannter als Sensorkette. In der Abbildung 3.2 ist die grundlegende Form einer Messkette dargestellt. Dabei werden die einzelnen Bestandteile in den folgenden Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.6 näher erläutert.

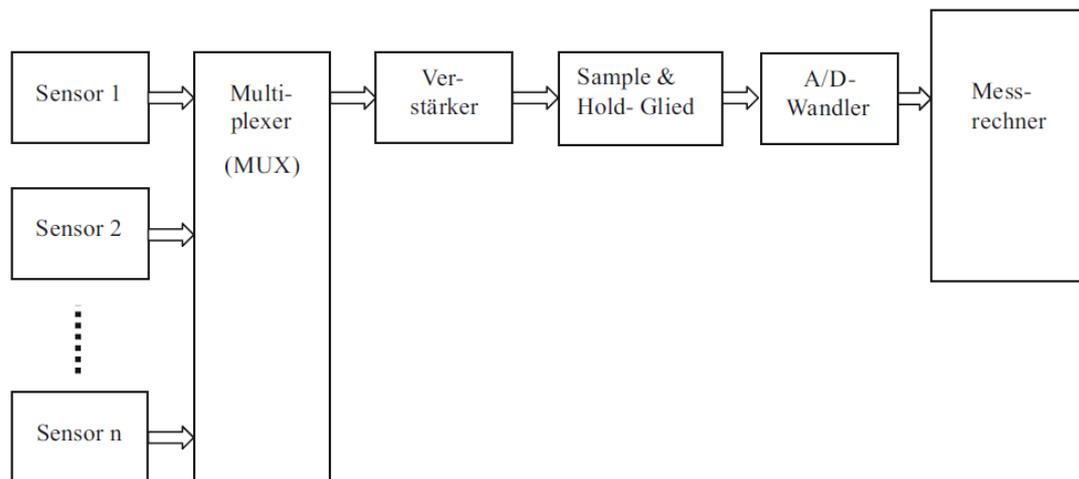


Abbildung 3.2.: Aufbau der Messkette beim Erfassen einer nichtelektrischen physikalischen Größe [16, Seite 158]

[5, Seite 18], [16, Seiten 157 -158]

3.3.1. Aufnahme des Messsignals

Das erste Glied der Messkette besteht aus der Sensorik bzw. dem Messaufnehmer. Grundsätzlich beeinflusst eine physikalische nicht-elektrische Größe die elektrischen Eigenschaften des Aufnehmers. Dabei ist der Zusammenhang zwischen der eingehenden und ausgehenden Größe des Messaufnehmers von höchster Bedeutung. Dieser Zusammenhang darf dabei nur sehr geringen Veränderungen unterliegen, wodurch der Fehler reduziert wird. Die einzelnen Messprinzipien der Aufnehmer werden in den Kapitel 3.5 genauer erläutert.

Bei der eigentlichen Messaufnahme ist es von großer Wichtigkeit, dass der Messaufnehmer weitestgehend durch das nicht-elektrische physikalische Signal beeinflusst wird. Ausschlaggebend dafür ist vor allem, die stetig zunehmende gegenseitige Beeinflussung von elektrischen und elektronischen Geräten. Einerseits wird durch die steigende Miniaturisierung der elektrischen Bauteile eine stärkere elektromagnetische Koppelung zweier benachbarten Komponenten erreicht. Andererseits entsteht aufgrund von immer höheren Energien - wegen Tendenz zu höherer Arbeitsgeschwindigkeit - hochfrequente Störstrahlung. Unter dem Aspekt der EMV gibt es unterschiedliche Möglichkeiten Störeinflüsse zu reduzieren. Dabei sind vor allem elektromagnetische Schirmung und Filterung die effektivsten Maßnahmen.

Die **Schirmung** beschreibt die Dämpfung von elektromagnetischen Störsignalen mit gleicher oder unterschiedlicher Frequenz als das Nutzsignal. Durch Umhüllung von Leitern oder Verarbeitungseinheiten mit elektrisch leitfähigen Materialien lassen sich viele elektrische Komponenten gegen Störungen abschirmen.

Bei der *Filterung* werden Frequenzen oberhalb oder unterhalb des Nutzsignalbereichs unterdrückt. Dafür werden vorrangig Filter der 1. und 2. Ordnung verwendet, steigen jedoch die Ansprüche, werden Filter höherer Ordnung angewendet. Folgende Filtertypen werden eingesetzt:

- **Tiefpass-Filter:** Ein Tiefpass unterdrückt hohe Frequenzanteile eines Signals, daher können nur Frequenzen unterhalb einer Eckfrequenz übertragen werden.
- **Hochpass-Filter:** Ein Hochpass unterdrückt tiefe Frequenzanteile eines Signals, daher können nur Frequenzen oberhalb einer Eckfrequenz übertragen werden.
- **Bandpass-Filter:** Ein Bandfilter überträgt Frequenzen innerhalb eines bestimmten Bereichs.

[16, Seiten 159 -160]

3.3.2. Multiplex

Bei einfachen Messungen, bei denen nur eine Messstelle zu erfassen ist, entfällt die Anwendung des Multiplexens. Jedoch sind bei herkömmlichen Aufgaben meistens mehrere Messstellen gleichzeitig zu überwachen. Die dazu eingesetzten Multiplexer verbinden die verwendeten Messstellen zeitseriell mit der restlichen Messeinrichtung.

Im Allgemeinen sind Multiplexer als 1-aus-n Ausführungen erstellt, was bedeutet, dass zu einem definierten Zeitpunkt aus n Messstellen genau eine einzelne mit der Messeinrichtung verbunden wird. Besteht der Bedarf nach mehreren Verbindungen zwischen Messpunkten und Messeinrichtungen, ist die Verwendung eines n-zu-m oder auch Matrix-Multiplexer notwendig.

[16, Seiten 160 -162]

3.3.3. Verstärkung

Da üblicherweise das durch den Messaufnehmer generierte elektrische Signal ein sehr niedriges Energieniveau aufweist, ist es unbedingt notwendig diese für die genaue Messung zu verstärken. Die Verstärkung sollte im Allgemeinen linear erfolgen. Dafür stehen leistungsfähige und rauscharme elektronische Bauteile - die s.g. Operationsverstärker (OPV) in zwei unterschiedlichen Grundschaltungen - zur Verfügung.

Zu einer Pegelanpassung wird die invertierende Grundschaltung benutzt (siehe Abbildung 3.3). Dabei wird die Ausgangsspannung im Bezug auf die zurückfliegende Eingangsspannung in deren Phase um 180° (in Radiant: π) verschoben. Es wird dabei die Impedanz am Eingang mit dem Widerstand R_1 dargestellt, welche im Bereich von $1 \text{ [k}\Omega\text{]}$ bis $50 \text{ [k}\Omega\text{]}$ liegt. Man erreicht dadurch zwar große Verstärkungen, jedoch kann dabei die Rückwirkung auf die Messsignalquelle nicht vollständig unterdrückt werden.

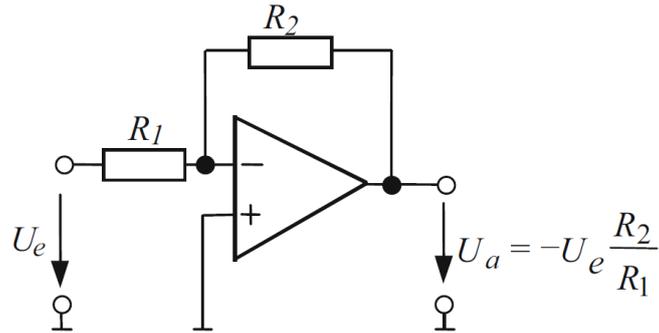


Abbildung 3.3.: Schaltbild eines invertierenden OPV [16, Seite 163]

Zur Entkoppelung zwischen Messaufnehmer und Messverarbeitung sind die nicht-invertierenden Grundsaltungen - in Abbildung 3.4 gezeigt - besser geeignet. Diese zeichnen sich durch sehr hohe Eingangswiderstände ($> M\Omega$) und niedrige Ausgangswiderstände aus. Doch anhand hoher Impedanzen dieser Schaltung reichen bereits kleine Schaltungskapazitäten aus, damit ein ungewolltes parasitäres RC-Glied entsteht. Durch Phasendrehungen im Rückkopplungsweig arbeitet die Schaltung nicht mehr korrekt. Somit werden nicht-invertierende Verstärker nur bei sehr kleinen Verstärkungen verwendet. Erhöht man den Widerstand $R_1 \rightarrow \infty$ entspricht dies einer Reduktion des Widerstands $R_2 \rightarrow 0$ und der Entfernung von R_1 . Dies entspricht - wie in Abbildung 3.5 gezeigt - der Idealvorstellung eines nicht-invertierenden OPV mit einer Verstärkung $v = 1$, welcher auch als Impedanzwandler bezeichnet wird. Dabei wird die Rückwirkung vom Verstärker auf den Messaufnehmer stark reduziert.

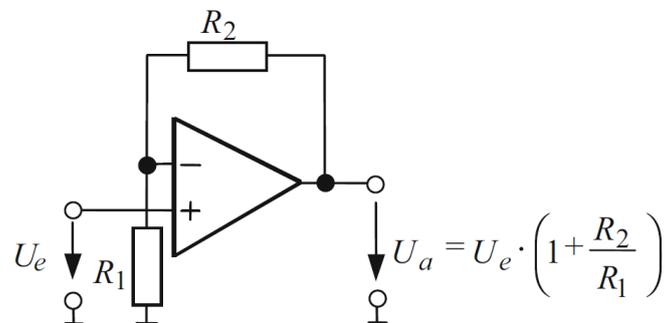


Abbildung 3.4.: Schaltbild eines nicht-invertierenden OPV [16, Seite 163]

Somit kann aus den vorhergehenden Überlegungen eine Verstärkungsschaltung - in Abbildung 3.6 zu sehen - erstellt werden, die einerseits über große Verstärkung und andererseits über sehr niedrige Rückwirkung auf den Messaufnehmer verfügt. Dabei können bei dem invertierenden Verstärker die Widerstände R_1 und R_2 so gewählt werden, dass die gewünschten Verstärkungen von Faktor $10^2 \dots 10^3$ ohne Stabilitätsverlust realisierbar sind.

[16, Seiten 162 - 164]

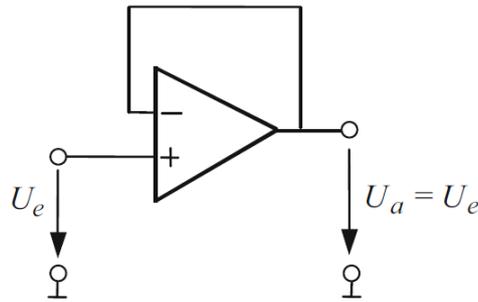


Abbildung 3.5.: Grundsaltung eines invertierenden OPV [16, Seite 163]

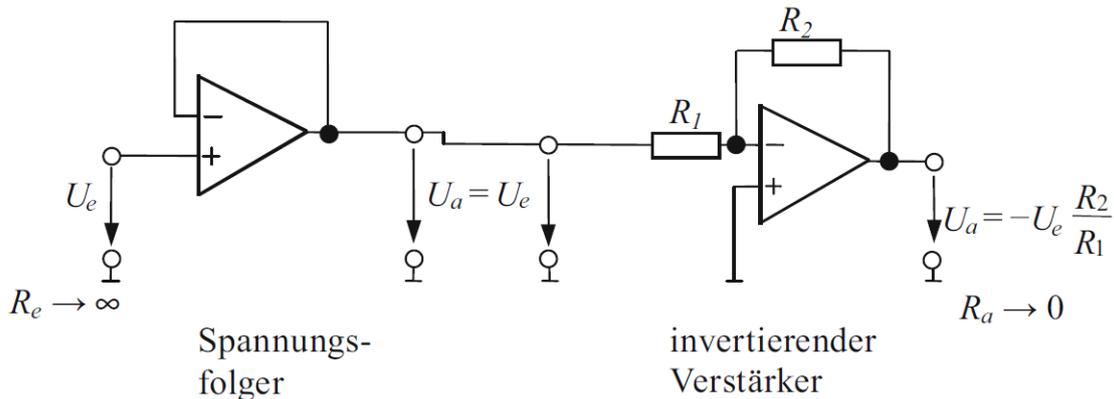


Abbildung 3.6.: Messverstärker bestehend aus einem Spannungsfolger und einem invertierenden Verstärker [16, Seite 164]

3.3.4. Abtastung und Haltung

Eine Abtastung und Haltung eines zeitveränderlichem Signals kann mit Hilfe eines Sample & Hold-Glied (SHG) erreicht werden. Dabei wird das elektrische Signal für kurze Zeit konstant gehalten, damit dieses im anschließenden ADW in einen digitalen Wert transformiert werden kann. Dies ist nur möglich, wenn das Signal - während der für die Wandlung benötigten Zeit - konstant bleibt. Dabei ist die aus dem Kapitel 3.3.3 gezeigte Abbildung 3.5 um einen Schalter S und einen Kondensator C ergänzt. Dies ist in der Abbildung 3.7 zu erkennen. Die Schaltung hat dabei verständlicherweise nur zwei unterschiedliche Zustände:

1. Schalter S geschlossen

In dieser Schalterstellung arbeitet das SHG im Abtast-Modus. Um korrektes Arbeiten zu gewährleisten muss der Quellwiderstand R_i gegen Null streben. Gleichzeitig strebt der Eingangswiderstand R_{eOPV} des OPV gegen Unendlich. Somit sind, bei geschlossenem Schalter S, die beiden Widerstände parallel geschaltet und ergeben mit der Kombination eines Speicherkondensators C eine gegen Null gehende Zeitkonstante τ :

$$\tau_1 = (R_i || R_{eOPV}) \cdot C \rightarrow 0 \quad (3.17)$$

Daher folgt die Ausgangsspannung $U_a(t)$ nahezu verzögerungsfrei der Eingangsspannung $U_e(t)$.

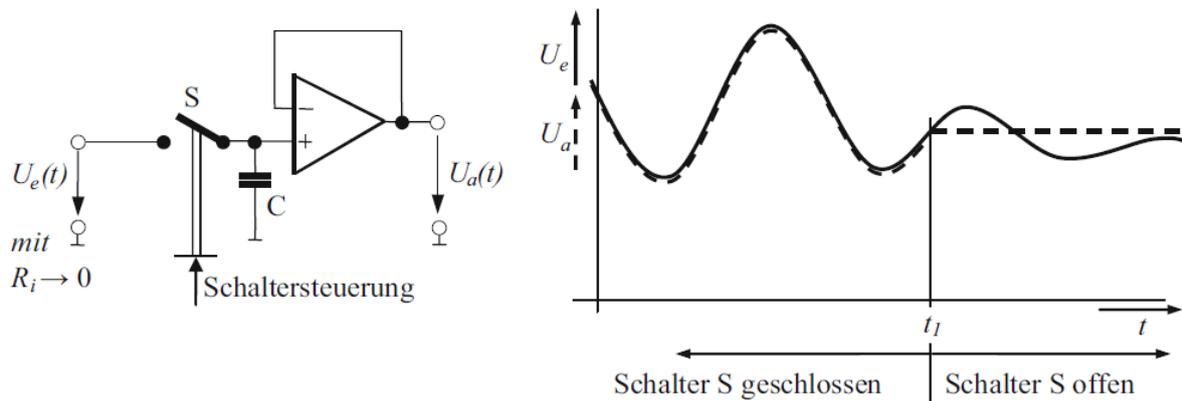


Abbildung 3.7.: Grundprinzip eines SHG und der Spannungsverlauf in Abhängigkeit des Schalters S [16, Seite 164]

2. Schalter S offen

Hierbei arbeitet das SHG im Halte-Modus, wobei die Signalquelle vom OPV getrennt ist. Dabei besteht die Impedanz nur mehr aus dem Speichercondensator C und dem - gegen Unendlich strebenden - Widerstand R_{eOPV} . Die sich nun ergebende Zeitkonstante errechnet sich durch:

$$\tau_2 = R_{eOPV} \cdot C \rightarrow \infty \quad (3.18)$$

Mathematisch gesehen bleibt die Spannung am OPV zeitlich konstant, in der Realität jedoch sinkt diese ab. Die Absinkrate der Spannung ist aber so gering, dass die Spannung während üblicher Wandlerzeiten als konstant betrachtet werden kann.

[16, Seiten 164 - 165]

3.3.5. Analog/Digital Wandlung

Der Analog-Digital Wandler stellt ein werte- und zeit-diskretes Signal zur Verfügung, das entweder gleich auf einer Digitalanzeige visualisiert oder aber an einen Rechner zur Weiterverarbeitung gesendet werden kann. Die bestimmten Kenngrößen des ADW sind die Abtastfrequenz bzw. Abtastgeschwindigkeit und die Auflösung.

Die Auflösung ist abhängig von der Anzahl der Bits, welche für die Darstellung der Ausgangsinformation zur Verfügung stehen. Je höher die Anzahl der Bits - also je höher die Auflösung - desto geringer ist die entstehende Abweichung durch die Quantifizierung des Eingangssignals, wie in Tabelle 3.7 gezeigt. Die relative Abweichung korrespondiert mit der Genauigkeit, mit der der ADW das Signal abtastet. In praktischen Applikationen macht es jedoch wenig Sinn die Auflösung so hoch zu wählen, wenn die erreichbare Genauigkeit nicht durch Komponenten des Messsystems dargestellt werden kann.

Grundsätzlich steigen bei der Messtechnik immer die Kosten, je höher die zu erzielende Genauigkeit festgelegt wird.

Die Abtastrate muss - laut dem Abtasttheorem nach Nyquist und Shannon - mehr als das Doppelte der Signalfrequenz betragen. Bei nicht-sinusförmigen Signalverläufen gilt diese Regel für das höchste Frequenzspektrum des Signals. Wird diese Bedingung erfüllt, lässt sich das ursprüngliche Signal vollständig abtasten und rekonstruieren.

Abtasttheorem:

„Jedes bandbegrenzte Signal $x(t)$ läßt sich eindeutig mit Hilfe von Abtastwerten $x[k] = x(kT)$ darstellen. Die Abtastrate $f_a = 1/T$ muß dazu größer als die doppelte Grenzfrequenz f_g (maximale Frequenz) des Signals gewählt werden:

$$f_a > 2 \cdot f_g$$

Die doppelte Grenzfrequenz $2 \cdot f_g$ (= minimale Abtastrate) bezeichnet man auch als Nyquist-Frequenz.“ [17, Seite 236]

Da es in der Messtechnik - wie in grundsätzlich allen anderen Bereichen - ebenfalls auf ökonomische Lösungen ankommt, wurden unterschiedliche Wandlungsprinzipien entwickelt, die spezifische Vorteile bei verschiedenen Anforderungen bieten.

[16, Seiten 165 - 172], [17, Seiten 235 - 237]

Wandlungsbreite	1 Bit	2 Bit	4 Bit	8 Bit	10 Bit
Zahl der Inkremente	2	4	16	256	1.024
rel. Abweichung A_{rel}	1	0,33	0,066	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$0,98 \cdot 10^{-3}$
Wandlungsbreite	12 Bit	14 Bit	16 Bit	18 Bit	20 Bit
Zahl der Inkremente	4.096	16.384	65.536	262.144	1.048.576
rel. Abweichung A_{rel}	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-7}$

Tabelle 3.7.: Wandlungsbreite und relative Abweichung eines idealen ADW [16, Seite 166]

3.3.6. Anzeige und Verarbeitung

Für die Verarbeitung von digitalen Signalen existieren einige Möglichkeiten, die in Verbindung mit einer zentralen Recheneinheit die Messungen sehr komfortabel machen.

Die Ausgabe der Messinformationen ist ein integraler Bestandteil jeder Messoperation. Diese kann direkt für den Menschen ablesbar angezeigt werden, aber auch als Information für Steueroperationen bei automatisierten Prozessen dienen.

Die ablesbare Anzeige der Messinformation kann dabei auf zwei verschiedene Arten erfolgen:

- **Analog:** Die analoge Anzeige erfolgt meist mit Hilfe verschiedener mechanischer Zeigeelemente, Balkenanzeigen, usw. Die deutlich schnellere Erfassung ist leider nur durch geringere Genauigkeit möglich (auf 2 - 3 Dezimalstellen). Gleichzeitig sind Ablesefehler durch die Parallaxe möglich.
- **Digital:** Dabei werden die Messwerte weit genauer (bis ca. 6 Dezimalstellen) auf einer geeigneten Ziffernanzeige zum direkten Ablesen abgebildet. Die Messwertaufnahme durch einen Messenden ist zwar zeitaufwendiger, dennoch sind keine Ablesefehler möglich.

[16, Seiten 172 - 173]

3.4. Messsignale

Wie bereits erwähnt, werden bei den meisten Messungen nicht-elektrische Größen mit Hilfe eines geeigneten physikalischen Prinzips in eine elektrische Größe transferiert. Somit repräsentiert die elektrische Größe (Strom, Spannung oder Frequenz) einen zugrunde liegenden Messwert, der die gesuchten Informationen des Messprozesses darstellt. Werden die einzelnen Messwerte über die Zeit aufgetragen, entsteht daraus eine Kurve, die in der Messtechnik als **Messsignal** bezeichnet wird. Somit kann man ein Signal auch als den *zeitlichen Verlauf* einer Größe bezeichnen, wobei die unabhängige Variable meist die Zeit darstellt.

3.4.1. Klassifizierung

Im Allgemeinen wird zwischen *kontinuierlichen* und *diskreten* (diskontinuierlichen) Variablen unterschieden. Dies kann auf die Zeit, aber auch auf Messwerte bezogen werden.

- **Kontinuierlich:**

„Ein (zeit-) kontinuierliches Signal wird durch eine reelle oder komplexe Funktion $x(t) \in \mathbb{R}(\mathbb{C})$ einer reellen Veränderlichen $t \in \mathbb{R}$ dargestellt. Der Wertebereich ist $\mathbb{R}(\mathbb{C})$ und der Definitionsbereich ist \mathbb{R} .“ [17, Seite 13]

Kontinuierliche Signale werden mathematisch durch eine Funktion $f(x)$ dargestellt.

- **Diskret:**

„Ein (zeit-) diskretes Signal wird durch eine Folge reeller oder komplexer Zahlen $x[k] \in \mathbb{R}(\mathbb{C})$, $k \in \mathbb{Z}$ dargestellt. Der Wertebereich ist $\mathbb{R}(\mathbb{C})$ und der Definitionsbereich ist \mathbb{Z} .“ [17, Seite 13]

Im Gegensatz zu kontinuierlichen Signalen werden diskrete durch eine mathematische Folge beschrieben.

Da es somit zeitkontinuierliche und -diskrete als auch wertkontinuierliche und -diskrete Signale existieren, ergeben sich grundsätzlich vier unterschiedliche Möglichkeiten - wie in Abbildung 3.8 gezeigt - ein Signal zu klassifizieren. Praktische Bedeutung besitzen vor allem analoge (zeit- und wertkontinuierliche) und digitale (zeit- und wertdiskrete) Signale.

Eine zusätzliche Möglichkeit der Unterscheidung sind stochastische und determinierte Signale.

- **Stochastisch:** Bei einem stochastischen Signal ist die Angabe des exakten Signalverlaufs nicht möglich, sondern nur statistische Eigenschaften, wie Mittelwert und Dichtefunktion. Häufig wird ein stochastisches Signal auch als *zufälliges Signal* bezeichnet.
- **Deterministisch:** Ein deterministisches Signal zeichnet sich durch den exakten Signalverlauf aus, welcher stets anhand mathematische Funktionen oder Tabellen gebildet werden kann.

[17, Seiten 1 - 3]

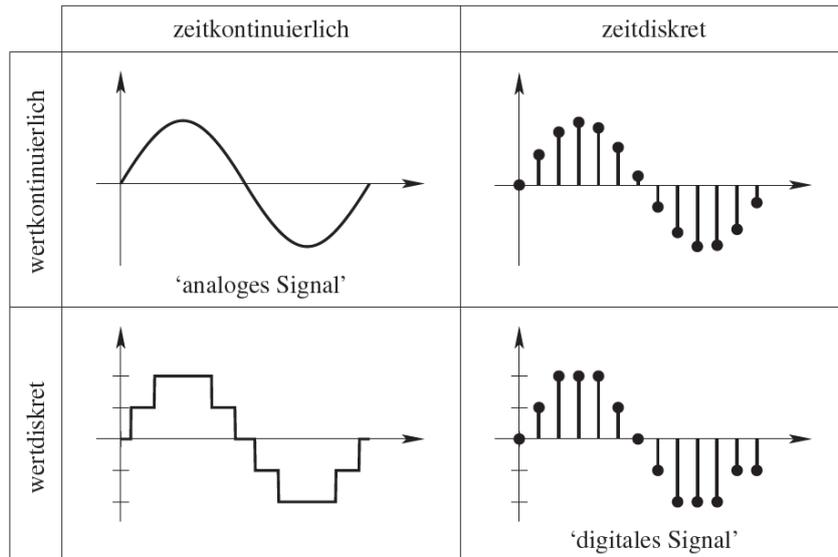


Abbildung 3.8.: Klassifizierung diskreter und kontinuierlicher Signale [17, Seite 13]

3.5. Messprinzipien

Das Bindeglied zwischen der Umwelt bzw. dem Messobjekt und dem dazugehörigen Messergebnis repräsentiert grob gesehen der Messaufnehmer oder umgangssprachlich oft bezeichnet der **Sensor**. Durch die steigende Digitalisierung und Verbesserung der Genauigkeit werden - wie bereits erwähnt - viele Messungen elektrisch durchgeführt. Die zu messende physikalische Größe selbst ist dabei sehr oft nicht elektrisch, was dazu führt, dass diese umgeformt oder gewandelt werden müssen, um anschließend weiterverarbeitet werden zu können. Die Umwandlung - welche stets reproduzierbar und in ausreichender Genauigkeit durchzuführen ist - basiert dabei auf diversen physikalischen Prinzipien bei denen mechanische, geometrische, thermische, chemische, elektrische, optische und magnetische Größen zusammenwirken. Leider bringt dieser Zwischenschritt der Wandlung ebenfalls Probleme mit sich, welche die Messkette und das abschließende Ergebnis stören können. Bei nahezu allen Umformungen entstehen Störgrößen und Rückwirkungen im System. Manche können mit geeigneten Zusatzelementen kompensiert, andere genau einkalkuliert werden. Bei denjenigen, die nicht einkalkuliert werden können, ist es möglich, dass die Genauigkeit des Messaufnehmers sinkt und somit das Messergebnis unzureichend genau ausgegeben wird.

Grundsätzlich kann man die Messaufnehmer in zwei Gruppen unterscheiden:

Aktive Messaufnehmer

Aktive Messaufnehmer entziehen dem Messobjekt einen Anteil an Energie und formen diese in ein elektrisches Signal um, wobei man davon die Spannung, Stromstärke, Ladung oder Frequenz bestimmen kann. Daher werden aktive Messaufnehmer auch oft als *Energiewandler* bezeichnet. Durch das Entziehen der Energie aus dem Messobjekt benötigt der Messaufnehmer keine zusätzliche Hilfsenergie zur Auswertung. Geringere Langzeitstabilität und niedrigere Genauigkeit zeichnen viele aktive Messaufnehmer aus, weshalb häufige Kalibrierung notwendig ist. Gleichzeitig kommt es bei geringen Frequenzen zu unvermeidbaren *Leckverlusten* im Integrationsglied, was zu einer unteren Grenzfrequenz führt $f_{gu} > 0$. Daher sind aktive Messaufnehmer nur für

dynamische, sehr selten für quasi-statische Messungen geeignet.

Passive Messaufnehmer

Passive Messaufnehmer entnehmen dem Messobjekt prinzipiell keine Energie, weshalb sie eine Hilfsenergiequelle zur Auswertung des Signals benötigen. In einem von der Hilfsenergie gespeisten Kreis, wird der Energiefluss durch die zu messende Größe verändert. Diese Änderung beeinflusst passive Schaltelemente des Kreises, wie Induktivitäten, Kapazitäten und Widerstände. Im Allgemeinen ist die untere Grenzfrequenz $f_{gu} = 0$, weshalb mit passiven Messaufnehmern auch statische Messungen durchführbar sind.

[16, Seiten 173 - 174], [18, Seiten 35 - 36]

3.5.1. Potenziometrisches Messprinzip

Das Potenziometrische Messprinzip gehört zu den kontaktbasierenden Messverfahren. Kontaktlose Messaufnehmer werden zwar immer beliebter, vor allem durch Vorteile wie bsp. gutes Preis-Leistungs-Verhältnis. Bei sehr vielen anderen Messprinzipien sind Linearitätswerte, Messgeschwindigkeiten, Auflösungen, Temperaturbereiche und Hysteresewerte nur mit vergleichsweise hohem Aufwand zu bewerkstelligen, weshalb der Einsatz von potenziometrischen Messaufnehmern auch in Zukunft nicht so rasch reduziert werden.

Mathematische Beschreibung

Potenziometrische Messaufnehmer arbeiten nach dem Prinzip eines veränderbaren Widerstandes. Dabei können lineare Abstände oder auch Drehwinkel gemessen werden. Ein Schleifkontakt greift auf einem Linearpotenziometer an, wobei dessen Position l_x annähernd proportional zu dessen Widerstandsänderung ΔR ist. Das Prinzip ist in Abbildung 3.9 dargestellt, wobei der mathematische Zusammenhang in der Gleichung 3.19 aufgezeigt ist.

$$\frac{U_a}{U_B} = \frac{\Delta R}{R} \approx \frac{l_x}{l} \Rightarrow U_a = U_B \cdot \frac{\Delta R}{R} = U_B \cdot \frac{l_x}{l} \quad (3.19)$$

Der mathematische Zusammenhang gilt jedoch nur, wenn vorausgesetzt wird, dass die elektrische Schaltung als unbelasteter Spannungsteiler funktioniert. Daraus folgt, dass der Lastwiderstand R_L sehr viel größer (≈ 1000 bis 5000 mal) als der variable Widerstand R sein muss. Somit wird eine Beeinflussung der Linearität durch den potenziometrischen Widerstand vermieden.

Sensorische Anwendungen

Wie bereits erwähnt, beruht ein Schleifkontakt auf dem variablen Widerstand. Dieser besteht oft aus einer aufgewickelten Drahtspule, wobei der Widerstand durch die Leiterlänge erzeugt wird. Die Temperatur hat dabei einen Einfluss auf die Leiterlänge und kann über die Gleichung 3.20 bestimmt werden.

$$R(T) = R(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (3.20)$$

[16, Seiten 184 - 185], [19, Seiten 184 - 188]

3.5.2. Optoelektronische Messprinzipien

Das wissenschaftliche Gebiet der Optoelektronik ist ein Teil der technischen Elektronik und Optik, welches sich mit der Informationsübertragung mit Hilfe des elektromagnetischen Spektrums im unsichtbaren Bereich des ultravioletten, sichtbaren und infraroten Lichtspektrums

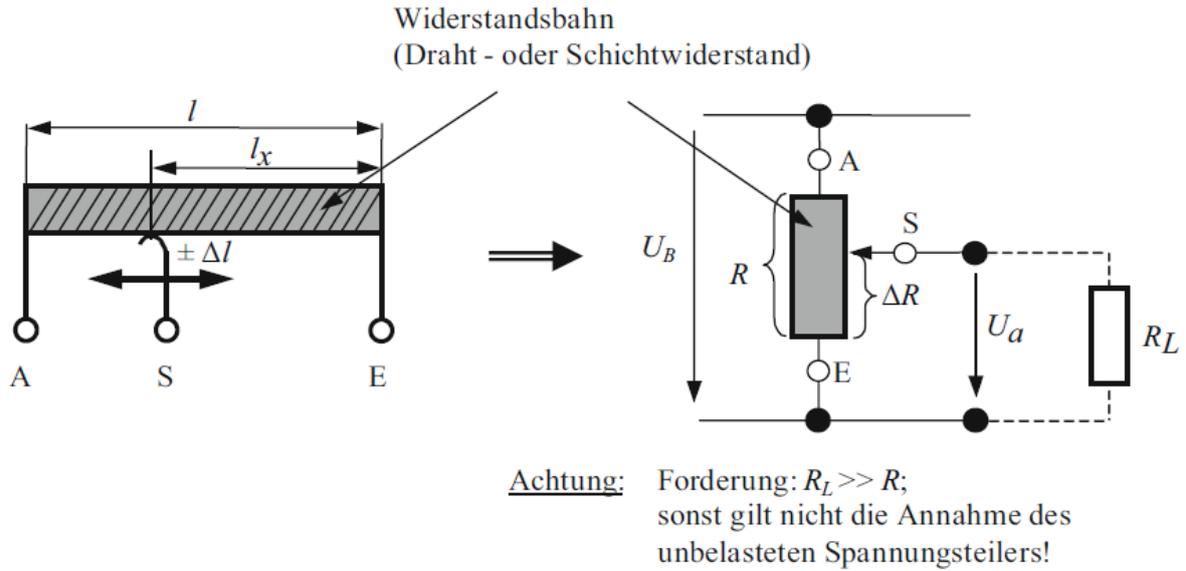


Abbildung 3.9.: Wirkprinzip des potenziometrischen Sensors mit Schaltbild [16, Seite 184]

befasst. In Abbildung 3.10 ist die Einteilung der unterschiedlichen Bereiche nach Wellenlänge des gesamten elektromagnetischen Spektrums abgebildet. Dabei gilt zwischen der Wellenlänge λ , Frequenz f und Phasengeschwindigkeit c der in Gleichung 3.21 gezeigte Zusammenhang:

$$c = \lambda \cdot f \quad (3.21)$$

Der deutsche Wissenschaftler *Max Planck* (1858-1947) fand um 1900 heraus, dass elektromagne-

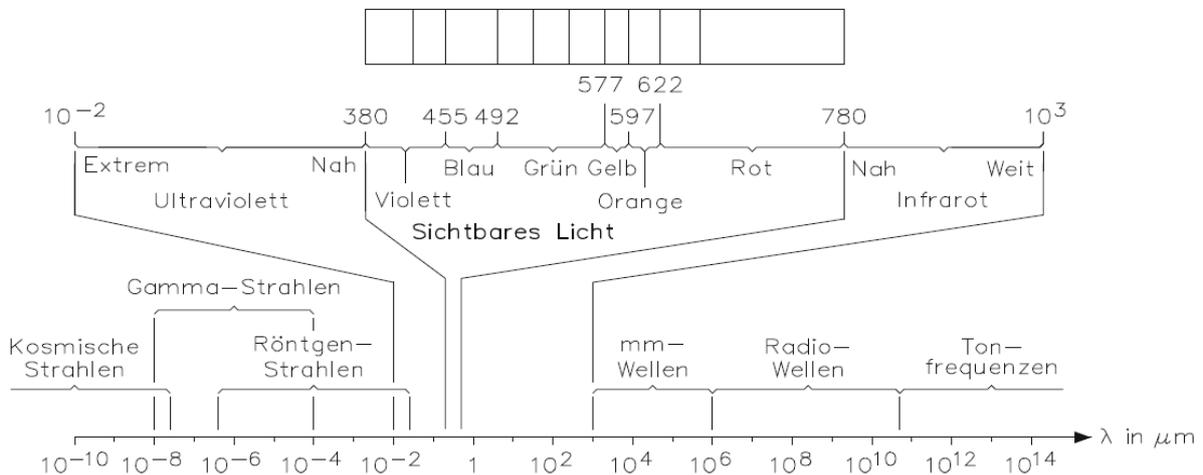


Abbildung 3.10.: Einteilung des elektromagnetischen Strahlungsspektrums [20, Seite 258]

tische Strahlung nicht nur als Welle, wie lange angenommen, sondern auch als Teilchenbewegung (Photon) beschrieben werden kann. Dies hat in der Quantentheorie zum s.g. *Welle-Teilchen-Dualismus* geführt. In Experimenten beobachtete Eigenschaften sind typisch Wellen zuzuordnen

(bsp. Interferenz, Beugung oder elektrische Polarisation), andere hingegen den Eigenschaften von Teilchen (bsp. Teilchenanregung von einem niedrigeren Energieniveau auf ein höheres, mit einer durch den Niveauabstand vorgegebenen Energie). Jedes Photon hat - laut Quantentheorie - zur Frequenz einen proportionalen Energiebetrag $E = h \cdot f$. Die Variable h entspricht dem *planckschen Wirkungsquantum*, einer Naturkonstante - siehe Tabelle 3.5.

