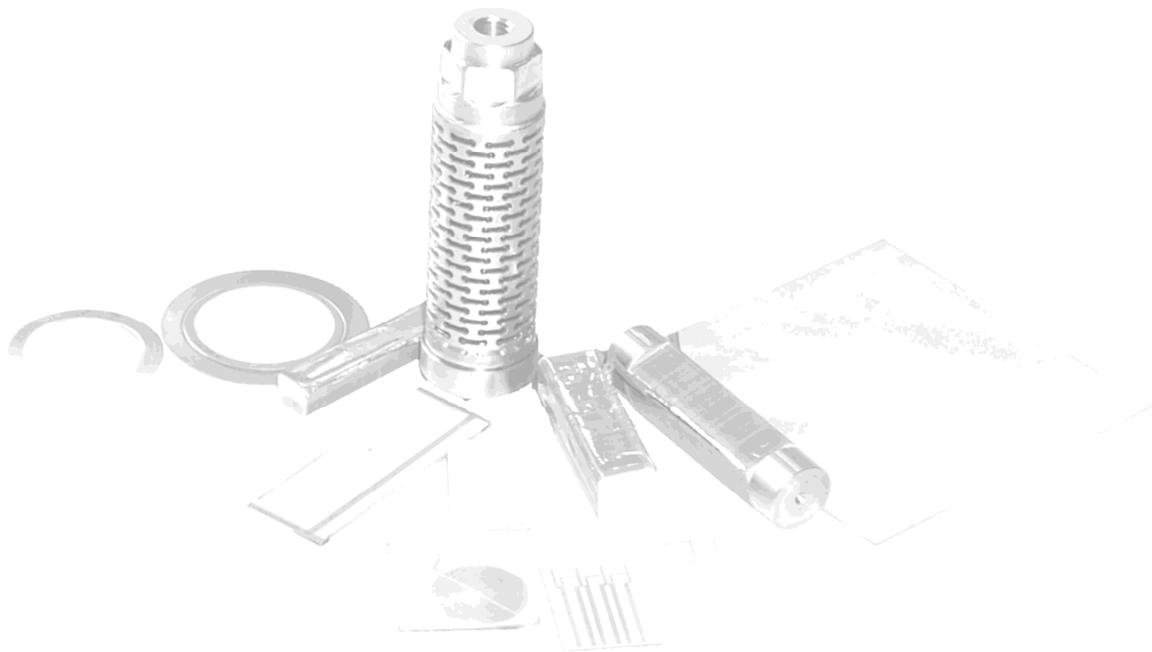


Praktikum Mikrotechnik

Lehrstuhl für Mikrotechnik und
Medizingerätetechnik

o. Prof. Dr. Tim C. Lüth



Version 2.7, Stand 31.10.2013

Praktikum Mikrotechnik

Inhalt:

Allgemeines:

Beschreibung zum Praktikumsablauf I - II

Versuche:

- | | |
|--|----------------|
| 1. Piezoaktoren | PIE 1 – PIE 14 |
| 2. Ansteuerung einer kapazitiven Last | TRA 1 – TRA 18 |
| 3. Regelungstechnik mit dem Operationsverstärker | OP 1 – OP 17 |
| 4. Untersuchung verschiedener Führungs-konzepte | FK 1 – FK 17 |
| 5. Motorkonzepte | MOT 1 – MOT 24 |
| 6. Ansteuerung mit dem Mikrokontroller
Auszug aus Datenblättern ATmega32(L) | MIK 1 – MIK 39 |
| 7. Mikroskopie | OPT 1 – OPT 13 |
| 8. Analog–Digital-Wandlung | AD 1 – AD 18 |
| 9. Projektoren | FD 1 – FD 8 |
| 10. Analoge Längenmessung mit dem Photosensor | LM 1 – LM 11 |

Grau gekennzeichnete Versuchsbeschreibungen sind in Version 2.7 zwar enthalten, werden aber im Rahmen des Praktikums derzeit nicht behandelt.

Ablauf des Mikrotechnikpraktikums

Daniel Günther überarbeitet von Thomas Ottnad, Wolfgang Büscher

1. Zum Inhalt

Mikrotechnik stellt bzgl. der angewandten Messmittel eine besondere Herausforderung dar. Die Dimensionen der Funktionsstrukturen liegen in den Größenordnungen der Toleranzen von Bauteilen des allgemeinen Maschinenbaus. Diese Anforderungen schlagen sich in den besonderen Aufbauten und Messmethoden mikrotechnischer Geräte nieder. Das Praktikum „Mikrotechnik“ soll den Stoff der Vorlesungen „Mikrotechnische Sensoren und Aktoren“ sowie „Mechatronische Gerätetechnik“ (früher „Feingerätebau“) veranschaulichen und vertiefen. Dabei ist der interdisziplinäre Ansatz von besonderer Bedeutung. Nur mit Hilfe der Kombination von Mikromechanik, Elektronik und den Konstruktionsprinzipien des Feingerätebaus können echte Mikrosysteme realisiert werden.

Ziel des Praktikums ist es, den Studenten Fähigkeiten zu vermitteln, welche sie direkt beim Aufbau mikrotechnischer Versuchsstände nutzen können. Die vermittelten Messmethoden sind grundlegend für den Umgang mit mikro-elektromechanischen Systemen (engl. MEMS). Das Praktikum hat dabei nicht zum Ziel, eine mikromechanische Funktionsstruktur zu realisieren. Die Studenten lernen im Verlauf des Praktikums notwendige Bauteile für ein 3D-Wachsdruckgerät kennen. Bei diesem 3D-Wachsdruckgerät handelt sich um einen Mehrdüsendruckkopf auf Basis eines piezoelektrischen Aktors.

Im Laufe des Praktikums werden die piezoelektrischen Grundlagen behandelt. Die Ansteuerung eines piezoelektrischen Aktors wird in Form der Ansteuerung einer kapazitiven Last vermittelt. Der Einsatz von Operationsverstärkern für eine einfache Temperaturregelung bildet die Basis für den Betrieb eines 3D-Wachsdruckgeräts bei gewünschter Temperatur. Unterschiedliche Antriebskonzepte und Führungen sowie Motorkonzepte werden untersucht, die für eine Positionierung eines x-y-Tisches notwendig sind.

Ausblickend sind im Skript Versuche zur Echtzeitsteuerung des x-y-Tisches per Mikrocontroller beschrieben. Ergänzende Versuche zur optischen Analyse von mikroskopischen Gegebenheiten runden das Praktikumsskript ab, werden aber im Wintersemester 2013/2014 nicht behandelt.

2 Ablauf

Das Praktikum umfasst insgesamt 6 Versuche. Ein Praktikumstag umfasst jeweils 3 Stunden.

Damit die Versuche sinnvoll und zügig ablaufen können, sollte sich der Praktikumsteilnehmer auf den jeweiligen Versuch gut vorbereiten. Dazu ist es sinnvoll, das Skriptum mit dem Versuch durchzulesen. Besonders sollten auch die praktischen Versuche vorher durchdacht werden.

Das Praktikum wird jeweils mit einer Fragerunde zum Inhalt begonnen. Die Vorbereitung wird durch den Assistenten bewertet. Zusätzlich dient diese Runde dazu, noch vorhandene Fragen zu klären. Dabei werden auch die Hausaufgaben durchgegangen und bewertet.

Die Durchführung des Versuchs selbst wird ebenso bewertet. Dabei sind zielgerichtetes Vorgehen und eine sinnvolle Dokumentation der Versuchsergebnisse die Bewertungsgrundlagen.

Insgesamt gliedert sich die Bewertung wie folgt:

- Hausaufgabe und Fragerunde 1/3
- Durchführung 1/3
- Ausarbeitung/ Dokumentation 1/3

Ergebnis des Praktikums ist ein benoteter Schein (auf Wunsch auch unbenotet). Dieser kann zwei Wochen nach Ablauf des Praktikums beim Praktikumsbetreuer abgeholt werden.

Die jeweiligen Termine sind in Form von Namenslisten und Gruppeneinteilungen im Internet und als Aushang am Lehrstuhl zu finden. Die Anmeldezeiträume sind im Internet aufgeführt.

3. Einordnung

Das Praktikum kann ohne begleitende Vorlesungen besucht und absolviert werden. Das Skriptum bietet hierzu alle notwendigen Informationen. Es vertieft den Stoff der Vorlesungen:

- Mechatronische Gerätetechnik (ehemals „Feingerätebau“)
- Mikrotechnische Sensoren und Aktoren

4. Version

Die vorliegende Ausführung ist die Version 2.7, Stand 31.10.2013

Viel Spaß und Erfolg beim Praktikum Mikrotechnik

Beschreibung zu Versuch Nr. 1:

Piezoaktoren

Daniel Günther, Michele Nicoletti überarbeitet von Thomas Ottnad, Wolfgang Büscher

1. Einordnung**1.1 Drucktechnik**

Die Drucktechnik ist ein wichtiger Markt für die Mikrotechnik. Deshalb sollen in diesem Praktikum grundlegende Vorgehensweisen und Verfahren der Mikrotechnik anhand eines Druckers vermittelt werden. Dieser besteht aus einem x-y- Tisch und einem Druckkopf, der in der Lage ist, heißes Wachs zu verdrucken. Mit einem solchem Aufbau können einfache 3D-Strukturen realisiert werden.

Im Verlauf des Praktikums sollen alle wichtigen Bestandteile des Druckers untersucht werden. Im Versuch Nr. 1 sollen die grundsätzlichen Eigenschaften von piezoelektrischen Aktoren (kurz auch Piezoaktoren) gezeigt werden. Diese sollen als Aktoren später für den Ausstoß von heißem Wachs sorgen.

1.2 Druckprinzip:

Der Tropfenausstoß eines Druckers wird dadurch erreicht, dass eine Flüssigkeitsmenge durch eine kleine Düse gepresst wird. Besitzt der aus der Düse austretende Strahl eine ausreichende kinetische Energie, kann sich ein Tropfen vom Druckkopf ablösen. Dabei gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Prinzipien: Das Continuous-Jet- und Drop-On-Demand- Verfahren.

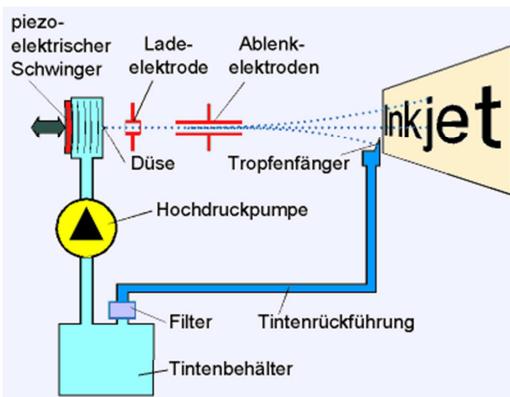


Bild 1: Prinzip eines Continuous-Jet-Druckers

Das Continuous-Jet-Verfahren basiert darauf, durch statischen Überdruck einen durchgehenden Flüssigkeitsstrahl durch die Düse zu pressen. Diesem Strahl wird eine periodische Druck-Schwingung überlagert, die ihn in einzelne Tropfen zerfallen lässt. Die vereinzelten Tropfen werden im Anschluss elektrisch aufgeladen. Eine Ablenkeinheit sorgt dafür, dass nicht auf dem Papier benötigte Tropfen abgelenkt werden. Diese Flüssigkeitsmenge wird in den Tintentank zurückgeführt. Bild 1 veranschaulicht das Prinzip.

Beim Drop-On-Demand-Verfahren herrscht in der Düse, wenn kein Tropfenausstoß stattfindet, ein geringer statischer Unterdruck. Dieser sorgt dafür, dass die Düsenöffnung immer von Flüssigkeitsresten befreit wird. Die Kapillarwirkung des Düsenkanals steht mit dem Unterdruck im Gleichgewicht und sorgt dafür, dass der Druckkopf nicht leer läuft. Wenn ein Tropfen auf dem Papier oder Druckmedium benötigt wird, wird er On-Demand durch einen Überdruckstoß erzeugt. Für dessen Erzeugung haben sich zwei Verfahren durchgesetzt:

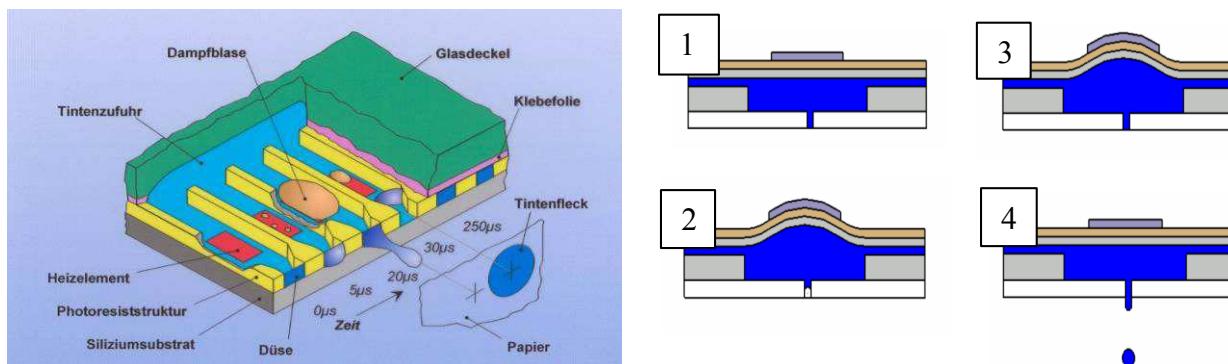


Bild 2: Links: Momentaufnahme eines Bubble-Jet-Druckmodells in Aktion.

Rechts: Die vier Zustände eines Druckers mit Pumpkammer.

1) Ruhe, 2) Ansaugen, 3) Kapillarisches Füllen, 4) Tropfenausstoß

Beim Bubble-Jet-Verfahren wird die Flüssigkeit durch eine Dampfblase unter Druck gesetzt. Diese wird über einem kleinen elektrischen Heizwiderstand erzeugt. Die Dampfblase drückt die Flüssigkeit aus der Düse. Im Anschluss füllt sich der Kanal wieder kapillarisch. Voraussetzung für dieses Verfahren ist eine Flüssigkeit mit ausgeprägtem Phasenwechsel. Hierfür kommen nur Wasser bzw. wasserähnliche Fluide in Frage. Diese Festlegung der Flüssigkeit schränkt das Bubble-Jet-Verfahren in seiner breiten Anwendung ein. Im Officebereich besitzt dieses Verfahren aber eine dominante Stellung. Dies wird besonders durch die gute Miniaturisierbarkeit der Heizwiderstände ermöglicht.

Die konkurrierenden Verfahren zeichnen sich dadurch aus, dass das Volumen einer Pumpkammer durch einen Aktor verändert wird (Bild 2 rechts). Nach der Ruhelage (1) wird das Kamervolumen vergrößert. Die Flüssigkeit wird dabei zum Teil aus dem Vorratsbehälter (Kanäle nach links und rechts) und auch aus dem Düsenkanal gesogen (2). Dieser füllt sich dann wieder durch die Kapillarkräfte (3). Wird die Kammer nun wieder auf das Ausgangsvolumen verkleinert (4), kann ein Teil des Differenzvolumens als Tropfen ausgestoßen werden. Als Aktoren für die Deformation kommen zahlreiche Prinzipien in Frage. Bezuglich der möglichen Grenzfrequenz, also der Ausdrucksgeschwindigkeit, zeigen allerdings Piezoaktoren die günstigsten Eigenschaften.

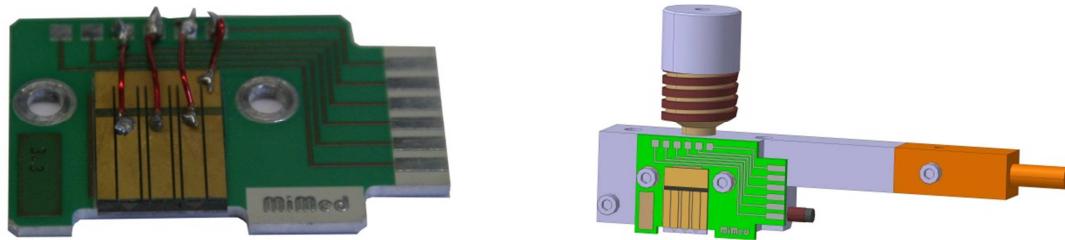


Bild 3: Piezomembrandruckkopf, wie er im Praktikum verwendet wird.

Auch der im Praktikum verwendete Druckkopf wird mit einem Piezoaktor angetrieben. Der Aktor ist dabei auf die passive Membran der Pumpkammer geklebt. Zusammen wirken die beiden Materialien ähnlich wie ein Bimetall. Das Piezoelement zieht sich bei der elektrischen Ansteuerung zusammen und drückt in die Kammer. Diese Bewegung bewirkt den Tropfenausstoß. Der Zeitpunkt, an dem die Membran wieder entspannt wird, liegt am günstigsten kurz vor der nächsten Aktion. Die Flüssigkeitssäule in der Düse kann auf diese Weise „Schwung“ holen. Die Tropfengeschwindigkeit und damit die Platziergenauigkeit der „Pixel“ wird dadurch stark erhöht.

Da die Verformungen des Piezoaktors auf dem Praktikumskopf im Bereich von wenigen Nanometern liegen, werden im Praktikum stellvertretend sog. Stapelaktoren vermessen. An ihnen wird das grundsätzliche Verhalten von Piezokeramiken untersucht. Zudem werden die sensorischen Eigenschaften der Piezos dargestellt.

2. Theorie der Piezoaktoren

2.1 Allgemeines

Das Phänomen des piezoelektrischen Verhaltens von bestimmten Stoffen wurde zum ersten Mal von Jaques und Pierre Curie beschrieben. Sie konnten als erste an einem Quarzkristall feststellen, dass ein Potential entsteht, wenn man den Kristall mechanisch deformiert. Zugrunde liegt hier eine Verschiebung der Ladungszentren. Auf Bild 4 ist ein Quarzkristall dargestellt. Das Bild rechts oben und die beiden unteren Bilder zeigen zweidimensionale Schematisierungen der eigentlich räumlichen Zusammenhänge.

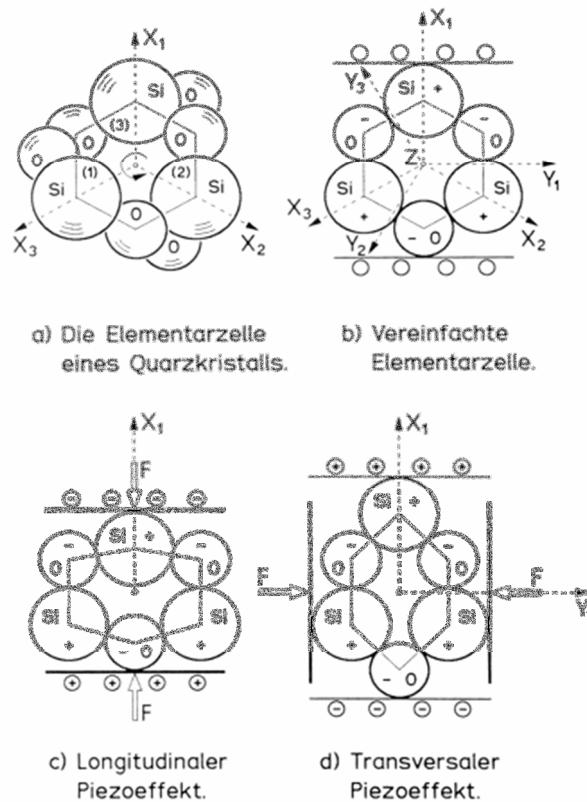


Bild 4: Quarz. Räumliche Darstellung (l. oben), Unbelastete Zelle (r. oben), Ladungsverschiebung durch verschiedene mechanische Spannungen (unten).

Wirkt auf den Kristall eine Kraft, wird er deformiert. Dabei verschieben sich die einzelnen Ladungen. Stellt man sich nun die Schwerpunkte der Einzelladungen vor, sieht man dass sich ein Potential gebildet hat. Dieses Potential kann von außen als Spannung abgegriffen werden. Der Piezokristall wirkt als Kraftsensor.

Vom inversen Piezoeffekt spricht man, wenn an die Keramik oder den Kristall eine Spannung angelegt wird. Dabei verschiebt sich wieder der Ladungsschwerpunkt. Damit wird der Kristall deformiert. Dieser Effekt lässt sich beim Aufbau von piezoelektrischen Aktoren nutzen.

Für praktische Anwendungen hat der Piezoeffekt bei Quarz eine geringe Bedeutung. Hierzu werden speziell entwickelte Keramiken eingesetzt, die einen um Größenordnungen ausgeprägteren Piezoeffekt aufweisen. Als Hauptvertreter dieser Gruppe haben sich Bariumtitanat und Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) durchgesetzt.

Die Elementarzelle eines derartigen Kristalls ist Bild 4 zu entnehmen. Das zentrale Atom der sogenannten Perovskit-Zelle ermöglicht den Effekt. Das zentrale Atom bildet nur in der Elementarzelle ein Symmetrieelement, wenn der Stoff über seine sog. Curie-Temperatur erhitzt wird (Siehe oben und analog zum Magnetfeld).

Fällt die Temperatur, so bildet die Elementarzelle keine volle Symmetrie mehr aus. Das zentrale Atom kann in sechs verschiedene Raumrichtungen ausweichen. Damit ergibt sich eine zufällige Polarisation der Elementarzellen. Würde man auf eine derartige Keramik Elektroden aufbringen, würde sich kein Effekt bemerkbar machen.

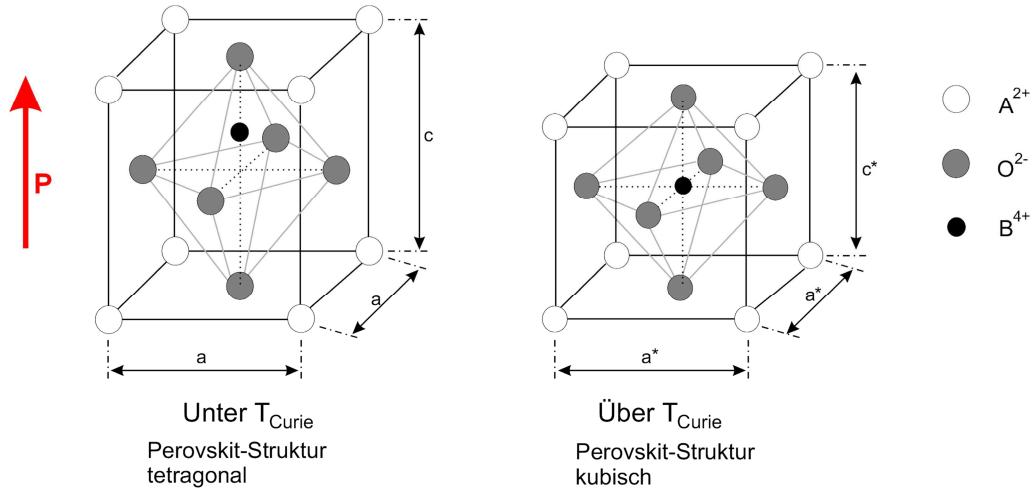
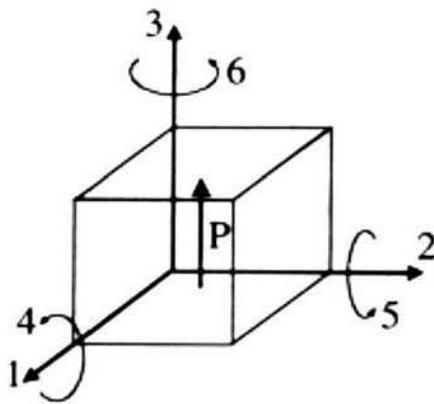


Bild 5: Blei-Zirkonat-Titanat. Die Elementarzelle wird bei Raumtemperatur durch das Zentralatom deformiert (links). Rechts: oberhalb der Curietemperatur findet das Atom wieder Platz (Zellengrößen nicht maßstäblich).

Wird die Keramik aber während des Abkühlens von einem elektrischen Feld durchflutet, so bildet sich bei der Polarisation eine Vorzugsrichtung aus und die Keramik kann später als Aktor genutzt werden. Der Effekt entsteht dadurch, dass nun eine Vorzugsrichtung der einzelnen Elementarzellen entstanden ist. Wird nach diesem sogenannten Polarisieren wieder ein Feld in Polarisationsrichtung angelegt, werden sämtliche Zentralatome in eine Richtung ausgelenkt. Der Kristall dehnt sich in der Feldrichtung und verkürzt sich senkrecht dazu. Ein weiterer Effekt kann beobachtet werden, wenn die Polarisationsrichtung und die Richtung des Betriebsfeldes senkrecht zueinander stehen. Der Kristall wird dann um einen gewissen Winkel deformiert. Der Effekt wird Schereffekt genannt. Der Piezoeffekt ist aufgrund seiner Abhängigkeit von der Kristallgeometrie stark richtungsabhängig, diese Abhängigkeit wird mit den Indizes i und j beschrieben. Die so genannten Bravais-Miller-Indizes stammen aus der Kristallographie und orientieren sich an ein kartesisches Koordinatensystem, in dem wie in Bild 6 (links) gezeigt, definitionsgemäß die X-Achse mit 1, die Y-Achse mit 2 und die Z-Achse mit 3 bezeichnet wird. Zusätzlich werden die Rotationen um die X-Achse mit 4, um die Y-Achse mit 5 und um die Z-Achse mit 6 bezeichnet. Wie in Bild 6 (rechts) dargestellt, werden je nach Polarisations- und Translationsrichtung verschiedene Teileffekte unterschieden und durch die Indizes markiert. Dabei orientiert sich der Polarisationsvektor definitionsgemäß in Richtung der positiven Z-Achse. Wenn i die Richtung des elektrischen Feldes angibt und j die der Auslenkung, ergeben sich folgende Indizes für die verschiedenen Teileffekte d_{ij} bzw. s_{ij} :

- 33 für den Längseffekt
- 31 für den Quereffekt
- 15 für den Schereffekt



	direkter Piezoeffekt (Kraftereinwirkung)	inverse Piezoeffekt (Spannungseinwirkung)
Längseffekt		
Quereffekt		
Scher-Effekt		

Bild 6: Darstellung der Bravais-Miller-Indizierung (links) und den dazugehörigen Auslenkungseffekten Abhängig von der Polarisationsrichtung P (rechts)

Dabei werden in der Technik häufig der d33- und der d31-Effekt genutzt.

Das Verhalten von angelegtem Feld und mechanischer Deformation ist nichtlinear. Dieser Umstand entsteht daraus, dass eine polykristalline Keramik unendlich viele Kristallorientierungen besitzt. Deshalb findet selbst im Betrieb immer noch eine Polarisierung statt, die den Effekt noch vergrößert. Sind aber alle Zentralatome orientiert tritt eine Sättigung auf.

Der Polarisations-Effekt bewirkt auch eine weitere wichtige Eigenschaft der Piezokeramiken: Das Hystereseverhalten. Ähnlich wie bei magnetischen Phänomenen (z. B. Magnetostriktion) geht bei Piezokeramik die Dehnung (oder Polarisierung) nachdem eine Feldstärke kleiner der Maximalfeldstärke eingestellt wurde nicht wieder vollständig zu ihrem Ausgangspunkt zurück.

Die Bild 7 zeigt die so genannte Hysteres- und die Schmetterlingskurve. Auf der Abbildung sind die wichtigsten Phasen für eine praktische Anwendung wiedergegeben.

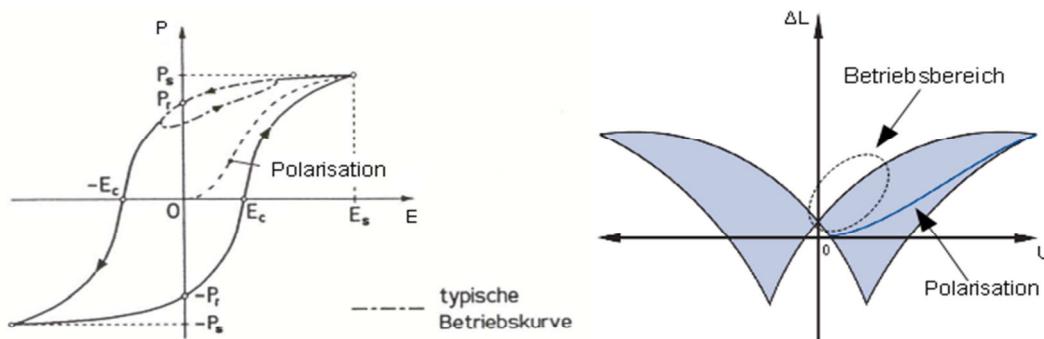


Bild 7: Hysterese- (links) und Schmetterlingskurve (rechts).

Der erste Schritt bei der Verwendung von Piezokeramiken ist die Polarisierung. Bei diesem Vorgang wird die Feldstärke bis in den Sättigungsbereich erhöht. Im Anschluss wird die Spannung auf 0 V abgesenkt (Anlieferungszustand). Im Betrieb wird dann die Feldstärke gemäß dem Anwendungsfall wieder erhöht (etwas niedriger als die Polarisationsfeldstärke). Beschränkend für die Höhe des Feldes ist die jeweilige Durchbruchsfeldstärke von Luft oder Keramik. Den kleineren Kennwert in Luft kann man bei der Polarisierung in einem Ölbad umgehen. Die Durchbruchsfeldstärke der Keramik begrenzt den Einsatz der Keramik rigoros. Die Nachpolarisation, die im Betriebsbereich stattfindet, ist auch für einen weiteren Effekt verantwortlich. Die Keramik weist ein deutliches Zeitverhalten auf. Das heißt, dass die Veränderung der Dehnung der Keramik nicht zu dem Zeitpunkt endet, an dem die Spannung einen konstanten Wert erreicht. Der Graph auf Bild 8 veranschaulicht diesen Prozess.

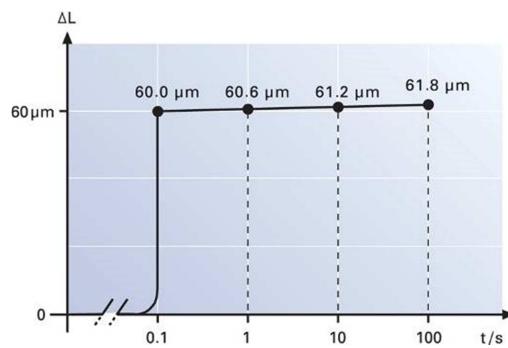


Bild 8: Kriechverhalten von Piezos.

Die zentralen Gleichungen, die das Verhalten einer Keramik im Kleinsignalbetrieb ($\Delta E \ll 0,5 \cdot E_{Max}$) darstellen, lauten wie folgt:

Der Ausdruck

$$\frac{\Delta l}{l} = \underbrace{s \cdot \Delta \sigma}_{\text{mechanischer Anteil}} + \underbrace{d \cdot \Delta E}_{\text{elektrischer Anteil}}$$

beschreibt die Verformung des Kristalls in guter Näherung. Der mechanische Anteil der Gleichung zeigt das Verhalten bei konstantem elektrischem Feld. Eine Änderung der mechanischen Spannung $\Delta \sigma$ bei konstantem Feld $\Delta E = 0$ führt zu einer dem Faktor $s = \frac{1}{E}$ (E hier für E-Modul) proportionalen Verformung des Aktors. Welches Potentialniveau am Piezo anliegt, spielt dabei keine Rolle. Der zweite Teil der Gleichung beschreibt den elektrischen Anteil der Dehnung. Auch hier ergibt sich wieder, unabhängig von der konstanten mechanischen Belastung d. h. $\Delta \sigma = 0$, eine proportionale Dehnung. Der Faktor d muss zusätzlich indiziert werden: d_{ij} . Hier steht i für die angelegte Feldrichtung. Der Index j beschreibt die Richtung der Verformung. Es treten immer mehrere Verformungen gleichzeitig auf, da der Piezoeffekt annähernd isochor ist. Diese Darstellung eignet sich besonders für Abschätzungen des Verhaltens von Aktoren.

Die Gleichung

$$D = \underbrace{d \cdot \Delta \sigma}_{\text{mechanischer Anteil}} + \underbrace{\varepsilon \cdot \Delta E}_{\text{Elektrischer Anteil}}$$

beschreibt die dielektrische Verschiebung. Auch gibt es wieder zwei Anteile, aus der sich die dielektrische Verschiebung zusammensetzt. Der mechanische Anteil ist hier besonders geeignet, um Berechnungen für Sensoren durchzuführen.

Die Tabelle 1 gibt für die Praxis wesentliche Kennwerte unterschiedlicher Materialien wieder (Richtwerte, Quarz nur zum Vergleich).

Tabelle 1: Kennwerte ausgewählter Materialien

Material	d33	d31	s33	s31	$\varepsilon_{T33} / \varepsilon_0$
Einheit	10^{-12} m/V 10^{-12} C/N	10^{-12} m/V 10^{-12} C/N	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	$10^{-12} \text{ m}^2/\text{N}$	
Bariumtitanat polarisiert	190	-78	9,5	-2,9	1700
Bariumtitanat	85,6	-34,6	15,7	-5,24	168
PZT	315	-135	16,8	-6,2	1450
Quarz	-2,3 (d11)	2,3 (d12)	12,77 (s11)	-1,79 (s12)	4,52 (s11)

Elektrisch verhält sich eine Piezokeramik wie ein Kondensator. Das heißt, dass bei Belastung Ladungen getrennt werden und wie beim Kondensator eine abgreifbare Spannung entsteht.

Die maximale Dehnung, die der Piezo als Aktor erreichen kann, ist durch die Gleichung für $\frac{\Delta l}{l}$ beschrieben. Setzt man die Dehnung zu Null, gibt der Ausdruck eine Formel für die Blockierkraft einer Piezokeramik wieder. Diese stellt für praktische Anwendungen eine weitere wichtige Kenngröße dar.

2.2 Vergrößerung des Hubs eines Piezoelements

Um den geringen Hub von Piezoaktoren technisch besser nutzen zu können, gibt es verschiedene Möglichkeiten, diesen stark zu vergrößern.

Die wichtigste besteht darin, ein Piezoelement nicht aus keramischen Vollmaterial aufzubauen, sondern einen großen Piezoaktor aus vielen, sehr dünnen Schichten zusammenzusetzen, die jeweils durch Elektroden getrennt sind. Dadurch wird die notwendige Ansteuerspannung stark herabgesetzt und die Auslenkung erreicht technisch sinnvoll nutzbare Dimensionen.

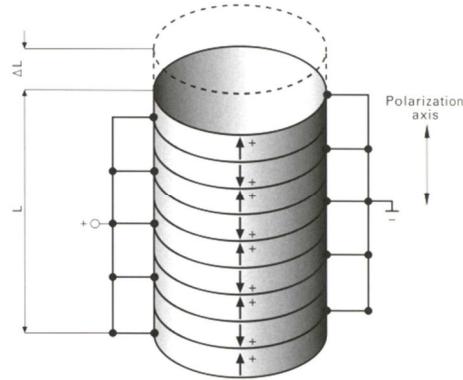


Bild 9: Prinzip eines Stapelaktors.

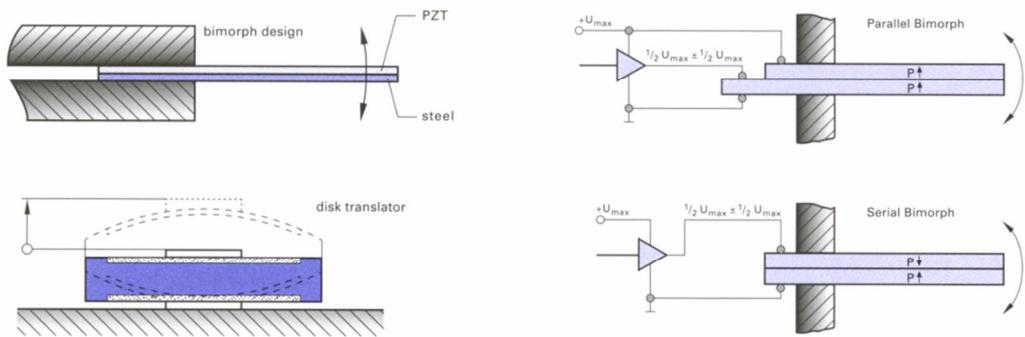


Bild 10: Bimorphe Anordnungen zweier Materialien..

Eine weitere Möglichkeit, große Verformungen zu erhalten, ist der Aufbau einer sogenannten mono- oder bimorphen Struktur. Dazu werden zwei Materialien miteinander verbunden. Eine oder beide Materialien sind dabei Piezomaterial. Der Effekt verhält sich analog zu einem Bimetall.

Durch Hebelgetriebe können ebenfalls die Hübe vergrößert bzw. übersetzt werden. Bedingt durch die Dimensionen müssen aber in den Gelenkpunkten Festkörpergelenke eingesetzt werden. Damit können dann spielfreie Strukturen aufgebaut werden. Bild 11 zeigt eine solche Festkörperstruktur und die Anwendung als Piezohebel.

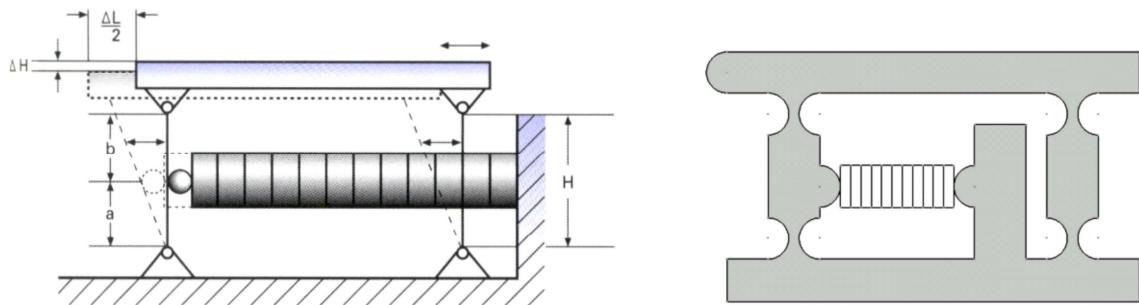


Bild 11: Festkörpergelenke mit Stapelaktoren. Schema (rechts), Blechschnitt (links).

