

7 Anwendung frequenzanaloger Kraftsensoren in der Wägetechnik

K. P. SELIG, D. FISCHLE
BIZERBA WERKE, BALINGEN

7.1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit berichtet über die Anwendung von mit Methoden der Mikromechanik hergestellten Sensorelementen mit frequenzanalogem Ausgangssignal in Kraftaufnehmern für die Wägetechnik.

Die Verwendung von Sensoren mit frequenzanalogem Ausgangssignal in der Wägetechnik ist nicht grundsätzlich neu, jedoch lassen sich von mit Methoden der Mikromechanik hergestellten Sensoren prinzipiell Vorteile gegenüber bestehenden Lösungen ableiten.

In der Wägetechnik haben sich heute weltweit für die hierfür notwendigen Aufnehmer folgende Technologien durchgesetzt:

- a. Dehnungsmesstreifentechnik
- b. Elektromagnetische Kraftkompensation
- c. Kapazitive Verfahren
- d. Verfahren mit schwingender Saite

Diese Technologien können vom physikalischen Prinzip her in drei Gruppen eingeteilt werden, und zwar in Verfahren, die eine Feder benötigen ((a) und (c)), in Kompensationsverfahren (b) und in Verfahren mit direkter Umsetzung der Messgrösse (d).

Grundsätzlich kann gesagt werden, dass die Verfahren, die eine Feder (zur Umsetzung der Messgrösse Kraft in einen Weg) benötigen, mit den spezifischen Fehlern (Hystese und Kriechen) des Federmaterials behaftet sind. Mit Kompensationsaufnehmern werden bezüglich der Genauigkeit die besten Ergebnisse erzielt, allerdings ist der Aufwand bei diesen Aufnehmern auch am höchsten.

Aufnehmer mit frequenzanalogem Ausgangssignal (z.B. ein Saitenkraftaufnehmer) haben gegenüber Aufnehmer mit analogem Ausgangssignal den Vorteil, keinen Analog-Digitalwandler zu benötigen. Speziell bei der Saitenwägezelle tritt jedoch ein Problem auf, dass bei diesen Aufnehmern unmittelbar das aktive Teil, nämlich die Saite, mit der Krafteinleitungsumgebung mechanisch verbunden werden muss. Diese Verbindung ist kritisch, da hiervon unmittelbar die Eigenschaften des Aufnehmers abhängen.

Verwendet man für einen Kraftaufnehmer dieses Typs an Stelle einer Saite ein mikromechanisch hergestelltes Sensorelement, so hat man die Möglichkeit, diese geometrisch so zu gestalten, dass nicht unmittelbar das schwingende Element mechanisch in Verbindung mit der Krafteinleitung kommt, sodass die störenden Rückwirkungen dieser Verbindung zumindest reduziert werden können.

Der vorliegende Bericht ist wie folgt gegliedert.

Das Kapitel 7.2 stellt einige theoretische Überlegungen für Kraftaufnehmer mit frequenzanalogem Ausgangssignal voran. Kapitel 7.3 beschäftigt sich mit numerischen Verfahren der Messwertverarbeitung und Korrektur. Da bei Aufnehmern mit frequenzanalogem Ausgangssignal die Messgrösse ja nicht analog vorliegt, ist es sinnvoll, die gesamte Messwertverarbeitung numerisch vorzunehmen.

Zur gesamten Verfahrensentwicklung waren frühzeitig im Projekt Aufnehmer als Messwertgeber notwendig. Aus diesem Grund wurden zunächst Aufnehmer entwickelt, die als Sensorelement eine Quarz-Doppelstimmgabel enthielten, die am Markt verfügbar war. Das vierte Kapitel berichtet über die mit solchen Aufnehmern durchgeführten Messungen.

Die Kapitel 7.5 und 7.6 führen dann auf die Entwicklung von Kraftaufnehmern mit einem Silizium-Resonator als Sensorelement. Das bei unserem Partner BOSCH entwickelte Sensorelement verfügt über einen piezoelektrischen Antrieb und gestattete die Untersuchung der Eigenschaften solcher Aufnehmer sowie den Aufbau eines Demonstrationsmusters.

Das letzte Kapitel gibt einen kurzen Abriss über andere Anwendungen von Aufnehmern mit Resonator-Sensorelementen.

7.2 Theoretische Betrachtungen für Resonator - Kraftaufnehmer

7.2.1 Auflösung, Messzeit und Eigenschaften des Sensorelements

Grundlegende Eigenschaften eines Messaufnehmers sind neben der absoluten Genauigkeit die Auflösung die innerhalb einer gegebenen Messzeit erreichbar ist.

Der allgemeine Zusammenhang zwischen Auflösung, Messzeit und Eigenschaften des Sensorelements wird im folgenden abgeleitet. Bei Sensorelementen mit frequenzanalogem Ausgangssignal, die nicht bei sehr hoher Frequenz arbeiten (wovon hier ausgegangen wird), ist zur Erfassung der Messgrösse Frequenz die Periodendauermessung des Sensorsignals sinnvoller als die Frequenzmessung. Bei dieser Art der Messung wird das Signal des Aufnehmers benutzt, um über eine Torschaltung ein Signal sehr hoher Frequenz freizugeben, dessen Perioden dann in einem Zähler ausgezählt werden.

Der so auflaufende Zählerstand ist gegeben durch

$$Z = f_0 \cdot T = \frac{f_0}{2 \cdot f} \quad (1)$$

Hierbei ist f_0 die Frequenz eines möglichst hochfrequenten Taktgenerators, T die Periodendauer und f die Frequenz des Sensors. Ändert sich die Frequenz des Sensors auf Grund der Messgrösse um den Wert df , so ergibt sich eine Zählerstandsänderung von

$$dZ = \frac{\delta Z}{\delta f} df = - \frac{f_0}{2 \cdot f^2} df \quad (2)$$

Definiert man die Empfindlichkeit S eines Aufnehmers zu

$$S = \frac{1}{f} \cdot \frac{df}{d\sigma} \quad (3)$$

so ergibt sich aus (2) mit $T = 1/f$

$$dZ = 0.5 \cdot f_0 \cdot n \cdot T \cdot S \cdot d\sigma \quad (4)$$

Hierbei wurde mit n noch die Zahl der Perioden der Aufnehmerfrequenz, über die zur Messung aufsummiert wird, eingeführt.