Die Unterschiede der Wellen- und Teilchencharakteristik ermöglichen daher die Entwicklung und Konstruktion zweier unterschiedlicher Typen an Messgrößenaufnehmern: *interferometrische* und *fotoelektrische* Aufnehmer

Sensorische Anwendungen

Alle handelsüblichen optischen Sensoren senden Licht in einem definierten elektromagnetischen Spektralbereich aus. Häufig ist dies sichtbares rotes oder unsichtbares infrarotes Licht aus. Dieses Licht wird vom zu detektierenden Messobjekt zum größten Teil reflektiert, anschließend vom Empfänger des Messaufnehmers eingefangen und ausgewertet.

Wie gänzlich alle Messaufnehmer sind auch die optischen Sensoren, aufgrund ihres spezifischen Aufbaus, individuell auf unterschiedliche Messsituationen und Einsatzgebiete - wie bsp. hohe Reichweite, Unempfindlichkeit gegen Verschmutzung oder Fremdlicht, Wiederholgenauigkeit usw. - optimiert. Gleichzeitig stellen im Allgemeinen diese Messaufnehmer bereits ein digitales Messsignal zur Verfügung, weshalb oft keine eigene ADW mehr erforderlich ist.

In der Regel werden für Sender und Empfänger von Licht bei optoelektronischen Messaufnehmern Halbleiterbauelemente verwendet.

- Dioden, die in Durchlassrichtung betrieben werden, s.g. Leuchtdiode (LED) werden sehr häufig als Lichtquellen eingesetzt. Dadurch wird Licht in einem speziellen Spektralbereich emittiert, das durch eine Linse gebündelt wird, um eine Richtwirkung zu erhalten. Der Aufbau einer LED ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

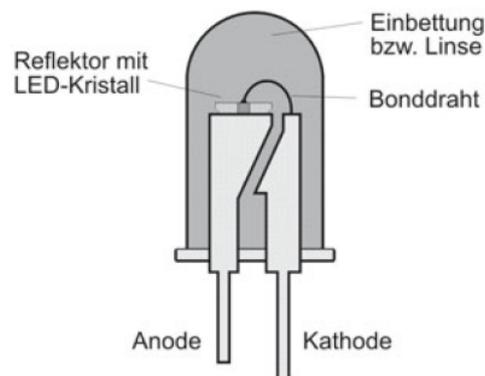


Abbildung 3.11.: Schematischer Aufbau einer T-Type LED [19, Seite 165]

- Steigt die Anforderung der Messung, vor allem bei Abstandssensoren, werden als Sendeelemente zunehmend Halbleiter-Laserdioden eingesetzt - in Abbildung 3.12 gezeigt. Die gegenüber der LED stark erhöhte Richtwirkung ist besonders bei größeren Messdistanzen ein entscheidender Vorteil. Durch die Verwendung von stark gebündelten Lichtstrahlen sind spezielle Maßnahmen zum Personenschutz einzuhalten.

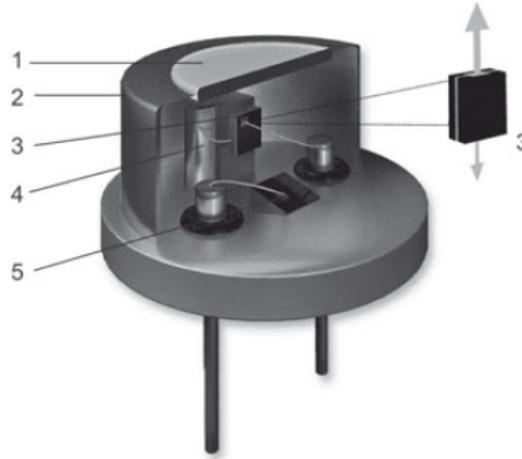


Abbildung 3.12.: Schematischer Aufbau einer Laserdiode [19, Seite 165]: Glasfenster (1), Gehäuse (2), Laserchip (3), Wärmesenke (4), Monitordiode (5).

- Avalanche-Fotodioden (APD) erzeugen bei Lichtbestrahlung eine hohe interne Verstärkung, welche durch die hohe Spannung freigesetzte Ladungsträger beschleunigt und wodurch eine lawinenartige Erzeugung von weiteren Elektronen-Loch-Paaren entsteht.
- Ein Position Sensitive Device (PSD)-Element erzeugt bei Kontakt mit einem Lichtstrahl elektrischen Strom I , der anschließend in zwei separate Teilströme I_1 und I_2 aufgeteilt wird. Das Verhältnis der beiden Ströme zueinander wird durch die Position x des auftreffenden Lichtstrahls bestimmt. Das Wirkprinzip ist in Abbildung 3.13 illustriert. Mit der Angabe der Gesamtlänge L und der Messung der Ströme an der Diode kann folgender Zusammenhang hergestellt werden:

$$\frac{I_1 - I_2}{I_1 + I_2} = \frac{L - 2x}{L}$$

- Charge Coupled Device (CCD)-Zeilen bestehen in deren Aufbau (Abbildung 3.14) aus einer Vielzahl nacheinander positionierter Fotodetektoren, wobei jedem Detektor eine eigene Kapazität zugeordnet ist. Durch das Auftreffen eines Lichtstrahls entsteht eine Ladungstrennung und die freigesetzten Elektronen laden den zugehörigen Kondensator auf. Mit Hilfe eines Steuerimpulses werden die einzelnen Ladungspakete in ein Schieberegister transferiert, wobei die Ladung dabei der Lichtintensität entspricht, die auf die Fotodetektoren wirkt. Durch einen anschließenden Verstärker kann das Signal in einem Mikrocontroller analysiert werden.

Grundsätzlich arbeiten alle optoelektronischen Messaufnehmer nach dem in Abbildung 3.15 gezeigten Prinzip. Der Sensor besteht dabei aus einem lichtemittierenden Sender und einem lichtauffangenden Empfänger. Der Sender strahlt dabei nur ein eigenes Nutzlichtsignal S_{Nutz} ab, während der Empfänger zusätzlich zum Nutzlichtsignal ein Fremdlichtsignal S_{Fremd} und ein Übersprechsignal S_{Ue} zu einem gesamten elektrischen Signal $S_{el} = S_{Nutz} + S_{Fremd} + S_{Ue}$ umwandelt.

Die reflektierende Objektfläche hat einen großen Einfluss auf das Nutzsignal. Einerseits

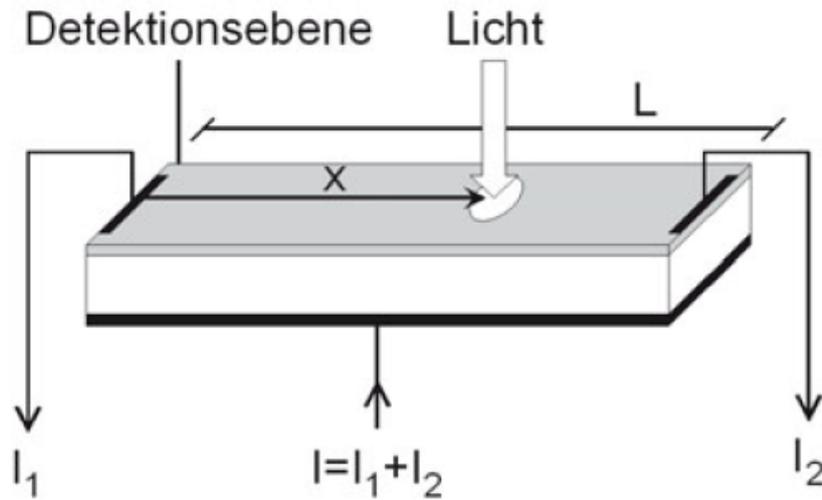


Abbildung 3.13.: Schematischer Aufbau und Funktionsweise eines PSD-Elements [19, Seite 166]

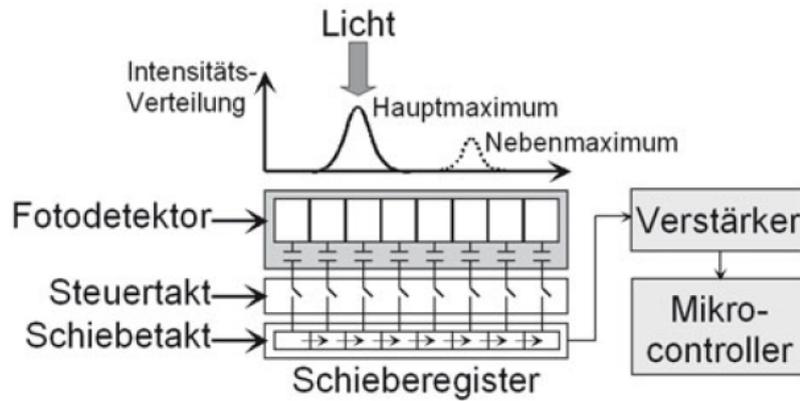


Abbildung 3.14.: Schematischer Aufbau und Funktionsweise eine CCD-Zeile [19, Seite 166]

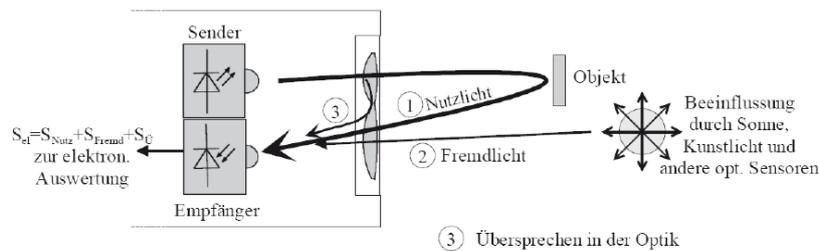


Abbildung 3.15.: Schematischer Aufbau eines optischen Messaufnehmers [19, Seite 167]

sind geometrische Abhängigkeiten - wie die Größe und Krümmung der Fläche - andererseits physikalische Eigenschaften - wie Reflexionsvermögen, Reflexionsverhalten und Farbe des Objekts - ausschlaggebend.

Die mathematische Abhängigkeit des Nutzsignals wird anhand folgender Gleichung dargestellt:

$$S_{Nutz} \propto \int S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot E(\lambda) d\lambda$$

Das Reflexionsvermögen $R(\lambda)$ beschreibt die Farbe des Objekts, $E(\lambda)$ die wellenlängenabhängige Empfindlichkeit des Empfängers und $S(\lambda)$ das Spektrum des Senders. Die Überlagerung der Faktoren ergibt das Nutzsignal, wobei alle in der Abbildung 3.16 separat dargestellt werden.

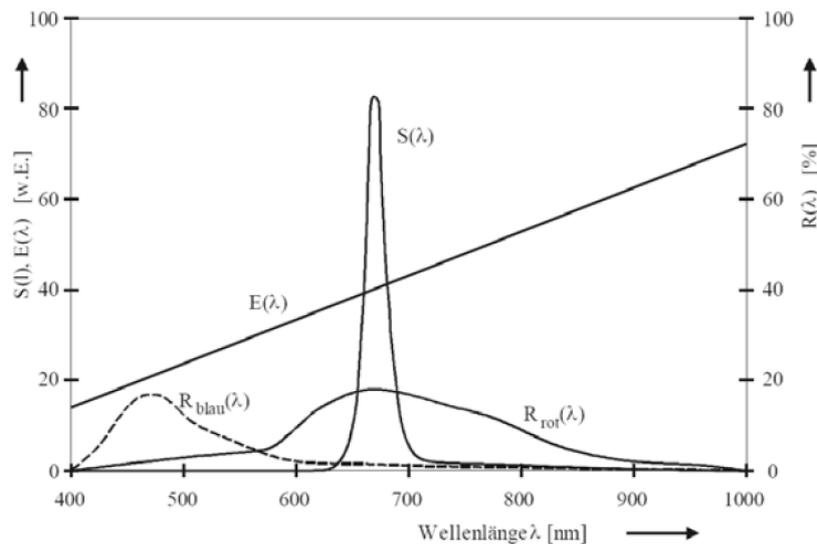


Abbildung 3.16.: Typische spektrale Verteilung [19, Seite 169]

Der Strahlenverlauf beschreibt den Aufbau des Messaufnehmers, wobei dafür zwei unterschiedliche Bauarten existieren:

1. **Autokollimationsoptik:** Durch die Ausführung als Strahlteiler (in Abbildung 3.17 gezeigt) ist die Achse des Senders und des Empfängers identisch, was dazu führt, dass der Empfänger im Nahbereich mehr Licht erhält, wodurch keine Blindzone vor dem Messaufnehmer entsteht. Sehr negativ macht sich jedoch der hohe Anteil der Transmission ($\approx 50\%$) bemerkbar. Daher sind Sensoren mit Autokollimationsoptik in deren maximalen Reichweiten stärker eingeschränkt als mit einer biaxialen Optik.
2. **Biaxiale Optik:** Bei einem Messaufnehmer mit einer biaxialen Optik sind die beiden Achsen des Senders und Empfängers unterschiedlich und meist sogar gegeneinander gekippt, damit die Energie des Nutzungssignals am Empfänger stärker ausgeprägt ist. Im Nahbereich ist dies ein größeres Problem, wodurch eine Blindzone entsteht. Der prinzipielle Aufbau ist ebenfalls in Abbildung 3.17 dargestellt.

Inkrementelle Weg- und Abstandsmessung

Das zentrale Bauteil eines inkrementellen Messsystems ist das s.g. *Messlineal*. Dieses ist auf dessen gesamter Länge in gleich große Quantifizierungseinheiten aufgeteilt (meistens Hell/Dunkelphasen, ein teilweise lichtdurchgängiges Gitter oder magnetisierte Einheiten). Der Aufbau des Messsystems ist in Abbildung 3.18 gezeigt. Die Lichtquelle sendet ein konstantes Lichtsignal aus, welches auf das Messlineal trifft. Durch die Hell/Dunkelphasen wird das Signal reflektiert bzw. gelangt teilweise durch die Schlitze des Gitters und wird von einer Fotodiode empfangen. Bei der Verschiebung Δs des Messlineals gegenüber der Ruheposition erzeugt das Messsystem Impulse, die nach einer Formung gezählt werden. Das Messergebnis ergibt sich somit aus der Multiplikation der Länge der Quantifizierungseinheit (dies ist unabhängig von der

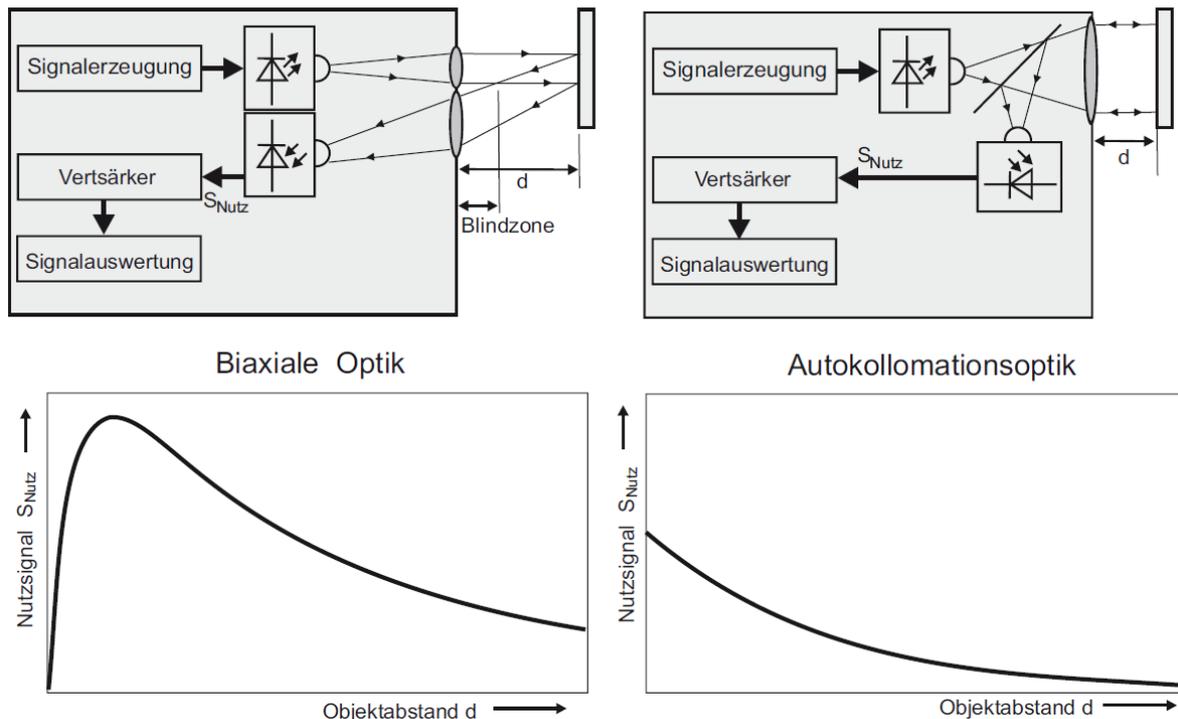


Abbildung 3.17.: Schematische Darstellung des Strahlenverlaufs und des Nutzsignals [19, Seite 168]

Art der Quantifizierungseinheit) und der Anzahl an Impulsen. Mit dieser Anordnung sind nur Wegänderungen und keine absoluten Abstände messbar. Mit der Einstellung eines Startpunktes - also einem Nullpunkt - werden absolute Längen ebenfalls detektierbar. Zusätzlich ist mit der Verwendung eines zweiten Messlineals, das um ein viertel Inkrement verschoben ist, die Angabe der Richtung möglich.

Optische Triangulation

Das Triangulationsverfahren basiert im Allgemeinen auf geometrischen Prinzipien. Das vom Sender - eine LED oder eine Laserdiode - erzeugte Licht wird mit Hilfe der Sendeelektronik zu einem Lichtbündel geformt und trifft dabei im Abstand d das Messobjekt. Dabei wird der Großteil des Lichts von der Oberfläche des Objekts reflektiert. Die Absorptions- und Reflexionseigenschaften hängen dabei vom Material und von der Oberflächenbeschaffenheit des Objekts ab. Die Empfangsoptik fängt einen Teil des reflektierten Lichts auf und bildet es auf einer Detektionsebene ab. Anhand des Objektstands d ergibt sich auf der Detektionsebene eine unterschiedliche Schwerpunktsposition x mit folgendem Zusammenhang:

$$x = \frac{B \cdot F}{d} \quad (3.22)$$

In Abbildung 3.19 ist der schematische Aufbau des Triangulationsprinzips dargestellt. F entspricht dem Abstand zwischen der Empfangsoptik und der Detektionsebene, B dem Abstand zwischen den Achsen der Sende- und Empfangsoptik. Die Bestimmung des Schwerpunkts x erfolgt grundsätzlich mit Hilfe von positionsempfindlichen Halbleiterbauelementen (PSD oder CCD).

Gleichzeitig ist anhand der Gleichung 3.22 zu erkennen, dass die maximal erzielbaren Reichwei-

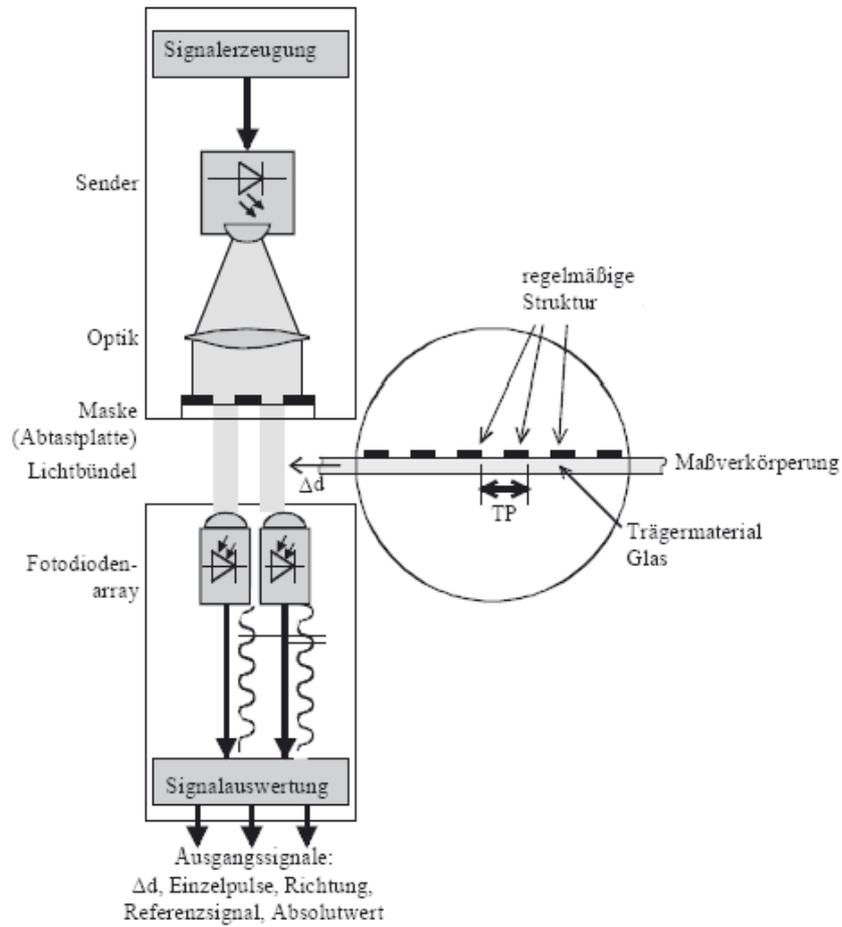


Abbildung 3.18.: Schematischer Aufbau einer inkrementellen Abtasteinheit [19, Seite 175]

ten (≈ 5000 [mm]) ausschließlich von der Sensorbaugröße beeinflusst werden. Im Allgemeinen werden die erzielbaren Reichweiten über den Basisabstand B variiert.

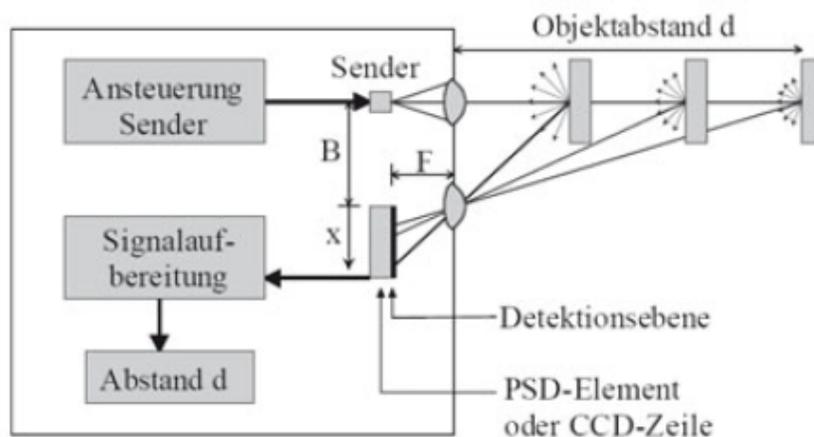


Abbildung 3.19.: Schematische Darstellung des Triangulationsprinzips [19, Seite 170]

Pulslaufzeitverfahren

Der Messaufnehmer sendet einen definierten Lichtimpuls aus und ermittelt dabei die Zeit Δt , die der Impuls benötigt, um vom Messobjekt reflektiert und von der Empfängereinrichtung aufgefangen zu werden. Die Zeit ist dabei ein Maß für den Objektabstand d .

Mit Hilfe des Brechungsindex n und der Lichtgeschwindigkeit c_M im umgebenden Medium ergibt sich - wie in Gleichung 3.23 gezeigt - folgender Zusammenhang zwischen der Differenzzeit Δt mit dem Objektabstand d .

$$d = \frac{c_M \cdot \Delta t}{2 \cdot n} \quad (3.23)$$

Der Brechungsindex oder Brechzahl ($n = c_0/c_M$) gibt an, um welchen Faktor die Wellenlänge und die Geschwindigkeit des Lichts in einem Medium kleiner sind als im Vakuum (in der Luft $n = 1,000292 \approx 1$).

Im Laufe der Zeit wurden die elektronischen Verfahren zur Signalaufbereitung und Zeitmessung immer stärker weiterentwickelt. Der schematische Aufbau einer Messung anhand des Pulslaufzeitverfahrens ist in Abbildung 3.20 zu sehen.

Grundsätzlich wird beim Aussenden des Lichtimpulses eine elektronische Zeitmesseinrichtung getriggert und beim Empfangen des Lichtsignals die verstrichene Zeit ausgelesen. Signale, die von weiter entfernten Messobjekten reflektiert werden, müssen von der Steuerung ausgeblendet werden. Daher ist bei sehr weit entfernten Messobjekten eine Mindestlichtintensität für den Empfänger notwendig. Somit sind mit Verwendung von Spiegelreflektoren am Messobjekt bis zu 100 [m] Messstrecke erzielbar.

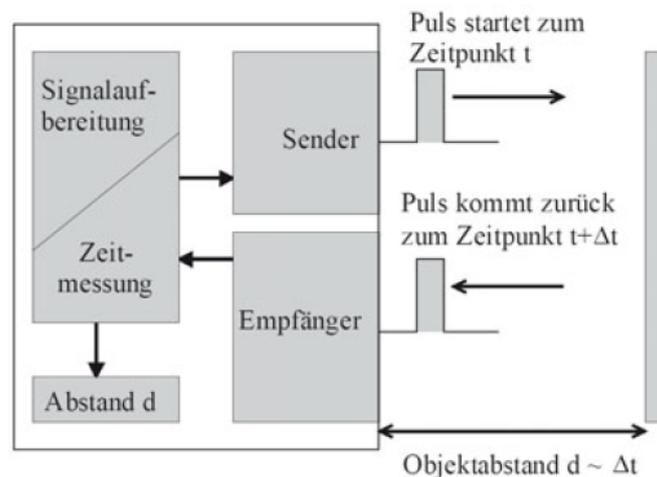


Abbildung 3.20.: Darstellung des Pulslaufzeitverfahrens [19, Seite 172]

Phasen- oder Frequenzlaufzeitverfahren

Das Phasen- oder Frequenzlaufzeitverfahren ist - vom Namen ersichtlich - den Laufzeitverfahren zuzuordnen. Die Intensität des Lichts - bestehend aus amplituden- und frequenzmodulierter Wellenlänge λ_m und Periodendauer T_m - hat den in Gleichung 3.24 gezeigten Zusammenhang.

$$\lambda_m = \frac{c \cdot T_m}{n} \quad (3.24)$$

Der Objektabstand d kann dabei durch die Messung einer Phasendifferenz $\Delta\varphi$ bzw. Frequenzdifferenz Δf zwischen dem gesendeten und empfangenen Licht bestimmt werden.

Eine konstante Frequenzänderung $\pm df/dt$ ist bei einer Amplitude H - zwischen maximalem und minimalem Wert - am einfachsten zu bestimmen. Der Objektabstand d ist dabei eine Funktion der Amplitude, der modulierten Wellenlänge und der Frequenzdifferenz Δf zwischen der Sendefrequenz f_S und der Empfangsfrequenz f_E ($\Delta f = f_S - f_E$). Der Zusammenhang ist in Gleichung 3.25 dargestellt. Der prinzipielle Aufbau zur Messung der Frequenzdifferenz ist in Abbildung 3.21 illustriert. Durch Verwendung mehrerer Frequenzen lässt sich die Reichweite des Messbereichs verändern.

$$d = \frac{\Delta f}{2 \cdot H} \cdot \frac{\lambda_m}{2} + i \cdot \frac{\lambda_m}{2}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (3.25)$$

Wie bereits erwähnt, in Gleichung 3.26 und Abbildung 3.22 gezeigt, lässt sich durch eine

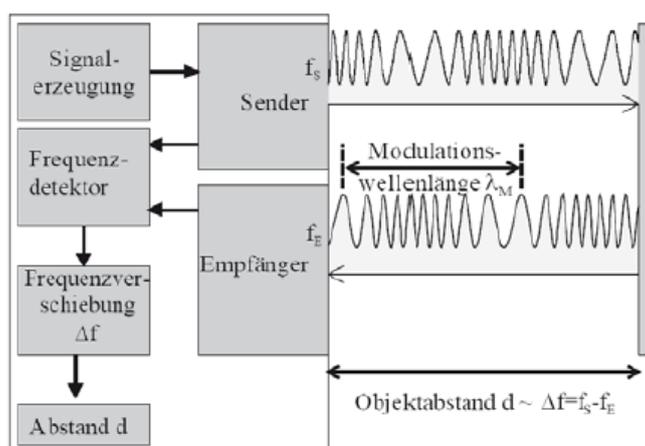


Abbildung 3.21.: Prinzip des Frequenzlaufzeitverfahrens [19, Seite 173]

Vermessung der Phasendifferenz ebenfalls der Objektabstand ermitteln. Die Phasenverschiebung wiederholt sich dabei periodisch mit dem Objektabstand, wobei die Eindeutigkeit der Messung nur bis zur halben Modulationswellenlänge $\lambda_m/2$ gewährleistet wird. Daraus folgt, dass die Genauigkeit der Messung bei sinkender Wellenlänge steigt und somit mehrere Wellenlängen gleichzeitig verwendet werden.

$$d = \frac{\Delta\varphi}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\lambda_m}{2} + i \cdot \frac{\lambda_m}{2}, i = 0, 1, 2, \dots \quad (3.26)$$

Interferometrische Längenmessung

Bei dem Verfahren der Interferometrischen Längenmessung wird die Welleneigenschaft von Laserlicht ausgenutzt. Die grundsätzliche Voraussetzung des Messprinzips ist ein monochromatisches, kohärentes Licht mit einer Wellenlänge λ . Diese Art des Lichts kann bsp. ein Laser erzeugen. Die Darstellung des prinzipiellen Aufbaus ist in Abbildung 3.23 illustriert.

Das vom Sender ausgehende Laserlicht trifft auf einen Strahlteiler - bestehend aus einem teildurchlässigen Spiegel - wobei der Lichtstrahl in zwei Teilbündel separiert wird. Ein Strahl bewegt sich dabei in Richtung eines feststehenden Spiegels und wird von diesem reflektiert und legt dabei die Strecke s_1 zurück; der andere Strahl bewegt sich in Richtung des beweglichen Spiegels

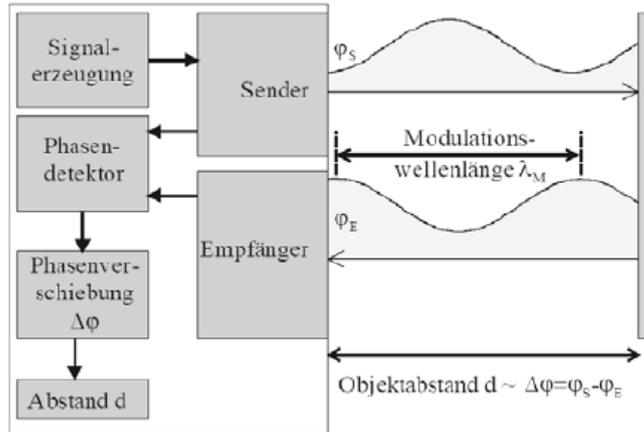


Abbildung 3.22.: Prinzip des Phasenlaufzeitverfahrens [19, Seite 173]

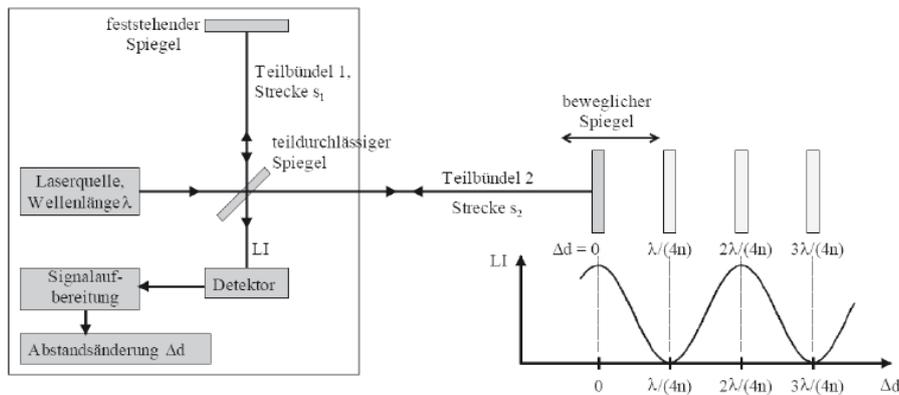


Abbildung 3.23.: Prinzip der interferometrischen Längenmessung [19, Seite 176]

und legt s_2 zurück. Beide Strahlen treffen erneut am teildurchlässigen Spiegel auf und überlagern einander am Schnittpunkt. Durch das Interferenzverhalten des Lichts entsteht dabei eine periodische Helligkeitszunahme welche als s.g. Lichtintensität LI gemessen werden kann. Dadurch hat eine Abstandsänderung Δd des Objekts folgenden Zusammenhang auf die Lichtintensität:

$$LI \propto \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot n \cdot 2\Delta d\right)$$

Die entstandene Wegänderung wird somit aus der Anzahl N der durchlaufenden Maxima der Lichtwelle errechnet - wie in Gleichung 3.27 gezeigt.

$$\Delta d = n \cdot \frac{\lambda}{2n} \quad (3.27)$$

[16, Seiten 177 - 185], [21, Seiten 187 - 193], [19, Seiten 75 - 77, 162 - 178], [22, Seiten 307 - 321]

3.5.3. Akustisches Messprinzip

Die Lehre des Schalls ist das Wissenschaftsgebiet der Akustik. Schall tritt - wie Licht - in Wellen, den s.g. Schallwellen auf. Dabei können ähnliche Effekte wie Interferenz oder Beugung auftreten. Im Allgemeinen sind Schallwellen mechanische Schwingungen - also lokale Druckschwankungen - innerhalb von Materie. Die Einteilung von speziellen Schallbereichen erfolgt anhand der Schallfrequenz:

- Infraschall: nicht hörbar bis 16 [Hz]
- Hörbarer Schall: 16 [Hz] bis 20 [kHz]
- Ultraschall: 20 [kHz] bis 1 [GHz]
- Hyperschall: ab 1 [GHz]

Mathematische Beschreibung

Schallwellen breiten sich üblicherweise von ihrer Quelle in einer Kugelwelle mit Schallgeschwindigkeit c aus. Wie bei Licht ist der Zusammenhang zwischen Wellenlänge λ , Schallgeschwindigkeit c und Frequenz f , folgender:

$$\lambda = c \cdot f$$

Da grundsätzlich die Abstandsmessung mit Ultraschall auf dem Prinzip des Laufverfahrens basiert, ist die exakte Kenntnis der Schallgeschwindigkeit von höchstem Interesse. Die Geschwindigkeit in idealen Gasen ist abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit, der Temperatur und vom Luftdruck (nicht aber vom statischen Druck).

