

Making Things Move

Die Welt bewegen



Lernen
durch
Entdecken

Dustyn
Roberts
Übersetzung von
Peter Klicman

DIE COOLE
WELT DER
MECHANIK &
MOTOREN

O'REILLY®

Inhaltsverzeichnis

Über die Autorin	XI
Danksagungen	XII
Was dieses Buch ist	XIV
Was dieses Buch nicht ist.	XVI
Wie man dieses Buch nutzt.	XVI
Ihre Ideen sind ihr größtes Plus	XVII
Was Sie wissen müssen	XVIII
Was Sie haben müssen	XIX
Was Sie über die Deutsche Übersetzung wissen müssen	XXI
1 Einführung in Mechanismen und Maschinen	1
Sechs einfache Maschinen.	2
Hebel	2
Hebel zweiten Grades	6
Hebel dritten Grades	8
Rollen	9
Geschlossene Systeme	9
Offene Systeme.	11
Rad und Achse	13
Schiefe Ebenen und Keile	14
Geschwindigkeit.	15
Schrauben	16
Zahnräder.	18
Getriebearten	19
Übersetzungsverhältnis	22
Entwurfswänge und Freiheitsgrade	23
Freiheitsgrade	23
Minimal beschränktes Design.	24
Projekt 1-1: Rube-Goldberg-Frühstücksmaschine	26

Referenzen	31
2 Materialien: Wie man sie wählt und wo man sie findet	33
Materialien beschreiben	34
Materialeigenschaften	34
Materialversagen: Druck, Krümmung und Ermüdung	34
Wie man Toleranzen toleriert	36
Materialtypen	38
Metalle	38
Keramik	42
Polymere (Kunststoffe)	42
Verbundwerkstoffe	44
Halbleiter	46
Biomaterial	47
Projekt 2-1: Verschiedene „Sprungbretter“	48
Referenzen	49
3 Schrauben oder kleben: Teile befestigen und verbinden	51
Nicht dauerhafte Verbindungen: Befestigungselemente	52
Projekt 3-1: Loch bohren und Gewinde schneiden	55
Kopf und Kopfanschlussformen	58
Unterlegscheiben	62
Nägel und Klammern	62
Dübel	63
Sicherungsringe	64
Dauerhafte Verbindungen: Kleben, Nieten und Schweißen	64
Klebstoffe	64
Nieten	68
Schweißen, Hartlöten und Löten	68
4 Kraft, Reibung und Drehmoment (Meine Güte!)	71
Drehmoment-Berechnungen	72
Reibung	75
Projekt 4-1: Ermittlung des Reibungskoeffizienten	79
Reibung reduzieren	80
Freischneiden und Graffiti-Roboter	81
Wie man Kraft und Drehmoment misst	86
Kraft messen	86
Drehmoment messen	88

Projekt 4-2: Motor-Drehmoment messen	88
5 Mechanische und elektrische Leistung, Arbeit und Energie	91
Mechanische Leistung	92
Elektrische Leistung	93
Energie für Prototypen: Das Labornetzgerät	101
Mobile Optionen: Batterien	102
Steck-Optionen	106
Alternative Energiequellen	107
Federn und Verformungsenergie	114
Projekt 5-1: Mausefallen-getriebenes Fahrzeug	115
Referenzen	117
6 Ene, mene, Motor: Bewegung erzeugen und steuern	119
Wie Motoren funktionieren	120
Projekt 6-1: Motor mit Magnetdraht im Eigenbau	120
Arten rotierender Aktuatoren	122
Gleichstrommotoren	123
Drehmagnete	138
Arten linearer Aktuatoren	139
Linearmotoren	140
Betätigungsmagnete	140
Motorsteuerung	141
Grundlegende Steuerung eines Gleichstrommotors	141
Projekt 6-2: 1x1 der Gleichstrommotor-Steuerung – die einfachste Schaltung	142
Projekt 6-3: Einen Schaltkreis zusammenlöten	143
Projekt 6-4: Schaltung auf Steckbrett	146
Projekt 6-5: Motor kehrt marsch	149
Geschwindigkeitskontrolle durch Impulsdauermodulation	153
Projekt 6-6: Hardware-PWM zur Geschwindigkeitsregelung	154
Fortgeschrittene Steuerung von Gleichstrommotoren	159
Projekt 6-7: Software-PWM zur Geschwindigkeitsregelung	159
Steuerung von Hobby-Servos	165
Steuerung von Standard-Hobby-Servos	166
Projekt 6-8: Steuerung eines Standard Hobby-Servos	167
Steuerung eines Weiterlauf-Servos	170
Schrittmotor-Steuerung	170
Projekt 6-9: Steuerung eines bipolaren Schrittmotors	172
Steuerung von Linearmotoren	177

VIII Inhaltsverzeichnis

Tipps und Tricks zur Motorsteuerung	178
Bewegung ohne Motor	181
Flüssigkeitsdruck	181
Künstliche Muskeln	183
Referenzen	184
7 Die Eingeweide: Kugellager, Kupplungen, Zahnräder, Schrauben und Federn	185
Lager und Buchsen	186
Radiallager	187
Kombinationen und Speziallager	194
Tipps und Tricks zur Installation von Lagern	196
Kopplungen	198
Mit Servomotoren arbeiten	198
Mit anderen Motortypen arbeiten	200
Kupplungen verwenden	206
Bundwellen	207
Zahnräder	208
Projekt 7-1: Eigene Zahnräder herstellen	211
Zwischenzahnräder	221
Doppelgetriebe	222
Riemenscheiben und Kettenräder, Riemen und Ketten	223
Standardscheiben und -bänder	224
Zahnriemenräder und Zahnriemen	224
Kettenräder und Ketten	224
Spindel (Power Screws)	225
Federn	227
Druckfedern	227
Zugfedern	228
Torsionsfedern	230
Sprengringe	231
Blattfedern	231
Spiralfedern	231
Referenzen	232
8 Einfache Maschinen kombinieren	233
Mechanismen zur Umwandlung von Bewegung	234
Gestänge	239
Projekt 8-1: Pantograph	241
Automaten und mechanische Spielzeuge	246

Projekt 8-2: Selbstbau-Automat – Das freundliche Schaf	249
Referenzen	250
9 Dinge machen und machen lassen	251
Das Making Things Move-Ökosystem	252
Kreation	253
Analoge Kreation	253
Digitale Kreation	254
Projekt 9-1: Das 3D-Modell eines Teils herunterladen und öffnen	258
Umsetzung	260
Analoge Umsetzung	261
Fertigung	262
Analoge Fertigung	262
Projekt 9-2: Ein mittiges Loch bohren ohne Drehmaschine	264
Digitale Fertigung	269
Montage	272
Verbreitung	272
Analog	274
Digital	274
Referenz	274
10 Projekte	275
Projekt 10-1: Die nicht so faule Susanne	275
Projekt 10-2: Windlicht	289
Projekt 10-3: SADbot: Der „Seasonally Affected Drawing Robot“	300
Referenzen	321
Anhang: Strom fürs Steckbrett und Arduino-Einführung	323
Strom für Ihr Steckbrett	323
Arduino-Einführung	324
Das Zusammenspiel von Arduino und Computer	325
Nun lassen wir es blinken	328
Nun lassen wir es GROSS blinken	329
Index	333

4

Kraft, Reibung und Drehmoment (Meine Güte!)

Haben Sie jemals versucht, eine Tür zu öffnen, und dabei festgestellt, dass Sie auf der falschen Seite drücken – also an der Angel – und dass sie nur schwer zu öffnen ist? Das passiert, weil die Tür zum Öffnen ein gewisses Drehmoment braucht. Wenn Sie die Tür zu nah an der Angel drücken, müssen Sie wesentlich mehr Kraft aufbieten als am Türknauf, um das gleiche Drehmoment zu erzeugen. Ich empfehle, Türen in der Mitte zu drücken, um peinliche Situationen zu vermeiden.