Da das Produkt $n \cdot T$ die Messzeit darstellt, ist durch (4) der Zusammenhang zwischen der Auflösung dZ , der Messzeit $n \cdot T$ und der Empfindlichkeit S bei maximaler mechanischer Spannung $d\sigma$ gegeben.

Die für eine vorgegebene Messzeit und eine vorgegebene Auflösung notwendige Mindestempfindlichkeit ist in Bild 7.1 dargestellt. Der Parameter in diesem Bild ist die Messzeit in Werten von 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 und 1 sec, die maximale Spannung wurde zu $d\sigma = 30 \text{ N/qmm}$ angesetzt.

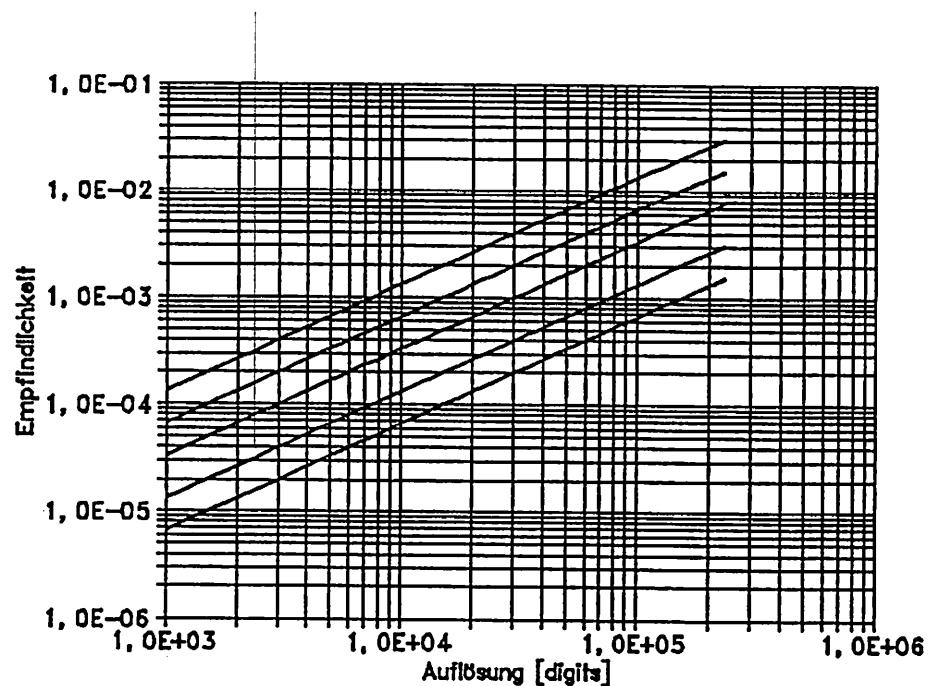


Bild 7.1: Mindestempfindlichkeit eines Aufnehmers als Funktion der Auflösung mit der maximalen Messzeit als Parameter (0.05 sec oben, 1 sec untere Kurve).

In [1] findet man für das Modell eines schwingenden Balkens für den Zusammenhang zwischen Empfindlichkeit S , Länge des Balkens l , Dicke (in Schwingungsrichtung) des Balkens t und E-Modul

$$S = \frac{0.266}{E} \cdot \frac{l^2}{t^2} \quad (5)$$

In der gleichen Arbeit findet man für die Grundfrequenz eines unbelasteten Schwingers

$$f(0) = 1.028 \cdot \frac{t}{l^2} \cdot \sqrt{E/\Gamma} \quad (6)$$

Hierbei ist Γ die Dichte des Resonatormaterials.

Bild 7.2 zeigt die berechnete Empfindlichkeit S eines balken förmigen Resonators als Funktion seiner Schlankheit (Verhältnis Länge/Dicke) berechnet für Silizium ($E = 1.9E11 \text{ N/m}^2$, $\Gamma = 2300 \text{ kg/m}^3$).

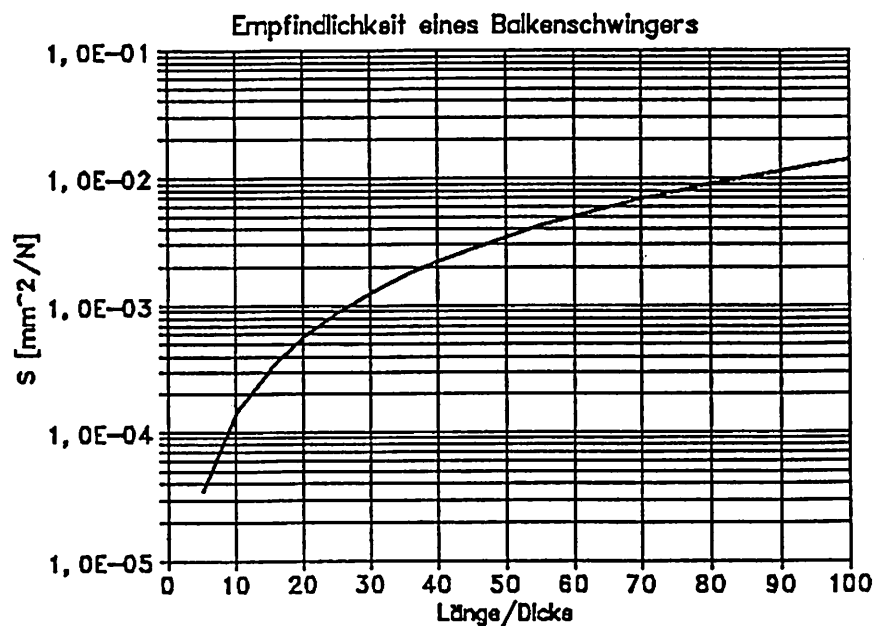


Bild 7.2: Empfindlichkeit S eines balkenförmigen Resonators als Funktion seiner Schlankheit.