Die Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit von der absoluten Temperatur T ist:

$$c = c_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{T}{273,15^\circ\text{C}}}$$

Steigende relative Luftfeuchtigkeit erhöht ebenfalls die Schallgeschwindigkeit, wobei diese Abhängigkeit nur sehr geringe Änderungen erzeugt.

Sensorische Anwendungen

Ultraschallmessaufnehmer können grundsätzlich in einem Schrankenbetrieb arbeiten, dabei ist jedoch die Messung von Abständen nicht möglich. Daher wird hier nicht speziell darauf näher eingegangen.

Laufzeitverfahren

Wie eingangs erwähnt, basiert die Abstandsmessung bei einem Ultraschallmessaufnehmer auf einer Laufzeitauswertung einer Schallwelle. Der Sensor befindet sich anfangs im Sender-Modus und emittiert einen Wellenzug im Ultraschallbereich, der vom Messobjekt als Echo reflektiert wird. Nach dem Senden des Signals schaltet der Aufnehmer in den Mikrofon-Modus um. Während des Umschaltens und des Abklingens des Signals, kann der Wandler kein Echo empfangen. Dies bezeichnet man als *Blindzone*. Nach dem Empfangen des Echos wird die Zeit zwischen dem Senden und Empfangen gemessen, woraus der Abstand errechnet werden kann. Das Funktionsprinzip ist in Abbildung 3.24 gezeigt.

[19, Seiten 108 - 112, 177 - 184]

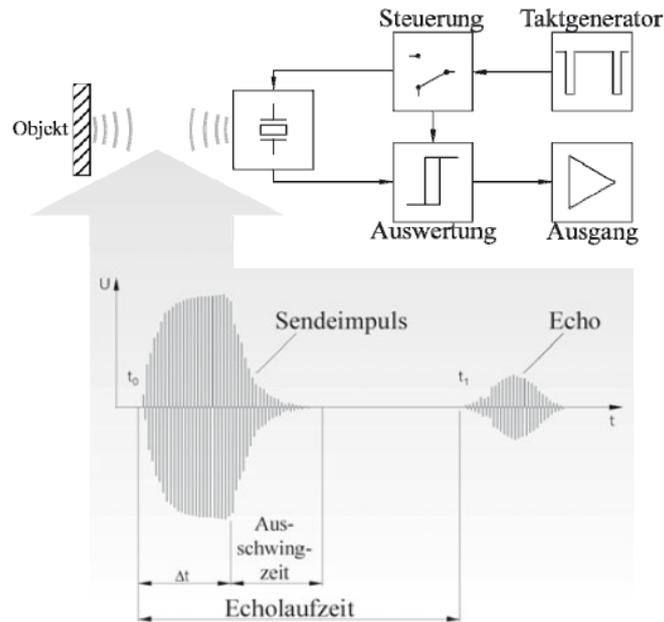


Abbildung 3.24.: Funktionsweise eines Ultraschalllaufzeitsensors [19, Seite 178]

3.5.4. Induktives Messprinzip

Das Prinzip eines induktiven Messaufnehmers basiert auf dem Elektromagnetismus bekannten Phänomen der Induktion. Grundsätzlich gibt es dafür zwei unterschiedliche Ausführungsprinzipien: *Längsanker-* und *Querankerprinzip*.

Mathematische Beschreibung

Im einfachsten Fall betrachtet man einen Längsankeraufnehmer, bestehend aus einer Spule und einem weichmagnetischen Kern. Dabei gilt:

$$\Phi = \frac{\Theta}{R_m} = \frac{n \cdot I}{R_m} \quad (3.28)$$

Dabei lässt sich erkennen, dass der magnetische Fluss Φ ein Produkt aus der Spulenwindungszahl n und dem darin fließenden Strom I dividiert durch den magnetischen Widerstand R_m ist. Somit erhält man aus Gleichung 3.28 die zeitliche Veränderung des magnetischen Flusses:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = \frac{n}{R_m} \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.29)$$

Das Induktionsgesetz besagt:

$$u_{ind}(t) = -n \cdot \frac{d}{dt}\Phi(t) \quad (3.30)$$

Damit ergibt sich aus den beiden Gleichungen 3.29 und 3.30 die Gleichung 3.31:

$$u_{ind}(t) = -n \cdot \frac{n}{R_m} \cdot \frac{di(t)}{dt} = -\frac{n^2}{R_m} \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3.31)$$

Fließt durch eine Spule ein Wechselstrom $i(t)$, so erzeugt dieser - laut den Gesetzen des Elektromagnetismus - einen sich ändernden magnetischen Fluss $\Phi(t)$. Dieser Fluss induziert in der

Spule eine elektrische Spannung $u_{ind}(t)$, welche einen elektrischen Strom treibt. Dieser ist dem ursprünglichen Strom entgegengesetzt, d.h. dem Widerstand entgegengesetzt. Die Gleichung 3.32 zeigt den Quotienten n^2/R_m , der dabei als *Induktivität* L bezeichnet werden kann.

$$L = \frac{n^2}{R_m} \quad (3.32)$$

Wie man erkennen kann, ist die Induktivität über den magnetischen Widerstand, der umgekehrt proportional dazu ist, steuerbar. Laut den Gesetzen der Elektrotechnik verhalten sich die magnetischen Widerstände analog zu den Elektrischen, daher kann man den magnetischen Widerstand - wie folgt - berechnen:

$$R_{m,ges} = R_{m,A} + R_{m,K}$$

$$R_{m,ges} = \frac{l_A}{\mu_0 \cdot \mu_{r,L} \cdot A_A} + \frac{l_K}{\mu_0 \cdot \mu_{r,K} \cdot A_K}$$

Der Index K steht für Kern und A für Außen. Mit $A_A \rightarrow \infty$ ergibt sich Gleichung 3.33:

$$R_{m,ges} \approx \frac{l_K}{\mu_0 \cdot \mu_{r,K} \cdot A_K} \quad (3.33)$$

Somit ist die Induktivität einer Spule eine Funktion der Kernlänge l_K , des Kernquerschnitts A_K , Anzahl der Windungen der Spule n und dem Material - also der magnetischen Permeabilität μ - des durch Feldlinien durchsetzten Mediums.

$$L = f(l_K, A_K, n, \mu_{r,K})$$

$$L = \frac{n^2 \cdot A_K \cdot \mu_K}{l_K} \quad (3.34)$$

Der Ausdruck $\mu_{r,i}$ bezeichnet die relative Permeabilität. Diese ist materialabhängig, wobei der Zusammenhang gilt:

$$\mu_K = \mu_0 \cdot \mu_{r,K}$$

Sensorische Anwendungen

Induktive Messaufnehmer verfügen häufig über einen frei verschiebbaren Kern, weshalb nahezu keine mechanischen Rückwirkungen existieren. Der Messbereich üblicher Ausführungen bewegt sich meist zwischen 0,1 [mm] bis 2000 [mm].

Einspulen-Längsanker

Im einfachsten Fall besteht ein Einspulen-Längsanker aus einer magnetischen Rückflusshülse, einer darin befindlichen Spule und zwei weichmagnetischen (ferromagnetischen) Abschlusscheiben. Der axial verschiebbare Kern muss ebenfalls aus einem weichmagnetischen Werkstoff bestehen, damit die Induktion das gewünschte Maß erreicht. Eine Skizze des Aufbaus eines Einspulen-Längsankers ist in Abbildung 3.25 zu sehen.

Die Errechnung des gesamten magnetischen Widerstandes folgt der Formel:

$$R_{m,ges} = R_m(l_{L,0}) + R_m(l_{K,Fe}) + R_m(H\ddot{u}) + 2 \cdot R_m(S) \quad (3.35)$$

$$R_{m,ges} = \frac{l_0}{\mu_0 \cdot \mu_L \cdot A_L} + \frac{l_{K,Fe}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,K,Fe} \cdot A_K} + \frac{l_{H\ddot{u}}}{\mu_0 \cdot \mu_{r,H\ddot{u}} \cdot A_{H\ddot{u}}} + 2 \cdot \frac{l_S}{\mu_0 \cdot \mu_{r,S} \cdot A_S} \quad (3.36)$$

In der Annahme, dass die Hülse, die beiden Scheiben und der Kern aus einem weichmagnetischen Material gefertigt sind, kann man folgenden Zusammenhang für die Permeabilität aufzeigen:

$$\mu_{r,K,Fe} = \mu_{r,Hü} = \mu_{r,S} \gg \mu_{r,L} = 1$$

Somit kann der Term des gesamten magnetischen Widerstands vereinfacht werden, wie die Gleichung 3.37 darstellt.

$$R_{m,ges} \approx \frac{l_{L,0}}{\mu_0 \cdot A_L} \quad (3.37)$$

Durch das Einsetzen der Gleichung 3.33 ergibt sich aus der Gleichung 3.32 - mit der Variation des Luftspalts $l_{L,0} \pm \Delta l_L$ - eine neue Induktivität:

$$L \approx \frac{n^2 \cdot \mu_0 \cdot A_L}{l_{L,0} \pm \Delta l_L} \quad (3.38)$$

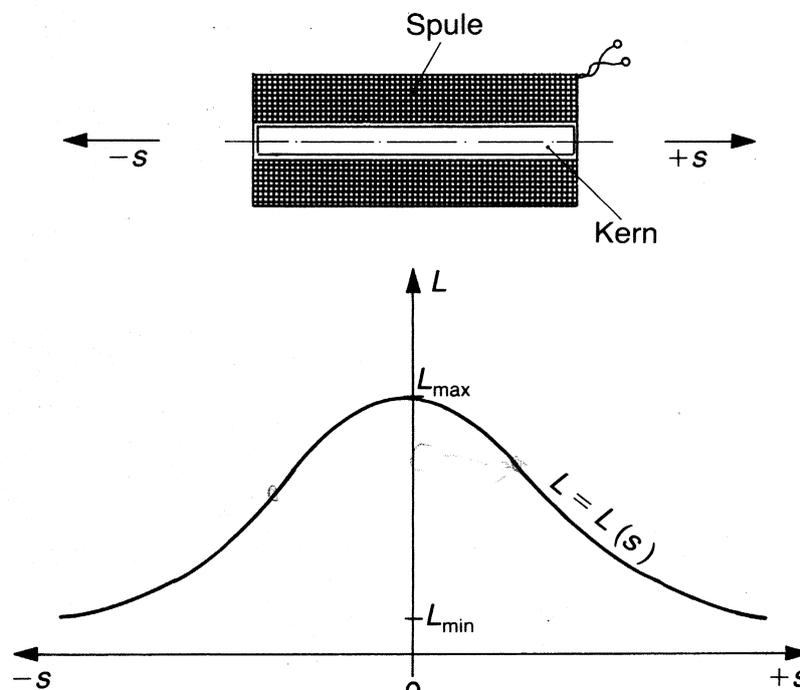


Abbildung 3.25.: Prinzipaufbau des Einspulen-Längsankers und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung [21, Seite 93]

Differenzspulen-Längsanker

Ein Differenzspulen-Längsanker ist ähnlich in seinem Aufbau zu einem Einspulen-Längsanker. Wie in Abbildung 3.26 zu erkennen ist, besteht dieser aus zwei Spulen und einem - mit einem nichtmagnetisierbaren Stab verbundenen - weichmagnetischen Kern. Wenn der Kern in der Mittelstellung steht, entsteht keine Differenzinduktivität $\Delta L = 0$. Kommt es anschließend zu einer Verschiebung des Kerns, ändern die Induktivitäten L_1 und L_2 der beiden Spulen sich gegensinnig. Die Vorteile dieser Konstruktion zeigen sich sowohl in einer thermischen Fehlerkompensation, einer doppelt so hohen Messempfindlichkeit, einem doppelten Messbereich als

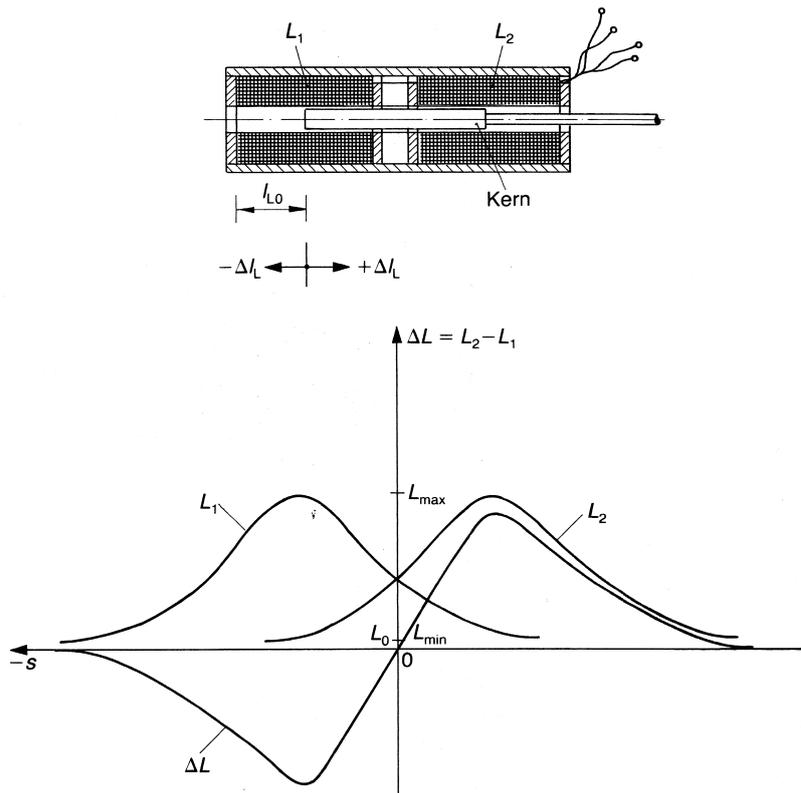


Abbildung 3.26.: Prinzipaufbau des Differenzspulen-Längsanker und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung [21, Seite 94]

auch in der verbesserten Nichtlinearität. Die Einzelinduktivitäten $L_1(s)$, $L_2(s)$ und die Differenzinduktivität $\Delta L(s)$ sind ebenfalls in Abbildung 3.26 unten zu sehen.

Einspulen-Queranker

Für die Wegmessung unter 2 [mm], eignen sich - aufgrund der hohen Empfindlichkeit - Querankeraufnehmer besonders gut. In Abbildung 3.27 ist der rudimentäre Aufbau eines Querankeraufnehmers dargestellt.

$$L(\Delta l_L) = \frac{\mu_0 \cdot n^2 \cdot A}{\frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}} + 2 \cdot \Delta l_L} \quad (3.39)$$

Ist kein Luftspalt vorhanden, resultiert eine maximale Induktion L_{max} . Am Verlauf ist zu erkennen, dass die Empfindlichkeit (Steigung der Kurve) und die Linearität nur im Anfangsbereich, also bei kleinem Abstand, für eine sensorische Anwendung ausreichen. Daher sind Einspulen-Queranker nur bei kleine Arbeitsabstände sinnvoll einsetzbar.

[16, Seiten 186 - 191], [18, Seiten 61 - 66], [21, Seiten 89 - 98], [19, Seiten 25 - 30]

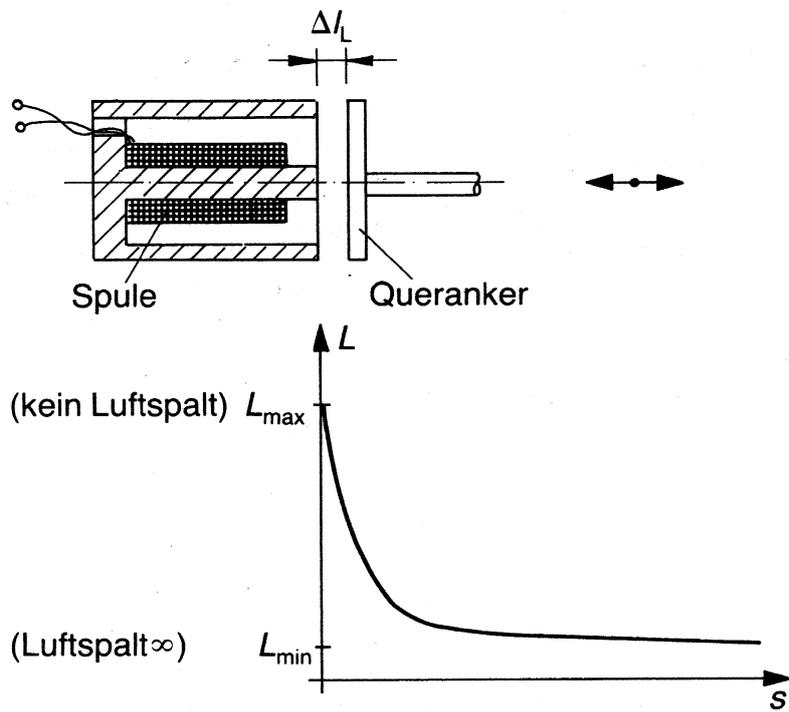


Abbildung 3.27.: Prinzipaufbau des Querankeraufnehmer und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung [21, Seite 97]

Teil III.

Praktische Ausführung

4. Messkonzeptentwicklung

Die detaillierte Behandlung der Messtechnik im Teil II dient als Ausgangspunkt für die praktische Ausführung des Projekts. Diese beginnt mit der Auswahl eines Messaufnehmers, welche auf einer Anforderungsliste basiert, deren Bestandteile sich speziell auf die vorliegende Situation beziehen. Die Hauptaufgabe besteht in der Entwicklung eines Vermessungssystems für die Überprüfung des Aktuators, also der Weg- bzw. Abstandsbestimmung über der Zeit, daher sind ausreichende Genauigkeit und passender Messbereich die wichtigsten Kriterien.

Für die Firma *FELDER KG* ist ein Serieneinsatz des Aktuators als Sicherheitseinrichtung das geplante Ziel. Dafür müssen die einzelnen Komponenten - Aktuator, Steuerungs- und Auslöseelektronik - in Praxisversuchen überprüft werden, um deren Sicherheit zu garantieren. Davor muss jedoch das eigentliche Messprinzip auf dessen Ausführbarkeit und korrektes Arbeiten überprüft werden. Dies wird ebenfalls mit Versuchen ermittelt. Eine sinnvolle Aussagekraft bei diesen Tests ist meist nur mit Hilfe statistischer Modelle möglich, weshalb die Praxistests ausreichend oft durchgeführt werden müssen.

4.1. Sensorauswahl

Um die Auswahl des geeigneten Messaufnehmers treffen zu können, ist eine Evaluierung der wichtigsten Messaufnehmereigenschaften unbedingt notwendig. Diese sind in der Tabelle 4.1 zu finden. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Messtechnik stark durch Entwicklungen in der Elektronik und Regelungstechnik beeinflusst wird. Daher kommt es ständig zu neuen Verbesserungen der Sensoren und deren Genauigkeitsklassen - siehe Tabelle 4.2.

In der folgenden Auflistung sind die wichtigsten Anforderungskriterien für die Sensorauswahl dargestellt:

- **Messbereich:** Ein Hauptkriterien für einen Abstands- bzw. Wegmessaufnehmers ist der durch den Sensor erreichbare Messbereich. Da jedes System unterschiedliche Bereiche abdecken kann, ist dies der wichtigste Punkt bei der Orientierung für die Auswahl des Messaufnehmers. Der notwendige Messbereich bewegt sich - nach Abmessen der Maschine - im Bereich von ca. 165 [mm] bis 170 [mm]. Dieser Bereich entspricht der maximalen Schnitttiefe des Kreissägeblatts, zuzüglich einer Toleranz für die Montage bzw. den Bezugspunkt für den Laser, der anfänglich am Spaltkeil angenommen wurde. Eine Abbildung des Spaltkeils am Sägenaggregat ist in Abbildung 4.1 gezeigt.
- **Dynamische Auflösung:** Zusätzlich ist die Auflösung ein wichtiges Kriterium bei der Auswahl des Messaufnehmers. Da es sich bei dieser Anwendung um eine dynamische Abstandsmessung zur Erfassung der Sägeblattposition handelt, ist die erforderliche Auflösung des Messaufnehmers bei ≈ 100 [μm] angenommen. Diese ist von der Abtastfrequenz (Einheit [Hz], also $1/s$, oder auch Abtastung/Sekunde) abhängig.

In der **Annahme**, das Absenken des Sägeblatts aus der maximalen Höhe (170 [mm])

beträgt eine halbe Sekunde, kann man die Auflösung der Messpunkte errechnen - die Zeitachse bleibt anhand der konstanten Abtastfrequenz stets gleich.

$$\text{Auflösung} = \frac{\text{Weg}}{\text{Frequenz} \cdot \text{Zeit}} = \frac{[\text{mm}]}{[\text{s}^{-1}] \cdot [\text{s}]} = [\text{mm}]$$

Daraus ist zu erkennen, dass die Auflösung umso genauer ist, je höher die Abtastfrequenz ausgewählt wurde. Eine anzustrebende Auflösengenauigkeit von $\approx 100 \text{ } [\mu\text{m}]$ fordert somit eine Frequenz von mindestens 3400 [Hz]. Dabei ist anzumerken, dass die zuvor verwendeten Werte **gemittelt** sind.

- **Preis:** Qualität hat bekanntlich ihren Preis, doch in vielen Fällen wird der Preis eines Messaufnehmers weitgehend durch die Genauigkeitsklasse (siehe Tabelle 4.2) beeinflusst. Je genauer, umso höher der Preis. Daher ist auch bei dieser Anforderung speziell der Einsatz vom Verwendungszweck anhängig.
- **Zusätzliche Eigenschaften:** Eine einfache Montage des Sensors, Unempfindlichkeit gegen Erschütterungen und kontaktloses Arbeiten sind zusätzliche wünschenswerte Merkmale.

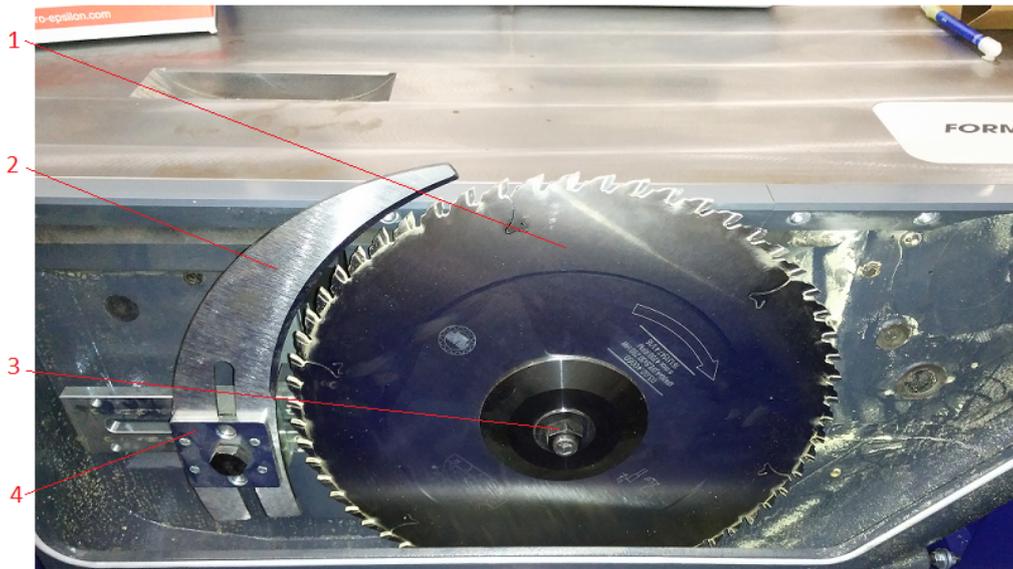


Abbildung 4.1.: Darstellung des freilegenden Kreissägeblatts an der *FELDER FORMAT 4 Kappe 550*: Sägeblatt (1), Spaltkeil (2), Wellenmutter (3) und Spaltkeilbefestigung (4) [Foto: Matti Felsner].

Die Wahl des passenden Sensorprinzips fiel schlussendlich auf die *optische Triangulation* im Kapitel 3.5.2 und die Wahl des passenden Lieferanten und Produkts fiel dabei auf die deutsche Firma *MICRO-EPSILON MESSTECHNIK GmbH & Co. KG*.

Die Firma *MICRO-EPSILON* bietet eine breite Palette an Triangulationssensoren an, die alle für spezifische Anwendungsbereiche konzipiert sind. Die wesentlichen Spezifikationen des gewählten Sensors sind in der Tabelle 4.3 zu finden.

Zu den einzelnen oben aufgelisteten Kriterien:

Sensorprinzip	Weg	Abstand	Messstrecke	Genauigkeitsklasse	Schnittstellen
induktiv	X	X	0,1 - 1000 mm	2-3	analog
kapazativ		X	0 - 20 mm	4 - 3	analog
optisch Triangulation		X	20 - 5000 mm	7 - 5	analog, digital, Bus
optisch Lichtlaufzeit		X	0 - 10000 mm	7	analog, digital, Bus
optisch Interferometrie	X		0 - ∞ mm	1	digital, Bus
optisch Inkrementell	X		0 - 10000 mm	5 - 6	digital, Bus
fotoelektrische Abtastung	X		0 - 10000 mm	1 - 2	analog, digital, Bus
potenziometrisch	X		0 - 5000 mm	4 - 3	analog
Ultraschall		X	25 - 8000 mm	5 - 6	analog, digital

Tabelle 4.1.: Auswahlmöglichkeiten der Sensoren für die Abstandsmessung (Durch Verbesserung der Elektronik und Messaufnahmetechnik sind mittlerweile erhöhte Messstrecken und Genauigkeiten erzielbar). [19, Seiten 127 - 128]

Genauigkeit	< 1 μ m	< 10 μ m	< 50 μ m	< 100 μ m	< 500 μ m	< 1 mm	< 5 mm
Klasse	1	2	3	4	5	6	7

Tabelle 4.2.: Einteilung der Genauigkeitsklassen [19, Seite 128]

- Messbereich: Der Messbereich ist - wie in Kapitel 3.5.2 beschrieben - abhängig von den geometrischen Verhältnissen, also den Dimensionen des Messaufnehmers. Daraus entsteht ein definierter Messbereichsanfang und ein -ende, die den eigentlichen Messbereich einschließen. Dieser Umstand hat bei der Auswahl des geeigneten Produkts und bei der Entwicklung der Haltevorrichtung einen wesentlichen Einfluss. Viele Hersteller bieten Triangulationssensoren mit unterschiedlichen Messbereichen an, weshalb das Angebot sehr umfangreich ist. Zusätzlich beeinflusst der Messbereich die Haltevorrichtung des Sensors - in diesem Fall die Länge der Schwenkarme (siehe Kapitel 6).
- Dynamische Auflösung: Grundsätzlich verfügen Triangulationssensoren über hohe Messfrequenzen. Der ausgewählte Messaufnehmer ist ab Werk standardmäßig auf 2 [kHz] eingestellt. Die Frequenz von 4 [kHz] ist nur bei einer digitalen Messung möglich, da der Sensor mittels ASCII-Code oder einem Webinterface speziell darauf programmiert werden muss. Für die nachfolgende Machbarkeitsüberprüfung im Kapitel 5.1 ist dies jedoch nicht zwingend erforderlich, da einerseits die geforderte Auflösung nicht so klein gewählt werden muss und andererseits bietet eine analoge Messung einige Vorteile, wie im Kapitel 5.3 aufgelistet.
- Preis: Die Kaufpreise für Triangulationssensoren sind grundsätzlich recht hoch. Das ist meist von der Messgenauigkeit, -Frequenz und von der Verwendung elektronischer Komponenten abhängig. Dennoch bietet *MICRO-EPSILON* hochqualitative Produkte an, die langfristig ihre Investition gerechtfertigten.

- Zusätzliche Eigenschaften: Die sehr kompakte Bauweise und einfache Verwendung des gewählten Messaufnehmers sind sehr von Vorteil. Zusätzlich kann der Sensor sehr unkompliziert montiert werden. Ein besonderer Sicherheitsaspekt wird durch das kontaktlose Messprinzip gewährleistet.

Somit erfüllt der ausgewählte Messaufnehmer ILD1420-500 der Firma *MICRO-EPSILON MESS-TECHNIK GmbH & Co. KG* ausgesprochen gut die anfangs definierten Anforderungen.

Bezeichnung	ILD1420-500
Messbereichsanfang	100 mm
Messbereich	500 mm
Messbereichsende	600 mm
Linearität	500 ... 1000 μm
Reproduzierbarkeit	20 ... 40 μm
Messrate	bis 4 kHz
Lichtquelle	Halbleiterlaser <1 mW, 670 nm (rot)
Lichtfleckdurchmesser	750 x 1100 μm
Laserschutzklasse	Klasse 2 nach DIN EN 60825-1: 2015-07

Tabelle 4.3.: Technische Daten des ausgewählten Triangulationssensors

5. Messsystemtests

5.1. Konzeptüberprüfung

Aus rein ökonomischer Sicht ist es nicht sinnvoll, erst komplett entwickelte Projekte auf deren Tauglichkeit zu überprüfen. Zwischenüberprüfungen der Kosten, Funktionalität und Machbarkeit eines Projekts stellen äußerst wichtige Meilensteine dar. Daher ist es in diesem Fall sehr praktisch - bevor eine eigene Haltevorrichtung physisch erstellt wird - das Messprinzip und den Messaufnehmer auf deren funktionierenden Betrieb und konsistente Messergebnisse zu überprüfen.

Die Überprüfung des Konzepts kann nur mit Hilfe von Versuchen erfolgen. Dabei geht es jedoch nicht direkt um die Überprüfung des Aktuators, sondern vorrangig um die Bestimmung der Messfehler und der Nachweis korrekter Arbeitsweise des Messprinzips. Diese Tests können dabei in einer rudimentären Konfiguration des Systems erfolgen (vertikaler Schnittwinkel und stehende Kreissäge).

Der dafür verwendete Sensorhaltearm hat keine besonderen Anforderungen mit Ausnahme des sicheren Haltens und einfacheren Positionierens des Messaufnehmers zu erfüllen.

Erst wenn davon ausgegangen werden kann, dass das Messergebnis ausschließlich durch den zufälligen Fehler verfälscht wird, kann der eigentliche Machbarkeitsnachweis - im englischen „*Proof of Concept*“ - erfolgen.

5.2. Versuchsaufbau

Wie bereits erwähnt, soll das Sägenaggregat der Maschine, bevor es zu Kontakt zwischen dem Sägeblatt und biologischem Material - also menschliche Gliedmaßen - kommt, in das Innere der Maschine abgesenkt werden. Da die Überprüfung dieser Sicherheitsvorrichtung von hoher Wichtigkeit ist, muss diese mit Hilfe von Messungen auf korrekte Funktionsweise überprüft werden. Da es sich dabei um eine Positionserfassung handelt, sind die Messergebnisse bereits vor der Messung als **Abstand über der Zeit** bekannt.

Gleichzeitig müssen die Messungen stets reproduzierbar sein und konsistente Ergebnisse liefern. Aus diesem Grund ist es notwendig, dass jede Versuchsanordnung genau dokumentiert und mit ausreichenden Durchläufen überprüft wird.

Kreissägeneinstellungen:

Die praktisch durchzuführenden Tests werden zur Sicherung der Machbarkeitsüberprüfung herangezogen. Dabei steht die Sicherheit und Einfachheit im Vordergrund, weshalb die Versuche unter speziellen Bedingungen durchgeführt werden.

- stehende Maschine ($n = 0$)

- niedrige Schnitttiefe ($s = \max. 50 \text{ [mm]}$)
- keine Sägeblattschrägstellung (vertikaler Schnittwinkel)
- manuelle Auslösung des Sicherheitssystems durch einen Schalter

Haltevorrichtung:

Die, für alle Versuche der Machbarkeitsüberprüfung, verwendete Haltevorrichtung ist in der Abbildung 5.1 gezeigt. Der Messaufnehmer (7) wird auf ein kleines Blechstück (5) (ca. $50 \text{ [mm]} \times 50 \text{ [mm]}$) geschraubt, das wiederum mit der Haltevorrichtung verschraubt wird. Die Haltevorrichtung besteht aus einem Magnetfuß (1) und zwei Schwenkarmen (4). Der erste Schwenkarm ist über ein Kugelgelenk (2) mit dem Magnetfuß verbunden, sodass die Positionierung sehr viel Freiheit erlaubt. Die beiden Schwenkarme sind per Drehgelenk (3) miteinander verbunden. Durch Anziehen des Handrads (6) werden alle Gelenke kraftschlüssig fixiert.

Detektionspunkt:

Der Laser benötigt eine einigermaßen glatte, nicht spiegelnde Oberfläche, die den Laserstrahl reflektiert, aber nicht ableitet. Der **anfängliche** Plan, den Spaltkeil als Abgriffspunkt zu verwenden, ist nach der ersten Probeabsenkung verworfen worden. Da der Spaltkeil wie ein einseitig eingespannter Biegeträger angesehen werden kann, hat er weitaus weniger Steifigkeit gegen seitliche Verformung. Die - durch den Absenkvorgang hervorgerufenen - mechanischen Schwingungen reichen aus, dass der Spaltkeil eine ausreichende Amplitude erreicht und somit der Laserstrahl nicht mehr reflektiert werden kann. Dies ist in der Abbildung 5.2 durch den sprunghaften Verlauf des Signals zu erkennen. Dabei verliert der Sensor den Reflexionspunkt am Spaltkeil, weshalb im graphischen Verlauf das Signal abrupt abfällt bzw. ansteigt und unterhalb eines gewissen Bereichs nicht mehr ausgegeben wird. Aus diesem Grund wurde der Abgriffspunkt zur Messung des Abstandes auf die Wellenmutter der Hauptspindel verlegt. In Abbildung 5.3 ist die Wellenmutter mit dem Lichtfleck des Laserstrahls abgebildet. Aus mechanischer Sicht ist dies eines der steifsten Elemente der Maschine, daher auch für die Reflexion des Lasers besonders geeignet. Bei **laufendem Aggregat** kann dies jedoch zum Problem werden, da einerseits der Vorschubtisch dafür komplett verschoben wird und daher die Sicherheitsvorrichtung manuell überteuert werden muss, andererseits bietet die Wellenmutter bei Rotation keine ebene Reflexionsfläche mehr. Für den Einsatz bei laufender Maschine ist Halterung des Spaltkeils am besten geeignet (siehe Abbildung 4.1 (4)).