Wenn man wissen will, wie groß das Drehmoment ist, an welcher Stelle man an der Tür drücken soll, herausfinden will, ob etwas bricht, einen Motor oder Material für ein Projekt wählen möchte, dann ist es hilfreich, wenn man sich die Welt um uns herum in Zahlen vorstellt. Bevor wir uns also Beispiele für Kräfte, Reibung und Drehmoment ansehen, müssen wir unsere Mathematik-Kenntnisse ein wenig auffrischen.

Drehmoment-Berechnungen

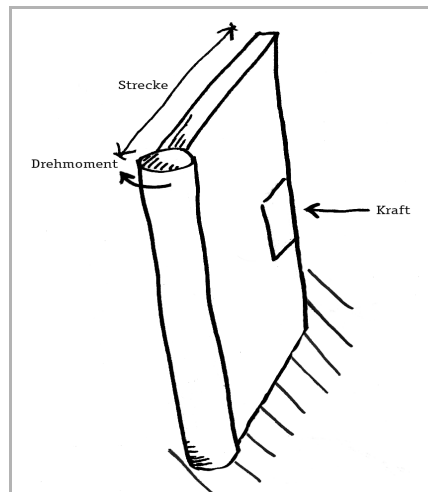
Zuerst müssen Sie die Beziehung zwischen *Kraft* und *Drehmoment* verstehen. Wir haben Kraft im ersten Kapitel behandelt. Während man sich Kraft als Stoßen oder Ziehen vorstellen kann, ist das Drehmoment die Stärke, mit der man etwas dreht.

Drehmoment beschreibt, wie fest etwas gedreht wird. Genauer gesagt, ist das Drehmoment die Kraft mal dem senkrechten Abstand zur Drehachse. Dieser Abstand wird auch *Hebelarm* genannt:

$$\text{Drehmoment} = \text{Kraft} \times \text{Abstand} (\perp)$$

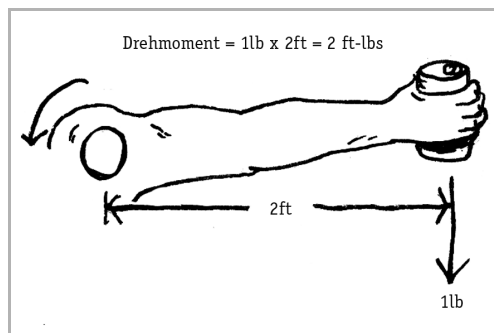
Im Fall der widerspenstigen Tür bildet die Angel die Rotationsachse. Aus Abbildung 4-1 und der Gleichung können Sie entnehmen, dass das Drehmoment umso größer ist, je größer der Abstand von der angewandten Kraft zur Türangel ist. Die Kraft sind in diesem Fall Sie, der die Tür aufdrückt. Wenn Sie die Tür also sehr nah an der Angel aufdrücken, müssen Sie sehr viel mehr Kraft aufwenden, als etwas weiter weg von der Türangel, wo Sie deutlich weniger Kraft benötigen.

ABBILDUNG 4-1 Drehmoment bildlich dargestellt



Drehmoment lässt sich an einem einfachen Beispiel greifbar machen. Nehmen Sie eine Dosensuppe aus der Vorratskammer, nehmen Sie sie in die rechte Hand und strecken Sie den Arm parallel zum Boden aus. Die Anspannung in Ihrer Schulter entsteht durch Ihre Muskeln, die das nötige Drehmoment erzeugen, um die Dose in Position zu halten. Ihre Schulter fungiert als Rotationsachse und das Drehmoment ist die Kraft der Dose (deren Gewicht) multipliziert mit dem Abstand der Dose

ABBILDUNG 4-2 Drehmoment an der Schulter beim Halten einer Dose parallel zum Boden



zur Schulter (siehe Abbildung 4-2). Wiegt die Dose 1 lb und ist ihr Arm 2 ft lang (d_1), dann wirkt ein Drehmoment von $1 \text{ lb} \times 2 \text{ ft} = 2 \text{ ft-lbs}$ auf ihre Schulter.

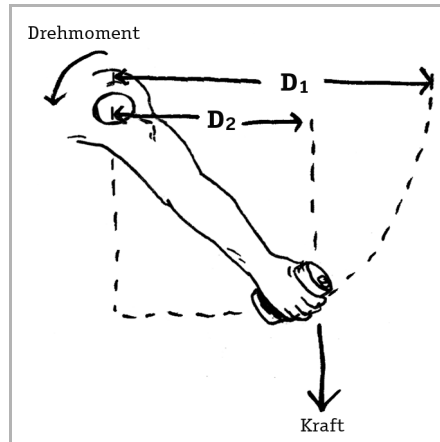
Ihre Schulter wird nach einer Weile in dieser Position etwas müde, also senken Sie die Dose bis zur Mitte ab (siehe Abbildung 4-3). Das auf die Schulter wirkende Drehmoment ist nun geringer, obwohl Ihr Arm gleich lang und die Dose gleich schwer ist. Wieso? Die Kraft der Dose wirkt immer noch nach unten (die Gravitation wirkt immer), aber der Abstand zur Achse – Ihrer Schulter – ist kleiner (d_2).

Drehmoment ist immer *Abstand* $\times$ *Kraft*. Leider gibt es viele Möglichkeiten, Kraft und Abstand zu messen, weshalb man das Drehmoment in foot-pounds, dem in Europa üblichen (Milli-)Newtonmetern, und so weiter, angeben kann. Besuchen Sie www.online-conversion.com/torque, um beliebige Werte in die von Ihnen bevorzugte Maßeinheit umzuwandeln. Es gibt sogar Smartphone-Apps, die das für Sie erledigen. Wenn Sie beispielsweise einen Motor finden, der sein Drehmoment in Millinewtonmetern angibt, foot-pounds für Sie aber sinnvoller ist, wandeln Sie das Motor-Drehmoment in foot-pounds um.

Bevor wir uns einigen Beispielen zuwenden können, müssen wir auch noch unsere Mathematik-Kenntnisse in Geometrie auffrischen. Erinnern Sie sich noch an Sinus, Cosinus und Tangens (kurz sin, cos und tan)? Diese drei trigonometrischen Eigenschaften helfen bei der Bestimmung des Drehmoments, wenn (wie in Abbildung 4-3) die Kraft nicht in einem so praktischen rechten Winkel auf die Rotationsachse wirkt.

Ein rechtwinkliges Dreieck besitzt einen Winkel von 90° (angedeutet durch den Kasten in der Ecke des Dreiecks in Abbildung 4-4). Die dem 90° -Winkel gegenüberliegende (längste) Seite des Dreiecks wird Hypotenuse genannt. Das Tolle an rechten Winkeln ist, dass man jeden beliebigen Wert – d.h. Seitenlänge oder Winkel – über Sinus, Cosinus oder Tangens ermitteln kann, wenn man zwei Werte kennt.

ABBILDUNG 4-3 Drehmoment an der Schulter beim angewinkelten Halten einer Dose



Nun verwenden wir diese Beziehungen, um die Länge der Seite X in Abbildung 4-4 zu bestimmen. Wir wissen nur, dass ein Winkel 45° und die Hypotenuse 2 ft lang ist. Da wir die Seite bestimmen wollen, die an den uns bekannten Winkel angrenzt, können wir den Cosinus wie folgt verwenden:

$$\cos(45) = X / 2$$

Nun können wir die Gleichung nach X umstellen:

$$X = \cos(45) \times 2$$

Geben Sie $\cos 45$ in ihren Taschenrechner ein, erhalten Sie als Antwort den Wert 0,707. Mit 2 multipliziert erhalten wir die Länge der Seite $X = 1.4$ ft.

