

## Bau einer digitalen Schwerpunktwaage

Die Lage des Schwerpunktes bestimmt die Flugeigenschaften eines jeden Flugzeuges wesentlich. Ist er zu weit hinten, ist das Flugzeug instabil, zu weit vorne, sind die Flugleistungen ungenügend. Die Lage des Schwerpunktes kann in einem gewissen Bereich verschoben werden, um die Flugeigenschaften dem Einsatzzweck des Modelles und dem Können des Piloten anzupassen.

Die zweckmässige Lage eines speziell für den Erstflug geeigneten Schwerpunktes sollte immer bekannt sein: Sei dies durch Angaben auf der Montageanleitung, auf dem Bauplan oder durch eigene Nachrechnungen [1] [2] [3].

Die Lage des Schwerpunktes wird immer noch häufig mit zwei Fingern überprüft. Exakter wird es mit einer gekauften oder selbst hergestellten Schwerpunktwaage in Form einer Wippe. Andere schwören auf die Vanessa-Schwerpunktwaage oder bringen geschickt platzierte Aufhängepunkte am Modell an. Bereits mit drei elektronischen Küchenwaagen, welche das Modell in der richtigen Lage unterstützen und deren Position zum Referenzpunkt der Schwerpunktangabe ausgemessen wurde, erlaubt eine digitale Schwerpunktermittlung.

Digitale Schwerpunktwaagen sind bereits käuflich erhältlich, z. B. [4] mit einem Bericht in [5]. Einige, z. B. [6] und [7], lehnen sich an das oben beschriebene Verfahren mit drei Küchenwaagen an. Drei Messzellen mit Aufnahmen für die Räder werden an einen Micro-Computer angeschlossen und auf einem Tisch nach einem vorgegebenen Verfahren entsprechend den Radabständen ausgerichtet und vermessen. Der Micro-Computer berechnet

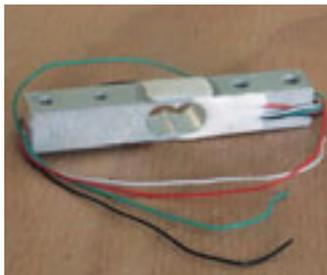


Abb. 1: Wägezelle.

dann das Gesamtgewicht und die Schwerpunktlage.

In jüngerer Zeit sind digitale Schwerpunktwaagen bekannt geworden, welche eine Art Waagschale aufweisen ([4] und [8]). In der Waagschale liegt das Modell horizontal und mit dem Referenzpunkt der Schwerpunktmessung – meist der Schnittpunkt der Nasenleiste mit dem Rumpf – an einem Anschlag. Damit entfällt das Vermessen von Distanzen. Veröffentlicht [9] wurden Konstruktionen mit einer, zwei oder drei Wägezellen (Tabelle 1).

Wägezellen (Abbildung 1) werden auch in digitalen Küchenwaagen verwendet. Es gibt verschiedene Formen von Wägezellen; meistens werden sie aus einem Metallstab mit speziellen Entlastungsbohrungen in der Mitte und geeignet angebrachten Dehnmessstreifen gefertigt. Die Kraft einer Biegebeanspruchung auf diesen Stab führt zur Veränderung der Widerstände der Dehn-

