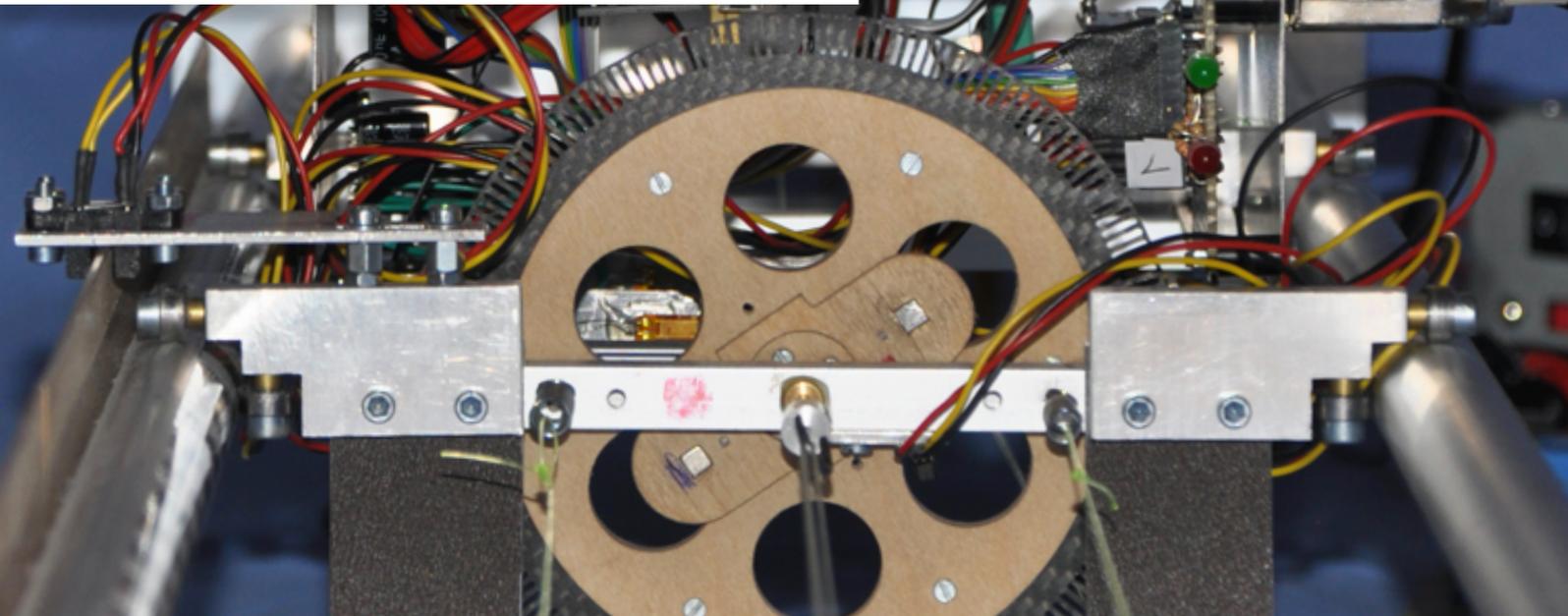


JUNGE

wissenschaft

JungforscherInnen publizieren
online | *peer reviewed* | original



Technik

Die Gummi- streckbank

Entwicklung, Bau und Test einer
Materialprüfanlage für Saalfluggummis

Seit über 100 Jahren gibt es den gummigetriebenen Freiflug. Dabei wird ein von einem Gummi angetriebenes Ultraleichtflugmodell in einer Halle geflogen. Um den verwendeten Spezialgummi (Saalfluggummi) genauer untersuchen zu können, wurde eine Materialprüfanlage gebaut. Durch automatisierte Abläufe konnten ausführliche Testreihen durchgeführt und so eine geschickte Auswahl geeigneter Gummis getroffen werden.

DER JUNGFORSCHER



Noah Dormann (2001)

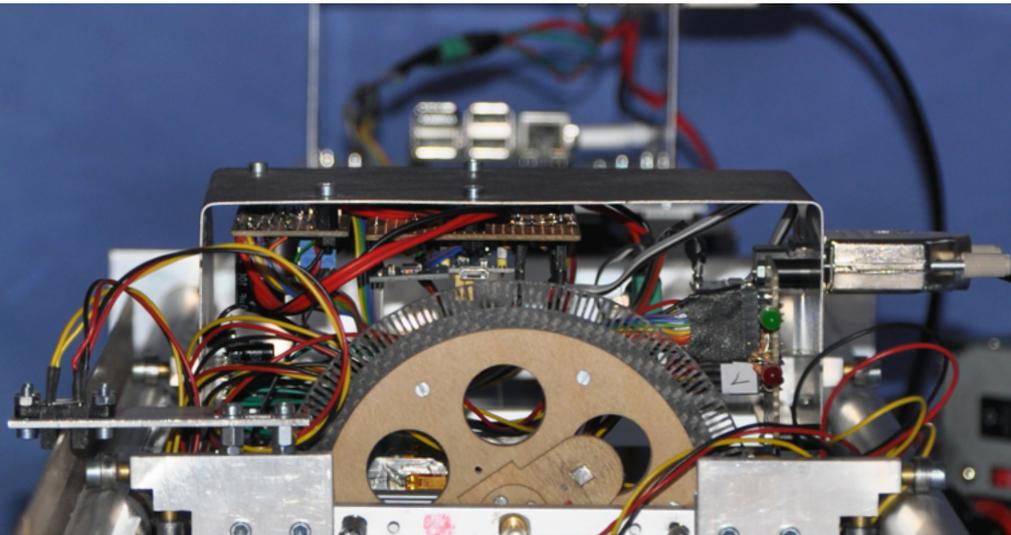
Chiemgau-Gymnasium
Traunstein

Eingang der Arbeit:

22.7.2018

Arbeit angenommen:

3.12.2018



Die Gummistreckbank

Entwicklung, Bau und Test einer Materialprüfanlage für Saalfluggummis

1. Einleitung

Beim Saalflug werden spezielle Gummischnüre aus Elastomeren als Energiespeicher und -umsetzer verwendet, indem sie verdreht werden und anschließend mit der gespeicherten Energie den Propeller eines Ultraleichtmodellflugzeugs antreiben. Vor dem Flug wird der Gummi zunächst gedehnt und langsam aufgedreht. Die maximale Umdrehungszahl, die hier erreicht wird, hängt vom verwendeten Gummi und dem genauen Vorgehen ab. Zudem kommt es auf die Erfahrung des Modellfliegers an. Der Gummi soll zwar maximal aufgedreht werden, darf aber nicht reißen – das erfordert Feingefühl. Nach dem Aufdrehen, welches außerhalb des Fliegers erfolgt, wird der Gummi in den

Flieger eingesetzt und das Modell kann gestartet werden.

Diese Modellflugzeuge fliegen über eine halbe Stunde (Weltmeisterschaften in Rumänien im Jahr 2014). Im Lauf der Jahre wurden von Saalfliegern verschiedene Artikel veröffentlicht [1-4, 6-11], in denen das Drehmoment in Abhängigkeit zu der Umdrehungszahl, der Länge und des Gummiquerschnitts sowie Hinweise zur richtigen Behandlung des Gummis angegeben wurden. Aufgrund von fehlenden oder sehr einfachen Messgeräten und ohne standardisierte Abläufe unterscheiden sich die verschiedenen Ergebnisse teilweise deutlich. Man arbeitet mit Faustformeln, die

empirisch ermittelt wurden. Dabei werden die Messreihen meist manuell mit einfachen Messgeräten durchgeführt. Eder beschreibt beispielsweise, wie er als Drehmomentmesser einen Hebel, der auf eine Waage drückt, nutzt [2]. In [9] findet sich ein Diagramm zur maximalen Aufziehzahl in Abhängigkeit des Hakenabstands und des Gummiquerschnitts. Eine der ältesten bekannten Formeln beschreibt diese maximale Aufziehzahl U_{max} durch

$$U_{max} = C \cdot \frac{l}{\sqrt{Q}}$$

wobei C die Gummikonstante, l die Länge der geknoteten Gummischleife, Q der Gesamtquerschnitt sind [8].

2. Konzept

Eine Materialprüfanlage für Gummis benötigt folgende Bestandteile:

Aktoren um den Gummi zu dehnen und aufzudrehen, sowie Sensoren, um die Dehnung des Gummis (Positionsmessung), die Windungszahl des Gummis, das Drehmoment des Gummis, die Zugkraft des Gummis und die Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit) zu messen. Die Datenverarbeitung dient der Visualisierung und der Speicherung der Messergebnisse.

Die hier vorgestellte Materialprüfanlage ist die Verbesserung eines „Gummiaufziehers“ aus dem Jahr 2014. Tabelle 1 zeigt, welche Komponenten verbessert wurden.

3. Prüfanlage

3.1 Rahmen und Schlitten

Um die Maschine zu bauen, waren verschiedene Bauteile aus unterschiedlichen Werkstoffen nötig. Entsprechend wurden diverse Herstellungsverfahren angewendet.

Tab. 1: Vergleich „Gummiaufzieher“ und hier vorgestellte Materialprüfanlage

	„Gummiaufzieher“ (2014)	Materialprüfanlage (2018)
Rahmen	Einfacher Holzrahmen, Länge < 1 m	Alukonstruktion, Länge ca. 2 m
Gummi ausziehen	Schrittmotor: zu schwach	Schrittmotor mit Getriebe
Antrieb des Schlittens	In Dehnrichtung des Gummis mit Zwirn gezogen, Rückzug mittels Gummis	In beide Richtungen mittels Zwirns, Schlittenbewegung auch ohne eingelegten Prüf gummi möglich
Bewegung des Schlittens	Gleiten auf Messingrohren über Zwirn	Stahlseil statt Zwirn, um dieses stärker spannen zu können und so mehr Stabilität zu bekommen
Gummi aufdrehen	Mit „Servo“-Elektronik angesteuerter Getriebemotor	Kräftiger Getriebemotor mit Endstufe, um auch dickere Gummis problemlos bis zum Zerreißen aufdrehen zu können
Umdrehungen zählen	Hallsensor mit einem Magneten: keine Richtungserkennung	Hallsensor mit mehreren Magneten
Messgeräte	Drehmomentmessung mittels „Servo“-Potentiometer	Präzise Drehmoment- und Kraftmessung (Eigenbau)

Der größte Teil der Prüfanlage besteht aus Metall. Wo immer möglich wurden passende Halbzeuge verwendet. Einige Teile wurden durch Drehen und Fräsen bearbeitet. Dazu benutzte ich unter anderem eine Drehbank, eine Fräsmaschine und eine Bohrmaschine. Skizziert habe ich die Teile sowohl im CAD als auch als einfache Handskizzen.

Einige Teile der Maschine habe ich auf einem 2D-CNC-Fräsplotter gefertigt. Auch wenn diese Art der Fertigung

sehr präzise ist und man die Zeichnung am PC in wenigen Schritten in ein fertiges Bauteil umsetzen kann, bevorzugte ich dennoch die manuelle Herstellung. Die Genauigkeit, die man mit Laubsäge und Feile erreichen kann, reicht bei den meisten Teilen aus und benötigt weniger Zeit als die Anfertigung einer Skizze am CAD. Einige Teile der Messgeräte, wie z. B. die Teilungen wären jedoch händisch nicht herstellbar gewesen.