5.3. Durchführung

Eine der Hauptaufgaben des Projekts ist die Durchführung der Versuche mit anschließender Auswertung der Ergebnisse, zur Überprüfung des Messprinzips. Die benötigten Bestandteile und Instrumente für die Kontrolle der Messapparatur sind:

- *FELDER FORMAT 4 Kappa 550*
- *Micro-Epsilon ILD 1420-500* Triangulationsaufnehmer
- Haltevorrichtung für den Messaufnehmer
- *Micro-Epsilon* Verbindungskabel
- elektrische Bauteile (Schalter S , Widerstand R , Kondensator C)

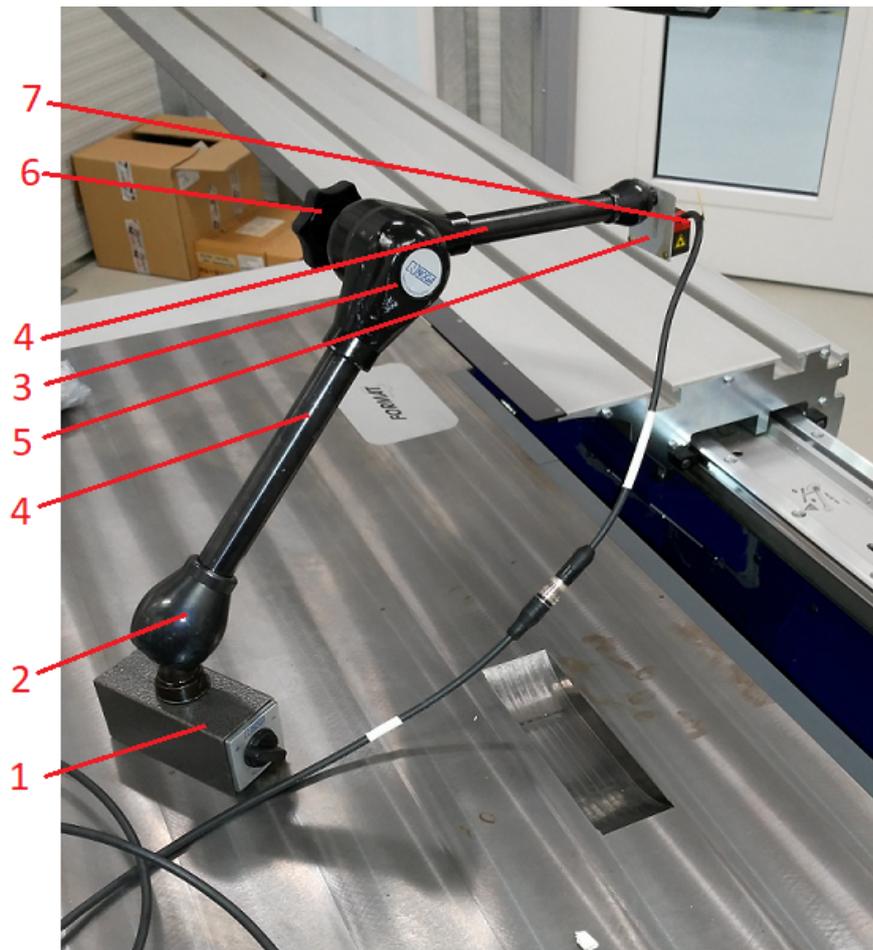


Abbildung 5.1.: Aufbau der temporären Haltevorrichtung für den Messaufnehmer zur Durchführung der Versuche: Magnetfuß (1), Kugelgelenk (2), Drehgelenk (3), Schwenkarm (4) Blechstück (5), Handrad (6) und Messaufnehmer mit Verbindungskabel (7) [Foto: Matti Felsner].

- *Pico Technology* Speicheroszilloskop *3406D*
- *Pico Technology* aktiver Differenzialastkopf *TA043*
- Notebook mit installierter *Pico Scope 6* Software

Dabei ist anzumerken, dass die wichtigsten Informationen bezüglich der verwendeten Elemente im AnhandA.2 zu finden sind.

Grundlagen für die Verarbeitung der Ergebnisse:

Die Messung des Abstandes kann bei Triangulationssensoren einerseits analog und andererseits digital erfolgen. Digitale Messungen sind vor allem bei größeren Messsystemen mit fix verbauten Aufnehmern sinnvoll. Die analoge Messung ist im elektrischen Aufbau wesentlich einfacher; zusätzlich sind keine speziellen Programmierungen des Sensors notwendig, da dieser in den Werkseinstellungen eingesetzt werden kann. Für die Ermittlung des Abstandes bei analogen Messungen gibt es zwei unterschiedliche Möglichkeiten:

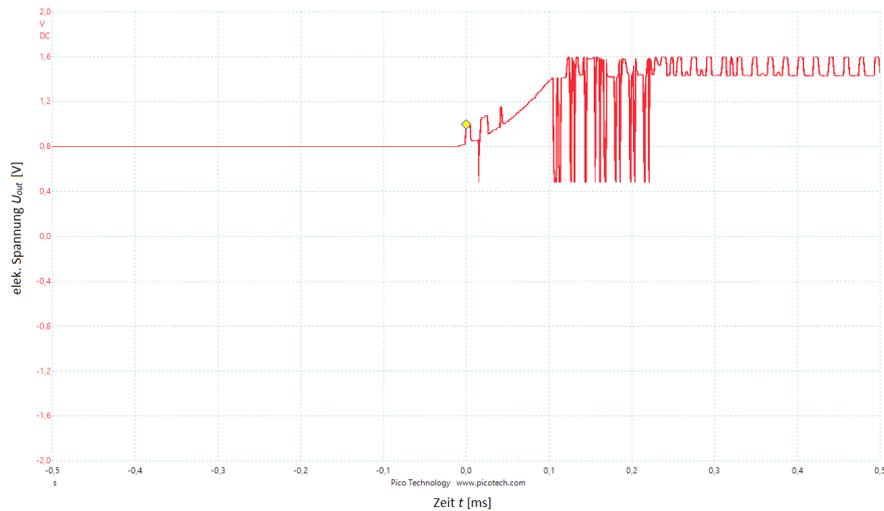


Abbildung 5.2.: Graphische Darstellung der Signalausgabe des Probedurchlaufs im Programm *Pico Scope 6*

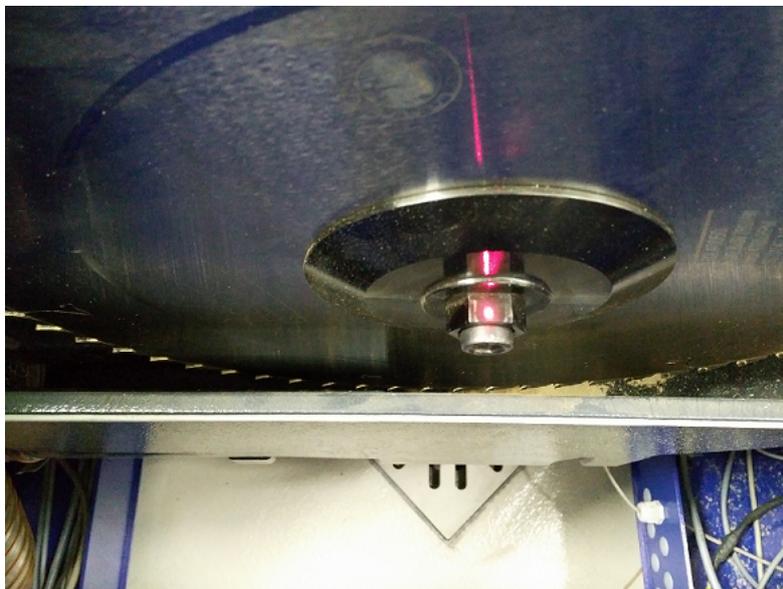


Abbildung 5.3.: Darstellung des neu definierten Detektionspunkt des Triangulationsaufnehmers an der Wellenmutter der Motorhauptspindel [Foto: Matti Felsner].

1. Abstandsermittlung über elektrischen Widerstand:

In diesem Fall wird eine zum Abstand proportionale Stromstärke gemessen. Da jedoch die meisten Oszilloskope Spannungen und Frequenzen detektieren, muss man die gemessene Spannung mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes ($U_{out} = R \cdot I_{out}$) umrechnen. Der Widerstand R entspricht dabei jenem, der zur Sicherung der thermischen Überbelastung installiert werden muss ($R = 500 [\Omega]$). Die - aus der Betriebsanleitung des Messaufnehmers (Betriebsanleitung optoNCDT 1420 - Seite 70 - siehe auch A.2.1) stammende - Umrechnungsformel

des Stromes I_{out} zum Abstand d ist:

$$d[\text{mm}] = \frac{(I_{out}[\text{mA}] - 4)}{16} \cdot 500[\text{mm}]$$

2. Abstandsermittlung über geometrische Verhältnisse an der Kreissäge:

Dabei muss die Spannung in beiden Extremlagen gemessen werden: Diese sind einerseits die maschinell eingestellte Schnitttiefe (max. 50 [mm]) des Kreissägeblatts und andererseits die unterste Einstellung (min. -17,5 [mm]), bei der der Magnet des Aktuators das Sägeaggregat nach dem Absenkvorgang erneut aufnimmt. Dadurch erhält man eine Spannungsdifferenz bei definiertem Abstand.

Während des Absenkvorganges befindet sich das Sägeaggregat innerhalb des Spannungsintervalls der eingestellten Schnitttiefe (obere Schranke d_{ob} und U_{ob}) und der untersten Einstellung (untere Schranke d_{ub} und U_{ub}). Daher kann man aus den gemessenen Faktoren $\Delta d_b = |d_{ob} - d_{ub}|$ und $\Delta U_b = |U_{ob} - U_{ub}|$ die resultierende Absenkung $\Delta d_{g,i}$ linear interpolieren. Die Gleichung 5.1 basiert dabei auf der in Abbildung 5.4 gezeigten Kennlinie.

$$\Delta d_{g,i} = \frac{\Delta d_b}{\Delta U_b} \cdot \Delta U_g = \frac{|d_{ob} - d_{ub}|}{|U_{ob} - U_{ub}|} \cdot (U_{g,i} - U_{ob}) \quad (5.1)$$

Diese Berechnung ist zwar aufwendiger als die Umrechnung der Spannung, dennoch sind dabei weniger Nichtlinearitäten, als bei der elektrischen Schaltung vorhanden.

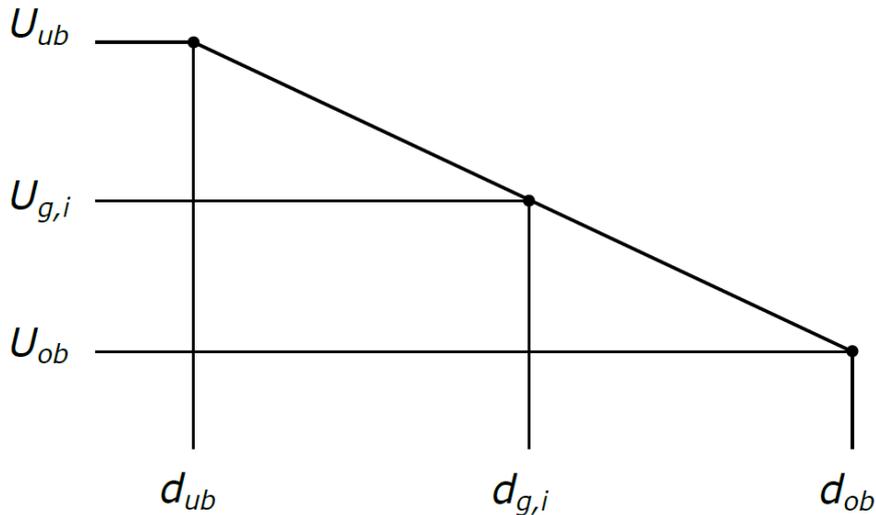


Abbildung 5.4.: Darstellung der Kennlinie für eine lineare Interpolation anhand der Seitenverhältnisse eines rechtwinkligen Dreiecks.

Versuchseinteilung:

Die durchzuführenden Versuche gliedern sich grundsätzlich in drei unterschiedliche Reihen. Jede Reihe verfügt über eine eigens eingestellte Schnitttiefe des Sägeblatts (siehe Tabelle 5.1). Die Versuchsreihe selbst besteht aus 10 Einzeltest mit stets gleich bleibenden Rahmenbedingungen.

Die erste Messung jeder Reihe besteht aus der Ermittlung der elektrischen Spannung bei der eingestellten Schnitttiefe (15 [mm], 35 [mm], 50 [mm]) und bei der maximalen Absenkung (- 17,5 [mm]) des Sägenaggregats. Mit Hilfe der *Pico Scope 6* Software kann die gemittelte Spannung mit Standardabweichung bei einer statischen Einstellung recht genau gemessen werden. Diese Werte, mit den daraus errechneten Differenzen, sind in den Tabellen 5.2 bis Tabelle 5.4 angeführt.

ReihenNr.	Bezeichnung	Anzahl der Messungen	Datum	Schnitttiefe
1	VN01	10	13.11.2017	50 mm
2	VN02	10	13.11.2017	35 mm
3	VN03	10	13.11.2017	15 mm

Tabelle 5.1.: Auflistung der Messreihen

VersuchsNr.	VN01
Datum	13.11.2017
Schnitttiefe	50 mm
Abgriffspunkt	Spindelmutter
Obere Schranke d_{ob}	50 mm
Spannung Mittelwert U_{ob}	2,102 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 400 \mu\text{V}$
Untere Schranke d_{ub}	-17,5 mm
Spannung Mittelwert U_{ub}	2,453 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 600 \mu\text{V}$
Abstandsdifferenz $\Delta d_b = d_{ob} - d_{ub} $	67,5 mm
Spannungsdifferenz $\Delta U_b = U_{ob} - U_{ub} $	0,351 V

Tabelle 5.2.: Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN01

Messaufnehmer:

Der Sensor verfügt über ein bereits angeschlossenes Kabel mit Anschlussbuchse. An diese Buchse wird das mitgelieferte Verbindungskabel angeschraubt, welches an dessen Ende über 11 unterschiedlich farbige Anschlussphasen verfügt. Die für analoge Messungen notwendigen Phasen sind: rot (7 - Betriebsspannung), schwarz (8 - Laser on/off), weiß (11 - Stromausgang I_{out}) und blau (12 - Bezugsmasse). Diese Phasen müssen zunächst laut der Betriebsanleitung des Sensors korrekt verbunden werden. Das elektrische Schaltbild für die Verkabelung ist in Abbildung 5.5 und im Anhang A.2.1 näher erläutert.

Folgende Verbindungen sind für die Messung notwendig:

- Verbindung der Pins „7“ und „12“ mit „+“ und „-“ der 24 [V]-Spannungsversorgung

Versuchsnr.	VN02
Datum	13.11.2017
Schnitttiefe	35 mm
Abgriffspunkt	Spindelmutter
Obere Schranke d_{ob}	35 mm
Spannung Mittelwert U_{ob}	2,166 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 450 \mu\text{V}$
Untere Schranke d_{ub}	-17,5 mm
Spannung Mittelwert U_{ub}	2,443 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 600 \mu\text{V}$
Abstandsdifferenz $\Delta d_b = d_{ob} - d_{ub} $	52,5 mm
Spannungsdifferenz $\Delta U_b = U_{ob} - U_{ub} $	0,277 V

Tabelle 5.3.: Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN02

Versuchsnr.	VN03
Datum	13.11.2017
Schnitttiefe	15 mm
Abgriffspunkt	Spindelmutter
Obere Schranke d_{ob}	15 mm
Spannung Mittelwert U_{ob}	2,273 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 500 \mu\text{V}$
Untere Schranke d_{ub}	-17,5 mm
Spannung Mittelwert U_{ub}	2,446 V
Spannung Standardabweichung	$\approx 700 \mu\text{V}$
Abstandsdifferenz $\Delta d_b = d_{ob} - d_{ub} $	32,5 mm
Spannungsdifferenz $\Delta U_b = U_{ob} - U_{ub} $	0,173 V

Tabelle 5.4.: Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN03

- Verbindung der Pins „8 “und „12 “mit Hilfe eines manuellen Schalters S
- Verbindung der Pins „11 “und „12 “und Parallelschaltung eines Kondensators C (100 [nF]) und Lastwiderstands R (500 [Ω])

Messgeräte:

Die beiden Instrumente zur Abtastung und Messung des Stromes bzw. der Spannung stammen von der britischen Firma *Pico Technology*. Das Speicheroszilloskop (Abbildung 5.6) verfügt über vier Koaxialeingänge, wovon nur zwei für die Messungen verwendet werden. Per USB-Kabel kann das Oszilloskop mit einem Rechner verbunden werden, um die Daten der Messung in der von *Pico Technology* gratis zur Verfügung gestellten *Pico Scope 6* Software auszuwerten. Dabei ist die Energieversorgung des Instruments ebenfalls durch das Datenübertragungskabel gewährleistet. Das Speicheroszilloskop verbindet gleich mehrere Komponenten der Messkette in einem

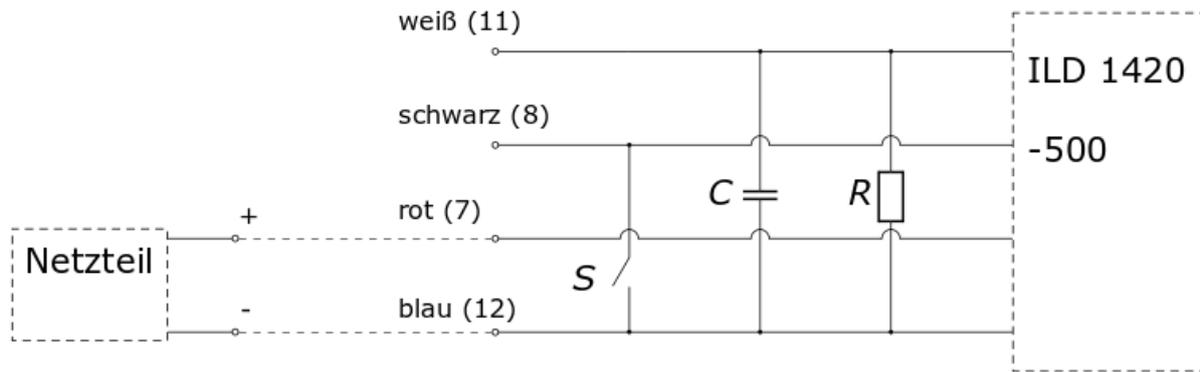


Abbildung 5.5.: Elektrische Verkabelung des Messaufnehmers.

Gerät miteinander. Die multiplen Signaleingänge stellen einen einfachen Multiplex dar. Die Verstärkung, das Halten bzw. Abtasten und das Digitalisieren sind dabei ebenfalls vorhanden. Die Verarbeitung und Anzeige wird mit Hilfe eine Notebooks und *Pico Scope 6* durchgeführt.

Der zweite Eingang (Kanal B) detektiert den Abgriff der ausgehenden Stromstärke I_{out} - in diesem Fall der ausgehenden Spannung U_{out} . Dieser Abgriff erfolgt mit Hilfe eines Abtastkabels, wobei ein Hakenschluss auf der weißen Phase und eine Krokodilklemme an der Masse befestigt werden müssen. Der erste Eingang (Kanal A) erfolgt durch den direkten Abgriff am Schalter der manuellen Auslöseeinrichtung für den Aktuator, um anschließend die Latenz und das Verhalten des Regelkreises auszuwerten. Zusätzlich ergeben die beiden Signale in Kombination ein besseres Verständnis für die zeitliche Darstellung des Absenkvorganges. Gleichzeitig dient das Signal der Auslöseeinrichtung als Trigger-Einstellung für die Messung. Dabei muss die Einstellung des Triggers auf „Absteigende Flanke“ gesetzt werden, denn bei Betätigung des Schalters fällt die Spannung auf 0 [V] ab. Da sich jedoch der Schalter an der Auslöseeinrichtung auf einem höheren elektrischen Potential befindet, ist es nicht ratsam, die Massen der Kreissäge und des Messaufnehmers zusammenzulegen. Dafür benötigt man den aktiven Differenzialtastkopf, welcher in Abbildung 5.7 dargestellt ist.

5.4. Verarbeitung der Messergebnisse

Wie bereits erwähnt besteht die Messung aus drei Messreihen zu je 10 Messzyklen, um eine gesicherte Aussage treffen zu können. Die dabei ausgegebenen Daten entsprechen einer zeitabhängigen Angabe einer elektrischen Spannung $U_{out}(t)$ (**elektrische Spannung über der Zeit**).

Die für eine statistische Auswertung wichtigen Faktoren sind:

- Zeit $\Delta t_{1,i}$ (i -ter Versuch) von der Aktivierung der manuellen Auslöseeinrichtung bis zum Anstieg der Spannung des Sensors - entspricht der Trägheit bzw. der Totzeit des Aktuator-Regelkreises (theoretisch bei allen Versuchsreihen gleich)
- Zeit $\Delta t_{2,i}$ von der Aktivierung der manuellen Auslöseeinrichtung bis zum Durchschritt der Nulllage, also Erreichen der eingestellten Schnitttiefe (bei jeder Versuchsreihe unterschiedlich)

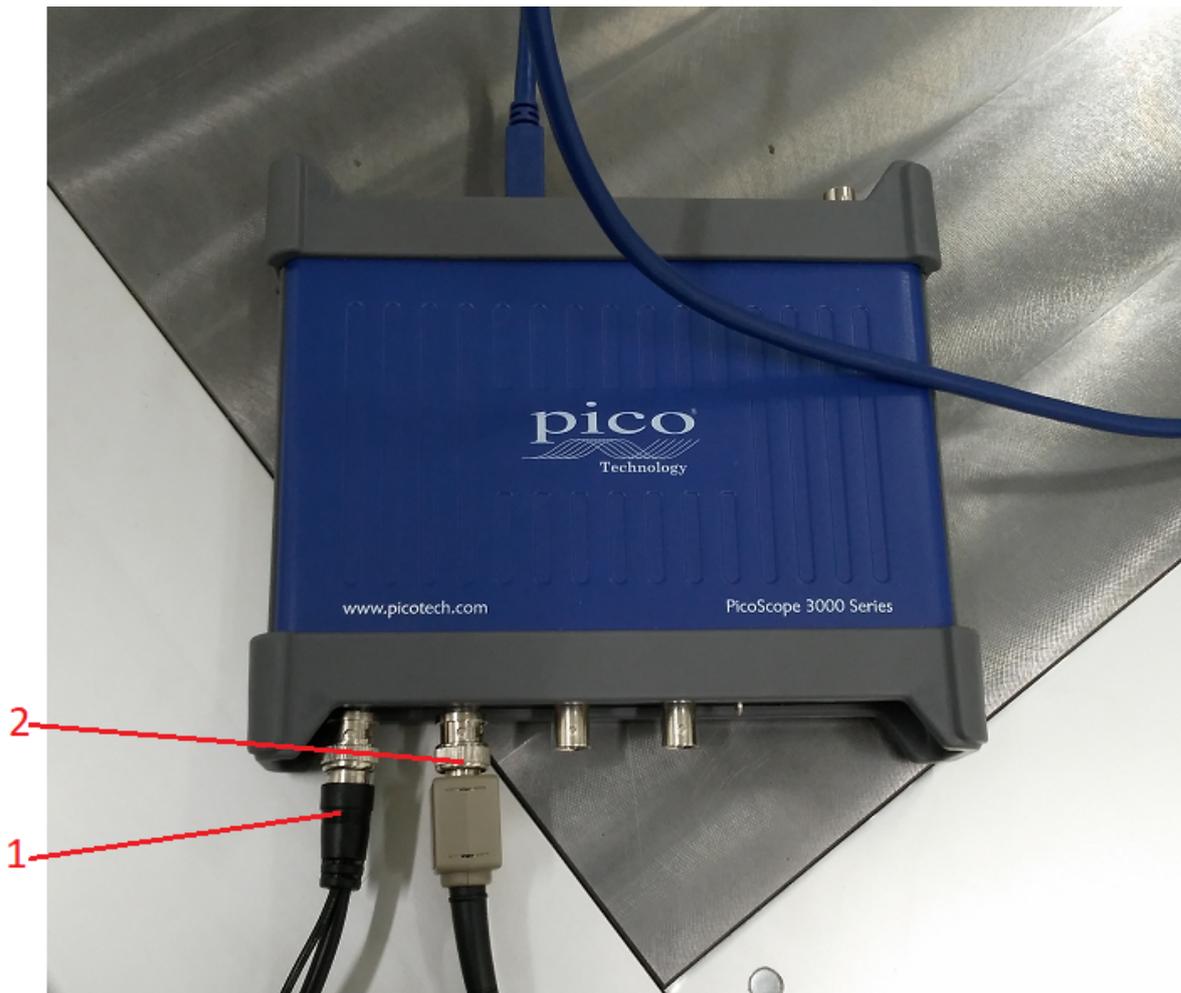


Abbildung 5.6.: Darstellung des Speicheroszilloskop *PicoScope 3000 Series* mit dem Differenzialaltaskopf *TA043* am Eingang A (1) und dem Messaufnehmer am Kanal B (2) [Foto: Matti Felsner].

Bereinigung der Daten:

Da die Auflösung der Digitalisierung auf einem hohen Wert von 12 Bit durchgeführt wird, entstehen für die Abbildezeit von 500 [ms] über 990000 unterschiedliche Zeiteinträge (Spannung bei zugehöriger Zeit) mit den dazugehörigen Signalwerten. Eine viel zu große Datenmenge für die Auswertung des vorliegenden Beispiels, dennoch eine passende Überprüfung der Genauigkeit des Messsystems. Daher wurde eine Bereinigung der Daten durch eine Gruppierung vorgenommen. Die vom Speicheroszilloskop gespeicherten Daten verfügen über ein eigenes, sehr kompaktes Dateiformat. Um zur Auswertung voran zu schreiten, müssen alle Dateien zu CSV-Files konvertiert werden, damit diese anschließend in einem Tabellenkalkulationsprogramm, wie Microsoft EXCEL, bearbeitet werden können.

Die Reduktion der Daten erfolgt durch eine Gruppierung im EXCEL, indem stets aus tausend aufeinanderfolgenden Werten ein arithmetischer Mittelwert gebildet und ausgegeben wird. Somit reduziert sich die Menge an Tabellenzeilen auf 993, weshalb eine weitaus einfachere Bearbeitung der Tabellen möglich ist. Diese Gruppierung geschieht mit den Zeiteinträgen und

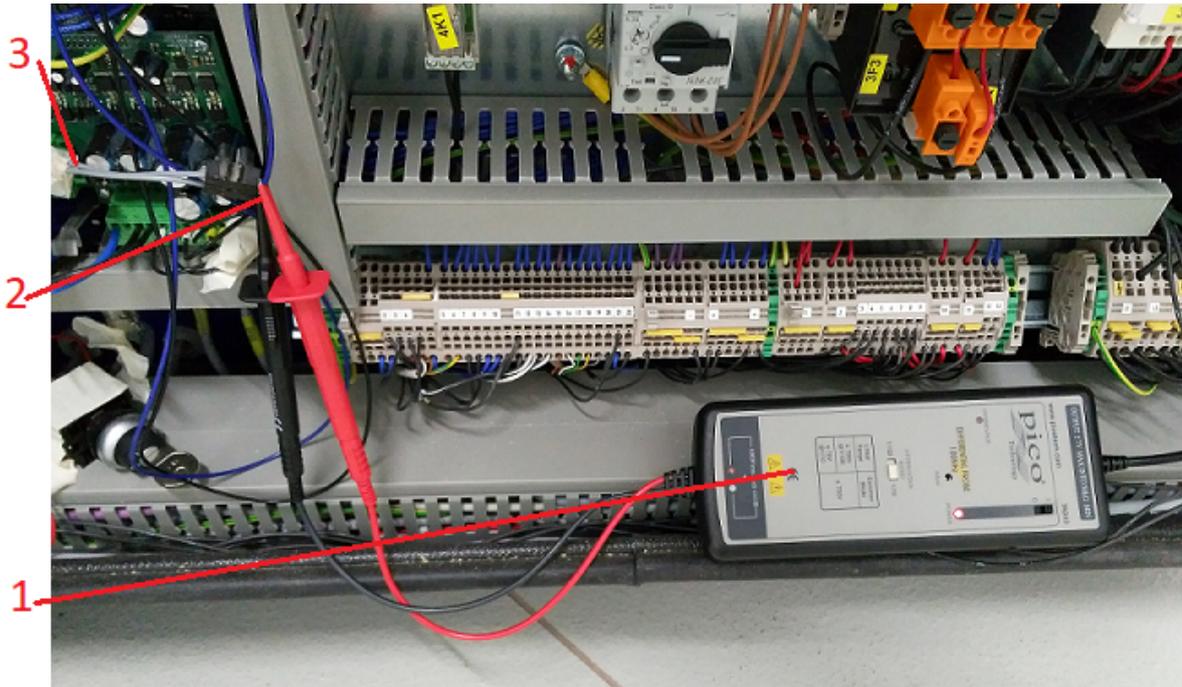


Abbildung 5.7.: Darstellung des Differenzialastkopfs *Pico Technology TA043* (1) mit dem Spannungsabgriff (2) am Schalter (3) der manuellen Auslösevorrichtung [Foto: Matti Felsner].

beiden Kanaleingängen (A & B) der elektrischen Spannung. Aus der reduzierten Datenmenge kann anschließend ein vereinfachter Signalverlauf dargestellt werden (siehe Abbildung 5.8).

Ermittlung der Totzeit:

Der Zeitwert $t_{1,i}$ entspricht der Zeitdifferenz zwischen der Aktivierung der Auslöseeinrichtung und dem Auslösen des Aktuators. Es verstreicht eine gewisse Zeit, während die von den einzelnen Sensoren der Sicherheitsvorrichtung eingehenden Signale elektronisch verarbeitet werden. Diese Zeit wird in der Regelungstechnik als *Totzeit* bezeichnet. Für die Entwicklung einer elektronischen Sicherheitsvorrichtung ist die Erfassung dieser Zeit von entscheidender Bedeutung. Wie in der Abbildung 5.8 zu erkennen ist, oszilliert das Signal (die rote Einrahmung zeigt das Bild 5.9). Einerseits sind dies mechanische Schwingungen am Messaufnehmer und der Wellenmutter, andererseits können auch Störsignale vom Speicheroszilloskop aufgezeichnet werden. Mit der Verwendung einer steiferen Haltevorrichtung des Sensors und geeigneten Bandfiltern kann der Signalausgang wesentlich verbessert werden. Die Ermittlung der Zeit $t_{1,i}$ erfolgt mit Hilfe der erstellten Diagramme. EXCEL verfügt über eine vereinfachte Funktion der Trendlinienbestimmung mit Hilfe des „Gleitenden Durchschnitts“ (siehe Abbildung 5.9). Die Periodenangabe dabei entspricht der Anzahl an Werten, aus denen der Durchschnitt errechnet werden soll. Dadurch kann der Graph deutlich geglättet werden, wodurch man den Trend des Signals wesentlich besser erkennen kann. Daraus ist auch der Aktivierungszeitpunkt des Aktuators besser zu ermitteln. Dieser entspricht dem Schnittpunkt zwischen einer gedachten mittleren Gerade und der Flankenanstieg der elektrischen Spannung. Die angebenen Werte entsprechen daher einer **Schätzung**, die sich in einem Bereich von ca. um ± 5 [ms] bewegt. Die Werte sind in den Tabellen 5.5 bis 5.7 angegeben und entsprechen dabei einzelnen Datenpunkten im Diagramm.

Ermittlung der Absenkezeit:

Für die Ermittlung der Zeit $t_{2,i}$ wird eine neue Spalte im EXCEL erstellt. Dabei verfügt jede Zelle über die selbe Formel wie in der Gleichung 5.1 dargestellt. Damit kann die aktuelle Position des Sägenaggregats, ausgehend von der eingestellten Schnitttiefe („Obere Schranke“ als Nullposition), angegeben werden. Zwar verfügt das Signal über Störsignale und überlagerte Schwingungen, dennoch entspricht der Wert $t_{2,i}$ jener Zeit, bei der das Sägenaggregat das erste Mal die definierte Schnitttiefe erreicht und somit das erste Mal das Kreissägenplatt komplett im Inneren der Maschine abgesenkt ist. Die Werte sind ebenfalls in den Tabellen 5.5 bis 5.7 aufgelistet.

Statistische Auswertung:

Für die 10 unterschiedlichen Werte der einzelnen Versuchsreihen wurden abschließend der Erwartungswert μ , die Varianz σ^2 und die Standardabweichung σ berechnet. Die dafür verwendeten Gleichungen 3.10, 3.13 und 3.15 sind im Kapitel 3.2.2 aufgelistet. Die berechneten Ergebnisse sind gleichfalls in den Tabellen 5.5 bis 5.7 zu finden.

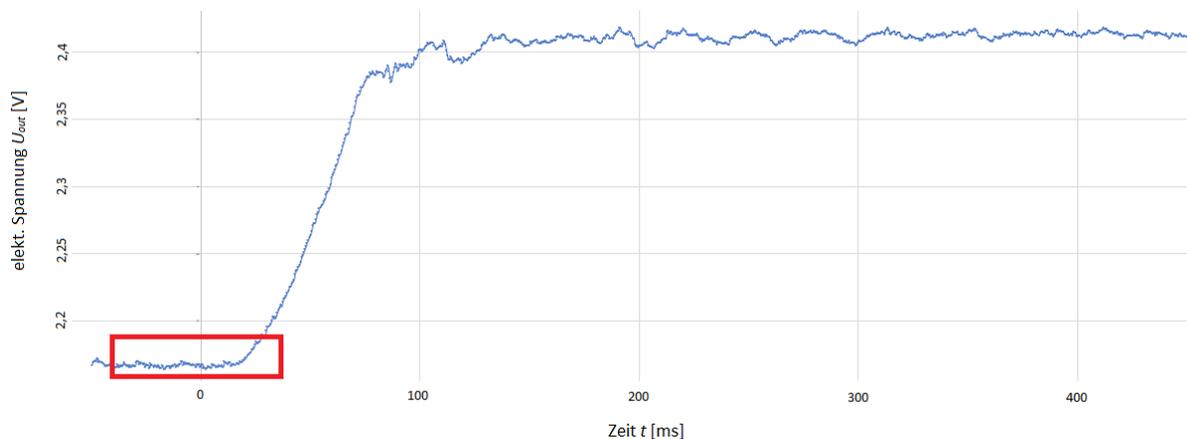


Abbildung 5.8.: Darstellung der Messaufnehmerspannung über der Zeit des Versuchs VN02-01 im EXCEL: Da der Differenzialastkopf das Triggersignal liefert, beginnt der Absenkvorgang bei 0 [ms].

5.5. Fazit

Wie man aus den Tabellen 5.5 bis 5.7 erkennen kann, verhalten sich die Zeiten t_1 und t_2 innerhalb der Versuchsreihe einigermaßen konsistent. Selbst der Erwartungswert μ_i der Zeiten t_1 sind den Versuchsreihen untereinander ebenfalls in unmittelbarer Nähe. Trotzdem wird darauf hingewiesen, dass eine verbesserte Ermittlung der Messergebnisse durch die Verwendung der - im Kapitel 6 dargestellten - Haltevorrichtung zu erwarten ist.