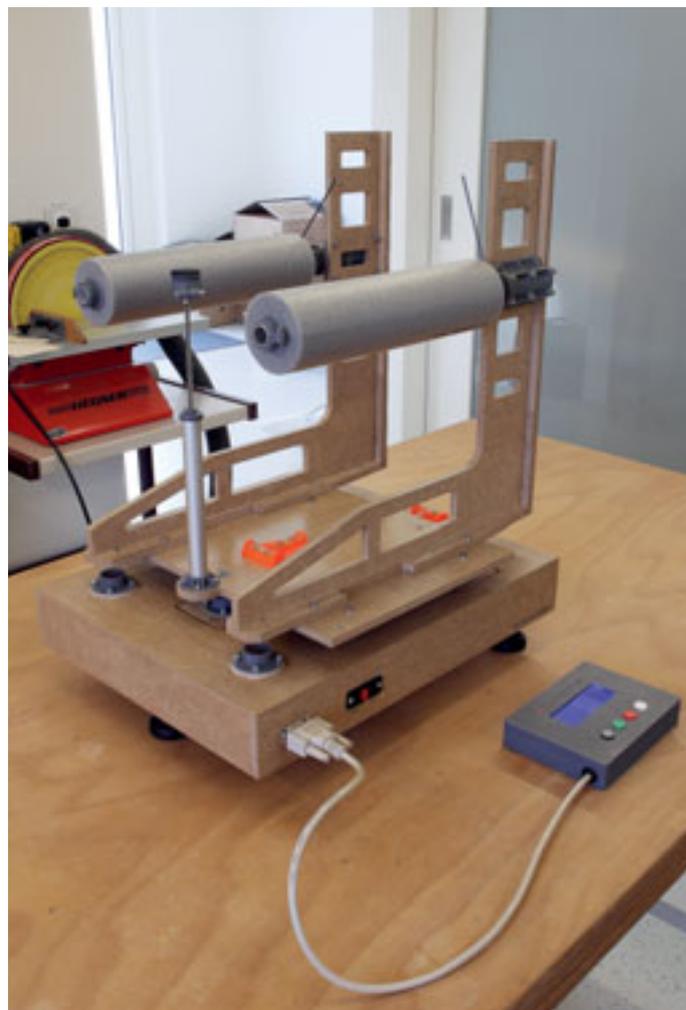


Abb. 2: Die selbstgebaute Schwerpunktwaage.

messstreifen. Mittels einer sogenannten Wheatstone'schen Messbrücke, Verstärkern und einem Analog-zu-Digital-(A/D)-Wandler kann die Kraft in einem Micro Controller ausgewertet und schliesslich angezeigt werden.

Ich habe eine digitale Schwerpunktwaage (Abbildung 2) für meine typischen Modelle (Motormodelle, Hoch-, Tief- und Mitteldecker, bis ca. 3 kg Gesamtgewicht) gebaut, weil mich als «Mechaniker» die Herausforderung reizte und ich Verbesserungspotenzial in meiner Schwerpunktermittlung sah. Dieser Bericht ist keine Bauanleitung mit detaillierter Dokumentation, sondern soll dazu beitragen, das Thema «digitale Schwerpunktwaage» besser zu verstehen. Er soll

Motivation zur Konstruktion und zum Bau einer eigenen, passenden Schwerpunktwaage sein.

### Aufbau der Schwerpunktwaage

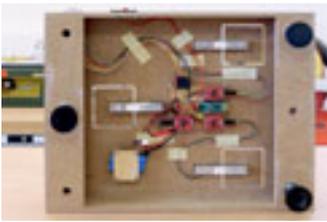
Meine Schwerpunktwaage besteht aus einem Grundgestell (Abbildung 3) mit drei Wägezellen (2×2 kg und 1×3 kg) und einer Waagschale. Das Grundgestell ist auf drei justierbaren,

Anzahl Wägezellen	Gesamtgewicht	Schwerpunkt längs	Schwerpunkt quer	Bemerkungen
1	Nein	Ja	Nein	Gesamtgewicht muss separat gemessen werden
2	Ja	Ja	Nein	Prinzipbedingt wirken auch Momente auf die Sensoren
3	Ja	Ja	Ja	Nur Kräfte wirken auf die Sensoren

Tabelle 1: Funktionalität digitaler Schwerpunktwaagen.



Abb. 3: Grundgestell mit Panel.



**Abb. 4 : Ansicht der Unterseite des Grundgestells.**

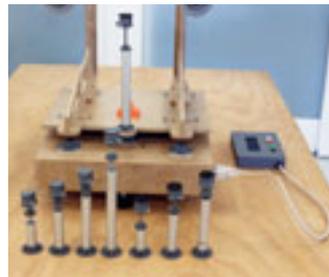
soliden Füßen aufgestellt. Auf der Oberseite sind in Aussparungen drei Aufnahmen für die Waagschale, mit 200 mm Abstand in Längs- und Querrichtung, montiert. Die Füße der Waagschale, geführt in den Aufnahmen, leiten die zu messenden Kräfte via Wägezellen auf das Grundgestell. Im Inneren des Grundgestells (Abbildung 4) sind die notwendige Elektronik (Micro-Controller, der Messverstärker mit A/D-Wandler), eine 2S-Li-Ion-Zelle für die Stromversorgung und die Verbindungen zur Aussenwelt (Stecker zu Bedienpanel, Ein-, Ausschalter) angebracht. Auf der Oberseite befinden sich drei weitere, etwas erhöhte Aufnahmen für die Waagschale. Die Waagschale steht in diesen, wenn die Waage nicht benützt wird, damit die Wägezellen nicht unbeabsichtigt belastet werden. Auf den erhöhten Auflagen stützt sich das Grundgestell auch ab, wenn dieses zu Wartungszwecken auf die Oberseite gelegt wird. Die Waagschale besteht aus einer Basis mit drei in der Höhe verstellbaren kugelförmigen Füßen, zwei Ständern mit Rohrhalterungen und verschiedenen, unterschiedlich langen Stützen. Die Ständer können in sechs verschiedenen Positionen montiert werden: drei verschiedene Positionen in Quer-