Das Grundgerüst besteht aus zwei

Alurohren, die mit zwei Querstreben an den Enden verbunden sind (siehe Abb. 1 und [Abb. 2](#)). Auf der linken Querstrebe befindet sich der Getriebemotor inklusive Winkelmessung zum Aufdrehen des Gummis. Zudem befindet sich hier eine Umlenkrolle, um die Nylonschnüre, die den Schlitten bewegen, umzulenken. Auf der rechten Seite befindet sich der Schrittmotor, inklusive Getriebe und den Spulen, um den Schlitten zu bewegen. Ebenso ist Platz für einen Endschalter und die restliche

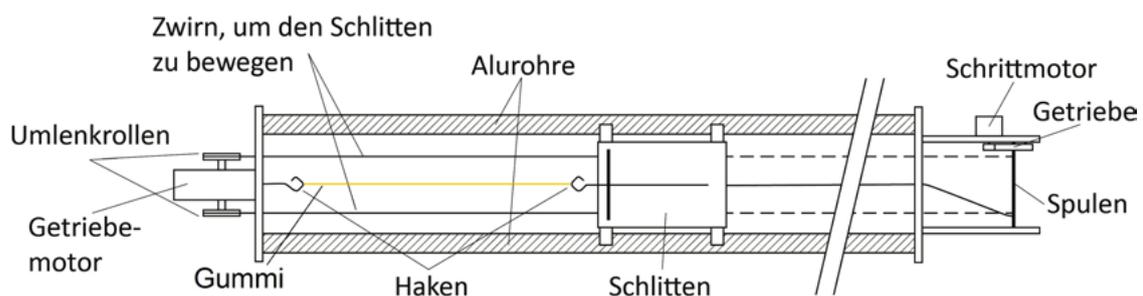


Abb. 1: Übersicht Rahmen und Schlitten

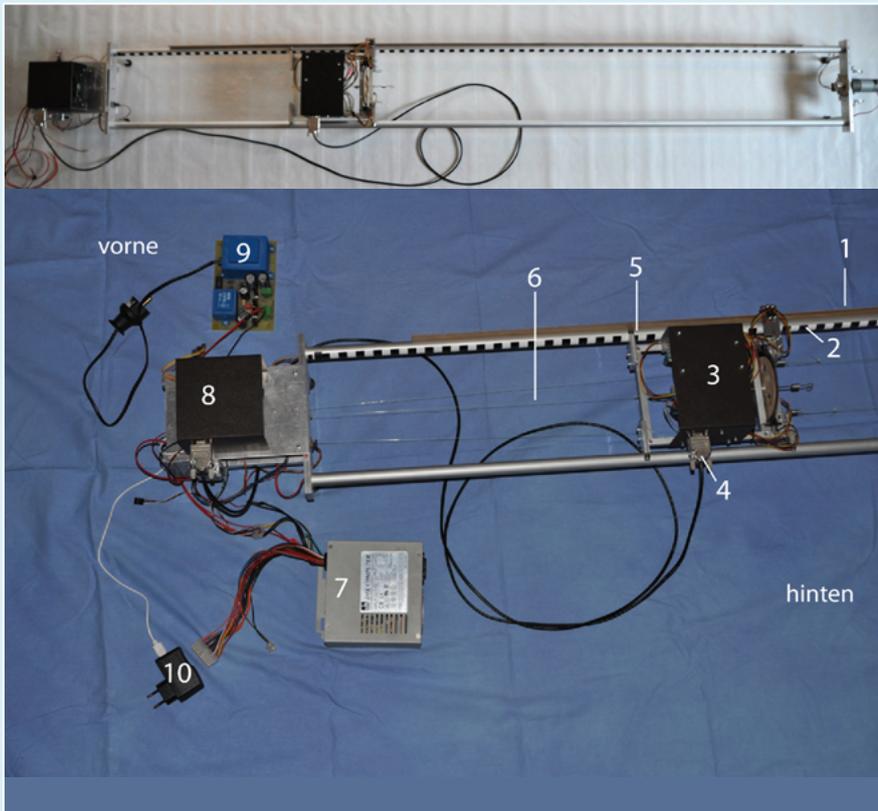


Abb. 2: Fertige Maschine a) Überblick b) nummerierte Einzelkomponenten

1. Millimetererteilung für die Positionsbestimmung
2. Schwarz-weiß-Karo für eine frühere Version der Positionsbestimmung
3. Schlitten mit den Messgeräten für Drehmoment, Zugkraft und Position
4. Kabel zur Versorgung des Schlittens mit Energie und Datenaustausch
5. Führung und Lagerung des Schlittens mittels Kugellagern
6. Nylonfaden zum Antrieb des Schlittens
7. Netzteil für die Spannungsversorgung der Microcontroller und der Motoren
8. Gehäuse, in dem Schrittmotoren und Elektronik zum Antrieb des Schlittens sowie zur Verarbeitung der Daten untergebracht sind.
9. Zusätzliches Netzteil für eine entstörte Spannungsversorgung der Messelektronik
10. Steckernetzteil für einen *Raspberry PI* (wird nicht verwendet)



Elektronik.

Der Schlitten selbst besteht aus einem einfachen Rahmen aus Aluminiumprofilen, der die einzelnen Messgeräte trägt. Nachdem bereits schlechte Erfahrungen mit der Zwirnführung des „Gummiaufziehers“ gemacht worden waren, war eine kugelgelagerte Schlittenführung die bessere Alternative. Diese hat den Vorteil, dass der Schlitten nicht mehr durchhängt. Das Gewicht des Schlittens ist nicht mehr entscheidend, dadurch ergibt sich konstruktive Freiheit beim Einbau der Messgeräte. Außerdem kann der Schlitten durch diese Führung nicht mehr verkanten.

3.2 Drehmomentmessung

Ausgehend von einigen Versuchen und der ersten Version der Maschine steht fest, dass das Drehmoment mittels der Verwindung eines Drahtes gemessen wird. Dieses Vorgehen ist bereits durch

Anleitungen anderer Saalflieger bekannt [3]. Dabei wird ein dünner Draht an einem Ende fest eingespannt, am anderen Ende befindet sich ein Haken inklusive Zeiger und Skala (s. [Abb. 3](#)). Wirkt nun ein Drehmoment auf den Draht, so verwindet sich dieser proportional zu diesem Drehmoment.

Der Verdrehungswinkel ergibt sich aus folgender Gleichung [5]:

$$\varphi = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_p}$$

Dabei ist M_t das Drehmoment, l die Länge, G das Torsionsmodul und I_p das Torsionsflächenmoment. Es ergibt sich die direkte Proportionalität $\varphi \sim M_t$. Um das Drehmoment berechnen zu können, muss der Winkel, um den sich der Draht verwindet, gemessen werden.

Es gibt unterschiedliche Arten diesen Winkel zu messen. In meiner ers-

ten Maschine brachte ein Potentiometer nur mittelmäßigem Erfolg. Zum einen ist die Auflösung und Genauigkeit des verwendeten Potentiometers schlecht. Zum anderen besitzt es viel Reibung, die das Ergebnis verfälschte.

Industriell werden Winkel meist mit Inkrementalgebern gemessen. Daher wurde ein Inkrementalgeber nach dem fotoelektrischen Prinzip gebaut. Als Sensoren bieten sich einfache Lichtschranken des Typs „TCST 2103“ von „Conrad Elektronik“ an. Eine selbstgefräste Scheibe mit 180 Schlitzen aus 3-mm-Sperrholz diente zunächst als Teilung. Die Lichtschranken sind nach Datenblatt so zu beschalten, dass sich der Fototransistor bei offener Schranke sofort in der Sättigung befindet. Es gibt daher nur die zwei Zustände **geblockt** und **durchlässig** und beim Abtasten der Teilung bekommt man ein Rechtecksignal. Durch Abtasten jeder Flanke wird so eine Auflösung von $0,5^\circ$ erreicht.

Die Drehmomente, die gemessen werden sollen, sind vergleichsweise gering und eine höhere Auflösung der Drehmomentmessung ist vorteilhaft. Tabelle 2 zeigt die Möglichkeiten und ihre jeweiligen Probleme.

Faszinierend war die Möglichkeit, durch Interpolation mit derselben Mechanik, einer kleinen Veränderung der Elektronik und entsprechender Software eine vielfach höhere Auflösung zu bekommen.

Interpolation meint hier, dass die Teilscheibe nicht mit diskontinuierlichen Lichtschranken abgetastet wird, was zu einem Rechtecksignal führt, sondern dass stattdessen die Lichtschranken umfunktioniert werden, um eine kontinuierliche Abtastung zu ermöglichen. Die partielle Abschattung der Lichtschranke führt dann zu einem Signal zwischen den vorherigen Extremen. Nach einigen Versuchen mit dem Oszilloskop wurde durch geschickte Beschaltung der Lichtschranke der Diodenstrom so limitiert, dass der Fototransistor sich nicht sofort in Sättigung befindet. Da die Blende der Lichtschranke rund ist und genau der Schlitzbreite von 1 mm entspricht, er-

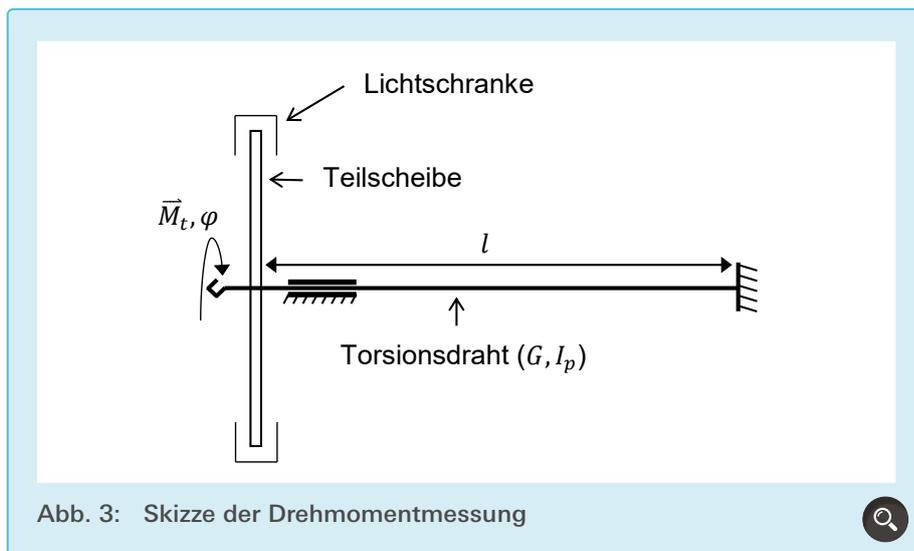


Abb. 3: Skizze der Drehmomentmessung

gibt sich statt des Rechtecksignals ein sinusförmiges Signal.

Um durch Interpolation nicht nur die Auflösung, sondern auch die Genauigkeit zu erhöhen, wird eine bessere Teilung benötigt. Für eine zweite Version fräste ich die Teilscheibe aus CFK. Dies hat den Vorteil, dass bei der Bearbeitung von CFK keine störenden Fransen entstehen und die Schlitze klare, scharfe Kanten aufweisen. Dies begünstigt möglichst sinusförmige Signale und ermöglicht, die Dicke der Teilscheibe auf 0,3 mm zu verringern, was zusätzlichen

Platz in den engen Lichtschranken einbringt. Dieser Platz wird benötigt, da sich die Teilscheibe aufgrund der Zugkraftmessung frei in axialer Richtung bewegen können muss.

Da kleine Drehmomente gemessen werden, spielt auch die Reibung und somit die Lagerung der Teilscheibe eine wichtige Rolle. Es zeigt sich, dass eine eingeschleifte Gleitlagerung mit der klassischen Materialpaarung Bronze/Stahl bereits ausreicht.

Die Lichtschranken werden mit Aluwinkeln an den Schlitten befestigt. Mittels einer Schraube kann die Höhe des Aluwinkels verstellt und so der Phasenwinkel justiert werden.

Um Exzenterfehler zu eliminieren, werden zwei gegenüberliegende „Abtastköpfe“, die jeweils aus zwei Lichtschranken bestehen, eingesetzt.

Nachdem die Mechanik der Winkelmessung fertiggestellt war, musste noch der geeignete Durchmesser für den Torsionsdraht festgelegt werden. Die einzelnen Formeln stammen aus einer Maschinenbauformelsammlung und wurden in einer Excelkalkulation (s. Tab. 3) zusammengefasst. Die Konstanten wurden im Internet recherchiert.