Aus den Bildern 7.1 und 7.2 kann entnommen werden, welche Wertkombinationen von Auflösung und Messzeit prinzipiell mit den hier diskutierten frequenzanalogen Sensoren erreicht werden können. Im folgenden ist nochmals ein Zahlenbeispiel angegeben, in dem zur Ermittlung absoluter Zahlen folgende Annahmen für die Taktfrequenz und die Abmessungen der Resonatorzunge gemacht wurden:

- Taktfrequenz : 10 MHz
- Max. mechanische Spannung : 30 N/mm²
- Dicke in Schwingungsrichtung : 0.2 mm
- Dicke senkrecht zu Schwing. : 0.5 mm
- Länge : 10 mm

Für ein Sensorelement in Form eines schwingenden Balkens ergeben sich dann auf Grund der in den Bildern 7.1 und 7.2 dargestellten Zusammenhänge folgende messtechnischen Grenzdaten:

- Grundfrequenz : 18.7 kHz
- Empfindlichkeit : 0.0035 mm²/N
- Messzeit : > 0.2 sec
- Auflösung : < 100000
- max. Kraft : 3 N

Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass es sich bei den hier ermittelten Daten um theoretische Grenzwerte handelt, die in der Praxis auf Grund anderer Effekte nicht unbedingt erreichbar sind.

7.3 Messwertverarbeitung

Bei Aufnehmern, die Sensorelemente mit frequenzanalogem Ausgangssignal verwenden, liegt die Messinformation in Form einer Frequenz oder einer Periodendauer und nicht in Form einer (analogen) Messgrösse vor.

Eine Korrektur von Querempfindlichkeiten des Aufnehmers mit analogen Verfahren ist hier also nicht sinnvoll möglich, viel-mehr sollte die Korrektur solcher Effekte in der Messwertverarbeitung mit Hilfe mathematischer Verfahren erfolgen.

Folgende Korrekturen müssen hierbei für Aufnehmer dieser Art ausgeführt werden:

- a. Linearisierung der Frequenz-Kraft-Beziehung
- b. Nullung (Tarierung)
- c. Korrektur des Temperaturgangs des Nullpunkts
- d. Korrektur des Temperaturgangs der Empfindlichkeit
- e. Filterung der Messwerte

Es ist zu beachten, dass diese Korrekturen zum Teil nicht unabhängig voneinander sind, so darf etwa die Nullung erst nach der Linearisierung erfolgen, da sonst durch die Nullung eine Verschiebung des 'Arbeitspunktes' auf der Frequenz-Last-Kurve erfolgt.

Die verschiedenen, in den Versuchen erprobten Verfahren sind im folgenden kurz skizziert; die nächsten Kapitel beschreiben dann Messungen, bei denen ausgesuchte Korrekturverfahren für Kraftaufnehmer experimentell überprüft wurden.

7.3.1 Verfahren zur Linearisierung

Die Abweichung der Übertragungsfunktion eines Kraftaufnehmers (Frequenz als Funktion der zu messenden Kraft) vom ideal linearen Verhalten geht unmittelbar als Fehler in die Messung mit einem solchen Aufnehmer ein und ist auch erheblich grösser als etwa bei Aufnehmern nach dem DMS-Prinzip oder der Kraftkompensation.

Die unterschiedlichen Verfahren zur Linearisierung wurden deshalb ausführlich durch Modellrechnungen und Experimente untersucht.

Folgende Verfahren wurden untersucht (zur detaillierteren Beschreibung siehe [3], [4], [5], [6]):

- a. Ganzrationale Polynome
- b. Tschebyscheff's Polynome
- c. Gefesselte kubische Splinepolynome
- d. Wurzelansatz

Beim Verfahren (c) handelt es sich um eine abschnittsweise Approximation mit stetigem Übergang an den Abschnittsgrenzen, das Verfahren (d) ist ein Ansatz auf Grund der empirischen Kenntnis des Verlaufs der Frequenz-Kraft-Funktion eines Aufnehmers.

7.3.2 Korrektur von Temperatureffekten

Bei Kraftaufnehmern mit frequenzanalogem Ausgangssignal muss sowohl eine Korrektur des Temperaturgangs des Nullpunkts als auch eine Korrektur des Temperaturgangs der Empfindlichkeit erfolgen. Beide Querempfindlichkeiten lassen sich durch konstruktive Massnahmen bei der Krafteinleitung günstig beeinflussen und sind über ein quadratisches Polynom korrigierbar. Aus diesem Grund war die Korrektur dieser Effekte nicht Schwerpunkt der vorliegenden Untersuchung.

7.3.3 Filterung

Um eine ausreichende Unterdrückung von dem Messsignal überlagerten Störungen zu gewährleisten, ist eine Filterung der Messwerte notwendig. Bei einem Aufnehmer mit frequenzanalogem Ausgangssignal kann diese Filterung nur digital erfolgen.

Bei dem realisierten Funktionsmuster einer Waage mit einem Siliziumresonator als Sensorelement wurde ein Transversalfilter (FIR-Filter) mit 10 Koeffizienten, einer Durchlassgrenzfrequenz von 1 Hz sowie einer Sperrgrenzfrequenz von 2 Hz realisiert

7.4 Messungen mit Quarz-Sensorelementen

7.4.1 Aufbau der Kraftaufnehmer

Kraftaufnehmer für den Einsatz in der Wägetechnik benötigen eine 'Umgebung' des Sensorelements, die folgende Aufgaben übernimmt:

- a. Eine Umsetzungen der zu messenden Gewichtskraft auf die vom Sensorelement zu verarbeitende Kraft
- b. Die Abkopplungen von störenden Drehmomenten, die durch aussermittiges Aufbringen der Last auf die Lastplatte erzeugt werden
- c. Einen Überlastungsschutz für das Sensorelement

Die Kraftumsetzung ist grundsätzlich auf zwei Arten realisierbar, als

- echte Hebelumsetzung
- elastische Umsetzungen

Die Abkopplung von Momenten vom Sensorelement erfolgt üblicherweise durch Ausbildung der Krafteinleitung als Parallelogrammlenker.