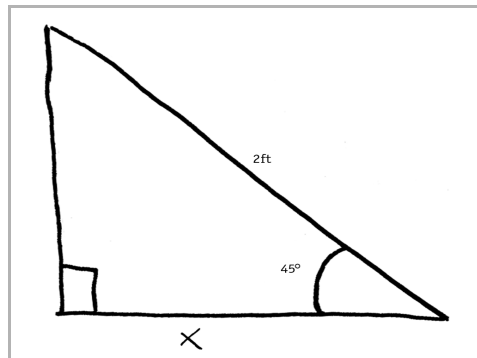
Haben Sie bemerkt, dass wir gerade die unbekannte Länge d_2 aus Abbildung 4-3 gelöst haben? Wenn wir annehmen, dass der Arm einen Winkel von 45° zur Horizontalen hat und 2 ft lang ist, dann haben wir gerade genau das getan. In Abbildung 4-2, haben wir bereits herausgefunden, dass das Schulter-Drehmoment bei gerade ausgestrecktem Arm 2 ft-lbs beträgt. Bestimmen wir nun das Drehmoment, wenn die Dose wie in Abbildung 4-3 in einem Winkel von 45° gehalten wird.

Die lotrechte Strecke, die wir gerade bestimmt haben, ist 1.4 ft, multipliziert mit dem Gewicht der Dose (1 lb), ergibt ein Drehmoment von $1.4 \text{ ft} \times 1 \text{ lb} = 1.4 \text{ ft-lbs}$. Aus diesem Grund ist es einfacher, eine Dose mit leicht angewinkeltem Arm zu halten statt mit einem gerade ausgestreckten.

Spinnen wir dieses Beispiel etwas weiter und nehmen wir an, wir wollen eine manns-hohe Puppe bauen, die eine Dose heben und senken kann. Wie stark müsste der Motor sein, den Sie an der Schulter befestigen?

Um sich bewegende Mechanismen bauen zu können, müssen Sie zuerst bestimmen können, ob etwas zerbricht, wenn es sich nicht bewegt (die *Statik*). Meistens lässt sich ein statisches Problem isolieren, das den schlimmsten Fall eines *dynamischen* (sich bewegenden) Problems darstellt. In unserem Beispiel ist das der Fall, wenn die Dose am weitesten von der Motorwelle entfernt ist und daher das größte Drehmoment ver-

ABBILDUNG 4-4 Rechtwinkliges Dreieck



langt. Da sich das Gewicht der Dose nicht ändert, wird das höchste Drehmoment benötigt, wenn der Abstand zwischen Dose und Schulter am höchsten ist. Das ist dann der Fall, wenn der Arm der Puppe parallel zum Boden ausgerichtet ist (wie in Abbildung 4-2 zu sehen). Da wir für diesen Fall das maximale Drehmoment bereits mit 2 ft-lbs bestimmt haben, müssen Sie also nach einem Motor suchen, der mindestens so stark ist. Er wird dann problemlos auch alle anderen Winkel verarbeiten können.

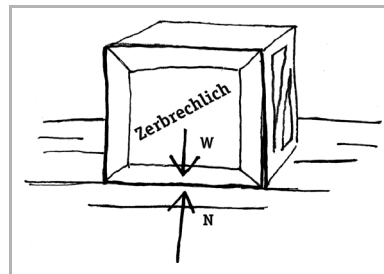
Reibung

Reibung tritt immer dann auf, wenn zwei Oberflächen Kontakt miteinander haben. Sie lässt Türen quietschen und macht Maschinen laut. Hohe Reibung ist manchmal eine gute Sache, wenn Ihr Mechanismus mit der Umgebung interagiert. Ein Beispiel sind Autoreifen, denen es die Reibung ermöglicht, gut auf der Straße zu haften. Die Reibung ist aber üblicherweise Ihr Feind, wenn es darum geht, Dinge sich bewegen zu lassen. Sie raubt Ihrem Mechanismus die Energie und verringert seine Leistungsfähigkeit. Wir streben in unseren Mechanismen eine niedrige Reibung an, weil sie dann rund laufen. Diese niedrige Reibung macht antihaftbeschichtetes Kochgeschirr glatt und lässt Sie auf Eis gleiten.

Was genau ist also Reibung und wie können wir unsere Projekte entwerfen und Materialien wählen, um sie zu minimieren?

Genau genommen ist Reibung (wie Ihr Gewicht) eine Kraft. Tatsächlich entspricht die Kraft der Reibung einem prozentualen Anteil des Gewichts eines Objekts. Nehmen wir an, Sie wollen eine 50 lb schwere Kiste über einen Holzboden bewegen. Wenn die Kiste ruht, wirken zwei Kräfte auf sie ein, wie in Abbildung 4-5 zu sehen:

ABBILDUNG 4-5 Auf eine ruhende Kiste wirkende Kräfte



- 1. Gewicht (W)** Das Gewicht der Kiste konzentriert sich im Gravitationszentrum der Kiste und richtet sich auf den Boden (in Richtung der Gravitation).
- 2. Normalkraft (N)** Der Boden wirkt der Kiste mit einer Kraft entgegen, die dem Gewicht der Kiste in Richtung der Normalen entspricht. Das mag ein wenig konstruiert klingen, doch stellen Sie sich vor, was passiert, wenn Sie die Kiste auf ein Bett aus Gummibärchen setzen. Die Gummibärchen würden

zusammengepresst werden, bis sie stark genug komprimiert wären, um das Gewicht der Kiste halten zu können. Der Boden wird nicht zusammengepresst, da er stark genug ist, um das Gewicht zu halten (anderenfalls sollten Sie sich einen neuen Boden zulegen).

Die Normalkraft (N) entspricht dem Gewicht (W) der Kiste, wenn diese stillsteht. Man bezeichnet das als *statisches Gleichgewicht*, d.h. alle auf das Objekt wirkenden Kräfte heben sich gegenseitig so auf, dass sich das Objekt nicht bewegt.

Da die Kiste sehr schwer ist, versuchen Sie gar nicht erst, sie zu heben, sondern setzen sich auf den Boden und drücken sie mit Ihren Beinen vorwärts. Wie fest müssen Sie drücken? Sie müssen so fest drücken, dass Sie die Reibung zwischen der Kiste und dem Holzboden überwinden. Diese Kraft entspricht einem Teil der Normalkraft. Formuliert man das in einer Gleichung, sieht das wie folgt aus:

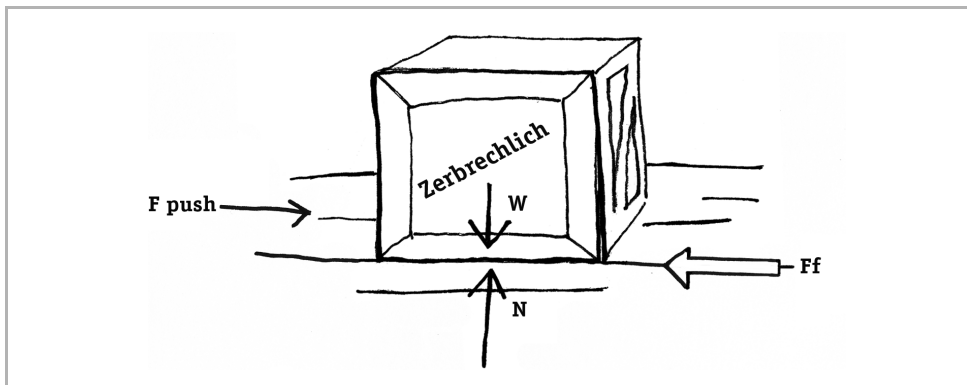
$$\text{Kraft durch Reibung } (F_f) = \text{Teil } (\mu) \times \text{Normalkraft } (N)$$

Dieser Bruchteil, oder *Reibungskoeffizient*, wird üblicherweise durch den griechischen Buchstaben μ (ausgesprochen mü) repräsentiert und ist kleiner als 1. Das bedeutet, dass Sie von der Seite mit einer Kraft von weniger als 50 lbs drücken müssen, um die Kiste zu bewegen.