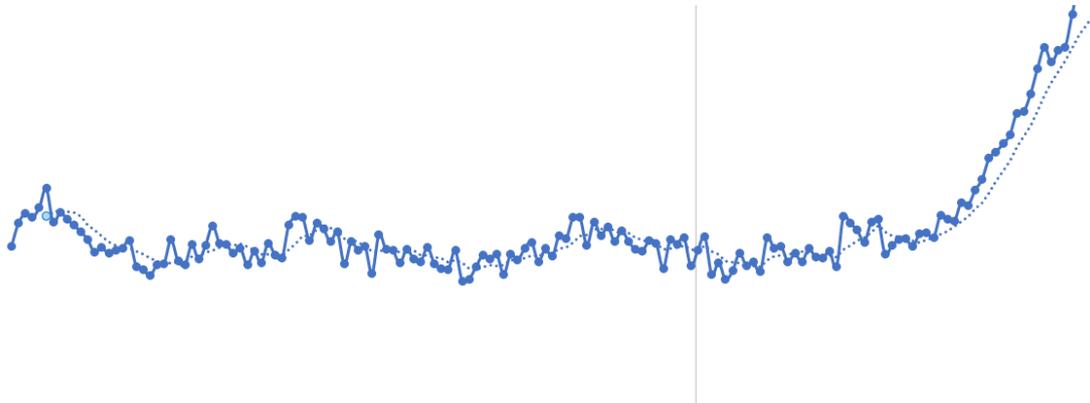


Abbildung 5.9.: Darstellung des „Gleitenden Durchschnitts“ an den Diagrammpunkten im EXCEL des Versuchs VN02-01: Dieses Detail entspricht dem rot eingerahmten Teil der Abbildung 5.8.

VersuchsNr.:	t_1	t_2
VN01-01	14,76 ms	81,907 ms
VN01-02	16,77 ms	82,403 ms
VN01-03	15,77 ms	81,835 ms
VN01-04	14,25 ms	82,116 ms
VN01-05	15,77 ms	82,956 ms
VN01-06	14,76 ms	83,697 ms
VN01-07	14,76 ms	84,379 ms
VN01-08	16,77 ms	84,565 ms
VN01-09	15,77 ms	84,527 ms
VN01-10	15,77 ms	84,087 ms
Erwartungswert μ_1	15,516 ms	83,2472 ms
Varianz σ_1^2	0,6695 ms	1,1431 ms
Standardabweichung σ_1	0,7763 ms	1,0143 ms

Tabelle 5.5.: Auflistung der Auswertung der Messreihe VN01

VersuchsNr.:	t_1	t_2
VN02-01	15,77 ms	68,205 ms
VN02-02	16,27 ms	68,476 ms
VN02-03	16,77 ms	68,225 ms
VN02-04	16,27 ms	68,618 ms
VN02-05	17,28 ms	68,798 ms
VN02-06	16,77 ms	68,187 ms
VN02-07	16,27 ms	67,691 ms
VN02-08	16,27 ms	68,188 ms
VN02-09	17,28 ms	68,423 ms
VN02-10	16,27 ms	68,456 ms
Erwartungswert μ_2	16,522 ms	68,3267 ms
Varianz σ_2^2	0,2155 ms	0,0823 ms
Standardabweichung σ_2	0,4404 ms	0,2722 ms

Tabelle 5.6.: Auflistung der Auswertung der Messreihe VN02

VersuchsNr.:	t_1	t_2
VN03-01	14,26 ms	45,949 ms
VN03-02	14,26 ms	45,301 ms
VN03-03	13,75 ms	45,032 ms
VN03-04	14,26 ms	44,199 ms
VN03-05	15,27 ms	44,565 ms
VN03-06	14,76 ms	45,209 ms
VN03-07	15,76 ms	45,416 ms
VN03-08	14,76 ms	45,079 ms
VN03-09	14,26 ms	45,756 ms
VN03-10	15,27 ms	45,421 ms
Erwartungswert μ_3	14,612 ms	45,1927 ms
Varianz σ_3^2	0,2581 ms	0,2423 ms
Standardabweichung σ_3	0,4820 ms	0,4670 ms

Tabelle 5.7.: Auflistung der Auswertung der Messreihe VN03

6. Entwicklung einer Sensorhaltevorrichtung

Wie bereits in der Aufgabenstellung beschrieben behandelt dieses Kapitel die Entwicklung einer passenden Haltevorrichtung für den Messaufnehmer, ohne diese jedoch physisch zusammenzubauen.

6.1. Anforderungen der Haltevorrichtung

Die strategische Aufgabe ist dabei die virtuelle Entwicklung eines geeigneten Konzeptes zur Montage und Bedienung des Messaufnehmers. Da bereits die Sensorauswahl einen bedeuteten Einfluss auf die Konzeptentwicklung der Haltevorrichtung hat, ist diesem Umstand schon im Vorhinein besondere Beachtung zu schenken.

Die an die Vorrichtung gestellten Anforderungen sind:

1. sehr einfach lösbar und bei anderen Kreissägen einsetzbar
2. einsetzbar bei stufenloser Schwenkung des Sägenaggregats
3. steife Konstruktion aufgrund erhöhter mechanischer Schwingungen beim Absenkvorgang des Sägenaggregats
4. Bedienung bei laufender Maschine
5. einfache Konstruktion mit vielen Zukaufteilen
6. ökonomisch vertretbar

Durch die sehr starke Eingrenzung der Eigenschaften und Definition des Anforderungsprofils gepaart mit der Sensorart ist es möglich ein geeignetes Konzept der Vorrichtung zu erarbeiten. Die hier aufzählten Anforderungen sind in Kapitel 6.3 näher beschrieben.

Da die Wahl des Messaufnehmers auf einen Triangulationssensor gefallen ist, braucht man zur korrekten Bedienung des Sensors eine reflektierende Fläche, welche das eigentliche Messobjekt darstellt. Durch die Anforderung, bei laufender Maschine den Absenkvorgang messen zu wollen, ist das Kreissägeblatt selbst nicht ausreichend. Der zum Schutz montierte Spaltkeil verfügt oberhalb eine ausreichend horizontal ebene Fläche. Dabei kann noch zusätzlich durch Anbringen eines weißen Klebebands die Reflexion verbessert werden. Der Spaltkeil ist - wie in Kapitel 2.1 bereits erwähnt - ca. 165 [mm] maximal oberhalb der Tischkante positioniert. Daher muss der Triangulationsmessaufnehmer so positioniert werden, dass der Spaltkeil weiter als der Messbereichsanfang entfernt ist, um ein geeignetes Signal zu erzeugen. Dies führt automatisch zu der hohen Schwenkarmlänge in der gewählten Konstruktion. Jedoch wurde erst bei den Systemtests (Kapitel 5) herausgefunden, dass sich der Spaltkeil, aufgrund hoher mechanischer Schwingungen, für die Reflexion des Lasers nicht eignet. Die Wellenmutter (statischer Überprüfung) oder die Halterung des Spaltkeils (dynamischer Überprüfung) sind dafür weitaus besser geeignet,

da diese Bauteile auch im dem Messbereich des ausgewählten Sensors liegen und über höhere Steifigkeit verfügen.

Da die einzelnen Merkmale untereinander eine gewisse Abhängigkeit aufweisen, ist es unbedingt notwendig, mehrmalig iterative Veränderungen - abhängig von der Komplexität des Projekts - an der Entwicklung vorzunehmen.

6.2. Konzeptentwicklung der Vorrichtung

Für die Entwicklung der Haltevorrichtung muss eine vollständige Konstruktion des Vermessungssystems erfolgen. Die dabei auftretende Reihenfolge der Aufgaben gliedert sich - laut VDI 2221 [23, Seite 31] - in die **Definition**, den **Entwurf**, die **Realisierung** und die **Dokumentation**. Dabei wurde die Durchführung der Aufgabe mit Hilfe folgender Instrumente durchgeführt:

- **Definition**

- Handskizzen: Mit Hilfe von Bleistiftskizzen werden die ersten konkreten und konzeptrelevanten Merkmale bestimmt. Vor allem die Auswahl der kinematischen Ausführung sowie die möglichen Bedienkriterien werden dabei festgelegt.

- **Entwurf**

- Konzept: Die ersten Definitionen der Dimensionen und Proportionen des Konzepts werden üblicherweise bereits am Rechner mit Hilfe von geeigneten CAD-Programmen erstellt. Die virtuellen Bauteile sind dabei eher rudimentär modelliert.
- Revision: Mehrmalige Überarbeitungen der Bauteile und Baugruppen ist unbedingt erforderlich, da man erst nach dem Erstellen der Modelle genau erkennen kann, welche Probleme (Kollisionen, falsche Proportionen, usw.) zu beseitigen sind.

- **Realisierung**

- Modell: Nach mehrmaliger Revision, können die Bauteile und Baugruppen abgesegnet werden, wodurch die ersten Schritte zur Fertigung bereits gegeben sind.

- **Dokumentation**

- Fertigungsunterlagen: Jene Bauteile, die mechanisch gefertigt bzw. nachbearbeitet werden müssen, benötigen umfangreiche technische Unterlagen. Einzelteilzeichnungen mit Maß- und Toleranzangaben, Stücklisten, Zusammenbau- und Explosionszeichnungen sind dabei ein integraler Bestandteil. Werden Bauteile rechnerunterstützt gefertigt (CAM), benötigen die Maschinen den typischen NC-Code zur Steuerung der Fertigungsabläufe. Diese sind in dafür speziellen Dateien gespeichert.

6.2.1. Planung der Vorrichtung - Erster Entwurf

Der erste Entwurf bestand anfangs aus drei unterschiedlichen Konzepten. Zwei wurden aufgrund zu hoher Komplexität bzw. unhandlicher Größe und hoher Kosten verworfen. Das verbliebene ist in Abbildung 6.1 dargestellt, wobei die Bauteile sehr einfach modelliert sind. Der Sinn dabei war es, die ersten Dimensionen und Funktionsweise des Entwurfs festzulegen.

Die Abbildung zeigt dabei den ersten Entwurf der Haltekonstruktion für den Messaufnehmer bestehend aus einer Grundplatte (1), zwei aufgeschraubten Magnetfüßen (2), die Schwenkarme

(4) mit montiertem Sensor (5) und einer - via Handrad (6) - einstellbaren Gewindespindel (3) die den Schwenkwinkel der Arme stufenlos variieren lässt. Somit werden bereits einige Konzeptanforderungen, wie bsp. stufenlose Schwenkmöglichkeit und einfache Lösbarkeit vom Arbeitstisch erfüllt.

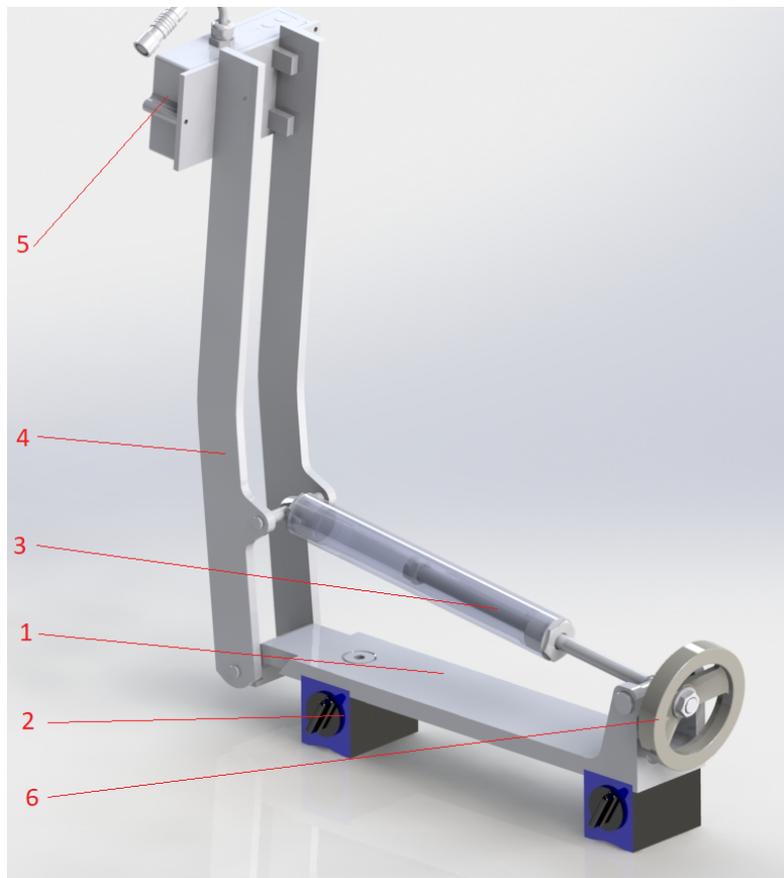


Abbildung 6.1.: Prinzipaufbau des ersten Entwurfs: Grundplatte (1), Magnetfuß (2), Gewindespindel (3), Schwenkarm (4), Messaufnehmer (5) und Handrad (6).

6.2.2. Überarbeitung der Merkmale - Zweiter Entwurf

Nach erster Revision konnte das Konzept detaillierter ausgearbeitet werden. Der zweite Entwurf ist in Abbildung 6.2 zu erkennen. Zusätzlich konnte dabei - aufgrund von Änderungen in der Geometrie - ein anderer Messaufnehmer (2) ausgewählt werden, wodurch Kosten des Sensors und die Schwenkarmlänge stark reduziert werden konnte. Damit reduziert sich auch die freie Schwinglänge, was zur Steifigkeit des Systems beiträgt. Gleichzeitig wurde der Lagerabstand der Schwenkarme zueinander vergrößert, um ebenfalls seitliche Steifigkeit zu erhöhen. Speziell der Einbau von Standardteilen (Handrad (5), Bolzen, Schrauben, Sicherungsringe und Scheiben) zur Erhöhung der Einfachheit, Reduktion der Kosten und Abgleich der Dimensionen entspricht dabei dem größten Teil der Überarbeitung. Gleichzeitig ist die Auswahl geeigneter Bauteile - wie eine spielfreie Spindelmutter (3), einer Spindelfixierung (4) und Lager mit Zentrierbund (1)

- für die Vereinfachung der Handhabung des Vermessungssystems ein wichtiger Schritt.

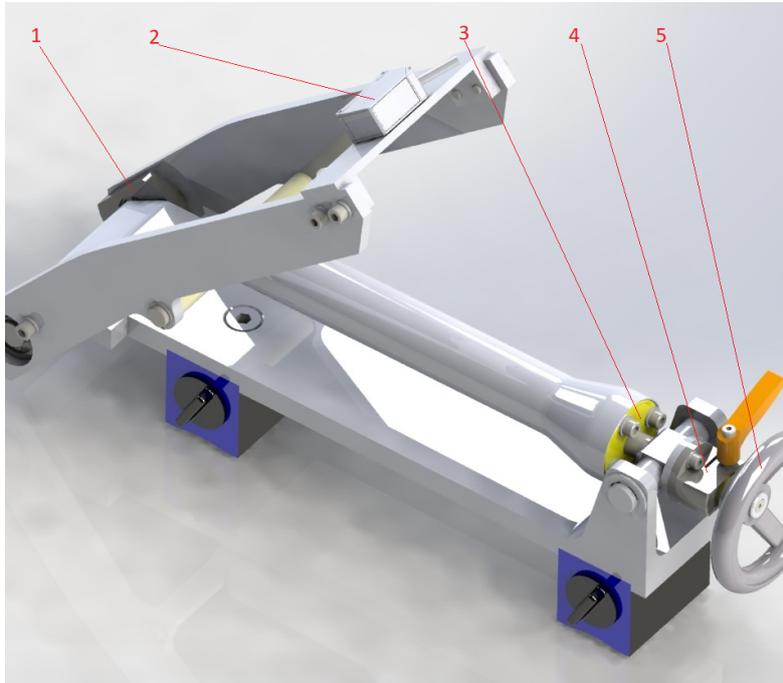


Abbildung 6.2.: Prinzipaufbau des zweiten Entwurfs: Lager mit Zentrierbund (1), Messaufnahme (2), Spindelmutter (3), Spindelfixierung (4) und Handrad (5).

6.2.3. Finalisierung - Dritter Entwurf

Beim dritten und zugleich letzten Entwurf (Abbildung 6.3) wurden die letzten bekannten Fehler behoben und noch abschließend auf die maximale Verwendung von Standardbauteilen (Lagerblöcke (6), Distanzhülsen, Gelenklager (2), Hülsenrohr (3) und Anschlagblöcke (1)) Wert gelegt wurde. Weiters wurden mehr zweidimensionale Blechbauteile - wie Grundplatte (5) und Sensorhalteplatte (7) - in die Konstruktion integriert. Zusätzlich wurde eine Winkelangabe (4) für den Schwenkarm installiert. Alle zu fertigenden bzw. zu bearbeitenden Bauteile sind im Anhang A.1 zu finden.

Ein nennenswerter nachteiliger Punkt bei dem gewählten Vorrichtungskonzept ist, dass die Konstruktion bei Veränderung des Schwenkwinkels längs verschoben werden muss. Dies resultiert aus der zur Schwenkdrehachse des Sägeblatts exzentrischen Lagerung des Sensors. Es gäbe zwar einige Möglichkeiten, dieses Problem zu beheben, jedoch verkompliziert dies die gesamte Konstruktion, was dem Punkt 5 - einer einfachen Konstruktion (vgl. nachfolgend Kapitel 6.3) - widersprechen würde. Dieser Nachteil ist in den Abbildungen 6.4 und 6.5 gezeigt, wobei die Haltevorrichtung und das Kreissägeblatt mit Spaltkeil (1) im Seitenriss auf dem Arbeitstisch (1) stehend dargestellt ist. Zusätzlich zeigt der rote Pfeil die Richtung der Absenkbewegung an. Beide Abbildungen stellen die Konstruktion bei $\pm 50^\circ$ von der Nulllage (vertikaler Schnitt) dar. Der numerische Wert des horizontalen Abstandes des vorderen Magnetfußes zum Säge-

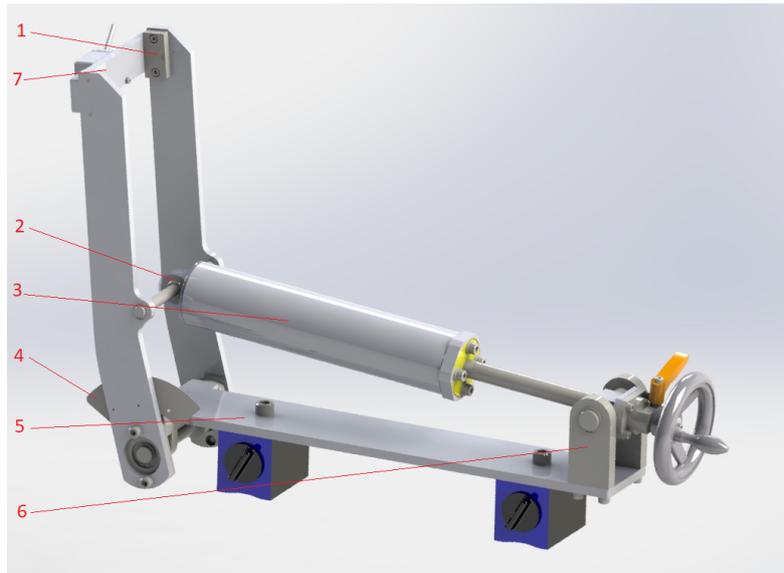


Abbildung 6.3.: Prinzipaufbau des finalen Entwurfs: Anschlagblock (1), Gelenklager (2), Hülssenrohr (3), Winkelskala (4), Grundplatte (5), Lagerblock (6), Sensorhalteplatte (7).

blatt ist bei beiden Extremlagen eindeutig unterschiedlich. Folglich ist bei jeder Änderung des Schnittwinkels an der Kreissäge, die Haltevorrichtung zu lösen und so in Richtung Sägeblatt zu versetzen, damit der Laserpunkt des Messaufnehmers erneut den passenden Punkt erreichen kann.

6.3. Bauteilanforderungen

Die Positionserfassung des Sägeblatts soll zwar anhand der zur Verfügung gestellten Maschine erfolgen, dennoch besteht die Anforderung, dass die Messeinrichtung auf anderen Maschinen der Firma *FELDER KG* ebenfalls eingesetzt werden kann. Standardmäßig ist es möglich das Sägeblatt aus einer vertikalen Nulllage in beide Richtungen um jeweils $\pm 50^\circ$ zu neigen. Da bei den Bearbeitungsmaschinen von *FELDER KG* die Neigungsvorrichtung direkt auf dem Aggregat zur Absenkung befestigt sind, senken sich geneigte Sägeblätter in Neigungsrichtung ab. Dabei soll die Positionserfassung stufenlos bei jedem Winkel erfolgen können.

6.3.1. Einfache Lösbarkeit

Am Ende des Kapitels 6.2.3 wurde bereits der Nachteil erwähnt, dass die Konstruktion bei einer Schnittwinkeländerung des Sägeblatts längs verschoben werden muss. Um die Komplexität und Kosten gering zu halten, ist eine manuelle Verschiebung der Messapparatur die einfachste und zugleich billigste Lösung. In der Annahme, dass die Konstruktion nicht nur für die am IFT stationierte Maschine genutzt werden soll, besteht die Anforderung einer universellen Nutzungsmöglichkeit an allen Kreissägen des Unternehmens.

Somit ist die Art der Befestigung von entscheidender Bedeutung. Die sicherste Methode ist selbstverständlich eine direkte mechanische Verbindung, bsp. durch Verschraubung. Dabei wäre

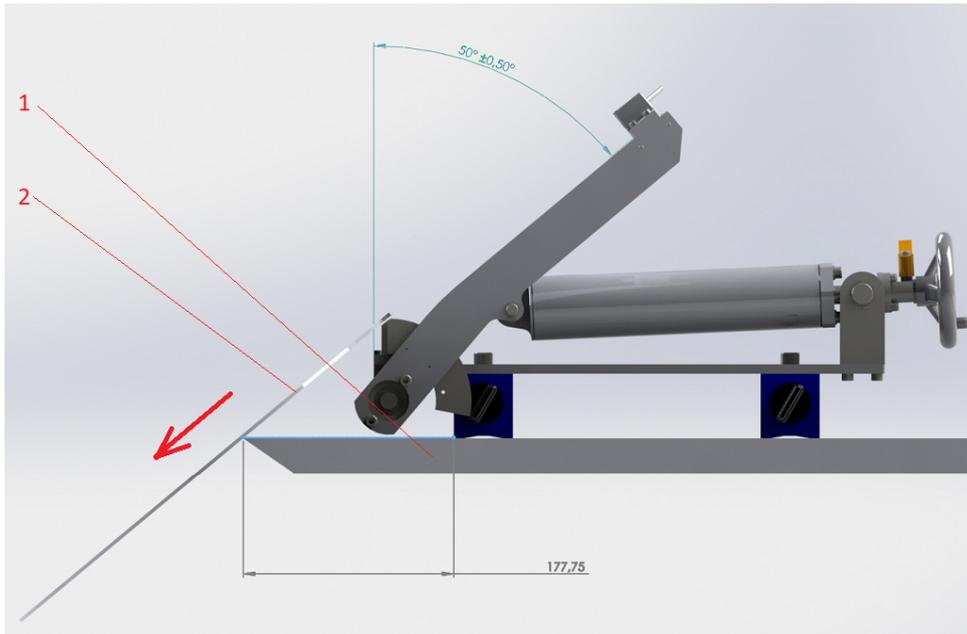


Abbildung 6.4.: Darstellung des Sägeblattabstands bei einem Schnittwinkel von -50° aus der Nulllage: Der horizontale Abstand vom vorderen Magnetfuß bis zum Kreissägeblatt ist aufgrund der Exzentrischen Lagerung der Schwenkarme unterschiedlich zum Abstand bei einem Schnittwinkel von $+50^\circ$

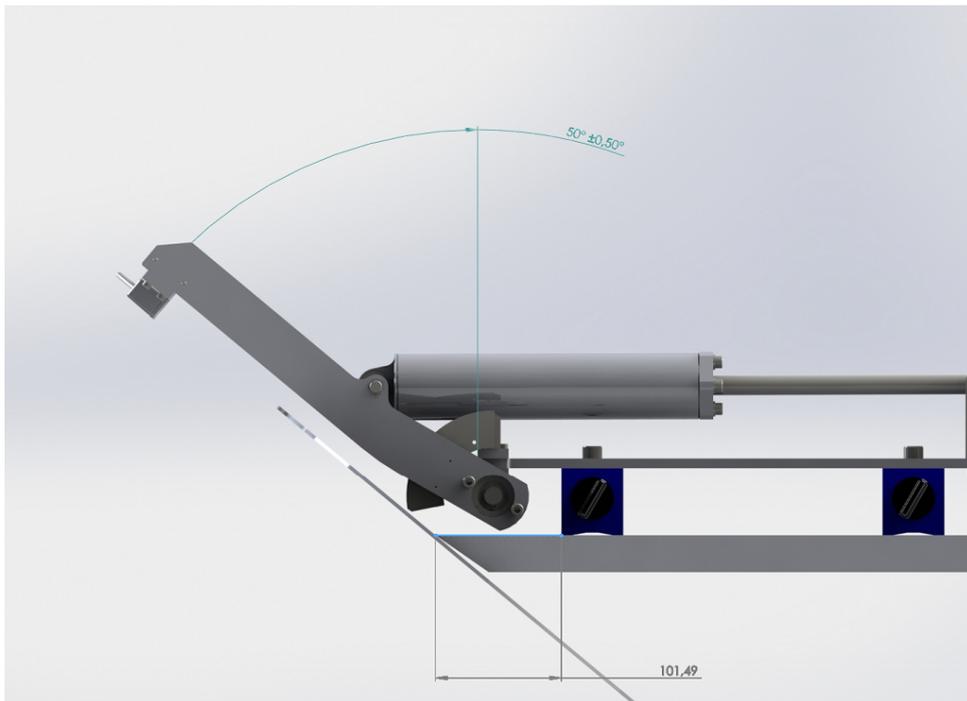


Abbildung 6.5.: Darstellung des horizontalen Sägeblattabstands bei einem Schnittwinkel von $+50^\circ$ aus der Nulllage

der Arbeitstisch jeder Maschine entsprechend zu bearbeiten. Dies wäre nicht nur sehr kompliziert, sondern auch ausgesprochen kostenintensiv. Daher besteht die Anforderung in Methode einer schnellen, billigen und einfachen Lösbarkeit der Messapparatur.

Jede Maschine der Firma *FELDER KG* verfügt über einen Arbeitstisch aus ferritischem Stahl, was die Möglichkeit einer magnetischen Befestigung der Vorrichtung zulässt. Die Vorteile dieser Methode liegen sofort auf der Hand:

- sehr einfaches Prinzip
- käuflich erwerbbar, als Quasi-Normteil
- kostengünstig
- schnell lösbar, einfache Bedienung
- keine zusätzliche mechanische Bearbeitung der Tischplatte

Die Wahl fiel dabei auf magnetische Bauteile, den s.g. Magnetfüßen. Diese werden eigentlich für die Befestigung von kleinen Stativen für Messuhren oder anderen kleinen Instrumenten verwendet. Dennoch kann die Haltekraft kleiner Magnetfüße bis zu 2000 [N] betragen, wodurch sie sich auch für die Fixierung des Vermessungssystems eignen.

6.3.2. Stufenlose Schwenkung des Sägeblatts

Wie bereits erwähnt und gleichzeitig in Abbildung 2.3 gezeigt, besteht die Möglichkeit, eine Schnittwinklereinstellung an der Maschine vorzunehmen. Dabei neigt sich das gesamte Maschinenaggregat mit dem Sägeblatt mit. Das heißt, eine Absenkung erfolgt stets parallel zum Sägeblatt; daher muss die Messung ebenfalls in dieselbe Richtung erfolgen. Daraus resultiert die (weitere) Anforderung, dass der Messaufnehmer schwenkbar sein muss. Gleichzeitig soll diese Schwenkung stufenlos anhand des Schnittwinkels erfolgen, da die Einstellung an der Maschine ebenfalls stufenlos erfolgen kann.

Die konstruktive Umsetzung dieser Forderung kann auf mehrere Arten erfolgen, wie bsp. mit Zahnrädern oder Schienensystemen in Kreisbahnen. Durch die Vorgabe einer einfachen und kostengünstigen Konstruktion war der Einsatz eines Gelenksystems mit Gewindespindel eine passende Möglichkeit. Durch die exzentrische Lagerung der Spindel zum Drehpunkt des Schwenkarms wird aus einer linearen translatorischen Bewegung der Spindel eine nichtlineare Rotation des Schwenkarms erzeugt. Daher ist es unmöglich eine Neigungsangabe des Messaufnehmers anhand der Spindelumdrehungen angeben. Aus diesem Grund wurde auch hier eine einfache Alternative erarbeitet. Mit der Montage einer analogen Winkelskala kann die Neigung des Schwenkarms schnell eingestellt werden.

Besonderes Augenmerk muss beim Einsatz einer Spindel auf die spielfreie Führung und für die Versuche notwendige Fixierung gelegt werden.

6.3.3. Steife Konstruktion

Bei jedem bewegten Aggregat werden mechanische Schwingungen erzeugt. In diesem Fall einerseits durch den Elektromotor und das Sägeblatt, andererseits durch stoßartige Beschleunigungen

bei der Aktivierung der Sicherheitseinrichtung und der Betätigung des Aktuators; genauso wie bei der Verzögerungen der gesamten Masse des Aggregats beim Erreichen der maximalen Absenkung.

Ist die Konstruktion nicht steif genug, werden die Schwingungen bis zum Messaufnehmer so übertragen, dass die Amplituden zwischen dem Arbeitsaggregat und der Konstruktion zu stark voneinander abweichen, wodurch das Messergebnis verfälscht wird. Bei einer sehr steifen Konstruktion werden die Schwingungen ebenfalls übertragen, aber die Phasen der einzelnen Bauteile bleiben näher synchron zueinander. Bei der gewählten Konstruktion ist dabei die Lateralsteifigkeit besonders zu beachten. Das Schwingverhalten ist einerseits abhängig von der Steifigkeit und andererseits von der freien Schwinglänge der Schwenkarme.

Die freie Schwinglänge ihrerseits ist sowohl von der Wahl des Messaufnehmers als auch des Messobjekts abhängig. Das Kreissägeblatt bzw. der Spaltkeil stehen bereits ca. 170 [mm] aus der Maschine heraus; dazu kommt noch der Messbereich des Triangulationssensors von min. 200 [mm]. Die daraus resultierende Schwenkarmlänge ist einige hundert Millimeter lang. Die möglichen Maßnahmen zur Erhöhung der Steifigkeit beruhen in der Materialauswahl und in der konstruktiven Gestaltung. Größere Bolzedurchmesser bei den Lagerpunkten und erhöhte Wandstärke wirken sich positiv auf die Steifigkeit der Konstruktion aus.

6.3.4. Bedienung bei laufender Maschine

Ein scharfes Kreissägeblatt mit hoher Drehzahl stellt ein erhebliches Sicherheitsrisiko dar, was die Wahl eines kontaktlosen Sensors nur bestätigt. Das Anbringen wäre bei einem Messaufnehmer mit anderem Prinzip nur im Inneren der Maschine möglich. Einerseits kann das dazu führen, dass es notwendig ist, bereits vorhandene Maschinenbauteile für die Montage des Sensors nachzubearbeiten, andererseits ist das Anbringen mit weit höherem Aufwand verbunden. Gleichzeitig soll die Messapparatur auch auf mehreren Maschinen eingesetzt werden können.

6.3.5. Einfache Konstruktion

Das Sprichwort „Man kann aus allem eine Wissenschaft machen“ trifft hier besonders gut zu, da es sich jedoch um eine praxisorientierte Entwicklung eines Vermessungssystems handelt, sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Die Einfachheit der Konstruktion spiegelt sich nicht nur im Aufbau, sondern auch in der Montage, der Lieferantenauswahl und der Bedienung nieder - nach dem Prinzip : „*Form follows function*“

6.3.6. Ökonomisch vertretbar

Vergleichbar mit der Erstellung eines Prototypen ist für jedes Erzeugnis mit niedriger Stückzahl die Einzelteilfertigung besonders kostspielig. Daher ist es auf jeden Fall von großem Vorteil, so wenige Teile wie möglich zu verwenden die keine besondere Standardisierung aufweisen können.

Das teuerste Zukaufteil ist selbstverständlich der optische Messaufnehmer. Das resultiert einerseits aus dem erhöhten Aufwand der Elektronik und andererseits aus der Qualität des verwendeten Produkts. Die Einzelteilpreise sind im folgenden Kapitel 6.4 für alle Zukaufteile angeführt.

6.4. Lieferantenpreise und Stückliste

Der Großteil der Konstruktion soll wie gefordert aus parametrisierbaren *Normteilen* bestehen. Dabei gilt jedoch, dass nachbearbeitete Zukaufteile noch immer billiger sind als eine Einzelteilerfertigung. Jedoch ist es kaum möglich, eine individuelle Konstruktion ganz ohne speziell gefertigte Bauteile zu erstellen. Die tragenden Elemente, wie der Grundplatte, Schwenkarme und Aufnahmeblech, sind sehr einfache zweidimensionale Profile. Daher ist es möglich diese Teile mit dem Laser- oder Plasmaschneider herstellen zu lassen. Eine Aluminium-Legierung ist zwar aus Kostengründen die erste Wahl, dennoch lassen diese sich, wegen der hohen thermischen Leitfähigkeit und Reflexionsvermögen, nur bis zu einer gewissen Dicke thermisch trennen. Die geforderte Lateralsteifigkeit bedingt höhere Materialstärken, daher sollen die Einzelteile aus einem nichtrostenden Stahl geschnitten sein. Die Bauteile werden individuell im CAD-System konstruiert und davon eine zweidimensionale Ableitung erstellt. Durch die Weitergabe der Modelle in einem DXF-Dateiformat an Lieferanten können die Bauteile aus den Blechen geschnitten werden. Die Preis dafür sind direkt beim Lieferanten zu erfragen. Da es sich hier ausschließlich um die Entwicklung der Vorrichtung handelt, ist dieser Schritt nicht erfolgt. Ebenso nicht bei den speziell zu fertigenden Bauteilen.

Die zugekauften Bauteile stammen alle - mit Ausnahme der Magnetfüße - von der *MISUMI Europa GmbH*, einer Tochtergesellschaft der *Misumi Group Honsha*. Die Muttergesellschaft wurde in Japan gegründet und hat in vielen Ländern eigene Niederlassungen. Die Firma *MISUMI* spezialisiert sich auf konfigurierbare mechanische Komponenten im Sondermaschinenbau. Ein sehr breites Produktportfolio von über zwölf Millionen Produkten, eine rund um die Uhr verfügbare Online-Bestellung, Bezug von CAD-Daten und Liefermengen ab einem Stück sind dabei sehr überzeugende Argumente.

Die Magnetfüße stammen von der deutschen Firma *Genoma Normteile GmbH* aus Hameln.

In der Tabellen 6.1 und 6.2 sind alle Bauteile, deren Bezugsquellen, Menge und Preise angegeben.

6.5. Montagehinweise

Da einige eher empfindlichen Bauteile zum geplanten Einsatz kommen - vor allem Bolzen mit Passungen, Lagern und der Spindel - muss daher besonders darauf geachtet werden, dass die Oberflächen dieser Teile nicht beschädigt werden. Kratzer sind oberflächliche Deformationen die bei den Passungstoleranzen bereits dazu führen können, dass Welle und Bohrung nicht mehr wie gewünscht ineinander passen. Daher sollten alle Bauteile bis zu deren Montage geschützt verwahrt werden. Oftmals eignen sich die Lieferverpackungen; bei nachbearbeiteten und entfetteten Bauteilen sind hingegen eigene Behälter oder Tücher zum Einwickeln am geeignetsten.