Für die im folgenden beschriebenen Messungen wurde eine Krafteinleitung in Form eines Parallelogrammlenkers mit echter Hebeluntersetzung verwendet. Dieses Element wurde durch Zerspanen aus einem Block einer Spezial-Aluminiumlegierung hergestellt. Bild 7.3 zeigt den schematischen Aufbau des Kraftaufnehmers.

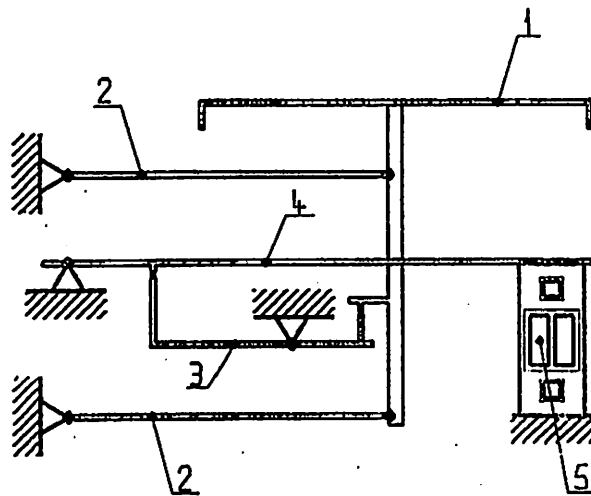


Bild 7.3: Schematischer Aufbau eines Kraftaufnehmers

Das zu bestimmende Prüfgut wird auf die Lastplatte (1) aufgebracht, die über zwei Parallel-Lenker (2) geführt wird. Die Gewichtskraft wird über die zwei Hebel (3), (4) untersetzt und dem Sensorelement (5) zugeführt.

Je nach benötigter Untersetzung wurden Varianten mit einem oder mit zwei Hebeln verwendet.

Für die in diesem Kapitel beschriebenen Versuche wurde als Sensorelement eine Quarz-Doppelstimmgabel der Firma ETA mit piezoelektrischer Anregung verwendet; technische Details dieses Resonators sind dem Anhang dieses Berichts zu entnehmen.

7.4.2 Lastverhalten der Kraftaufnehmer

Zur Ermittlung des Zusammenhangs zwischen Last und Frequenz eines Kraftaufnehmers wurden verschiedene Aufnehmer mit echter Hebeluntersetzung und Quarz-Doppelstimmgabelresonator aufgebaut und untersucht. Im folgenden sind die Messergebnisse eines Aufnehmers mit Einfach-Hebeluntersetzung und einem Unter-setzungsverhältnis von ca. 7:1 beschrieben. Zur Durchführung der Messung wurde der Aufnehmer mit einer Lastplatte von ca. 100mm x 100mm versehen und mit Hilfe von Gewichtsstücken belastet.

Die Messung wurde bei Raumtemperatur durchgeführt.

Bild 7.4 zeigt die Abweichung der Messwerte dieses Aufnehmers von der Idealkurve, und zwar für die rohen Messwerte (gekrümmte Kurve) und die linearisierten Messwerte (gerade Linie auf der x-Achse). In dieser Darstellung sind die Werte für die Punkte Last = Null und Last = Vollast auf Null normiert. Aus der Form der Kurve der Rohdaten ist ersichtlich, dass die Übertragungsfunktion des Aufnehmers (Ausgangsgrösse als Funktion der Eingangsgrösse) durch eine rechtsgekrümmte Kurve dargestellt wird.

Zur Linearisierung der Messwerte wurden kubische Splinepolynome in drei Abschnitten benutzt. Die für diese Art der Approximation notwendigen Randbedingungen für die zweite Ableitung wurde iterativ ermittelt.

Die linearisierten Werte sind in Bild 7.4 ebenfalls dargestellt, wegen der sehr geringen Restfehler der linearisierten Werte ist in dieser Auflösung lediglich eine Gerade zu sehen.

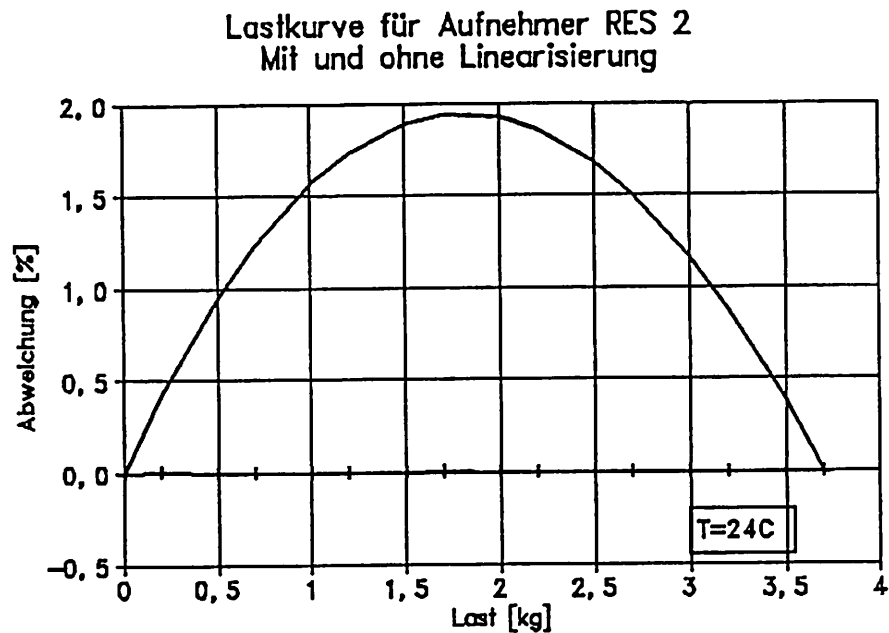


Bild 7.4: Linearitätsfehler für Kraftaufnehmer mit Quarz-Resonator für die Rohwerte (gekrümmte Kurve) und für die linearisierten Werte.

