

Wägezellen für Trachtwaaagen

technische und mathematische Grundlagen

Brell, Claus*
claus.brell@clabremo.de

*clabremo RESEARCH
Revision 1.0 vom 14.03.2025

1 Motivation

Eine Trachtwaaage steht bei vielen Imkern auf der Wunschliste. Einige Imker bauen sich Trachtwaaagen selbst. Bei preiswerten kommerziellen Trachtwaaagen (Brell 2021b) und bei Eigenentwicklungen (Creutz 2019, S. 50ff) bleibt die Genauigkeit zuweilen hinter den Erwartungen zurück, zudem zeigen Trachtwaaagen, die noch im Haus gut funktionierten, draußen am Stand unerklärliche Schwankungen, die teilweise temperaturabhängig sind. Der Beitrag soll die Hintergründe beleuchten und Methoden zur Kalibrierung und zur Temperaturkompensation an die Hand geben.

2 Technik der Wägezellen

Wägezellen für Trachtwaaagen basieren i.d.R. auf Dehnungsmessstreifen. Dehnungsmessstreifen ändern ihren elektrischen Widerstand, wenn sie verformt werden. Eine Wägezelle besteht aus einem Trägerbauteil, darauf werden Dehnungsmessstreifen aufgeklebt. Die Verformung der Wägezelle durch das aufliegende Gewicht führt zu einer Widerstandsänderung in den aufgeklebten Dehnungsmessstreifen. Die Widerstandsänderung ist äußerst klein und stellt die Messtechnik vor Herausforderungen. Die Dehnungsmessstreifen einer Wägezelle sind daher oft zu einer Wheatstoneschen Brücke (balkenförmige oder Plattform-Modelle, siehe Bosche (o.J)) oder einer Halbbrücke (sog. Flachzellen) verschaltet. Andere Physikalische Prinzipien der Gewichtsmessung wie z.B. über Resonanzen (Saitenschwingerwaage, Stoller 1994) oder dem piezoelektrischen Effekt sind bei Trachtwaaagen unüblich.

Wägezellen für Trachtwaaagen sind entweder balkenförmige Gebilde (Plattform-Wägezellen, vgl. Bosche(o.J)), die eine vollständige Wheatstonesche Brücke beinhalten, oder sogenannte Flachzellen mit Halbbrücken, die zu zweit oder zu viert in der Waage verschaltet werden (Creutz 2019, S 50 ff., Brell 2021a). Ein typischer Einsatzort für Flachzellen sind Personenwaagen für das Badezimmer.

Balkenförmige Wägezellen werden von einigen Trachtwaaagen-Herstellern auch zu Mehreren (parallel) verschaltet. Ein solcher Aufbau hat zunächst mechanische Vorteile, bringt jedoch zusätzliche Schwierigkeiten bei der Konzeption der Auswertung und der Linearität.

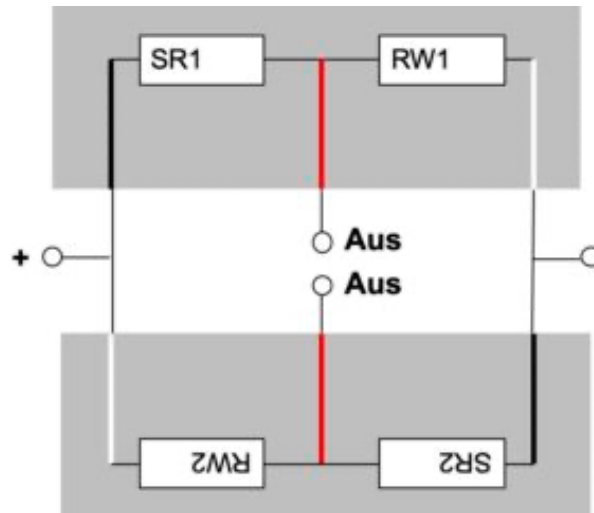


Abb. 1 Wheatstonesche Brückenschaltung mit zwei Halbbrücken (nach Brell 2021a)

3 Technik der Analog-Digitalwandlung

Da das elektrische Signal aus Wägezellen sehr klein ist, wird es vor der Analog-Digital-Wandlung verstärkt. Ein typischer Vertreter eines kombinierten Verstärkers und Analog-Digitalwandlers, der auf eine Brückenschaltung ausgelegt ist, ist der HX711, für den es fertige PCBs in verschiedenen Ausprägungen gibt.