Nehmen wir beispielsweise an, dass der Reibungskoeffizient für unsere Kiste aus Pappkarton auf dem Holzboden bei 0,4 liegt. Unsere Gleichung sieht dann wie folgt aus:

$$F_f = 0,4 \times 50 \text{ lbs}$$

ABBILDUNG 4-6 Auf bewegte Kiste wirkende Kräfte



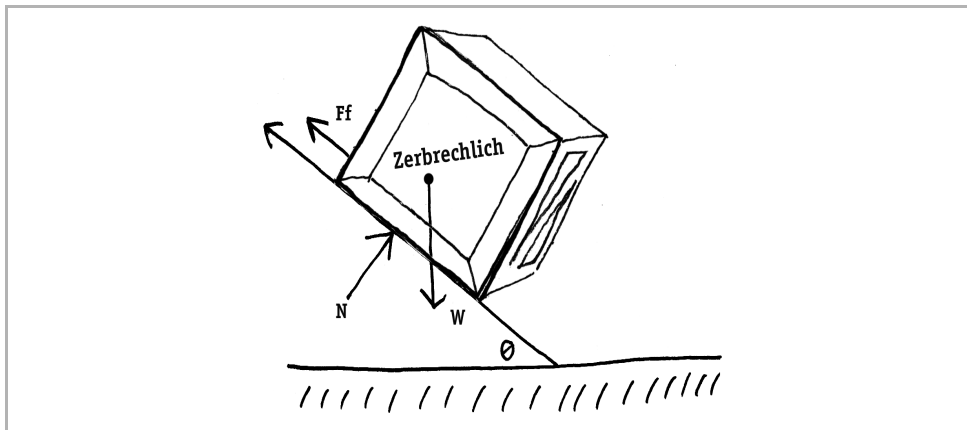
Die aufgrund der Reibung zu überwindende Kraft liegt also bei nur 20 lbs. Trägt man die Kraft der Reibung und die Kraft, mit der Sie drücken, mit in das Diagramm ein, sieht das aus wie in Abbildung 4-6. *Die Reibung wirkt der Bewegung immer direkt entgegen.*

Also nochmal: Wenn sich alle Kräfte gegenseitig aufheben, befindet sich die Kiste im statischen Gleichgewicht und bewegt sich nicht. Sie müssen nur eine Kraft aufwenden, die wenig über der durch die Reibung verursachten Kraft liegt, um die Kiste aus dem Gleichgewicht zu bringen und zu bewegen.

Im vorigen Beispiel haben wir nur den Reibungskoeffizienten betrachtet. Doch was tun, wenn Sie diesen Reibungskoeffizienten nicht kennen und ihn messen müssen? Wir nehmen die gleiche Pappkarton-Kiste mit einem Gewicht von 50 lb, die diesmal aber auf einem Stück Sperrholz steht. Sie platzieren die Kiste in der Mitte der Sperrholzplatte und heben diese dann auf einer Seite an, bis die Kiste anfängt zu rutschen. Verwenden Sie einen Winkelmesser oder ein anderes Werkzeug zur Winkelmessung. Der Reibungskoeffizient entspricht genau dem Tangens des Winkels, bei dem die Kiste zu rutschen beginnt. In Gleichungsform sieht das wie folgt aus:

$$\mu = \tan \theta$$

ABBILDUNG 4-7 Kräfte bei einer geneigten Kiste



Die Lage des Winkels θ ist in Abbildung 4-7 zu sehen. Fängt die Kiste auf dem Sperrholz bei einem Winkel von 22° zu rutschen an, entspricht das dem von uns vorhin angenommenen Reibungskoeffizienten von 0,4.

Diese ganze Diskussion über rutschende Kisten ist ja schön, doch wie hilft uns das beim Design unserer Mechanismen? Stellen Sie sich Reibung als Kraft vor, die immer gegen Sie arbeitet. Sie müssen sie also kompensieren, wenn Sie einen Motor oder andere Komponenten für Ihr Projekt wählen. Nichts ist 100%ig effizient. Das bedeutet, dass Sie nie das herausbekommen, was Sie hineinstecken. Es gibt immer Verluste, und häufig sind diese Verluste der Reibung geschuldet.

Hinter dieser einfachen Gleichung zur Bestimmung des Reibungskoeffizienten steckt raffinierte Mathematik. Die Kräfte beschreibenden Pfeile in Abbildung 4-7 weisen keine perfekten rechten Winkel auf, wie die in Abbildung 4-6. Um die Kräfte aufzuheben und zu berechnen, müssen alle in die gleiche Richtung zeigen. Zu diesem Zweck zerlegen wir die durch das Gewicht wirkende Kraft (W) in zwei Komponenten: eine, die parallel zum Sperrholz wirkt (entgegen der Reibung), und eine parallel zur Normalkraft (N).

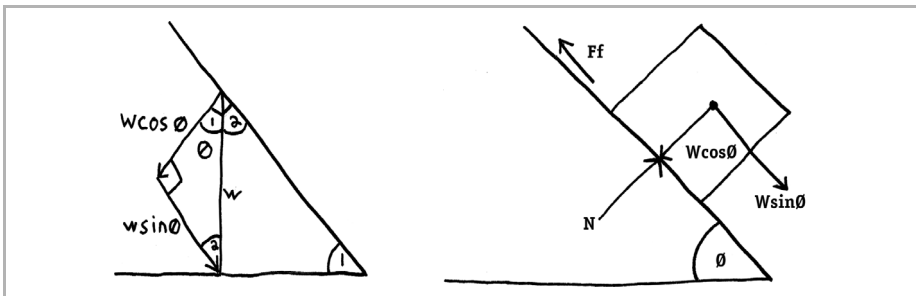
Sie erkennen, dass der Winkel dieses Kraft-Dreiecks dem Winkel entspricht, mit dem die Sperrholzplatte angehoben wurde (der erste Winkel in Abbildung 4-8). Wir wenden ein wenig Trigonometrie an und finden heraus, dass die Gewichtskomponente parallel zum Sperrholz $W \times \sin \theta$ entspricht und die Komponente parallel zur Normalkraft $W \times \cos \theta$. Wir können diese Kräfte wieder in das Diagramm eintragen, was wir auf der rechten Seite von Abbildung 4-8 auch getan haben. Nun können wir damit beginnen, die Kräfte aufzuheben:

$$N = W \times \cos \theta \quad \text{und} \quad F_f = W \times \sin \theta$$

Wir wissen aber auch, dass $F_f = \mu \times N$ entspricht. Wenn wir das in die Gleichung rechts eintragen, erhalten wir

$$\mu \times N = W \times \sin \theta$$

ABBILDUNG 4-8 Zerlegen des Gewichts zur Berechnung der Reibung (links) und revidierte Anordnung (rechts)



Im vorigen Beispiel lag der Reibungskoeffizient bei 0,4, d.h., 40% der aufgewendeten Kraft gehen durch Reibung verloren! Falls Ihnen das viel vorkommt, liegt das daran, dass es viel ist – nun, zumindest in diesem Fall. Reibung ist immer relativ. Bei der Kombination aus der Kiste, die über Sperrholz rutscht, ist die Reibung sehr hoch, doch eine Rollerskate-Rolle, die sich in ihrem Kugellager dreht, hat einen Reibungskoeffizient von nur 0,05, also ein Verlust von nur 5%.