3 Ausprägungen im Versuch

Im Versuch können auf Grund der geringen Dehnungen von Piezovollmaterial nur Wege von Aktoren vermessen werden, bei denen bereits Maßnahmen zur Wegvergrößerung getroffen worden sind. Hier kommt ein Stapelaktor des Typs AN0X zum Einsatz, der mit einer Feder (in Form eines Rohres) vorgespannt ist. Die Vorspannung spielt bei sehr schnellen Bewegungen eine Rolle. Sie schützt die Keramik (auf Zug empfindlich!) vor dynamisch erzeugten Zugspannungen beim Zusammenziehen des Aktors. In Bild 12 sind die Bestandteile des Piezostapels dargestellt.

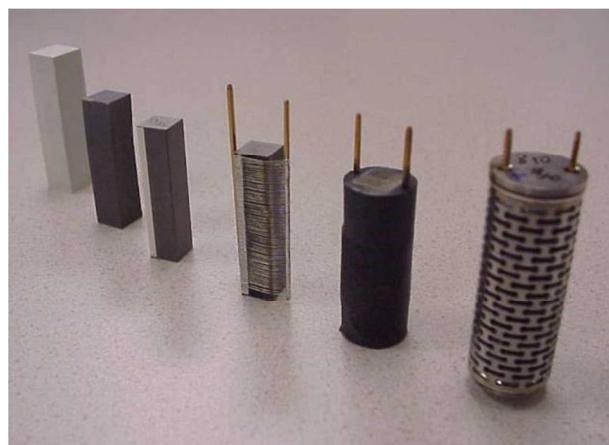


Bild 12: Baustufen eines Stapelaktors.

Die Tabelle 2 gibt wesentliche Daten dieses Stapelaktors wieder.

Tabelle 2: Kennwerte eines AN0X/8500b-Stapelaktors von EPCOS

Bezeichnung	AN0X/8500b EPCOS
Abmessungen Piezostapel	30x6,8x6,8 mm ³
Nennspannung	160 V
Kapazität	2,7 µF
Auslenkung bei 150V (ohne Gegenkraft)	40 µm
Innenwiderstand	>100 MΩ
Steifigkeit	40 N/µm

Zusätzlich soll im Versuch die Eignung von Piezokeramik als Sensor untersucht werden. Dazu wird Vollmaterial des Typs PIC 151 verwendet. Auf den Herstellerseiten können dazu die in Tabelle 3 dargestellten Daten gefunden werden.

Tabelle 3: Kennwerte für das Material PIC151

Materialtyp			PIC 151	PIC 255	PIC 155	PIC 153
Parameter						
Physikalische und dielektrische Eigenschaften						
Dichte	(g/cm ³)		7,80	7,80	7,80	7,60
Curie-Temperatur	T _C (°C)		250	350	345	185
relative Permittivitätszahl	In Polungsrichtung zur Polung	$\epsilon_{33}^T/\epsilon_0$	2400	1750	1450	4200
		$\epsilon_{11}^T/\epsilon_0$	1980	1650	1400	
dielektrischer Verlustfaktor	$\tan\delta$ (10 ⁻³)		20	20	20	30
Elektromechanische Eigenschaften						
Kopplungsfaktor	k _P		0,62	0,62	0,62	0,62
	k _T		0,53	0,47	0,48	
	k ₃₁		0,38	0,35	0,35	
	k ₃₃		0,69	0,69	0,69	
	k ₁₅		0,66			
piezoelektrische Ladungskonstante	d ₃₁		-210	-180	-165	
	d ₃₃ (10 ¹² C/N)		500	400	360	600
	d ₁₅		550			
piezoelektrische Spannungskonstante	g ₃₁ (10 ³ Vm/N)		-11,5	-11,3	-12,9	
	g ₃₃		22	25	27	16
Akustomechanische Eigenschaften						
Frequenzkonstante	N _P	(Hzm)	1950	2000	1960	1960
	N _I		1500	1420	1500	
	N ₃		1750		1780	
	N _E		1950	2000	1990	1960
elastische Nachgiebigkeitskonstante	S ₁₁ ^E (10 ⁻¹² m ² /N)		15,0	16,1	15,6	
	S ₃₃ ^E		19,0	20,7	19,7	
elastische Steifigkeitskonstante	C ₃₃ ^D (10 ¹⁰ N/m ²)		10,0		11,1	
mechanischer Gütefaktor	Q _M		100	80	80	50
Temperaturstabilität						
Temperaturkoeffizient von ϵ_{33}^T (im Bereich -20°C bis +125°C)	TK ϵ_{33} (x10 ⁻³ /K)		6	4	6	5
Zeitstabilität (relative Änderung des Parameters pro Zeitdekade in %)						
relative Dielektrizitätszahl	C _E	(%)		-1,0	-2,0	
Kopplungsfaktor	C _K			-1,0	-2,0	

4 Hausaufgaben:

1. Berechnen Sie die Ausdehnung in 3-Richtung einer quaderförmigen Keramik (1-Richtung: 15 mm, 2-Richtung 12 mm und 3-Richtung 3 mm) vom Typ PIC 151 (Tabelle 3) bei einer angelegten Spannung (kein Zahlenwert) in 3-Richtung! Welche Verformung ergibt sich in 1-Richtung bei gleichem Feld? Auf die Keramik soll in beiden Fällen keine mechanische Spannung wirken.

2. Erklären Sie anhand der Gleichung, warum ein Piezostapel die möglichen Dehnungen stark vergrößert (bei gleicher elektrischen Spannung im Vergleich mit Vollmaterial)!

$$\frac{\Delta l}{l} = \underbrace{s \cdot \Delta \sigma}_{\text{mechanischer Anteil}} + \underbrace{d \cdot \Delta E}_{\text{elektrischer Anteil}}$$

3. Ermitteln Sie die Blockierkraft des Piezostapelaktors (Tabelle 2) bei 150 V! Fertigen Sie dazu ein Diagramm an, bei dem der Piezohub über die Kraft aufgezeichnet ist. Zeichnen Sie zusätzlich Kennlinien für 75 V und 50 V ein!

4. Der Piezostapelaktor ist bei 150 V mit 500N belastet. Berechnen Sie die Längenänderung des Piezostapel, wenn die Spannung plötzlich um 50V verringert wird!

5. Die Entladung eines Kondensators über einen Widerstand (hier die Messeinrichtung mit einem Megaohm) gehorcht folgendem Gesetz:

$$U_C(t) = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{R \cdot C}}.$$

Berechnen Sie für die Kapazitäten C1=2,7 µF und C2=1 nF die Zeit, in der die Spannung am Kondensator auf 90 % seiner Anfangsspannung (Anfangsladung!) abgesunken ist!

5 Praktikumsaufgaben:

Im diesem Versuchsteil des Praktikums sollen die Eigenschaften von Piezokeramiken gezeigt werden. Dabei wird mit unbelasteten Piezostapeln begonnen, da diese bei niedrigen Spannungen messbare Verformungen zeigen. Diese Aktoren werden im Anschluss unter Belastung untersucht. Zusätzlich werden die Sensoreigenschaften von Piezokeramiken gezeigt. Dafür werden eine Vollkeramik sowie ein Piezostapel verwendet. Den Abschluss des Versuchs bildet die Diskussion von möglichen Einsatzgebieten von Piezoaktoren unter Betrachtung von Stärken und Schwächen sowie Kompensationsmöglichkeiten.

1. Vermessen von Piezostacks

Im Folgenden soll die Großsignalkennlinie des Piezoaktors mit der Bezeichnung AN0X bestimmt werden:

- a) Bringen Sie die Messuhr in Position, um den freistehenden Stapelaktor zu untersuchen und fixieren Sie sie. Schließen Sie den Piezo und das Digitalmultimeter an.

Nehmen Sie die Kennlinie für den Piezostapel nach folgender Anleitung auf:

Drehen Sie die Spannung am Piezo auf 0 V zurück. Nach jeder Spannungsänderung muss mindestens zwanzig Sekunden gewartet werden, bis der Messwert abgelesen wird (Warum ist das nötig?)

Ändern Sie die Spannung von 0 V bis 160 V in 20 V - Schritten und notieren Sie die Messwerte. Achten Sie dabei darauf, die Spannung immer nur in eine Richtung zu verändern.

Drehen Sie anschließend die Spannung in 20 V - Schritten wieder herunter (ausgehend von 160 V bis 0 V) und halten Sie die Messwerte fest.

Zeichnen Sie ein Diagramm, das das Hystereseverhalten wiedergibt. Benutzen Sie eine sinnvolle Skalierung. Charakterisieren Sie die Hysterese durch geeignete Kennzahlen.

- b) Um die Messung zu verbessern, soll nun ein Hebelgetriebe zum Einsatz kommen. Schließen Sie nun den Piezo unter dem Hebelgetriebe an das Steckbrett an. Nehmen Sie, wie oben beschrieben, die Piezoverformung für 20-V-Schritte in beiden Richtungen (Spannungsänderungen) auf. Beachten Sie dabei zusätzlich Folgendes: Die Werte müssen um die Getriebeübersetzung korrigiert werden (Rückrechnen auf die Piezoverformung) Tragen Sie die Daten in das gleiche Diagramm ein wie bei Versuch 1a). Interpretieren Sie das Diagramm!

2. Piezoaktoren unter Belastung

Im Folgenden soll der Fall untersucht werden, dass sich die Belastung des Piezos bei gleichbleibendem Feld verändert

- a) Stellen Sie eine Spannung von 20 V am Piezo ein. Belasten Sie den Piezo mit jeweils 20, 40, 60, 80 und 100 N. Tragen Sie die Verformungen in ein Diagramm ein. Messen Sie danach in 20 N –Schritten von 100 N abwärts die Verformungen und tragen sie diese Werte wieder in das Diagramm ein. Interpretieren Sie die Ergebnisse.

- b) Nehmen Sie nach obiger Messung auch für 40, 60, 80, 100 V die Verformungen durch die Belastungen 20, 40, 60, 80 und 100 N auf. Tragen Sie alle Daten in einem separaten Diagramm zusammen und zeichnen Sie Linien mit konstanter Spannung ein. Achten Sie dabei auf einen sinnvollen Nullpunkt für die Verformungen. Entsprechen die extrapolierten Kennwerte: *Dehnung unbelastet bei 150 V* und *Blockierkraft* Ihren Erwartungen?

3 Piezokeramik als Sensor

Im folgenden Versuch soll die Eignung von Piezokeramiken als Sensoren untersucht werden. Hierzu wird der direkte Piezoeffekt genutzt.

- a) Stecken Sie den Piezostapelaktor aus Versuch Nr. 2 an das Steckbrett. Verbinden Sie die Klemmen mit dem Oszilloskop. Berühren Sie den Stapelaktor mit den Fingern und betrachten Sie eine Minute lang den Spannungsverlauf. Welche Erklärungen kann es für dieses Phänomen geben?

- b) Lassen Sie den Stapelaktor auf Raumtemperatur abkühlen! Nehmen Sie während dessen das Piezovollmaterial und stellen es unter die Belastungseinrichtung. Belasten Sie das Material und beobachten Sie den Spannungsverlauf. Führen Sie den Vorgang mehrfach durch. Welche Beobachtungen können Sie dabei machen?

- c) Stellen Sie nun wieder den Stapelaktor unter die Belastungseinrichtung. Belasten Sie mit 50 N. Beobachten Sie drei Minuten den Spannungsverlauf. Welche Beobachtung machen Sie und was bedeutet das für eine statische Spannungsmessung?

- d) Führen Sie den gleichen Versuch (3c) nun mit dem Piezovollmaterial durch. Welche Gemeinsamkeiten und Unterschiede können Sie beobachten? Finden Sie eine Erklärung hierfür.

6 Literatur:

- Vorlesungsskriptum „Mikrotechnische Sensoren und Aktoren“, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Prof. T. Lüth, 2013, TUM München
- Vorlesungsskriptum „Mechatronische Gerätetechnik“, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Prof. T. Lüth, 2013, TUM München
- „Piezofibel“, Piezosystem Jena GmbH:
http://www.piezosystem.de/piezo_pedia/piezofibel/
- http://www.physikinstrumente.com/en/pdf_extra/2009_PI_Piezo_University_Designing_with_Piezo_Actuators_Tutorial.pdf
- http://www.physikinstrumente.com/en/products/piezo_tutorial.php
- www.picermatics.de
- www.efunda.com

Beschreibung zu Versuch Nr. 2:

Ansteuerung einer kapazitiven Last

Johannes Rucha, Oliver Keßling überarbeitet von Martin Seidl, Wolfgang Büscher

1. Einordnung

Der Praktikumsdruckkopf wird durch einen Piezoaktor angetrieben. Dieser verhält sich im Wesentlichen wie ein Kondensator. Um den Druckkopf Tropfenfolgen mit hoher Frequenz erzeugen zu lassen, muss die Piezokeramik schnell zwischen Betriebsspannung und Masse hin- und hergeschalten werden. Diese Schaltvorgänge werden mit Transistoren realisiert. Im Praktikum sollen zuerst die Grundlagen erarbeitet werden. Dazu werden wichtige Grundgrößen vermessen. In den weiterführenden Fragen des Versuchsteils wird ein Tiefsetzsteller behandelt. Dieser stellt ein besonders häufig verwendetes Bauteil dar, da mit ihm Spannungen auf sehr verlustarme Weise reduziert werden können und damit der Aufgabe angepasst werden können.

2. Theorie

Als Mechatronik bezeichnet man die integrierte Betrachtung eines Systems in Mechanik, Elektronik und Software. Die Elektronik stellt damit das Bindeglied zwischen Steuerung und eigentlicher Maschine dar. Dabei stellt sich immer wieder die Aufgabe, große Lasten wie etwa Motoren, Scheinwerfer oder ähnliches mit Leistung bis in den kW-Bereich durch z.B. Mikrocontroller zu steuern. Das Problem hierbei ist, dass die steuernden Elemente, wie Mikrocontroller oder Logikgatter, nicht in der Lage sind, nennenswerte Ströme zu liefern. Diese belaufen sich üblicherweise auf wenige Milliampere. Zugleich sind die verfügbaren Spannungen auf die Betriebsspannung der Logikschaltkreise begrenzt (typisch $3V < V_{cc} < 15V$). Die Leistungen die sich dadurch ergeben, reichen kaum um die Spule in einem Relais zu betreiben. Es sind daher unbedingt verstärkende (aktive) Elemente notwendig. Die wichtigste Bauteilgruppe innerhalb dieser „Verstärker“ stellt der Transistor dar.

Die ersten Patente zum Prinzip des Transistors wurden von Julius Edgar Lilienfeld in Deutschland 1928 angemeldet. Bis zur endgültigen Fertigung eines Transistors vergingen jedoch noch einige Jahre: Die Erfindung des ersten funktionierenden Transistors wird auf Dezember 1947 in den Bell Laboratories datiert. Beteiligt an der Erfindung waren William B. Shockley, John Bardeen und Walter Brattain, die 1956 den Nobelpreis dafür erhielten. In den 1950er Jahren gab es einen Wettlauf zwischen Röhre und Transistor, in dessen Verlauf die Chancen des Transistors gelegentlich eher skeptisch beurteilt wurden.

Zuerst wurden Transistoren aus Germanium hergestellt und ähnlich wie Röhren in winzige Glasrörchen eingeschmolzen. Das Germanium wurde später durch Silizium ersetzt. Es werden auch Mischmaterialien benutzt, diese sind aber seltener vertreten.

Wenn man alle Transistoren in sämtlichen bislang hergestellten Schaltkreisen (Arbeitsspeicher, Prozessoren usw.) zusammenzählt, ist der Transistor inzwischen diejenige

technische Funktionseinheit, die von der Menschheit in den höchsten Gesamtstückzahlen produziert wurde. Laut Gordon Moore, dem Mitbegründer der Firma Intel, wurde allein im Jahr 2002 eine Trillion produziert.

Ein einzelner Core i7 Prozessor der dritten Generation (Ivy-Bridge) aus dem Jahr 2012 enthält bereits 1,4 Milliarden Transistoren, ein Grafikprozessor vom Typ AMD R1000 besteht aus 4,3 Milliarden Transistoren.

Diskrete (daher nicht in ICs integrierte) Transistoren lassen sich entsprechend ihrer Bauart und ihrer Eignung in verschiedene Gruppen und Klassen einteilen.

2.1 Wichtige Transistorbauformen

Bipolartransistoren sind die „klassische“ Bauform von Transistoren. Ihr interner Aufbau ist in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Allen Bipolartransistoren ist gemeinsam, dass ein Basisstrom I_b den Kollektorstrom I_c steuert. Im linearen Bereich folgt I_c dem Zusammenhang:

$$I_c = \beta \cdot I_b$$

Der Faktor β wird dabei als Stromverstärkung bezeichnet. Typische Werte sind: $20 < \beta < 500$.

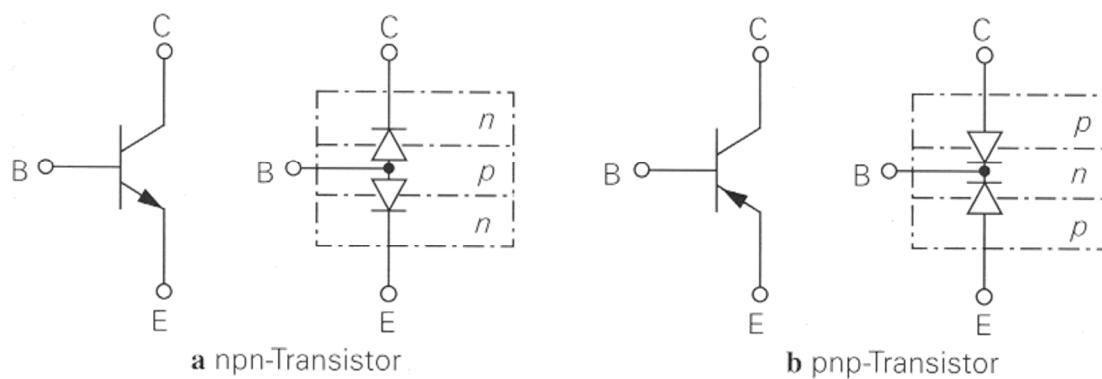


Bild 1: Schaltzeichen und Diodenersatzschaltbilder

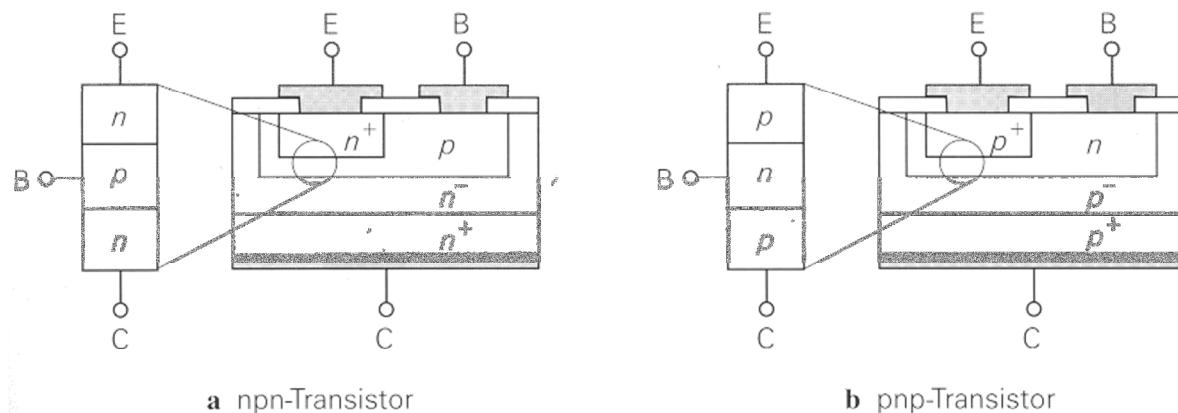


Bild 2: Aufbau eines Halbleiterplättchens mit Epitaxial-Einzeltransistor.

Soll ein Verbraucher „nur“ ganz ein oder ganz aus geschaltet werden, wird in die Basis soviel Strom eingeleitet, dass I_C nicht mehr durch den Transistor selbst sondern durch den Verbraucher (im Allgemeinen die externe Beschaltung) begrenzt wird. Man spricht dann vom Sättigungsbereich in dem der Transistor betrieben wird. Der hierfür notwendige Basisstrom kann wie folgt abgeschätzt werden:

$$I_B > 2 \cdot \frac{1}{\beta} \cdot I_C$$

Die Basis wird also, bildlich gesprochen, mit Strom „übersättigt“. Die Spannung, die dabei an der Basis gegen den Emitter anliegen muss, dass dieser Strom fließt, beträgt ca. 0,7 V bei Siliziumtransistoren. Daraus ergeben sich, abhängig vom eingesetzten Transistor, zum Teil erhebliche Steuerleistungen. Darlington-Transistoren („Kaskadierte Bipolartransistoren“) bieten hier gewisse Vorteile, die jedoch an anderer Stelle (höhere Sättigungsspannung) erkauft werden müssen.

Feldeffekttransistoren (unipolare Transistoren)

Historisch gesehen ist das Funktionsprinzip des MOSFETs wesentlich länger bekannt als das des Bipolartransistors. Die ersten Patentanmeldungen stammen aus den Jahren 1926 (Julius Edgar Lilienfeld) und 1934 (Oskar Heil). Die ersten MOSFETs wurden allerdings erst 1960 gefertigt, als mit dem Silizium/Siliziumdioxid ein Materialsystem zur Verfügung stand, mit dem sich eine reproduzierbar gute Halbleiter-Isolator-Grenzfläche herstellen ließ. Damit verbunden war die Abkehr vom Germanium als Basismaterial und steigende Anforderungen an die Fertigungsbedingungen (Reinräume, strenge Temperaturregime).

Ein großer Vorteil von FETs gegenüber Bipolartransistoren ist ihr positiver Temperaturkoeffizient im ohmschen Bereich (siehe unten) dadurch wird es möglich bei Bedarf mehrere FETs parallel zu schalten (Gate auf Gate, Source auf Source,...) um einen Transistor größerer Leistungsfähigkeit zu erhalten.

Wie auch beim Bipolartransistor gibt es zwei komplementäre Bauformen: n-Kanal-MOSFET und p-Kanal-MOSFET. Diese können jeweils noch in selbstsperrende (Anreicherungstyp) und selbstleitende (Verarmungstyp) Bauformen unterschieden werden.

Außerdem gibt es auch noch den sogenannten JFET (Unijunctiontransistor), bei dem ein pn-Übergang in Sperrrichtung die Isolation der Gateelektrode zum Kanal übernimmt.

Der wichtigste Unterschied zwischen Anreicherungs- und Verarmungstyp ist das Vorzeichen der sog. Threshold Spannung (Threshold = Schwellenwert): Die Gate-Source-Spannung ab der der Transistor leitfähig wird. In diesem Praktikum soll insbesondere die Anwendung der wichtigsten Gruppe dieser Transistoren, der n-Kanal-MOSFET in seiner selbstsperrenden Variante dargestellt werden.

MOSFET-Transistoren, wie der hier gezeigte n-Kanal Anreicherungstyp, werden mit den üblichen Halbleitertechniken wie Lithographie und verschiedenen Aufbau und Ätztechniken hergestellt. Auf Bild 4 ist der Schnitt durch einen auf einem p-Silizium Wafer aufgebrachten Transistor gezeigt. Bei Power-MOSFETs wird der Bulk-Anschluss (=Substrat) üblicherweise direkt im Gehäuse mit Source verbunden.

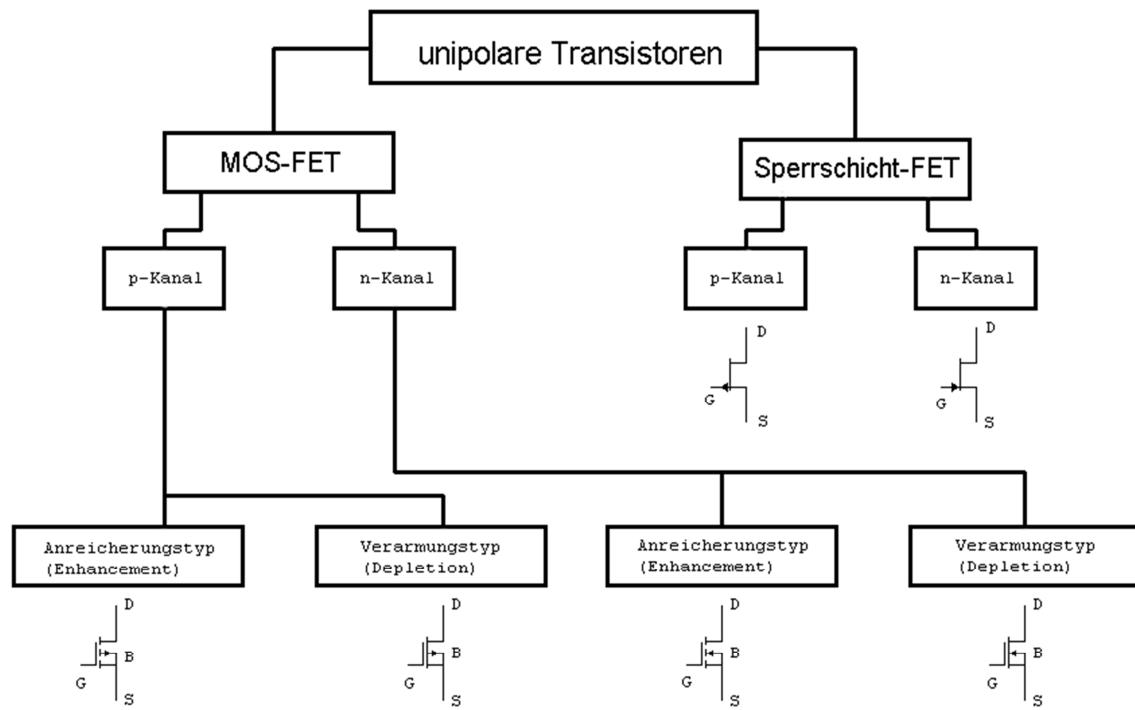


Bild 3: Typen von Transistoren, sehr häufig wird der MOSFET, n-Kanal, Anreicherungstyp eingesetzt.

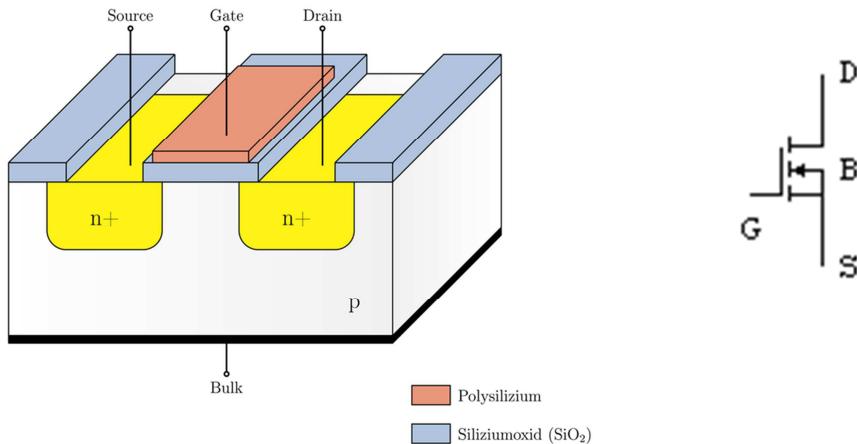


Bild 4: MOSFET-Transistor im Schnittbild und als Schaltsymbol

Ein wichtiges Schaubild für MOSFET-Transistoren ist das Kennlinienfeld des Drainstromes über der Drain-Source-Spannung. Aus diesem Kennfeld kann man erkennen, ob der Transistor für die vorgegebene Aufgabe geeignet ist. Das bei Bipolartransistoren übliche Schaubild der Eingangsdiode entfällt bei MOSFET-Transistoren. Die Gateelektrode wirkt zusammen mit Source wie eine einfache Kapazität.

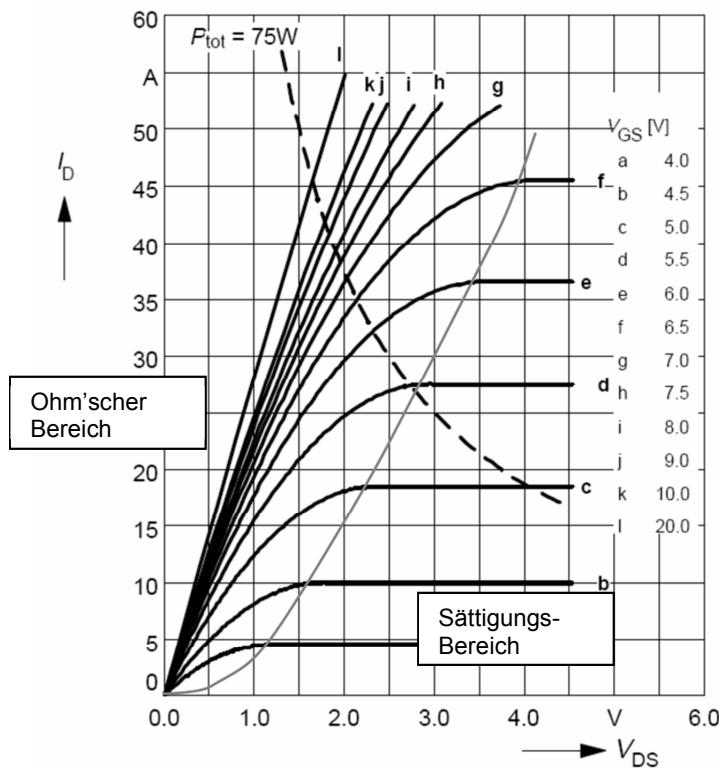


Bild 5: Typisches Kennlinienfeld eines MOSFET-Transistors

Das Übertragungsverhalten eines MOSFET lässt sich wie auch beim Bipolartransistor in 3 Bereiche aufteilen: Ohm'scher, Sperr- und Sättigungsbereich.

2.2 Betriebsbereiche

- **Sperrbereich:**

Der Sperrbereich ist der Bereich in dem der Transistor keinen Strom leitet. Bedingung für diesen Fall ist:

$$U_{GS} < U_{th} .$$

Mit U_{th} wird also diejenige Spannung bezeichnet, bei der der Transistor leitend wird. Bei einem n-Kanal Anreicherungstyp (wie in unserem Praktikum) ist diese Spannung positiv (normalerweise $1V < U_{th} < 5V$). Bei einer Gate-Source-Spannung von $U_{GS} = 0V$ ist der Transistor also im Sperrbereich. Daher auch das Attribut „selbstsperrend“. (Der Verarmungstyp hat eine negative Thresholdspannung, ist daher bei 0V U_{GS} schon leitfähig und wird daher als selbstleitend bezeichnet.)

- **Ohm'scher Bereich**

Der Ohm'sche Bereich, auch Trioden Gebiet genannt, ist im Kennlinienfeld links von der grauen Parabel definiert. Der Transistor zeigt in diesem Bereich ein resistives Verhalten. Die

Kennlinien (für U_{GS} = Konst.) sind wieder Parabeln die allerdings im Bereich des Ursprungs sehr linear verlaufen. Für moderate Ströme und ausreichendes U_{GS} kann also der Drain-Source-Widerstand als ohmsch bezeichnet werden. Dabei ist zu beachten, dass er weiterhin durch die Größe von U_{GS} gesteuert werden kann.

- **Sättigungsbereich:**

Der Sättigungsbereich ist gegeben wenn $U_{DS} \geq U_{GS} - U_{th}$ und $U_{GS} > U_{th}$ ist. Für den Drain-Strom ergibt sich folgende quadratische Kennlinie:

$$I_D = \frac{K}{2} \cdot (U_{GS} - U_{th})^2.$$

Der sog. Steilheits- oder auch Transkonduktanzkoeffizient K lässt sich zwar theoretisch aus den Halbleitermaterialparametern und der Transistorgeometrie errechnen, diese sind aber normalerweise nicht angegeben. In der Praxis wird nur die Parabel graphisch im Datenblatt abgebildet und Steigung der Kurve bei einem bestimmten Drainstrom linearisiert angegeben und meistens mit Transkonduktanz bezeichnet.

Typ. transfer characteristics $I_D = f(V_{GS})$

parameter: $t_p = 80 \mu\text{s}$

$V_{DS} \geq 2 \times I_D \times R_{DS(on)max}$

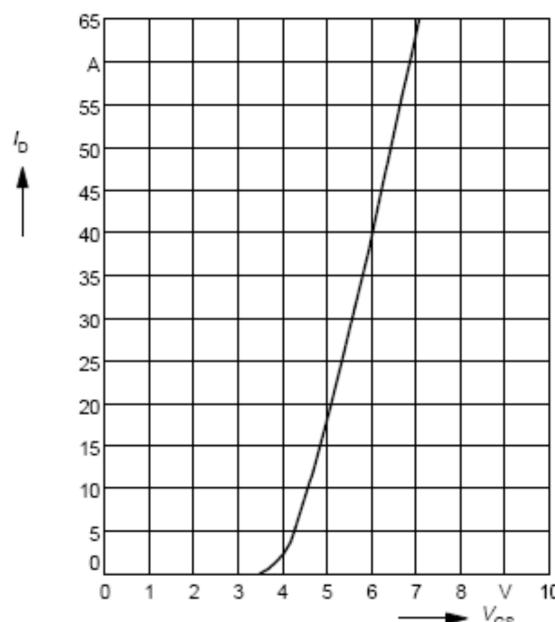


Bild 6: Kennlinie zur Transkonduktanz.

Die Kurve gibt vor allem an, welchen Strom der Transistor abhängig von der U_{GS} überhaupt leiten kann. Im Kennlinienfeld entspricht dies dem Teil rechts der grauen Parabel (die waagerechten Kennlinienbereiche)

2.3 Wichtige Parameter zur Auswahl von MOSFETs

Die wichtigsten Parameter zu einem Transistor finden sich meist direkt auf der 1. oder 2. Seite des Datenblattes. Die Datenblätter können im allg. schnell über beispielsweise „Google“ im Internet unter Eingabe des Bauteilnamens gefunden werden.

- $R_{DS(on)}$

Werden MOSFETs als Schalter verwendet so werden sie im Ohmschen Bereich betrieben. Der minimale Durchgangswiderstand, oder auch Einschaltwiderstand wird als $R_{DS(on)}$ bezeichnet. Mit dem $R_{DS(on)}$ kann errechnet werden, welche Verlustleistung am Transistor im Betrieb abfallen wird.

- U_{DS}

Gibt die maximal zulässige Sperrspannung zwischen Drain und Source an. Diese Spannung sollte im allgemeinen mind. 50% über der vorgesehenen Betriebsspannung liegen.

- U_{GS}

Spannungsfestigkeit des Gate-Source-Isolationsmaterials. Größere Spannungen zerstören diese Schicht und damit den Transistor. Wichtig für die Auslegung der Treiberschaltung.

- I_D

In den Datenblättern werden an verschiedener Stelle Drainströme angegeben. Diese beziehen sich jeweils auf bestimmte Zusatzbedingungen (Peak pulsed, bei Temp.= 25°C, 100°C, 125°C...) Auch der Wert der als „continuous I_D “ angegeben wird setzt eine ausreichende Kühlung des Transistors voraus. Dieser Wert kann aber schon mal als grobe Orientierung bei der Auswahl dienen.

- U_{th}

Steht meist erst auf der zweiten Seite und wird meist mit minimal, typisch und maximal Wert angegeben.

- **Package**

Obwohl die Gehäuse standardisiert sind wird meist auf den letzten Seiten des Datenblattes noch eine Maßzeichnung des verwendeten Gehäuses abgedruckt. Es gibt eine große Auswahl an Gehäusen für Transistoren die für die verschiedenen Einsatzzwecke optimiert sind: kleine, große, flache,... Sie unterscheiden sich (im Bereich der Powertransistoren) vor allem in der Verlustleistung die der Transistor darin an die Umgebung abgeben kann und ob ein Kühlkörper angeschlossen werden kann. Besonders wichtig ist auch die Anschlussbelegung des einzelnen Transistors, da diese nicht einheitlich ist. So ist nicht immer das Gate am selben Anschlussbeinchen.

Häufig verwendet wird für Power MOSFETs das Gehäuse TO220 das auch in unserem Praktikum zum Einsatz kommt.

- P_{tot} :

Bezieht sich wieder auf eine bestimmte Kühlung (hier: besonders gute Kühlung) und ist daher nicht besonders relevant. Wichtiger ist:

- **Operating Temperature:**

In welchem Temperaturbereich kann der FET betrieben werden. Die Angabe bezieht sich immer auf den Chip selbst. Die für unseren Versuch wichtige obere Temperatur liegt bei MOSFET's im Allgemeinen bei 125°C bis 150°C.

- **Thermal resistance**

Der gesamte Wärmewiderstand R_{thJA} eines Transistors und seiner Kühlung besteht aus einer Reihenschaltung folgender Teilwiderstände:

R_{thJC} : Wärmewiderstand zwischen aktivem Bereich des Chips (Junction) und der Gehäuse-Außenfläche (Case)

R_{thCS} : Wärmewiderstand zwischen der Gehäuse-Außenfläche (Case) und dem Kühlkörper (Sink). Zur besseren Wärmeleitung wird hier oft mit Wärmeleitpaste oder Wärmeleitpads gearbeitet.