Der HX711 kann das Signal aus den Wägezellen um die Faktoren 128, 64 und 32 (einstellbar) verstärken. Aus dem digitalen Ausgang kommt ein serielles Signal mit einer Breite von 24 Bit. Die Rohmesswerte können somit $2^{24} = 16.777.216$ Werte darstellen; da negative Werte möglich sind, liegt der Wertebereich zwischen $-8.388.608$ und $+8.388.607$

Der HX711 kann bis zu 80 Messwerte pro Sekunde liefern. Die Messwerte sind i.d.R. verrauscht, so dass sich die Software um eine geeignete Glättung kümmern muss. Meist geschieht dies durch Median- oder Mittelwertbildung über mehrere (7 bis 100) Messwerte. Das Rauschen vermindert auch die Auflösung des HX711.

4 Zusammenhang des Gewichts mit den digitalen Messwerten, Kalibrierung

4.1 Analyse und Messungen an Wägezellen

Da die Brücken in den Wägezellen immer etwas verstimmt sind, geben sie auch schon ohne Gewichtsbelastung einen von 0 abweichenden Messwert, so als würde ein Gewicht aufliegen. Bei den hier getesteten Aufbauten lagen die Messwerte ohne aufliegendes Gewicht zwischen -500.000 und $+500.000$.

Je nach Aufbau der Waage ist der Zusammenhang zwischen den digitalen Messwerten und dem Gewicht annähernd linear.

So kann z.B. eine Auflage von knapp 138 kg zu einem Roh-Messwert von $-5.656.979$ führen. In Abb. 1 ist für untersuchte Wägezellen der Zusammenhang des Gewichts (hier in Gramm) und dem Messwert gezeigt.

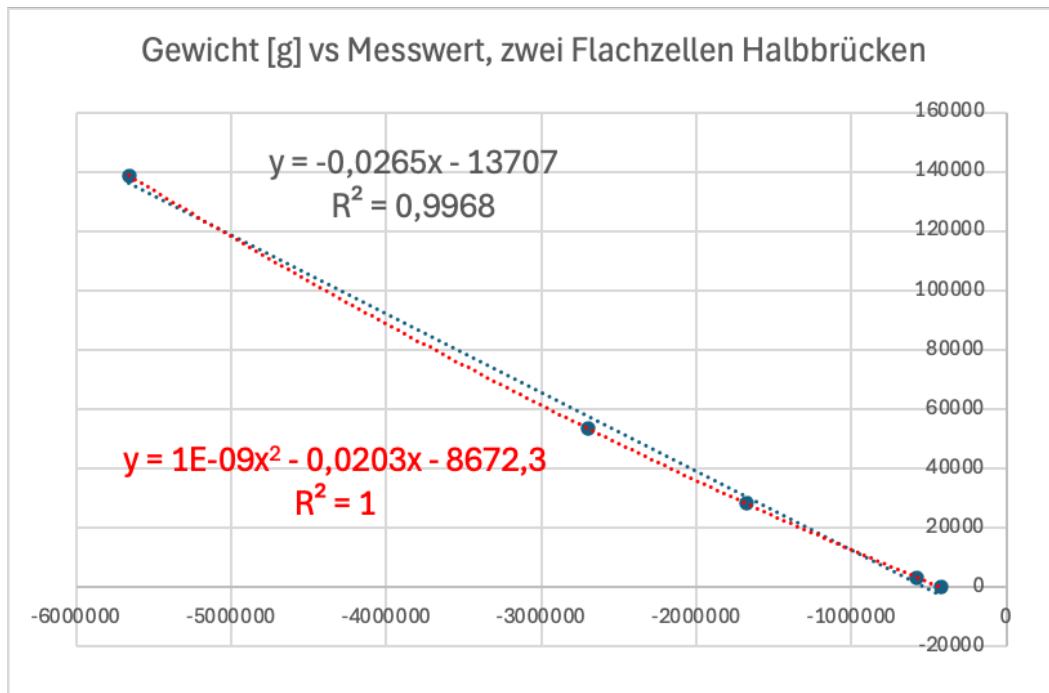


Abb. 1 Zusammenhang zwischen Gewicht in Gramm und Messwert. Es sind jeweils Regressionen für ein lineares Modell und ein Modell 2ter Ordnung gerechnet. Das lineare Modell erklärt die Varianz bereits zu $R^2=99,68\%$. Der Proportionalitätsfaktor umgerechnet auf Kilogramm wäre $a=0,0000265$, als Offset weist die lineare Regression einen Wert von $b = 13,707\text{kg}$ aus. Die Wiegeeinrichtung zeigt also leer und unbelastet einen Wert, der bereits $13,707\text{kg}$ entspricht.