**Abb. 5: Einstellbare Anschläge für die Schwerpunktmessung.**

richtung für unterschiedliche Rumpfbreiten, Fahrwerke und Flügelverstreben und zwei Positionen in Längsrichtung um den Messbereich der Waage in Längsrichtung, zu verlängern. Der Referenzpunkt für die Messung kann so um 50 mm verschoben werden.

Das Modell wird auf den mit Schaumstoff gepolsterten Rohrhalterungen aufgelegt und an zwei drehbaren und längs verstellbaren Anschlägen (Abbildung 5) aus 2-mm-CFK-Stäben ausgerichtet. Dies erlaubt auch das Vermessen von Modellen mit gefeilten Tragflächen. Die Rohrhalterungen können auf drei verschiedenen Höhen am Ständer befestigt werden. Die horizontale Lage der Modelle wird mit einer Stütze eingestellt. Ich habe verschieden lange Stützen (Abbildung 6)



**Abb. 6: Verfügbare, in der Länge verstellbare Stützen mit flachem oder V-förmig gekerbtem Kopf.**

gebaut und sie mit flachen, gepolsterten (für Kastenrumpfe) und V-förmig gekerbten Köpfen (für gerundete Rumpfunterseiten) versehen. Grundsätzlich kann ein Modell in Normalflug- oder Rückenfluglage vermessen werden. Bei geraden oder konkaven Profilen muss in Normalfluglage entweder die Nasenleiste unterlegt werden oder in Rückenfluglage gemessen werden.

#### Verwendete Hardware und Software

Ein Micro Controller ist das Hirn der gesamten Elektronik. Ich habe mich für einen Micro Controller von Arduino [10] entschieden, da diese Geräte im Netz sehr gut dokumentiert

sind und einfach in der Programmierung sind. Sehr viele Tutorials (Videos) und Bücher sind verfügbar, sodass die im Zusammenhang mit dem Bau einer digitalen Schwerpunktwage notwendigen Kenntnisse in überschaubarer Zeit erworben werden können. Verwendet habe ich einen originalen Arduino Nano, um Ärger zu vermeiden und einen kleinen Beitrag an das faszinierende Open-source-Projekt zu leisten. Wägezellen kann man aus digitalen Küchenwaagen recyceln. Günstige Wägezellen mit ausreichender Genauigkeit habe ich nur in China gefunden [11]. Es sind Wägezellen mit gleichen Haupt- und Anschlussmassen für 1, 2, 3, 5, 10 und 20 kg verfügbar. Meistens werden diese mit einem Verstärker-A/D-Wandler basierend auf dem HX711-Chip geliefert. Gemäss Berichten aus dem Internet liefern nicht alle eine gute Signalqualität. Verstärker- und A/D-Wandler habe ich in den USA eingekauft. Auf der Homepage [12] finden sich eine gute Dokumentation und der Verweis auf eine Library [13], die man zur einfachen Auswertung der Messresultate im Zusammenhang mit einem Arduino Micro Controller benötigt.

Ebenso habe ich bei der Beschaffung des LCD-Displays [14] [15] auf eine gute Dokumentation und nicht prioritär auf einen tiefen Preis geachtet. Der Entscheid fiel auf ein Vierzeilen-Display, damit ich die Resultate der Schwerpunktmessung übersichtlich darstellen kann.