R_{thSA} : Wärmewiderstand zwischen dem Kühlkörper (Sink) und der Umgebung (Ambient)

$$\vartheta_{chip} = \vartheta_{umgebung} + (R_{thJC} + R_{thCS} + R_{thSA}) \bullet P_{tot} ;$$

Diese Wärmewiderstände sind extrem abhängig von der Einbaulage und anderen Einflussfaktoren. Die Berechnung der Chiptemperatur ist mit dieser einfachen Methode nicht besondere genau. Es ist daher ratsam eine entsprechend vorsichtige Auslegung zu wählen. (genauer wäre z.B. eine FEM-Simulation)

In verschiedenen Anwendungen kann es nötig werden, noch eine Vielzahl anderer Parameter zu überprüfen, für „normale“ einfache Schaltaufgaben reichen die hier angesprochenen Werte aus.

2.4 Vorgehen bei der Auswahl von MOSFET-Transistoren

Bei der Suche nach einem Transistor geht man im allgemeinem so vor:

- Bestimmen der benötigten Sperrspannung
- Bestimmen der Stromtragfähigkeit
- Kataloge wälzen in denen zu jedem Typ die oben genannten Werte angegeben sind (Gehäusebauform beachten)
- Datenblätter der gefundenen Typen suchen und restlichen Parameter überprüfen.

3. Ausprägung im Versuch

Im Praktikumsversuch werden Transistoren in verschiedenen Schaltungen betrachtet. Sie werden dazu zumeist voll durchgesteuert eingesetzt. Damit können Verluste im Vergleich zur Beschaltung mit Widerständen gesenkt werden.

Tiefsetzsteller

Ein Tiefsetzsteller dient dazu, die Spannung am Bauteil beziehungsweise den Strom durch ein Bauteil zu begrenzen. Klassischerweise wird eine solche Aufgabe durch einen vorgesetzten Widerstand gelöst. Bild 7 zeigt eine solche Anordnung. Der Widerstand, der den Strom begrenzen soll, wird dabei vom gleichen Strom wie das Bauteil durchflossen.

Damit ergibt sich bei großen Strömen eine erhebliche Verlustleistung, die den Gesamtwirkungsgrad der Anordnung stark herabsetzt.

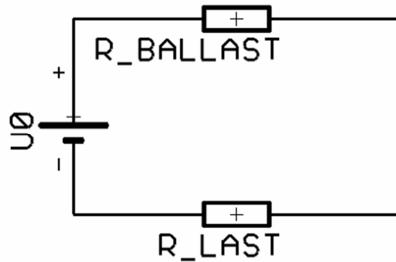


Bild 7: Ballastwiderstand zur Strombegrenzung in der Last

Um die Verluste zu reduzieren wird folgende Methode angewandt. Mit einem Schalter wird der Strom in der Last periodisch an- und abgeschaltet. Dies geschieht so, dass die über die Zeit integrierte mittlere Leistung an der Last dem gewünschten Wert entspricht. Dieser wird durch das Verhältnis der Ein- und Ausschaltzeiten bestimmt. Das Verfahren wird Pulsweitenmodulation genannt. Eine minimale Tiefsetzstellerschaltung ist in Bild 8 gezeigt:

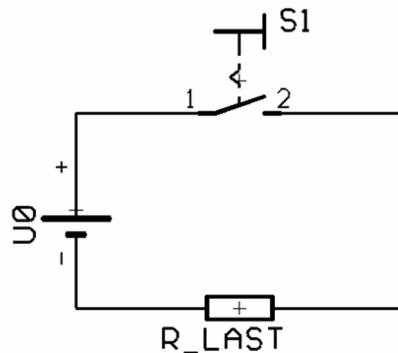


Bild 8: Tiefsetzsteller mit Schalter

Der Schalter wird in der realen Schaltung durch einen Transistor ersetzt. Mit diesem können Ströme bis weit über den MHz-Bereich unterbrochen werden. Stört die Welligkeit der Spannung an der Last kann die Spannung zusätzlich mit einem Kondensator geglättet werden.

Diese Schaltung wird beispielsweise in den Schrittmotortreiberbausteinen verwendet, die im Praktikum zum Einsatz kommen. Sie dient hier im Stromregelkreis für den Schrittmotorstrangstrom als Stellglied. In diesem wird die Strominformation über einen Messwiderstand zurückgekoppelt und der Regelkreis passt die Strangspannung mit dem Tiefsetzsteller an.

Brückenschaltungen

Viele Anwendungen erfordern es, dass der Verbraucher nicht nur von der Spannungsquelle getrennt wird. So ist es zum Beispiel bei Piezoaktoren notwendig, sie nach dem Aufladen wieder definiert zu entladen. Dazu muss die Klemme, die zum Beladen auf dem Potential der

Betriebsspannung war, auf das Potential der zweiten Klemme des Piezos gezogen werden. Über Be- und Entladewiderstände können definierte Zeitkonstanten erzielt werden.

Der obere Transistor solcher Brückenschaltungen spielt eine besondere Rolle. Bei seiner Ansteuerung wird normalerweise ein Potential von wenigen Volt benutzt die sich auf die Masse beziehen. Die Source-Spannung des Transistors ist aber je nach Zustand der Schaltung veränderlich. Damit kann mit der Standardansteuerung kein definiertes Potential gegenüber Source aufgebaut werden. Der sogenannte DC-DC-Wandler und die Bootstrap-Schaltung sind Möglichkeiten ein „sauberes“ Bezugspotential für den oberen Transistor bereitzustellen.

Bild 9 zeigt die Idee einer Bootstrap-Schaltung: Ist der Piezo ungeladen, so liegt der Source-Anschluss von T2 auf Potential der Masse. Der Kondensator C kann sich nun über die Diode auf $V_{cc}=12V$ aufladen. Ist der Piezo jedoch geladen, so liegt der Source-Anschluss nicht mehr auf Masse, sondern auf einem höheren Potential. Da der Kondensator jedoch voll geladen ist und sich nicht entladen kann (die Diode verhindert dies), liegen beim Schließen des Schalters S die kompletten 12V zwischen Gate- und Source-Anschluss. Der Transistor kann voll durchgesteuert werden.

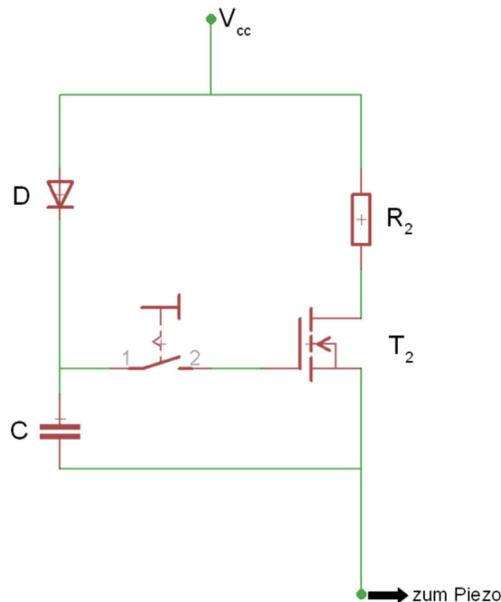


Bild 9: Funktionsprinzip einer Bootstrap-Schaltung

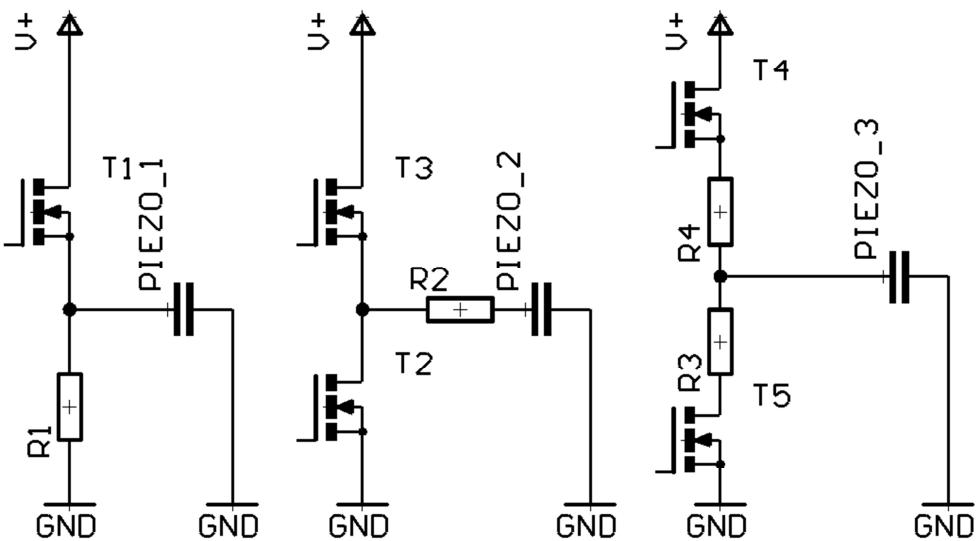


Bild 10: Drei mögliche Schaltungen zur Ladung und Entladung von Piezokeramiken

Will man darüber hinausgehend den Piezo mit zwei verschiedenen Polungen aus einer Spannungsquelle versorgen, muss man eine Vollbrückenschaltung aufbauen. Hier kommen als Schalter 4 Transistoren zum Einsatz der Strom der in die Last fließt kann durch die Ansteuerung der Transistoren umgeschaltet werden. Auch hier können die Be- und Entladezeiten durch Widerstände eingestellt werden (siehe 1).

Diese Schaltung wird weniger häufig bei Piezokeramiken eingesetzt als bei elektromagnetischen Aktoren mit Spulen, wie z. B. Schrittmotoren. Bei der sogenannten bipolaren Ansteuerung von Schrittmotoren mit zwei Wicklungen kommen zwei solcher Vollbrücken zum Einsatz (Siehe Praktikumsversuch über Motoren)

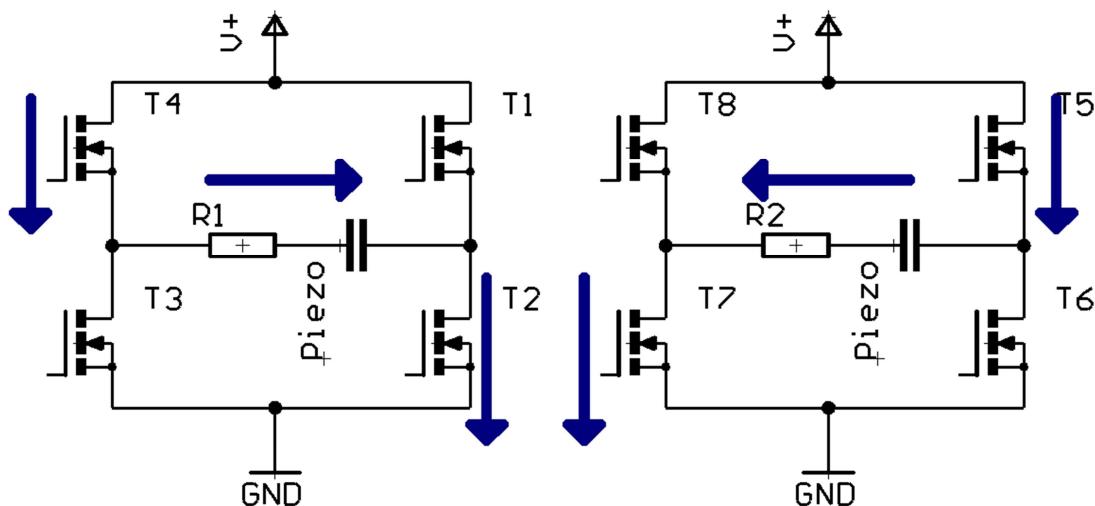
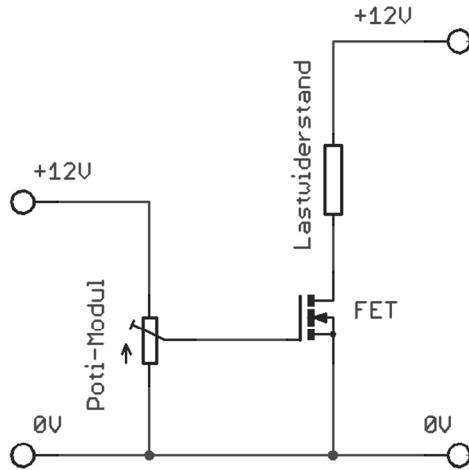


Bild 11: Vollbrückenschaltungen mit den jeweiligen Strömen zu den Piezos

4. Hausaufgaben

Für eine Schaltung, ähnlich der in Versuch 1, soll ein Transistor ausgewählt werden. ($P_{Lastwiderstand} = 100 \text{ W}$)

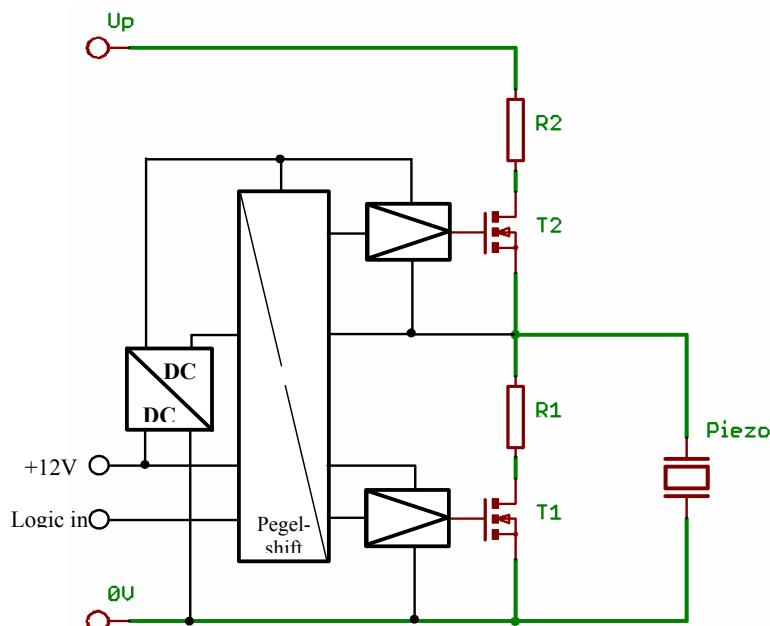


1. Welchen maximalen Betriebsstrom muss der Transistor tragen können?
2. Welche Sperrspannung sollte der Transistor mindestens aufweisen?
3. Wie groß darf der Drain-Source-On-Widerstand maximal sein, damit im voll durchgeschalteten Betrieb ($P_{Lastwiderstand} = 100 \text{ W}$) die Verlustleistung am Transistor 1 W nicht übersteigt?
4. Wählen Sie einen Transistor aus dem Angebot eines Elektronikversands aus (z. B. Farnell oder Conrad)! Farnell eignet sich hierbei für die Recherche am besten, da man einzelne technische Daten in einem Suchraster eintragen kann. Der Transistor muss folgende Eigenschaften aufweisen:
 - Er muss den Belastungen, die in Aufgaben 1-3 errechnet wurden, standhalten.
 - Er muss ein Gehäuse vom Typ TO220 besitzen.
 - Die Anschlussbelegung muss (von oben betrachtet, von links nach rechts) Gate Drain Source lauten.
 - Die maximale Gate-Source-Spannung muss mindestens 20 V betragen.
 Drucken Sie das Datenblatt aus und legen Sie es Ihrer Hausaufgabe bei.
5. Welchen Wärmewiderstand R_{thSA} muss der Kühlkörper besitzen, damit bei Raumtemperatur und einer Verlustleistung am FET von 13 W eine Chiptemperatur von 125°C nicht überschritten wird (bezogen auf den von Ihnen ausgewählten Transistor!)?

Aufgaben Teil 2:

Piezoaktoren, wie sie im Praktikumsdruckkopf verwendet werden, verhalten sich annähernd wie eine kapazitive Last. Zur Ansteuerung soll eine Transistorhalbbrücke wie in der unten

abgebildeten Schaltung verwendet werden. Diese basiert auf der Schaltung aus dem ersten Hausaufgabenteil. Durch das Schalten der Transistoren T1 und T2 und die jeweils einem Transistor zugeordneten Vorwiderstände R1 und R2 kann ein Anschluss der Kapazität abwechselnd auf die Potentiale U_p und GND gebracht, und diese somit geladen und entladen werden.



Prinzipschaltplan für den Schaltverstärker (Transistorhalbbrücke)

Es gelten folgende Werte:

$$U_p = 30 \text{ V} \quad R_1 = R_2 = 100 \Omega \quad R_{DS(on)} \text{ für } T_1 = T_2 = 0,1 \Omega \quad C_p = 10 \text{ nF}$$

6. Berechnen Sie die Energie, die in R_1 und T_1 beim vollständigen Entladen des Piezos umgesetzt wird!

Annahmen: Der Piezo sei ein idealer Kondensator.

Der Piezo wurde vollständig auf U_p aufgeladen.

7. In welchem Verhältnis teilt sich die Verlustenergie auf T_1 und R_1 auf (Näherung)?

8. Welche Verlustleistung wird in R_1 durchschnittlich umgesetzt, wenn ein Piezo mit 10 kHz geladen und entladen wird (Näherung)?

9. Wie groß ist die Verlustleistung am Widerstand R_2 ?

5. Praktikumsaufgaben:

Im Laufe des Versuchsteils soll eine 50 W Halogenglühbirne durch einen Transistor geschaltet und gedimmt werden. Die Betriebsspannung dieser Lampe beträgt 12 V.

1. Kennwerte der Schaltung

Verbinden Sie auf dem Steckbrett „Tiefsetzsteller“ die Anschlüsse und Baugruppen zu der in Bild 9 gezeigten Schaltung! Stecken Sie die Spannungsversorgung erst nach Kontrolle durch den Assistenten ein! Überlegen Sie sich vor jeder Versuchsdurchführung, an welchen Stellen Sie Messgeräte anbringen müssen.

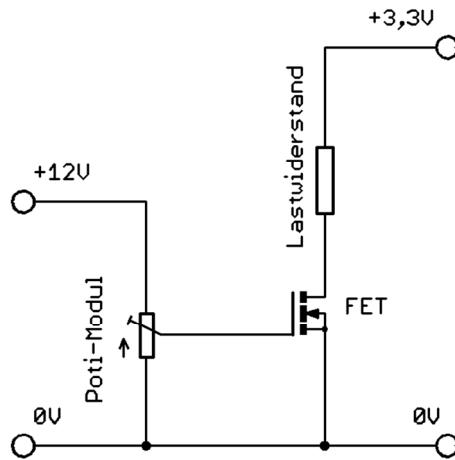


Bild 9: Schaltung zur Vermessung der Transistorkennlinien

a) **Messung der Thresholdspannung:**

Als Lastwiderstand dient eine Halogenlampe. Stellen Sie am Leistungsnetzteil das die Lampe versorgt 3,3 V ein. Am Potimodul sollen wie in Bild 9 dargestellt 12V anliegen. Die Gate-Source-Spannung kann daraufhin mit dem Potimodul eingestellt werden. Steigern Sie langsam die Gate-Source-Spannung bis ein Stromfluss einsetzt!

b) **Aufnehmen von Kennlinien:**

Stellen Sie das Leistungsnetzteil, welches die Lampe versorgt, auf 0 V. Stellen Sie mit Hilfe des Potentiometers die in der Tabelle links angegebene Gate-Source-Spannung ein! Steigern Sie die Spannung am Leistungsnetzteil, sodass sich ein U_{DS} von ca. 0,2 V einstellt! Messen Sie nun I_D und U_{DS} genau! Steigern Sie die Spannung am Leistungsnetzteil, zunächst in 0,2 V-Schritten (bis 1V), später in 0,5 V-Schritten bis 5 V. Bei dieser Messung wird der Transistor schnell warm, sie müssen daher **zügig vorgehen**. Zwischen den Messreihen muss der Transistor abkühlen.

Übertragen Sie die untenstehende Tabelle auf Ihr Aufgabenblatt! Messen Sie die benötigten Werte für die verschiedenen Gate-Source-Spannungen! Zeichnen Sie daraus ein Kennlinienfeld! Diskutieren Sie im Anschluss kurz Ihr Ergebnis!

$U_{GS} = U_{th} + 0,15V$	U_{DS}									
$U_{GS} = U_{th} + 0,3V$	U_{DS}									

$U_{GS} = U_{th} + 0,5V$	U_{DS}										
--------------------------	----------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 c) **Einschaltwiderstand $R_{DS(on)}$**

Im Folgenden soll der für den Schalterbetrieb wichtige Kennwert $R_{DS(on)}$ vermessen werden. Das Leistungsnetzteil wird auf 3,3 V gestellt. Für diesen Versuch wird ein Widerstandsmodul mit 0,33 Ohm anstelle der Halogenlampe verwendet. Die Eingangsspannung des Potimoduls bleibt bei 12 V.

U_{GS}	$U_{th} + 1V$	$U_{th} + 2V$	$U_{th} + 3V$	$U_{th} + 5V$	$U_{th} + 7V$
I_D bei $R=0,33 \Omega$					
U_{DS}					
$R_{DS(on)}$					

Übertragen Sie wieder die Tabelle auf Ihr Arbeitsblatt! Zeichnen Sie diesmal ein Diagramm, bei dem Sie $R_{DS(on)}$ über U_{GS} auftragen!

Interpretieren Sie kurz Ihr Ergebnis!

2. Tiefsetzsteller-Schaltungen

Im folgenden Versuch soll der Tiefsetzsteller untersucht werden. Dazu wird das Widerstandsmodul wieder durch eine Halogenlampe ersetzt.

Schließen Sie als erstes den Spannungsmesser parallel zur Lampe an! Im Lauf des Versuchs soll die Lampe mit Hilfe des Transistors auf 0 %, 25 %, 50 %, 75 % 100% gedimmt werden. Der Transistor soll dabei mit verschiedenen Ansteuerschaltungen gesteuert werden. Zunächst mit einer Konstantspannung aus einem Poti (wie oben), dann mit einem pulsweitenmoduliertem Signal direkt aus einem Mikrocontroller. Die Qualität der Steuerung soll dabei anhand der Steuercharakteristik und der **Erwärmung des Transistors** bewertet werden.

a) Potentiometer

Die Spannung am Leistungsnetzteil beträgt 12V. Stellen Sie die Gate-Source-Spannung mit dem Potentiometer so ein, dass die Spannung an der Lampe die Werte aus der Tabelle annimmt! Messen Sie den Lampenstrom.

Wiederholen Sie nach ca. 15 s die Messung von Spannung und Strom an der Lampe! Übertragen Sie die Tabelle wieder auf das Arbeitsblatt:

Spannung an der Lampe	3V		6V		9V		12V
Gate-Source-Spannung:		XXX		XXX		XXX	
Lampenstrom							
Leistung der Glühbirne							

b) Pulsweitenmodulation

Lassen Sie den Transistor abkühlen! Ersetzen Sie das Potentiometer durch das PWM-Modul. Erstellen Sie wie für das Potentiometer obige Tabelle!

Welchen auffälligen Unterschied gegenüber der Schaltung mit dem Potentiometer können Sie beobachten? Versuchen Sie, diese Beobachtung zu erklären!

6. Literatur:

- [1] Schrüfer, E., 2004, *Elektrische Messtechnik, 8. Auflage*, Hanser, München
- [2] U. Tietze, Ch. Schenk, 1986, Halbleiter-Schaltungstechnik, Achte, Überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- [3] Vorlesungsskriptum Feinmesstechnik 2, Prof. Heinzl, 1998, TU München

Beschreibung zu Versuch Nr. 3:

Regelungstechnik mit dem Operationsverstärker (OP)

Yuichiro Honda, überarbeitet von Jakob Neuhäuser, Wolfgang Büscher

1. Einordnung

Im Rahmen dieses Praktikums soll ein 3D-Wachsdruckgerät in Betrieb genommen werden. Eine Teilaufgabe davon ist die Temperaturregelung des Druckkopfes. Um die Viskosität des Wachses einzustellen und um das Wachs durch Druckdrüsen auszuspritzen, muss der Druckkopf beheizt werden. Verschiedene Umgebungsbedingungen erfordern eine individuelle Temperaturregelung des Druckkopfes.

Im Praktikum wird dazu ein Aufbau mit einem Zweipunktregler mit Rückführung verwendet. Ein Temperatursensor (Thermoelement des Typs K (TE-K) oder ein PT100-Sensor), ein Verstärker, ein Regler, eine Relais-Schaltung und ein Heizelement bilden hier den Regelkreis (Abb. 1). Der Sensor überwacht die Temperatur des Druckkopfes. Der Verstärker verstärkt das Sensorsignal auf das 1000-fache. Das verstärkte Sensorsignal wird vom Regler verarbeitet. Der Regler ist eine Schmitt-Trigger-Schaltung bestehend aus einem Operationsverstärker (OP). Im Allgemeinen können OPs keine ausreichende Energiezufuhr für ein elektrisches Heizelement gewährleisten. Daher wird eine Relais-Schaltung am Ausgang des OPs verwendet. Das elektrische Heizelement erwärmt daraufhin den Druckkopf.

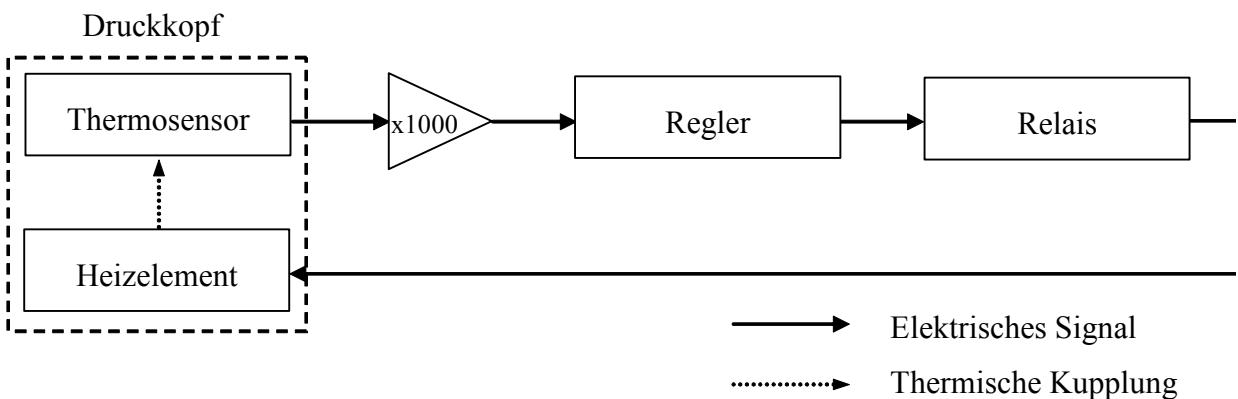


Bild 1: Regelkreis der Regelung der Druckkopftemperatur

2. Theorie und Materialien

Bei der Temperaturmessung muss eine passende Verbindung der Messleitungen ausgewählt werden. Da die Kontaktstelle gelötet ist, könnte das Lot während der Messung schmelzen. Bei normalen Lötkontakten sollte eine Temperaturmessung über 170°C nicht durchgeführt werden.

2.1. Temperatursensoren

Temperatursensoren basieren auf thermischen Eigenschaften von Materialien (thermomechanisch, thermoelektrisch und thermochemisch). Im Praktikum werden ein Thermoelement vom Typ K (TE-K) und ein thermoelektrischer Widerstand PT100, verwendet. Die Ausgangsgrößen der beiden Sensoren sind unterschiedlich. Die Messgrößen des TE-Ks und des PT100 sind elektrische Spannung bzw. elektrischer Widerstand.

Thermoelektrische Widerstände werden allgemein in PTC- und NTC-Typen unterteilt. PTC und NTC sind Widerstände mit positivem bzw. negativem Temperaturkoeffizienten. Beim PTC erhöht sich der Widerstand bei steigender Temperatur. Der NTC hingegen weist einen negativen Temperaturkoeffizienten auf. Deshalb wird der PTC als *Kaltleiter* und der NTC als *Heißleiter* bezeichnet. Beide Sensortypen besitzen Eigenschaften, die sie für verschiedene Anwendungen unterschiedlich gut geeignet machen. In Tabelle 1 werden Thermoelement und thermoelektrischer Widerstand verglichen [1].

Tabelle 1: Vor- und Nachteile des Thermoelementes und des thermoelektrischen Widerstand-Sensors (engl. RTD = Resistance Temperature Detector)

Merkmale	Thermoelement	RTD
Antwortzeit	Besser	
Maximale Temperatur	Höher	
Unempfindlichkeit	Besser	
Kosteneffizienz	Besser	
Genauigkeit		Besser
Langfristige Stabilität		Besser
Standardisierung		Besser

2.1.1. Thermoelement

Ein Thermoelement (TE) besteht aus zwei bestimmten Metall-Legierungen, die in Kontakt stehen (verlötet oder verschweißt). Das TE erzeugt dabei eine elektrische Spannung (Thermospannung), die durch den Seebeck-Effekt erzeugt wird. In Tabelle 2 werden verschiedene Typen von Thermoelementen, deren Metall-Legierungen und deren Temperaturbereiche dargestellt [2]. Im Praktikum wird das Thermoelement vom Typ K (NiCr-Ni) verwendet.

Typ	Material	Temperaturbereich in °C
B	Pt30%Rh - Pt6%Rh	0 ~ 1790
E	NiCr - CuNi	-200 ~ 900
J	Fe - CuNi	0 ~ 760
K	NiCr - Ni oder NiCr - NiAl	-250 ~ 1260
L	Fe - CuNi	0 ~ 760
N	NiCrSi - NiSi	300 ~ 1260
R	Pt13%Rh - Pt	1200 ~ 1790
S	Pt10%Rh - Pt	1200 ~ 1768
T	Cu - CuNi	-270 ~ 400
U	Cu - CuNi	0 ~ 370

Tabelle 2: Verschiedene Thermoelemente, Materialkombinationen und Temperaturbereiche

2.1.2. PT100

PT100 ist ein thermoelektrischer Widerstand (engl. RTD) mit einem positiven Temperaturkoeffizienten. Die Widerstandsänderung beruht auf der Materialeigenschaft der Platinlegierung. Das Verhältnis zwischen Temperatur und Widerstand ist nahezu linear für einen kleinen Temperaturbereich. Der Widerstandswert wird mit Hilfe einer Umwandlungsschaltung als elektrische Spannung oder als elektrischer Strom gemessen. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die Wärmeentwicklung aus dem Messstrom die Messung nicht beeinflusst. Es gibt Zwei-, Drei- und Vier-Draht Systeme von PT100 Sensoren. Bei 4-Draht-Systemen bestehen die 4 Leitungen aus zwei Spannungsmessleitungen und zwei Stromzuführleitungen. IEC751 definiert die Farbcodierung für die Sensorkabel des Platin-Widerstand-Thermometers (Rot/Weiß-Markierung) wie folgt (Abb. 2) [3].

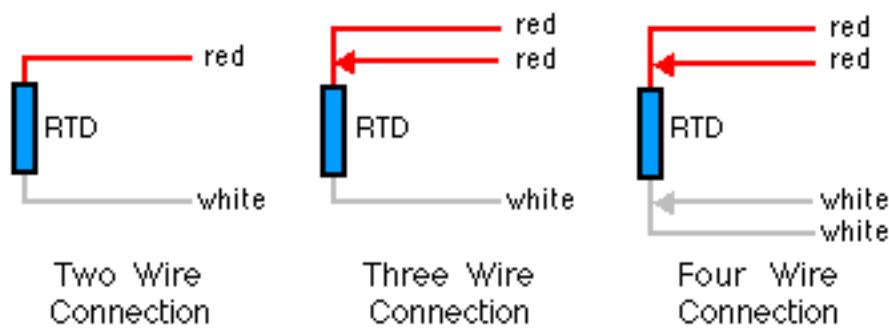


Bild 2: Die Farbcodierung des Platin-Widerstand-Thermometers

Der PT100-Sensor ist entsprechend der Messgenauigkeit klassifiziert (Tab. 3). Im Praktikum wird ein 2-Draht-System der Klasse B verwendet.

Tabelle 3: Norm IEC 60751: Sensor-Klassen für PT100

Norm IEC 60751	Genauigkeit bei 0 °C
Klasse AA	± 0,10°C
Klasse A	± 0,15°C
Klasse B	± 0,30°C
Klasse C	± 0,60°C

2.2. Operationsverstärker

Operationsverstärker (OP) sind elektrische Analogbauteile, die in der Regel als integrierte Schaltungen (10 bis 50 Transistoren und etliche Widerstände auf einem Quadratmillimeter großen Chip) ausgeführt sind. Im Gegensatz zur Digitaltechnik, bei der nur zwei Zustände (z. B.: 0 V=Low, 5 V=High) existieren, liegt die Information in der Analogtechnik in den kontinuierlichen Spannungs- bzw. Stromwerten vor. Mit OPs lassen sich mit geringem, zusätzlichem Hardwareaufwand Schaltungen mit den unterschiedlichsten Funktionen (Verstärker, Analogrechenelemente, Oszillatoren, Filter) realisieren. Für spezielle Einsatzbereiche von OPs (DMS-Verstärker, HiFi-Verstärker, Videosignalverarbeitung, Biopotential-Verstärker) stehen von verschiedenen Anbietern zahlreiche Typen zur Verfügung. Außerdem macht die Weiterentwicklung der Herstellungstechnik (J-FET-, Bipolar- und CMOS-OPs) die Operationsverstärker zunehmend anwenderfreundlich. Die richtige Auswahl eines OPs ist sehr wichtig, um die jeweiligen Spezifikationen zu erfüllen.

Es gibt keinen idealen OP für alle Zwecke!

Operationsverstärker besitzen mindestens fünf Anschlusspins:

Zwei Eingänge, einen Ausgang und zwei Pins für die Betriebsspannung (siehe Abb. 3).

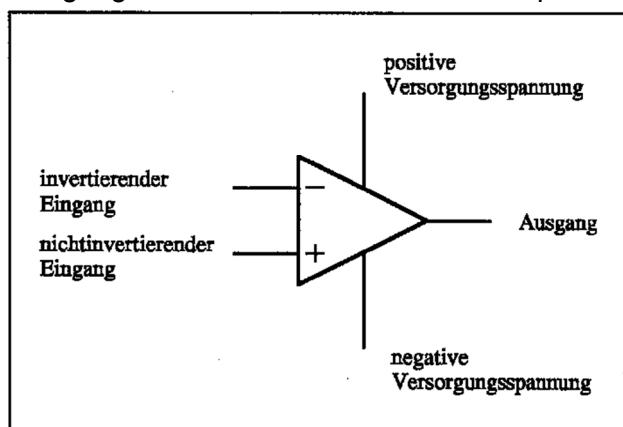


Bild 3: Anschlusspins eines Operationsverstärkers

Die Eingänge bestehen aus einem invertierenden und einem nichtinvertierenden Pin. Beim Schaltungsaufbau muss man die beiden Eingänge dem jeweiligen Zweck entsprechend verwenden. Sie sind nicht vertauschbar. Anwendungsbeispiele werden im Kapitel 3.5 (Grundschaltungen mit dem Operationsverstärker) dargestellt. Im Allgemeinen weicht ein OP wegen Nullpunktfehlern, Ein-/Ausgangswiderständen und Ein-/Ausgangsströmen vom idealen OP ab (Tab. 4). Durch die große Universalität und der damit verbundenen weiten Verbreitung ist eine Massenproduktion mit niedrigen Stückkosten möglich. Z. B. kostet ein typischer OP vom Typ 741 im Einzelhandel ca. 15 Cent. Neben Einzeloperationsverstärkern sind auch Mehrfach-OPs erhältlich, wobei zwei bzw. vier OPs in einem 8- bzw. 14-poligen Gehäuse vereint sind.

Tabelle 4: Parametervergleich zwischen dem idealen OP, TL082 (J-FET) und μA741C (bipolar)

Größe	ideal	TL082	μA741C
Eingangswiderstand in Ω	∞	10^{12}	2×10^6
Eingangsstrom in pA	0	20	80×10^3
Ausgangswiderstand in Ω	0	40	75
Maximaler Ausgangsstrom in mA	∞	40	25

2.3. Relais

Ein Relais wird häufig als Schnittstelle zwischen einem Regelungs-/Steuerungssignal (einer Regelungs-/Steuerungsschaltung) und dem Treiber eines elektrischen Aktors (einer Starkstromschaltung) eingesetzt. Beim konventionellen Relais wird durch einen mechanischen Kippmechanismus die Ein-/Ausschaltung realisiert. Bei jedem Kippen der Kontaktstelle des Relais werden allerdings mechanische Schwingungen erzeugt. Dadurch entstehen bei einem Schaltzustandwechsel mehrmalige Kontakte in kurzer Zeit (ca. 50 ms). Ein neuer Typ von Relais ist ein Solidstate-Relais. Dieses Relais verzichtet auf den mechanischen, beweglichen Teil. Somit entsteht keine Schwingung beim Schaltzustandwechsel. Die Lebensdauer des Solidstate-Relais ist länger als die eines mechanischen Relais. Im Praktikum wird ein mechanisches Relais verwendet.

2.4. Elektrische Heizelemente

Elektrische Heizelemente entwickeln Wärme aus elektrischer Energie. Beispiele für ein solches Heizelement sind ein Widerstand (eine Heizwendel, eine Glühwendel) und ein Peltier-Element. Im Praktikum werden normale Widerstände als Heizelemente verwendet. Sie werden seriell gelötet und in den Druckkopf eingesetzt.

2.5. Druckkopf

Der Druckkopf wurde speziell für das Praktikum aus einer Aluminium-Legierung hergestellt. Er besteht aus den Temperatursensoren, dem Heizelement, einer Wachskammer und einer Wachsspritzdüse.

3 Ausprägungen im Versuch

3.1. Thermoelement vom Typ K

Abbildung 4 zeigt die Kennlinie des Thermoelementes Typ K [2]. Die Linie kann man mit der Gleichung

$$\text{Thermospannung [mV]} = 0,0407 \text{ [mV/}^{\circ}\text{C]} \cdot \text{Temperatur [}^{\circ}\text{C]} + 0,0094 \text{ [mV]}$$

proportional annähren.