Zur Kalibrierung werden nun mehrere bekannte Testgewichte aufgelegt und der Zusammenhang zwischen Messwerten und Gewicht durch Regression bestimmt. Die Vorhersagegenauigkeit, gemessen durch das Bestimmtheitsmaß R^2 , steigt, wenn statt einer linearen Regression ein Polynom z.B. 2ter Ordnung gewählt wird. Die Kalibrierung und die Umwandlung der Messwerte in ein Gewicht wird allerdings einfacher, wenn man mit einem linearen Modell arbeitet - in dem Fall lässt sich eine Waage mit nur zwei Gewichtsmessungen mit bekannten Gewichten kalibrieren.

4.2 Lineare Kalibrierung mit zwei Gewichten

Sei der lineare Zusammenhang zwischen dem Gewicht (physikalisch korrekter: der Masse) kg und dem Messwert M wie in Gleichung (1) gegeben:

$$(1) \text{ kg} = a \cdot M + b$$

mit

a = Proportionalitätsfaktor zwischen Gewicht und Messwert und

b = Offset, heißt Verschiebung des Nullpunktes.

Beispiel I - Kalibrierung:

Mit zwei bekannten Gewichten 10kg und 20kg werden folgende Messwerte erzielt:

Messung	Messwert	Gewicht [kg]
1	800.000	10
2	1.200.000	20

Der Proportionalitätsfaktor ist dann

$a = (20-10)/(1.200.000-800.000)=0,000025$ und der Offset ist

$b = kg - a * M = 20 - 0,000025 * 1.200.000 = -10kg$

Ein unbekanntes Gewicht lässt sich durch Auflage auf die Waage und mit Gleichung (1) berechnen.

Beispiel II - Messung unbekanntes Gewicht:

Sei der Messwert 1.456.778, dann ist das Gewicht

$kg = a * M + b = 0,000025 * 1.456.778 + (-10) = 26,419 \text{ kg}$

Die Grammangabe wird aus mehreren Gründen prinzipiell ungenau sein. Erstens haben die Wägezellen eine begrenzte Genauigkeit, zweitens ist Gleichung (1) nur eine lineare Näherung. Erschwerend kommt hinzu, dass die Verstimmung der Brücke und damit der Messwert nicht nur vom aufgelegten Gewicht abhängt, sondern auch von der Temperatur. Der HX711 zeigt eine nur leichte, im Rahmen dieser Untersuchung vernachlässigte Temperaturabhängigkeit. Eine weitaus größere Temperaturabhängigkeit zeigen allerdings die handelsüblichen Wägezellen.

5 Temperaturabhängigkeit der Wägezellen

Die Temperaturabhängigkeit der Wägezellen ist im Gegensatz zur Gewichtsabhängigkeit klein. Sie ist nicht linear, jedoch liefert eine lineare Korrektur bereits eine gute Verbesserung der Messgenauigkeit insgesamt. Abb. 2 zeigt die Temperaturabhängigkeit für untersuchte Wägezellen.