Zur besseren Erkennbarkeit der Restfehler für die linearisierten Daten sind in Bild 7.5 die linearisierten Messwerte nochmals in wesentlich höherer Auflösung dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Einheit der Ordinatenachse bei Bild 7.5 als 'ppm' gewählt wurde, im Gegensatz zur Einheit '%' in Bild 7.4.

Es ist zu erkennen, dass der Restfehler bei der Linearisierung im Vergleich zu den Rohwerten um über den Faktor 500 verbessert wurde, was ein hervorragendes Ergebnis darstellt.

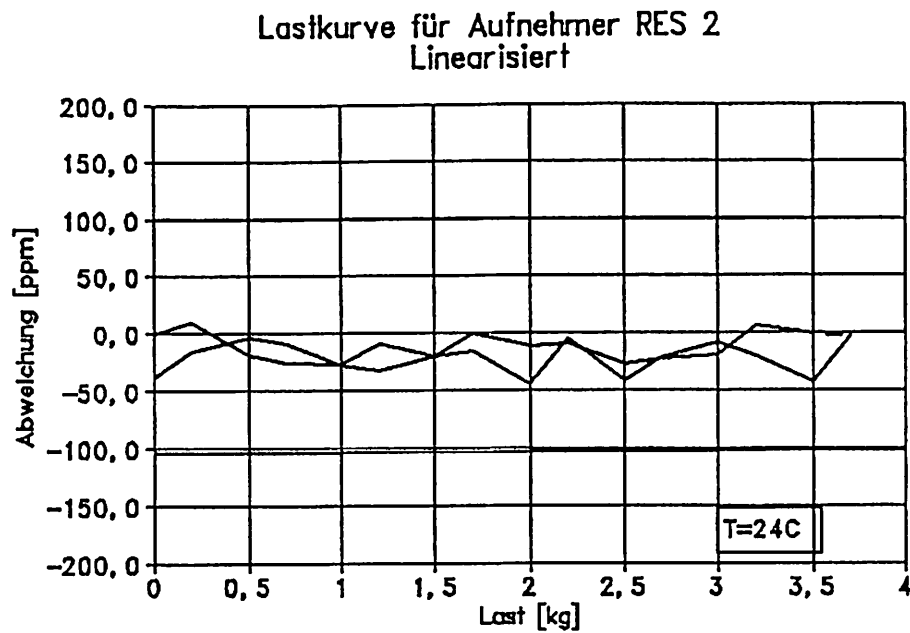


Bild 7.5: Linearitätsfehler für linearisierte Messwerte wie in Bild 7.4, aber mit höherer Auflösung.

Aus Bild 7.5 ist ebenfalls ersichtlich, dass der Kraftaufnehmer nur eine sehr geringe Hysterese und eine ausgezeichnete Nullpunktrückkehr aufweist, obwohl während der Messung keine besonderen Massnahmen bezüglich der Umgebungseinflüsse getroffen wurden (die Messung erfolgte in normaler Laborumgebung).

Zur Orientierung sind in Bild 7.5 noch die zulässigen Fehlergrenzen für eine eichfähige Waage mit 10000 Schritten Auflösung angegeben (± 100 ppm). Der hier dargestellte Lastaufnehmer hat bezüglich der lastabhängigen Fehler Linearität, Hysterese und Nullpunktrückkehr eine Qualität, die mit Dehnungsmesstreifenaufnehmern praktisch nicht mehr erreichbar ist.

Bild 7.6 zeigt im Vergleich dazu den Restlinearitätsfehler eines anderen Aufnehmers, bei dem die Linearisierung mit einem Polynom zweiten Grades realisiert war. Die Koeffizientenbestimmung wurde hierbei über ein überbestimmtes Gleichungssystem nach der Methode der kleinsten (Rest-) Fehlerquadrate durchgeführt.

Man sieht, dass das einfachere Verfahren mit Hilfe eines quadratischen Polynoms einen wesentlich höheren Restfehler zur Folge hat.