Die Behauptung, ich hätte die Software selber programmiert, wäre übertrieben. Im Netz finden sich sehr viele Hinweise auf die zu lösenden Teilprobleme. Bei der Programmierung kann man bequem in Etappen vorgehen. Ich habe zuerst das LCD kennengelernt. In einem weiteren Versuchsprogramm habe ich die Wägezellen aus gelesen. Die Schaltung für die Tasten und die Messung der Batteriespannung – Themen je-



**Abb. 7: Hauptmenü, Navigation mit den Tasten.**



**Abb. 8: Anzeige des Gesamtgewichtes und der Schwerpunktlage.**

der Einführung in Arduino – kannte ich von früher. Die Lage des Schwerpunktes wird mithilfe des Kräfte- und Momenten-Gleichgewichtes berechnet. Tönt komplizierter, als es ist, siehe z. B. [16]. Das Programm ist Menü-gesteuert (Abbildung 7, Abbildung 8). Vier Tasten (Up, Down, Enter, Menü) erlauben eine einfache Navigation und Auswahl in den Menüs. Das Hauptmenü besteht aus vier Punkten:

- **Schwerpunkt:** Ausmessen des Schwerpunktes. Zuerst wird die Waage tariert und anschliessend der Benutzer aufgefordert, das Modell aufzulegen.
- **Vorstand:** Es muss angegeben werden, ob die Ständer in der vorderen oder hinteren Position montiert sind.
- **Kalibrierung:** Jede Wägezelle wird mit einem bekannten Gewicht kalibriert. Die Kalibrierung ist auch nach dem Aus- und Einschalten wieder verfügbar.
- **Reset-Werte:** Zurücksetzen der Kalibrierfaktoren auf die ursprünglichen Werte.

#### Herstellung

Das Grundgerüst und die Waagschale habe ich vorwie-

gend aus 8 mm und 10 mm starken MDF-Platten CNC-gefräst. Halterungen, Fittings, Panelgehäuse sind 3D-gedruckt. Sehr viele Teile wie Alu-Rohre, Heizungsisololation, Füße für das Grundgestell, D20-Kugelgriffe (Füße für die Waagschale), Gewindestangen, Gewindeeinsätze, Schrauben, Muttern und Unterlagscheiben habe ich beim Eisenwarenhändler besorgt.

Die Elektronik habe ich auf einer Lochrasterplatine für das Grundgestell (Arduino Nano, drei Verstärker-A/D-Wandler, Anschlüsse für die externe Spannungsversorgung, Ein-, Aus-Schalter und das Verbindungskabel zum Panel) und auf einer für das Panel (Taster, Anschlüsse für das LCD-Display, die LED und das Verbindungskabel zum Grundgerüst) zusammengelötet.

### Überprüfen der Funktionalität der Schwerpunktwage

Bevor die Waage geprüft oder eingesetzt werden kann, muss sie mit einem, wenn möglich, geeichten oder verlässlichen Gewicht kalibriert werden. Die Bestimmung des Referenzgewichtes brachte die erste Erkenntnis: Meine drei in der Werkstatt vorhandenen digitalen Küchenwaagen zeigen ein innerhalb von 3 g variierendes Ergebnis an. Ich beschloss, dass eine der drei Waagen das richtige Ergebnis anzeigt und verwendete diesen Wert. Das absolute Gewicht ist für die Messung des Gesamtgewichtes wichtig; für die Messung der Lage des Schwerpunktes kommt es darauf an, dass alle Wägezellen gleich kalibriert sind. Nach Abschluss der Kalibrierung habe ich die Waagschale auf die Schwerpunktwage aufgesetzt und das Referenzgewicht an verschiedenen Positionen auf der Waagschale überprüft. Überall das gleiche Resultat!

Als Nächstes versuchte ich, die Ermittlung des Schwerpunktes (Abbildung 9) zu überprüfen. Dazu nahm ich ein Brett und fixierte darauf mittig in Längs-

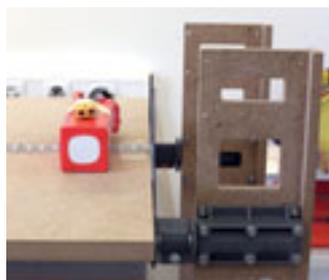


Abb. 9: Versuchsaufbau zur Überprüfung der Messgenauigkeit.

richtung ein Messband mit Klebstreifen. Das Brett samt Messband wog ca. 1,3 kg. Die Schwerpunktwage wurde in diesem Fall kalibriert, bevor das Brett und der Akku quer aufgelegt wurden. Darauf verschob ich den Akku von 235 g in kleinen Schritten entlang dem Messband. Die Position des Akkus wurde an einer Längskante des Akkus abgelesen. Diese Versuche wiederholte ich mit zusätzlichen Gewichten auf dem Brett und mit dem Akku alleine, indem ich das Brett zusammen mit der Waagschale tarierte.