Die Excelkalkulation gab eine grobe Vorstellung von dem nötigen Durch-

Tab. 2: Möglichkeiten zur Erhöhung der Auflösung der Drehmomentmessung

Möglichkeit	Problem
Dünnerer Draht und damit größerer Winkel bei gleichem Drehmoment	Verringern des Messbereichs, da Streckgrenze schneller erreicht wird
Längerer Draht und damit größerer Winkel bei gleichem Drehmoment	Platz auf dem Schlitten ist begrenzt
Mehr Schlitze: Dünnere Schlitze oder größerer Radius der Teilung und damit eine höhere Auflösung des Winkels	Fertigung dünnerer Schlitze ist mit der zur Verfügung stehenden Fräse kaum möglich; kein Platz für einen größeren Radius
Interpolation	Anfälliger für Störgrößen und erhöhter Aufwand bei Mechanik, Elektronik und Programmierung

Tab. 3: Auslegung des Torsionsdrahts



Gegeben:		Ergebnis:	
Durchmesser d in mm	0,3	Trägheitsmoment in mm^4	0,000795216
Drehmoment M in Nmm	4	Widerstandsmoment in mm^3	0,005301438
Max. Verdrehwinkel des Torsionsdrahtes α in Vielfachen von π	12,5663706	Verdrehwinkel α in Grad	617,5767384
Länge l in mm	180	Größte Spannung τ in N/mm^2	754,5123228
E-Modul E in N/mm^2	210000		
Querkontraktionszahl	0,4		

messer, welcher sich im Bereich der Durchmesser, die sich in den Saalfluganleitungen finden lassen, befand. Der Draht ist leicht austauschbar und wurde daher zunächst grob in dieser Größenordnung gewählt.

3.3 Genauigkeit der Winkelmessung

Um die Winkelmessung zu testen, wird eine möglichst genaue Referenz benötigt. Man befestigt dieses Referenzmessgerät am Winkelmessgerät und betrachtet die Abweichung von der Referenz. Da kein geeignetes Referenzmessgerät vorhanden war, wurde als Ersatz ein Schrittmotor verwendet. Durch den Betrieb des Schrittmotortreibers mit Microschritten wurde so ein Schrittwinkel von ca. $0,05625^\circ$ erreicht.

Allerdings ist die Genauigkeit des Schrittwinkels des Schrittmotors im Datenblatt mit $1,8^\circ \pm 5\%$ angegeben. Dadurch ergibt sich rein rechnerisch eine Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ des Schrittmotors.

Natürlich sind damit keine genau-

en Messungen möglich, da der Schrittmotor nicht derart präzise arbeitet. Trotzdem konnte in einem Test als Abschätzung eine Abweichung bestimmt werden.

Auf der y -Achse von [Abb. 4](#) ist der Abweichungswinkel des Messgerätes zum Schrittmotorwinkel aufgetragen. Es zeigt sich, dass die Schwankungen innerhalb einer Umdrehung im Bereich von maximal $\pm 0,25^\circ$ liegen. Zusammen mit der Ungenauigkeit des Schrittmotors ergibt dies dann eine Ungenauigkeit von $\pm 0,35^\circ$. Die dreifache Standardabweichung über 6 Umdrehungen beträgt $0,24^\circ$. Ungenauigkeiten des Schrittmotors spielen hier jedoch eine große Rolle. So lässt sich z. B. die sichtbare Sinusschwingung in [Abb. 4](#) durch einen Exzenterfehler des Schrittmotors erklären. Es ist daher fraglich, inwieweit man von dem Ergebnis auf die tatsächliche Genauigkeit der Winkelmessung schließen kann.

Um das Messgerät weiter zu charakterisieren, wurde die Wiederholgenauigkeit gemessen, da die Ungenauigkeit des Schrittmotors hier vermutlich einen

wesentlich kleineren Einfluss auf das Ergebnis hat.

[Abb. 5](#) zeigt die Abweichung des gemessenen Winkels der ersten Umdrehung zur zweiten Umdrehung. Die Abweichung liegt dabei bei maximal $\pm 0,011^\circ$. Über 6 Umdrehungen gemessen beträgt die dreifache Standardabweichung $0,012^\circ$.

Mithilfe eines genauen Referenzmessgerätes könnten aufgrund dieser Daten noch weitere Optimierungen vorgenommen werden. Auch eine Fehlerkorrektur mittels einer sogenannten „Lookup-Tabelle“ ist denkbar, ausreichende Wiederholgenauigkeit wäre vorhanden. Dabei wird der Fehler an jeder Position in einer Tabelle abgelegt und kann so verrechnet werden, was die absolute Genauigkeit signifikant erhöht. Für dieses Vorhaben sind die erzielten Werte jedoch absolut ausreichend.

Eine weitere Fehlerquelle könnte Fremdlicht durch Reflexionen des Sonnenlichts oder sonstiger Lichtquellen auf die Fototransistoren sein. Um das auszuschließen, wurde das fertige Messgerät Fremdlicht aus verschie-

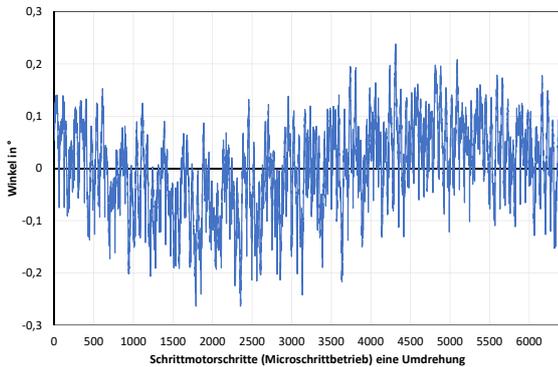


Abb. 4: Abweichung des Winkelmessgeräts vom Schrittmotorwinkel (Dauer der Messung etwa 15 Minuten)

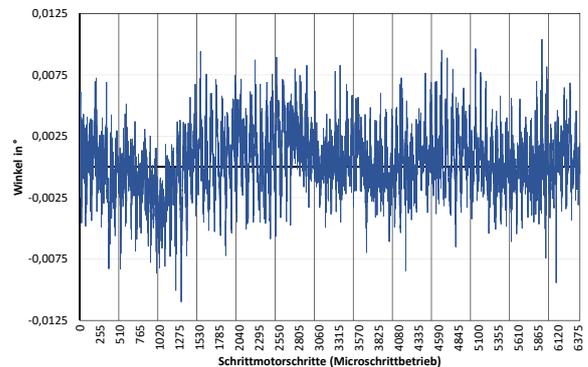


Abb. 5: Abweichung der ersten Umdrehung zur zweiten Umdrehung

denen Winkeln ausgesetzt (Taschenlampe, gespiegeltes Sonnenlicht). Dabei konnte keine Veränderung des gemessenen Winkels festgestellt werden. Mein Messgerät wird somit von Fremdlicht nicht messbar beeinträchtigt.

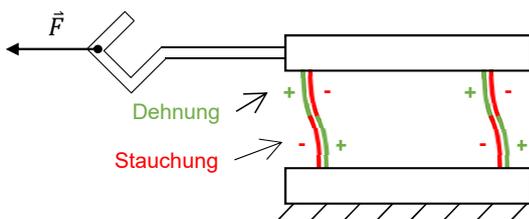
Zusammenfassend kann man festhalten: die Wiederholgenauigkeit beträgt $\pm 0,012^\circ$, die absolute Genauigkeit ist besser als $\pm 0,35^\circ$ und in der Software wird als Auflösung $0,01^\circ$ verwendet.

3.4 Zugkraftmessung

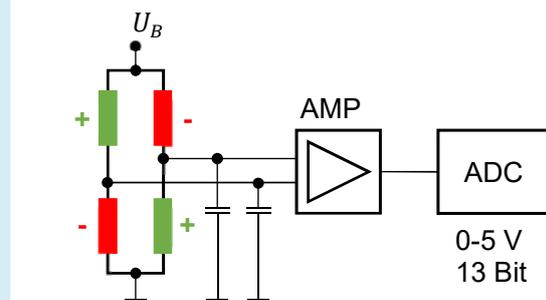
Im Bereich der Zugkraftmessung hatte ich noch keine Erfahrung. Allerdings war ich bereits im Besitz einiger Dehnmessstreifen (DMS). Nach einiger Recherche im Internet kam ich zu dem

Entschluss, diese auch für die Kraftmessung zu verwenden. Typischerweise werden DMS zur Messung von Spannungen in Materialien verwendet. Die DMS werden dabei auf das Material (den Träger) appliziert. Durch die Kenntnis der Trägerparameter lässt sich auf die wirkenden Kräfte schließen. Die notwendige Zugkraft für eine Dehnung bis zur Streckgrenze bei einem Querschnitt von $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ beträgt bereits 42 kN (Werte für Stahl). Der Messbereich, der für den Aufbau notwendig ist, liegt im Bereich von wenigen mN bis maximal 30 bis 40 N . Um diese Kräfte direkt als Zugkräfte messen zu können, muss der Träger also einen sehr kleinen Querschnitt besitzen. Ein weiteres Problem ist die Trennung von Drehmomentmessung und Kraft-

messung. Für die Drehmomentmessung muss sich die Teilscheibe frei bewegen können, bei der Kraftmessung stört das Drehmoment aber, da die Verdrehung des Trägers aufgrund des geringen Querschnitts zur Verfälschung der DMS-Messwerte bis zu deren Beschädigung führen kann. Ich brauche also eine Mechanik, die torsionssteif ist und trotzdem parallel zum Gummi frei beweglich, um die Kraftmessung nicht zu verfälschen. Diesen Anforderungen wird ein Festkörpergelenk gerecht. Dieses verhält sich durch den Querschnitt des Gelenkarms in einer Richtung starr, ist in der anderen Richtung aber elastisch. Das Festkörpergelenk besteht aus zwei Quadern, die mittels dünner Stahlfolie verbunden sind. Dabei ist die Folie in Bewegungsrichtung dünn, um



a)



b)

Abb. 6: Skizze für Zugkraftmessung: prinzipieller Aufbau (a), Beschaltung (b)

Tab. 4: Auslegung des Festkörpergelenks



Gegeben:		Ergebnis:	
Abstand in mm	37	Biegemoment in Nmm	444
Kraft in N	12	Größte Spannung in N	839,0551181
E-Modul in N/mm ²	210000	Flächenträgheitsmoment in mm ⁴	0,132291667
Querkontraktionszahl	0,3	Dehnung in %	0,3996
Breite in mm	12,7	Widerstandsmoment in mm ³	0,529166667
Höhe in mm	0,5	Durchbiegung in mm	7,29312036

eine Bewegung zu ermöglichen, und in die andere Richtung dick, um Bewegung zu verhindern (Parallelogrammführung) (siehe [Abb. 6](#)). Da sich ein entsprechend ausgelegtes Festkörpergelenk bei den kleinen Kräften kaum bewegt, ist es, wenn man von innerer Reibung absieht, reibungsfrei.

Der kleine Querschnitt stellte ebenfalls eine Herausforderung dar. Eine Überschlagsrechnung zeigte hier, dass er in einem Bereich von 1 mm² liegen müsste. Mein erster Ansatz, um diesen kleinen Querschnitt zu umgehen, war ein reibungsfrei aufgehängter Hebel zur Kraftverstärkung.

Die Umsetzung stellte sich jedoch als schwierig heraus, da der Träger für die DMS nach wie vor sehr dünn sein musste. Während weiterer Recherche wurde mir klar, dass man mit DMS nicht nur direkte Zugkräfte messen kann, sondern auch Kräfte, die bei Biegung an den Außenseiten auftreten. Mein zweiter Ansatz war nun, die Zugkraft indirekt über die Biegung der Plättchen des Festkörpergelenks zu messen (s. [Abb. 6 a](#)). Diese Biegung verhält sich für klei-

ne Kräfte bzw. kleine Biegungen annähernd linear zur wirkenden Kraft. Die „Plättchen“ als Verbindung der Quader müssen dünn sein, sollten sich aber ebenso wie die DMS im Messbereich nicht über die Streckgrenze biegen.

Für die Auslegung des Festkörpergelenks wurde eine einfache Excelkalkulation (basierend auf den Formeln zur Balkenbiegung bzw. Flächenträgheitsmomente) erstellt und passende Werte durch Ausprobieren ermittelt (s. Tab. 4).

Die Dehnung bei einer Kraft von 50 N beträgt bei dieser Konfiguration 0,4 %. Da für das Parallelogramm zwei Plättchen erforderlich sind, die sich die Kraft aufteilen, liegt deren Dehnung bei der Streckgrenze ungefähr bei 0,2 %. Somit liegt die maximal erlaubte Kraft bei etwas unter 50 N. Nach diesen Berechnungen baute ich nun mein erstes Gelenk. Die Quader fräste ich selbst aus Halbzeugen. Für die dünne Metallfolie, also die „Plättchen“, verwendete ich sog. „Hasbergfolie“. Diese Metallfolie ist sehr präzise gefertigt, vor allem die Dicke ist sehr konstant. Die DMS wurden unter Druck mit „UHU Plus“ appliziert.