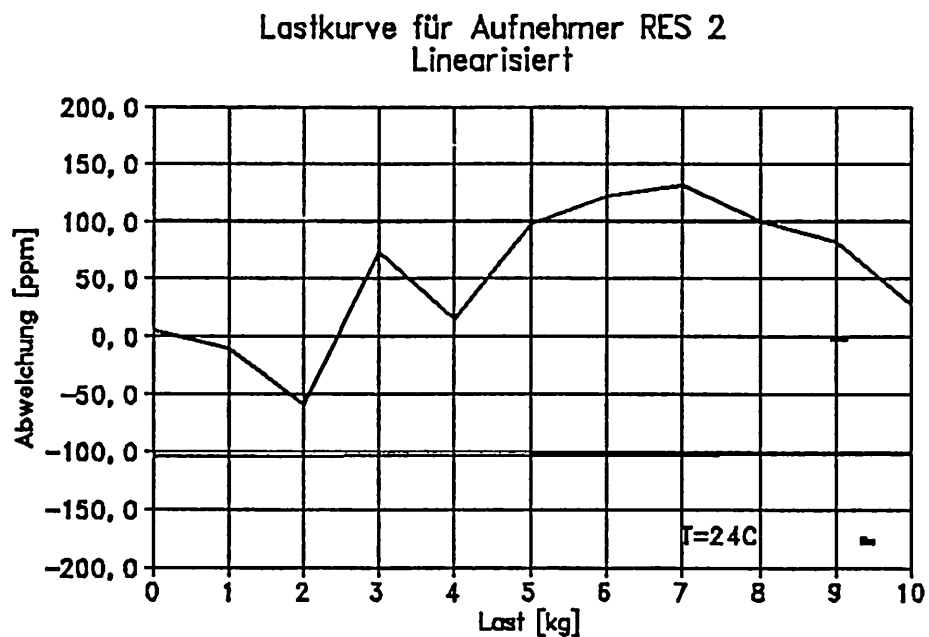


Bild 7.6: Restlinearitätsfehler bei quadratischer Approximation

7.4.3 Elastische Nachwirkungen (Kriechen)

Alle Werkstoffe zeigen bei längerandauernder Belastung eine elastische Nachwirkung, die sich in einer zeitlichen Änderung der Dehnung auswirkt. Dies betrifft bei den hier betrachteten Aufnehmern sowohl den metallischen Werkstoff der Krafteinleitung, das Resonatorelement selbst und insbesondere auch die mechanische (Klebe-) Verbindung zwischen diesen Teilen. Da Kunststoffe ein erheblich stärkeres Kriechen zeigen als Metalle oder kristalline Stoffe, kommt dieser Klebeverbindung für die Qualität solcher Aufnehmer eine erhebliche Bedeutung zu.

Bei den hier untersuchten Klebeverfahren stellte sich ein unter Druck und Übertemperatur laufendes Verfahren als besonders vorteilhaft heraus, weil es die Herstellung extrem dünner Klebstoffschichten erlaubt. Es wird ein Klebstoff verwendet, der unter Temperatur aushärtbar ist.

Bild 7.7 zeigt das Zeitverhalten eines Kraftaufnehmers für eine Belastungsdauer von 5 min mit Vollast sowie eine anschließende Phase ebenfalls von 5 min Dauer ohne Last. In diesem Diagramm ist im Bereich 0 sec - 300 sec die Abweichung vom Vollastwert aufgetragen, im Bereich 300 sec - 600 sec die Abweichung vom Nullastwert vor der Belastung.

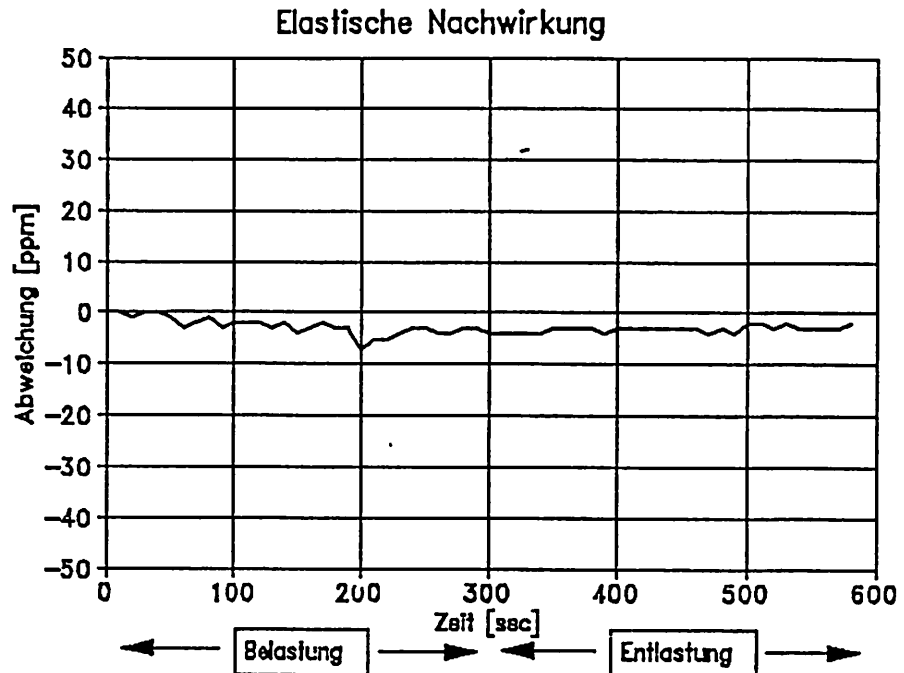


Bild 7.7: Elastische Nachwirkung für eine Belastungsdauer von 300 sec und eine anschliessende Entlastung von 300 sec.

Kraftaufnehmer der hier verwendeten Bauart zeigen, wie aus Bild 7.7 ersichtlich, einen extrem geringen Kriechfehler. Vergleichbar kleine Kriechfehler sind mit Aufnehmern in Dehnungsmesstreifentechnik (genauer, bei allen Verfahren, die eine Feder benutzen) nicht realisierbar.

7.4.4 Temperatureffekte

Kraftaufnehmer für die eichfähige Wägetechnik müssen in der Regel für den Temperaturbereich -10°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ ausgelegt sein und dürfen in diesem Bereich keine Abweichung vom Idealwert aufweisen, die grösser als 1 Eichwert des Aufnehmers ist.

Auf Grund temperaturabhängiger Materialparameter der verwendeten Werkstoffe ist dies nur mit einer Korrektur der von der Temperatur abhängigen Qucrempfindlichkeiten für Nullpunkt und Empfindlichkeit zu realisieren.

Bild 7.8 zeigt den Temperaturverlauf von Nullpunkt und Kennwert (Vollastwert - Nullastwert) eines Aufnehmers im Temperaturbereich 0°C bis 40°C ohne Korrektur (Rohwerte). Die Daten sind auf den Kennwert normiert dargestellt.