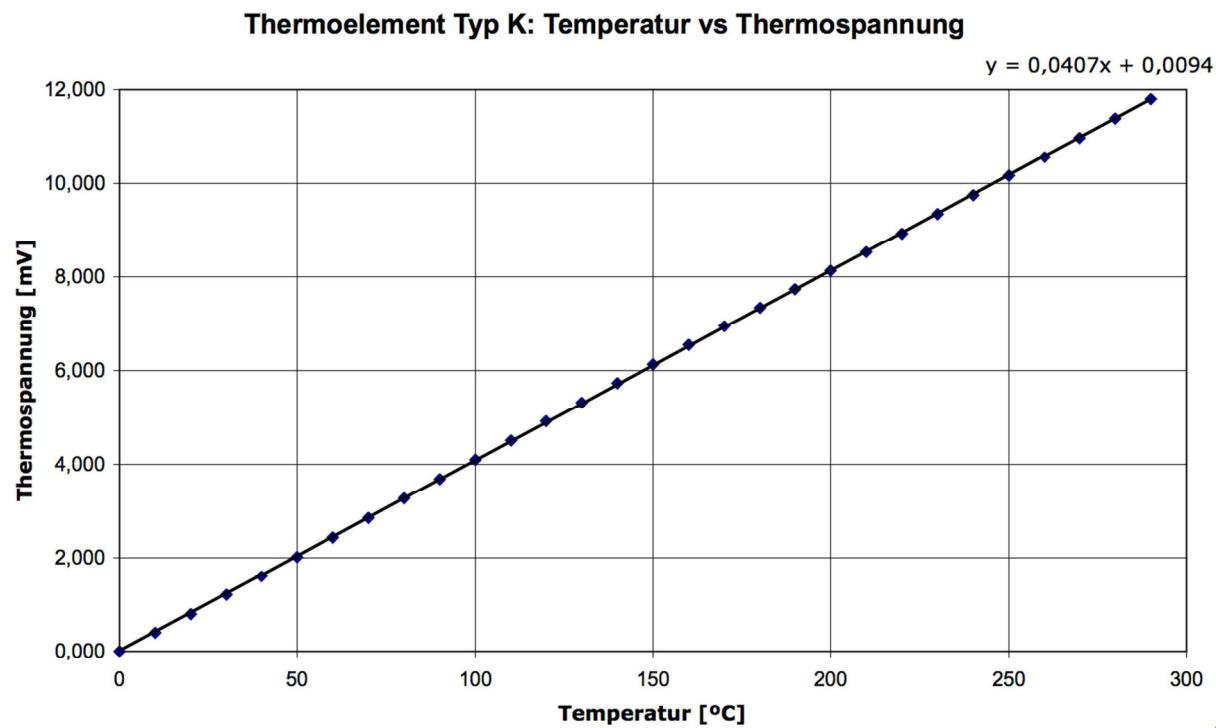


Bild 4: Kennlinie der Thermoelement Typ K, Temperatur gegen Thermospannung

3.2. PT100

Ein PT100 besitzt die Widerstandswerte 100Ω bei 0°C und $138,4 \Omega$ bei 100°C . Es gibt ein festes Verhältnis zwischen dem Widerstand und der Temperatur. Dies wurde durch den

„International Temperature Scale 90“ (ITS-90) sowie durch die IEC751 definiert (Gleichung 2).

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3) \quad (2)$$

t : gegebene Temperatur

R_t : Widerstand bei t

R_0 : Nennwiderstand bei 0°C ($100\ \Omega$)

$$A = 3,9083 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^\circ\text{C}}$$

$$B = -5,775 \cdot 10^{-7} \frac{1}{^\circ\text{C}^2}$$

$$C = -4,183 \cdot 10^{-12} \frac{1}{^\circ\text{C}^4} \quad (t < 0^\circ\text{C}),$$

$$C = 0 \quad \frac{1}{^\circ\text{C}^4} \quad (t \geq 0^\circ\text{C}).$$

Pt100: Temperatur vs Widerstand

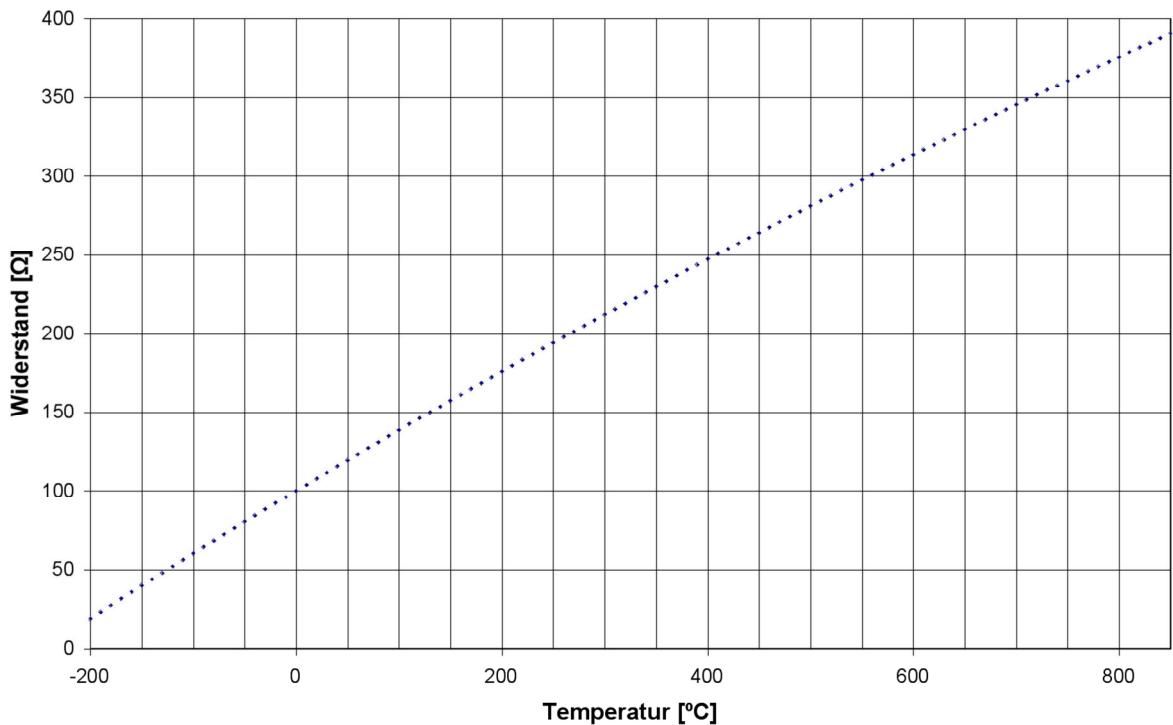


Bild 5: Kennlinie des PT100, Temperatur gegen Widerstand

Die Widerstandswerte ändern sich nahezu linear über den Temperaturbereich von 0 bis 100°C . Damit ändert sich der Widerstandswert um $0,384\ \Omega$ je 1°C Temperaturänderung. Wenn man die Kurve im Temperaturbereich von 0°C bis 100°C linear annährt (Gleichung 3), ergibt sich beispielsweise ein Fehler von ca. $0,4^\circ\text{C}$ bei 50°C .

$$R_t = R_0 \cdot (1 + A' \cdot t) \quad (3)$$

$$A' = 3,85 \cdot 10^{-3} \frac{1}{^{\circ}C}$$

Lässt man durch einen Widerstand von 100Ω einen Strom von 100 mA fließen, so wird eine Wärmeenergie von $100 \mu\text{W}$ erzeugt. Ein Teil der Wärmeenergie erwärmt den Sensor. Zur Vermeidung oder zur Verringerung des Messfehlers sollte ein guter Wärmekontakt zwischen dem Messobjekt und dem Sensor bestehen.

3.3. Operationsverstärker

Der OP TL082 ist ein typisches Beispiel für einen Baustein mit J-FET-Eingängen ($10^{12} \Omega$) mit fünf Anschlusspins. Im Praktikum werden zwei Operationsverstärker (in einem Gehäuse) als nichtinvertierender Verstärker und als Schmitt-Trigger verschaltet. Der Verstärkungsfaktor des Verstärkers ist ca. 1000. Mit der Schmitt-Trigger-Schaltung kann man die gewünschten Kippspannungen einstellen. Sie sind beide an die $\pm 15 \text{ V}$ Versorgungsspannung angeschlossen.

Teilnehmer am Praktikum können eine oder mehrere Schaltungen mit selber ausgewähltem Operationsverstärker auf einer Steckplatine aufbauen (*Siehe Kapitel 5.2, Vorbereitung*).

3.4. Heizelement

Das Heizelement besteht aus vier Widerständen (jeweils 33Ω). Sie sind seriell verbunden und an die $\pm 15 \text{ V}$ Versorgungsspannung angeschlossen. In den Widerständen wird die elektrische Energie in Wärmeenergie umgewandelt. Die Leistung (P) wird aus dem elektrischen Strom (I) und dem Widerstand (R) mit der Gleichung 4 beschrieben.

$$P = I^2 R \quad (4)$$

3.5 Grundschaltungen mit dem Operationsverstärker

Üblicherweise werden OPs immer mit einer äußeren Beschaltung betrieben, die dann für das Verhalten der Schaltung ausschlaggebend ist. Die folgenden Schaltungen sind Grundschaltungen mit Operationsverstärkern. Die Anwendung von Operationsverstärkern ist vielseitig. Genauere Informationen zu verschiedenen Reglern, sowie der internen Funktionsweise von OPs werden in der Literatur [4], [5] gezeigt.

Da die Eingangswiderstände sehr groß (ideal: unendlich) sind, fließt kein Strom über die Eingänge, sondern es wird die Spannungsdifferenz gemessen. Den Ausgangstrom bezieht der OP aus seiner Versorgungsspannung.

Zum besseren Verständnis der Funktion einer Schaltung mit einem OP kann man sich folgendes vorstellen:

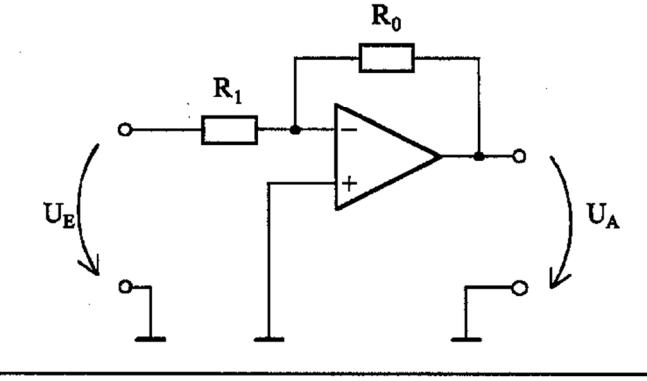
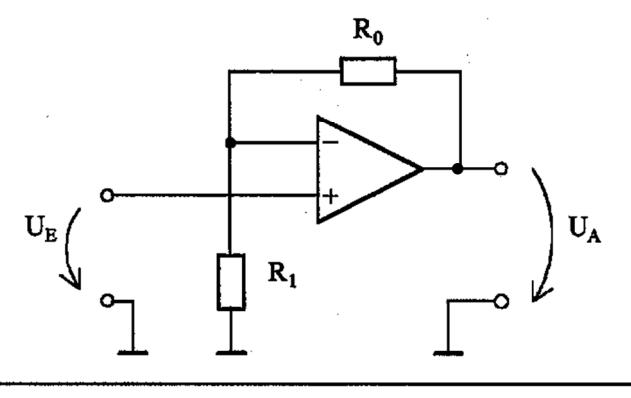
Der Operationsverstärker versucht immer, die beiden Eingangsspannungen gleichzusetzen. Nur bei Gegenkopplung kann er das annähernd schaffen, indem Spannung und Strom am Ausgang so gesteuert werden, dass der gekoppelte Eingang angeglichen wird.

Zur Berechnung der Schaltung gilt es daher, eine wichtige Regel zu beachten:

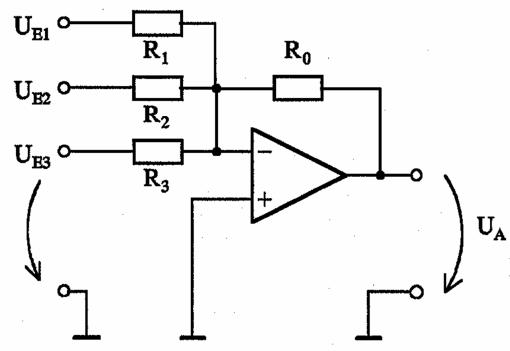
Die Spannung zwischen dem invertierenden und nichtinvertierenden Eingang wird als NULL angenommen. Zwischen beiden Eingängen besteht aber kein Kurzschluss (Virtuell Short).

Ein idealer OP besitzt einen unbegrenzt hohen Eingangswiderstand, reagiert am Ausgang ohne Zeitverzögerung und kann unbegrenzte Ströme am Ausgang liefern.

Tabelle 5: Grundschaltungen von Operationsverstärkern

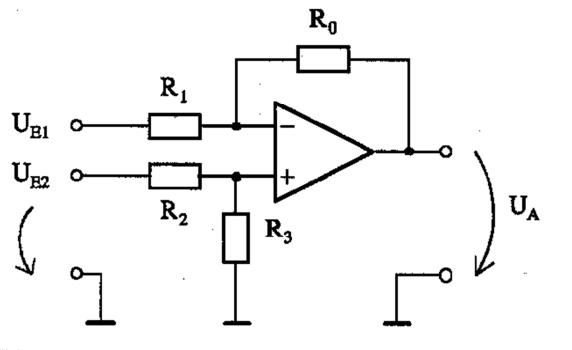
Invertierender Verstärker	
Nichtinvertierender Verstärker *Diese Schaltung kann einen sehr hohen Eingangswiderstand besitzen!	 $U_A = U_E \left(1 + \frac{R_0}{R_1} \right)$

Additionsverstärker



$$U_A = -\frac{R_0}{R_1} U_{E1} + \frac{R_0}{R_2} U_{E2} + \frac{R_0}{R_3} U_{E3}$$

Subtraktionsverstärker

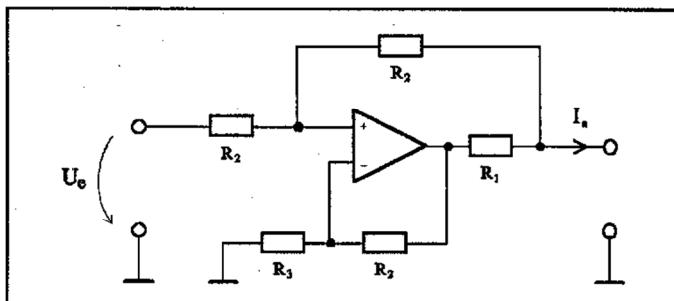


$$U_A = U_{E2} \frac{(R_0 + R_1)R_3}{(R_2 + R_3)R_1} - U_{E1} \frac{R_0}{R_1}$$

Wenn $R_0=R_1=R_2=R_3$,

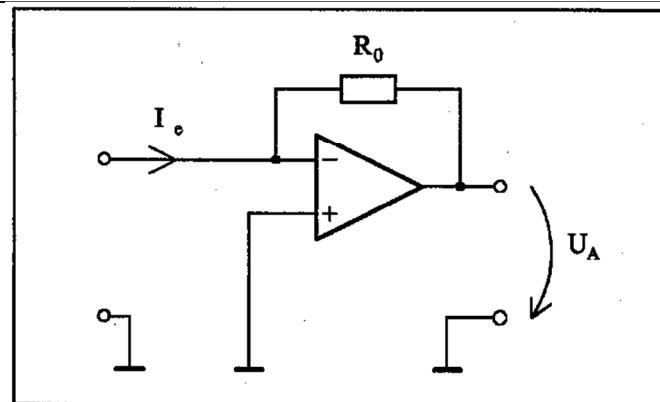
$$U_A = U_{E2} - U_{E1}$$

Spannungs-Strom-Wandler



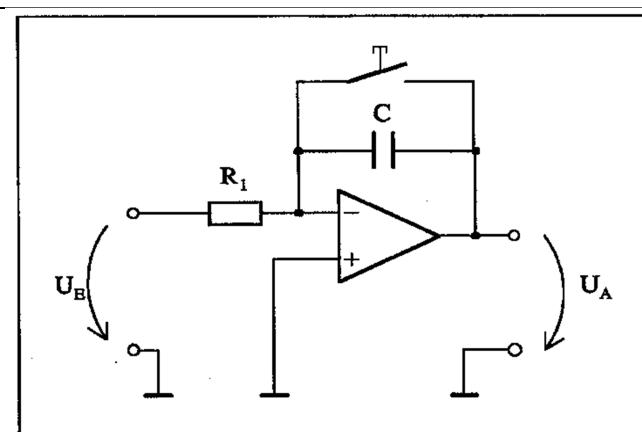
$$I_a = U_e \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \text{ mit } R_3 = \frac{R_2^2}{R_1 + R_2}$$

Strom-Spannungs-Wandler



$$U_A = -I_e \cdot R_0$$

Integrator

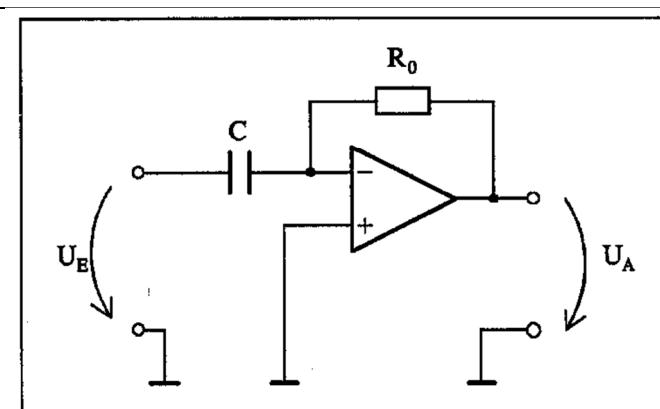


$$U_A(t) = U_A(t=0) - \frac{1}{\tau} \int_{t_0}^t U_E(t) dt$$

mit der Zeitkonstante:

$$\tau = R_1 \cdot C$$

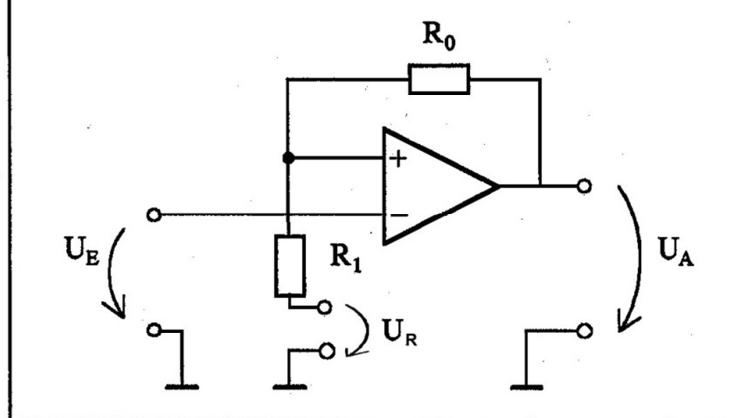
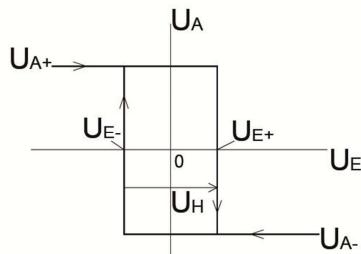
Differenzierer



$$U_A(t) = -\tau \frac{dU_E(t)}{dt}$$

mit der Zeitkonstante: $\tau = R_0 \cdot C$

Invertierter Schmitt-Trigger



$$\text{Einschaltpegel: } U_{E+} = \frac{U_R R_0 + U_{A+} R_1}{R_1 + R_0}$$

Mit Ausgangspegel: $U_{A+} = \text{max. Ausgangsspannung}$

$$\text{Ausschaltpegel: } U_{E-} = \frac{U_R R_0 + U_{A-} R_1}{R_1 + R_0}$$

Mit Ausgangspegel: $U_{A-} = \text{min. Ausgangsspannung}$

Schalthysterese:

$$\Delta U_E = U_H = \frac{R_1}{R_1 + R_0} (U_{A+} - U_{A-}) = \frac{R_1}{R_1 + R_0} 2U_A$$

Referenzspannung:

$$U_R = \frac{U_A (U_{E+} + U_{E-})}{2U_A - U_{E+} + U_{E-}}$$

4 Hausaufgaben

Der Signalfluss des Regelkreises wird in Abbildung 1 dargestellt. Dieser soll durch eine elektrische Schaltung realisiert werden. Eine mögliche Versuchsschaltung dieses Regelkreises zeigt Bild 6.

4.1. Erklärung der Versuchsschaltung

Der Operationsverstärker (TL082) wird mit einer 12-V-Spannung versorgt. Die Kondensatoren C2 und C3 dienen der Versorgungsspannungsstabilisierung des Operationsverstärkers. Der Verstärker besteht aus einem Operationsverstärker (IC3B), zwei Eingängen (X1) und zwei Widerständen (R1, R2). Sie bilden einen nichtinvertierenden Verstärker. Das Eingangssignal wird gemäß den Widerständen auf ca. 1000-fache Verstärkung eingestellt. Dadurch wird bei der Messung des TE-Ks die Messspannung vom „mV“ Bereich auf den „V“ Bereich vergrößert. Das so verstärkte Signal wird über die

Schaltung-1 weitergegeben. Zwei Potentiometer (R7, R8) und ein Operationsverstärker (IC3A) bilden eine Schmitt-Trigger-Schaltung. Die Schmitt-Trigger-Schaltung gibt anhand des Eingangs die maximalen Ausgangssignalpegel des Operationsverstärkers aus. Der Widerstand R7 stellt die Größe der Hysterese ein. Mit dem Widerstand R8 wird die mittlere Spannung der Hysterese eingestellt. Der FET (Q1) ist ein N-Kanal FET. Er wird durch ein positives Spannungssignal am Gate-Pin eingeschaltet. Der Widerstand R3 dient als Strombegrenzung. Ein Relais (K1) wird durch den FET Q1 gesteuert. Die Ein- und Ausschaltzustände des FET Q1 entsprechen jeweils den Ein- und Ausschaltzuständen des Relais K1. Der Widerstand R4 ist das Heizelement. Wenn das Relais K1 eingeschaltet ist, wird R4 erwärmt. Dadurch wird der Druckkopf beheizt. Die Temperatur des Druckkopfes wird durch die Temperatursensoren (TE-K oder PT100) gemessen. Die Ausgangssignale der Sensoren werden durch die Anschlüsse (X1-1, X1-2) zum Verstärker geleitet. Somit ist der Regelkreis für die Temperatur des Druckkopfes geschlossen.

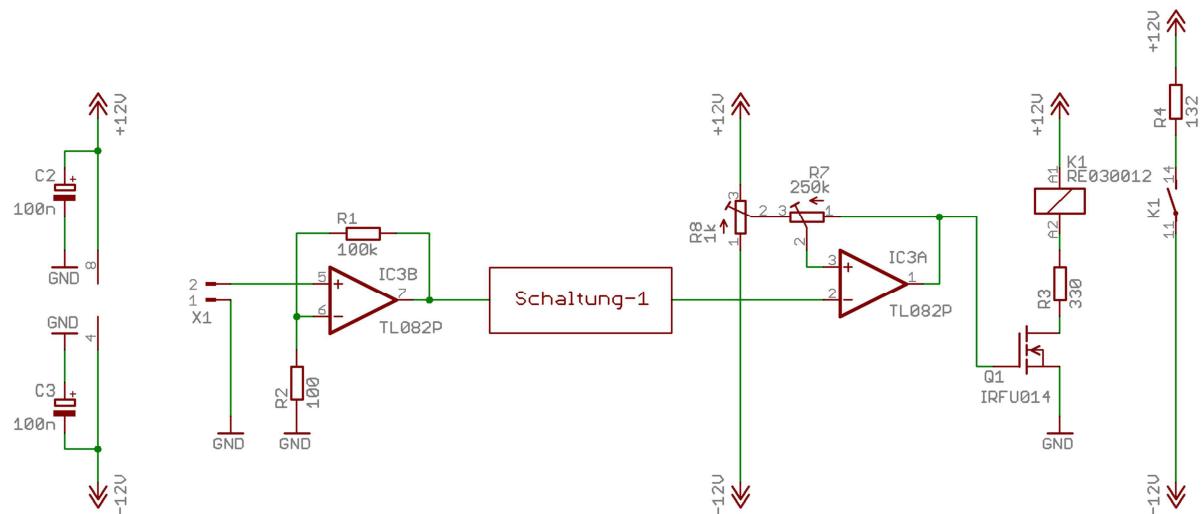


Bild 6: Versuchsschaltung: Verstärker ($R_1, R_2, IC3B$), Schmitt-Trigger-Schaltung ($R_7, R_8, IC3A$), Relais-Schaltung (Q1, R3, K1), Heizelement (R4)

4.2. Vorbereitung (Hausaufgabe)

1. Für den Versuch im Praktikum stehen folgende Operationsverstärkertypen zur Verfügung: LF356N, UA74 und LF412.

Recherchieren Sie im Internet nach den Datenblättern für diese Typen und suchen Sie das für die gestellte Aufgabe geeignete Modell heraus! Bringen Sie das Datenblatt zum Praktikum mit! Versuchen Sie Ihre Auswahl anhand der Kenndaten zu begründen!

2. Die Verstärkereinheit der Versuchsschaltung hat als Ausgangsgröße die elektrische Spannung. Bei einer Messung mit dem Thermoelement kann man die Thermospannung also direkt verstärken. Wie kann man die Messgröße des PT100 in eine elektrische Spannung mit dem passenden Bereich für den Verstärker umwandeln? Bitte skizzieren Sie die Messschaltung bei der Messung mit einem PT100! Auf was muss hierbei geachtet werden (Spannungen und Ströme abschätzen!)? Experimentieren Sie mit der bereitgestellten Steckplatine!

3. Schätzen Sie vor dem Praktikum Ihre Ergebnisse ab, wenn Sie den Operationsverstärker TL082 mit dem von Ihnen ausgewählten Operationsverstärker tauschen: 1) den Verstärkungsfaktor, 2) die Offset-Spannung, 3) das Kippverhalten an der Schmittschaltung und 4) die Temperaturstabilität der Heizung bei der Messung.

4. Was für eine Funktion wird an der Stelle „Schaltung-1“ in der Versuchsschaltung (Bild 6) sinnvoll eingesetzt? Aus welchem Grund wird diese Funktion benötigt?

5. Bestimmen Sie die theoretischen Einstellwerte der Potentiometer R7 und R8, um die Temperatur des Druckkopfes zwischen 70 °C und 80 °C zu regeln! Annahmen hierfür sind: 1) TE-K wird als Thermosensor verwendet, 2) die Verstärkereinheit weist eine 1000-fache Verstärkung auf, 3) R7 besteht aus 2 Widerständen die mit dem OP den Schmitt-Trigger bilden, R8 ist ein Spannungsteiler um eine asymmetrische Hysterese (U_R) zu erhalten
4) $R8 = 100k\Omega$, $R7 = 10k\Omega$

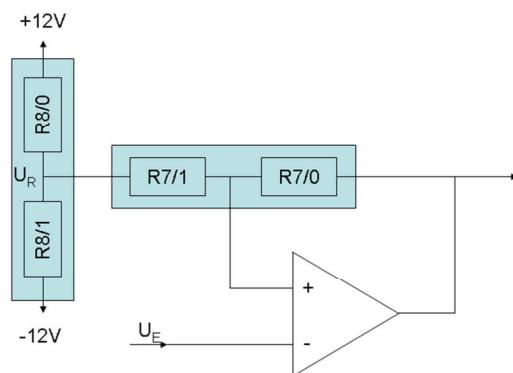


Bild 7: Vereinfachte Darstellung der Schmitt-Trigger-Schaltung (R7, R8, IC3A)

5 Praktikumsaufgaben:

5.1 Grundschemata der Experimente

Jedes Experiment besteht aus folgenden fünf Schritten: 1) Messung der Funktionseinheiten, 2) Einstellung des Regelkreises, 3) Beschaltung des Regelkreises, 4) Beobachtung und 5) Verbesserung.

- Messung der Funktionseinheiten

Zuerst bauen Sie die Versuchsschaltung ohne Verbindungen zwischen Ein/Ausgängen der Funktionseinheiten auf, um die einzelnen Eigenschaften der Funktionseinheiten kennen zu lernen. Messen Sie das Ausgangssignal des TE-Ks mit verschiedenen Temperaturen!

- Einstellung des Regelkreises

Stellen Sie die beiden Potentiometer R7 und R8 so ein, dass der Druckkopf auf einem bestimmten Temperaturbereich geregelt wird! Die Zieltemperatur des Druckkopfes ist 75 ± 5 °C. Die Einstellwiderstände der Potentiometer können mit Hilfe der Kennlinien berechnet werden!

- Beschaltung des Regelkreises

Verbinden Sie den Ausgang der Verstärkereinheit und den Eingang der Schmitt-Trigger-Schaltung.

Schließen Sie direkt den Ausgang der Schmitt-Trigger-Schaltung mit dem Eingang des FETs zusammen!

Schließen Sie die von Ihnen zusammengesteckte Schaltung an!

- Beobachtung

Beobachten Sie das Verhalten der Schaltung! Die elektrischen Bauteile werden mit bestimmter Toleranz gebaut. Dadurch stimmen der theoretische Wert und das Messergebnis nicht vollständig überein. Jeder Zweck erfordert unterschiedliche Optimierung der Schaltung. Ist z. B. der Verstärkungsfaktor der Verstärkereinheit mit einem Wert von exakt 1000 in diesem Praktikum notwendig?

- Verbesserung

Die Einstellung aus der theoretischen Berechnung und das tatsächliche Verhalten der Schaltung sind wegen der Toleranzen der Bauelemente nicht übereinstimmend. Dieser Fehler kann durch die Beobachtung nachjustiert werden.

5.2. Aufgaben

Aufgabe 1: Kennlinien der Sensoren und der Verstärkereinheiten

Um das Heizelement auf eine bestimmte Temperatur zu regeln, sollten die Eigenschaften des Sensors und der Verstärkereinheit bekannt sein.

Nehmen Sie die Kennlinien des TE-Ks bzgl. der Temperatur auf! Verwenden Sie als Messgröße den Ausgang des Verstärkers (die beiden Sensoren zeigen fast lineare Eigenschaften der Messgrößen gegenüber der Temperatur)!

Schließen Sie zuerst beide Eingänge des Verstärkers kurz und messen Sie dann den Nullpunktfehler!

Aufgabe 2: Graphische Darstellung der Kennlinien

Zeichnen Sie die Kennlinien des TE-Ks gegenüber der Temperatur graphisch! Lesen Sie den Sollwert (die elektrische Spannung) des Druckkopfes aus den Kennlinien ab!

Aufgabe 3: Einstellung der Regelkreise

Stellen Sie die beiden Potentiometer R7 und R8 so ein, dass der Druckkopf auf einen bestimmten Temperaturbereich geregelt wird. Die Zieltemperatur des Druckkopfes ist $75 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Einstellwiderstände der Potentiometer können mit Hilfe der Kennlinien berechnet werden.

Aufgabe 4: Leistung des Heizelements

Berechnen Sie die Leistung des Heizelements!

Aufgabe 5: Beobachtung der Regelkreise

Beobachten Sie die Regelkreise der beiden Sensoren! Beschreiben Sie, wie die Regelkreise funktionieren! Bei welchen Bedingungen wird das Heizelement ein- oder ausgeschaltet? Was für ein Störsignal könnte diese Regelkreise beeinflussen?

Aufgabe 6: Einfluss von thermischen Störungen

Erzeugen Sie thermische Störungen (Abkühlung und Erhitzung) und beobachten Sie die Reaktion des Regelkreises. Sie können mit einem Kältespray bzw. Luftspray den Druckkopf abkühlen. Zum Erhitzen können Sie einen Fön verwenden.

Aufgabe 7: Analyse der Regelkreise

Beschreiben Sie das Verhalten der Regelkreise und nennen Sie Verbesserungsmöglichkeiten am Regelkreis, um die Temperatur konstanter zu halten!

6 Literatur

- [1] Maxim IC, 2005.,'Positive Analog Feedback Compensates PT100 Transducer', [Online], Application Note. Available from: <http://www.maxim-ic.com/appnotes.cfm/appnote_number/3450> [16. 12. 2005].
- [2] NN ,Grundlagen Thermoelemente', 2002, [Online], Temp-Web.DE. Available from: <<http://www.temp-web.de/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=36>> [10.03.06].
- [3] NN ,RTDs', [Online], Capgo Pty Ltd. Available from: <<http://www.capgo.com/Resources/Temperature/RTDs/RTD.html>> [17. 4. 2006].

- [4] Mann, H., Schiffelgen, H. & Froriep, R. 2003, *Einführung in die Regelungstechnik*, 9. Auflage, Hanser, München.
- [5] Schrüfer, E., 2004, *Elektrische Messtechnik*, 8. Auflage, Hanser, München
- [6] U. Tietze, Ch. Schenk, 1986, Halbleiter-Schaltungstechnik, Achte, Überarbeitete Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.

Beschreibung zu Versuch Nr. 4:

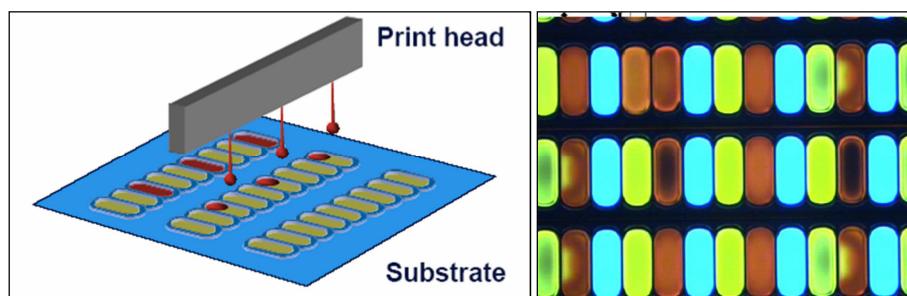
Untersuchung verschiedener Führungskonzepte

Jan Harnisch, überarbeitet von Sebastian Gepp, Wolfgang Büscher

1. Einordnung

Die Auflösung eines Druckgerätes wird im Wesentlichen durch zwei Faktoren bestimmt. Zum einen ist die Größe der mit dem Druckkopf erzeugbaren Tropfen wichtig, zum anderen die Genauigkeit der Druckkopfpositionierung. Diese Größe stellt besondere Anforderungen an den Druckkopf. Hierin sind die Herausforderungen für mikromechanische Fertigungsmethoden und Aufbauten gegeben.

Je nach Druckverfahren ist auch die Steifigkeit der Mechanik von Bedeutung. Für ein einwandfreies Funktionieren sind folgende Konzepte von Bedeutung: Spielfreiheit oder Einstellbarkeit von Führungen, Vorspannung von Gewindespindeln und Zahnrädern/Zahnriemen. Bei hohen Anforderungen an die Dynamik werden meist Direktantriebe eingesetzt, wobei als Führungen auch Luflager oder Magnetlager denkbar sind. Beispiele für derartige Drucksysteme sind Anlagen, die für das Drucken von LED-Bildschirmen (siehe Bild 1) verwendet werden oder mit denen durch Verwendung leitfähiger Tinte feinste Leiterbahnen auf flexible Substrate (Folienleiter) gedruckt werden können.



*Bild 1: OLED-Produktionsprozess bei Phillips (l.), Mikroskop-Bild eines OLED-Displays (r.)
(OLED = Organische Leuchtdiode)*

Auch für die 3D-Druckverfahren ist die Mechanik des Gerätes von entscheidender Bedeutung. Wie in einer Werkzeugmaschine müssen alle Achsen beweglich ausgeführt werden. Ein Transport des Papiers, wie im Office-Drucker, ist hier nicht möglich. Zusätzlich muss hier eine Bewegung in Z-Richtung stattfinden. Diese Verfahrmöglichkeit wird meist mit hohen Lasten beaufschlagt und muss trotzdem hohen Anforderungen an Präzision genügen. Dieser Praktikumsversuch soll einen möglichst breiten Überblick über gängige Konzepte von Führungen bieten. Aus diesem Grund werden hier auch Konstruktionen behandelt, die üblicherweise nur in Werkzeugmaschinen oder in der Feinwerk- und Mikrotechnik angewendet werden, aber in anderen Bereichen, wie zum Beispiel bei Drucken, je nach Problemstellung durchaus eine adäquate oder bessere Wahl darstellen können.

2. Theorie

Die Theorie von Bewegungskinematiken basiert auf den mechanischen Grundlagen, die im Fachbereich „Maschinenelemente“ gelehrt werden. Dazu wird die Grübler-Gleichung zur Analyse herangezogen. Hierzu wird der Begriff der Sonderabmessungen anschaulich erläutert. Ein weiteres Thema sind die Begriffe Selbsthemmung und Steifigkeit, die großen Einfluss auf die Präzision eines Systems haben. Durch eine mechanische Schwingungsanregung die wiederum durch den Stick-Slip-Effekt hervorgerufen wird, wird die Präzision weiter beeinflusst. Des Weiteren sollen die Grundlagen der Umsetzung von Rotationsbewegungen in Linearbewegungen gezeigt werden.

Statische Bestimmtheit anhand der Grübler-Gleichung

Die meisten Führungen fixieren 5 der 6 im Raum vorhandenen Freiheitsgrade (3 rotatorische, 3 translatorische). Seltener werden Führungen mit mehr als einem Freiheitsgrad eingesetzt (Beispiel: Führung der Bohrspindel einer Tischbohrmaschine; 1 rot. + 1 transl. Freiheitsgrad).