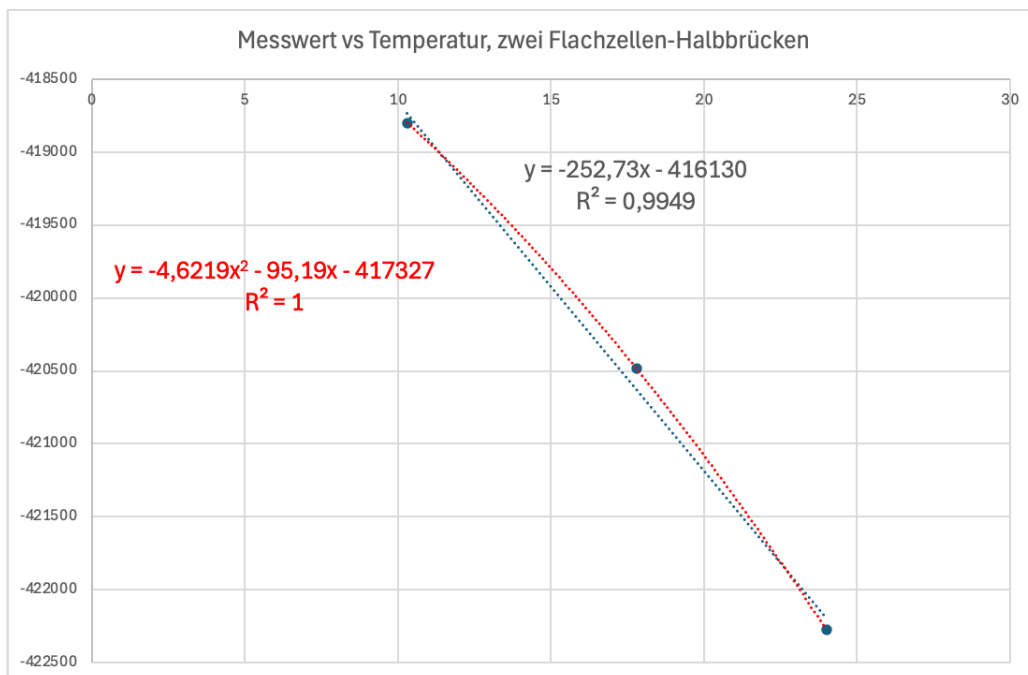


Abb. 2. Temperaturabhängigkeit von Wägezellen. Als Beispiel wurden zwei Flachzellen als Vollbrücke geschaltet. Die Zellen befanden sich in einem Edelstahl-Prototypen einer Waage, der Temperatursensor und der HX711 waren nahe der Wägezellen angebracht. Die lineare Regression ergibt bereits einen Zusammenhang, der mit $R^2=99,49\%$ die Variation erklärt. Zu erwarten ist, dass ein Polynom höherer Ordnung bei Messwerten außerhalb des untersuchten Bereichs zu starken Abweichungen ("Fantasiewerten") führt.

Als linearen Ansatz kann die Gleichung (2) angenommen werden:

$$(2) \text{ Mw} = M + m (T - T_0)$$

mit

M = Messwert aus dem HX711,

Mw gewünschter "wahrer" Messwert,

m=Proportionalitätsfaktor für die Temperaturabhängigkeit,

T = Temperatur der Wägezelle bei der Messung,

T0 = Referenztemperatur. Idealerweise wählt man für die Referenztemperatur T0 - die Temperatur, bei der die Wägezelle kalibriert wurde. Oft wird das eine Zimmertemperatur von 22°C sein, während eine Trachtwage draußen auch einmal bei -5°C stehen kann.

Beispiel III - Temperaturkompensation:

Ohne Gewichtsaufgabe werden bei Zimmertemperatur und im Kühlschrank folgende Messwerte erzielt:

Messung	Messwert	Temperatur [°C]
1	401.100	22,0°C
2	405.880	7,0°C

dann ist der Proportionalitätsfaktor für Gleichung (2)

$$m = (401.100 - 405.880) / (22,0 - 7,0) = -318,7$$

Den temperaturkompensierten "wahren" Messwert Mw erhält man dann mit folgenden Annahmen:

T= 29,5°C, gemessener Wert

M= 3.400.550, dann ist der temperaturkompensierte "wahre" Wert

$$Mw = M + m * (T-T0) = 3.400.550 + (-318,7) * (29,5 - 22,0) = 3.397.710 \text{ (gerundet)}$$

Mit diesem Wert Mw wird nun das Gewicht mit Gleichung (1) ermittelt:

$$kg = a * Mw + b = 0,000025 * 3.397.710 + (-10) = 74,943 \text{ kg.}$$

Mit dem nicht temperaturkompensierten Wert wäre das

$$kg = a * M + b = 0,000025 * 3.400.550 + (-10) = 75,014 \text{ kg.}$$

Die Abweichung ist hier im Beispiel nicht groß, je nach Aufbau der Waage, den verwendeten Wägezellen und den Temperaturdifferenzen z.B. im Winter können auch über 2 kg Abweichung beobachtet werden.

6 Gesamt-lineares Modell für die Umrechnung

Aus den vorangegangenen Überlegungen lässt sich nun ein lineares Gesamtmodell ableiten, das die Temperaturabhängigkeit berücksichtigt und eine Umrechnung des Messwertes in ein Gewicht ermöglicht.

$$(3) \text{ kg} = a * Mw + b = a * M + a * m * (T - T0) + b$$

Die Faktoren a und m und der Offset b sind wägezellen-abhängig. Bei einer gegebenen Wägezelle sind die Faktoren a und m und der Offset b zu bestimmen.