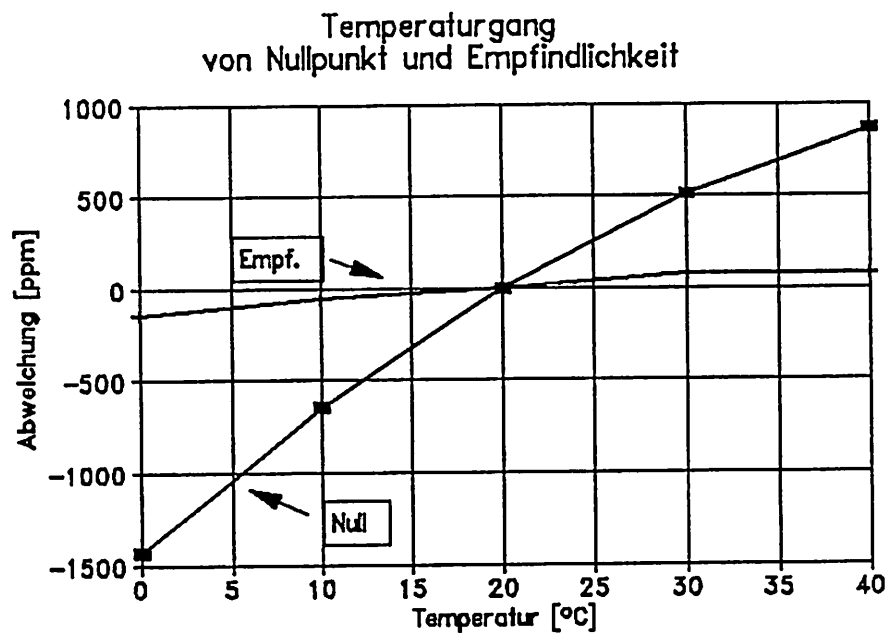


Bild 7.8: Temperaturbedingte Abweichungen von Nullsignal und Empfindlichkeit; Bezugstemperatur 20°C.

Der Verlauf der beiden Kurven entspricht Temperaturkoeffizienten von

- TK (Nullpunkt) : 58 ppm/°C
- TK (Empfindlichkeit) : 6 ppm/°C

Diese Temperaturkoeffizienten sind für einen unkorrigierten Aufnehmer ausserordentlich niedrig. Auf Grund des in Bild 7.8 dargestellten gutmütigen Kurvenverlaufs wurde für die Temperaturkorrektur eine quadratische Approximation der Form

$$y(T) = A + B \cdot T + C \cdot T^2 \quad (7)$$

gewählt. Die Koeffizientenbestimmung erfolgte aus jeweils 5 Messwertpaaren (d.h. aus einem überbestimmten Gleichungssystem) nach einem Verfahren mit modifizierter GivensTransformation [9].

Bild 7.9 zeigt den Temperaturverlauf von Nullpunkt und Empfindlichkeit, korrigiert mit diesem Verfahren. Es ist ersichtlich, dass sowohl Empfindlichkeit als auch Nullpunkt nur noch minimale Restfehler aufweisen.

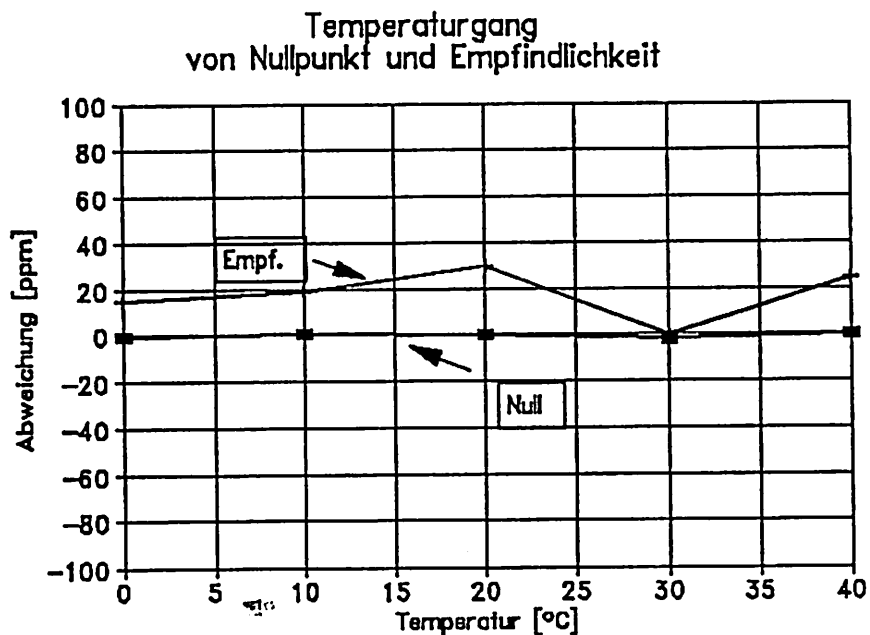


Bild 7.9: Korrigierter Temperaturverlauf für Nullpunkt und Kennwert.

7.4.5 Zusammenfassungen der Messungen

Die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen wurden durchgeführt mit Kraftaufnehmern bestehend aus einem Quarzresonator als Sensorelement und einer Krafteinleitung, die als echte Hebeluntersetzung mit Parallelenkerfunktion ausgebildet war.

Ziel dieser Messungen war, Verfahren für die digitale Messwertverarbeitung zu entwickeln und die Grenzen in Bezug auf die erreichbaren Genauigkeiten zu bestimmen.

Betrachtet man die Summe der in den Kapiteln 7.4.2 - 7.4.4 beschriebenen Ergebnisse dieser Versuche, so wird ersichtlich, dass diese Messsysteme eine erheblich grössere Genauigkeit ermöglichen als Kraftaufnehmer mit Feder. Messungen der Überlastungsfestigkeit gegenüber extremer, stossartiger Überlastung solcher Aufnehmer (hier nicht im Detail beschrieben, siehe etwa [10]) zeigen, dass bedingt durch die Sprödigkeit des Materials für das Sensorelement eine mit vernünftigem Aufwand realisierbare Überlastsicherung nicht möglich ist. Es gibt zwar technische Lösungen hierfür, die aber vom wirtschaftlichen Aufwand her für diese Aufnehmer nicht sinnvoll sind.

Sowohl die hervorragenden erzielbaren Genauigkeiten als auch der Nachteil solcher Systeme für Schockbelastungen zeigen, dass der Anwendungsbereich solcher Aufnehmer in der Wägetechnik nicht bei den Handelswaagen liegt, sondern im Bereich der Präzisionswaagen.