Der Freiheitsgrad einer Führung und die Anforderungen an deren Herstellung lassen sich mit der Grübler-Gleichung bestimmen. Dafür wird die Führung in Teilelemente zerlegt, deren Freiheitsgrad bekannt ist. Die allgemeine Grübler-Gleichung lautet:

$$F = B \cdot (n - 1 - g) + \sum b_i + \sum s_i$$

Dabei bedeuten die einzelnen Zeichen:

F: Freiheitsgrad

g: Anzahl der Gelenke (od. Gelenkflächen)

B: Bewegungstyp (ebene/sphärische

b_i: Beweglichkeit des Gelenks i

Anordnung: B=3, räumliche Anordnung:

s_i: eingehaltene Sonderabmessungen

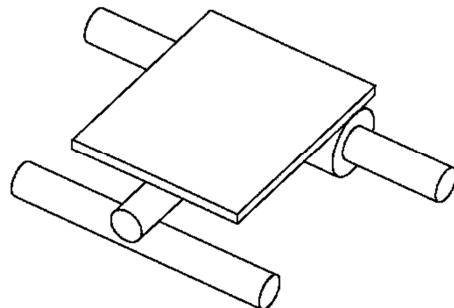
B=6)

n: Anzahl der Elemente

Ebene/Ebene (flächige Berührung)		b _i =3 1 Rot. / 2 Transl.	Zylinder/Ebene (Linienberührung)		b _i =4 2 Rot. / 2 Transl.
Kegel/Kegel (flächige Berührung)		b _i =1 1 Rotation	Kugel/Ebene (Punktberührung)		b _i =5 3 Rot. / 2 Transl.
Kugel/Kugel (flächige Berührung)		b _i =3 3 Rotation	Kugel/V-Nut (Punktberührung)		b _i =4 3 Rot. / 1 Transl.
Zylinder/Zylinder (flächige Berührung)		b _i =2 1 Rot. / 1 Transl.	Zylinder/Gabel (Linienberührung)		b _i =4 2 Rot. / 2 Transl.
Zylinder/Zylinder (Punktberührung)		b _i =5 3 Rot. / 2 Transl.			

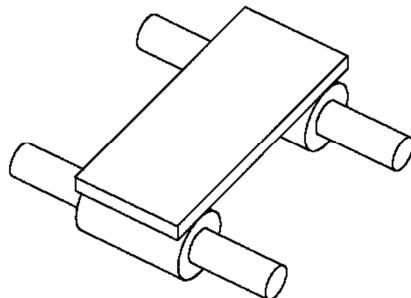
Bild 2: Freiheitsgrade von räumlichen Gelenken

Wenn man keine besonderen Anforderungen an die Fertigungsgenauigkeit stellen will, verwendet man beispielsweise eine Linearführung aus zwei Zylinder/Zylinder-Elementargelenken (1 x Flächenberührungen, 1 x Punktberührungen):

*Bild 3: Statisch bestimmte Führung; $F=6(2-1-2)+2+5=1$*

Es fällt auf, dass für $F=1$ die Summe der Gelenkbeweglichkeiten ungerade sein muss. Daher ist es nicht ohne weiteres möglich, eine Führung mit $F=1$ aus zwei identischen Elementargelenken aufzubauen. Das hindert jedoch viele Konstrukteure nicht daran, es trotzdem zu tun (oft sogar aus guten Gründen).

Eine solche in der Praxis gebräuchliche Art der Führung ist in Bild 4 dargestellt:

*Bild 4: Führung aus zwei Schiebehülsen*

Die Berechnung des Freiheitsgrades ergibt hier zunächst $F=6(2-1-2)+4 = -2$, d. h. die Führung dürfte sich überhaupt nicht bewegen lassen. Um zu $F=1$ zu kommen, sind deshalb noch drei sogenannte Sonderabmessungen zu erfüllen:

- die Stangen müssen zueinander parallel sein
- die Hülsen müssen zueinander parallel sein
- der Abstand der Stangen im Gestell muss dem Abstand der Hülsen im Schlitten entsprechen.

Diese Bedingungen müssen entweder bei der Konstruktion (Selbsteinstellung/Vorsehen von federnden Elementen), bei der Fertigung (Anpassen/Einhaltung einer entsprechenden Genauigkeit) oder bei der Montage (Justieren/verspannungsfreier Zusammenbau in der

richtigen Position) erfüllt werden. Für den Betrieb einer solcherart überbestimmten Führung ergeben sich eventuell Einschränkungen z. B. durch Verspannung in Folge von Wärmedehnungen.

Reibung und Selbsthemmung

Bild 5 zeigt einen Körper, der von einer Kraft F auf eine Unterlage gedrückt wird. Diese teilt sich in eine Normalkomponente F_n und eine Tangentialkomponente F_t auf. Ist das Verhältnis von Normal- zu Tangentialkraft ausreichend groß, so befindet sich der Kraftvektor innerhalb des sogenannten Reibungskegels und der Körper bleibt in Ruhe, d. h. es tritt Selbsthemmung auf. Der Öffnungswinkel des Reibungskegels wird durch das Verhältnis von Tangential- zu Normalkraft bestimmt, bei dem sich der Körper in Bewegung setzt. Dieses Verhältnis heißt Haftreibwert μ_0 .

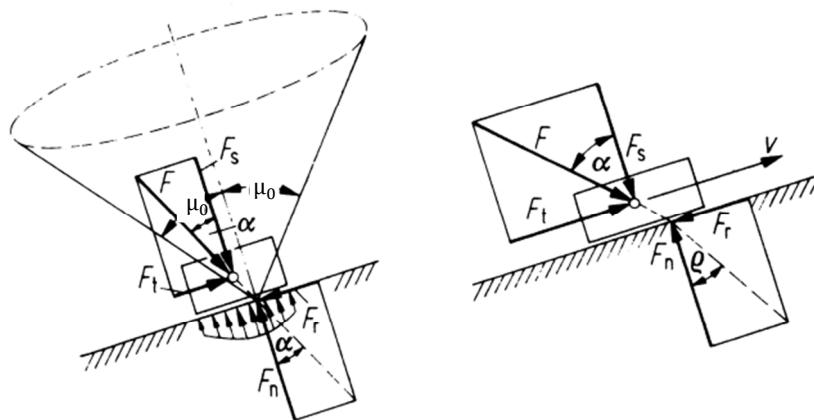


Bild 5: Haftung und Gleitreibung

Wird der Körper bewegt, so liegt der aus Normal- und Reibungskraft zusammengesetzte Kraftvektor genau auf dem Reibungskegel. Es ist zu beachten, dass der Öffnungswinkel des Reibungskegels je nach Geschwindigkeit unterschiedlich sein kann. Er wird definiert durch den Reibwert $\mu = F_r/F_n$.

Sämtliche Lagerungen weisen bei endlicher Relativgeschwindigkeit Reibung auf. Je nach Führungsart gibt es meist einen charakteristischen Zusammenhang zwischen Reibwert und Relativgeschwindigkeit, z. B.:

- bei Wälzlagern ist μ nahezu unabhängig von der Geschwindigkeit. Der Reibwert kann aber z. B. durch reichhaltige Schmierung bei hoher Geschwindigkeit nennenswert ansteigen (Strömungs-/Planschverluste).
- Luftlagerungen und hydrostatische Lagerungen haben im Stillstand $\mu_0=0$; bei zunehmender Verschiebegeschwindigkeit ergibt sich durch die Zähigkeit der Luft bzw. des Öls ein Reibungswiderstand. Zumindest bei Luftlagern ist dieser meist vernachlässigbar.

- Gleitlager benötigen im Stillstand zur Überwindung der Haftreibung meist eine Losbrechkraft, die größer als die Verschiebekraft ist: der Haftreibwert μ_0 ist größer als der Gleitreibwert μ .

In Bild 5 ist ein gleitgelagerter Schlitten mit außermittigem Antrieb gezeigt. Aus den Kräfte- und Momentengleichgewichten ergibt sich:

$$\sum F_x : F_{N1} = F_{N2};$$

$$\sum F_y : F = F_{R1} + F_{R2};$$

$$\sum M_z : F(e + \frac{b}{2}) = F_{N2} \cdot l + F_{R2} \cdot b$$

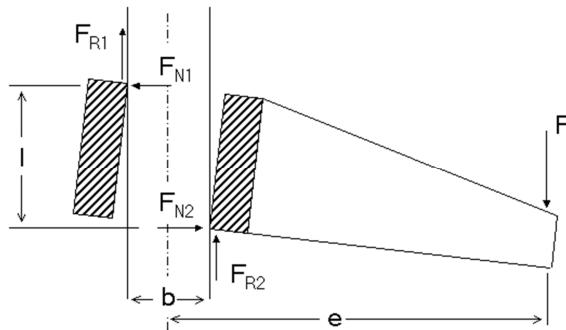


Bild 6: Schlitten mit außermittigem Antrieb

Es ist zu sehen, dass dieses Gleichungssystem noch nicht eindeutig lösbar ist. Jedoch können beide Kontaktstellen jeweils maximal eine Reibkraft $F_R = \mu \cdot F_N$ übertragen. Da die Normalkräfte F_{N1} und F_{N2} gleich groß sind, ist die maximal übertragbare Reibkraft $F_{R\text{ges}} = 2 \cdot \mu_0 \cdot F_N$. Wird F größer als diese Kraft, tritt Gleiten auf. Die Grenzbedingungen lauten somit:

$$F = 2 \cdot \mu_0 \cdot F_N$$

$$F(e + \frac{b}{2}) = F_N \cdot l + \mu_0 \cdot F_N \cdot b$$

und es ergibt sich:

$$l = 2 \cdot \mu_0 \cdot e.$$

Beim Bau eines exzentrisch angetriebenen Schlittens ist deshalb darauf zu achten, die Schlittenlänge l nicht zu kurz zu wählen. Um den Verschleiß zu vermindern, wird man in der Praxis l üblicherweise wesentlich länger wählen als nach obiger Formel berechnet. Weiterhin fällt auf, dass die Selbsthemmung unabhängig von der Breite b der Führung ist. Jeder wird aus eigener Erfahrung bestätigen können, dass sich eine schlecht gebaute Schublade verklemmen kann, obwohl der Griff in der Mitte ist.

Stick-Slip, Steifigkeit

Durch die besondere Reibcharakteristik von Gleitlagern ($\mu_0 > \mu$) kann es unter ungünstigen Bedingungen zum sog. Stick-Slip-Effekt kommen: Um einen gleitgelagerten Schlitten in Bewegung zu setzen, arbeitet der (endlich steife) Vorschubantrieb zunächst gegen die Haftreibung und verformt sich dabei, bis die Losbrechkraft erreicht ist. Durch die nun frei werdende mechanische Spannung des Vorschubantriebs wird der Schlitten beschleunigt. Wenn dabei die Kraft aus dem Vorschubantrieb zu weit zusammenbricht, kommt der Schlitten wieder vollständig zur Ruhe und der Vorgang wiederholt sich.

Dieser Effekt kann zu unerwünschten Schwingungen und nennenswerter Geräuschentwicklung führen. Ein einfaches Beispiel für Stick-Slip sind quietschende Türen oder das „Stottern“ alter Scheibenwischer. Die hohe Steifigkeit der auf Torsion beanspruchten Komponenten (Scharniere) führt zur hohen Frequenz dieser Anregung.

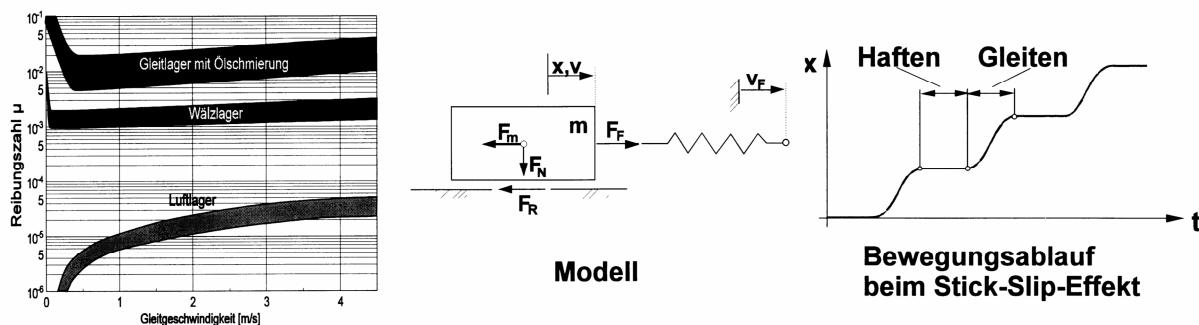


Bild 7: Reibung und Stick-Slip-Effekt

Stick-Slip lässt sich verringern durch:

- geringeren Reibwertabfall im Mischreibungsgebiet (Bereich des Übergangs von Haft- zu Gleitreibung, wenn noch kein vollständiger Schmierfilm aufgebaut ist), z. B. durch ein zäheres Schmiermittel
- höhere statische Steifigkeit des Vorschubantriebs
- geringere Massen

3 Ausprägungen im Versuch

Im folgenden Abschnitt werden Führungen gezeigt, wie sie in der Praxis des Maschinenbaus ausgeführt werden, bzw. solche, die als Systembauteile käuflich erhältlich sind. Dabei werden ihre Vor- und Nachteil angesprochen.

In einem weiteren Teil werden rotatorische Bewegungen, die der elektrische Motor des Druckers erzeugt, in lineare Bewegungen umsetzen. Mit den Komponenten Linearführung und Antrieb kann ein x-y-Tisch aufgebaut werden. Diese Bewegungsform eignet sich besonders für Drucker, die Matrixbilder erzeugen sollen.

Führungen in der Praxis

Je nach Einsatzfall ergeben sich unterschiedlichste Anforderungen an Präzision, Steifigkeit, mögliche Verfahrgeschwindigkeiten, Bauraum, etc., denen durch eine entsprechende Gestaltung Rechnung getragen werden muss.

Nachfolgend findet sich eine Aufstellung einiger praktischer Anforderungen und eine Liste gängiger Führungskonzepte. Die Darstellung beschränkt sich dabei, soweit nicht anders angegeben, auf Führungen für lineare Bewegungen; die meisten Kriterien gelten aber analog auch für rotatorische Führungen.

Kriterien an ein Führungssystem:

- Tragkraft
- Bauraum
- Steifigkeit
- Dämpfung
- Präzision
- Spielfreiheit/Einstellbarkeit
- Klemmbarkeit
- Verfahrgeschwindigkeit
- max. Verfahrweg
- Stick-Slip-Anfälligkeit
- Selbsthemmung
- Leichtgängigkeit/ μ -v-Verhalten
- Verschleiß/Langzeitverhalten/Störanfälligkeit
- Auswechselbarkeit
- Eignung für hochdynamische Anwendungen (Oszillation)
- Schmutzanfälligkeit
- Schmutzerzeugung/Kontamination der Umgebung
- Schmiermittelbedarf
- Kosten
- Schlupf
- Umkehrspiel
- Rückwirkungen auf die Führungsgenauigkeit: Die meisten Antriebe für axiale Bewegungen verursachen auch unerwünschte laterale Kräfte, die von den Führungen aufgefangen werden müssen. Beispielsweise haben viele Schraubstöcke eine leicht verbogene Gewindespindel, was dazu führt, dass die bewegliche Schraubstockbacke bei Drehung der Spindel sichtbar wackelt. Bei ausreichend hohen Anforderungen an die Genauigkeit kann zusätzlicher konstruktiver Aufwand nötig werden, um die

Übertragung derartiger unerwünschter Seitenbewegungen auf die Führungen auszuschließen.

Wichtige Typen von Führungen:

- Gleitführungen/hydrodynamische Lager
Verschiedenste Bauformen, z. B.: Schwalbenschwänze, Prismen, Rundführungen
Teilweise mit eingesetzten Gleitelementen (Bronze oder Kunststoffe)
Teilweise selbsttätige Nachstellung bei Verschleiß (Prismenführung)
Übliche Betriebsgeschwindigkeiten kleiner als bei Wälzführungen
Hohe Dämpfung und Genauigkeit

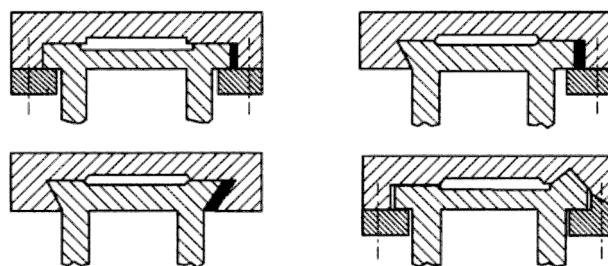


Bild 8: Einige Bauformen von Gleitführungen

- Wälzführungen
Bauformen z. B.: Kugelbüchsen, Kugel-/Rollenumlaufführung
Niedrige Reibwerte ($\mu=0,001\ldots0,004$), kaum Stick-Slip
Niedrige Dämpfung

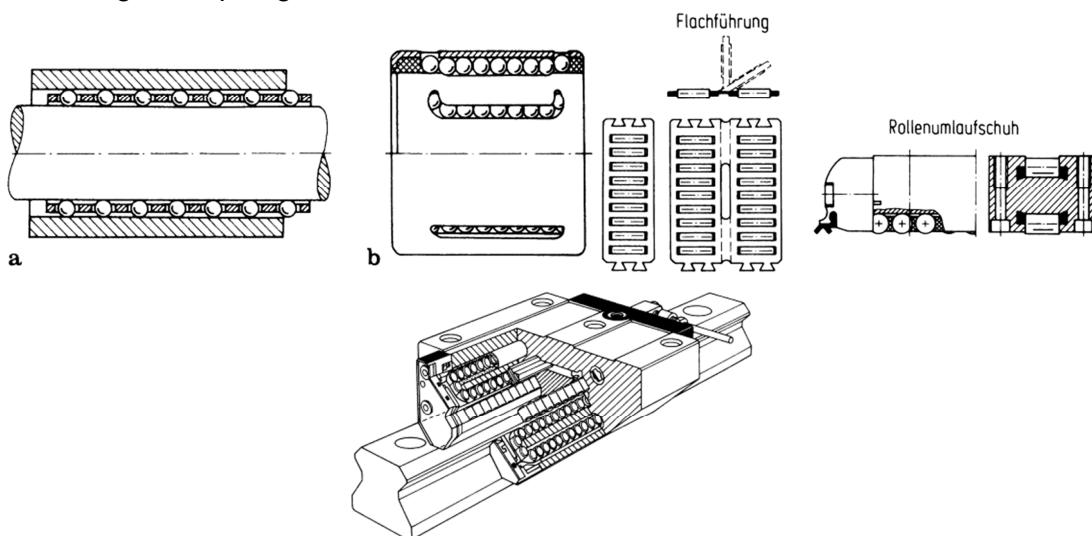


Bild 9: Wälzführungen: Kugelbüchsen (a: ohne, b: mit Kugelrückführung), Flachführungen, Rollenumlaufschuhe

- Aerostatische Lager (Luftlager)



Bild 10: Aerostatische Lager. Links: Planlager, rechts: Schlitten aus vier flächigen Lagerelementen

- Magnetlager

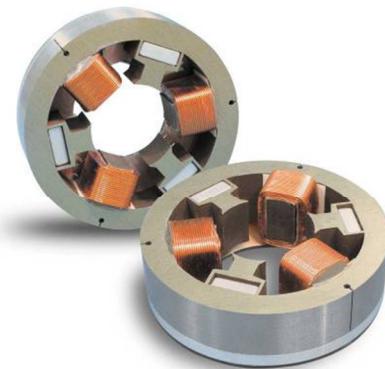


Bild 11: Magnetlager für Wellen

- Festkörpergelenke für translatorische Bewegungen (hier: x-y-Tisch)

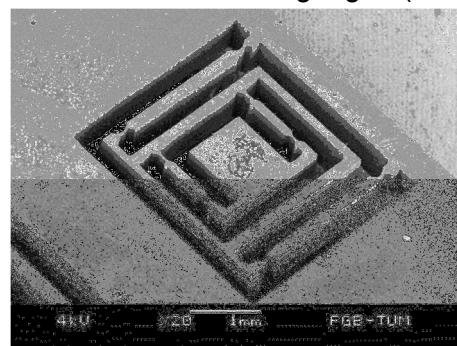


Bild 12: Am Lehrstuhl hergestellter x-y-Tisch für Bewegungen im Submikrometerbereich. Die einzelnen Teilbewegungen können z. B. mit Piezoelementen erzeugt werden.

- Gewindespindel (Normale Schrauben, Trapezgewindespindeln)

- Kugelumlaufspindel

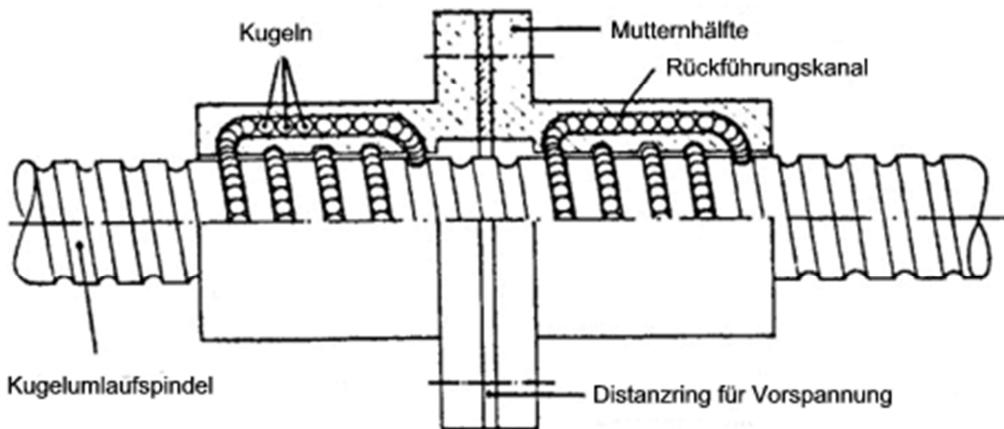


Bild 13: Schnitt durch eine - auf Grund von Vorspannung - spielfreie Kugelumlaufspindel

- Rollenumlaufspindel
- Rollringgetriebe (Erfinder: Fa. Uhing)

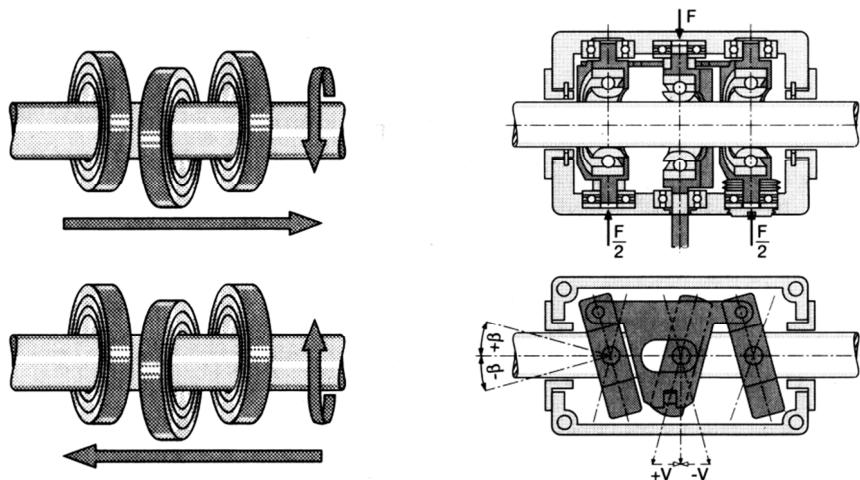


Bild 14: Prinzip (links) und technische Ausführung (rechts) eines Rollringgetriebes

- Flach-/Keilriemen
- Zahnriemen
- Zahnstange
- Direktantrieb-Linearmotor/Schraubengewinde-Reluktanzmotor
- Pneumatikzylinder
- Hydraulikzylinder
- Piezostriktiver Aktor
- Thermostriktiver Aktor
- Elektrostriktiver Aktor
- Magnetostriktiver Aktor

Spielfreiheit, Festkörpergelenke

Um trotz Fertigungstoleranzen eine leichtgängige Bewegung zu gewährleisten, haben die meisten Führungs- und Antriebselemente etwas Spiel. Durch den Spalt zwischen den einzelnen Bauteilen kann sich Schmiermittel verteilen und die Bewegung wird von kleinen Schmutzpartikeln weniger beeinträchtigt.

Unter Genauigkeitsaspekten ist dieses Spiel meistens störend und muss mit geeigneten Maßnahmen vermieden werden. Wie schon im Abschnitt „Statische Bestimmtheit“ angesprochen, bestehen hierfür die Möglichkeiten

- Anpassen
- Justieren
- Selbsteinstellung

Um dem nach einer gewissen Betriebszeit anfallenden Verschleiß entgegenwirken zu können, sind vor allem die beiden letzten Möglichkeiten geeignet. Beispiele für die spielfreie Lagerung einer Welle zeigt das Bild 15.

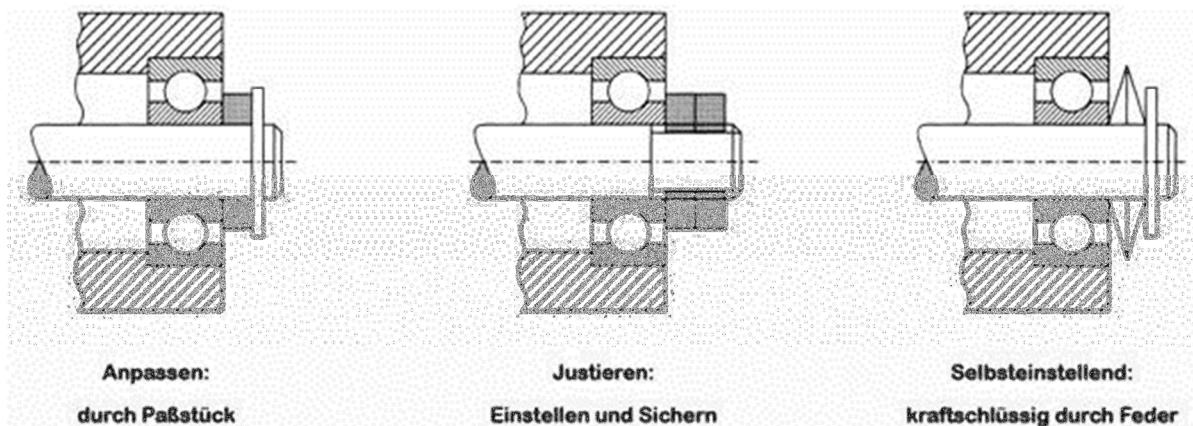


Bild 15: Spielfreie Lagerung einer Welle

Bei wälzgelagerten Führungselementen für Präzisionsanwendungen (Rollenumlaufführung, Kugelumlaufspindel etc.) wird die Spielfreiheit meist durch Anpassen erreicht. Die genau gefertigten Bauteile sind nach dem Zusammenbau um einige Mikrometer gegeneinander vorgespannt. Durch den im Vergleich zu Gleitführungen wesentlich geringeren Verschleiß bleibt die Vorspannung über eine lange Betriebsdauer erhalten.

Führungen auf der Basis von Festkörpergelenken (s. Bild 12) weisen prinzipbedingt kein Spiel auf. Das Gelenk kann entweder (wie im Bild gezeigt) zusammen mit der restlichen Mechanik aus einem Stück gefertigt werden, oder es werden federnde Bleche o. ä. verwendet.

Führungen aus Festkörpergelenken sind nicht nur spielfrei, sondern auch Stick-slip-frei und bei geeigneter Gestaltung in den anderen Koordinatenrichtungen sehr steif. Weitere Vorteile sind die geringe Masse, die Schmutzunempfindlichkeit und die einfache Herstellbarkeit. Nachteilig sind die geringe Dämpfung und die eingeschränkten Verschiebewege. Speziell im Bereich der Mikrotechnik werden häufig elektromechanische Komponenten aus Silizium hergestellt (z. B. Spiegelarrays für DLP-Videoprojektoren). Da Silizium als Einkristall keine

Gitterfehler aufweist, tritt hier auch keine Materialermüdung auf und die Lebensdauer solcher Bauteile ist praktisch unbegrenzt.

In Fällen, in denen die Rückstellkräfte von Festkörperlagern unerwünscht sind und nur Druckkräfte übertragen werden müssen, kommen häufig Schneidenlager zum Einsatz. Als sehr reibungsarme Lager werden sie z. B. in Präzisionswaagen eingesetzt. Linearführungen auf der Basis von Schneidenlagern sind aufgrund der nur einseitigen Kraftübertragung wenig gebräuchlich.

Prüfung von Führungen

Die nachfolgenden Bilder geben einen Überblick über gängige Prüfmethoden für die Genauigkeit von Führungen.

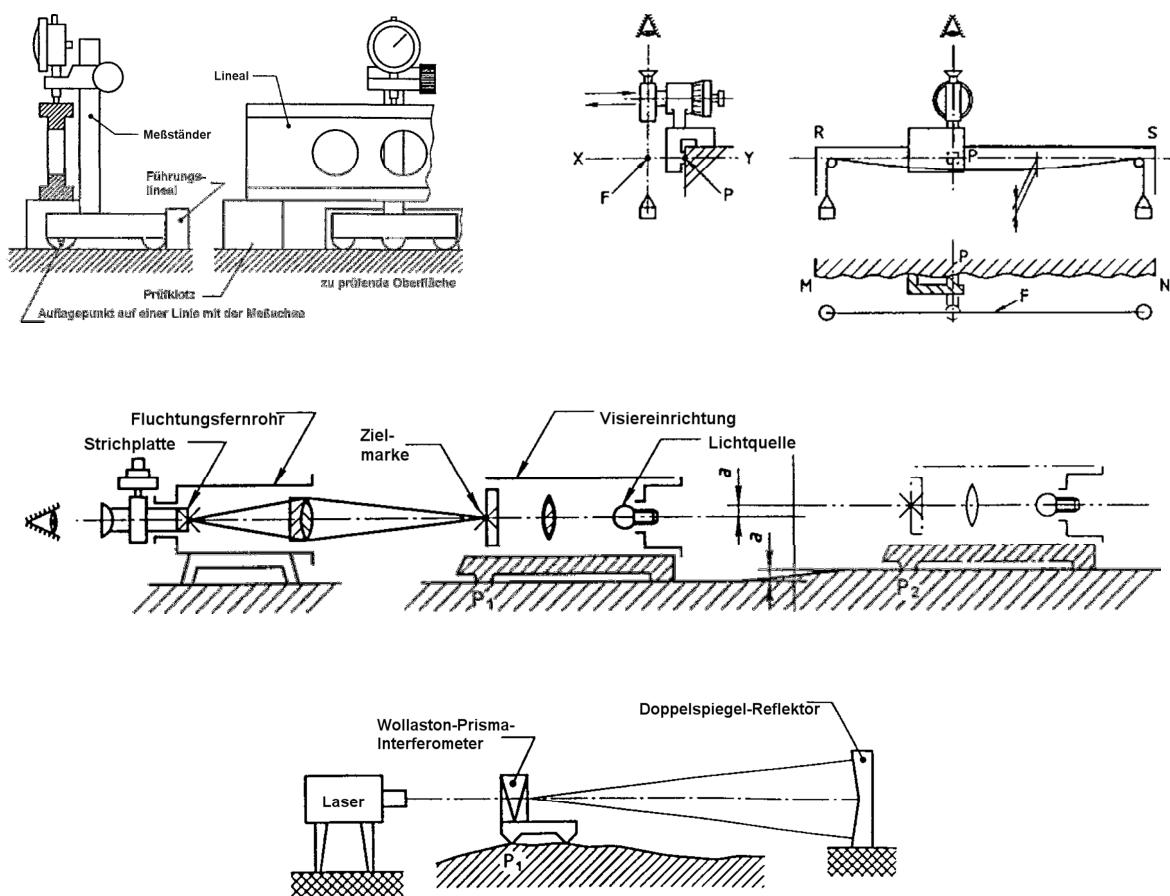


Bild 16: Prüfmethoden für Geradheit: Lineal, Spanndraht in Verbindung mit einem Messmikroskop, Fluchtungsfernrohr und Interferometer

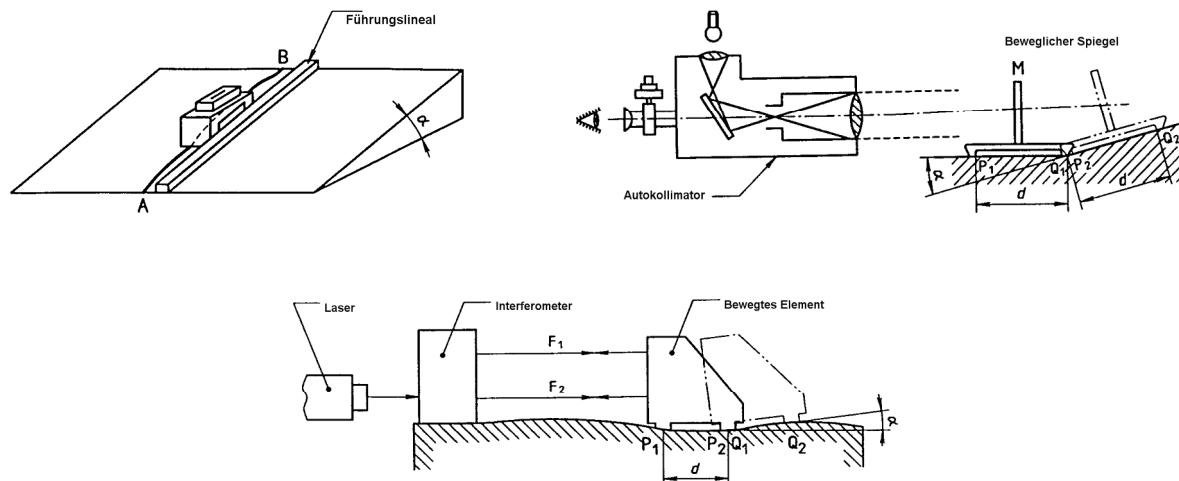


Bild 17: Prüfmethoden für Geradheit mittels Winkelmessung (schrittweise Abtasten der Messfläche im Abstand der Auflagepunkte): Neigungsmessgerät, Autokollimator, Interferometer

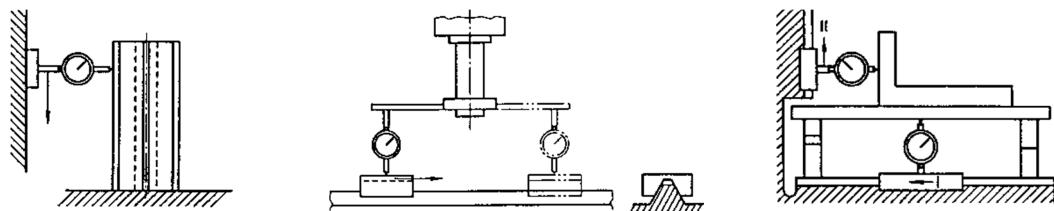


Bild 18: Prüfmethoden für Rechtwinkligkeit anhand eines Prüfzylinders, einer Drehachse oder eines Winkels

Eine umfassendere Zusammenstellung findet sich in der DIN/ISO 230-1 (Abnahmebedingungen für Werkzeugmaschinen). Es werden vor allem mechanische (Lineale, Messtaster, etc.) und optische Messverfahren behandelt. Ein hochgenaues Messverfahren, das einfach nachvollzogen werden kann, ist die Interferometrie.

4 Hausaufgaben

1. In von Hand bedienten Maschinen (z. B. Werkzeugfräsmaschinen, etc.) werden zum Antrieb der Schlitten meist normale Gewindespindeln (keine Kugelumlaufspindeln) eingesetzt. Ändert man die Drehrichtung der Spindel, so lässt sich diese durch das Spiel zwischen Spindel und Mutter ein kurzes Stück frei drehen, bevor sie den Schlitten wieder mitnimmt (Umkehrspiel, sogenannter „toter Gang“). Skizzieren Sie eine Konstruktion, wie ein solcher Gewindeantrieb spielfrei gestaltet werden könnte, so dass kein Umkehrspiel mehr auftritt.
2. Bei manuellen Drehmaschinen werden wegen der guten Dämpfung und Steifigkeit meist Gleitführungen eingesetzt. Können Sie sich denken, wieso die Führung des Z-Schlittens als Prismen- und nicht als Schwalbenschwanzführung realisiert wird?
3. Die meisten aktuellen CNC-Werkzeugmaschinen besitzen keine Gleitführungen, sondern Kugel- oder Rollenumlaufführungen. Was könnten die Gründe sein?
4. Sie haben eine Gewindespindel (normales metrisches Spitzgewinde) und eine Trapezgewindespindel mit gleichem Durchmesser, gleicher Steigung und aus gleichem Material. Die Gewindespindel ist gerade noch selbsthemmend. Ist die Trapezgewindespindel auch selbsthemmend oder nicht? Warum?

5. Gegeben ist eine Festkörpergelenkführung nach folgender Skizze:

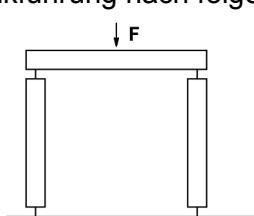


Bild 19: Schema der Festkörperführung

Alle Elemente der Führung bestehen aus dem gleichen Material. Die federnden Elemente sind 0,3 mm dick, 5 mm hoch und 20 mm tief (senkrecht zur Papierebene). Die beiden senkrechten Elemente haben einen Querschnitt von 10 mmx20 mm und sind 95 mm hoch. Der Abstand der Gelenkpunkte am Querbalken beträgt 100 mm; die Tiefe des Querbalkens 20 mm. Wie dick muss der Querbalken sein, damit er bei mittigem Kraftangriff und mittiger Messung die gleiche Steifigkeit hat wie die Verbindung des Balkens zum Fundament (die senkrechten Elemente aus je zwei Festkörpergelenken und einem Druckstab)? Verwenden Sie die Gleichungen für Druckstäbe bzw. für den Biegebalken die Gleichung für einen statisch bestimmt gelagerten Balken (Formelsammlung)!

5 Praktikumsaufgaben:

Um Aussagen über die Eignung des x-y-Tisches im Praktikum für einen Drucker zu bestimmen, sollen im Folgenden wichtige Kenngrößen der Führungen messtechnisch erfasst werden. Dazu werden der Tisch und sein Antrieb vermessen.

1. x-y-Tisch:

Der Praktikumstisch verfügt über runde Führungen (Silberstahl) mit Kugelbüchsen, um die Reibungskräfte zu senken. Die Antriebskraft der Schrittmotoren wird über einen Zahnriemen (Breite 9 mm) auf den Tisch übertragen. Der Durchmesser der Führungsstäbe beträgt 10 mm.