Die DMS wurden in einer Vollbrücke an einen Instrumentenverstärker geschaltet (siehe [Abb. 6 b](#)). Dieser verstärkte die Brückendifferenz von wenigen mV auf einen für Microcontroller messbaren Bereich. Das verstärkte Signal konnte ich dann mit einem Oszilloskop messen. Für die Verstärkerelektronik designte ich eine Platine (s. [Abb. 7](#)) in „EAGLE“. Um diese zu fertigen, ersetzte ich die Spindel an unserem 2D-CNC-Plotter durch einen UV-Laser und belichtete damit eine mit Fotolack beschichtete Kupferplatine. Diese habe ich anschließend entwickelt und geätzt. Diese Platine ist die einzige, die ich nicht auf einer Lochrasterplatine aufgebaut habe. Die Verstärkerelektronik sollte sich möglichst nahe an den DMS befinden und die Leiterbahnen sollten möglichst kurz sein, um Einstreuung von Störsignalen zu vermeiden. Bei den kleinen Spannungen sind bereits die Widerstände der Litzen entscheidend. Daher ist die Schaltung möglichst symmetrisch aufgebaut, um die Leiterlängen überall auf gleiche Länge zu bringen.

Nun wurde der Messbereich getestet,

indem einer der vorgesehenen Gummis am Festkörpergelenk eingehängt und mit der Hand auszogen wurde. Dabei stellte sich heraus, dass der Messbereich noch zu groß war, da bei starker Dehnung nur ein geringer Bruchteil von 5 V ausgegeben wird. Jedoch sollte die Spannung bei maximaler Dehnung bei ungefähr 5 V liegen, um das Signal mit einem Microcontroller einlesen zu können. Außerdem lagen noch hochfrequente Störfrequenzen auf dem Messsignal.

Für die zweite Version wurde deshalb die Dicke der Metallplättchen halbiert, um den Messbereich für geringere Kräfte zu optimieren und so eine höhere Auflösung zu bekommen. Zudem bereitete eine zusätzliche Schaltung auf einer Lochrasterplatine das Signal weiter auf.

Diese Platine (s. [Abb. 8](#)) war mit einem LC-Tiefpassfilter 2. Ordnung bestückt, um das hochfrequente Rauschen zu unterdrücken. Das Signal, das gemessen werden sollte, veränderte sich vergleichsweise langsam. Deshalb wurden für den Kondensator und die Induktivität relativ große, experimentell ermittelte Werte verwendet, um das hochfrequente Rauschen möglichst stark zu unterdrücken. Ein Widerstand und zwei Dioden begrenzten den Strom und schützten den ADC vor Überspannung.

Um eine möglichst gute Verstärkung des Signals mit bestmöglicher Linearität zu erzielen, kam ein „INA217P“ mit einer Versorgungsspannung von ± 12 V zum Einsatz (nicht „Rail-to-Rail“). Dadurch könnte jedoch bei Auftreten einer zu starken Kraft die Differenzspannung der Brückenschaltung in eine Spannung über 5 V oder unter 0 V verstärkt werden: Diese Spannung würde die weitere Auswertungs elektronik beschädigen – davor schützten jedoch die Dioden und der Widerstand.

Die Spannung wurde nun von einem

„5-Volt-13-bit-analog-digital-Wandler“ in einen digitalen Wert konvertiert. Dieser Baustein besitzt eine SPI-Schnittstelle, über die der Wert mit einem Microcontroller ausgelesen werden kann. Um von der Spannung auf eine Kraft schließen zu können, muss der Messaufbau kalibriert werden. Dafür wurde das Gewicht einer Probemasse bestimmt und der Aufbau senkrecht ausgerichtet. Die Gewichtskraft der Masse kann so zur Kalibrierung verwendet werden.

3.5 Getriebemotor

Der Gummi wird von einem Gleichstrom-Getriebemotor aufgedreht. Dieser hat genügend Kraft, um Gummi mit nahezu beliebigem Querschnitt aufzudrehen. Mit einer maximalen Geschwindigkeit von 15 U/s ist er ausreichend schnell. Um möglichst viele Messwerte zu bekommen und Vibrationen zu vermeiden, wird der Gummi für Versuche normalerweise mit etwa 5 U/s aufgedreht.

Angesteuert wird der Motor mit einem Leistungstransistor „TIP120“. Da dieser einen schlechten Stromverstärkungsfaktor hat, wird ein weiterer Transistor benötigt, um den geringen Strom des Microcontrollers zu verstärken. Im Rahmen der Geschwindigkeitsregelung wird der Motor mit Pulsweitenmodulation (PWM) angesteuert. Die Richtungs umkehr erfolgt mittels zweier Relais.

Um Motorposition und Geschwindigkeit zu regeln, ist eine exakte Messung von Winkel und Winkelgeschwindigkeit des Motors nötig.

Ein erster Ansatz, die Motorposition mittels eines Hallsensors und eines bzw. mehrerer Magneten zu messen, stellte sich als unzureichend heraus (keine Richtungserkennung, geringe Auflösung).

Nachdem mein fotoelektrischer Inkrementalgeber bei der Winkelmessung bereits zuverlässige Ergebnisse brachte,

habe ich den Getriebemotor ebenfalls mit einer vereinfachten Form des Inkrementalgebers (keine Interpolation) ausgerüstet. Damit konnte eine einfache Lageregelung realisiert werden.

Der Inkrementalgeber besteht diesmal aus einer Teilscheibe aus 1,5-mm-Sperrholz mit 60 Schlitzen, welche zwei Lichtschranken ohne Interpolation abtasten. Die zusätzliche Auflösung (durch Interpolation) wird nicht benötigt, so lässt sich Rechenzeit sparen, indem ein Hardwarebaustein die Rechtecksignale auswertet.

3.6 Ansteuerung des Schlittens

Der Schlitten wird durch zwei Zwirne bewegt. Ein Zwirn zieht den Schlitten, während der andere Zwirn abgewickelt wird. Als Antrieb dient ein Schrittmotor. Mittels einer Übersetzung treibt dieser zwei Spulen an. Wird der eine Zwirn aufgewickelt, wickelt sich der andere ab. Eine Feder dient als Ausgleich bei unregelmäßiger Wicklung und hält die Zwirne unter Spannung.

Die Position des Schlittens muss prinzipiell nur mit einer Genauigkeit von ± 1 mm bestimmt werden, da allein die Bestimmung der Länge des Gummis diese Ungenauigkeit enthält.

Der erste Ansatz war, direkt aus der Position des Schrittmotors auf die Position des Schlittens zu schließen. Die Elastizität der Zwirne führte allerdings zu Abweichungen von bis zu 5 cm.

Der zweite Ansatz war, die Position zwar prinzipiell mittels des Schrittmotors zu bestimmen – auf kurze Distanz (10 cm) ist die Genauigkeit ausreichend – jedoch in regelmäßigen Abständen die Position mit Referenzmarken abzugleichen. Diese Referenzmarken wurden mit einer selbstklebenden Folie mit Schwarz-weiß-Karomuster als Teilung und einem „Linienfolgesensor“ (Sensor kann zwischen Schwarz und Weiß unterscheiden) als *Encoder* realisiert. Dieser Aufbau scheiterte daran, dass der

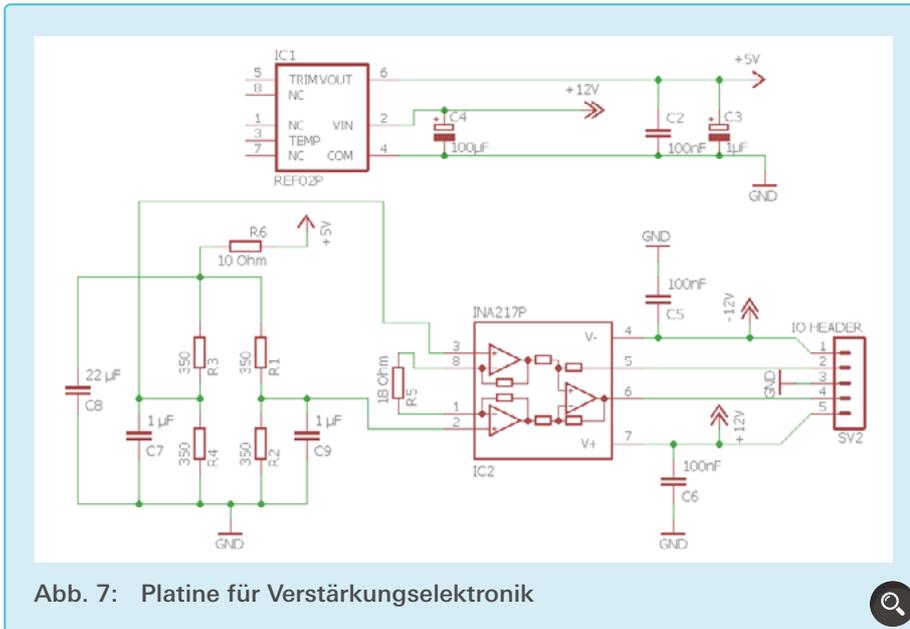


Abb. 7: Platine für Verstärkelelektronik

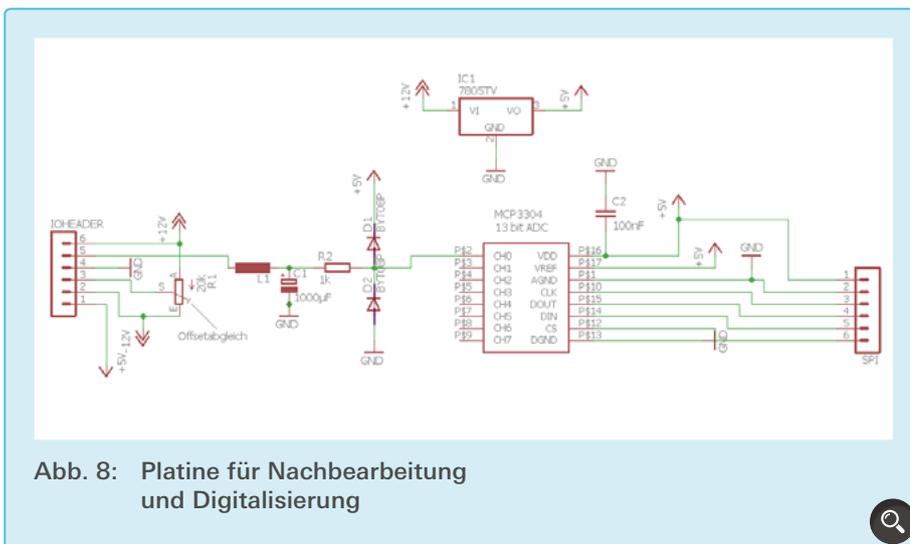


Abb. 8: Platine für Nachbearbeitung und Digitalisierung

Sensor nicht geeignet war. Er reagierte leicht auf Fremdlicht und „prellte“ teilweise an den Übergängen.

Auch verschiedene Programmieransätze konnten diese Defizite nicht ausgleichen. Daher konstruierte ich schließlich auch für den Schlitten einen fotoelektrischen Inkrementalgeber nach dem bekannten Prinzip.

Eine aus 1-mm-Sperrholz gefräste 1-mm-Teilung wird von zwei Lichtschranken im Interpolationsverfahren abgetastet. Dieser Aufbau erreicht eine verwendbare Auflösung von 10 µm und eine absolute Genauigkeit von unter 1 mm auf die Länge von 2 m.

4. Programmierung

Die Maschine wird von drei Microcontrollern gesteuert: *MeasureControl*, *MotorControl* und *MainControl* (siehe [Abb. 9](#)). Diese kommunizieren untereinander mittels einer seriellen Schnittstelle (*Universal Asynchronous Receiver Transmitter* kurz UART). Die einzelnen Microcontroller benutzen zusätzlich je nach Funktion spezielle Peripherie wie einen Analog-Digital-Converter (ADC) oder das *Serial Peripheral Interface* (SPI). Mit dem Laptop sind sie über eine serielle Schnittstelle verbunden.