Projekt 4-1: Ermittlung des Reibungskoeffizienten

Wir wollen einen Test machen, um ein Gefühl für den Reibungskoeffizienten unterschiedlicher Materialien zu bekommen, damit deutlich wird, was 5% und 40% Verlust bedeuten.

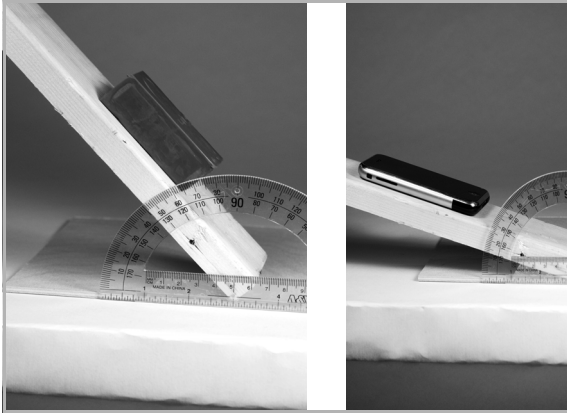
Einkaufsliste:

- Zwei kleine Objekte aus unterschiedlichem Material (hier werden ein ca. 100 g schweres Stück Tonerde und ein iPhone 2G mit Aluminiumgehäuse verwendet)
- Ein altes Holzbrett
- Winkelmesser
- Taschenrechner

Rezept:

1. Positionieren Sie den Winkelmesser am Drehpunkt des Holzbretts, wie in Abbildung 4-9 zu sehen.
2. Platzieren Sie das erste Objekt (die Tonerde) auf dem Brett.
3. Erhöhen Sie den Winkel, bis das Objekt zu rutschen beginnt.
4. Lesen Sie den Winkel ab.
5. Wiederholen Sie die Schritte 2 und 3 dreimal und bestimmen Sie den Mittelwert. Bei diesem Test begann der Ton bei 45° zu rutschen.
6. Wiederholen Sie die Schritte 2 bis 5 mit dem zweiten Objekt (dem iPhone). Bei mir begann das iPhone schon bei nur 12° zu rutschen.

ABBILDUNG 4-9 Reibungstest



7. Greifen Sie sich Ihren Taschenrechner. Um den Reibungskoeffizienten bei Holz und Ton zu bestimmen, berechnen Sie den Tangens von 45° (erinnern Sie sich: $\mu = \tan \alpha$). Sie erhalten den Wert 1. Wenn Sie also einen Block aus Tonerde über den Boden schieben wollen (wie wir es davor mit der Kiste getan haben), dann müssten Sie mit einer Kraft drücken, die dem Gewicht des Tonblocks entspricht!
8. Führen Sie die gleiche Berechnung mit 12° durch. Sie erhalten den Wert 0,21. Da das iPhone glatter ist als der Ton, gleitet er leichter. Wenn Sie ein iPhone über einen Holzboden schieben wollen, müssen Sie mit einer Kraft drücken, die nur 21 % des Gewichts entspricht.

Reibung reduzieren

Nachdem Sie nun wissen, dass Reibung Ihr Feind ist, wollen wir uns eine Reihe von Möglichkeiten ansehen, die Reibung zu reduzieren: Spiel zwischen den Teilen und Schmierung.

Spiel

In Kapitel 2 haben wir über die Toleranzen von Materialien und Teilen gesprochen. Sie wissen daher, dass eine 1/2 in-Achse nicht sehr gut in eine 1/2 in-Bohrung passt, wenn beide 0.50000 in breit sind. Sie benötigen ein wenig Spiel zwischen den Teilen, die sich relativ zueinander bewegen sollen.

Spiel ist nur ein anderes Wort für Abstand. Sie müssen etwas Abstand um Ihre 1/2 in-Achse lassen, damit diese sich bewegen kann. Sie werden also ein Loch von etwa 0,515 in bohren wollen, damit sie etwas Platz zum Drehen hat. Es gibt kein „korrektes“ Spiel – es hängt von der Größe der Teile und ihrer Oberfläche ab, aber auch davon, ob die Teile beweglich oder fest sein sollen. Denken Sie an LEGO. Einige Teile wie Achsen passen genau durch die Bohrungen in anderen Teilen. Doch die kleinen grauen Stopper, Zahnräder und Räder, die auf diese Achsen kommen, lassen sich schwerer aufstecken. Und sobald sie sich an der richtigen Stelle befinden, bleiben sie auch da. Das liegt daran, dass es bei LEGO-Teilen weniger Spiel zwischen Achse und Zahnrad gibt als zwischen Achse und Bohrung.

Die Unterschiede im Spiel zwischen den Teilen erlauben es Ihnen, die Bewegung der LEGO-Teile gerade genug zu beschränken, aber nicht zu sehr. Das folgt dem Prinzip des „minimum constraint design“, das wir in Kapitel 1. diskutiert haben. Spiel richtig einzusetzen, ist eine ausgezeichnete Möglichkeit, dieses Prinzip anzuwenden.

Schmierstoffe und Schmierfett

Sich bewegende Dinge zu schmieren, ist eine gute Idee. Das verringert die Reibung, was wiederum die Effizienz erhöht, d.h., die aufgewandte Eingangskraft kann in mehr Ausgangskraft umgewandelt werden. Es sorgt auch dafür, dass die Mechanik leise bleibt.

Viele Kugellager, Motorgetriebe und andere Komponenten werden bereits eingefettet ausgeliefert. Als schnelle Mehrzweckhilfe ist WD-40 ein gutes, leichtes Schmiermittel. Das Unternehmen behauptet, es gäbe über 2000 Einsatzgebiete. Ein besseres Schmiermittel (und ebenfalls eine bekannte Marke) ist 3-IN-ONE. Für Fahrradketten oder quietschende Türangeln reicht ein Tropfen, und die Sache ist erledigt.

Es stehen dutzende Arten von Ölen und Fetten zur Verfügung. Fett ist dicker als Öl und bleibt da, wo man es hinschmiert, während Öl eher verläuft. Wenn ein Allzweck-Schmiermittel nicht reicht, suchen Sie bei McMaster nach einer Empfehlung für ihren Anwendungsfall – suchen Sie beispielsweise nach „Getriebefett“. Beeswax funktioniert Berichten zufolge gut bei beweglichen Holzteilen.