Die Position des Schwerpunktes (Abbildung 10) konnte auf  $\pm 0,5$  mm bestimmt werden. Bei längerer Messdauer driftete das Gesamtgewicht je nach Belastung um bis zu 2 g. Nach Wegnahme der Last korrigiert sich diese Abweichung nach



Abb. 10: Die Abweichung der gemessenen und der berechneten Schwerpunktlage beträgt  $\pm 0,5$  mm.



Abb. 11: Schwerpunktlage des PC-7 messen und notieren.

wenigen Sekunden wieder. Die Messresultate zeigen, dass in der Mitte der Messspanne von 200 mm die Resultate weniger abweichen. Die Möglichkeit, die Schwerpunktlage mit geändertem Vorstand zu verstellen, sollte also trotz Montageaufwand genutzt werden.

### Wägeprozess

Die Schwerpunktwage muss auf einer stabilen Plattform und längs sowie quer im Lot stehen. Es dürfen keine Windkräfte auf das Modell wirken, d.h., es muss drinnen gemessen werden.

Die Schwerpunktwage an das Modell anpassen, sodass es horizontal auf der Waage liegt

und der zu messende Schwerpunkt nicht am Rand des Messbereichs liegt.

Die Schwerpunktwage starten und den Modus Schwerpunkt wählen. Sobald das Trieren abgeschlossen ist, kann das Modell sorgfältig aufgelegt (Abbildung 11) und in Längs- und Querrichtung ausgerichtet werden. Für die Reproduzierbarkeit der Resultate ist das ein ganz wichtiger Schritt! Warten, bis alle Schwingungen abgeklungen sind, und dann die Werte notieren.

An sich ist die Messung jetzt abgeschlossen. Aber es lohnt sich, den Wägeprozess ohne Akku zu wiederholen.

Ich habe eine Excel-Tabelle entworfen, um die Resultate auszuwerten. Bei Elektromodellen geht es meist darum, den Akku zu verschieben, sodass der Soll-Schwerpunkt erreicht wird. Das Gewicht und die Lage des Akkus, bezogen auf den Referenzpunkt, werden berechnet. In einer Grafik (Abbildung 12) wird dies aufgezeigt, wenn die Soll- und Ist-Werte eingetragen sind. Sobald der Akku gemäß Grafik verschoben wurde, kann mit einer weiteren Messung das Ergebnis überprüft werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Schwerpunktmessungen bei sorgfältigem Ausrichten sehr gut reproduzierbar sind. Die verwendeten Kreuzlibellen aus dem Baumarkt zur Anzeige der horizontalen Lage des Grund-

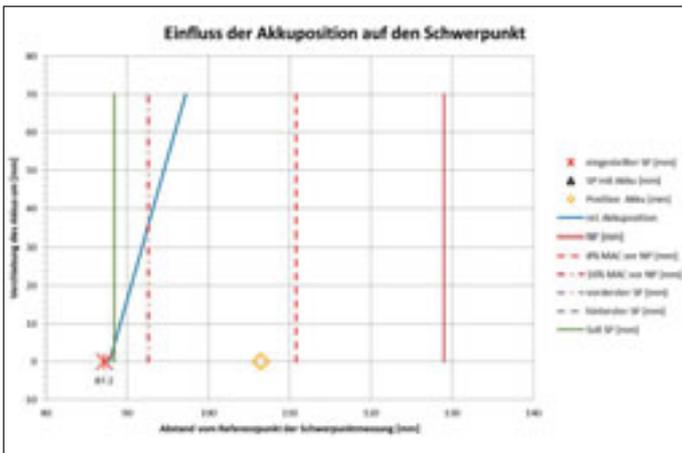


Abb. 12: Grafische Auswertung der Schwerpunktmessung am PC-7. Die kopflastige Einstellung und der hinter dem Schwerpunkt liegende Akku sind klar ersichtlich.

**Fazit**

Die erreichbare Genauigkeit und Reproduzierbarkeit genügen den Anforderungen. Von den analogen Schwerpunktwagen unterscheidet sich die digitale Schwerpunktwage durch die einfachere Anwendung und die schonendere Behandlung der Auflageflächen. Die digitale Schwerpunktwage kann problemlos während dem Bau eingesetzt werden, nicht nur um die momentane Lage des Schwerpunktes zu ermitteln, sondern auch um das Gewicht eines grossen Bauteils zu bestimmen oder den Einfluss der La-

ge der Komponenten auf den Schwerpunkt zu studieren. Schnell kann auch abgeschätzt werden, ob ein schwerer Akku zu unzulässigen Schwerpunktverschiebungen führt. Ebenso kann einfach der Einfluss von Zusatzgewichten (Ballast) oder Gewichtverschiebungen (Tankfüllung, in Längsrichtung einziehbare Fahrwerke) abgeschätzt werden.