4.1 Datenverarbeitung der Microcontroller

Ausgehend von einem ATMEGA sind die Datenraten relativ hoch, aus der Perspektive eines FPGAs aber verschwindend gering. Allein aufgrund der räumlichen Trennung von Messgeräten, Motoren und der Verbindung zum Laptop habe ich mich für mehrere STM32F103C8T6-Microcontroller entschieden.

Durch die Nutzung von *Direct Memory Access* (DMA) konnte ich die Kommunikation mit der Peripherie größtenteils in die Hardware auslagern. Die Abfrage der Inkrementalgeber für Winkel- und Positionsmessung mit 3 kHz und das Einlesen des externen ADC mit 12,8 kHz bei gleichzeitiger Verarbeitung stellten so kein Problem da.

4.2 Fotoelektrischer Inkrementalgeber

4.2.1 Ohne Interpolation (Drehgeber für den Getriebemotor)

Für die Inkrementalgeber, die ich ohne Interpolation benutze, kann ein Timer des Microcontrollers als Encoder benutzt werden. Der Timer wird dazu in den *Encoder Interface Mode* versetzt. Das Zählregister des Timers beinhaltet die aktuelle Anzahl an Messschritten und kann per Interrupt in regelmäßigen Abständen ausgelesen und weiterverarbeitet werden.

4.2.2 Mit Interpolation (Zugmessung, Position des Schlittens)

Um einen zusätzlichen Interpolationswinkel zu berechnen, werden die Phasen nicht digital, sondern analog eingelesen. Dazu wird ein Analog-Digital-Umsetzer (ADC) verwendet, der direkt in den Microcontroller integriert ist. Durch die Nutzung von *Direct Memory Access* (DMA) werden die einzelnen Spannungen der Phasen durch den ADC in digitale Werte konvertiert und in einen Buffer gespeichert. Sind alle

Kanäle konvertiert, wird ein Interrupt ausgelöst und die gespeicherten Werte werden weiterverarbeitet.

Die Werte jedes Samples werden anschließend auf einen Wert zwischen -1 und 1 normiert. Der Interpolationswinkel lässt sich nun mittels der „arctan2“-Funktion berechnen. Die Standardimplementierung dieser Funktion ist für einen Microcontroller recht rechenintensiv. Der Interpolationswinkel muss jedoch mit mehreren kHz berechnet werden, um die Übergänge von 0° auf 360° auch bei schnellen Winkelgeschwindigkeiten detektieren zu können. Daher nutze ich ein Polynom dritten Grades als Annäherung an die „arctan2“-Funktion [10].

Nachdem der Interpolationswinkel berechnet ist, müssen noch die Übergänge von 360° auf 0° detektiert und in einer globalen Variable gespeichert werden.

4.3 Kraftmessung per Serial Peripheral Interface (SPI)

Wie bereits im Kapitel „Zugkraftmessung“ beschrieben, kommt ein externer ADC zum Einsatz, um die analoge Spannung der Elektronik in einen digitalen Wert umzuwandeln. Diesen ADC kann man über den SPI-Port des Microcontrollers auslesen. Um eine möglichst hohe Samplerate zu bekommen, wird auch hier DMA genutzt. Dadurch kann eine 256-fache Überabtastung des Signals realisiert werden. Die gemessenen Werte werden summiert und auf einen 15-bit-Wert reduziert. Auf diese Weise wird die Auflösung der 13-bit-Samples erhöht, und durch Mitteln wird zusätzlich Rauschen unterdrückt.

Der Messbereich des ADC liegt zwischen 0 V und 5 V. Durch Überabtastung wird eine Auflösung von rund 0,1526 mV erreicht. Im normalen Betrieb lässt sich dabei durch den zusätzlichen elektrischen Tiefpassfilter kein „Klappen“ des letzten Bits feststellen.

Die Schrittmotorendstufe wurde bereits als eine der Störquellen lokalisiert, da für die aktuellen Versuche jedoch der Schrittmotor kaum bewegt wird und eine Bewegung immer zu einer großen Kraftveränderung allein schon durch Vibrationen des Schlittens führt, ist eine Optimierung an dieser Stelle zweitrangig.

4.4 Messen der Geschwindigkeit des Getriebemotors

Für die Versuche ist es notwendig, dass der Gummi möglichst konstant und gleichmäßig aufgezogen wird. Dazu muss zunächst die Winkelgeschwindigkeit des Getriebemotors gemessen werden. Die Winkelgeschwindigkeit ω kann auf verschiedene Arten gemessen werden. Zum einen zeitdiskret, indem in festen Abständen der verstrichene Winkel gemessen wird, oder ortsdiskret, indem nach festen Winkeln die verstrichene Zeit gemessen wird. Auch eine Kombination beider Methoden ist möglich.

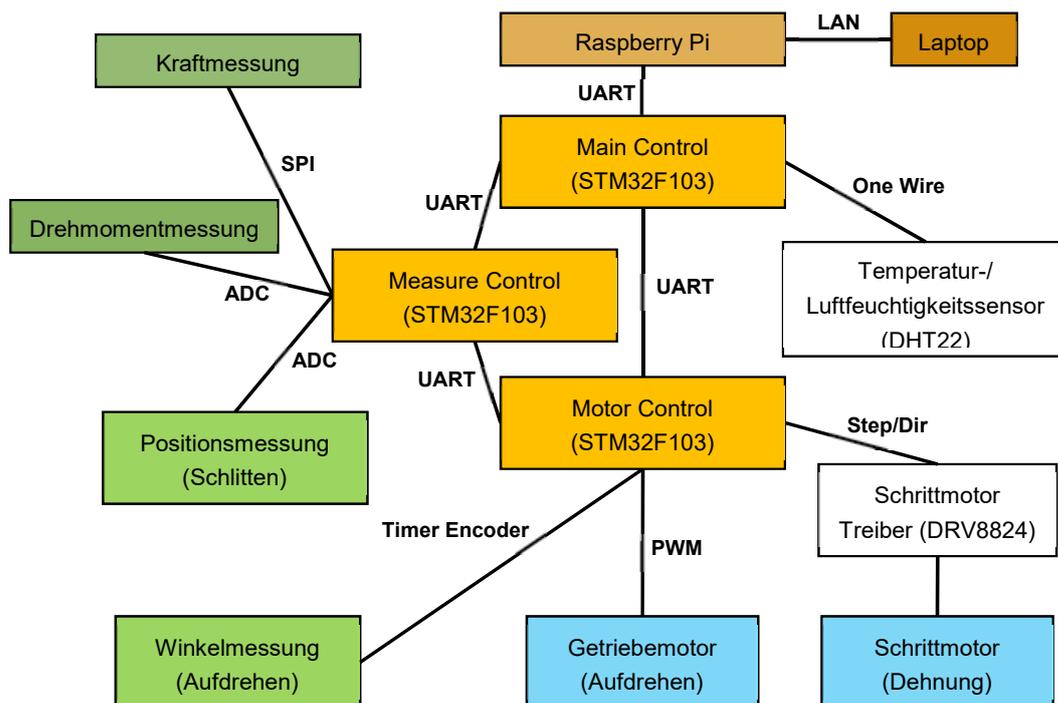


Abb. 9: Microcontrollerschema

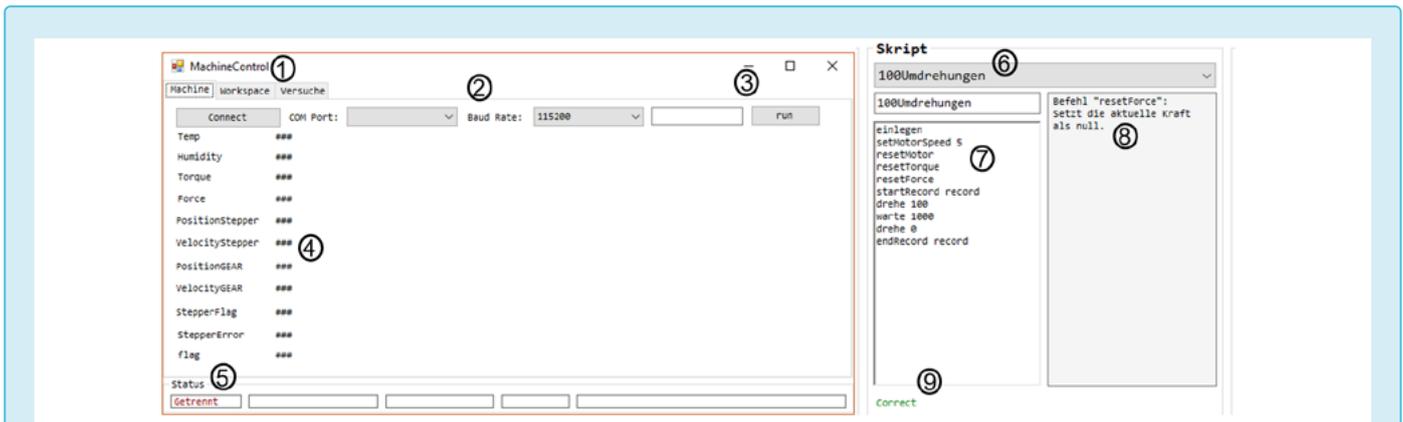


Abb. 10: Benutzeroberfläche

1. Verschiedene Tabs zur Durchführung von Versuchen und der Visualisierung der Ergebnisse
2. Menü, um die Verbindungseinstellungen mit der Maschine zu treffen und zu verbinden
3. Textfeld, um einzelne Befehle eingeben und ausführen zu können
4. Einfache Darstellung aller empfangenen Daten zur Laufzeit
5. Statusleiste, um über die wichtigsten Komponenten der Maschine zu informieren
6. Skriptbox
7. Eingabebox für das Skript
8. Hilfe für aktuelle Eingabe
9. Fehleranzeige



Um die CPU-Auslastung möglichst konstant zu halten, wird zeitdiskret gemessen, also in festen Zeitabständen, und anhand der gezählten Impulse die Geschwindigkeit berechnet. Diese ist zwar bei sehr kleinen Geschwindigkeiten ungenau, jedoch habe ich nur einen Drehzahlbereich von 2–15 Umdrehungen/s und kann die Messung daran anpassen.

4.5 Ansteuerung der Motoren

Nach verschiedenen Ansätzen werden der Getriebemotor und der Schrittmotor mit PID-Regelkreisen angesteuert. Die Drehzahlregelung des Getriebemotors übernimmt ein PI-Regler.

Ein Schrittmotor würde zunächst keinen Regelkreis brauchen, da $v \sim f$ gilt. Jedoch verliert der Schrittmotor diese Linearität durch die Elastizität der Nylonschnüre und dem damit verbundenen unterschiedlichen „Aufwickelverhalten“. Eine Lageregelung des Schlittens ist daher notwendig. Ein PID-Kaskaden-Regler bekommt als Eingangsgröße die Zielposition und erzeugt daraus Drehzahl und letztendlich die Frequenz für den Schrittmotor.

4.6 Verbindung der einzelnen Microcontroller

Um die zuverlässige Funktionalität der Maschine bereitzustellen, müssen alle Microcontroller untereinander kommunizieren. Dazu ist eine schnelle, sichere Verbindung der drei Microcontroller notwendig.

Der Datenaustausch baut auf einem einfachen Byte-Protokoll auf. Dieses besteht aus einer Präambel und den darauffolgenden Daten. Die einzelnen Nachrichten sind dabei immer gleich lang, sodass zum Empfangen und Senden DMA verwendet werden kann.

4.7 Temperatur-Luftfeuchtigkeit-Messung

Ein „DHT22“-Sensor misst mit einer Genauigkeit von $< \pm 0,5^\circ$ bzw. $\pm 2\%$ Temperatur und Luftfeuchtigkeit. Diese Genauigkeit ist ausreichend, um diese Umgebungsvariablen aufzunehmen. Das Auslesen von Temperatur und Luftfeuchtigkeit erfolgt über einen einzigen Pin. Die Auswertung des Protokolls erfolgt mit einem Timer im *Input capture mode*.