Vermessen Sie die Führungssteifigkeit:

a)

Die Belastungseinrichtung überträgt eine Zugkraft mittig auf den Tisch. Für deren quantitative Messung steht eine Waage zur Verfügung. Bringen Sie die Messuhr in einer sinnvollen Position am Tisch an! Überlegen Sie, welche Messfehler durch eine falsche Positionierung entstehen könnten!

b)

Belasten Sie nun den Tisch mit Kräften bis zu 100 N in 5-N-Schritten, indem Sie die Schraube der Belastungseinrichtung verstellen! Lesen Sie jeweils den Messwert an der Messuhr ab (Vergessen Sie nicht, die Messuhr zu Beginn der Messung zu nullen)! Tragen Sie alle Messwerte in eine Tabelle und ein Diagramm mit geeigneten Achsskalierungen ein!

c)

Interpretieren Sie Ihr Diagramm! Welche Kenngrößen können Sie daraus entnehmen? Betrachten Sie dazu sorgfältig die Konstruktion des Tisches!

Vermessung der Rechtwinkligkeit:

d)

Montieren Sie den Messwinkel auf der Grundplatte! Befestigen Sie die Messuhr in der Halterung für die x-Achse! Justieren Sie den Winkel so, dass die Messuhr beim Verfahren der x-Achse möglichst wenige Ausschläge zeigt! Der Messwinkel ist jetzt zum Tisch exakt positioniert. Benutzen Sie nun die Messuhr in der Halterung für die y-Achse! Ermitteln Sie durch definiertes Verschieben des Tisches den Winkel zwischen beiden Achsen!

Antriebssteifigkeit:

e)

Blockieren Sie den Motor mit der dafür vorgesehenen Klemmvorrichtung! Klappen Sie dazu die Belastungseinrichtung um! Bringen Sie die Messuhr in Position! Vermessen Sie wie in b) die Steifigkeit! Belasten Sie mit bis zu 100 N in 10-N-Schritten! Zeichnen Sie ebenso eine Tabelle und ein Diagramm!

f)

Lassen Sie die Blockade im Motor! Klappen Sie die Belastungseinrichtung um 180° um! Messen Sie Steifigkeit des Tisches nun in der anderen Richtung (Kurve in das vorhandene Diagramm eintragen)! Interpretieren Sie Ihre Ergebnisse!

6 Literatur

- Dubbel, „Taschenbuch für den Maschinenbau“, 20. Auflage, W. Beitz und K.-H. Grote, Springer 2001
- DIN-ISO 230-1 und ggf. 230-2,
- Vorlesungsskriptum „Feingerätebau“, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Prof. T. Lüth, 2006, TUM München
- Vorlesungsskriptum „Mikrotechnische Sensoren und Aktoren“, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Prof. T. Lüth, 2006, TUM München

7 Ergänzende Informationen

Der folgende Abschnitt fasst kurz einige weitere Erkenntnisse zusammen, die während der Durchführung des Praktikumsversuchs gewonnen werden können. Er ist für die Vorbereitung auf das Praktikum nicht relevant.

Längenmessungen allgemein: Um Fehler durch Winkelabweichungen möglichst klein zu halten, ist darauf zu achten, dass der Prüfling (die zu messende Länge) zur Maßverkörperung fluchtet (Abbe'sches Komparatorprinzip), siehe Bild 22.

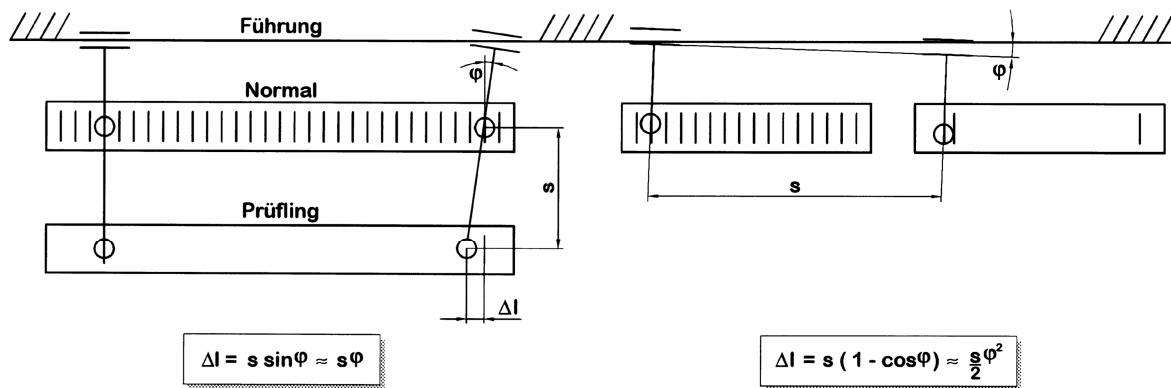


Bild 22: Abbe'sches Komparatorprinzip

Messung von Führungs- und Lagerspiel: Der Schlitten bzw. die Spindel wird durch ein Gewicht (oft reicht das Eigengewicht) oder eine weiche Feder vorgespannt. Wie bei der Steifigkeitsmessung wird die Verformung gemessen, die durch eine in entgegengesetzter

Richtung wirkende Kraft verursacht wird. Bei einer bestimmten Kraft ergibt sich ein Sprung in der Federkennlinie, der dem Lagerspiel entspricht.

Dabei ist u. a. auf Folgendes zu achten:

- Kraft- und Messrichtung sollten in einer Mittelebene durch die Führung/das Lager liegen.
- Wenn das Spiel einer Führung/eines Lagers im eingebauten Zustand gemessen werden soll, dürfen sich durch die anderen Führungen/Lager des Schlittens bzw. der Spindel keine Verspannungen ergeben, die das Messergebnis verfälschen.

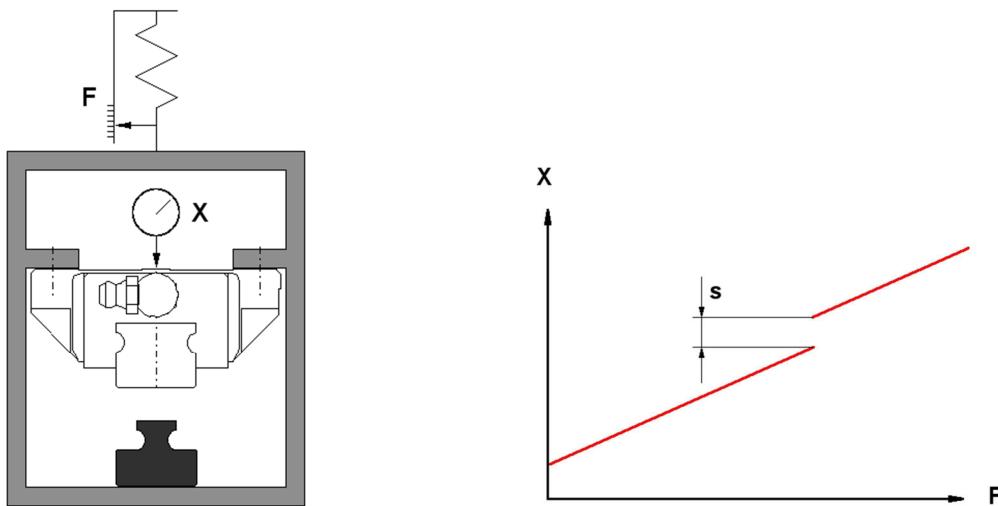


Bild 23: Messung des Führungsspiels

Konstruktion steifer Schraubverbindungen: Für die Steifigkeit (besonders die Kippsteifigkeit) einer Schraubverbindung ist nicht primär die Größe der Kontaktflächen bedeutsam, sondern die richtige Lage zum Kraftfluss. Statt einer großen Fläche (die aufgrund von Formabweichungen oder Verschmutzung die Kräfte über unvorhersehbar verteilte Berührpunkte überträgt) sind definierte Kontaktflächen im Bereich der Verbindungsschrauben vorzuziehen.

Verstelleinrichtungen im Sub- μ -Bereich: Auch mit einem üblichen „groben“ Gewinde lassen sich hochgenaue Wegverstellungen realisieren. Dabei wird der größte Teil des Schraubenweges im Schaft und in den Kontaktstellen der Schraube in elastische Verformung umgesetzt. Die Schraube spannt sich gegen einen steif gelagerten Körper, der die eigentliche Verstellbewegung ausführt.

Beschreibung zu Versuch Nr. 5:
Motorkonzepte

Michael Scheuenpflug, überarbeitet von Markus Kagerer, Wolfgang Büscher

1. Einordnung

Im vorangegangenen Versuch wurden unterschiedliche Führungen und Antriebskinematiken für den Praktikumsdrucker untersucht und ausgewählt. Um eine gezielte Ansteuerung der Bewegung des Druckers zu ermöglichen, soll in folgendem Praktikumstermin ein Antriebskonzept für die Bewegung des Druckkopfes untersucht und ausgewählt werden. Der Druckkopf in einem herkömmlichen Tintendrucker wird entlang seiner Führung auf einer Geraden über das zu druckende Papier bewegt. Die Bewegung des Vorschubs wird über die Transportwalze des Papiers ermöglicht. Im Falle des zu bauenden Wachsdruckers ist diese Trennung der Zustellbewegung in x- und y-Richtung nicht möglich. Der Druckkopf muss in zwei Dimensionen auf der Druckebene platziert werden können.

Für den Antrieb der bereits ausgewählten Kinematik ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, welche nach verschiedenen Kriterien eingeteilt werden können: Neben einer Bewegungseinteilung in linear bzw. rotatorisch wirkenden Stellgliedern können auch unterschiedliche physikalische Antriebskonzepte zum Einsatz kommen.

Bei der Antriebsauswahl müssen die Umweltbedingungen sowie die Anforderungen (Hub, Leistung etc.) an den Aktor berücksichtigt werden. Entscheidend für ein gutes Druckbild, sowohl bei kommerziellen Tintendruckern, als auch bei Sonderformen wie dem Wachsdrucker, ist eine hohe Auflösung. Hierzu sind die Erzeugung kleiner Tropfen sowie eine möglichst hohe Positioniergenauigkeit (auch Wiederholgenauigkeit) des Druckkopfs notwendig. Dabei tragen Eigenschaften wie eine hohe Steifigkeit der gesamten Anordnung ebenso zu einer exakten Positionierung bei, wie auch andere Eigenschaften, wie z. B. auftretender Schlupf in der Antriebskinematik. Auch Leistungsdefizite des Antriebsmotors verschlechtern das Druckergebnis.

Neben aller geforderter Präzision und Richtigkeit (Präzision + Richtigkeit =Genauigkeit) darf aber auch die maximale Geschwindigkeit der Verfahrachsen nicht signifikant beeinträchtigt werden. Gerade im Hinblick auf die dynamischen Eigenschaften gibt es zwei unterschiedliche Prinzipien der Positionsbestimmung und Überwachung der Verfahrachsen. Die externe Längenmessstechnik bringt den Vorteil einer sehr genauen und unverfälschten Messung, jedoch auch eine aufwendige Auswertung, zusätzliche Bauteile und stark erhöhte Kosten mit sich. Antriebskonzepte mit einer integrierten Lagebestimmung (z. B. über Drehratensensoren am Motor) hingegen zeigen sich anfälliger bei Störungen.

2. Theorie

Der Antrieb der Bewegungskinematik für den Wachsdrucker muss über einen Motor erfolgen. Da es sich hierbei nicht um einen Standardantrieb wie den Elektromotor handeln muss und eine Vielzahl unterschiedlicher Antriebsmöglichkeiten kommerziell verfügbar sind, ist die Bezeichnung **Aktor** für eine uneingeschränkte Auswahl an Antriebsmöglichkeiten besser geeignet.

Ein Antriebskonzept setzt sich in den meisten Fällen aus zwei funktionalen Gruppen zusammen; der Steuerung und dem oder den Aktoren.

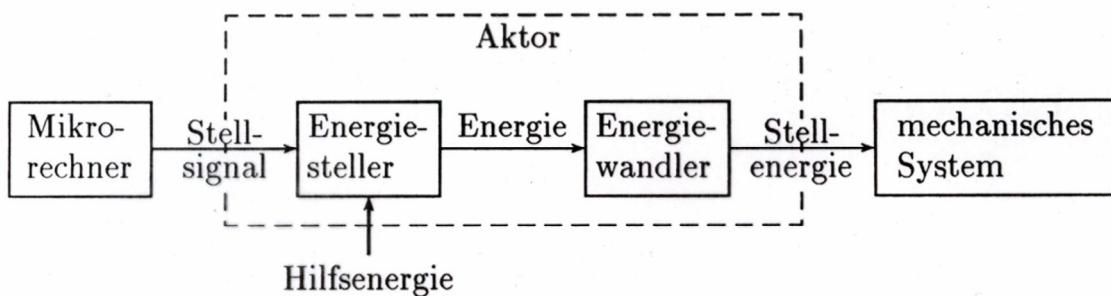


Bild 1: Blockschaltbild eines Aktors

Vergleicht man die Steuerung mit dem Gehirn eines Geräts, so sind die Aktoren die Muskeln. Die Vielfalt an realisierten Aktoren ist riesig. Es gibt standardisierte Baugruppen mit konventionellem Wandlerkonzept, z. B. für einfache Rotations- oder Translationsbewegungen bei Rechnerendgeräten, in der Handhabungstechnik oder im Kfz-Bereich ebenso wie Spezialentwicklungen, z. B. als Tropfenerzeuger in Tintendruckern, als hochgenaue Antriebseinheiten zur Ausrichtung tonnenschwerer Teleskope oder als Spiegel-Positioniereinheit zur Strahlablenkung in der Laserlithographie.

Bereits im allgemeinen Geräteschema ist zu erkennen: Der Aktor erhält eingangsseitig nur Information von der Steuerung, ausgangsseitig leistet er Arbeit und muss Energie abgeben. Hierzu muss er zusätzlich mit Energie versorgt werden. Hinter dem Aktor verbirgt sich also in jedem Fall mehr als nur der elektromechanische Wandler. Für eine Bewegungsaufgabe könnte es so aussehen: Ein oder mehrere Regelkreise, die Leistungselektronik, der eigentliche elektromechanische Wandler und die Mechanik zur Anpassung der Bewegung an die entsprechende Aufgabe im Prozess. Aus Information und Hilfsenergie wird damit elektrische Energie, die in mechanische Energie gewandelt und angepasst wird.

Ein typisches Aktorprinzip, das in der Mikrotechnik häufigen Einsatz findet, ist der Piezoaktor. Die charakteristischen Eigenschaften von Piezokeramik und die möglichen Bauformen von Aktoren aus Piezokeramik wurden in einem vorangegangenen Versuch 1 bereits untersucht. Piezoaktoren zeichnen sich durch sehr kleine Verstellbewegungen bei hohen Kräften, besonders in der Bauform als Stapelaktor, aus. Diesen Effekt macht man sich bei der Anwendung des Piezoaktors z. B. in einem Inchworm-Linearantrieb zu Nutze. Über

abwechselnde Klemm- und Schubbewegungen der Piezoaktoren wird eine Schubstange in linearer Richtung weiterbewegt.

Das quantitativ am häufigsten verwendete Aktorprinzip ist der oben bereits genannte Elektromotor. Dabei lassen sich mehrere Motortypen unterscheiden: Eine erste Unterscheidungsmöglichkeit bietet die Art der Energieversorgung (Wechsel- sowie Gleichstrommotoren).

2.1 Gleichstrommaschine

Unter einer Gleichstrommaschine versteht man einen Elektromotor, der mit Gleichstrom betrieben wird, oder einen Generator, der umgekehrt mechanische Energie in Gleichstrom wandelt. In einigen Anwendungsfällen kann ein Gerät auch beide Funktionen erfüllen.

Die Gleichstrommaschine besteht aus einem unbeweglichen Teil, dem Stator, und einem drehbar gelagerten Teil, dem Rotor. Die meisten Gleichstrommotoren sind als Innenläufer ausgeführt: der Rotor ist der innere Teil, der Stator der äußere. Beim Außenläufer ist es umgekehrt. Bei konventionellen Gleichstrommaschinen besteht der Stator aus einem Elektromagneten oder bei kleineren Maschinen einem Permanentmagneten. Der Rotor wird bei konventionellen Maschinen Anker genannt.

Zu den Vorteilen der Gleichstrommaschinen gehören ein gutes Anlaufverhalten und eine gute Regelbarkeit.

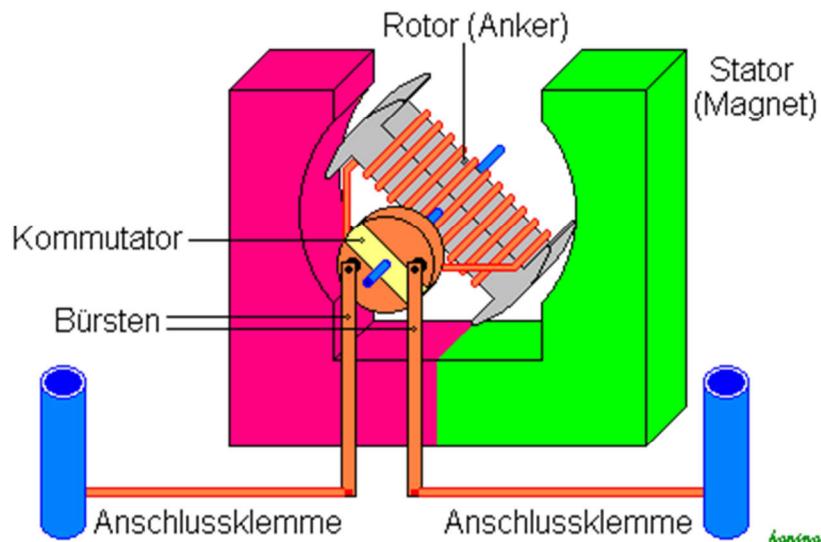


Abbildung 2: Schematische Darstellung einer Gleichstrommaschine

Die Wicklung des Ankers wird über den Kommutator angeschlossen. Die Kontakte („Bürsten“) des Kommutators sind so aufgebaut, dass sie während der Drehung ständig die Polung der Ankerwicklung wechseln. Sie sind aus einem Material gefertigt, welches gut elektrisch leitet, sich im Betrieb ein wenig abreibt und sich somit selber „schmiert“ (meistens enthalten sie Graphit- und Kupferstaub). Somit ist beim Gleichstrommotor die Drehbewegung

gewährleistet. Beim Generator wird durch die Funktion des Kommutators aus dem Wechselstrom des Rotors Gleichstrom.

2.2 Typen von Gleichstrommotoren

Nach der Art der Schaltung von Rotor und Statorwicklung unterscheidet man:

- Die Reihenschlussmaschine

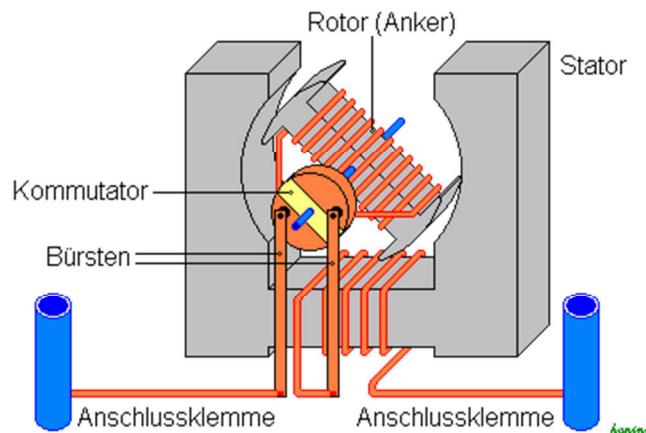


Abbildung 3: Reihenschlussmaschine

Die Reihenschlussmaschine ist eine Abwandlung des Gleichstrommotors zur Nutzung von Wechselstrom. Hier sind Erregerwicklung und Ankerwicklung in Reihe geschaltet. Dadurch wechseln Erregerfeld und Ankerstrom ihre Richtung synchron, so dass eine Speisung mit Wechselstrom möglich wird. Solche Maschinen werden als Bahnantriebe in Wechselstromnetzen eingesetzt. Unter dem Begriff Universalmotor oder Allstrommotor werden die Antriebe von Haushaltmaschinen, Bohrmaschinen etc. zusammengefasst.

Die Drehzahl von Reihenschlussmotoren ist stark lastabhängig. Sinkt das abgegebene Drehmoment, so steigt wegen des geringeren Stroms und der damit einhergehenden Feldschwächung die Drehzahl des Ankers. Das kann so weit führen, dass der Motor „durchgeht“, was bedeutet, dass sich der Motor wegen der auftretenden Fliehkräfte selbst zerstört. Deshalb sollten Reihenschlussmotoren mit einer Grundlast (Motorlüfter, Getriebe etc.) betrieben werden.

- Die Nebenschlussmaschine.

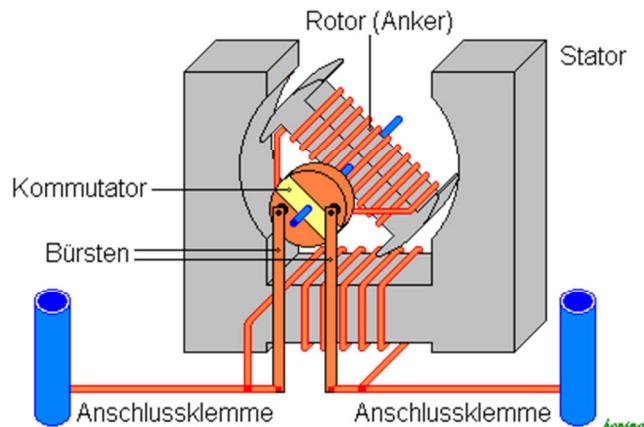


Abbildung 4: Nebenschlussmaschine

Bei der Nebenschlussmaschine sind Erreger- und Ankerwicklung parallel geschaltet. Ein Wechselspannungsbetrieb ist nicht üblich, da hierfür Erreger- und Ankerstrom in Phase sein müssten, d. h. Anker- und Erregerwicklung gleiche Induktivität (und Widerstand) haben müssen. Oft wird nicht zwischen Nebenschluss- und fremderregter Maschine unterschieden und dabei übersehen, dass eine Verringerung der Ankerspannung zu einer Feldschwächung führt. Nebenschlussmotoren können bei Unterbrechung des Erregerkreises durchgehen.

- Glockenanker-Maschinen.



Abbildung 5: Vorderansicht eines Rotors einer Glockenanker-Maschine der Firma „Maxon motor AG“

Kleine Maschinen bis etwa 100 Watt mit Permanentmagnet können auch mit einem hohlen Rotor gebaut werden. Der Rotor ist eisenlos selbsttragend gewickelt und kunstharzgetränkt. So wird das Trägheitsmoment des Rotors verringert und der Motor kann schneller beschleunigen.

Der Stator, ein Permanentmagnet, liegt in diesem Fall innerhalb des Rotors. Das außen liegende Motorgehäuse aus Eisen bildet den notwendigen Rückschluss für den magnetischen Fluss des Stators. Der elektrische Aufbau entspricht der ersten Illustration.

Durch den eisenlosen Aufbau des Rotors bildet der Motor kein Rastmoment aus, er lässt sich vollkommen frei drehen.

Da im Gegensatz zu allen anderen Motoren im Betrieb keine Eisenteile ummagnetisiert werden müssen, ist dieser Motor frei von Eisenverlusten und erreicht dadurch höhere Wirkungsgrade.

Der Scheibenläufermotor ist ähnlich aufgebaut, allerdings ist die Wicklung nicht in Form eines Zylinders sondern als Scheibe ausgeführt.

2.3 Phänomene beim Gleichstrommotor

- Ankerrückwirkung

Da der Anker stromdurchflossen ist, bildet sich auch um diesen ein magnetisches Feld. Dieses verstärkt das Hauptfeld auf der einen Seite des Leiters und schwächt es auf der anderen. Insgesamt führt dies dazu, dass sich der neutrale Bereich, in dem die Polung des Stromes umgeschaltet werden muss, etwas verspätet, d. h. er verschiebt sich in Drehrichtung. Da sich jedoch der Kommutator nicht anpasst (also stets senkrecht zu den Hauptfeldlinien umschaltet und nicht senkrecht zu den „effektiven“ Feldlinien), liegt zu dem Zeitpunkt des Umschaltens noch eine Induktionsspannung an den Kohlebürsten an und es kommt zur Funkenbildung, dem Bürstenfeuer.

- Gegenspannung

Der Rotor dreht sich im Motor innerhalb des Statorfeldes. Nach dem Generatorprinzip wird so in der Spule eine Spannung induziert. Diese induzierte Spannung wirkt der angelegten Netzbetriebsspannung und somit auch dem Rotorstrom entgegen, daher der Name Gegenspannung.

$\text{Rotorstrom} = (\text{Betriebsspannung} - \text{Gegenspannung}) / \text{Rotorwiderstand}$

Die Gegenspannung ist abhängig von der Drehzahl des Rotors. Bei Motorstillstand gibt es also keine Gegenspannung. Deshalb liegt an der Rotorspule die volle Betriebsspannung. Der Widerstand der Rotorspulen ist sehr klein und somit der Strom im Moment des Einschaltens sehr groß, ohne Begrenzung des Anlaufstromes würde also die Rotorspule zerstört werden.

Drehzahl = Null; Gegenspannung = Null; Betriebsspannung = Spannung an der Rotorspule; Strom der Rotorspule sehr hoch.

Der Anlaufwiderstand wird in Reihe zur Rotorspule geschaltet. Nach dem Hochlaufen wird dann der Anlaufwiderstand bis auf Null reduziert.

2.4 Wechselstrommaschinen

Wechselstrommaschinen unterscheiden sich in Synchron- und Asynchronmaschinen.

Eine Drehstrom-Asynchronmaschine, auch Induktionsmaschine, Asynchronmotor oder Kurzschlussläufer (engl. Squirrel Cage Motor) genannt, ist ein häufig verwendeteter Elektromotor, der mit Drehstrom betrieben wird. Bei der Asynchronmaschine ist die Drehzahl des Läufers im Motorbetrieb geringer als die Drehzahl des antreibenden elektromagnetischen Drehfeldes, d. h. der Läufer rotiert asynchron zum Drehfeld. Im Generatorbetrieb rotiert der Läufer schneller als das Magnetfeld und speist so Energie in das Netz ein.

Asynchronmotor: Aufbau und Funktionsweise

Der Ständer oder Stator besteht aus dem Gehäuse, dem Ständerblechpaket und der darin eingelegten Ständerwicklung.

Die für die Spannungsinduktion bzw. den Läuferstrom erforderliche Magnetflussänderung wird vom Ständer durch ein umlaufendes Drehfeld erzeugt. Elektrisch gesehen ist eine Asynchronmaschine ein kurzgeschlossener Drehstrom-Transformator mit Luftspalt, dessen Sekundärwicklung (der Rotor) drehbar gelagert ist.

Die Rotordrehzahl ist um die Schlupfdrehzahl gegenüber dem netzsynchronen Statordrehfeld verringert; dies ist bei Belastung erforderlich, um den Rotorstrom und dessen Feld zu erhalten, sodass mechanische Leistung abgegeben werden kann. Bei Motorleerlauf ist die Schlupfdrehzahl sehr niedrig. Sie muss nur zur Deckung der Lagerreibungsverluste, des wegen der sehr niedrigen Frequenz (etwa 1 % der Netzfrequenz) geringen Käfigwicklungs-Stromes und der ebenfalls sehr geringen Verluste im Rotorblechpaket (sehr niedrige Magnetisierung und niedrige Frequenz) ausreichen. Der Läufer kann immer nur eine kleinere Drehzahl annehmen, als die Synchrondrehzahl des Netzes vorgibt (bei Motorbetrieb, als Generator: Läuferdrehzahl größer als Netzdrehzahl), darum auch der Name Asynchronmaschine.

Dadurch, dass bei der Asynchronmaschine der Rotorstrom durch Induktion erzeugt wird und nicht wie bei der Synchronmaschine durch die Erregerwicklung oder einen Permanentmagneten, wird sie gelegentlich auch Induktionsmaschine genannt.

Die Drehmomenten- über Drehzahlkennlinie ist im Anlaufbereich bei diesem Motorprinzip sehr ungünstig. Der Motor ist nicht in der Lage, unter vollem Lastmoment anzulaufen. Er muss mit geringer Last auf etwa 90 % der Nenndrehzahl hochfahren, ehe er ein nennenswertes Drehmoment abgeben kann. Dieser Nachteil führte zunächst zur Entwicklung des Schleifringläufers, bei dem an extra angebrachten Rotorschleifringen zusätzliche Widerstände von außen an die gewickelte Rotorwicklung zwischen die drei Außenleiter spannungen geschaltet werden, um so das maximale Drehmoment auch schon bei der Drehzahl 0 zu erreichen.

Die Widerstände werden nur als Anlaufhilfe benötigt, sie werden nach dem Erreichen der Nenndrehzahl durch Kurzschluss der Schleifringe ausgeschaltet.

Später wurde dann der Kurzschlussläufermotor entwickelt, dessen Rotor aus einem gebleichten Eisenkernläufer besteht, der seine „Wicklung“ mittels Aluminium-Druckguss in vorhandenen Bohrungen erhält. Die Kurzschlusswicklung ähnelt einem Hamsterlauftrad (englisch „squirrel cage motor“), daher die Bezeichnung Käfigläufermotor. Bei großen Leistungen wird die Käfigwicklung aus Kupfer- oder Bronzestäben aufgebaut, die stirnseitig in Kurzschlussringen verlötet werden.

Synchronmotor:

Eine Drehstrom-Synchronmaschine ist ein Elektromotor, der mit Drehstrom betrieben wird, oder ein Generator, der Drehstrom erzeugt. Sie kann aber auch zur Blindleistungskompensation verwendet werden.

Die Maschine besitzt eine Außenwicklung (Statorwicklung), die ein magnetisches Drehfeld erzeugt bzw. in welcher elektrischer Strom erzeugt wird. Der Rotor (Polrad) trägt zur Felderzeugung entweder Permanentmagnete oder eine Erregerwicklung. Im zweiten Fall werden zwar Schleifkontakte notwendig, über die jedoch nur ein vergleichsweise kleiner Strom fließt und im Gegensatz zur Gleichstrommaschine nicht kommutiert wird, so dass das Bürstenfeuer mit all seinen Konsequenzen für die Lebensdauer entfällt.

Bei schnelllaufenden großen Turbogeneratoren u. a. in Dampfkraftwerken sind auch schleifringlose Erregungen über Außenpol-Synchrongeneratoren und mitrotierende Gleichrichter (sog. RG-Sätze) Stand der Technik. Synchronmotoren sind permanent- oder gleichstromerregte Drehfeldmaschinen, bei denen die Drehzahl gleich der Wechselspannungsfrequenz, geteilt durch die halbe Polzahl des Rotors, ist.

Über die Frequenz des zugeführten Wechselstroms ist die Drehzahl des Synchronmotors exakt und winkelgenau regelbar. Ein Winkelgeber überprüft ständig die tatsächliche Motorstellung und somit die tatsächliche Drehfrequenz. Bei starker Belastung hängt der Motor dem Soll-Phasenwinkel geringfügig hinterher. Um einen Synchronmotor stufenlos in der Drehzahl regeln zu können, muss ein Frequenzumrichter verwendet werden.

Die Synchronmaschine hat im Unterschied zur Drehstrom-Asynchronmaschine keinen Schlupf. Bei der Synchronmaschine ist die Drehzahl des Läufers gleich der Drehzahl des elektromagnetischen Drehfeldes, das heißt, der Läufer rotiert synchron zum Drehfeld. Deshalb wird im Rotor keine Spannung induziert.

Schrittmotor:

Schrittmotoren als weiteres Elektromotormodell können als eine Sonderform der Synchronmaschine betrachtet werden.

Die auf dem Markt befindlichen Schrittmotoren lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine Gruppe bilden die permanentmagnetisch erregten Motoren, welche durch einen Permanentmagneten im Rotor gekennzeichnet sind. Die andere Gruppe sind die Reluktanzmotoren, die ohne Permanentmagneten auskommen.

Das Prinzip und die wichtigsten Eigenschaften beider Gruppen werden im Folgenden kurz beschrieben. Eine umfangreichere Darstellung findet sich in der zahlreichen Literatur über Schrittmotoren.

Der Reluktanzmotor

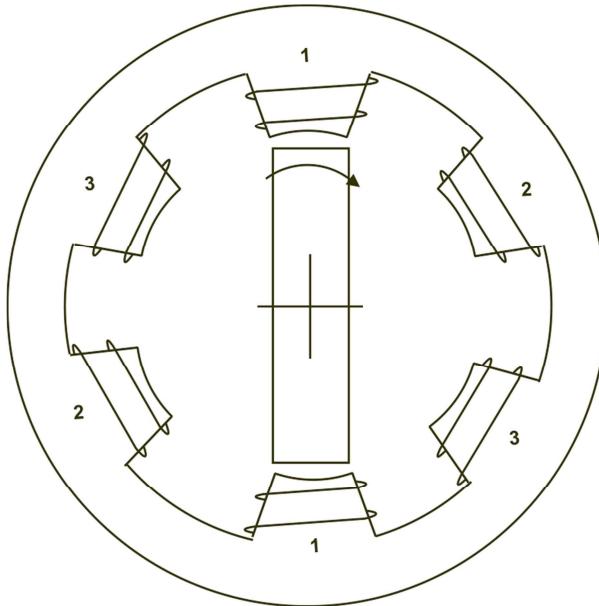


Abbildung 6: Reluktanzschrittmotor

Das Reluktanzprinzip ist das älteste beim Bau von Schrittmotoren eingesetzte Prinzip. Obwohl das Prinzipmuster solcher Motoren bereits Anfang des letzten Jahrhunderts entwickelt wurden, kamen Reluktanzmotoren, als erste Schrittmotoren, erst Ende der 50er Jahre, mit der steigenden Bedeutung der Digitaltechnik, auf den Markt. Das Prinzip des Reluktanzmotors ist sehr einfach. Der Rotor besteht aus weichmagnetischem Material (z. B. Weicheisen). Der Stator hat wenigstens drei Wicklungen deren Polschuhe sich gegenüberstehen. *Abbildung 6* zeigt einen Radialschnitt. Wird eine Phase bestromt, so wird das Eisen von den Polen des Elektromagneten angezogen und richtet sich nach den magnetischen Feldlinien aus. In dieser Stellung ist dann der Widerstand des magnetischen Kreises, die Rekluntanz, am geringsten. Werden die Wicklungen in den bezeichneten Abfolgen bestromt, so führt der Rotor eine kontinuierliche Drehbewegung aus. Charakteristisch für den Reluktanzmotor ist, dass die Richtung der Bestromung nicht geändert werden muss, und der Motor deshalb mit einer einfachen Ansteuerelektronik auskommt. Beim Reluktanzprinzip können auf einfacherem Wege sehr kleine Schrittewinkel erreicht werden. Ihr Wirkungsgrad ist aber schlechter als bei permanentmagnetisch erregten Motoren. Dies liegt daran, dass der Rotor erst durch das Statorfeld magnetisiert wird. Die Magnetisierungsenergie für den Rotor muss daher zusätzlich von außen zugeführt werden. Trotz seines niedrigen Preises und der einfachen Ansteuerung ist infolge dieses Nachteils der Marktanteil des Reluktanzmotors am abnehmen. Er wird deshalb im Praktikum nicht untersucht.

Der heteropolar permanentmagnetisch erregte Schrittmotor

Der Rotor eines solchen Motors besteht aus einem hartmagnetischen Material (z. B. Ferrit). Entlang des Umfangs wechseln magnetische Nord- und Südpole einander ab. Der Stator wird wieder durch die Polschuhe der von den Wicklungen gebildeten Elektromagneten und durch den magnetischen Rückschluss gebildet. Der Schnitt in *Abbildung 7* zeigt schematisch einen solchen Motor mit einem Polpaar am Rotor. Um den Motor in Drehung zu versetzen werden die beiden Phasen zunächst nacheinander in einer Richtung bestromt. Das gleiche folgt dann mit der umgekehrten Stromrichtung. Der zweiphasige Motor kennt also vier elektromagnetisch unterscheidbare Zustände.

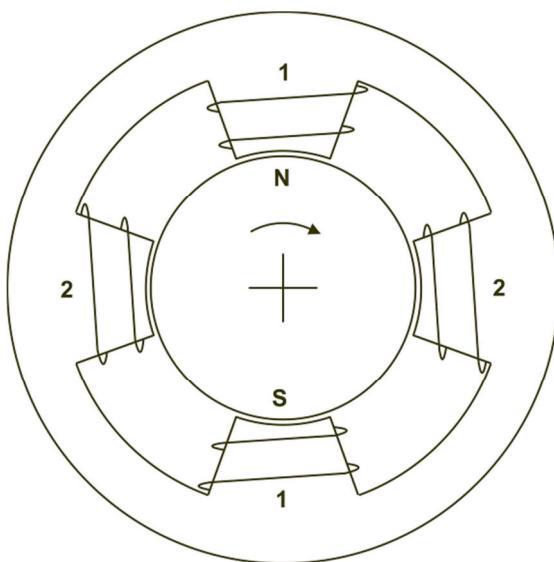


Abbildung 7: heteropolar permanentmagnetischer Schrittmotor

Um den Schrittewinkel eines solchen Motors zu verkleinern, muss die Anzahl der Polpaare am Rotorumfang erhöht werden. Die Tatsache, dass dabei die Mitten der Pole immer weiter zusammenrücken führt bei der Herstellung des Magneten bald zu Magnetisierungsproblemen. Schrittmotoren dieser Bauart haben deshalb kaum Schrittewinkel unter 5 °.