Freischneiden und Graffiti-Roboter

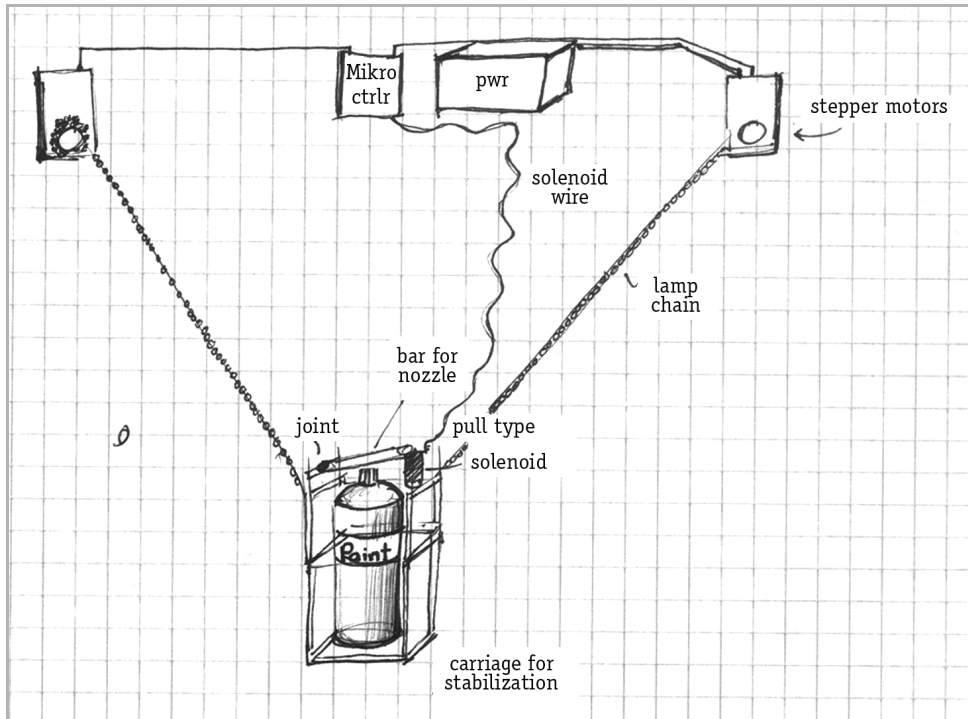
Eines der größten Probleme, vor dem meine Studenten stehen, ist die Bestimmung des Motordrehmoments für ein bestimmtes Projekt. Es ist unmöglich, die Größe eines Motors zu bestimmen, ohne ein wenig zu analysieren, was der Motor genau machen

soll. Soll der Motor einen kleinen mobilen Roboter schnell antreiben? Oder soll der Motor ein schweres Gewicht heben oder ein Gummiband antreiben?

Das sogenannte Freischneiden ist eine nützliche Fertigkeit, wenn man bestimmen will, wie etwas zu befestigen ist oder welches Motordrehmoment benötigt wird, oder anders ausgedrückt immer dann, wenn Sie eine Komponente basierend auf Kraft oder Drehmoment auswählen müssen. Das *Freischneiden* ist ein vereinfachter Schnappschuss aller Kräfte und Momente, die auf eine Komponente wirken. Sie können solche Diagramme auch nutzen, um die Kräfte und Momente zu bestimmen, die Sie nicht kennen. Der *Körper* ist dabei nur ein Objekt oder eine Komponente eines Systems.

Das Freischneiden umfasst :

- Eine Skizze des Körpers, befreit von allen anderen Objekten, mit so wenig Details wie nötig (meistens wird nur ein Punkt benötigt).
- Alle auf das Objekt wirkenden Kontaktkräfte:
- *Reibung* wirkt der Bewegung immer direkt entgegen.
- Die *angewandte Kraft* ist genau das, wonach es sich anhört: die Kraft, die Sie auf etwas anwenden. Das kann ein Drücken oder Ziehen (oder Treten oder Ziehen oder ...) sein. Das kann auch eine Kraft sein, die jemand anders auf Ihr Objekt ausübt, etwa die Aufwärtskraft, die durch die Ketten auf den Sitz einer Schaukel wirkt.
- Die *Normalkraft* wirkt lotrecht zur Kontaktfläche. Sie verhindert, dass Sie oder Ihr Stuhl durch den Boden fallen.
- *Widerstand* ist die Kraft, die ein Objekt behindert, wenn es sich durch Luft, Wasser oder andere Flüssigkeiten bewegt. Der Widerstand erhöht sich, je schneller sich das Objekt bewegt. Generell ignorieren wir den Widerstand bei Dingen, die sich langsam an der Luft bewegen.
- Alle berührungslosen Kräfte, die auf ein Objekt wirken:
- *Gravitation* wirkt auf alle Objekte auf der Erde und zieht sie in Richtung Erdmittelpunkt. Sie erscheint beim Freischneiden als Gewicht des Objekts.
- Alle Momente (Drehmomente) eines Objekts

ABBILDUNG 4-10 Original-Konzept Graffbot (von Mike Kelberman)

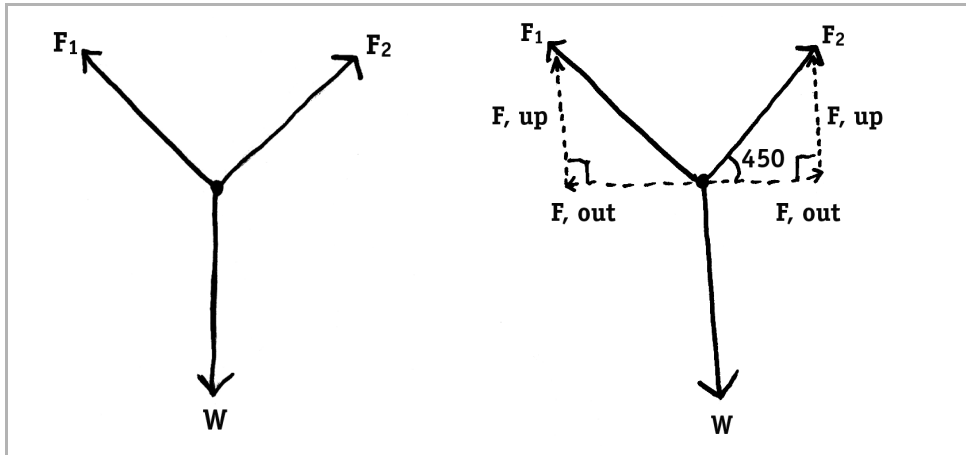
Damit sich ein Objekt im statischen Gleichgewicht befindet, müssen drei Bedingungen erfüllt sein:

1. Alle seitlichen (horizontalen) Kräfte müssen sich aufheben.
2. Alle von oben und unten wirkenden (vertikalen) Kräfte müssen sich aufheben.
3. Alle (Dreh-)Momente müssen sich aufheben.

Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, bewegt sich das Objekt.

Sehen wir uns ein reales Beispiel an, um das alles in den richtigen Kontext zu bringen. Einer meiner ehemaligen Studenten hat einen Graffiti-zeichnenden Roboter gebaut, bei dem eine Sprühdose von zwei motorisierten Spulen angetrieben wird (siehe Abbildung 4-10).

ABBILDUNG 4-11 Freigeschnittene Sprühdosen-Plattform des Graffbot (links) und in Komponenten aufgeteilte Seilkräfte (rechts)



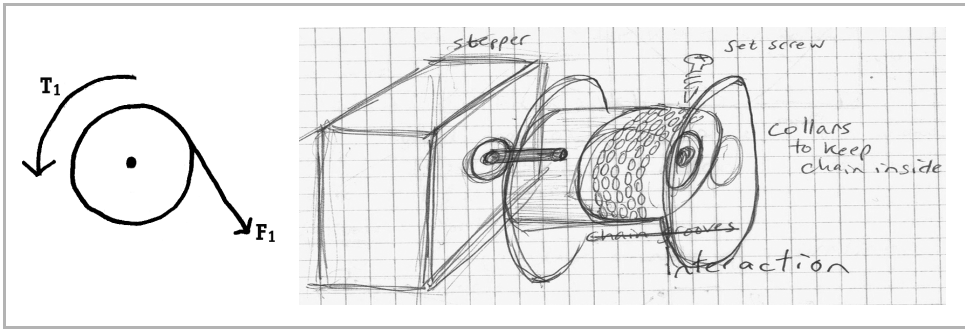
Ein Motor und ein Controller treiben die Spulen an. Zusammen können die Spulen die Sprühdose in jede beliebigen Richtung bewegen. Um festzustellen, wie schwer der Motor arbeiten muss, wollen wir die Sprühdosen-Plattform freischneiden, so wie auf der linken Seite von Abbildung 4-11 zu sehen.

Die einzigen Kräfte sind hier das Gewicht der Sprühdosen-Plattform (W) und die Kraft, die auf das jeweilige Seil (F_1 , F_2) der Motorspulen wirkt. Wir können nun unser Wissen nutzen, um diese Kräfte zu bestimmen und die Größe des Motors richtig auszulegen.