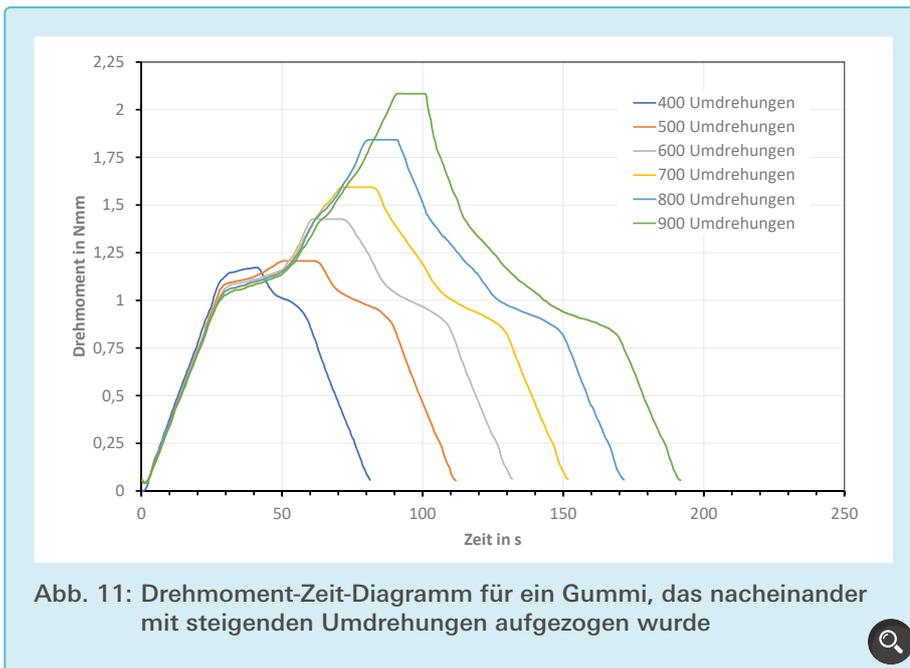
5. Auswertesoftware

Um die Maschine anzusteuern und Messdaten speichern zu können, ist eine Auswertesoftware nötig. Die Benutzeroberfläche (siehe Abb. 10) besteht aus *MachineControl* und dem *Skript*.

5.1 Automatisierter Ablauf von Versuchen

Eine wichtige Funktionalität der Materialprüfanlage ist das automatisierte Ausführen von Versuchen. Dazu habe ich eine einfache Skriptsprache entwickelt.

Mit Befehlen wie `drehe 1000`, `ziehe 300` oder `warte 1000` kann ich den Gummi aufdrehen lassen oder den Schlitten bewegen. Kontrollstrukturen sind in der Form `wiederhole 10 Mal ... end` vorhanden. Dazu gibt es in meinem Programm eine Textbox zum Eingeben des Skripts. Zum aktuellen Befehl wird zusätzlich eine Hilfe angezeigt. Nach jeder Eingabe wird das Skript auf Fehler überprüft und gibt diese aus. Sobald ein Skript ausgeführt wurde, wird es gespeichert und kann so wiederverwendet werden.



holt auf- und abgedreht. Dabei wurden maximale Umdrehungen von 400 bis 900 erreicht.

Durchführung: Zunächst werden die Messgeräte genullt und langsame Geschwindigkeiten für Aufdrehen und Dehnen des Gummis gesetzt. Der Schlitten wird verfahren, um den Hakenabstand der Gummilänge anzupassen. So kann der Gummi einfach eingelegt werden. Nach einer Bestätigung, dass der Gummi durch den Nutzer eingelegt ist, läuft der Versuch automatisch ab. Der Gummi wird dabei zunächst auf 1 m gedehnt und dann auf die oben genannten Umdrehungszahlen auf- und abgedreht. Zwischen Aufdrehen und Abdrehen erfolgt immer eine kurze Pause von 10 s. Die einzelnen Auf- und Abdrehvorgänge werden als einzelne Datensätze unter dem Versuch abgespeichert. Nachdem der Versuch vollständig durchgeführt wurde und das *Skript* beendet wurde, können die Daten über die Software visualisiert werden (z.B. Abb. 11). Der gesamte Versuch dauert etwa 15 Minuten.

5.2 Visualisierung der Ergebnisse

Alle Versuche werden gespeichert, wobei jeweils auch die Verbindung zum verwendeten Skript bzw. Gummi besteht, sodass man den Versuchsablauf nachvollziehen kann bzw. erkennen kann, welche Versuche jeweils mit einem Skript durchgeführt wurden.

Die Datensätze der Versuche lassen sich direkt durch Diagramme visualisieren, wobei man zwischen dem gewünsch-

ten Inhalt umschalten kann und zudem weitere Nachbearbeitungsmaßnahmen, wie z. B. einen Tiefpassfilter zuschalten kann.

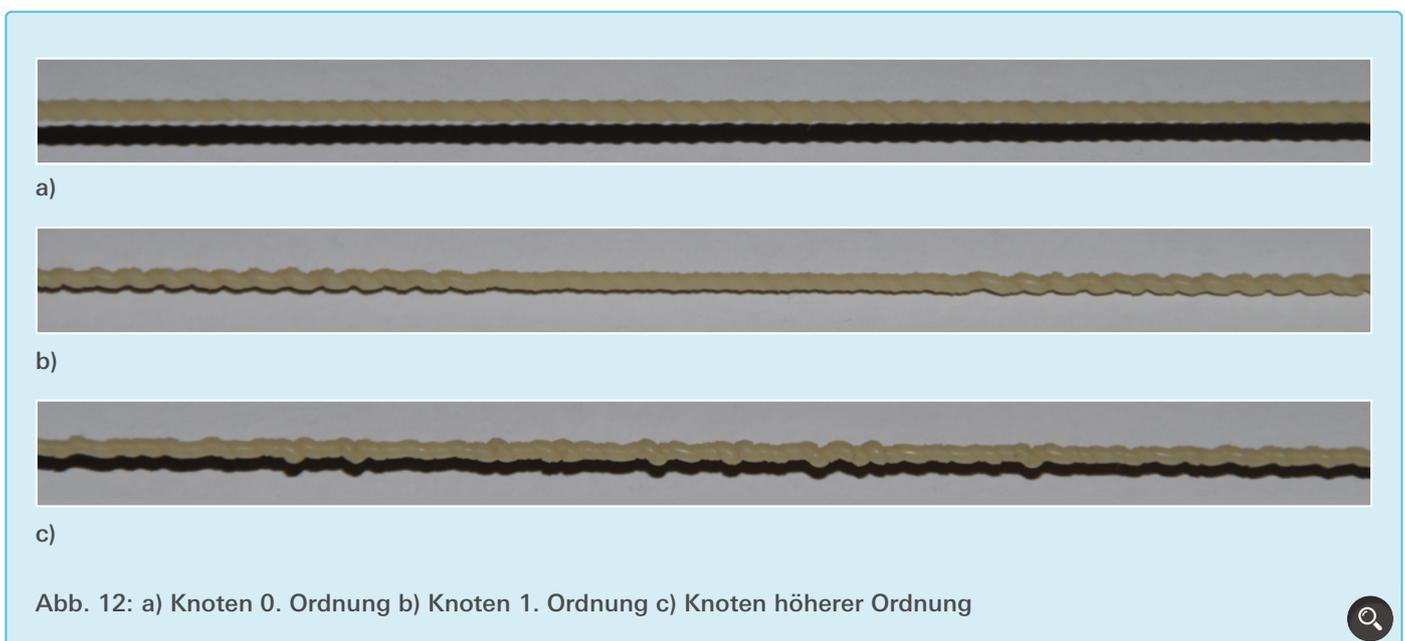
6. Messergebnisse

In diesem Kapitel werden Messergebnisse und Beobachtungen vorgestellt.

6.1 Automatisiertes Auf- und Abdrehen

Der Gummi SuperTAN2 wurde wieder-

Ergebnis und Beobachtung: In Abb. 11 kann man unterschiedliche Phasen erkennen. Die erste, lineare Phase dauert von 0 bis 30 Sekunden: Hier steigt das Drehmoment stark an. In der Phase 2 von 30 bis 50 Sekunden ist der Drehmomentanstieg



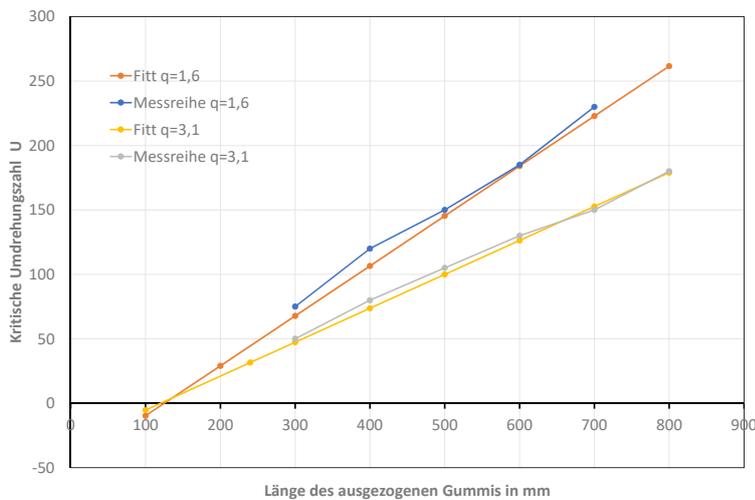


Abb. 13: Untersuchung der kritischen Umdrehungszahl für Knoten erster Ordnung

nur sehr gering. Erst in der anschließenden Phase steigt das Drehmoment wieder stärker an. Auch bis zum höchsten Drehmoment sind bei genauer Betrachtung abwechselnd stärker und weniger starke Anstiege zu erkennen.

Sehr gut erkennt man auch, dass das erzielte Drehmoment bei gleicher Umdrehungszahl bei jedem Aufziehversuch geringer wird.

Die unterschiedlichen Drehmomentanstiege lassen sich nicht durch die Elastizität des Gummis allein erklären. Der Grund der Drehmomentanstiege liegt vermutlich in der Geometrie des Gummis während des Aufziehens wie [Abb. 12](#) zeigt.

In der ersten Phase verwindet sich der Gummi zunächst nur („Knoten 0. Ordnung“, [Abb. 12 a](#)). Ist diese Phase überschritten, so verdrillt sich der Gummi zu regelmäßigen Verdickungen („Knoten 1. Ordnung“, [Abb. 12 b](#)). Dabei entsteht zunächst ein Gleichgewicht zwischen Drehmoment und Zugkraft. Bei der Entstehung eines Knotens nimmt die Zugkraft zu, aber das Drehmoment ab. Daher steigt das Drehmoment nur noch schwach an, während sich diese „Knoten 1. Ordnung“ bilden. Anschlie-

ßend verdrillen sich diese „Knoten 1. Ordnung“ weiter zu „Knoten 2. Ordnung“ ([Abb. 12 c](#)).

Die Vermutung liegt nahe, dass sich auch die weiteren Knicke in den Messkurven der Drehmomentmessung ([Abb. 11](#)) durch die Bildung von Knoten höherer Ordnung erklären lassen.

Das Absinken des Drehmoments bei jedem neuen Aufziehversuch lässt sich durch Alterung und damit nachlassender Spannkraft des Gummis erklären. Der Anstieg der Temperatur des Gummis durch das Aufziehen als Ursache ist unwahrscheinlich, da diese bekanntlich zu einer Zunahme der Gesamtenergie des Gummis führen würde, wodurch sich der Gummi stärker zusammenzieht und demnach die Spannkraft stiege.

6.2 Kritische Umdrehungszahl für Knoten erster Ordnung

Nachdem die einzelnen Abschnitte des Drehmomentverlaufs durch die geometrischen Gegebenheiten beschrieben wurden, sollten diese auch in einen formellen Zusammenhang gebracht werden. Zunächst wurde dazu die kritische Umdrehungszahl, bei der Knoten erster Ordnung entstehen, betrachtet. Als

Einflüsse kommen dabei primär Dehnung, Länge und Querschnitt der Gummischleife in Frage.