Großer Verbreitung erfreut sich der nach diesem Prinzip arbeitende Klauenpolschrittmotor. Dies ist eine Folge seiner fertigungs- und montagefreundlichen Konstruktion, die einen besonders niedrigen Preis ermöglicht. Der aus massivem Blech gefertigte Stator bedingt jedoch große Hysterese- und vor allem Wirbelstromverluste, die den Einsatz bei hohen Schrittfrequenzen unmöglich machen.

Der homopolar permanentmagnetisch erregte Schrittmotor

Dieser Motor ist aus der Idee heraus entstanden, den Wirkungsgrad und den zweiphasigen Aufbau, der durch den Einsatz des Permanentmagneten möglich wird, mit dem geringen Schrittewinkel des Reluktanzmotors zu verbinden. Da dieser Motor beide, permanentmagnetisches und Reluktanzprinzip, vereinigt, wird er oft auch als Hybridmotor bezeichnet.

Der Rotor dieses Motortyps besteht aus zwei genuteten ferromagnetischen Scheiben, die zusammen mit einem dazwischen befindlichen, in axialer Richtung magnetisierten ringförmigen Permanentmagneten auf eine Welle aufgepresst werden. Dadurch entstehen zwischen Stator und Rotor zwei Luftspaltbereiche mit homopolarer Erregung. *Abbildung 8* und *Abbildung 9* zeigt schematisch den mechanischen Aufbau. Die hintere Rotorscheibe ist dabei gegen die vordere um eine halbe Teilung versetzt. Ist nun die erste Spule (Index 1) vorwärts bestromt, so stellen sich am Stator die magnetischen Pole wie gezeichnet ein. Der Rotor stellt sich nun so ein, dass die Zähne der Nordscheibe den Stator Südpolen, und die Zähne der Südscheibe den Stator Nordpolen gegenüberstehen. Wird nun die zweite Spule vorwärts bestromt, so stellt sich derselbe Zustand für die mit zwei indizierten Statorpole ein. Der Rotor rückt also einen Schritt weiter. Kehrt man den Strom nun zunächst in Phase eins und dann in Phase zwei um, so rückt der Rotor weitere zwei Schritte fort.

Die Abfolge der Bestromung und deren Richtung unterscheiden sich also in keiner Weise vom heteropolaren Motor. Die Ansteuerung ist also völlig gleich. Schrittmotoren nach dem Hybridprinzip werden heute für Schrittinkel bis herunter zu $0,9^\circ$ gebaut. Da sie durch ihre gebleichte Ausführung des Eisenkreises relativ geringe Wirbelstromverluste aufweisen, sind sie, besonders im Bereich mittlerer und höherer Schrittfrequenzen, sehr häufig anzutreffen. Ihr Wirkungsgrad ist wesentlich besser als der des Reluktanzmotors, erreicht aber nicht den des heteropolaren permanentmagnetischen Motors.

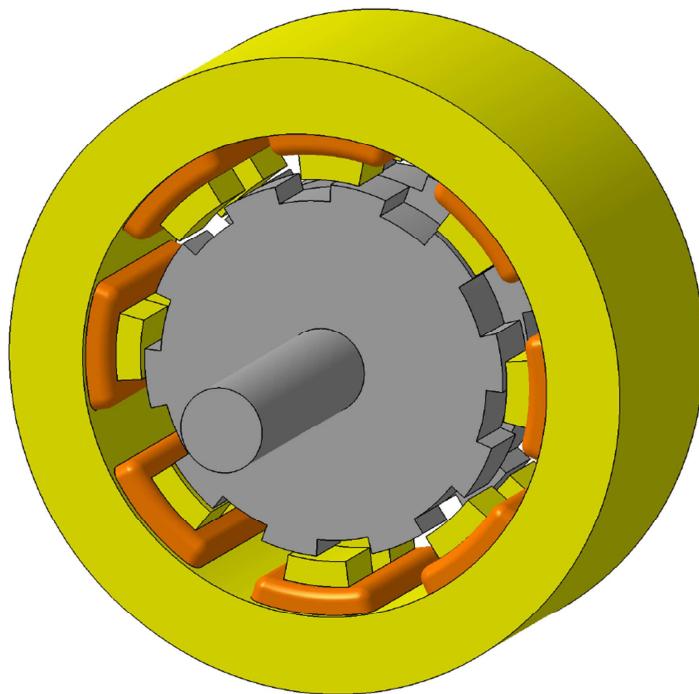


Abbildung 8: Der homopolare permanentmagnetische Schrittmotor

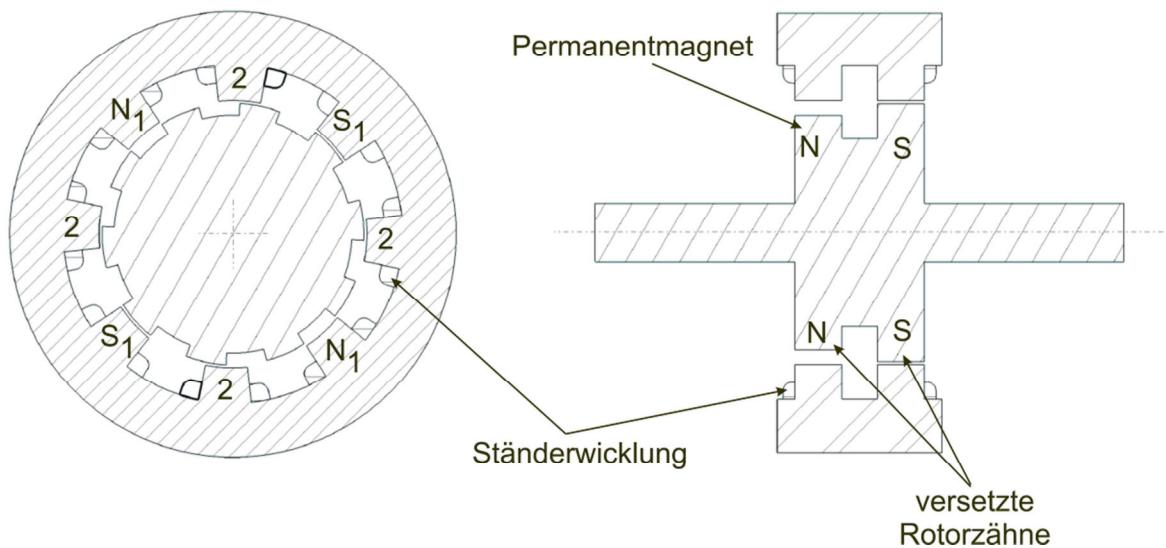


Abbildung 9: homopolarer permanentmagnetischer Schrittmotor im Schnitt

3 Ausprägung im Versuch

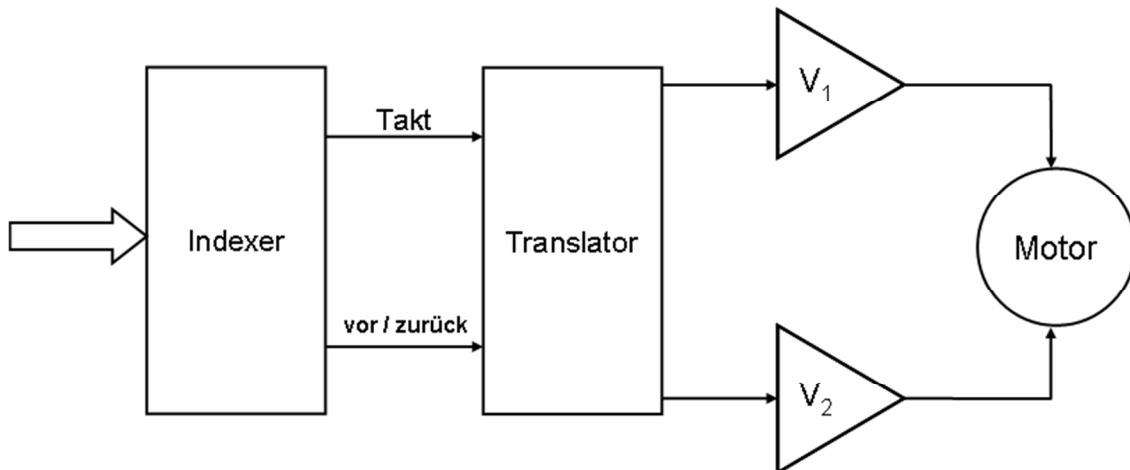


Abbildung 10: Blockschaltbild einer Schrittmotorsteuerung

Im Rahmen dieses Versuchs wird ein Schrittantrieb mit einem zweiphasigen Hybridmotor im gesteuerten Betrieb untersucht. Das bedeutet, dass die elektrischen Größen an den Motorwicklungen von einer Steuerung nach einem starren zeitlichen Raster vorgegeben werden. Die Alternative dazu ist eine Regelung, bei der die zeitliche Abfolge durch die Bewegung des Motors selbst gesteuert wird (Selbststeuerung).

Die Aufgabe einer Steuerelektronik für Schrittmotoren besteht darin, die Schritte in einer für die Positionieraufgabe geeigneten Zeitfolge vorzugeben, und über Leistungsverstärker die Motorwicklungen zu bestromen. Abbildung 10 zeigt ein Blockschaltbild einer solchen Steuerung.

3.1 Signalelektronik

Zur Signalelektronik gehören der Indexer und der Translator. Der Indexer gibt abhängig von einem Positionierbefehl (z. B. „Drehe schnellstmöglich 100 Schritte nach rechts“) an seinem Eingang die nötigen Schrittimpulse und ein Richtungssignal am Ausgang aus. Der Translator übersetzt diese in Signale, die die Bestromungsrichtung der Motorwicklungen festlegen. Diese werden dem Leistungsteil zugeführt. Während Indexer und Translator bei den ersten Schrittmotoren in hybrider Technik ausgeführt waren, werden heute für beide Aufgaben fast nur noch Mikroprozessoren eingesetzt. Man muss sich dabei vor Augen halten, dass ein einziges Mikroprozessorsystem, dessen Bauteilpreis den Preis eines Schrittmotors kaum übersteigt, die Signale für mehrere Schrittmotoren gleichzeitig erzeugen kann. Sämtliche Antriebe eines Gerätes werden dann von einem Prozessor gesteuert.

3.2 Leistungselektronik

Die Leistungselektronik hat die Aufgabe auf ein Signal des Translators (TTL-Logik) den Strom in einer Wicklung in der gewünschten Richtung ein- bzw. auszuschalten. Es gibt hierbei zwei wesentliche Methoden um Schrittmotorspulen zu bestromen:

Unipolare Ansteuerung:

Hierfür sind nur Motoren mit sechs oder acht Drähten geeignet. Die Leistungselektronik kann auf vier Transistoren im Schalterbetrieb beschränkt bleiben. Die Mittelabgriffe der Spulen werden mit der Masse verbunden. Die Transistoren schalten abwechselnd jeweils die andere Spulenhälfte an die Betriebsspannung (siehe *Abbildung 11*, Nr. 2 und Nr. 4). Dadurch können die notwendigen unterschiedlichen Polungen einer Spule erreicht werden. Unipolare Motoren sind verhältnismäßig teuer.

Bipolare Ansteuerung:

Mit einer solchen Schaltung können alle Schrittmotortypen betrieben werden. Sie ermöglicht es, die Spule in beiden Richtungen zu bestromen. Hierfür sind jedoch zwei Transistor-Vollbrücken mit jeweils vier Transistoren notwendig. Die Logik für die Ansteuerung ändert sich im Wesentlichen nicht. Die Transistorvollbrücke erfordert aber einen wesentlich höheren Schaltungsaufwand.

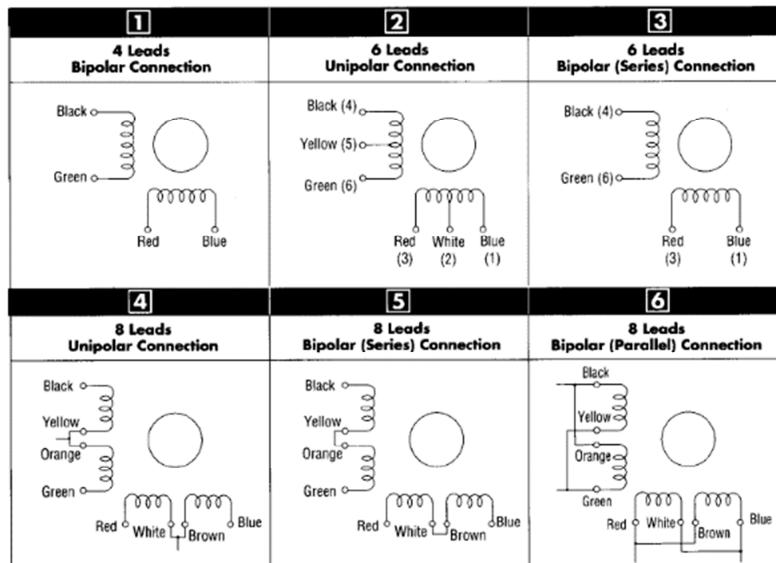


Abbildung 11: Uni- und bipolare Anbindung von Schrittmotoren

Wird über den Transistor eine elektrische Spannung an die Wicklung gelegt, so fließt in ihr bekanntlich nicht sofort der maximale Strom, sondern er steigt gemäß der folgenden Gleichung an:

$$I(t) = \frac{U}{R} \cdot (1 - e^{(\frac{-R}{L} \cdot t)})$$

Die Anstiegszeit $T_{\text{Anstieg}} = L/R$ liegt bei Schrittmotoren im Bereich von 1 ms. Bei vielen Antriebsaufgaben wird die Feldrichtung aber in wesentlich kürzeren Zeitabständen umgeschaltet. Hier muss die endliche Anstiegszeit berücksichtigt werden. Die Anstiegszeit kann beispielsweise durch einen vor die Wicklung geschalteten Widerstand (R) verringert werden. Dies führt aber zu einer Verringerung des Wirkungsgrads. In größeren Schrittmotorantrieben werden deshalb sogenannte Chopper-Treiber eingesetzt.

3.3 Synchronismus und Schrittverlust

Schaltet man das Feld im Schrittmotor langsam Schritt für Schritt weiter, so wird der Rotor ruckartige Bewegungen machen. Steigert man die Frequenz langsam, so wird durch die integrierende Wirkung der vorhandenen Trägheitsmomente die schrittweise Bewegung in eine kontinuierliche Drehbewegung übergehen. Die Zeit T_s bezeichnet dabei die Dauer eines Schrittes. Ihr reziproker Wert $f_s = 1/T_s$ wird als Schrittfrequenz bezeichnet. Wenn nun die mittlere Geschwindigkeit des Rotors genau so groß ist, dass er sich in der Zeit T_s um einen Schrittwinkel α_s dreht, so spricht man von Synchronismus. Die synchrone Winkelgeschwindigkeit ergibt sich zu:

$$\Omega_s = \alpha_s \cdot f_s$$

Neben der Winkelgeschwindigkeit im Synchronismus ist noch die absolute Winkelposition des Rotors von wesentlicher Bedeutung. Sie bestimmt, wie im Fall eines statischen Statorfeldes, das abgegebene Drehmoment. Um bei der Beschreibung der Zusammenhänge von der Größe des Schrittwinkels unabhängig zu werden, bezieht man sich auf den Phasenwinkel des elektrischen Wechselstroms. Man spricht dann vom „elektrischen Winkel“ α_E . Er hängt mit dem mechanischen Drehwinkel α_M beim zweiphasigen Motor in folgender Weise zusammen:

$$\alpha_E = \pi / 2 \cdot \frac{\alpha_M}{\alpha_s}$$

Mit Einführung des el. Winkels erhält man die statische Drehmomentkennlinie in formelmäßiger Darstellung:

$$M = -i \cdot K \cdot \sin(\alpha_E)$$

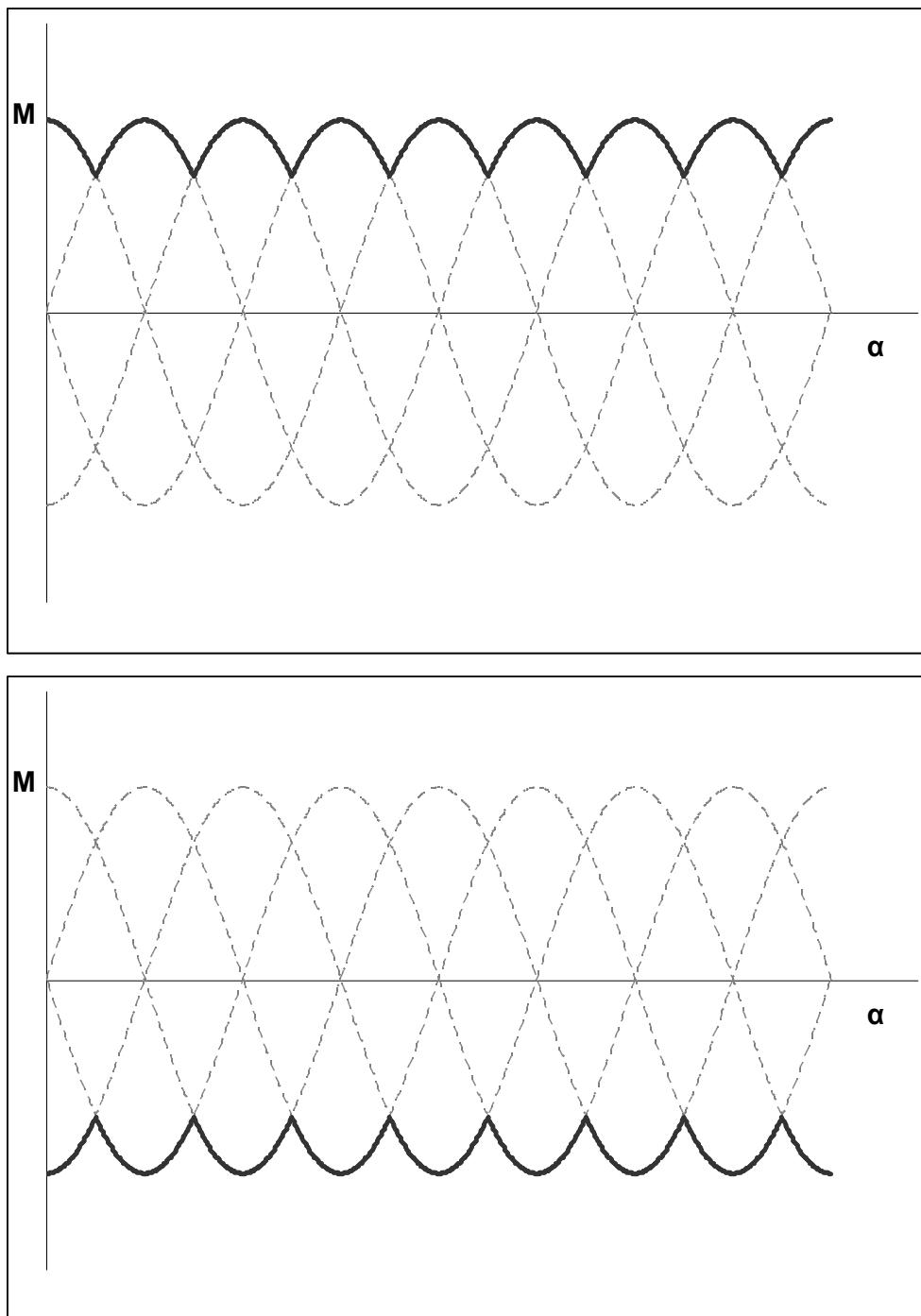


Abbildung 12: Drehmomententwicklung beim Schrittmotor

Hier ist der Nullpunkt des Winkels die magnetische Raststellung. Diese wandert nun mit der Schrittfrequenz um je einen Schritt weiter. Entsprechend wandert die statische Drehmoment-Kennlinie auf der Ortsachse weiter. In *Abbildung 12* deuten die gestrichelten Linien die statische Kennlinie an aufeinander folgenden Orten der magnetischen Raststellung an. Bewegt sich der Rotor, so läuft das abgegebene Drehmoment auf einer dieser Kennlinien. Sobald er einen Schritt weiter geschaltet wird, springt er auf eine andere. Je nachdem, ob der Rotor der magnetischen Raststellung nacheilt (oben) oder voreilt (unten), wird ein

antreibendes oder bremsendes Moment abgegeben. Im statischen Fall kann nur ein begrenztes Drehmoment abgegeben werden. Wird dieses durch statische oder dynamische Lastmomente am Motor überschritten, so kann der Motor dem elektrischen Feld nicht mehr folgen. Er kommt außer Tritt. Man spricht auch von einem Schrittverlust.

Bei Positionieraufgaben ist ein Schrittverlust unbedingt zu vermeiden, denn beim Betrieb ohne Rückmeldung der Rotorstellung (Open-Loop-Betrieb) kann man die aktuelle Rotorstellung nur durch Mitzählen der ausgegebenen Schritte bestimmen. Man muss also davon ausgehen, dass der Rotor dem elektrischen Feld gefolgt ist.

Die Notwendigkeit, Schrittverlust zu vermeiden, führt zu wesentlichen Restriktionen in der dynamischen Betriebsweise des Motors.

3.4 Die Dynamische Drehmomentkennlinie

Um nun den Schrittantrieb so auslegen zu können, dass kein Schrittverlust auftritt, ist es erforderlich, das maximale Drehmoment zu kennen, welches der Motor abgeben kann. Dieses ist von der Schrittzahl abhängig.

Obwohl die statische Drehmomentkennlinie, von der das maximale dynamische Drehmoment abgeleitet wird, auch bei hohen Frequenzen ihre sinusförmige Gestalt beibehält, wird ihre Amplitude geringer. Diese ist dem Strom proportional. Infolge der endlichen Anstiegszeit kann aber bei höheren Frequenzen der Strom nicht mehr bis zu seinem Maximalwert ansteigen.

Die Wicklung wird nun unabhängig von der Frequenz mit einer konstanten Spannung angesteuert. Die Frequenzabhängigkeit des Stromes kann nun mit den Ergebnissen der Wechselstromlehre gefunden werden. Bekanntlich ist die Impedanz (Wechselstromwiderstand) einer Reihenschaltung eines ohmschen Widerstands und einer Induktivität gegeben durch:

$$Z = \sqrt{(R^2 + (\omega \cdot L)^2)}$$

Die Kreisfrequenz der Spannung hängt nun mit der Schrittzahl in folgender Weise zusammen:

$$\omega = 2\pi \cdot f_s$$

Damit hat man für die Frequenzabhängigkeit des Moments wegen der Proportionalität des Stromes:

$$M = M_0 / \sqrt{1 + \pi^2 / 4 \cdot (f_s \cdot L/R)^2}$$

Dadurch erhält man die dynamische Drehmomentkennlinie. Versuche mit Schrittmotoren zeigen, dass in der Realität nicht alle Betriebspunkte unter der Kennlinie zu einem stabilen Lauf des Schrittmotors führen. Dies ist beispielsweise auf eine Schwingungsanregung des

Rotors durch das schrittweise Fortschalten des Feldes zu erklären. Außerdem ist hier der Einfluss der im Motor induzierten Gegenspannung vernachlässigt. Diese bewirkt bei höheren Frequenzen eine zusätzliche Verminderung des Drehmoments.

Deshalb werden die dynamischen Kennlinien des Motors vom Hersteller messtechnisch bestimmt und im Datenblatt angegeben.

3.5 Start-Stopp-Frequenz

Bei den meisten Antriebsaufgaben lässt sich sicherstellen, dass das statische Lastmoment das maximale Moment nicht überschreitet. Wesentlich kritischer sind die dynamischen Belastungen. Solche treten besonders bei der sprungförmigen Änderung der synchronen Geschwindigkeit auf.

Ein besonders einfaches Steuerkonzept besteht nun darin, bei stillstehendem Motor eine Wechselspannung fester Frequenz aufzuschalten; und mit dieser Frequenz, die dem gewünschten Drehwinkel entsprechende Anzahl von Schrittimspulsen auszugeben und die Impulsreihe dann zu stoppen. Dies wird als Start-Stopp-Betrieb bezeichnet.

Die erforderliche Beschleunigung und damit die dynamische Belastung des Motors werden nun umso größer sein, je höher die Frequenz dieser Schrittimpulse ist. Die höchste Frequenz, bei der dieser Betrieb möglich ist, ohne dass der Motor außer Tritt fällt, wird als maximale Start-Stopp-Frequenz bezeichnet. Sie ist, außer von den Motordaten, von der Ansteuerung und der Last abhängig. Ihre exakte Berechnung ist nur numerisch möglich. Es sind verschiedene analytische Näherungslösungen bekannt. Ein Verfahren zur groben Abschätzung dieser Frequenz wird im Folgenden angegeben.

Die Belastung des Motors lässt sich im Allgemeinen durch die dominierende dynamische Belastung infolge eines Trägheitsmoments J , das sich aus dem Trägheitsmoment des Rotors J_{Mot} und dem der Last J_L zusammensetzt, darstellen. Die statische Last ist im Allgemeinen wesentlich geringer und soll vernachlässigt werden. Es werden nun die dynamischen Belastungen beim Anlauf in Abhängigkeit der Frequenz näherungsweise berechnet. Die maximale Start-Stopp-Frequenz ergibt sich dann durch Schnitt dieser Kennlinie mit der dynamischen Drehmoment-Kennlinie.

Man nimmt an, die magnetische Raststellung würde sich mit einer Konstanten, der synchronen Drehzahl bewegen. Der Rotor ist durch magnetische Kräfte wie durch eine Drehfeder an die umlaufende magnetische Raststellung gekoppelt. Im Bezugssystem der magnetischen Raststellung hat der Rotor also zum Zeitpunkt des Loslaufens eine Geschwindigkeit, die betragsmäßig der synchronen Geschwindigkeit entspricht. Es beginnt eine Drehschwingung die anfänglich folgende Energie enthält:

$$E_{\text{Swing}} = \frac{1}{2} \bullet J \bullet \Omega_s^2$$

Am nächsten Amplitudenmaximum gilt dann:

$$E_{\text{Swing}} > \frac{1}{2} \bullet M_{\text{Swing}} \bullet \alpha_{\text{Swing}}$$

Dann gilt für das höchstens auftretende dynamische Moment:

$$M_{\text{Max}} = J \bullet \frac{\Omega_s^2}{\alpha_s}$$

Um die maximale Start-Stopp-Frequenz für ein gegebenes Trägheitsmoment zu ermitteln, geht man nun folgendermaßen vor: Man trägt die Parabel gemäß Gleichung (M_{Max}) in die dynamische Drehmomentkennlinie ein. Die Abszisse des Schnittpunktes ergibt dann die gesuchte Frequenz.

3.6 Hochlauf- und Bremsprogramme

Für viele Anwendungen wird die synchrone Drehzahl bei der maximalen Start-Stopp-Frequenz zu niedrig sein. Die Schrittfrequenz kann nun nach einem Frequenz-Zeit-Profil bis zur gewünschten Maximalfrequenz gesteigert werden. Entsprechend muss die Frequenz beim Abbremsen wieder langsam gesenkt werden. Dieses Profil ist von den äußereren Belastungsverhältnissen abhängig. Um ein solches Frequenz-Zeit-Profil zu realisieren, ist eine bestimmte zeitliche Abfolge von Schrittfortschaltungen erforderlich. Die zeitliche Abfolge wird durch das Programm des steuernden Mikroprozessors festgelegt. Man spricht deshalb von einem Hochlauf- und Bremsprogramm.

Ob der Schrittmotor in der Lage ist, einem vorgegebenen Frequenz-Zeit-Profil ohne Schrittverlust zu folgen, kann überschlägig ermittelt werden, indem man es in ein Drehzahl-Zeit-Profil übersetzt und damit die auftretenden dynamischen und statischen Belastungen berechnet. Durch Vergleich mit der dynamischen Drehmomentkennlinie ermittelt man, ob eine Überlastung eintritt.

Das ermittelte kontinuierliche Frequenz-Zeit-Profil muss dann in eine zeitliche Folge von Schrittfortschaltungen umgesetzt werden. Hier geht man folgendermaßen vor: Zur Einleitung des Hochlaufs wird eine Schrittfortschaltung ausgegeben. Der Zeitpunkt für die Auslösung des nächsten Schrittes ergibt sich nach der Formel:

$$1/(t_{i+1} - t) = f_s(t_{i+1})$$

3.7 Geräte für die Versuchsdurchführung

Der zu vermessende Motor weist folgende Kenndaten auf:

Schrittwinkel	1.8°
Phasenanzahl	2
Wicklungswiderstand	37,5 Ω
Wicklungsinduktivität L	45 mH
Rotorträgheitsmoment	16 gcm ²
Nennspannung	12 V
Motortreiberbaustein	ST Elektronik GS D-200 1A

4 Hausaufgaben

1. Welche Funktion haben Permanentmagneten in Schrittmotoren?
2. Was bedeutet das für den Wirkungsgrad?
3. Was versteht man unter Open-Loop-Betrieb?
4. Welche Alternative ist denkbar (Vorteile, Nachteile)?
5. Wie groß ist der minimale Winkelfehler bei einem Schrittverlust?
6. Was ist der Vorteil der Sechs-Leiter-Technik?
7. Wie ändert sich das Drehmoment mit der Motorspannung?
8. Bei welcher Schrittfrequenz sinkt das Drehmoment infolge der Wicklungsinduktivität um den Faktor $\sqrt{2}$ gegenüber M_0 ?
9. Welche Ursache hat der schnellere Abfall bei der gemessenen Kennlinie?

5 Praktikumsaufgaben:

In diesem Teil des Praktikums sollen die in der Vorbereitung untersuchten Eigenschaften eines Schrittmotors praktisch nachvollzogen werden. Die Unterschiede zwischen Gleich-, Wechselstrommaschinen und Schrittmotoren wurden bereits in den Grundlagen ausführlich erklärt. Zwei grundsätzliche Unterschiede spiegeln sich auch in den Auslegungskennzahlen für Schrittmotoren wieder. Im Gegensatz zur Auslegung eines Gleichstrommotors, bei dem das maximale Motordrehmoment in Betrieb verwendet wird, ist bei Schrittmotoren das maximale Haltemoment ausschlaggebend.

Haltemoment

In diesem Abschnitt soll das maximale Haltemoment des Schrittmotors des Praktikums ermittelt werden. Ergebnis ist ein Graph, in dem das Motordrehmoment über dem Laststrom des Motors aufgetragen wird.

Zur Ermittlung der Wertepaare stehen folgende Hilfsmittel zur Verfügung:

- Hebelarm
- div. Gewichte
- Strommessgerät

Der Schrittmotor muss mit einer Hebelstange bestückt werden. Diese wird mit einer Madenschraube direkt auf die Motorwelle geklemmt. Stecken Sie anschließend das Ampermeter an den entsprechenden Buchsen am Teststand an.

Nachdem die Versorgungsspannung des Motors eingeschaltet wurde, stellen Sie den maximalen Motorstrom ein und belasten den Hebel mit Gewichten solange, bis das maximale Haltemoment überschritten wurde. Der Motor verliert mindestens einen Schritt und der Hebel fällt auf den Anschlag. Aus dem aufgelegten Gewicht und dem Hebelweg können Sie das Drehmoment berechnen.

Da das Motordrehmoment stark von dem Betriebsstrom abhängt, werden weitere Werte durch das Verringern des Motorstroms ermittelt und in ein Diagramm eingetragen.

Steuerprogramm für einen Schrittmotor

Zur Ansteuerung des Schrittmotors wird ein Treiberbaustein benutzt, der über TTL-Signale angesteuert werden kann. Für die Steuerung des Motors im Praktikum müssen nicht alle Funktionen des Treiberbausteins genutzt werden. Die benötigten Anschlüsse können aus dem Anschlussplan entnommen werden.

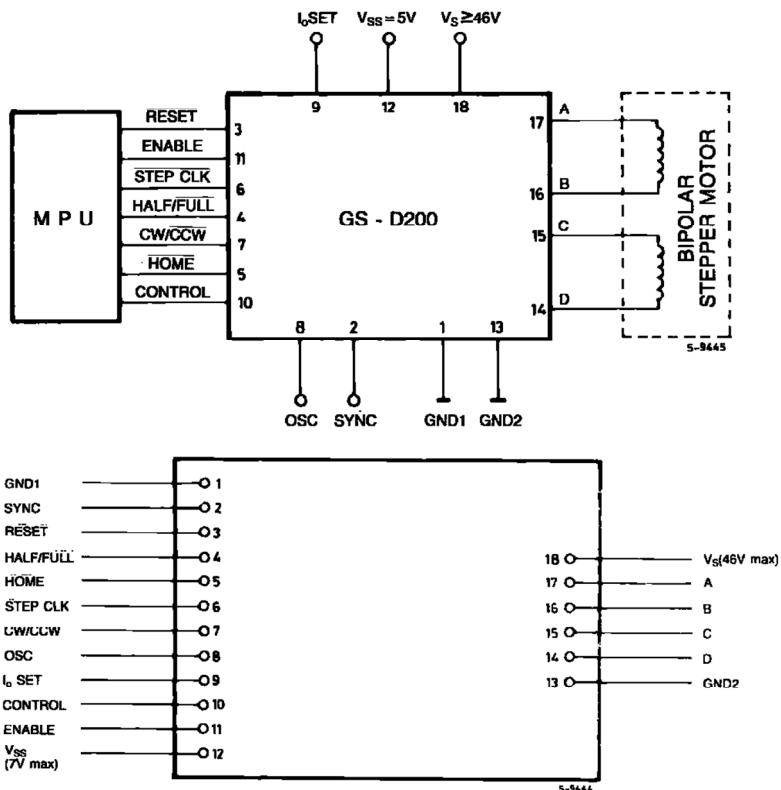


Abbildung 13: Anschlüsse des Motortreiberbausteins

Pin	Funktion	Beschreibung
1	GND1	Masse
6	stepclk	Taktsignal für den Motor
7	CW/CCW	Richtungsvorgabe für den Motor. Belegung mit high oder unverbunden ergibt Drehung im Uhrzeigersinn
11	Enable	Hauptschalter für die Bestromung des Motors
12	Vss	5-V-Logikspannung
13	GND2	Masse
14	D	Ausgang zum Motor
15	C	Ausgang zum Motor
16	B	Ausgang zum Motor
17	A	Ausgang zum Motor
18	Vs	Spannungsversorgung des Schrittmotors

Für die Steuerung des Motors müssen drei Signale gesetzt werden.

Nachdem der Eingang an Pin 11 auf high gesetzt wurde kann ein TTL-Taktsignal an Pin 6 die Anzahl und Frequenz der Schritte bestimmen. Die Rotationsrichtung wird über Pin 7 vorgegeben. Alle Steuersignale arbeiten mit 5 V Logikspannung.

Start-Stopp-Frequenz

Der große Vorteil eines Schrittmotors besteht in der sensorlosen Positionserkennung. Dies funktioniert aber nur unter der Annahme, dass der Motor der von der Steuerung vorgegebenen Schrittfrequenz folgen kann. Sind die Frequenzsprünge in der Ansteuerung zu hoch, führt dies zu Schrittverlusten. Diese bleiben durch den Open-Loop-Betrieb in der Steuerung unbemerkt und heben die Vorteile der Lageerkennung des Schrittmotors auf. Bei der Auslegung eines Antriebs für eine Bewegungsaufgabe muss das maximale Drehmoment des Motors beachtet werden, um Schrittverluste zu vermeiden.

In diesem Versuch soll die maximale Startfrequenz mit unterschiedlichen Belastungszuständen ermittelt werden.

Montieren Sie den Zeiger mit Hilfe der Madenschraube auf die Ausgangswelle des Motors! Bestromen Sie den Motor durch Einschalten des Motorhauptschalters! Justieren Sie die Zeigerspitze auf einem Teilstrich der darunter liegenden Skala! Steuern Sie den Schrittmotor so an, dass er immer eine gesamte Umdrehung ausführt! Erhöhen Sie die Ansteuerfrequenz schrittweise so lange, bis der Motor keine volle Umdrehung mehr erreicht! Deuten Sie diese Erscheinung! Erhöhen Sie den Phasenstrom und wiederholen Sie die Messung! Welche Unterschiede sind erkennbar?

Im Anschluss an die Versuche montieren Sie die Zusatzmasse auf dem zweiten Wellenende des Schrittmotors! Wiederholen Sie obigen Versuch mit gleichen Phasenströmen! Was können Sie feststellen?

Sie wollen eine Schrittfrequenz von 1,5 kHz erreichen. Wie können Sie dies mit dem gegebenem Versuchsstand realisieren?

6 Literatur

- Vorlesungsskriptum „Mikrotechnische Sensoren und Aktoren“, Lehrstuhl für Mikrotechnik und Medizingerätetechnik, Prof. T. Lüth, 2006, TUM München
- www.wikipedia.de
- R.Haeslich: Positioniersystem mit Permanentmagnet Schrittmotoren; Antriebstechnik (1988) 3 S.26-27
- R. Weinke, G. Treffer: Moderne Positionierantriebe in der Bürogerätetechnik; Feinwerk & Messtechnik 97 (1989)3 S.75-77
- H.P.Kreuth: Schrittmotoren; Oldenburg, 1988

- G. Heine: Kleine PM-Schrittmotoren in der Datentechnik; Feinwerk & Messtechnik 87 (1979) 4 S.146-151
- H. Eissfeldt: Konzepte zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit von Schrittantrieben durch Ausnutzung der sensorischen Eigenschaften des Motors; ETG-Fachbericht 27 (1989) S.17-26
- H. Sax: Schrittmotorsteuerung mit monolithisch integrierten Bausteinen; Elektronik (1980) 23 S.67-71
- P. Dittrich: Näherungsweise Berechnung der zulässigen Steuerfrequenzen in Start-Stop Betrieb von Schrittantrieben; Feingerätetechnik 30 (1981) 9 S. 401-405

Beschreibung zu Versuch Nr. 7:

Mikroskopie

Markus Vogl, überarbeitet von Wolfgang Büscher

1 Einordnung

In der Mikrotechnik spielt die Bauteilkontrolle eine besondere Rolle. Deshalb werden hier zahlreiche Verfahren eingesetzt, um Objekte vergrößert darzustellen. Zu diesen Verfahren zählen: Die Lichtmikroskopie, Rasterelektronenmikroskopie und allgemeine Topometrieverfahren wie Weißlichtinterferometrie und Streifenlichtprojektion. Zu diesen Methoden kommen noch taktile Messverfahren, die mit Rasterabtastung 3D-Profile erzeugen. Hierzu zählen die Profilmessgeräte wie Rauheitsmessgeräte und Rasterkraft- oder Tunnelmikroskope.