Die für die Montage notwendigen Werkzeuge sind:

- Imbusschlüssel bzw. Schraubendreher mit Imbus-Bits der Größen ISK 1,5, ISK 2,5, ISK 3, ISK 4, ISK 5 und ISK 8
- Schrauben- bzw. Gabelschlüssel mit den Schlüsselweiten SW11 und SW55
- Sicherungsringzangen

PNr.	Bezeichnung	Liferantencode	Bezug	Menge	Einzelpreis
1	Winkelskala	MEAAC140-80-3	MiSUMi	1	€14,50
2	Grundplatte			1	
3	Magnetfuß	MH.127-016	Genoma	2	€35,00
4	Schwenkarm			1	
5	Schwenkarm-RE			1	
6	Aufnahmeplatte			1	
7	Schanierböcke	HGHAB15-W12-H23	MiSUMi	2	€44,40
8	Schanierlagerböcke	HPE16-60-12	MiSUMi	2	€9,36
9	Anschlagböcke	SBFB-40-20-8	MiSUMi	2	€6,80
10	Distanzplatte			1	
11	Bolzen D15	FSFUFF-D15-L126.7-H4-U4-LKC	MiSUMi	1	€33,88
12	Bolzen D10	FSFJFF-D10-L142.7-H4-U4-LKC	MiSUMi	1	€17,28
13	Bolzen D18	FSFUFF-D18-L74.7-H4-U4-LKC	MiSUMi	1	€32,80
14	Distanzhülse 20x15x17	PSTS20A-17	MiSUMi	2	€24,72
15	Distanzhülse 20x18x13,5	PSTS20A-13,5		2	€26,60
16	Befestigung Gewindefixierung			1	
17	Gewindespindel	MTSBRK16-337-F5-R12-T58-Q12-S17-E10-AR2.2-ME4-KE3-C10	MiSUMi	1	€50,30
18	Flache Unterlegscheibe M12	PWF12	MiSUMi	3	€0,21
19	Passfeder	KES3-10	MiSUMi	1	€1,20
20	Handrad	24590.0505	MiSUMi	1	€9,78
21	Lager mit Zentrierbund	BGCRB6902ZZ	MiSUMi	2	€30,24
22	Gewindeklemme	MTQDB12	MiSUMi	1	€61,60
23	Gelenklager	RBPB10	MiSUMi	1	€11,10

Tabelle 6.1.: Stückliste des Vermessungssystems mit Lieferantenpreisen -Teil 1

- Bremsereiniger zur Entfettung der Bauteile
- Schmieröl für Lagerstellen und Spindel
- Reinigungstücher aus Baumwolle
- Gewinde-Sicherungsmittel

Eine Möglichkeit den Zusammenbau zu vereinfachen und gleichzeitig Zeit zu sparen ist die Er-

PNr.	Bezeichnung	Liferantencode	Bezug	Menge	Einzelpreis
24	Spindelmutter	MTBLR16	MiSUMi	1	€97,10
25	Hülsenanschluss- Gelenk			1	
26	Hülsenrohr			1	
27	Spindelhülse			1	
28	Messaufnehmer	ILD1420-500	Micro- Epsilon		€1.480,00
29	Pfeilschilder	PPPL30	MiSUMi	1	€6,80
30	Sicherungsring D10	STWN10	MiSUMi	2	€0,52
31	Sicherungsring D15	STWN15	MiSUMi	2	€0,52
32	Sicherungsring D18	STWN18	MiSUMi	2	€0,72
33	Sicherungsring D12	STWN12	MiSUMi	1	€0,52
34	Befestigungsscheibe	WSHT-S45C-M5	MiSUMi	1	€0,13
35	Zylinderkopfschraube M2x6	CB2-6	MiSUMi	2	€0,40
36	Zylinderkopfschraube M3x20	CB3-20	MiSUMi	2	€0,09
37	Zylinderkopfschraube M4x12	CB4-12	MiSUMi	11	€0,09
38	Zylinderkopfschraube M5x12	CB5-12	MiSUMi	4	€0,09
39	Flache Unterlegscheibe M5	PWF4	MiSUMi	4	€0,13
40	Flache Unterlegscheibe M6	PWF6	MiSUMi	4	€0,16
41	Zylinderkopfschraube M6x14	CB6-14	MiSUMi	8	€0,09
42	Zylinderkopfschraube M6x20	CB6-20	MiSUMi	4	€0,10
43	Zylinderkopfschraube M4x16	CB4-16	MiSUMi	4	€0,09
44	Zylinderkopfschraube M10x15	CB10-15	MiSUMi	2	€0,17
45	Zylinderkopfschraube M1,6x6	CSH-ST-M1.6-6	SUNCO	2	€0,49

Tabelle 6.2.: Stückliste des Vermessungssystems mit Lieferantenpreisen - Teil 2

stellung von Unterbaugruppen. Diese sind in der Tabelle 6.3 und in den Abbildungen 6.6 bis 6.11 dargestellt.

Die meiste Arbeit bei der Montage ist meist das Ausrichten und Zusammenschrauben der Bauteile. Die Lagerbolzen zentrieren die meisten Bauteile zueinander, was den Zusammenbau erleichtert. Aufgrund der Dimensionen der Konstruktion muss man davon ausgehen, dass die Parallelität der einzelnen Lagerbolzen zueinander nicht ausreichend vorhanden ist. Damit kei-

ne Verteilung der Komponenten entsteht, wird ein Gelenklager in das Hülsenanschlussgelenk verbaut. Dafür ist ein eigener Montageschritt zu beachten. Das Gelenklager muss in den Hülsenanschluss eingepresst werden, da es sich bei der vorhandenen Passungspaarung h6/R7 um eine Übermaßpassung handelt. Um den Einbau zu vereinfachen kann das Gelenklager in den Tiefkühler gelegt und der Hülsenanschluss leicht erwärmt werden.

<p>(1) Schwenkarm RE-Baugruppe Abb. 6.6</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schwenkarm Re • Lager m. Bund + Schrauben • Anschlagblock + Schrauben • Winkelskala + Schrauben 	<p>(2) Schwenkarm LI-Baugruppe Abb. 6.7</p> <ul style="list-style-type: none"> • Schwenkarm Li • Lager m. Bund + Schrauben • Anschlagblock + Schrauben
<p>(3) Spindel Baugruppe Abb. 6.8</p> <ul style="list-style-type: none"> • Gewindespindel • Scheibe + Sicherungsring • Spindelmutter + Scheiben und Schrauben • Hülsenrohr • Hülsenanschluss + Gelenklager • Spindelhülse 	<p>(4) Grundplatte Baugruppe Abb. 6.9</p> <ul style="list-style-type: none"> • Magnetfüße + Schrauben • Grundplatte • Lagerblöcke + Schrauben • Lagerblöcke + Schrauben • Distanzplatte + Schrauben • Pfeilschild + Schrauben
<p>(5) Messaufnehmer Baugruppe Abb. 6.10</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sensor + Scheiben und Schrauben • Aufnehmerplatte 	<p>(6) Fixierung Baugruppe Abb. 6.11</p> <ul style="list-style-type: none"> • Befestigung • Fixierung + Schrauben

Tabelle 6.3.: Auflistung der Unterbaugruppen

Die einzelnen Unterbaugruppen werden durch Verbindungselemente miteinander zusammen verbunden. Diese sind in der Tabelle 6.4 aufgelistet.

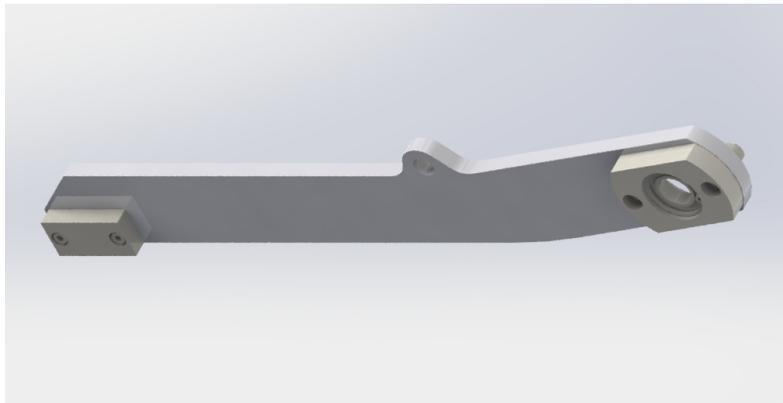


Abbildung 6.6.: Darstellung der Baugruppe (1) im CAD: Schwenkarm RE-Baugruppe

Zusammenbau von: (1), (2), (4) <ul style="list-style-type: none"> • Bolzen Ø15 + Sicherungsring • Distanzhülsen
Zusammenbau von: (1), (2), (5) <ul style="list-style-type: none"> • Schrauben
Zusammenbau von: (4), (6) <ul style="list-style-type: none"> • Bolzen Ø18 + Sicherungsring • Distanzhülsen
Zusammenbau von: (3), (6) <ul style="list-style-type: none"> • Scheibe • Scheibe • Passfeder • Handrad • Scheibe + Schraube
Zusammenbau von: (1), (2), (3) <ul style="list-style-type: none"> • Bolzen Ø10 + Sicherungsring

Tabelle 6.4.: Auflistung der Bauteile für die Montage einzelner Unterbaugruppen

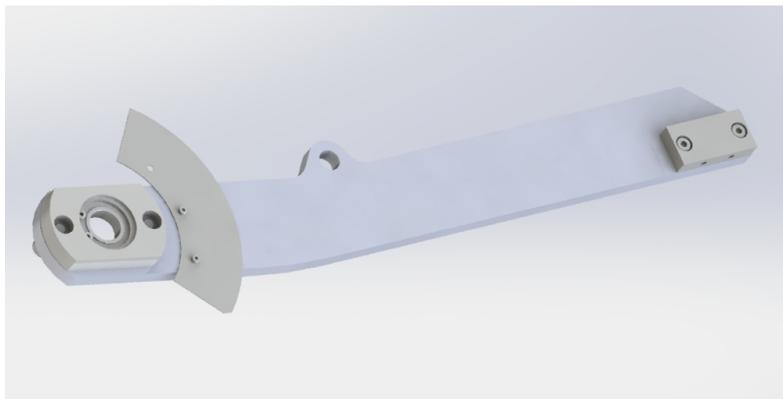


Abbildung 6.7.: Darstellung der Baugruppe (2) im CAD: Schwenkarm LI-Baugruppe

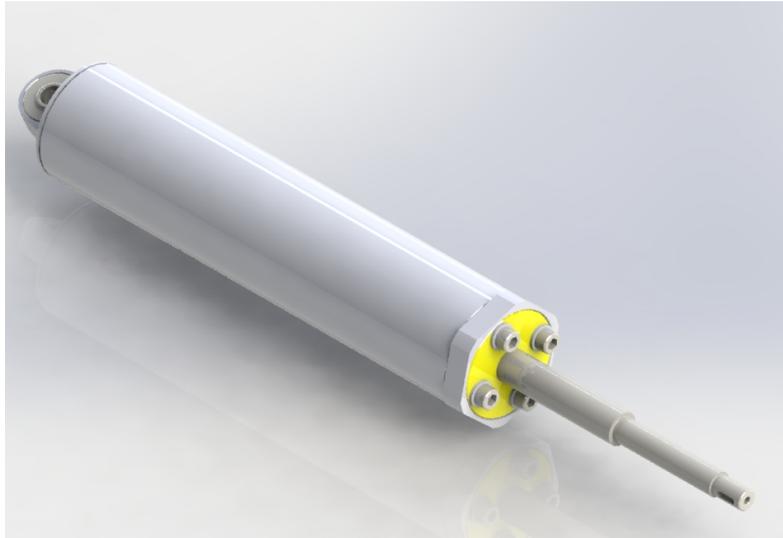


Abbildung 6.8.: Darstellung der Baugruppe (3) im CAD: Spindel Baugruppe

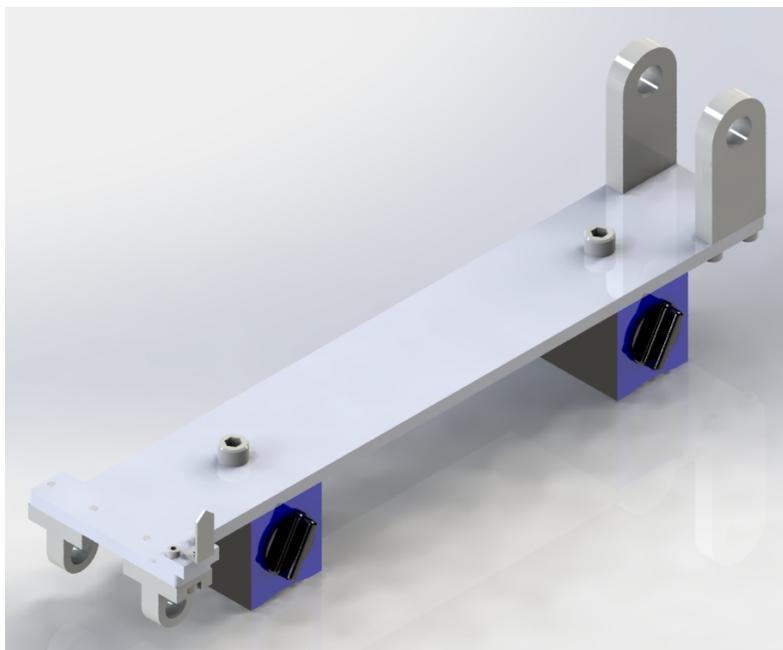


Abbildung 6.9.: Darstellung der Baugruppe (4) im CAD: Grundplatte Baugruppe

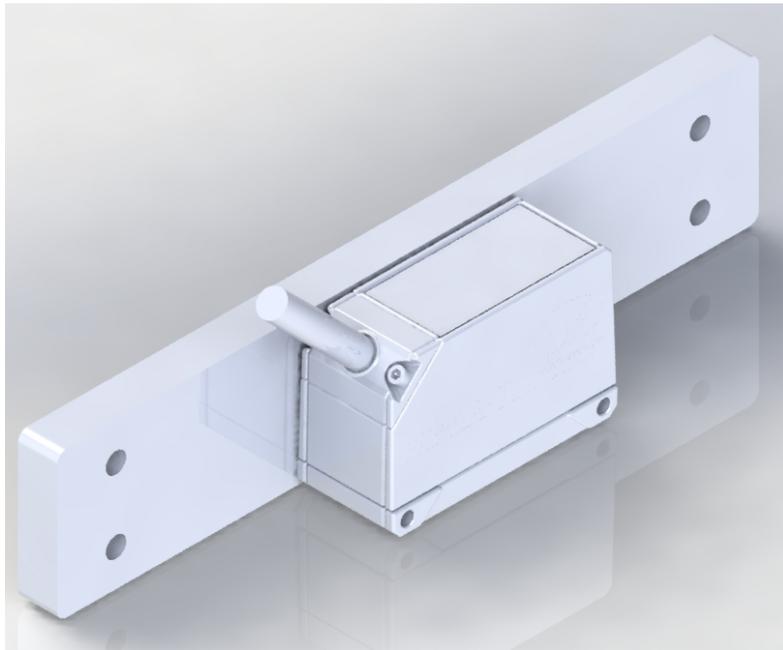


Abbildung 6.10.: Darstellung der Baugruppe (5) im CAD: Messaufnehmer Baugruppe

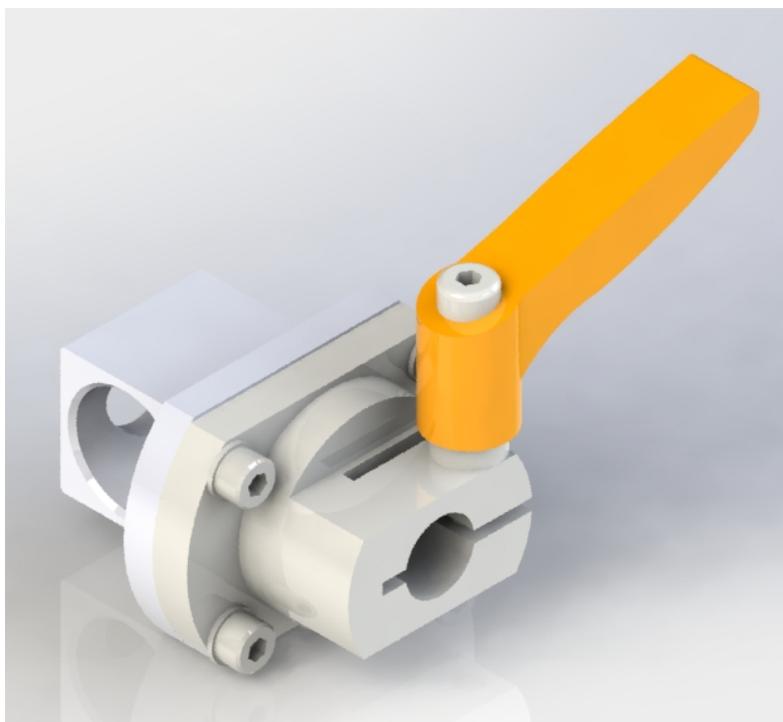


Abbildung 6.11.: Darstellung der Baugruppe (6) im CAD: Fixierung Baugruppe

7. Zusammenfassung

Die mit dem Projekt verbundene Arbeit deckt mehrere Wissensbereiche ab - ist somit eine interdisziplinäre Aufgabenbewältigung. Die Erarbeitung des Kapitels der Messtechnik, besteht aus grundlegenden Begriffen, Bestandteile und Aufbau einer Messkette, Messsignalklassifizierung und der Beschreibung von ausgewählten Messprinzipien. Diese repräsentieren nur einen sehr kleinen Teil der wissenschaftlich verwendeten Möglichkeiten zum Messen physikalischer Größen. Die beschriebenen Prinzipien beschränken sich ausschließlich auf das Bestimmen des geometrischen Weges bzw. des Abstands von Messobjekten.

Die weitere Arbeit bestand in der Auswahl eines geeigneten Weg- bzw. Abstandssensors. Die detaillierten Aufstellungen der Anforderungen an den Messaufnehmer sind im Kapitel 4.1 beschrieben. Darauf folgend musste die Ausführbarkeit des Messkonzeptes festgestellt und gesichert werden. Dabei wurden der Messaufnehmer und die Elektronik bei einfachster Maschinenkonfiguration (stehendem Motor und vertikalem Sägeblatt) überprüft. Die Überprüfung gliederte sich in drei Versuchsreihen (bestehend aus 10 Einzelversuchen unter den selben Rahmenbedingungen) mit drei unterschiedlichen Schnitttiefen. Dabei wurde eine, zu der Position des Sägeblatts proportionale, elektrische Spannung mit Hilfe eines Speicheroszilloskops gemessen und digital ausgewertet. Die Speicherung der Daten (Position über der Zeit) erfolgte in einem zugehörigen CSV-File, das wiederum mit einem Tabellenkalkulationsprogramm bearbeitet werden konnte. Die Auswertung bestand aus der Ermittlung der Totzeit (Zeit von der manuellen Schalterbetätigung bis zur Auslösung der Sicherheitsvorrichtung) und der Absenkezeit (Zeit von der manuellen Schalterbetätigung bis zu Erreichen der eingestellten Schnitttiefe).

Erst bei der Probedurchführung der Versuche, hat sich herausgestellt, dass der anfänglich angenommene Reflexionspunkt am Spaltkeil der Kreissäge für den Messaufnehmer kein sinnvolles Ergebnis erzeugt. Aus diesem Grund wurde die Spindelmutter der Motorwelle als passendes Element für die Abtastung herangezogen. In diesem Fall handelt es sich um eine Messung bei stehender Maschine. Da jedoch in weiterer Folge die Abstandsmessungen bei laufender Maschine durchgeführt werden sollen, ist dabei erneut ein anderer Punkt auszuwählen. Aus Gründen der Steifigkeit und verbesserten Zugänglichkeit ist die Halterung des Spaltkeils am besten dafür geeignet.

Wie im Kapitel 3.2 gezeigt, kann nie ein eindeutiger Messwert angegeben werden. Durch die Errechnung eines Mittelwerts mit Schwankungsbreite - anhand von zufälligen Messfehlern erzeugt - kann eine Aussage mit statistischer Wahrscheinlichkeit getätigt werden. Die aus den Versuchen gewonnenen Ergebnisse sind daher mit Hilfe statistischer Werkzeuge ausgewertet worden. Die Voraussetzung dafür ist, dass die Versuchsanordnung stets gleich bleibt und ausreichend viele Einzelversuche durchgeführt werden, um die Schwankungsbreite zu minimieren.

Die abschließende Entwicklung einer Haltevorrichtung im Kapitel 6 ist ausschließlich virtuell erfolgt. Bei der Konstruktion sind speziell die Kosten und die geringe Komplexität des Aggregats zu beachten gewesen. Eine von mehreren Anforderungen abhängige Arbeit, die nur durch

iterative Entwicklungsschritte möglich war. Gleichzeitig mussten die zur Verfügung stehenden Lieferanten für die einzelnen Bauteile ausgewählt werden.

Abkürzungen

IFT	Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik
vgl.	vergleiche
s.g.	so genannt
max.	maximal
min.	minimal
ca.	circa
d.h.	das heißt
SI	Système International d'Unités
bsp.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
usw.	und so weiter
bzw.	beziehungsweise
OPV	Operationsverstärker
ADW	Analog-Digital Wandler
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
SHG	Sample & Hold-Glied
DMS	Dehnungsmessstreifen
PZT	Bleizirkontitanat
PVDF	Polyvinylidenfluorid
LED	Leuchtdiode
APD	Avalanche-Fotodioden
PSD	Position Sensitive Device
CCD	Charge Coupled Device
CAD	Computer-aided Design
CAM	Computer-aided Manufacturing
NC	Numerical Control
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
DXF	Drawing Interchange File Format
CSV	Character-separated values

Abbildungsverzeichnis

2.1. Kreissäge <i>Felder Format 4 Kappa 550</i> am IFT.	10
2.2. Darstellung des <i>Felder Kreissägenmoduls 133</i>	10
2.3. Schwenkmöglichkeit des Kreissägeblatts	11
2.4. Sägenaggregat mit dem Schwenkmechanismus innerhalb der <i>Felder Format 4 Kappa 550</i>	11
2.5. Integriertes Rechnerpaneel der <i>FELDER FORMAT 4 Kappa 550</i>	12
2.6. Darstellung des montierten Aktuators zwischen Kreissägenmodul und dem Sägenaggregat und der installierten Stoßdämpfer in der <i>FELDER FORMAT 4 Kappa 550</i>	13
3.1. Darstellung der Verteilungsdichtefunktion einer Normalverteilung	23
3.2. Aufbau der Messkette beim Erfassen einer nichtelektrischen physikalischen Größe	24
3.3. Schaltbild eines invertierenden OPV	26
3.4. Schaltbild eines nicht-invertierenden OPV	26
3.5. Schaltbild eines nicht-invertierenden OPV	27
3.6. Messverstärker bestehend aus einem Spannungsfolger und einem invertierenden Verstärker	27
3.7. Grundprinzip eines SHG und der Spannungsverlauf in Abhängigkeit des Schalters S	28
3.8. Klassifizierung diskreter und kontinuierlicher Signale	31
3.9. Wirkprinzip des potenziometrischen Sensors mit Schaltbild	33
3.10. Einteilung des elektromagnetischen Strahlungsspektrums	33
3.11. Schematischer Aufbau einer T-Type LED	34
3.12. Schematischer Aufbau einer Laserdiode	35
3.13. Schematischer Aufbau und Funktionsweise eines PSD-Elements	36
3.14. Schematischer Aufbau und Funktionsweise einer CCD-Zeile	36
3.15. Schematischer Aufbau eines optischen Messaufnehmers	36
3.16. Typische spektrale Verteilung	37
3.17. Schematische Darstellung des Strahlenverlaufs und des Nutzsignals	38
3.18. Schematischer Aufbau einer inkrementellen Abtasteinheit	39
3.19. Schematische Darstellung des Triangulationsprinzips	39
3.20. Darstellung des Pulslaufzeitverfahrens	40
3.21. Prinzip des Frequenzlaufzeitverfahrens	41
3.22. Prinzip des Phasenlaufzeitverfahrens	42
3.23. Prinzip der interferometrischen Längenmessung	42
3.24. Funktionsweise eines Ultraschalllaufzeitsensors	44
3.25. Prinzipaufbau des Einspulen-Längsankers und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung	46
3.26. Prinzipaufbau des Differenzspulen-Längsanker und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung	47
3.27. Prinzipaufbau des Querankeraufnehmer und Induktivitätsveränderung in Abhängigkeit der Kernstellung	48

4.1. Darstellung des freilegenden Kreissägeblatts an der <i>FELDER FORMAT 4 Kappa 550</i>	51
5.1. Aufbau der temporären Haltevorrichtung für den Messaufnehmer zur Durchführung der Versuche	56
5.2. Graphische Darstellung der Signalausgabe des Probedurchlaufs im Programm <i>Pico Scope 6</i>	57
5.3. Darstellung des neu definierten Detektionspunkt des Triangulationsaufnehmers an der Wellenmutter der Motorhauptspindel [Foto: Matti Felsner].	57
5.4. Darstellung der Kennlinie für eine lineare Interpolation anhand der Seitenverhältnisse eines rechtwinkligen Dreiecks.	58
5.5. Elektrische Verkabelung des Messaufnehmers.	61
5.6. Darstellung des Speicheroszilloskops <i>PicoScope 3000 Series</i>	62
5.7. Darstellung des Differenzialtaktkopfs <i>Pico Technology TA043</i>	63
5.8. Darstellung der Messaufnehmerspannung über der Zeit des Versuchs VN02-01 im EXCEL	64
5.9. Darstellung des „Gleitenden Durchschnitts“ an den Diagrammpunkten im EXCEL des Versuchs VN02-01	65
6.1. Prinzipaufbau des ersten Entwurfs:	69
6.2. Prinzipaufbau des zweiten Entwurfs	70
6.3. Prinzipaufbau des finalen Entwurfs	71
6.4. Darstellung des Sägeblattabstands bei einem Schnittwinkel von -50° aus der Nulllage: Der horizontale Abstand vom vorderen Magnetfuß bis zum Kreissägeblatt ist aufgrund der Exzentrischen Lagerung der Schwenkarme unterschiedlich zum Abstand bei einem Schnittwinkel von $+50^\circ$	72
6.5. Darstellung des horizontalen Sägeblattabstands bei einem Schnittwinkel von $+50^\circ$ aus der Nulllage	72
6.6. Darstellung der Baugruppe (1) im CAD: Schwenkarm RE-Baugruppe	78
6.7. Darstellung der Baugruppe (2) im CAD: Schwenkarm LI-Baugruppe	79
6.8. Darstellung der Baugruppe (3) im CAD: Spindel Baugruppe	80
6.9. Darstellung der Baugruppe (4) im CAD: Grundplatte Baugruppe	80
6.10. Darstellung der Baugruppe (5) im CAD: Messaufnehmer Baugruppe	81
6.11. Darstellung der Baugruppe (6) im CAD: Fixierung Baugruppe	81

Tabellenverzeichnis

3.1. SI-Basiseinheiten	18
3.2. SI-Präfixe für dezimale Vielfache und Teile von Einheiten	18
3.3. Beispiele für aus den kohärenten SI-Einheiten abgeleitete Größen	18
3.4. Beispiele für aus den kohärenten SI-Einheiten abgeleitete Größen mit Eigennamen	19
3.5. Auflistung einiger Naturkonstanten	19
3.6. Wahrscheinlichkeiten der Normalverteilung anhand der Standardabweichung [2, Seite 38]	23
3.7. Wandlungsbreite und relative Abweichung eines idealen ADW	29
4.1. Auswahlmöglichkeiten der Sensoren für die Abstandsmessung	52
4.2. Einteilung der Genauigkeitsklassen	52
4.3. Technische Daten des ausgewählten Triangulationssensors	53
5.1. Auflistung der Messreihen	59
5.2. Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN01	59
5.3. Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN02	60
5.4. Auflistung der Berechnungsdaten der Messreihe VN03	60
5.5. Auflistung der Auswertung der Messreihe VN01	65
5.6. Auflistung der Auswertung der Messreihe VN02	66
5.7. Auflistung der Auswertung der Messreihe VN03	66
6.1. Stückliste des Vermessungssystems mit Lieferantenpreisen -Teil 1	76
6.2. Stückliste des Vermessungssystems mit Lieferantenpreisen - Teil 2	77
6.3. Auflistung der Unterbaugruppen	78
6.4. Auflistung der Bauteile für die Montage einzelner Unterbaugruppen	79

Literaturverzeichnis

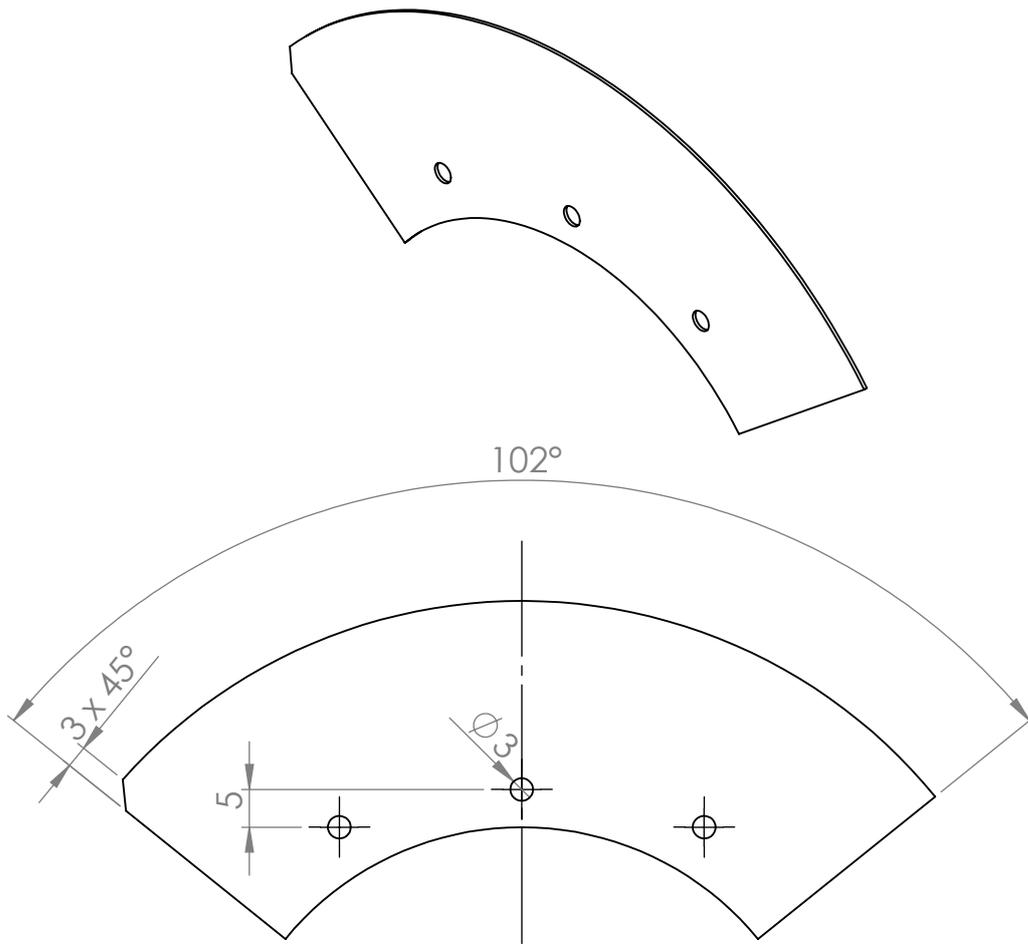
- [1] FELDER KG, "Webseite: <https://www.felder-group.com/at-de>," Letzter Zugriff: 11.10.2017.
- [2] T. Mühl, *Einführung in die elektrische Messtechnik - Grundlagen, Messverfahren, Geräte*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [3] DIN, "Größen," *DIN 1313*, 1998.
- [4] VDI, "Kalibrieren von Messmitteln für elektrische Größen Grundlagen," *VDI 2622-1*, 2014.
- [5] DIN, "Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe," *DIN 1319-1*, 1995.
- [6] B. I. des Poids et Mesures, "The International System of Units (SI)," *Organisation Intergouvernementale de la Convention du Mètre*, 2006.
- [7] DIN, "Einheiten – Teil 1: Einheitennamen, Einheitenzeichen," *DIN 1301-1*, 2010.
- [8] DIN, "Einheiten – Allgemein angewendete Teile und Vielfache," *DIN 1301-2*, 1978.
- [9] DIN, "Grundlagen der Meßtechnik - Teil 3: Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße, Meßunsicherheit," *DIN 1319-3*, 1996.
- [10] DIN, "Grundlagen der Meßtechnik - Teil 4: Auswertung von Messungen, Messunsicherheit," *DIN 1319-4*, 1999.
- [11] J. Hoffmann, *Handbuch der Messtechnik*. Carl Hanser Verlag, 2007.
- [12] E. Zeidler, *Springer - Taschenbuch der Mathematik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [13] DIN, "Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik - Begriffe der Statistik, Spezielle Wahrscheinlichkeitsverteilungen," *DIN 55350-22*, 1987.
- [14] DIN, "Stochastik - Wahrscheinlichkeitstheorie, Gemeinsame Grundbegriffe der mathematischen und beschreibenden Statistik, Begriffe und Zeichen," *DIN 13303-1*, 1982.
- [15] DIN, "Stochastik - Mathematische Statistik, Begriffe und Zeichen," *DIN 13303-2*, 1982.
- [16] R. Parthier, *Messtechnik - Grundlagen und Anwendungen der elektrischen Messtechnik*. Springer Vieweg, 2016.
- [17] M. Frey, Thomas und Bossert, *Signal- und Systemtheorie*. Vieweg+Teubner, 2008.
- [18] J. W. Helmut Springer, *Skriptum zur Vorlesung Mess- und Schwingungstechnik*. TU Wien Institut für Mechanik und Mechatronik, Oktober 2007.
- [19] G. S. Ekbert Hering, *Sensoren in Wissenschaft und Technik*. Vieweg+Teubner Verlag, 2011.

- [20] H. Bernstein, *Messelektronik und Sensoren - Grundlagen der Messtechnik, Sensoren, analoge und digitale Signalverarbeitung*. Springer Vieweg, 2014.
- [21] E. Schiessle, *Sensortechnik und Meßwertaufnahme*. Vogel-Fachbuch, 1992.
- [22] H. Schaumburg, *Sensoren (Werkstoffe und Bauelemente der E-Technik)*. Vieweg+Teubner Verlag, 1992.
- [23] VDI, "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte," *VDI 2221*, 1993.