Bei der Untersuchung der Abhängigkeit von der Dehnung des Gummis, also dem Hakenabstand beim Aufdrehen, lässt sich deutlich ein linearer Zusammenhang erkennen ([Abb. 13](#)). Der Schnittpunkt der gefitteten Geraden mit der x-Achse liegt genau bei der Hälfte der Länge der Gummischleife im ungedehnten Zustand. Eine Veränderung des Querschnitts des Gummis zeigt sich in einer unterschiedlichen Steigung der Geraden. Eine genauere Untersuchung ergab hier eine indirekte Proportionalität zur Wurzel des Querschnitts. Weitere Versuche mit verschiedenen Stranganzahlen im üblichen Bereich zeigten zudem, dass der Schnittpunkt mit der x-Achse nicht immer bei der Hälfte der Gummilänge im ungedehnten Zustand liegt, sondern bei $\frac{1}{\text{stranganzahl}}$ – bei den üblicherweise verwendeten zwei Strängen also genau bei $\frac{1}{2}$.

Somit ergibt sich für die kritische Umdrehungszahl U_{krit}

$$U_{\text{krit}} = \frac{l - \frac{1}{S} l_{\text{Motor}}}{2 \sqrt{\frac{1}{2} q_{\text{Gesamt}}}}$$

wobei l die Länge des gedehnten Gummis, l_{Motor} die Länge des ungedehnten Gummis, S die Anzahl von Strängen, q_{Gesamt} der Gesamtquerschnitt aller Gummistränge und $\frac{1}{2}$ der Proportionalitätsfaktor ist.

6.3 Wiederholbarkeit von Messergebnissen

Ein wichtiger Aspekt bezüglich der Aussagekraft weiterer Versuche ist die Reproduzierbarkeit von Messreihen. Beim Gummi spielt vor allem die Vorgeschichte (Lagerung, Belastung, Schmierung) eine wichtige Rolle. Deshalb werden Gummis vor dem ersten Gebrauch „eingebrochen“. Der Gummi

wird dabei in einen definierten Zustand gebracht, indem er stark belastet wird. Abb. 14 a zeigt die Ergebnisse eines Experiments, bei dem ein bereits eingebrochener Gummi 20-mal direkt hintereinander gleich aufgedreht wurde: Die zwanzig Messreihen liegen exakt übereinander. Nur die erste Messreihe zeigt einen deutlichen Offset. Dies liegt an den Hysteresen meiner Messgeräte. Erst nach dem ersten Durchlauf befinden sich die Messgeräte in einem definierten Zustand.

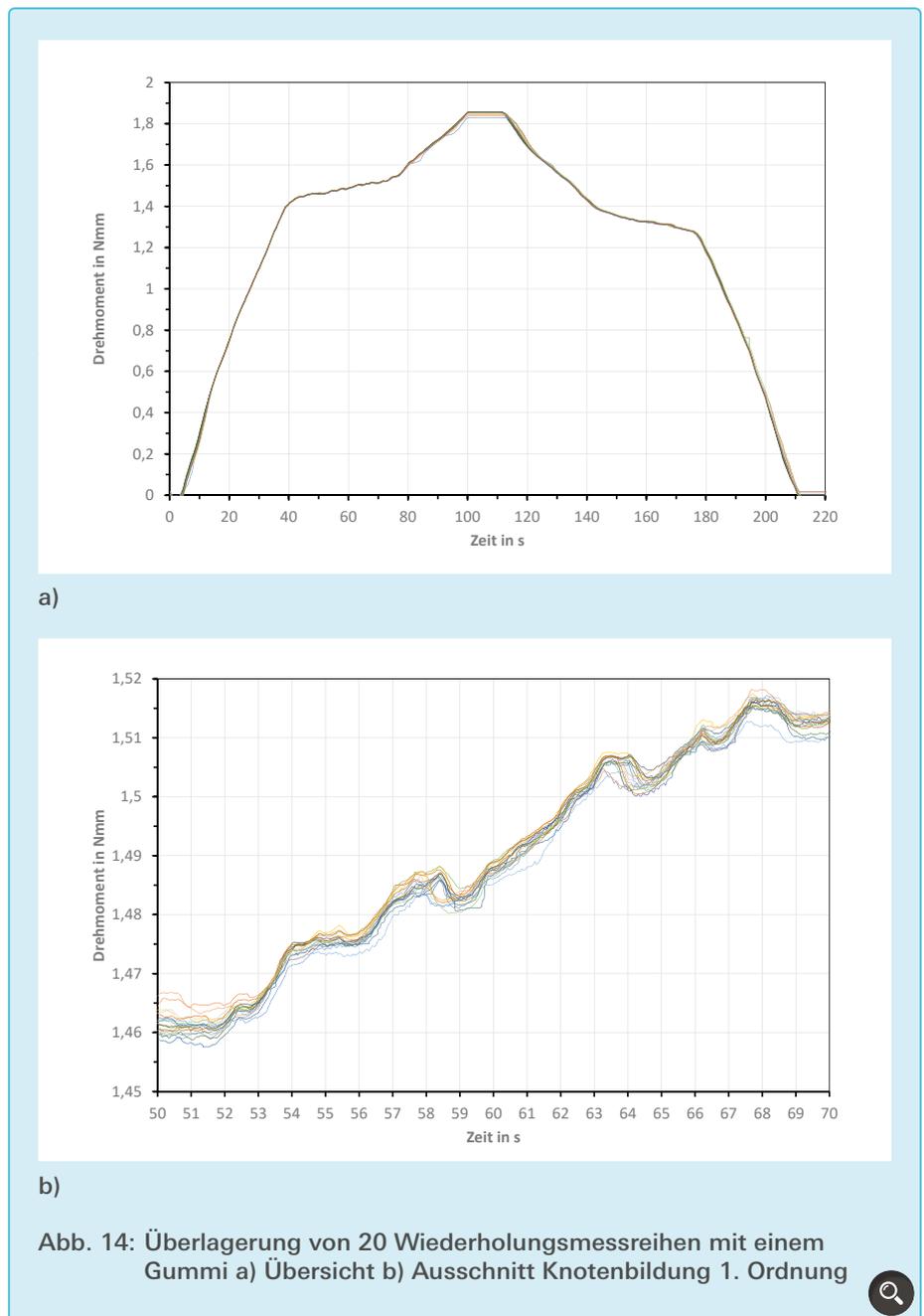
Dieser Versuch zeigt zum einen, dass sowohl mein Messgerät als auch das Verhalten des Gummis reproduzierbar ist. Zum anderen scheint sich der Gummi durch diesen Aufdrehvorgang nicht maßgeblich zu erwärmen. Der geringfügige Offset der einzelnen Messreihen lässt sich höchstens auf den Temperaturverlauf von 22°C auf 24 °C während des Versuchs zurückführen.

Besonders deutlich wird die Reproduzierbarkeit, wenn man sich eine Stelle genauer ansieht. In Abb. 14 b sieht man den Drehmomentverlauf im Abschnitt der Knotenbildung 1. Ordnung. Erwartet hätte man hier eine zufällige Streuung der Bildung von Knoten. Jedoch sind die Artefakte während des Drehmomentanstiegs, die auf die Bildung von Knoten hinweisen, exakt an derselben Stelle.

Wenn man den ersten „linearen“ Anstieg betrachtet, stellt man auch hier fest, dass alle Messreihen keiner Gerade, sondern eher einem Bogen folgen, der in der Vergrößerung bei etwa 14 Sekunden einen „Knick“ vermuten lässt. Man sieht also, dass diese Abweichungen keine Messungenauigkeiten sind, sondern dass ein Modell, das einen linearen Anstieg voraussetzt, die Realität nur annähert wiedergeben kann.

6.4 Vergleich verschiedener Gummichargen

Die für den Saalflug verwendeten Spezialgummis werden mittlerweile nur noch



von einer einzigen Firma in den USA hergestellt. Diese produziert einmal im Jahr extra für die Saalflugszene einen passenden Gummi. Durch kleine Unterschiede bei der Herstellung unterscheiden sich die einzelnen Gummis teilweise deutlich. So gibt es bestimmte Chargen, die als besonders gut gelten und extra für Wettbewerbe aufgehoben werden.

Dr. Heinrich Eder hat freundlicherweise Gummiprüfungen verschiedener Chargen bereitgestellt, sodass mit ihnen verschiedene Versuche durchgeführt werden konnten.

Zum Vergleich wurde je Probe eine Gummischleife mit gleichem Querschnitt und Länge geknotet. Das Wiegen der einzelnen Schlaufen hat ergeben, dass das Gewicht bei allen ca. 1,8 g beträgt. Als Versuch werden alle Gummis möglichst praxisnah zunächst auf 1 m gedehnt und bei dieser Dehnung auf 600 Umdrehungen aufgedreht. Anschließend ruhen sie 60 Sekunden, bevor sie wieder auf 30 cm (in etwa dem Hakenabstand im Flieger) entspannt und dann abgedreht werden.

Obwohl sich somit die einzelnen Proben

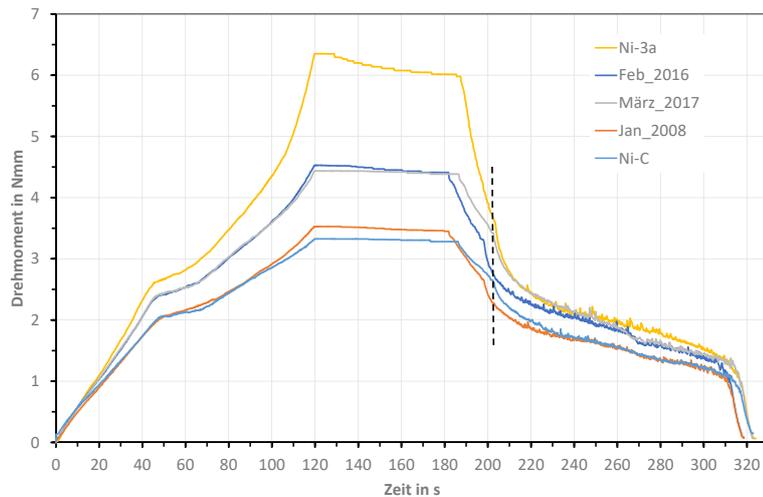


Abb. 15: Drehmomentverläufe von Gummiprüfungen verschiedener Chargen

nur durch ihren chemischen Aufbau unterscheiden, sind die Drehmomentkurven sehr unterschiedlich (Abb. 15). Das Spitzendrehmoment eines Gummis von Nimptsch (Ni-3a) ist nahezu doppelt so groß, wie das eines Gummis aus dem Jahr 2008 (Jan_2008). Hier spielen auf jeden Fall auch Alterungseffekte eine Rolle. Es zeigt sich somit, dass es schwierig ist, nur von den geometrischen Beschaffenheiten eines Gummis auf sein Verhalten zu schließen. Interessant ist, dass sich zwar die Amplituden der Messkurven unterscheiden, jedoch markante Ereignisse wie das Einsetzen der Knotenbildung erster Ordnung in etwa zum selben Zeitpunkt einsetzen. Dies bestätigt die Vermutung, dass diese Knotenbildung (1. Ordnung) vor allem geometrisch bedingt ist. Zudem zeigt sich, dass man vom Drehmomentverlauf beim Aufdrehen nicht zwingend auf den Verlauf beim Abdrehen schließen kann. So hat der Gummi mit dem größten maximalen Drehmoment (Ni-3a) nach dem Zusammenziehen auf 30 cm (Markierung in Abb. 15) in etwa das gleiche Drehmoment, wie die Gummis (Feb_2016) und (März_2017). Das heißt auch, dass der Wirkungsgrad des Gummis schlechter ist als der von (Feb_2016) und (März_2017), da ein stärkeres Drehmoment während des

Aufdrehens eine größere Arbeit bedeutet, jedoch beim Abdrehen der Drehmomentverlauf und damit die rückgewonnene Arbeit bei beiden ziemlich gleich ist. Warum also gerade die Charge von Probe (Ni-3a) als Wettbewerbsgummi verwendet wurde, wird aus diesem Versuch nicht ersichtlich. Auch der Gummi (Ni-C) der sogar als „C“-Competition als Wettbewerbsgummi gekennzeichnet wurde, schneidet hier mit dem geringsten Spitzendrehmoment eher schlecht ab. Möglicherweise wurde er aber auch gerade aufgrund seines niedrigen Spitzendrehmoments ausgewählt, da so ein gleichmäßiger Flug gewährleistet wird. Berechnet man die Energie der verschiedenen Proben als Integral des Drehmoments über die Umdrehungszahl und vergleicht sie bezüglich der abgegebenen Energie bei möglichst gleichmäßigem Drehmomentverlauf, scheinen (Feb_2016) und (März_2017) die beste Wahl zu sein.