Für die Dimensionen der Mikrotechnik spielt die Lichtmikroskopie eine herausragende Rolle. Es können hier Strukturen bis herunter zu einem Mikrometer noch sicher aufgelöst werden. Genauere Auflösungen sind meist nicht erforderlich.

Die hohe Tiefenschärfe eines Rasterelektronenmikroskops (REM) kann mit manuellen Lichtmikroskopen nicht erreicht werden. Bei der sogenannten Digitalmikroskopie werden aber durch automatische Fokusverstellung und digitale Bildverarbeitung ähnliche Bilder erzielt. Hier macht sich aber dann ein wesentlicher Vorteil von Lichtmikroskopen bemerkbar: Die Darstellung ist in Farbe und besitzt damit eine weitere Dimension mit deren Hilfe Aussagen abgeleitet werden können.

Ein weiterer Vorteil von Lichtmikroskopen liegt in der einfachen Handhabung. Die Probe kann ohne weitere Vorbehandlung unter normaler Atmosphäre betrachtet werden. Dadurch können auch Verschmutzungen und Flüssigkeiten betrachtet werden. Beim REM dagegen müssen die Proben entfettet und getrocknet werden, da Rückstände in der Hochvakuumkammer verdampfen würden und das REM verschmutzen würden. Des Weiteren müssen nicht elektrisch leitende Materialien zum Betrachten im REM vergoldet werden. Die Beobachtung erlaubt zudem das Arbeiten unter dem Mikroskop.

Für den Praktikumsdrucker ermöglicht das Mikroskop zwei Methoden zur Beurteilung der erzeugten Ergebnisse. Zum einen können die Tropfen auf dem Papier vermessen werden.

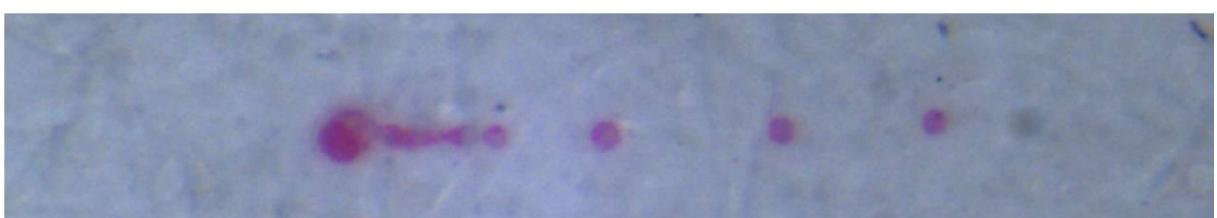


Bild 1: Druckbild eines länglich ausgebrachten Tropfens auf gestrichenem Papier

Dabei kann beurteilt werden, wie der Tropfen verläuft, wie saugfähig der Untergrund ist oder ob der 3D-Aufbau mit Wachs funktioniert und wie die Parameter eingestellt werden müssen.

Zum anderen können die Tropfen bei ihrem Flug beobachtet werden. Dazu werden sie mit einem Stroboskop beleuchtet. Die so entstehenden Bilder geben wertvolle Einblicke in die Tropfenentstehung. Dies ist eine weitere Möglichkeit die Parameter zu optimieren.

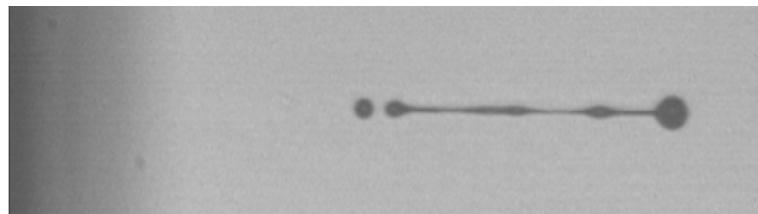


Bild 2: Tropfen im Stroboskoplicht

2 Theorie

2.1 Einführung in die Optik - Strahlengang

Wie gut sich Einzelheiten an einem Gegenstand erkennen lassen, hängt davon ab, unter welchem Sehwinkel α_0 sie dem Auge erscheinen.

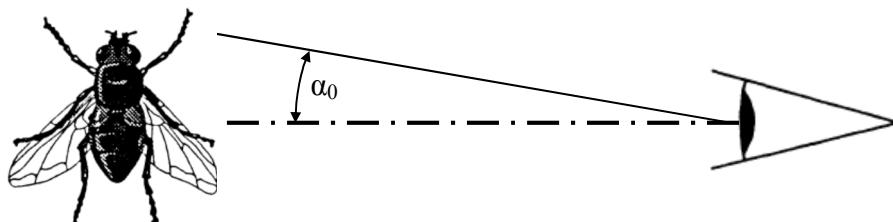


Bild 3: Definition des Sehwinkels.

Gegenstände werden somit primär dadurch vergrößert, dass man sie näher an das Auge heranführt. Als minimalen Abstand zwischen Auge und Gegenstand wurde $a_0 = 25$ cm festgelegt. Unterhalb dieses Abstandes kann das Auge den Gegenstand nicht mehr entspannt und scharf betrachten. Aus diesem Grund benutzt man für eine weitere Vergrößerung von Gegenständen optische Instrumente, wie zum Beispiel Lupen oder Mikroskope. Eine weitere Möglichkeit Gegenstände fürs Auge vergrößert darzustellen ist ein Fernrohr. Dabei wird wie beim Mikroskop der Winkel unter dem ein Objekt dem Auge erscheint vergrößert.

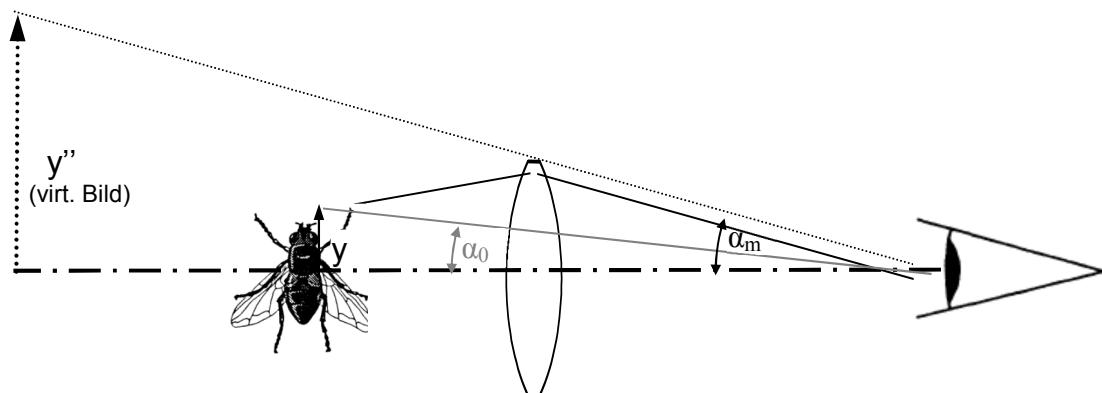


Bild 4: Sehwinkel mit einer Linse.

Die Vergrößerung eines optischen Instruments ist definiert als das Verhältnis

$$\Gamma = \frac{\tan \alpha_m}{\tan \alpha_0}$$

wobei α_m der Sehwinkel mit dem optischen Instrument und α_0 der Sehwinkel mit unbewaffnetem Auge ist.

Optische Instrumente sind aus Linsensystemen aufgebaut. Das *Brechungsgesetz* erklärt die Eigenschaften von Linsen:

- Für Sammellinsen (konvex) gilt: Zur Achse parallele Strahlen werden nach der Brechung im Brennpunkt F vereinigt. Umgekehrt werden Strahlen durch den Brennpunkt F nach der Brechung achsparallel.
- Für Zerstreuungslinsen (konkav) gilt: Zur Achse parallele Strahlen verlaufen nach der Brechung so, als ob sie vom Brennpunkt her kämen.

Bei der Abbildung mit einer Zerstreuungslinse entsteht nur ein virtuelles Bild. Eine Sammellinse dagegen kann reelle und virtuelle Bilder erzeugen. Ein reelles Bild kann auf einem Bildschirm sichtbar gemacht werden, während ein virtuelles Bild nur durch eine zusätzliche Linse (z. B. Augenlinse) scharf abgebildet werden kann.

Das virtuelle Bild liegt auf der gleichen Seite der Linse wie der Gegenstand. Das reelle Bild liegt auf der anderen Seite der Linse.

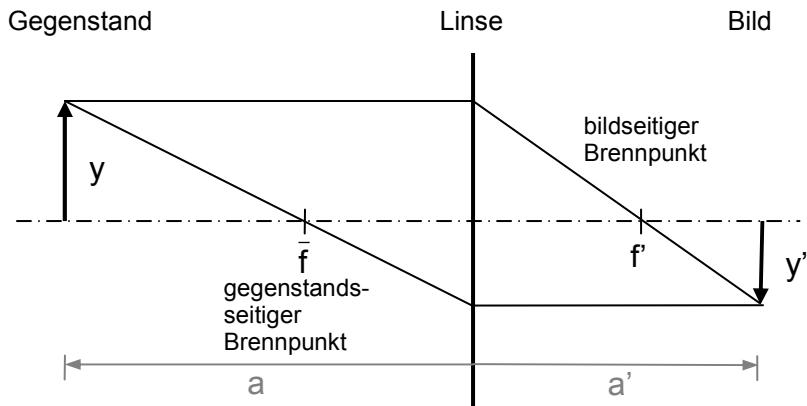


Bild 5: Abbildung durch eine Linse.

Die Abbildung mit einer dünnen Linse lässt sich nach folgender Formel berechnen:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

mit

- a ... Gegenstandsweite
- a' ... Bildweite
- f ... Brennweite ($f = |\bar{f}| = |f'|$)

Der Abbildungsmaßstab β ist das lineare Größenverhältnis zwischen dem Gegenstand und seinem Bild. Es berechnet sich aus dem Zusammenhang:

$$\beta = \frac{a'}{a} = \frac{y'}{y}$$

Bei der Abbildung lassen sich fünf einfache Fälle unterscheiden, deren Zusammenhang aus obiger Formel leicht ersichtlich ist:

- $a > 2f$: Das Bild, welches die Linse entwirft, ist reell und der Gegenstand erscheint verkleinert.
- $a = 2f$: Das Bild des Gegenstandes ist reell und gleich groß wie der Gegenstand selbst. ($|y| = |y'|$)
- $f < a < 2f$: Das Bild ist reell und der Gegenstand erscheint vergrößert.
- $a = f$: Das Bild liegt nun im Unendlichen, da die Strahlen vom Brennpunkt ausgehen und auf der Bildseite der Linse parallel verlaufen. Das menschliche Auge kann ein solches (virtuelles) Bild sehen. Auf einem Bildschirm ist keine Abbildung möglich.
- $a < f$: Das Bild ist virtuell und erscheint vergrößert.

2.2 Aufbau eines Mikroskops

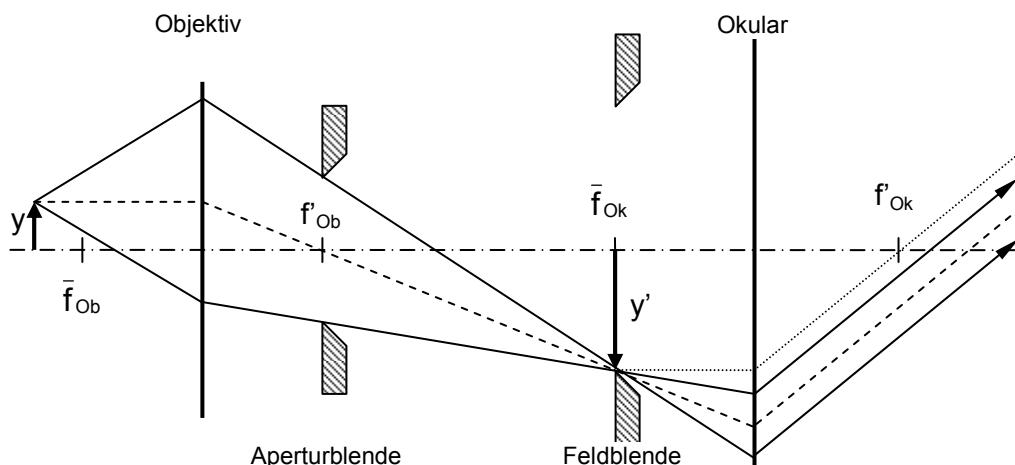


Bild 6: Schematischer Aufbau eines Mikroskops

Ein einfaches Mikroskop besteht aus zwei Linsen, dem Objektiv und dem Okular. Diese Linsen werden für den Praktikumsversuch als dünne Linsen betrachtet. Die Besonderheit des Mikroskops ist, dass vom Objektiv ein Zwischenbild y' erzeugt wird, das größer ist als der Gegenstand y . Das Zwischenbild liegt in der gegenüberliegenden Brennebene des Okulars und die austretenden Lichtstrahlen sind parallel. Dadurch kann das Bild mit völlig entspanntem, d. h. auf unendliche Entfernung akkomodiertem Auge betrachtet werden. Die Aperturblende liegt in der bildseitigen Brennebene des Objektivs. Von der Aperturblende hängen die Helligkeit der Abbildung, die Schärfentiefe, das Auflösungsvermögen und der Abbildungsfehler ab.

Die Feldblende liegt in der gegenüberliegenden Brennebene des Okulars. Die Feldblende begrenzt die Größe des abzubildenden Feldes.

Für die Vergrößerung des Mikroskops gilt:

$$\Gamma_M = \beta_{Ob} \cdot \Gamma_{Ok}$$

2.3 Auflösungsvermögen

Die Auflösung wird von der Beugung begrenzt. Jede Linsenfassung ebenso wie jede Begrenzung der Prismen, Spiegel, usw. stellt eine beugende Öffnung dar. Das hat zur Folge, dass unabhängig von den sonstigen optischen Eigenschaften, ein Lichtpunkt unscharf abgebildet wird.

Wenn ebene Wellenfronten auf eine kreisrunde Öffnung treffen, dann überlagern sich die Elementarwellen, die von der kreisrunden Öffnung ausgehen, je nach Richtung in unterschiedlichen Phasenlagen. Es tritt positive Überlagerung aber auch Auslöschung auf, je nach Betrachtungsrichtung. Bildet man die Wellenfronten in einer Bildebene ab, so entstehen um einen hellen Fleck in der Mitte dunkle und helle konzentrische Kreise.

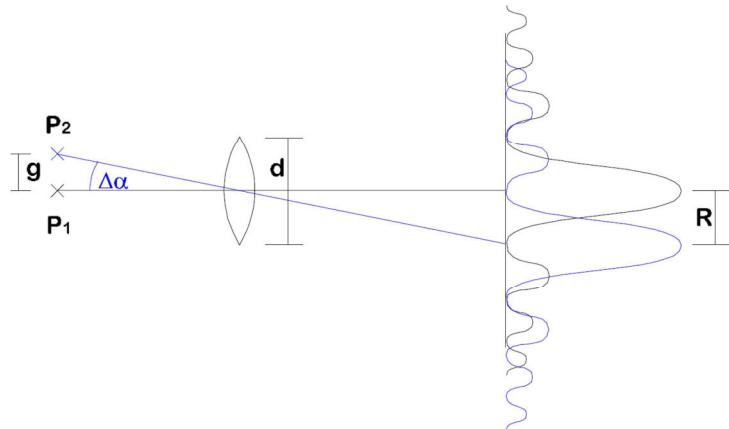


Bild 7: Beugungsmuster zweier Punkte, die durch eine Linse abgebildet werden

Von jedem Punkt wird auf dem Schirm ein Beugungsmuster entworfen. Zwei solcher Muster sind dann noch zu unterscheiden, wenn ihre Maxima mindestens um den Radius R des ersten Maximums voneinander entfernt sind. Der Winkelabstand der beiden Lichtpunkte P_1 und P_2 muss mindestens so groß sein, dass das Hauptmaximum des ersten Beugungsscheibchens beim ersten Minimum des zweiten liegt.

Der Winkel $\Delta\alpha$ muss nach dem Rayleigh-Kriterium die Mindestgröße $\Delta\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{d}$ besitzen, wenn beide Punkte noch getrennt erkannt werden sollen. Der Kehrwert des minimalen Winkels $\Delta\alpha$ heißt Auflösevermögen. Damit der Abstand zweier erkennbarer Punkte klein genug bleibt, muss man also die begrenzende Öffnung d groß wählen.

Der sichtbare Bereich des Lichts liegt in einem Farbspektrum von $380 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$. Da im Mikroskop üblicherweise mit Weißlicht (mit einem Bandspektrum) arbeitet, nimmt man eine mittlere Wellenlänge von 550 nm an.

Betrachtet man ein Objekt durch ein Mikroskop, so liegt der Gegenstand mit der Ausdehnung y annähernd in der Brennebene des Objektivs, so dass der Winkel $\Delta\alpha = \frac{y}{f}$ gilt (Abstand Objekt – Objektiv \approx Brennweite f). Für den Abstand y zweier noch zu trennender Punkte gilt damit:

$$y = 1,22 \frac{f}{d} \lambda$$

und für das Auflösevermögen A :

$$A = \frac{1}{y} = 0,82 \frac{d}{\lambda f}$$

Hierbei ist $\frac{d}{f}$ nichts anderes als die Apertur N des Objektivs, so dass man schreibt:

$$A = 0,82 \frac{N}{\lambda}$$

Die numerische Apertur ist festgelegt durch

$$N = n \sin u$$

wobei n der Brechungsindex des Mediums zwischen Objekt und Objektiv und u der Aperturwinkel ist. In Luft ist $n = 1$.

Das Auflösungsvermögen des Mikroskops ist durch den Abstand zweier noch zu trennender Punkte definiert. Das Objektiv entwirft in der Brennebene des Okulars ein Bild, das mit dem Okular betrachtet wird. Das Okular spielt nun für die Beugung keine Rolle, da zwei Punkte, deren Beugungsmuster sich schon in der Brennebene des Objektivs überlagern, auch nicht durch das Okular entzerrt werden können.

2.4 Stroboskopische Vermessung periodischer Vorgänge

Die Tropfenerzeugung bei einem Druckkopf ist ein periodischer Vorgang. Eine Analyse der Vorgänge bei der Tropfenentstehung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera würde einen enormen technischen Aufwand bedeuten: Es müsste eine Kamera mit sehr hoher Lichtempfindlichkeit eingesetzt werden, damit eine kurze Belichtungszeit verwendet werden kann, und die zum Teil 20 m/s schnellen Tropfen nicht verschmiert wirken. Zudem wäre noch eine leistungsfähige Bildverarbeitung notwendig um eine Beobachtung und Vermessung zu ermöglichen.

Um die Vorgänge trotzdem als Standbild oder verlangsamt bewegt darstellen zu können, wird im Praktikumsversuch eine stroboskopische Beleuchtung einsetzen. Eine ruckfreie Bewegung kann hier schon mit 25 Bildern pro Sekunde erreicht werden. Dazu wird das Geschehen an der Düsenplatte des Druckkopfes stroboskopisch beleuchtet und mit einem Mikroskop betrachtet. Für ein Standbild wird zwischen dem Impuls, der die Spannung für die Tropfenerzeugung am Druckkopf liefert, und dem Stroboskopimpuls ein fester Zeitversatz eingehalten. Da die Tropfen sehr gleichmäßig erzeugt werden, erscheint der Tropfen im Mikroskop als stehendes Bild. Wird diese Zeitdifferenz verändert, kann man den Tropfen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Ausstoß aus der Düse, also an unterschiedlichen Positionen beobachten.

Wird die Zeitdifferenz beider Signale kontinuierlich vergrößert so wirkt der Vorgang für den Beobachter wie ein Film. Der Tropfen Wandert langsam durch das Bild. Hierbei wird die Tropfenbildung besonders anschaulich abgebildet. Auf Bild 8 ist eine zeitliche Folge von Tropfen zu sehen, die mit dem Praktikumsdruckkopf erzeugt wurden.

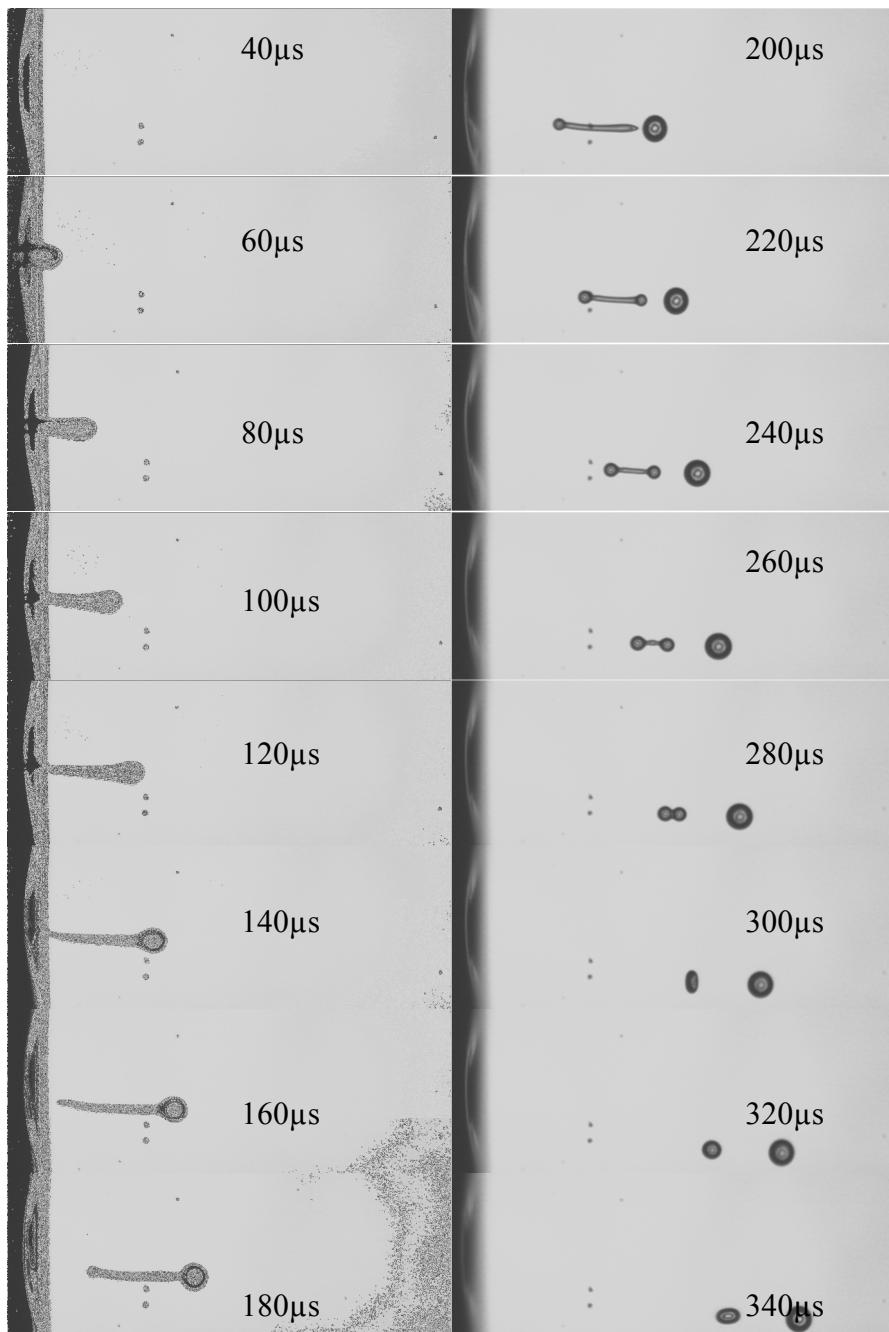


Bild 8: Tropfenfolge durch stroboskopische Aufnahme mit veränderlicher Phasenlage bei 100-facher Vergrößerung.

Aus der hohen Geschwindigkeit des Tropfens im Vergleich zu der geringe Größe ergibt sich eine besondere Anforderungen an das Stroboskop: Die Belichtungszeit muss extrem kurz sein. Fliegt ein Tropfen mit $50 \mu\text{m}$ Durchmesser mit ca. 10 m/s legt er in der Zeit von $1 \mu\text{s}$ bereits $10 \mu\text{m}$ (20 % seines Durchmessers) zurück. Er würde damit für den Betrachter schon

leicht verschmiert wirken. Deshalb ist eine kurze Belichtungszeit, und ein schnelles Aufleuchten und erlöschen der Lichtquelle notwendig.

Bei einer Belichtungszeit von $1 \mu\text{s}$ und einer Druckfrequenz von ca. 1 kHz würden pro Sekunde 1000 Lichtblitze mit einer Dauer von $1 \mu\text{s}$ die Szene beleuchten. Daraus ergibt sich ein Verhältnis von Helligkeit zur Dunkelheit von $1/1000$. Die Lampe muss also sehr lichtstark sein, damit der Tropfen ausreichend hell erscheint. Im Praktikumsversuch wird der Tropfen mit einer Frequenz von 1 kHz erzeugt und mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 m/s ausgestoßen.

3 Ausprägung im Versuch

Der Versuch im Praktikum gliedert sich in zwei Teilversuche. Zuerst werden die wichtigsten Methoden gezeigt, um Mikrostrukturen quantitativ zu vermessen. Der zweite Versuchsaufbau dient der Vermessung von Wachstropfen mit stroboskopischer Beleuchtung.

3.1 Statische Vermessung von Bauteilen

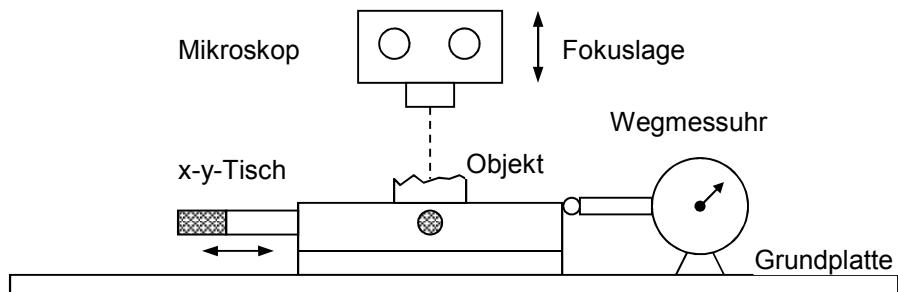


Bild 9: Versuchsaufbau für die Strukturvermessung

Das Mikroskop befindet sich über einem Objekt, das untersucht werden soll. Um den Fokus auf das Objekt richtig einzustellen, kann das Mikroskop in vertikaler Richtung verstellt werden.

Zur Vermessung des horizontalen Abstands zweier Punkte auf dem Objekt wird eine Wegmessuhr angebracht. Betrachtet man einen Punkt auf dem Objekt und verfährt den x-y-Tisch zum Betrachten eines anderen Punktes, so zeigt die Wegmessuhr den Abstand in einer Achse an. Für das exakte Vermessen des Abstandes ist es somit erforderlich, den Winkel des Objekts entsprechend zur Achse einzurichten. Dazu wird die Lage ebenfalls mit dem Mikroskop kontrolliert. Die zu messende Strecke wird mit dem Tisch abgefahren. Wenn das Fadenkreuz beide Messpunkte anvisieren kann, ohne dass die zweite Achse bewegt werden muss, liegt das Messobjekt richtig.

Um die Messpunkte genau erfassen zu können, wird bei dieser Messung auf die größte Vergrößerung am Objekt gestellt.

Zur Vermessung des vertikalen Abstands zweier Punkte wird mit einer Wegmessuhr das Mikroskop in vertikaler Richtung angetastet. Der Fokus wird auf Höhe des ersten Punkts scharf eingestellt und die Messuhr auf Null gesetzt. Anschließend wird der Fokus auf Höhe des zweiten Punkts scharf gestellt. Die Messuhr zeigt den vertikalen Abstand der beiden Punkte. Auch bei dieser Messung sollte mit der größten Vergrößerung gearbeitet werden. Die Schärfentiefe nimmt dadurch stark ab. Die Blende wird so weit wie möglich geöffnet, um die Schärfentiefe der Abbildung nochmals zu minimieren.

Beachte: Messuhren verfügen meistens über ein deutliches Umkehrspiel. Man sollte deshalb bei jeder Messung immer nur in einer Richtung, d. h. ohne Richtungsumkehr, messen!

3.2 Tropfenbeobachtungsstand

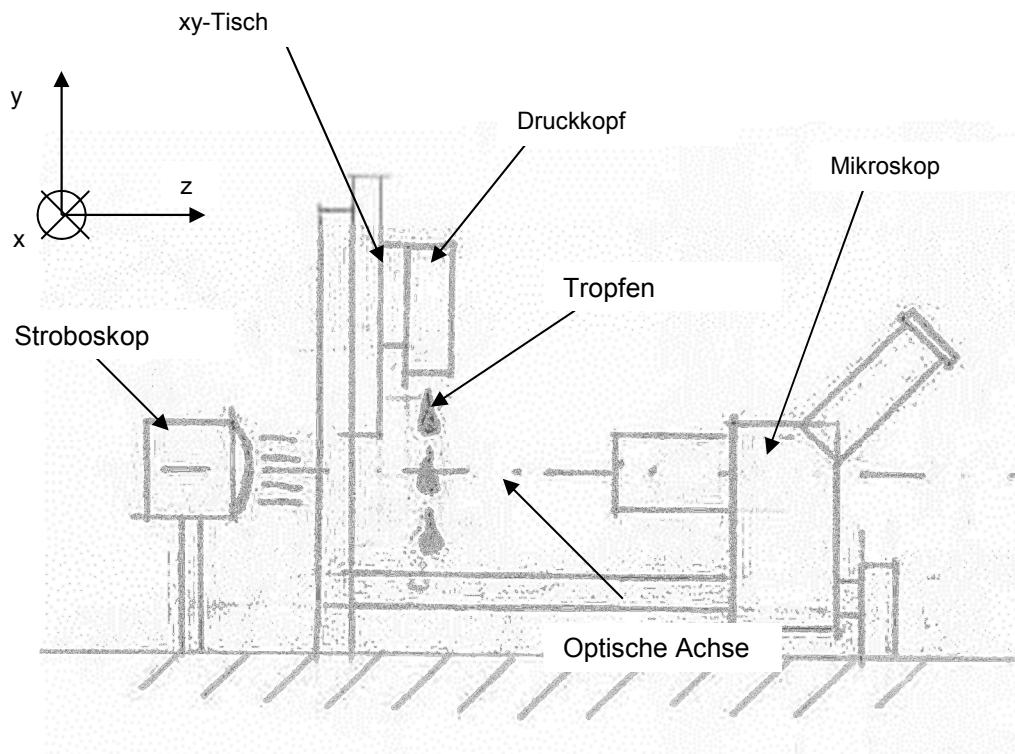


Bild 10: Tropfenbeobachtungsstand

Das Mikroskop wird nun zur Beobachtung von Tropfen verwendet. Um den Fokus auf die Tropfen richtig einzustellen, kann das Mikroskop in Blickrichtung verstellt werden. Die Tropfen werden von einem Druckkopf senkrecht in einen Auffangbehälter ausgestoßen. Der Druckkopf kann in der Bildebene bewegt werden. Die Tropfen werden mit einem Stroboskop

von hinten synchron zur Ausstoßfrequenz belichtet. Dadurch erscheint im Mikroskop ein stehender Tropfen, der durch einen einstellbaren Zeitversatz (Verzögerung zwischen Tropfenausstoß und Belichtung), in unterschiedlicher Entfernung vom Druckkopf betrachtet werden kann. Dies ermöglicht eine qualitative Beurteilung der Tropfenentstehung und des Tropfens. Mit dem x-y-Tisch kann der unter dem Mikroskop anvisierte Tropfen scheinbar im Bild verschoben werden. Dieses Vorgehen ermöglicht quantitative Messungen.

4 Hausaufgaben

- 1.** Zeichnen Sie die Strahlengänge zu den 5 in 2.1 genannten Fällen! (Gegeben: Gegenstandsgröße $y = 2 \text{ cm}$, Brennweite $f = 1,5 \text{ cm}$) Zeichnen Sie auch das virtuelle Bild für $a < f$ ein!

- 2.** Zur Vermessung von Objekten soll an geeigneter Stelle eine Platte mit Skala eingebaut werden. Welche Stelle eignet sich besonders zum Einbau der Skala? Welche Auswirkungen hat die Verkleinerung der Aperturblende auf die Helligkeit und Schärfentiefe? Betrachten Sie dazu den Gegenstand als einen diffusen Strahler. Begründen Sie Ihre Aussage anhand des Strahlengangs von Objekten, die axial verschoben liegen.

- 3.** Wie groß ist der kleinste, auflösbare Punktabstand für stärkste Objektive (numerische Apertur $N = 1,4$)?
Gehen Sie davon aus, dass die Abbildung auf einem Schirm erfolgt und ein Abstand benachbarter Punkte größer als 1 mm nicht sinnvoll ist. Wie groß ist in diesem Fall die erreichbare Vergrößerung?

- 4.** Das Mikroskop des Praktikums hat eine numerische Apertur von 0,44. Welchen Punktabstand können Sie bestenfalls noch unterscheiden?
Wie muss die Farbe (Wellenlänge) der Beleuchtung gewählt werden, um das Auflösevermögen zu steigern?

5 Praktikumsaufgaben:**1 Bauteilvermessung**

a)

Betrachten Sie unterschiedliche Objekte mit unterschiedlichen Vergrößerungen am Mikroskop. Skizzieren Sie je Person ein Objekt ihrer Wahl und tragen Sie eine Maßlinie ein.

b)

Skizzieren Sie eine Pumpenkammer des Druckkopfes. Stellen Sie in einer Schrägangsicht den Übergang von der Pumpenkammer zum Düsenkanal so dar, dass Sie für die Tiefe t und die Breite b des Düsenkanals eine Bemaßung eintragen können.

c)

Erstellen Sie für die beiden folgenden Teilaufgaben jeweils eine Tabelle mit Spaltenbeschriftung und Nummerierung der Messwerte. Benötigt werden sechs Spalten für die unterschiedlichen Messungen mit Auswertungen und zehn Messwerten untereinander!

Vermessen Sie die Tiefe des Düsenkanals am Übergang zur Pumpenkammer unter Verwendung eines Mikrometertasters bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Ermitteln Sie jeweils 10 Messwerte für die Tiefe unter Verwendung des Objektivs mit 10-facher und 50-facher Vergrößerung. Notieren Sie die möglichen Fehlerquellen stichpunktartig.

d)

Vermessen Sie die Breite des Düsenkanals unter Verwendung eines Mikrometertasters bei unterschiedlichen Vergrößerungen. Ermitteln Sie jeweils 10 Messwerte für die Breite des Düsenkanals unter Verwendung des Objektivs mit 5-facher und 50-facher Vergrößerung. Notieren Sie die möglichen Fehlerquellen stichpunktartig.

e)

Ermitteln Sie für die Messreihen der beiden vorhergehenden Teilaufgaben den Mittelwert und die Standardabweichung. Interpretieren Sie das Ergebnis.

Hinweis zur Berechnung des Mittelwertes und der Standardabweichung:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$
$$\sigma_x := \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}$$

f)

Ermitteln Sie eine Formel zur Berechnung der wahren Größe von y aus dem abgelesenen Skalenwert im Okular. Verwenden Sie hierzu die zuvor ermittelte Breite des Düsenkanals. Runden Sie ihr Ergebnis sinnvoll.

2 Tropfenbeobachtung

- a) Bringen Sie den stehenden Tropfen in das Gesichtsfeld des Mikroskops. Sorgen Sie dafür, dass das Gesichtsfeld gut ausgeleuchtet ist. Stellen Sie die Impulsbreite für die Tropfenerzeugung am Verstärker so ein, dass sie ein ähnliches Tropfenbild wie in Bild 8 erhalten.
- b) Vermessen Sie den größten Einzeltropfen im Bild. Geben Sie sein Volumen in Litern an. Ermitteln sie das Gewicht des Tropfens (Dichte $0,9 \text{ g/cm}^3$).
- c) Ermitteln Sie die Geschwindigkeit des größten Tropfens, indem Sie den Tropfen zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten nach dem Ausstoß betrachten und den Abstand zwischen den zwei unterschiedlichen Positionen dieses Tropfens messen. Die zwei unterschiedlichen Zeitpunkte können entweder durch Einstellen einer unterschiedlichen Verzögerung (delay) zwischen Tropfenausstoß und Beleuchtung, wie in Bild 8 gezeigt, eingestellt werden oder bei beibehalten der Verzögerung durch die Beleuchtungsfrequenz festgelegt sein.
- d) Ermitteln Sie die kinetische Energie des Tropfens!
- e) Skizzieren Sie den Tropfen mit seinem Schweif und den Satelliten. Überlegen Sie sich was für ein Bild bei hoher Verfahrgeschwindigkeit des Drucktisches erfolgen würde?
- f) Vermessen Sie die Länge des Tropfenstrahls, kurz nachdem der Tropfen die Düse vollständig verlassen hat! Welche Länge würde er auf einem mit 1 m/s bewegten Tisch mit Wachs benetzen?

6 Literatur

- Schröder, „Technische Optik – Grundlagen und Anwendungen“, 9., veränd. u. erw. Aufl., Vogel, Juli 2002
- Czichos, „Hütte – Die Grundlagen der Ingenieurwissenschaften“, 31. Auflage, Springer, 2002
- Muth, „Ausgewählte Grundlagen des Feingerätebaus“, 1. Auflage, TU München, 2002
- Heinzl, „Feingerätebau“, TU München, 2001