6.1 Vorgehen zur Bestimmung der Faktoren für die Kalibrierung und der Temperaturkompensation

Im ersten Schritt wird einer festen und bekannten Temperatur mit zwei bekannten Gewichten der Kalibrierungsfaktor a bestimmt. Dazu werden die Gewichte aufgelegt und zusammen mit den zugehörigen Messwerten in Form einer Tabelle notiert.

Die Berechnung des Kalibrierungsfaktors a erfolgt dann wie im Beispiel I.

Im zweiten Schritt wird der Offset b aus (irgend-) einer Tabellenzeile berechnet, ebenfalls nach Beispiel I.

Im dritten Schritt wird der Temperaturkompensationsfaktor m ermittelt. Dazu wird die unbelastete Waage zwei unterschiedlichen Temperaturen (Zimmertemperatur, Kühlschrank) ausgesetzt und die Messwerte in einer Tabelle festgehalten.

Die Berechnung des Temperaturkompensationsfaktors m erfolgt dann wie im Beispiel III.

6.2 Benötigte Daten für eine Trichtwaagenparametrisierung (Kalibrierung und Temperaturkompensation)

Um die Messwerte einer Wägezelle z.B. durch Excel oder einer eigenen Software in ein Gewicht umzurechnen, sind zur Kalibrierung und zur Temperaturkompensation folgende Werte (zwei Gewichte und drei Temperaturen) erforderlich:

Gewicht 1 und dazu passend Messwert $M1a$
Gewicht 2 und dazu passend Messwert $M2a$
Temperatur $T0$ (Temperatur bei diesen Messungen)

Temperatur $T1$ und dazu passend Messwert $M1m$
Temperatur $T2$ und dazu passend Messwert $M2m$

Dabei kann Gewicht 1 auch 0 kg sein, $T1$ kann auch identisch zu $T0$ sein.

7 Anhang

7.1 Quellen

Bosche (o.J) Plattform-Wägezellen H40A. online ressource
<https://www.bosche.eu/p/plattform-waegezellen-h40a/100-300-10-88>, zuletzt abgerufen 13.03.2025

Brell, Claus (2023) *Was ist eigentlich Temperatur und wie misst man sie?* online ressource,
<https://cbrell.de/blog/was-ist-eigentlich-temperatur/>

Brell, Claus (2021a) *Wägezelle – wie funktionieren preiswerte Personenwaagen-Zellen?*
online ressource, <https://cbrell.de/blog/waegezelle-wie-funktionieren-preiswerte-personenwaagen-zellen/>

Brell, Claus (2021b) *Digitale Waagen zum Selbstbau*. In: bienen&natur Sonderheft Waldtracht 1/2021, S. 65

Creutz, Ronald (2019) Entwurf und Implementierung eines IoT Systems zur Informationsgewinnung in der Agrarwirtschaft (hier: Imkerei) unter Nutzung von LoRaWan. Diplomarbeit, Mittweida, online verfügbar unter <https://monami.hs-mittweida.de/frontdoor/deliver/index/docId/12779/file/Diplomarbeit-RonaldCreutz-2019-10-16.pdf>, zuletzt abgerufen 13.03.2025

Kistler (o.J) Piezo vs. DMS. online ressource <https://www.kistler.com/DE/de/piezo-vs.-dms/C00000145>, zuletzt abgerufen am 13.03.2025

Stoller, Beate (1994) *Elektromechanische Waage mit Saitenschwinger*, Patentschrift, Inhaber Toledo GmbH, Schweiz. online verfügbar

<https://patentimages.storage.googleapis.com/98/72/10/2bf96be977a5d9/CH684441A5.pdf>,
zuletzt abgerufen 13.03.2025

7.2 Danksagung

Diese Unterlage entstand im Rahmen des Projektes Steel4Bees. Weitere Informationen zum Projekt gibt es unter <http://steel4bees.de>.

Das Projekt Steel4Bees wird im Förderprogramm IGP vom Ministerium für Wirtschaft und Klimaschutz von 01.10.2024 bis 30.09.2025 gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

7.3 Autor

Prof. Dr. Claus Brell

Bienensachverständiger NRW

Obmann für neue Methoden der imkerlichen Bienenhaltung im Kreisverband Krefeld/Viersen

führt in clabremo RESEARCH (clabremo GmbH, <https://clabremo.de>) das Projekt Steel4Bees durch.