7. Ausblick

Nachdem der Bau der Materialprüfanlage abgeschlossen war, konnten erste Versuchsreihen durchgeführt werden. Die Ergebnisse waren verblüffend und warfen oft mehr Fragen auf, als sie beantworteten. Dementsprechend existiert mittlerweile eine Datenbank von über 200 Versuchen mit unterschiedlichsten Gummis und Skripten. Die daraus gewonnenen Kenntnisse lassen sich hier nicht alle darstellen. Weitere interessante Fragestellungen wären:

- Untersuchung von Drehmoment und Kraft kurz vor dem Reißen des Gummis
- Untersuchung von Formeln aus Veröffentlichungen
- Untersuchung des Temperatureinflusses
- Optimales Aufziehen in Bezug auf maximale Energie und möglichst gleichmäßigen Drehmomentverlauf
- Vergleich meines maschinellen Aufziehens zum Aufziehen von Saalflugprofis

Quellen- und Literaturverzeichnis

- [1] Barker, John, „Aufziehen eines Gummimotors“, *Thermiksense*, Nr. 3, 1995, S. 5–6
- [2] Eder, Heinrich, „Fliegen mit Minimalenergie“, *Make*, Nr. 4, 2017, S. 14-15 & 47–50
- [3] Eder, Heinrich, „Alles über Saalflug: Vom Gummiantrieb bis zum Micro-RC-Modell“, vth Verlag, 2014
- [4] Gerlach, Oskar, „Der Gummimotor“, *Deutsche Luftwacht – Modellflug Bd. 7*, Nr. 4, 1942, S. 4748
- [5] Hrg. Grote, Karl-Heinrich, Feldhusen, Jörg, „Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau“, Berlin 2011, S. C 26 f. und E 76 f.
- [6] Hatschek, Bob, „How to cooperate with PIRELLI“, *Model Airplane News*, Juni 1961, S. 62–67
- [7] Korsgaard, Jorgen, „Gummipraxis“, *Thermiksense*, Nr. 1, 2001, S. 20–23
- [8] Schneitler, Rolf, „Berechnung der Leistungen von Gummimotoren“, *Deutsche Luftwacht - Modellflug Bd. 1*, Nr. 4, 1936, S. 120–122
- [9] F. Stamer und A. Lippisch, „Der Bau von Flugmodellen“, C.J.E. Volkmann Nachf. G.M.B.H Verlag, 1935, Beiblatt Tafel 2.
- [10] Taylor, Nic, „How to Find a Fast Floating-Point atan2 Approximation“, <https://www.dsprelated.com/showarticle/1052.php>, 30.03.2018
- [11] Warren, Michael, „Gummi-Vorbereitung, -Lagerung und -Einsatz für F1B“, *Thermiksense*, Nr. 2, 2000, S. 17–20
- [12] Warren, Michael, „Gummi-Vorbereitung, -Lagerung und -Einsatz für F1B 2. Teil“, *Thermiksense*, Nr. 3, 2000, S. 15–21

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Dr. Christian Brendl für die kontinuierliche konstruktive Unterstützung im Rahmen seiner Tätigkeit als Mentor von Jugend forscht und bei den Vorbereitungen auf die Intel ISEF. Mein Betreuungslehrer Michael Götzinger hat mich mehrere Jahre bei meinen Jugend forscht-Projekten unterstützt und mich auch dieses Mal wieder bei Durststrecken motiviert. Zu speziellen Fragen zur Auslegung von Verstärkerschaltungen für DMS konnte ich auf die Antworten von Gerhard Schegelman zählen. Für die Bereitstellung spezieller Materialien bedanke ich mich bei Dr. Heinz Eder und der Firma Heidenhain. Ich bin froh, dass meine Familie die Transformation von meinem Kinderzimmer zu einem Labor toleriert hat und mir die Teilnahme an Jugend forscht so erst ermöglicht hat.

Publiziere auch Du hier!

Forschungsarbeiten von
Schüler/Inne/n und Student/Inn/en

In der Jungen Wissenschaft werden Forschungsarbeiten von SchülerInnen, die selbstständig, z. B. in einer Schule oder einem Schülerforschungszentrum, durchgeführt wurden, veröffentlicht. Die Arbeiten können auf Deutsch oder Englisch geschrieben sein.

Wer kann einreichen?

SchülerInnen, AbiturientInnen und Studierende ohne Abschluss, die nicht älter als 23 Jahre sind.

Was musst Du beim Einreichen beachten?

Lies die [Richtlinien für Beiträge](#). Sie enthalten Hinweise, wie Deine Arbeit aufgebaut sein soll, wie lang sie sein darf, wie die Bilder einzureichen sind und welche weiteren Informationen wir benötigen. Solltest Du Fragen haben, dann wende Dich gern schon vor dem Einreichen an die Chefredakteurin Sabine Walter.

Lade die [Erstveröffentlichungserklärung](#) herunter, drucke und fülle sie aus und unterschreibe sie.

Dann sende Deine Arbeit und die Erstveröffentlichungserklärung per Post an:

Chefredaktion Junge Wissenschaft

Dr.-Ing. Sabine Walter
Paul-Ducros-Straße 7
30952 Ronnenberg
Tel: 05109 / 561508
Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de

Wie geht es nach dem Einreichen weiter?

Die Chefredakteurin sucht einen geeigneten Fachgutachter, der die inhaltliche Richtigkeit der eingereichten Arbeit überprüft und eine Empfehlung ausspricht, ob sie veröffentlicht werden kann (Peer-Review-Verfahren). Das Gutachten wird den Euch, den AutorInnen zugeschickt und Du erhältst gegebenenfalls die Möglichkeit, Hinweise des Fachgutachters einzuarbeiten.

Die Erfahrung zeigt, dass Arbeiten, die z. B. im Rahmen eines Wettbewerbs wie **Jugend forscht** die Endrunde erreicht haben, die besten Chancen haben, dieses Peer-Review-Verfahren zu bestehen.

Schließlich kommt die Arbeit in die Redaktion, wird für das Layout vorbereitet und als Open-Access-Beitrag veröffentlicht.

Was ist Dein Benefit?

Deine Forschungsarbeit ist nun in einer Gutachterzeitschrift (Peer-Review-Journal) veröffentlicht worden, d. h. Du kannst die Veröffentlichung in Deine wissenschaftliche Literaturliste aufnehmen. Deine Arbeit erhält als Open-Access-Veröffentlichung einen DOI (Data Object Identifier) und kann von entsprechenden Suchmaschinen (z. B. BASE) gefunden werden.

Die Junge Wissenschaft wird zusätzlich in wissenschaftlichen Datenbanken gelistet, d. h. Deine Arbeit kann von Experten gefunden und sogar zitiert werden. Die Junge Wissenschaft wird Dich durch den Gesamtprozess des Erstellens einer wissenschaftlichen Arbeit begleiten – als gute Vorbereitung auf das, was Du im Studium benötigst.



Richtlinien für Beiträge

Für die meisten Autor/Inn/en ist dies die erste wissenschaftliche Veröffentlichung. Die Einhaltung der folgenden Richtlinien hilft allen – den Autor/innen/en und dem Redaktionsteam

Die Junge Wissenschaft veröffentlicht Originalbeiträge junger AutorInnen bis zum Alter von 23 Jahren.

- Die Beiträge können auf Deutsch oder Englisch verfasst sein und sollten nicht länger als 15 Seiten mit je 35 Zeilen sein. Hierbei sind Bilder, Grafiken und Tabellen mitgezählt. Anhänge werden nicht veröffentlicht. Deckblatt und Inhaltsverzeichnis zählen nicht mit.
- Formulieren Sie eine eingängige Überschrift, um bei der Leserschaft Interesse für Ihre Arbeit zu wecken, sowie eine wissenschaftliche Überschrift.
- Formulieren Sie eine kurze, leicht verständliche Zusammenfassung (maximal 400 Zeichen).
- Die Beiträge sollen in der üblichen Form gegliedert sein, d. h. Einleitung, Erläuterungen zur Durchführung der Arbeit sowie evtl. Überwindung von Schwierigkeiten, Ergebnisse, Schlussfolgerungen, Diskussion, Liste der zitierten Literatur. In der Einleitung sollte die Idee zu der Arbeit beschrieben und die Aufgabenstellung definiert werden. Außerdem sollte sie eine kurze Darstellung schon bekannter, ähnlicher Lösungsversuche enthalten (Stand der Literatur). Am Schluss des Beitrages kann ein Dank an Förderer der Arbeit, z. B. Lehrer und Sponsoren, mit vollständigem Namen angefügt werden. Für die Leser kann ein Glossar mit den wichtigsten Fachausdrücken hilfreich sein.
- Bitte reichen Sie alle Bilder, Grafiken und Tabellen nummeriert und zusätzlich als eigene Dateien ein. Bitte geben Sie bei nicht selbst erstellten Bildern, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. die genauen und korrekten Quellenangaben an (siehe auch [Erstveröffentlichungserklärung](#)). Senden Sie Ihre Bilder als Originaldateien oder mit einer Auflösung von mindestens 300 dpi bei einer Größe von 10 · 15 cm! Bei Grafiken, die mit Excel erstellt wurden, reichen Sie bitte ebenfalls die Originaldatei mit ein.
- Vermeiden Sie aufwendige und lange Zahlentabellen.
- Formelzeichen nach DIN, ggf. IUPAC oder IUPAP verwenden. Gleichungen sind stets als Größengleichungen zu schreiben.
- Die Literaturliste steht am Ende der Arbeit. Alle Stellen erhalten eine Nummer und werden in eckigen Klammern zitiert (Beispiel: Wie in [12] dargestellt ...). Fußnoten sieht das Layout nicht vor.
- Reichen Sie Ihren Beitrag sowohl in ausgedruckter Form als auch als PDF

ein. Für die weitere Bearbeitung und die Umsetzung in das Layout der Jungen Wissenschaft ist ein Word-Dokument mit möglichst wenig Formatierung erforderlich. (Sollte dies Schwierigkeiten bereiten, setzen Sie sich bitte mit uns in Verbindung, damit wir gemeinsam eine Lösung finden können.)

- Senden Sie mit dem Beitrag die [Erstveröffentlichungserklärung](#) ein. Diese beinhaltet im Wesentlichen, dass der Beitrag von dem/der angegebenen AutorIn stammt, keine Rechte Dritter verletzt werden und noch nicht an anderer Stelle veröffentlicht wurde (außer im Zusammenhang mit **Jugend forscht** oder einem vergleichbaren Wettbewerb). Ebenfalls ist zu versichern, dass alle von Ihnen verwendeten Bilder, Tabellen, Zeichnungen, Grafiken etc. von Ihnen veröffentlicht werden dürfen, also keine Rechte Dritter durch die Verwendung und Veröffentlichung verletzt werden. Entsprechendes [Formular](#) ist von der Homepage www.junge-wissenschaft.ptb.de herunterzuladen, auszudrucken, auszufüllen und dem gedruckten Beitrag unterschrieben beizulegen.
- Schließlich sind die genauen Anschriften der AutorInnen mit Telefonnummer und E-Mail-Adresse sowie Geburtsdaten und Fotografien (Auflösung 300 dpi bei einer Bildgröße von mindestens 10 · 15 cm) erforderlich.
- Neulingen im Publizieren werden als Vorbilder andere Publikationen, z. B. hier in der Jungen Wissenschaft, empfohlen.

Impressum

[JUNGE]
wissenschaft



Junge Wissenschaft

c/o Physikalisch-Technische
Bundesanstalt (PTB)
www.junge-wissenschaft.ptb.de

Redaktion

Dr. Sabine Walter, Chefredaktion
Junge Wissenschaft
Paul-Ducros-Str. 7
30952 Ronnenberg
E-Mail: sabine.walter@verlag-jungewissenschaft.de
Tel.: 05109 / 561 508

Verlag

Dr. Dr. Jens Simon,
Pressesprecher der PTB
Bundesallee 100
38116 Braunschweig
E-Mail: jens.simon@ptb.de
Tel.: 0531 / 592 3006
(Sekretariat der PTB-Pressestelle)

Design & Satz

Sabine Siems
Agentur „provieler werbung“
E-Mail: info@provieler-werbung.de
Tel.: 05307 / 939 3350