Auf der rechten Seite von Abbildung 4-11 bildet jedes Seil ein Dreieck mit einer imaginären horizontalen Linie. Wenn die Dose in einem Winkel von 45° hängt, wirkt ein Teil der Seilkraft zur Seite und ein Teil zieht nach oben. Indem wir die auf das Seil wirkende Kraft in ihre horizontalen und vertikalen Komponenten aufteilen, erkennen wir, dass die beiden seitlichen Kräfte (F_{1-OUT} und F_{2-OUT}) gleich groß und entgegengesetzt sind und sich daher gegenseitig aufheben, was die erste Bedingung für ein statisches Gleichgewicht erfüllt. Bleiben noch zwei nach oben (F_{1-UP} und F_{2-UP}) und eine nach unten wirkende Kraft (W). Damit das System ausgeglichen ist, müssen die nach oben wirkenden Kräfte die nach unten wirkende Kraft ausgleichen, um ein statisches Gleichgewicht herzustellen:

$$F_{1-UP} + F_{2-UP} = \text{Gewicht } (W)$$

ABBILDUNG 4-12 Freigeschnittene Graffbot-Spule (links) und Originalzeichnung der Graffbot-Spule (rechts) (von Mike Kelberman)



Wenn die Sprühdosen-Plattform also 10 lbs wiegt, muss jede F_{UP} -Kraft 5 lbs entsprechen. Bei dieser Plattform gibt es kein Drehmoment, weshalb wir die dritte Bedingung für statisches Gleichgewicht ignorieren.

Nun nähern wir uns unserem Ziel an. Wir wissen, dass sich die F_{OUT} -Kräfte aufheben und dass jede F_{UP} -Kraft bei 5 lbs liegt. Doch wir kennen die tatsächlichen Kräfte F_1 und F_2 nicht, die auf die Seile wirken, die durch die Spulen laufen. Bei dem Dreieck auf der rechten Seite von Abbildung 4-11 erinnern wir uns daran zurück, dass der Sinus eines Winkels der Gegenseite über der Hypothense entspricht:

$$\sin 45^\circ = F_{1-UP} / F_1$$

Das ergibt eine Kraft F_1 von 7 lbs. Was lernen wir daraus? Wir müssen mehr Kraft aufwenden, um etwas in diesem Winkel hochziehen zu können, als das bei einer Geraden nötig wäre. Wird der Winkel kleiner, d.h., dass die Plattform näher an den Motorspulen liegt, dann erhöht sich die auf die Seile wirkende Kraft.

Um den richtigen Motor wählen zu können, müssen wir noch einen Schritt weitergehen und die Spule freischneiden (siehe Abbildung 4-12).

Wir können das Gewicht der Spule und des Motors vernachlässigen, weil die Haltekräfte der Schrauben, mit denen sie an der Wand befestigt sind, sie aufheben. Bleibt die Kraft des Seils und das Drehmoment des Motors, der mit der Spulenachse ausgerichtet ist, damit ein Abrollen verhindert wird. Erinnern Sie sich daran, dass das Drehmoment einfach die Kraft mal dem Abstand ist? Der Abstand entspricht hier der Stre-

cke von der Kante bis zur Mitte der Spule. Hat die Spule einen Durchmesser von 4 in, dann liegt der Radius bei 2 in, und wir können das unbekannte Motordrehmoment berechnen:

$$\text{Drehmoment (T)} = 7 \text{ lbs} \times 2 \text{ in} = 14 \text{ in-lb}$$

Wir wissen nun, dass wir einen Motor benötigen, der sich mit einem Drehmoment von *mindestens* 14 in-lbs dreht, um den Graffbot bewegen zu können. Jeder Motor muss so stark sein, um die Sprühdosen-Plattform kontrollieren zu können.

Wie man Kraft und Drehmoment misst

Sie können Ihr Gewicht (die Kraft, die Sie auf den Boden ausüben) messen, indem Sie sich auf eine handelsübliche Personenwaage stellen. Doch was tun, wenn das zu wiegende Objekt nicht auf eine Waage passt oder wenn Sie die Zugkräfte von so etwas wie einem Seil messen müssen? Und wie misst man das Drehmoment?

Kraft messen

Die einfachste Möglichkeit zur Messung einer Kraft (wenn Sie etwas wiegen wollen), ist eine Waage. Manche Waagen arbeiten mechanisch, und verwenden Gewichte und Federn, um eine Anzeige zu bewegen. Andere arbeiten elektrisch. Geräte zur Messung von Kräften gibt es in den unterschiedlichsten Formen, Größen und Preisen. In diesem Buch werden wir immer Messgeräte verwenden, die verfügbar und bezahlbar sind.

Mechanische Optionen

Die günstigste Möglichkeit ist die normale Personenwaage. Sie ist die kleinere Variante der Waage, auf der Sie beim Arzt stehen. Die Küchenwaage, eine kleine Verwandte, wird für leichtere Objekte verwendet (etwa für die Zutaten eines Rezepts) und ist genauer. Dabei handelt es sich um mechanische Waagen, die leicht zu verwenden sind. Sie verwenden üblicherweise eine Nadel, die über einer Anzeige zum Stehen kommt, um das Gewicht anzuzeigen. Bei diesen Waagen drückt das Objekt auf einen Boden, um die Kraft zu messen.

Um Zugkräfte zu messen, können Sie eine Gepäck- oder Federwaage nutzen. Sie finden Sie in Sportgeschäften, wo sie als Fischwaagen verkauft werden. Mechanische Gepäckwaagen gibt es für unter \$10 und ähneln den Waagen im Lebensmittelladen, mit denen Obst gewogen wird. Federwaagen, die tatsächlich nur aus Aufhänger mit Feder bestehen, gibt es für noch weniger. Die meisten Federwaagen besitzen ein

Gehäuse, das die Zugkraft anzeigt, je nachdem, wie weit die Feder gedehnt wird. Sie funktionieren generell nur für kleine Kräfte so zwischen 5 bis 20 lbs. Sie müssen also eine recht gute Vorstellung davon haben, was Sie messen wollen, bevor Sie es messen.

Elektronische Optionen

Personen- und Küchenwaagen gibt es auch in elektronischen Versionen. Anstelle eines Systems aus Federn und Hebeln unter der Plattform verwenden sie Sensoren, um das Gewicht zu ermitteln und auf einer Digitalanzeige darzustellen. Sie können diese Art von Sensoren auch direkt nutzen, wenn Sie sie in ein Projekt integrieren wollen, doch sie sind nicht so einfach zu verwenden wie die mechanischen Gegenstücke.

- Druckempfindliche Widerstände (force-sensitive resistors, FSRs) werden zur Messung kleiner Kräfte genutzt. Sie sind nicht besonders genau (je nach Anwendung zwischen $\pm 5\%$ – 25%). Man verwendet sie daher eher zur Messung relativer Gewichte oder um zu bestimmen, ob etwas zusammenge-drückt wird oder ob sich jemand setzt. Ein Beispiel ist der SparkFun-Sensor (www.sparkfun.com) SEN-09375, der bis zu 22 lbs wiegen kann.
- Flexiforce-Drucksensoren sind genauer – etwa $\pm 2.5\%$ –, kosten aber auch gut doppelt so viel wie FSRs. Mit rund \$20 liegen sie aber immer noch an der unteren Preisskala für Kraft-Messgeräte. Ein Beispiel ist der SparkFun-Sensor SEN-08685.
- Auch Gepäck-/Federwaagen gibt es in digitalen Versionen. Die Firma Balanzza stellt beliebte Versionen her, deren Preise bei etwa \$15 beginnen. MakerBot Industries hat eine digitale Fischwaage genutzt, um die Zugkraft ihres Plastruder-Motors für die CupCake-CNC-Maschine zu bestimmen (siehe Abbildung 4-13). In Projekt 4-2 erfahren Sie, wie das funktioniert und wie Sie eine eigene Version herstellen können.