A. Anhang

A.1. Weiterführende Konzeptentwicklung

A.1.1. Einzelteilzeichnungen



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN: fein
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

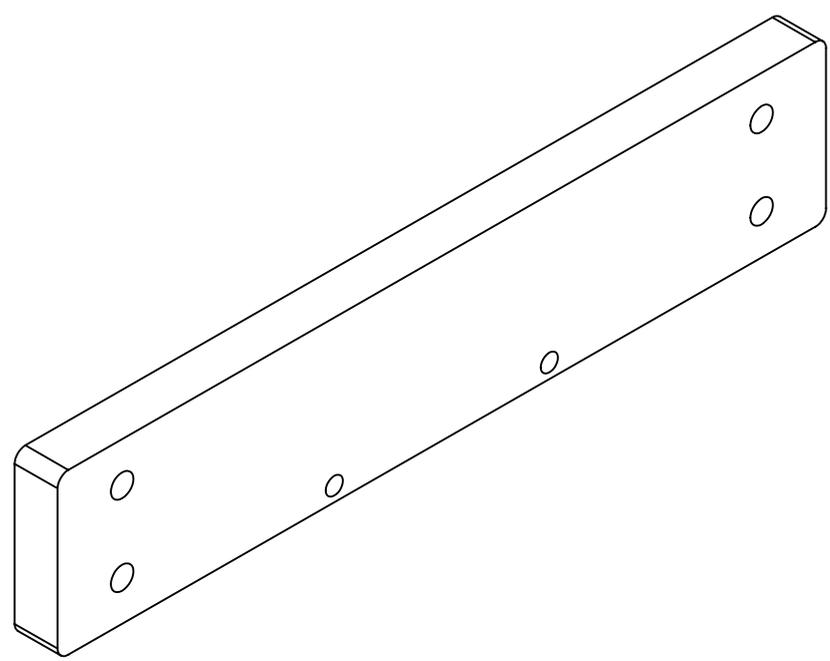
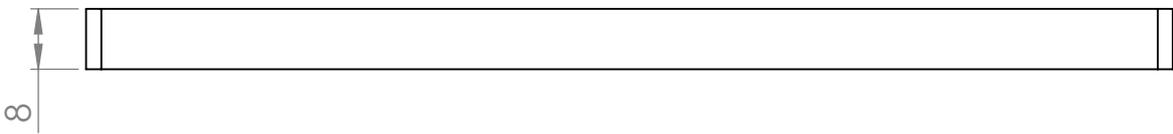
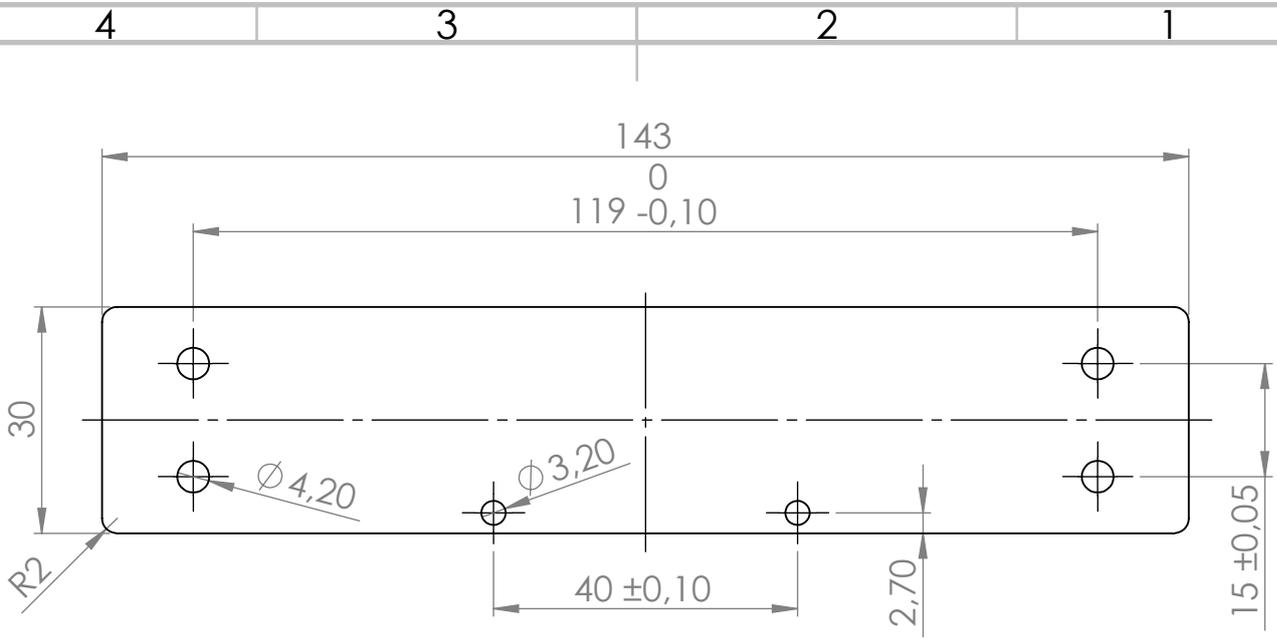
	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG: MEAAC140-80-3	
ZEICHNUNGSNR. ZN 001	A4
MASSSTAB: 1:1	BLATT 1 VON 1

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

WERKSTOFF:

GEWICHT:



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
Aufnahmeplatte

ZEICHNUNGSNR.
ZN 006

WERKSTOFF:

GEWICHT:

MASSSTAB: 1:1

BLATT 1 VON 1

A4

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

4 3 2 1

F

F

E

E

D

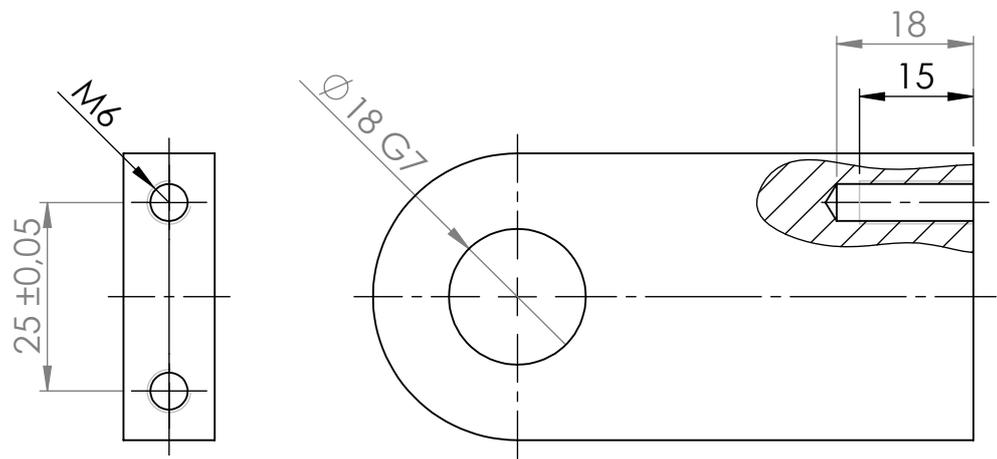
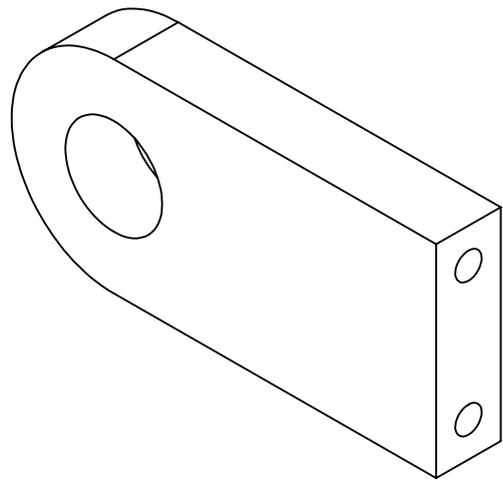
D

C

C

B

B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN: fein
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

 ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
HPE16-60-12

ZEICHNUNGSNR.
ZN 008

WERKSTOFF:
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

GEWICHT:
 MASSSTAB: 1:1

BLATT 1 VON 1

4 3 2 1

A

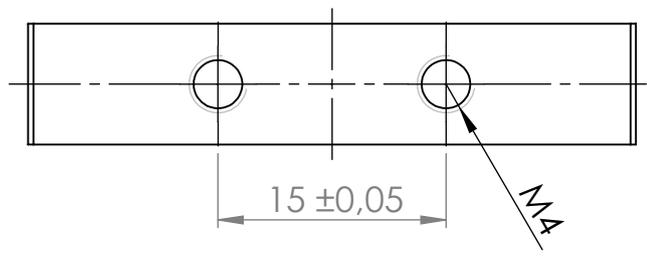
A

A4

4 3 2 1

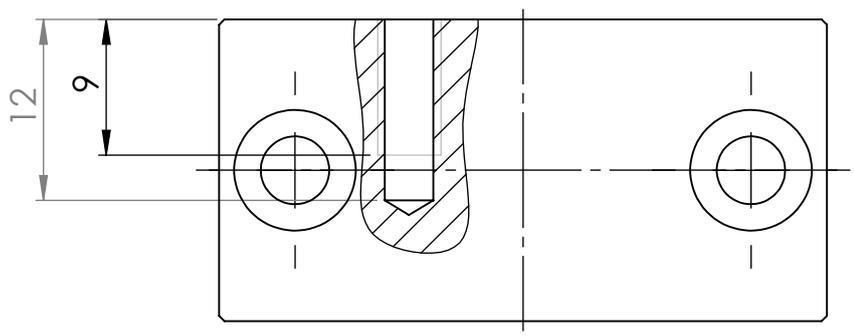
F

F



E

E

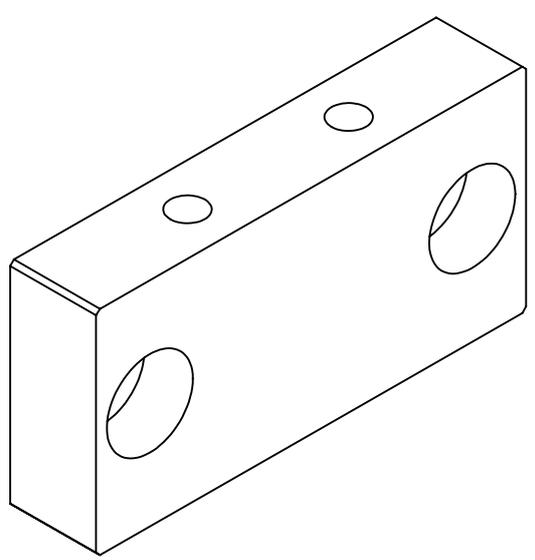


D

D

C

C



B

B

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
SBFB-40-20-8

ZEICHNUNGSNR.
ZN 009

WERKSTOFF:
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

MASSSTAB:2:1

BLATT 1 VON 1

4 3 2 1

A

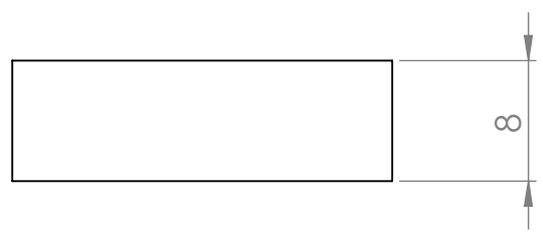
A

A4

4 3 2 1

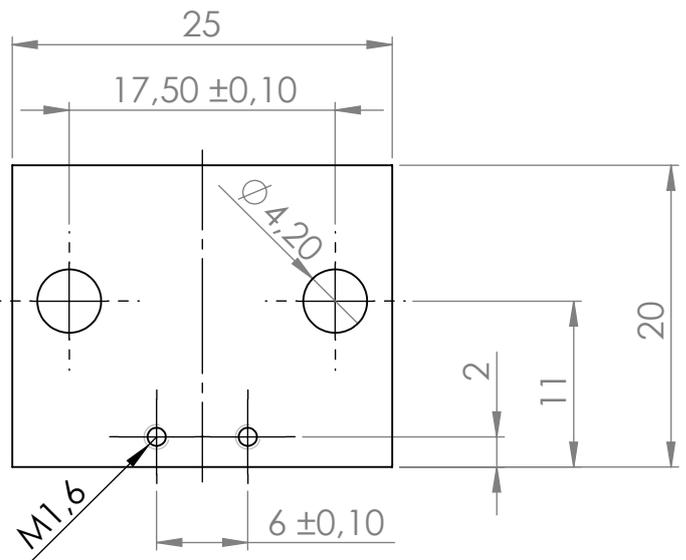
F

F



E

E

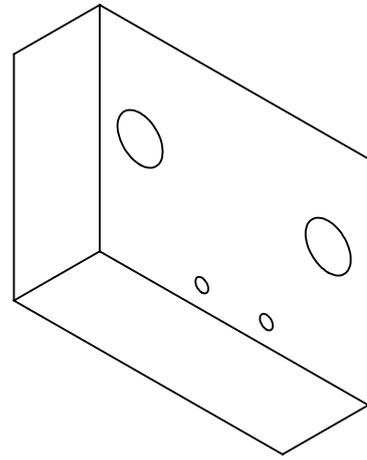


D

D

C

C



B

B

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
Distanzplatte

ZEICHNUNGSNR.
ZN 010

WERKSTOFF:
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

MASSSTAB:2:1

BLATT 1 VON 1

A4

A

A

4 3 2 1

4 3 2 1

F

F

E

E

D

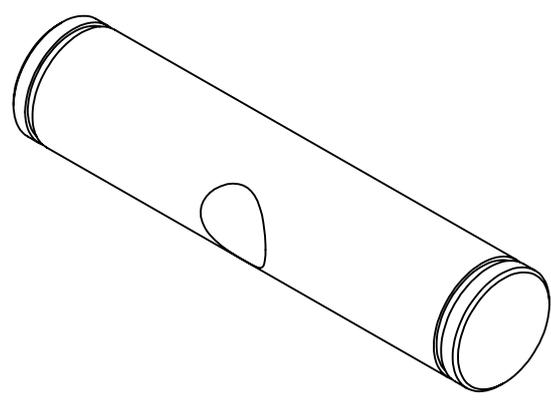
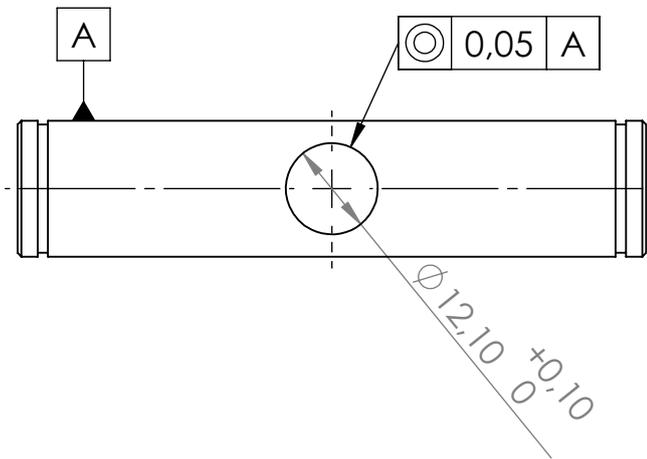
D

C

C

B

B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
**FSFUFF-D18-L74.7-
H4-U4-LKC**

ZEICHNUNGSNR.
ZN 013

MASSSTAB: 1:1

BLATT 1 VON 1

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

A4

4 3 2 1

A

A

4 3 2 1

F

F

E

E

D

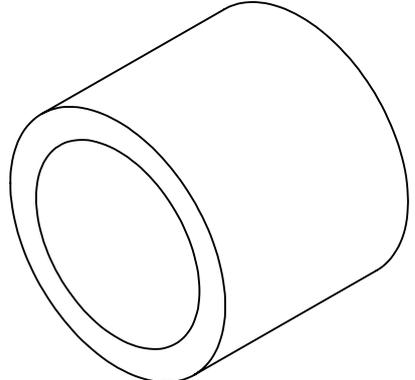
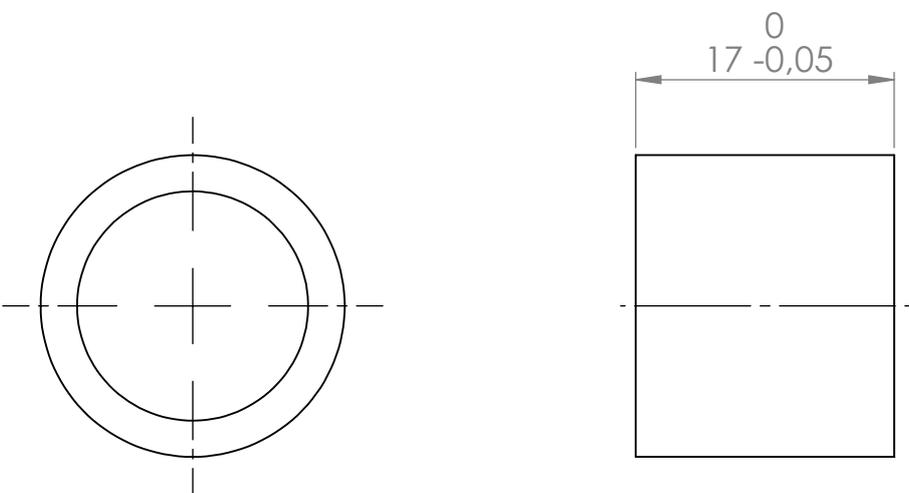
D

C

C

B

B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN: fein
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

BENENNUNG:
PSTS20A-17

ZEICHNUNGSNR.
ZN 014

MASSSTAB:2:1

BLATT 1 VON 1

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

A4

4 3 2 1

A

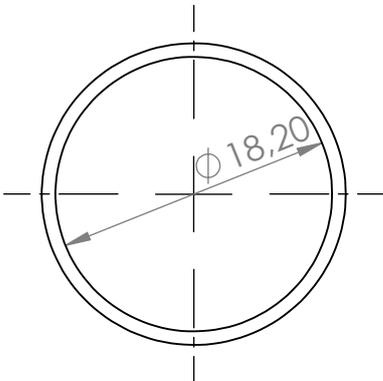
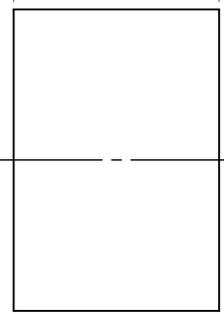
A

4 3 2 1

F

F

13,50⁰_{-0,05}

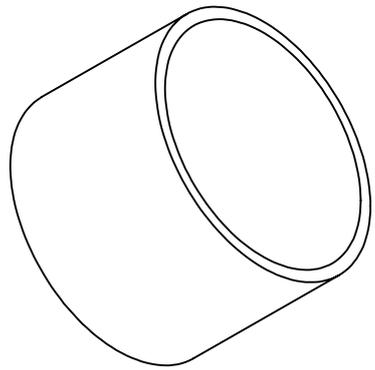


E

E

D

D



C

C

B

B

WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			

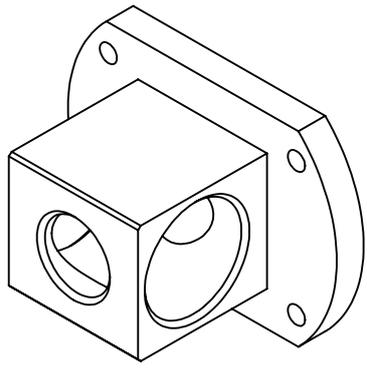
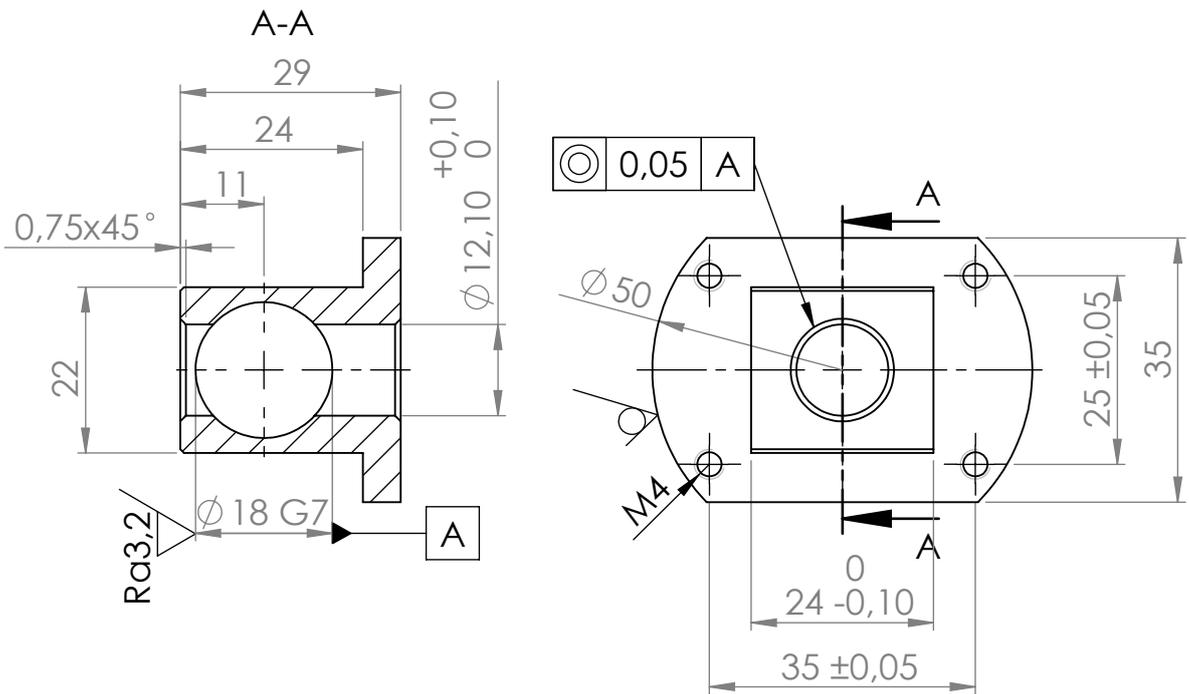
BENENNUNG: PSTS20A-13,5	
ZEICHNUNGSNR. ZN 015	A4
MASSSTAB:2:1	BLATT 1 VON 1

SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.

A

A

4 3 2 1



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
 BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
 OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
 TOLERANZEN: fein
 LINEAR:
 WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:
 ENTGRATEN
 UND SCHARFE
 KANTEN
 BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			

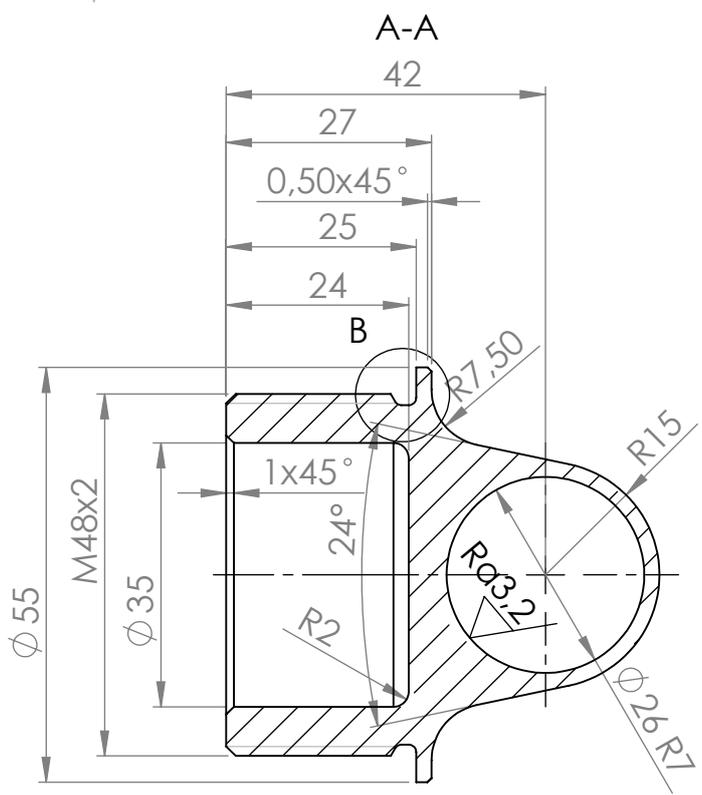
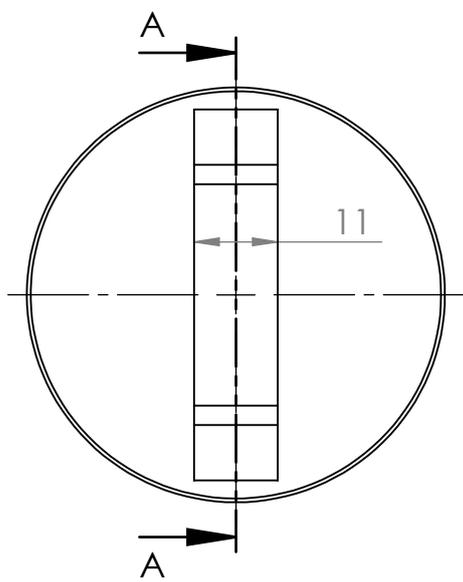
BENENNUNG:
Spindelfixierung

WERKSTOFF:
EN AW-6060

GEWICHT:

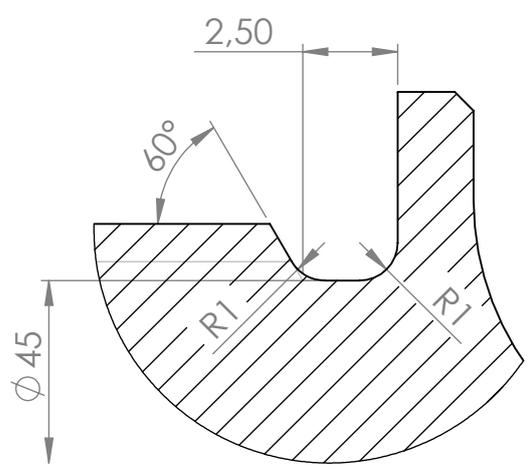
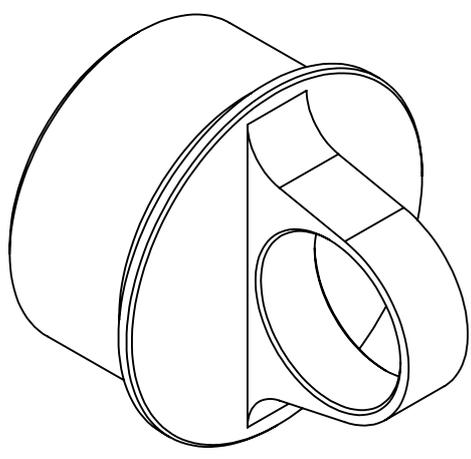
ZEICHNUNGSNR.
ZN 016

MASSSTAB: 1:1 BLATT 1 VON 1



B (5 : 1)

Gewindefreistich nach DIN 76-1 Form B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: fein LINEAR: WINKEL:			OBERFLÄCHENGÜTE:			ENTGRATEN UND SCHARFE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN		ÄNDERUNG	
NAME Felsner Matti			SIGNATUR			DATUM			BENENNUNG: Hülsenanschluss- Gelenk		
GEZEICHNET			GEPRÜFT			GENEHMIGT			ZEICHNUNGSNR. ZN 025		
PRODUKTION			QUALITÄT			WERKSTOFF: EN AW-6060 o. ä.			MASSSTAB: 1:1 (5:1)		
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke			GEWICHT:			MASSSTAB: 1:1 (5:1)			BLATT 1 VON 1		

A

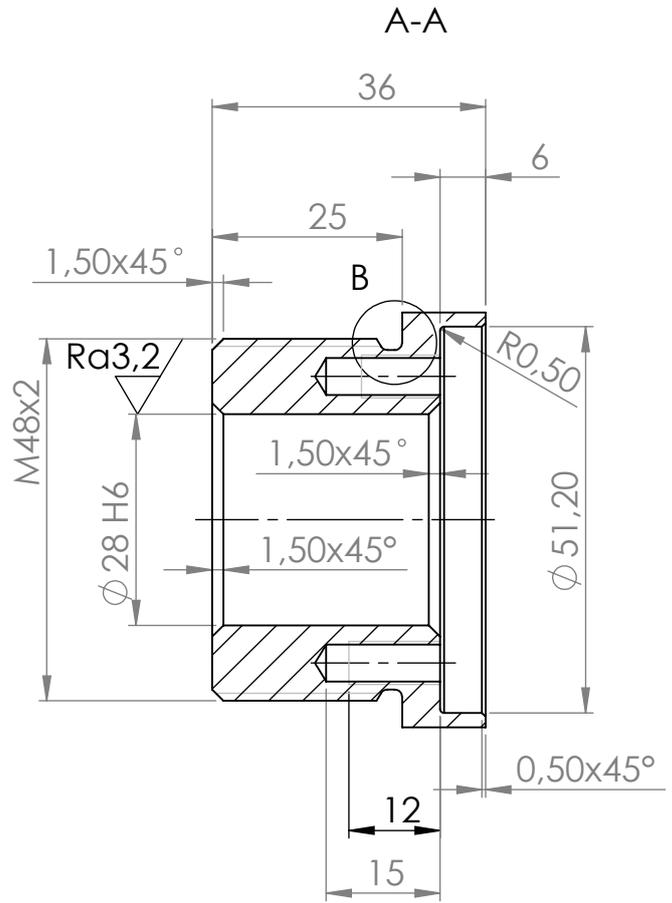
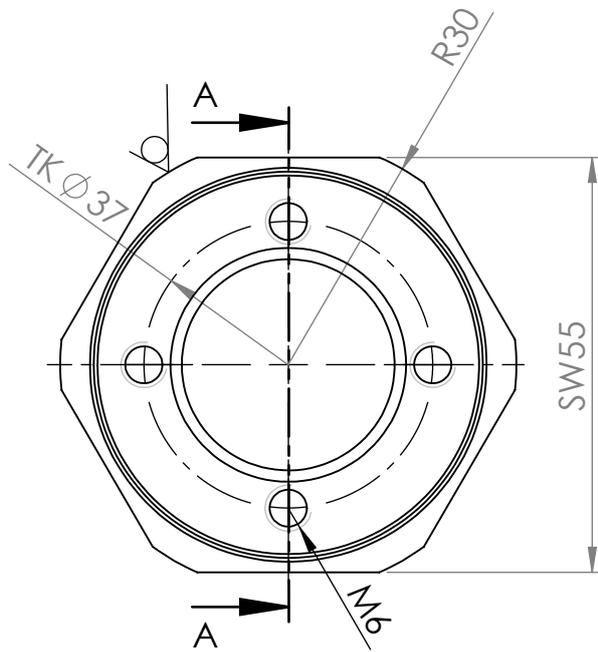
A

4

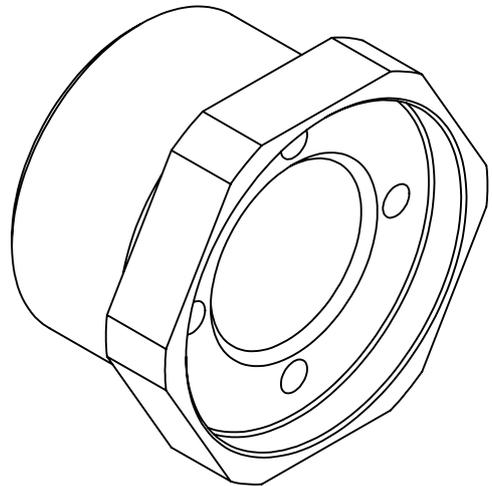
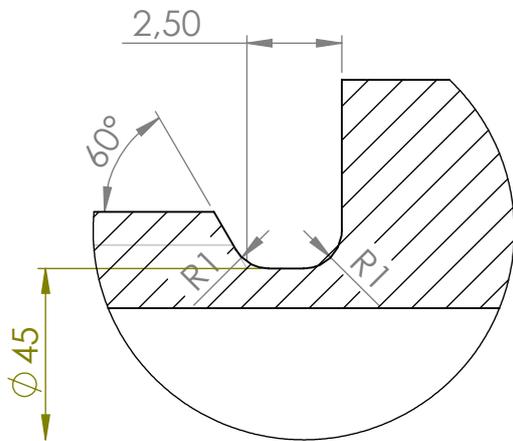
3

2

1



B (5 : 1)
Gewindefreistich nach DIN 76-1 Form B



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT:
BEMASSUNGEN SIND IN MILLIMETER
OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT:
TOLERANZEN: fein
LINEAR:
WINKEL:

OBERFLÄCHENGÜTE:

ENTGRATEN
UND SCHARFE
KANTEN
BRECHEN

ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN

ÄNDERUNG

	NAME	SIGNATUR	DATUM
GEZEICHNET	Felsner Matti		
GEPRÜFT			
GENEHMIGT			
PRODUKTION			
QUALITÄT			
Werkstoff: EN AW-6060 o. ä.			
SOLIDWORKS Lehrprodukt - Nur für Lehrzwecke.			
GEWICHT:			

BENENNUNG:

Spindelhülse

ZEICHNUNGSNR.

ZN 027

A4

MASSSTAB: 1:1

BLATT 1 VON 1

A.1.2. Zusammenstellungszeichnungen

A.2. Betriebsanleitung

A.2.1. Messaufnehmer *MICRO-EPSILON ILD1420-500*

2. Laserklasse

2.1 ILD1420

Das optoNCDT 1420 arbeitet mit einem Halbleiterlaser der Wellenlänge 670 nm (sichtbar/rot).

Die Sensoren sind in die Laserklasse 2 eingeordnet. Der Laser wird gepulst betrieben, die maximale optische Leistung ist ≤ 1 mW. Die Pulsfrequenz hängt von der eingestellten Messrate ab (0,25 ... 4 kHz). Die Pulsdauer der Peaks wird abhängig von der Messrate und Reflektivität des Messobjektes geregelt und kann 0,3 ... 3999,6 μ s betragen.

i Beachten Sie die Laserschutzvorschriften.



Schauen Sie nicht absichtlich in den Laserstrahl! Schließen Sie bewusst die Augen oder wenden Sie sich sofort ab, falls die Laserstrahlung ins Auge trifft.

Beim Betrieb der Sensoren sind die einschlägigen Vorschriften nach DIN EN 60825-1 (VDE 0837, Teil 1 von 07/2015) und die in Deutschland gültige Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“ (BGV B2 von 1/97) zu beachten. Danach gilt:

- Bei Lasereinrichtungen der Klasse 2 ist das Auge bei zufälliger, kurzzeitiger Einwirkung der Laserstrahlung, d.h. Einwirkungsdauer bis 0,25 s, nicht gefährdet.
- Lasereinrichtungen der Klasse 2 dürfen Sie deshalb ohne weitere Schutzmaßnahmen einsetzen, wenn Sie nicht absichtlich länger als 0,25 s in den Laserstrahl oder in spiegelnd reflektierte Strahlung hineinschauen.
- Da vom Vorhandensein des Lidschlussreflexes in der Regel nicht ausgegangen werden darf, sollte man bewusst die Augen schließen oder sich sofort abwenden, falls die Laserstrahlung ins Auge trifft.

Laser der Klasse 2 sind nicht anzeigespflichtig und ein Laserschutzbeauftragter ist nicht erforderlich.