Ich möchte meine neue digitale Schwerpunktwage nicht mehr missen.

Leonhard Keller

gerüstes und der Waagschale versehen ihren Dienst nicht und müssen noch ersetzt werden.

Selbstverständlich habe ich meine aktuellen Modelle durchgemessen. Dabei habe ich keine wesentlichen Abweichungen zur vorher mit der Wippe oder der Drei-Waagen-Methode ermittelten Schwerpunktlage feststellen können. Die flexiblen, grossflächigen Auflagen zeigten keine Spuren in den Tragflächen von Schaumstoffmodellen. Trotz Umbau der Waage für die verschiedenen Modelle ging es viel schneller und die reproduzierbaren Resultate hinterlassen ein besseres Gefühl.

[1]. **Stumpf, Rainer.** Rainers Modellflugseite. Schwerpunkt und Einstellwinkel berechnen. [Online] <http://www.rainers-modellflugseite.de/Schwerpunkt.html>.  
 [2]. **Meissner, Dietrich.** Modellflug-Club Reichertshofen e.V. WinLaengs4. [Online] <http://www.mfc-reichertshofen.de/index.php/know-how/2-uncategorised/281-winglaengs-beitrag>.  
 [3]. **Ranis, Frank.** FLZ\_Vortex V1.217 (Demo-Freeware). FLZ\_Vortex. [Online] [http://www.flz-vortex.de/flz\\_vortex.html](http://www.flz-vortex.de/flz_vortex.html).  
 [4]. **GliderCG.** GliderCG. [Online] <https://glidercg.wordpress.com/>.  
 [5]. **Schwartz, Frank.** Der digitale Schwerpunkt, Glider CG von Mahmoudi Modellsport. FMT. 2018, April.  
 [6]. **Digitech Electronics BV.** Tools. CG Wizard 3.0 Pro Version. [Online] <http://www.digitech.nl/cg-wizard-pre-order-now>.  
 [7]. **XICOY Electronica SL.** CG Meter. [Online] <https://www.xicoy.com/catalog/index.php?cPath=57&osCsid=1f4ede21f06d117e7230f730471520a4>.  
 [8]. **Kallhovd, Olav.** CG scale for F3X gliders. [Online] [https://github.com/olka/CG\\_scale](https://github.com/olka/CG_scale).  
 [9]. **natxopedreira.** RC-Groups. CG scale geek way. [Online] <https://www.rcgroups.com/forums/showthread.php?2917114-CG-Scale-geek-way>.  
 [10]. **Arduino.** [Online] <https://www.arduino.cc/>.  
 [11]. **Aliexpress.** Aihasd Digital Load Cell Weight Sensor 2KG Portable Electronic Kitchen Scale + HX711 Weighing Sensors Ad Module for Arduino. [Online] <https://www.aliexpress.com/item/Aihasd-Digital-Load-Cell-Weight-Sensor-2KG-Portable-Electronic-Kitchen-Scale-HX711-Weighing-Sensors-Ad-Module/32830560784.html>.  
 [12]. **SparkFun.** SparkFun Load Cell Amplifier – HX711. [Online] <https://www.sparkfun.com/products/13879>.  
 [13]. **Bodge.** GitHub. An Arduino library to interface the Avia Semiconductor HX711 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weight Scales. [Online] <https://github.com/bodge/HX711>.  
 [14]. **reichelt elektronik.** DEBO LCD 20X4 BL. [Online] <https://www.reichelt.de/DEBO-LCD-20X4-BL/3/index.html?ACTION=3&GROUPID=8244&ARTICLE=192144&START=0&OFFSET=16&>.  
 [15]. **fdebrabander.** GitHub. Library for the LiquidCrystal LCD display connected to an Arduino board. [Online] <https://github.com/fdebrabander/Arduino-LiquidCrystal-I2C-library>.  
 [16]. **maschinebau-fh.de.** studienfächer. Statik-Kräftegleichgewicht und Momentengleichgewicht. [Online] [http://www.maschinenbau-fh.de/s\\_gleichgewicht.html](http://www.maschinenbau-fh.de/s_gleichgewicht.html).