ABBILDUNG 4-13 MakerBot Industries hat The Rack verwendet, um die Zugkraft ihres Plastruder-Motors zu messen.



Dies ist ein Auszug aus dem Buch "Making Things Move - deutsche Ausgabe", ISBN 978-3-86899-139-0
<http://www.oreilly.de/catalog/makingthingsmove/>
 Dieser Auszug unterliegt dem Urheberrecht. © O'Reilly Verlag 2011

Der nächste Schritt auf der Preis-Skala ist ein großer. Höherwertige Kraftmesser nutzen eine ausgeklügelte Elektronik für genaue Messungen. Es gibt generell zwei Varianten: Handgeräte und Taster-Varianten, die man in eigene Projekte integrieren kann.

- Digitale Kraftmesser wie McMaster's 1903T51 gibt es ab ca. \$370. Sie können einen Haken oder eine Platte am Messende anbringen, um die Kraft beim Ziehen oder Drücken zu messen.
- Ladezellen wie die MLP-100 von Transducer Techniques (www.transducertechniques.com/) gibt es ab ca. \$300. Wenn Sie nicht gerade ein Elektronik-Freak sind, brauchen Sie noch das Display für \$400, um die Kraft ablesen zu können. Wenn Sie allerdings eine hohe Genauigkeit benötigen und einen Sensor, den Sie in Ihr Projekt integrieren können, dann sind sie ideal.

Drehmoment messen

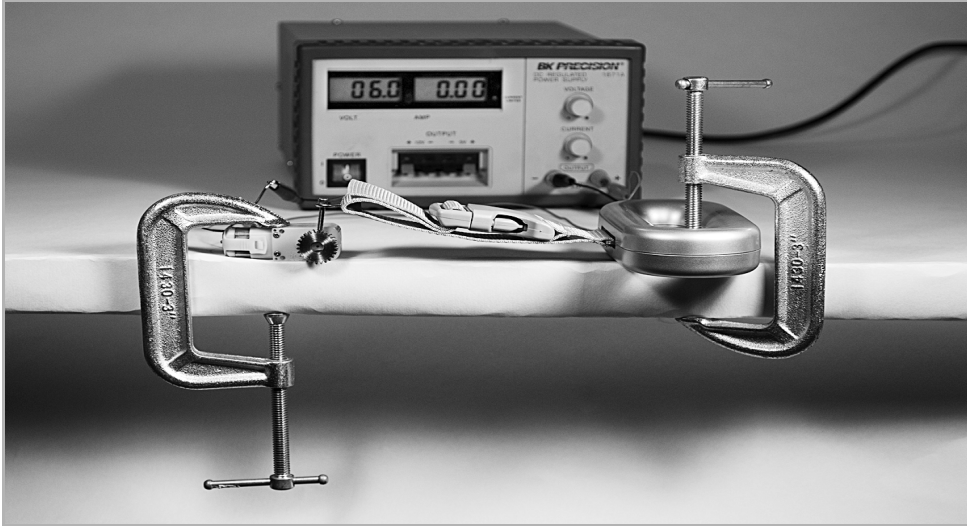
Das Messen eines unbekannten Drehmoments kann teuer werden. Sie können einen Drehmomentschlüssel auf einen bestimmten Wert einstellen und einen Bolzen gerade richtig anziehen, doch Drehmomentschlüssel sind nicht für die Messung unbekannter Drehmomente gemacht. Ihre Preise beginnen bei ca. \$100 und steigen dann steil an.

Sie können einen Drehmomentmesser mit einer Motorwelle oder einem Schraubenkopf verbinden und das resultierende Drehmoment in Echtzeit ablesen. Bei einem Preis von \$580 für ein Messgerät wie McMasters 83395A29 ist das aber keine echte Option.

Glücklicherweise können wir die Tatsache, dass $\text{Drehmoment} = \text{Kraft} \times \text{Abstand}$ ist, zu unserem Vorteil nutzen. Wir müssen nur die Kraft messen und die Strecke von der Achse zu dem Punkt, an dem sie angewandt wird, und schon haben wir das Drehmoment!

Projekt 4-2: Motor-Drehmoment messen

Wenn Sie einen Motor kaufen, bekommen Sie üblicherweise auch eine Produktspezifikation, die alles enthält, was Sie über ihn wissen müssen. Manchmal fehlt einem aber das Datenblatt zu einem Motor. Wir wollen hier eine Abwandlung von MakerBot Racks (Abbildung 4-13) nutzen, um das Motor-Drehmoment indirekt über die Motor-kraft zu messen.

ABBILDUNG 4-14 Messung des Motor-Drehmoments**Einkaufsliste:**

- Gleichstrommotor (im Bild ein Solarbotics GM9)
- Nabe, Zahnrad oder eine andere Komponente, die auf die Welle passt und eine Stellschraube besitzt. Ersetzen Sie die Stellschraube durch eine normal lange Schraube
- Gepäck-, Feder- oder Fischwaage
- Zwei Schraubzwingen für die Befestigung des Motors und der Skala
- Lineal
- Optional Epoxidspachtel und einen kleinen Haken (wie man ihn z.B. zum Aufhängen von Bildern nutzt)

Rezept:

1. Befestigen Sie die Schraube und die Nabe/das Zahnrad mit der Motorwelle.
2. Befestigen Sie den Motor mit einer Schraubklemme an der Kante Ihrer Arbeitsplatte (siehe Abbildung 4-14).

Dies ist ein Auszug aus dem Buch "Making Things Move - deutsche Ausgabe", ISBN 978-3-86899-139-0
<http://www.oreilly.de/catalog/makingthingsmoveger/>
 Dieser Auszug unterliegt dem Urheberrecht. © O'Reilly Verlag 2011

3. Falls nötig, verwenden Sie den Epoxidkleber und den kleinen Haken, um eine Aufhängung für die Skala zu bauen, die an der Schraube angebracht werden kann.
4. Befestigen Sie die Gepäckwaage mit einer Schraubzwinde an Ihrer Arbeitsplatte.
5. Schalten Sie die Gepäckwaage ein, falls es sich um eine digitale Waage handelt.
6. Verbinden Sie das Ende eines Bandes oder Hakens so nah wie möglich mit dem Schraubenkopf.
7. Schalten Sie den Motor ein.

HINWEIS Wenn Sie einen Motor testen, für den Sie kein Datenblatt besitzen, sollten Sie ein Labornetzgerät verwenden, damit Sie die erlaubte Spannung einstellen können (siehe Kapitel 5). Alternativ können Sie Batterien zusammenschalten, um die vom Motor benötigte Spannung bereitzustellen. Sechs Volt sind für die meisten kleinen Gleichstrommotoren eine gute Wahl.

8. Der Motor versucht sich zu drehen, doch die Verbindung mit der Gepäckwaage stoppt ihn. Lesen Sie die Skala ab, sobald der Motor sich nicht mehr weiterdreht, und halten Sie den Wert fest. Beeilen Sie sich dabei, damit der Motor nicht überhitzt!
9. Schalten Sie den Motor aus.
10. Messen Sie den Abstand von der Mitte der Motorwelle bis zur Schraube, mit der die Skala verbunden ist.
11. Multiplizieren Sie den in Schritt 10 ermittelten Abstand mit der Kraft, die Sie in Schritt 8 abgelesen haben, und schon kennen Sie das Drehmoment des Motors für die verwendete Spannung.