Am Sensorkabel sind die beiden Laserwarnschilder (Deutsch / Englisch) angebracht:



Abb. 1 Laserhinweisschilder am Sensorkabel

3.3 Technische Daten ILD1420

Modell	ILD1420-10	ILD1420-25	ILD1420-50	ILD1420-100	ILD1420-200	ILD1420-500
Messbereich	10 mm	25 mm	50 mm	100 mm	200 mm	500 mm
Messbereichsanfang	20 mm	25 mm	35 mm	50 mm	60 mm	100 mm
Messbereichsmittle	25 mm	37,5 mm	60 mm	100 mm	160 mm	350 mm
Messbereichsende	30 mm	50 mm	85 mm	150 mm	260 mm	600 mm
Linearität ¹	8 ... 10 μm	20 ... 25 μm	40 ... 50 μm	80 ... 100 μm	160 ... 200 μm	500 ... 1000 μm
Reproduzierbarkeit ²	$\leq 0,08$ bis $0,1$ % d.M.					
Reproduzierbarkeit ²	0,5 μm	1 μm	2 μm	4 μm	8 μm	20 ... 40 μm
Messrate ³	0,25 kHz / 0,5 kHz / 1 kHz / 2 kHz / 4 kHz					
Lichtquelle	Halbleiterlaser <1 mW, 670 nm (rot)					
Zulässiges Fremdlicht	10.000 lx					
Lichtfleck- durchmesser ± 10 %	MBA	100 x 140 μm	90 x 120 μm	90 x 120 μm	750 x 1100 μm	750 x 1100 μm
	MBM	120 x 130 μm	45 x 40 μm	230 x 240 μm	750 x 1100 μm	750 x 1100 μm
	MBE	390 x 500 μm	140 x 160 μm	630 x 820 μm	750 x 1100 μm	750 x 1100 μm
	kleinster \emptyset	55 x 50 μm bei 31 mm	45 x 40 μm bei 24 mm	70 x 65 μm bei 42 mm	---	---
Laserschutzklasse	Klasse 2 nach DIN EN 60825-1: 2015-07					
Temperaturstabilität	$\pm 0,03$ % d.M./ $^{\circ}\text{C}$					
Betriebstemperatur	0 ... +50 $^{\circ}\text{C}$ (nicht kondensierend)					
Lagertemperatur	-20 ... +70 $^{\circ}\text{C}$ (nicht kondensierend)					
Messwertausgang	analog	4..20 mA (1-5 V mit Kabel PCF1420-3/U); 12 bit frei skalierbar innerhalb des Messbereiches ⁴				
Vibration	digital	RS422 / 16 bit bzw. 18 bit				
		20 g / 20 ... 500 Hz (nach IEC 60068-2-6)				

Schock	15 g / 6 ms / 3 Achsen (nach IEC 60068-2-29)
Gewicht	ca. 145 g (mit 3 m Kabel) ca. 60 g (mit Pigtail)
Schalteingänge	Laser on/off; Funktionseingang: Trigger in, Nullsetzen/Mastern, Teachen
Schaltausgang	Schaltausgang
Sensorkabel	mit offenen Enden, Länge: 3 m mit M12-Kabelstecker, Länge: 0,3 m
Anzeigen	2 x 3 Farb-LED für Power und Status
Taste	Select Taste für Zero / Teachen / Werkseinstellung
Versorgung	11-30 V DC, 24 V P < 2 W
Elektronik	integrierter Signalprozessor

Die angegebenen Daten gelten für eine weiße, diffus reflektierende Oberfläche (Referenz: Keramik).
d.M. = des Messbereichs,

MBA = Messbereichsanfang; MBM = Messbereichsmitte; MBE = Messbereichsende

1) Werte gelten von 0 bis 50 % d.M. bzw. 51 bis 100 % d.M.

2) Messrate 2 kHz, Median 9

Werkseinstellung 2 kHz; Ändern der Werkseinstellungen erfordert IF2001/USB Konverter (optional erhältlich)

4) D/A-Wandlung erfolgt mit 12 bit;

5. Montage

5.1 Hinweise für den Betrieb

5.1.1 Reflexionsgrad der Messoberfläche

Prinzipiell wertet der Sensor den diffusen Anteil der Reflexionen des Laserlichtpunktes aus.

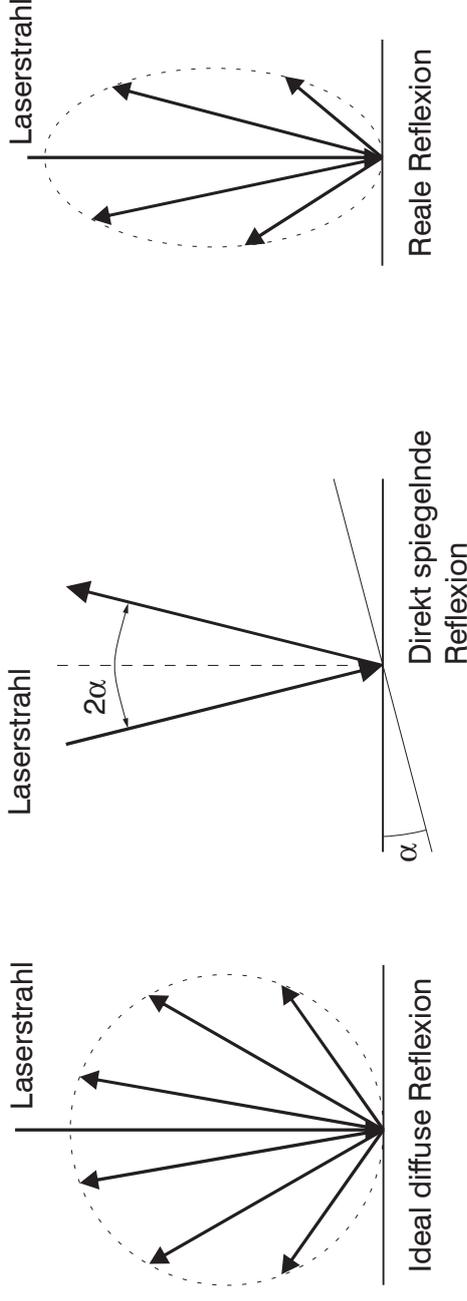


Abb. 6 Reflexionsgrad der Messoberfläche

Eine Aussage über einen Mindestreflexionsgrad ist nur bedingt möglich, da selbst von spiegelnden Flächen noch geringe diffuse Anteile ausgewertet werden können. Dies geschieht durch Intensitätsbestimmung der diffusen Reflexion aus dem CMOS-Signal in Echtzeit und anschließender Regelung, siehe Kap. 3.2. Für dunkle oder glänzende Messobjekte, wie zum Beispiel schwarzer Gummi, kann aber eine längere Belichtungszeit erforderlich sein. Die Belichtungszeit ist an die Messrate gekoppelt und kann nur durch ein Herabsetzen der Messrate des Sensors erhöht werden.

5.1.2 Fehlereinflüsse

5.1.2.1 Fremdlicht

Die Sensoren der Reihe optoNCDT 1420 besitzen durch ihr eingebautes optisches Interferenzfilter eine sehr gute Fremdlichtunterdrückung. Bei glänzenden Messobjekten und bei herabgesetzter Messrate kann es jedoch zu Störungen durch Fremdlicht kommen. In diesen Fällen empfiehlt sich das Anbringen von Abschirmungen gegen das Fremdlicht. Das gilt im Besonderen beim Messen in der Nähe von Schweißeinrichtungen.

5.1.2.2 Farbunterschiede

Farbunterschiede von Messobjekten wirken sich aufgrund der Intensitätsnachregelung auf das Messergebnis nur gering aus. Häufig sind aber diese Farbunterschiede auch mit unterschiedlichen Eindringtiefen des Laserlichtpunktes in das Material verbunden. Unterschiedliche Eindringtiefen wiederum haben scheinbare Veränderungen der Messfleckgröße zur Folge. Deshalb können Farbwechsel, verbunden mit Eindringtiefenveränderungen, zu Messunsicherheiten führen.

5.1.2.3 Oberflächenrauigkeiten

Oberflächenrauigkeiten in der Größenordnung $5\ \mu\text{m}$ und darüber, führen bei traversierenden Messungen zu einer scheinbaren Abstandsänderung (sog. Oberflächenrauschen). Sie können aber durch die Wahl eines größeren Mittelwertes, gedämpft werden.

5.1.2.4 Temperatureinflüsse

Bei Inbetriebnahme ist eine Einlaufzeit von mindestens 20 Minuten erforderlich, um eine gleichmäßige Temperaturenbreitung im Sensor zu erreichen. Wird im μm -Genauigkeitsbereich gemessen, ist auch die Wirkung der Temperaturschwankungen auf die Halterung des Sensors vom Anwender zu beachten.

Schnelle Temperaturänderungen werden durch die dämpfende Wirkung der Wärmekapazität des Sensors nur verzögert erfasst.

5.1.2.5 Mechanische Schwingungen

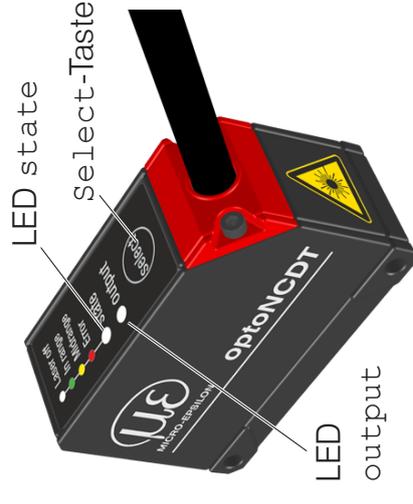
Sollen mit dem Sensor Auflösungen im μm - Bereich erreicht werden, ist besonderes Augenmerk auf eine stabile bzw. schwingungsgedämpfte Sensor- und Messobjektmontage zu richten.

5.1.2.6 Bewegungsunschärfen

Bei schnell bewegten Messobjekten und niedriger Messrate kann es auch zu Bewegungsunschärfen (Verwischen) kommen. Deshalb ist bei schnellen Vorgängen eine hohe Messrate zu wählen, um Fehler zu vermeiden.

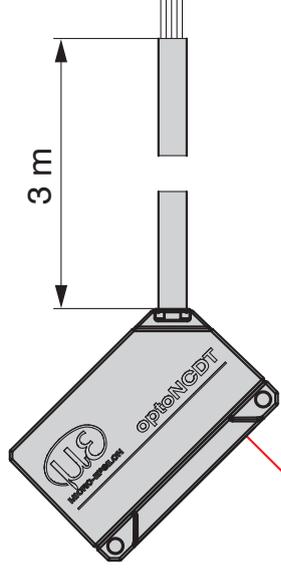
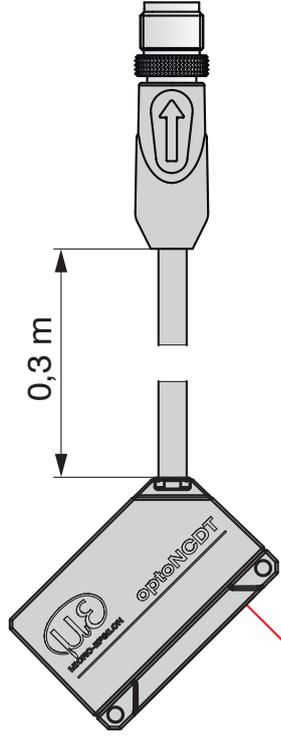
5.3 Bedien- und Anzeigeelemente

LED State	Bedeutung
grün	Messobjekt im Messbereich
gelb	Messobjekt in Messbereichsmitte
rot	Fehler, z.B. Messobjekt außerhalb des Messbereichs, zu niedrige Reflexion
aus	Laser abgeschaltet
LED Output	Bedeutung
grün	Messwertausgang RS422
gelb	RS422 und Stromausgang sind abgeschaltet. Die RS422 oder der Stromausgang können zugeschaltet werden.
rot	Messwertausgang Strom 4 ... 20 mA
aus	Sensor aus, keine Versorgung



Die programmierbare Taste `Select` ruft die Funktionen `Mastern` oder `Teachen` auf. In den Werkseinstellungen ist die Taste `Select` nur 5 Minuten nach dem Einschalten der Betriebsspannung aktiv. Danach wird sie automatisch gesperrt. Die Tastensperre kann über interne Webseiten oder ASCII-Befehle programmiert werden.

5.4.2 Anschlussbelegung

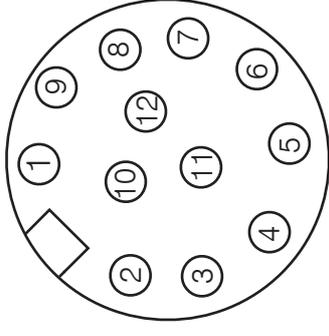


Die Abschirmung des Kabels ist mit dem Sensorgehäuse verbunden. Das Sensorkabel ist nicht schleppkettentauglich. Einseitig ist es am Sensor angegossen, das andere Ende besitzt einen M12-Rundkabelstecker oder Litzen mit Aderendhülsen

ILD1420 mit Pigtail

ILD1420 mit offenen Enden

Pin	Sensorkabel bzw. PCF1420-x/I, Erläuterung	Bemerkung, Beschaltung
3	grün RS422 Rx+	Intern mit 120 Ohm abgeschlossen
4	gelb RS422 Rx-	
5	grau RS422 Tx+	Am Empfänger mit 120 Ohm abschließen
6	rosa RS422 Tx-	
7	rot +U _B	11 ... 30 VDC, typ. 24 VDC, P < 2 W
8	schwarz Laser on/off	Laser aktiv, wenn der Eingang mit GND verbunden ist
9	violett Funktionseingang	Funktionseingang (Trigh, Zero/Master, TeachIn)
10	braun Error	I _{max} = 100 mA, U _{max} = 30 VDC Schaltverhalten programmierbar: (NPN, PNP, Push-Pull)
11	weiß I _{OUT}	
12	blau GND	R _{Bürde} = 250 Ohm ergibt U _{OUT} 1 ... 5 V bei U _B > 11 V R _{Bürde} = 500 Ohm ergibt U _{OUT} 2 ... 10 V bei U _B > 17 V
	Schirm	Versorgungs- und Signalmasse
	Steckergehäuse	Mit Potentialausgleich verbinden



Lötseite Kabelbuchse

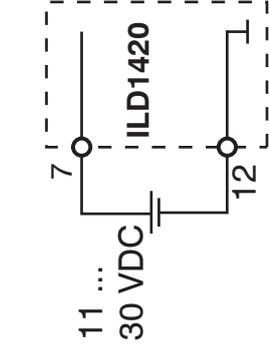
Das Sensorkabel PCF1420 ist schleppkettentauglich. Einseitig ist eine M12 Kabelbuchse angegossen, das andere Ende besitzt Litzen mit Aderendhülsen.

5.4.3 Versorgungsspannung

Nennwert: 24 V DC (11 ... 30 V, P < 2 W).

➡ Schalten Sie das Netzteil erst nach Fertigstellung der Verdrahtung ein.

➡ Verbinden Sie die Eingänge „7“ und „12“ am Sensor mit einer 24 V-Spannungsversorgung.



Spannungsversorgung nur für Messgeräte, nicht gleichzeitig für Antriebe oder ähnliche Impulsstörquellen verwenden. MICRO-EPSILON empfiehlt die Verwendung des optional erhältlichen Netzteils PS2020 für den Sensor.

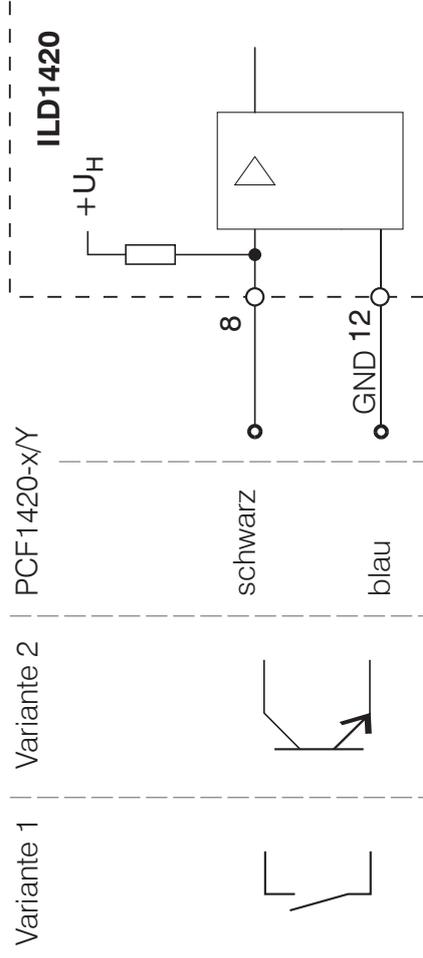
Abb. 15 Anschluss Versorgungsspannung

Sensor Pin	PCF1420-x/Y Farbe	Versorgung
7	rot	+U _B
12	blau	Masse

5.4.4 Laser einschalten

Der Messlaser am Sensor wird über einen HTL-Schalteingang eingeschaltet. Dies ist von Vorteil, um den Sensor für Wartungszwecke oder Ähnliches abschalten zu können. Zum Schalten eignen sich sowohl ein Schalttransistor mit offenem Kollektor (zum Beispiel in einem Optokoppler) als auch ein Relaiskontakt.

i Der Laser bleibt abgeschaltet, solange nicht Pin 8 mit Pin 12 elektrisch leitend verbunden ist.



Es ist kein externer Widerstand zur Strombegrenzung erforderlich. Für permanent „Laser on“ Pin 8 und Pin 12 verbinden.

Reaktionszeit: Der Sensor braucht circa 1 ms Zeit bis korrekte Messdaten gesendet werden, nachdem der Laser wieder eingeschaltet wurde.

Abb. 16 Prinzipschaltung für die Lasereinschaltung

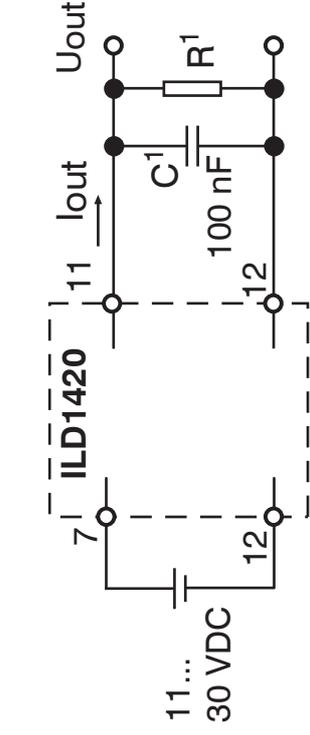
5.4.5 Analogausgang

Der Sensor stellt einen Stromausgang 4 ... 20 mA zur Verfügung.

- Der Stromausgang darf nicht dauerhaft im Kurzschlussbetrieb ohne Lastwiderstand betrieben werden.
- Der Kurzschlussbetrieb führt dauerhaft zur thermischen Überlastung und damit zur automatischen Überlastabschaltung des Ausganges.

➔ Verbinden Sie den Ausgang 11 (weiß) und 12 (blau) am Sensor mit einem Messgerät.

Sensor	
12-pol. M12 Kabelstecker	Sensorkabel
I _{OUT} (Pin 11)	weiß
GND (Pin 12)	blau



Bei Verwendung eines PCF1420-x/U erhalten Sie am Ausgang eine Analogspannung im Bereich von 1 ... 5 V.
 $R = 250 \text{ Ohm}$;
 $U_{\text{OUT}1} \dots 5 \text{ V}$ bei $U_{\text{B}} > 11 \text{ V}$
 $R = 500 \text{ Ohm}$;
 $U_{\text{OUT}2} \dots 10 \text{ V}$ bei $U_{\text{B}} > 17 \text{ V}$

Abb. 17 Beschaltung für Spannungsausgang

1) Die Bauteile sind im PCF 1420-x/U bereits enthalten.

6. Betrieb

6.1 Herstellung der Betriebsbereitschaft

- ➡ Montieren Sie das optoNCDT 1420 entsprechend den Montagevorschriften, siehe Kap. 5.
- ➡ Verbinden Sie den Sensor mit nachfolgenden Anzeige- oder Überwachungseinheiten und der Stromversorgung.

Die Laserdiode im Sensor wird nur aktiviert, wenn am Eingang Laser on/off Pin 8 mit Pin 12 verbunden ist, siehe Kap. 5.4.4.

Nach dem Einschalten der Betriebsspannung durchläuft der Sensor eine Initialisierungssequenz. Nach außen signalisiert der Sensor dies durch ein kurzes Aktivieren aller LED's. Nach Ablauf der Initialisierung sendet der Sensor ein „->“ über die RS422-Schnittstelle. Die Initialisierung dauert maximal 10 Sekunden. Innerhalb dieser Zeit wird nur das Kommando `Reset` bzw. `Bootloader` über die Taste `Select` ausgeführt.

Der Sensor benötigt für reproduzierbare Messungen eine Einlaufzeit von typisch 20 min.

Ist die `LED Output` aus, dann fehlt die Betriebsspannung.

Ist die `LED State` aus, dann ist die Laserlichtquelle abgeschaltet.

7.5.3.4 Berechnung Messwert aus analogem Strom

Stromausgang (ohne Mastern, ohne Teachen)

Variablen	Wertebereich	Formel
I_{OUT} = Strom [mA]	[3,8; <4] MBA-Reserve [4; 20] Messbereich [> 20; 20,2] MBE-Reserve	$d \text{ [mm]} = \frac{(I_{OUT} \text{ [mA]} - 4)}{16} * MB \text{ [mm]}$
MB = Messbereich [mm]	{10/25/50/100/200/500}	
d = Abstand [mm]	[-0,01MB; 1,01MB]	

Stromausgang (mit Mastern), Bezugswert Messbereichsmittle

Variablen	Wertebereich	Formel
I_{OUT} = Strom [mA]	[3,8; <4] MBA-Reserve [4; 20] Messbereich [> 20; 20,2] MBE-Reserve	$d \text{ [mm]} = \frac{(I_{OUT} \text{ [mA]} - 12)}{16} * MB \text{ [mm]}$
MB = Messbereich [mm]	{10/25/50/100/200/500}	
MP = Masterposition [mm]	[0; MB]	
d = Abstand [mm]	für $MP \leq 0,5MB$: [-MP; 0,5MB] für $MP > 0,5MB$: [-0,5MB; MB - MP]	

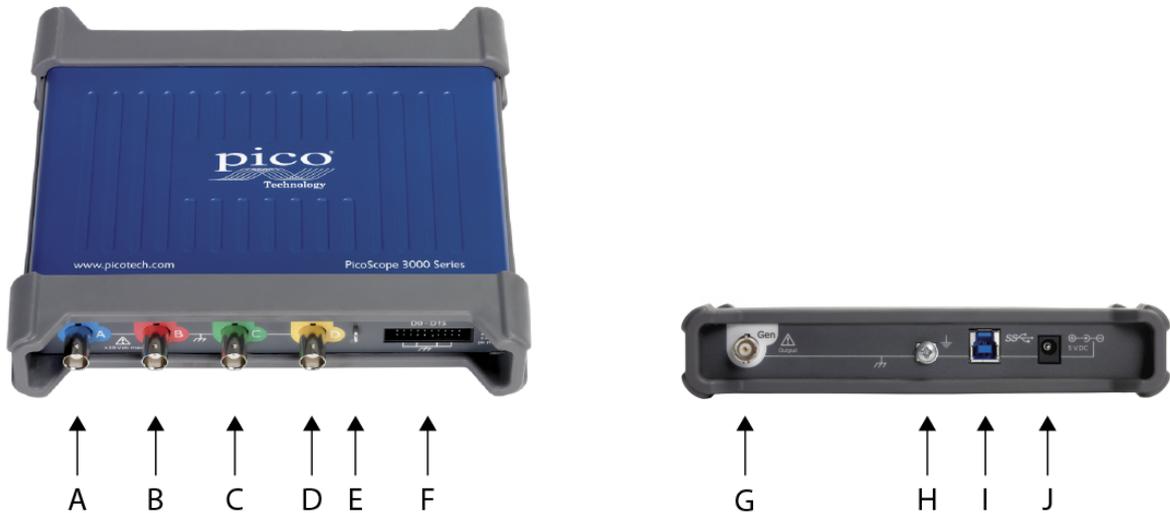
A.2.2. Speicheroszilloskop *PicoTechnology PicoScope® 3000 Series*

Zu den Vorteilen der Oszilloskope der PicoScope 3000D-Serie gehören:

- **Tragbarkeit.** Sie können das Gerät mitnehmen und einfach an einen beliebigen Windows-PC anschließen. (Linux und Mac OS X werden in der Beta-Software ebenfalls unterstützt).
- **Leistung.** Bis zu 200 MHz Bandbreite, 512 MS Pufferspeicher und eine Abtastrate von 1 GS/s.
- **Mischsignalfunktion.** Anzeige analoger und digitaler Signale auf gleicher Zeitbasis mit den MSO-Modellen.
- **Flexibilität.** Sie können das Gerät als Oszilloskop, Spektrumanalysator, Signalgenerator oder Datenerfassungsschnittstelle mit hoher Geschwindigkeit verwenden.
- **Programmierbarkeit.** Das PicoScope 3000A SDK ermöglicht es Ihnen, eigene Programme in einer Programmiersprache Ihrer Wahl zu schreiben, mit denen Sie alle Funktionen des Oszilloskops steuern können. Mit den API-Funktionen können Sie alternativ Ihre eigenen Programme entwickeln, um Daten vom Oszilloskop zu erfassen und zu analysieren. Weitere Informationen finden Sie im *Programmierhandbuch zur PicoScope-Serie 3000 (A API)*.
- **Langfristiger Support.** Softwareaktualisierungen können von unserer Website unter www.picotech.com heruntergeladen werden. Unsere Experten bieten Ihnen telefonischen Support. Diese Leistungen stehen Ihnen für die gesamte Lebensdauer des Produkts kostenlos zur Verfügung.
- **Preis-Leistungs-Verhältnis.** Sie müssen für die Funktionen, die Sie bereits auf Ihrem Computer haben, nicht zweimal bezahlen: Das Oszilloskop der PicoScope 3000-Serie enthält ausschließlich die spezielle Hardware, die Sie benötigen.
- **Komfort.** Die Software nutzt die Anzeige, den Festplattenspeicher, die Benutzeroberfläche und die Netzwerkfunktionen Ihres Computers über eine schnelle USB-Verbindung.
- **Fünf Jahre Garantie.** Wir gewähren auf unsere Oszilloskope ab dem Kaufdatum eine fünfjährige Garantie gegen Fabrikationsfehler. Diese Garantie ist für Sie kostenlos.

2.1.4 Anschlussdiagramm für 4-Kanal-MSO-Modell

PicoScope 3403D MSO, 3404D MSO, 3405D MSO und 3406D MSO.



A. Eingangskanal A

B. Eingangskanal B

C. Eingangskanal C

D. Eingangskanal D

E. Tastkopf-Kompensationskontakt (siehe oben)

LED (siehe unten)

Blinkt grün, wenn das Oszilloskop Daten abtastet.

F. Digitaleingänge D0 bis D15

G. AWG-Ausgang

H. Erdungsklemme

I. USB-Anschluss

J. Gleichstrom-Spannungseingang

2.2 Anschlussmöglichkeiten, Stromversorgung und Installation

1. Installation der PicoScope-Software

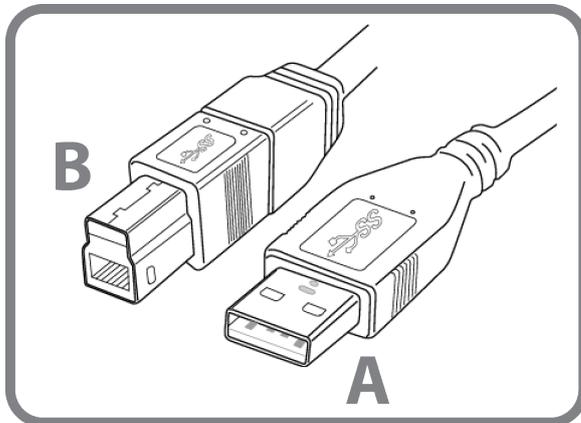
Bevor Sie Ihr Oszilloskop der PicoScope 3000-Serie einrichten, sollten Sie zunächst die PicoScope 6-Software installieren. Befolgen Sie dazu die Anweisungen in der mitgelieferten *Schnellstartanleitung*.

Für jedes Oszilloskopmodell gibt es je nach den Spezifikationen verschiedene Anschlussmöglichkeiten und Optionen für die Stromversorgung.

2. USB-Konnektivität

Um optimale Ergebnisse zu erzielen, verwenden Sie nur die mit Ihrem PicoScope mitgelieferten Qualitäts-USB-Kabel.

- Wenn Ihr Computer über einen USB 3.0-Anschluss verfügt, verbinden Sie das Oszilloskop über das mitgelieferte USB 3.0-Kabel damit (Bild unten).
- Falls an Ihrem Computer kein freier USB 3.0-Anschluss verfügbar ist, können Sie stattdessen das USB 2.0-Kabel mit zwei Steckern verwenden (Bild unten). Dieses Kabel ermöglicht die Verwendung eines zweiten USB-Anschlusses für zusätzliche Leistung. Die PicoScope-Software informiert Sie, falls das USB-Kabel mit zwei Steckern benötigt wird.
- Wenn Ihr Computer nicht über einen USB 3.0-Anschluss oder einen geeigneten USB 2.0-Anschluss verfügt, können Sie ein USB 2.0-Kabel mit zwei Steckern verwenden (separat erhältlich), das einen zweiten USB-Anschluss für zusätzliche Leistung nutzt.



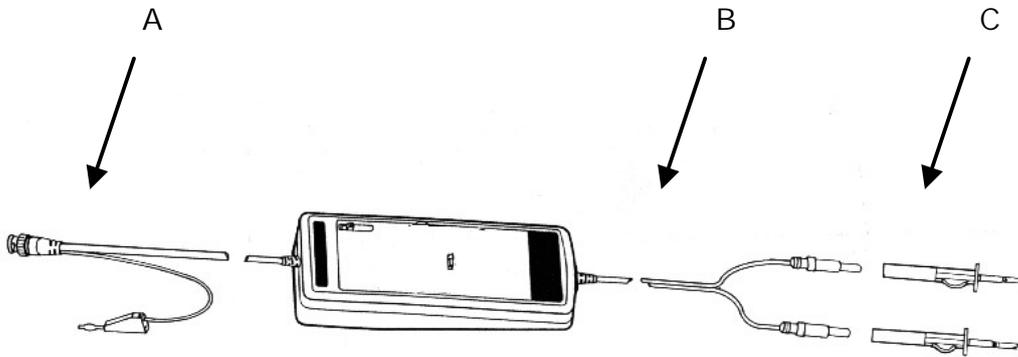
Stecker A: Am USB-Anschluss an Ihrem Computer anschließen

Stecker B: Am USB-Anschluss an Ihrem Oszilloskop der PicoScope 3000-Serie anschließen

A.2.3. Differenzialastkopf *PicoTechnology TA043*

5. Appearance

The differential probe looks like this:



A. Output Lead

The BNC output connector and an auxiliary grounding terminal are connected to the oscilloscope.

B. Input Leads

The input leads of the differential probe connect to sprung hooks that come with the probe.

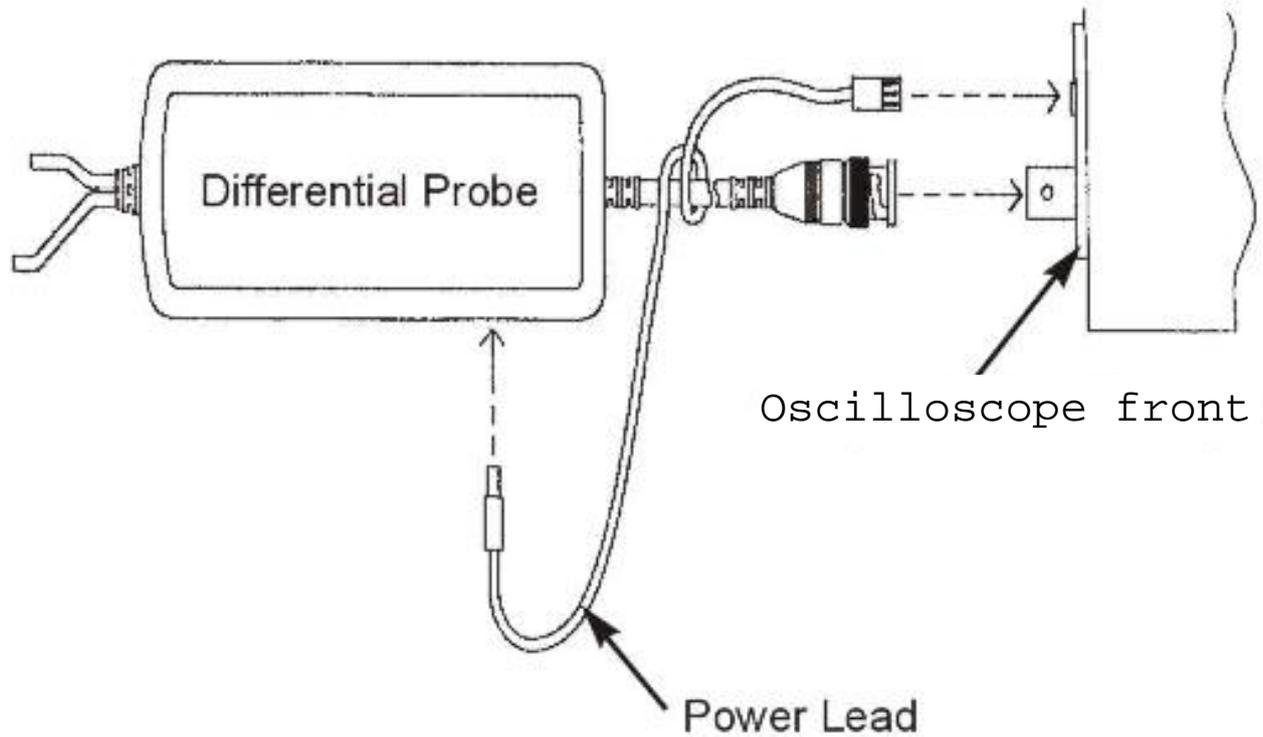
C. Sprung Hooks

The sprung hooks are connected safely to test points in the circuits under test.

6. Power leads

Two types of power leads are available for use with this instrument:

- a. Lemo[®] Lead: For oscilloscopes with Lemo[®] power connectors.
- b. Probus[®] Lead: For oscilloscopes with Probus[®] power connectors.



7. Specifications

Bandwidth	DC to 100 MHz (-3 dB)
Attenuation ratio	1: 10/100
Accuracy	±2%
Input Impedance	4 MΩ // 7 pF each side to ground
Input Voltage	
Differential Range* (1/10)	±70 V (DC + Peak AC) or 70 V rms
Differential Range* (1/100)	±700 V (DC + Peak AC) or 500 V rms
Common Mode Range*	±700V (DC + Peak AC) or 500 V rms (1/10 and 1/100)
Absolute Max. Voltage* (Differential or Common-Mode)	1000 V rms CAT III (1/10 & 1/100)
Output Voltage	
Swing	±7V into 50 kΩ load
Offset (typical)	< ±5 mV
Noise (typical)	0.9 mV rms
Source Impedance (typical)	50 Ω
CMRR (typical)	-85 dB @ 50 Hz; -55 dB @ 1 MHz
Ambient Operating Temperature	-10 to 40 °C
Ambient Storage Temperature	-30 to 70 °C
Ambient Operating Humidity	25 to 85% RH
Ambient Storage Humidity	25 to 85% RH
Power Requirements	
Standard	4xAA cells or 6 V DC / 200 mA mains adaptor** or regulated 9 V DC / 120 mA mains adaptor**
Options	Power leads
Length of Input Leads	30 cm
Length of BNC Lead	90 cm
Weight	500 g
Dimension (LxWxH)	202 mm x 83 mm x 38 mm

* Voltage limit is the lesser of the DC+Peak AC and RMS values.

**

- The supplied voltage must be less than 12 V and greater than 4.4 V, otherwise the probe could be damaged or might not operate properly.
- Polarity is "+" inside and "-" outside. If the polarity is wrong, a built-in circuit protects the probe so that no danger or damage will occur.
- When the voltage of the cells becomes too low, the power indicator on the panel will flicker.