Für diesen Bereich würden Kraftaufnehmer der hier betrachteten Bauform sowohl bezüglich der Genauigkeit als auch bezüglich der Herstellkosten die Lücke abdecken, die heute zwischen Dehnungsmesstreifentechnik und Kraftkompensationstechnik besteht.

7.5 Materialalternativen für Resonatorelemente

Die bisher beschriebenen Messungen wurden an Kraftaufnehmern mit einer Quarz-Doppelstimmgabel als Sensorelement durchgeführt.

Es war eines der Hauptziele dieses Forschungsprojektes, für die Sensorelemente mit Methoden der Mikromechanik gestaltete Siliziumresonatoren zu verwenden. Eines der dabei auftretenden Probleme ist das Fehlen der piezoelektrischen Eigenschaft des Quarzes bei Silizium.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen über Antriebe für Resonatoren, die keine piezoelektrische Eigenschaft des Materials voraussetzen, wurden auch Abschätzungen und Vorversuche an metallischen (durch isotropes Ätzen) hergestellten Doppelstimmgabelresonatoren durchgeführt.

7.5.1 Metallische Resonatoren

Zur Anregung von Resonatoren ohne piezoelektrische Materialeigenschaft wurde eine ganze Reihe denkbarer Anregungsmechanismen theoretisch und zum Teil auch experimentell untersucht.

Eines dieser Verfahren ist die Anregung über elektromagnetische Kräfte (eine detailliertere Beschreibung findet man in [10]).

Zur Anwendung dieses Verfahrens ist es notwendig, dass die Schenkel des anzuregenden Resonators ferromagnetisch sind. Dies kann entweder dadurch erreicht werden, indem man diese Schenkel mit einem ferromagnetischen Material, z.B. Nickel, beschichtet, oder indem der Resonator selbst aus ferromagnetischem Material gefertigt wird.

Die mit metallischen Resonatoren durchgeführten Versuche zeigten, dass eine magnetische Anregung möglich ist. Diese Variante wurde im Rahmen dieses Projekts nicht weiter verfolgt.

7.5.2 Silizium-Resonatoren thermisch angeregt

Die Versuche zur thermischen Anregung von Siliziumresonatoren wurden gemeinsam mit der Firma GMS durchgeführt. Bei GMS wurde ein Si-Resonator mit Dünnschicht-NiCr Schichten zur thermischen Anregung entwickelt. Trotz der sehr geringen nutzbaren Signalamplituden konnte eine Erregerschaltung zur kontinuierlichen Anregung des Resonators realisiert werden [11].

Bei den Versuchen stellte sich heraus, dass der so angeregte Resonator eine starke Querempfindlichkeit gegenüber Änderungen der Wärmeabfuhr an die Umgebung aufweist. Diese Querempfindlichkeit rührt im wesentlichen von der starken Temperaturüberhöhung durch die Verlustleistung der NiCr-Dünnschichtwiderstände in der Mitte des Resonators [11] her.

Bezüglich der Optimierung dieses Verfahrens zur Reduzierung dieser Querempfindlichkeit sei auf den Bericht der Firma GMS verwiesen.

An dieser Stelle sei nochmals auf die Grösse dieser Querempfindlichkeit verwiesen, die möglicherweise die Entwicklung von Anemometern zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten ermöglicht.

Bild 7.10 zeigt die Frequenz eines thermisch angeregten Si-Resonators als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft. Dieser Zusammenhang wurde auf Basis der in [11] beschriebenen Rechnungen und Messungen berechnet.

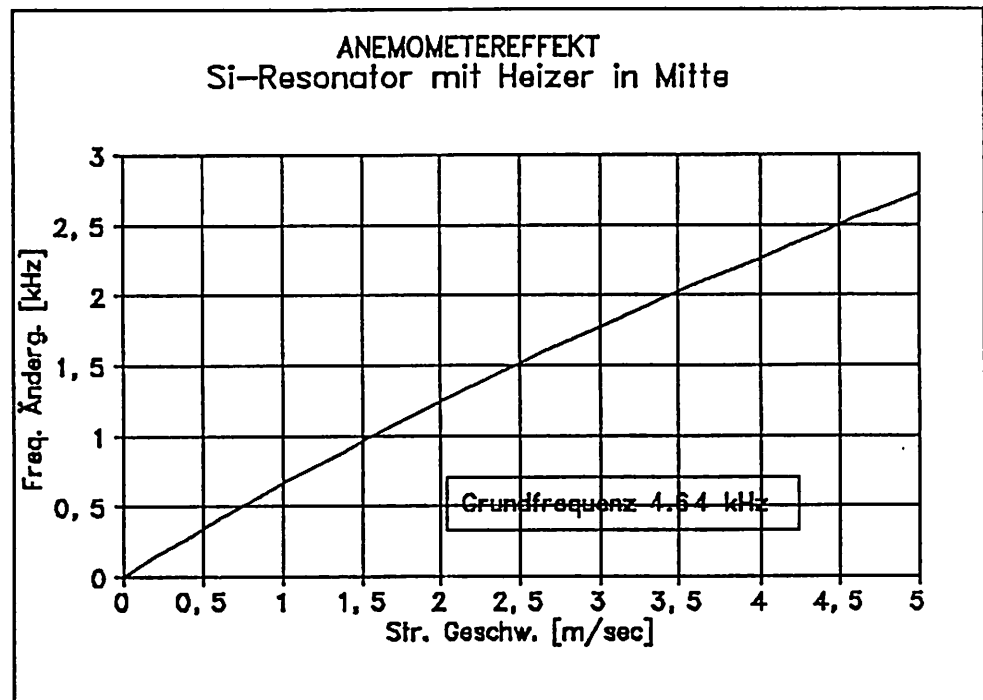


Bild 7.10: Berechnete Resonanzfrequenz eines thermisch angeregten Resonators als Funktion der Strömungsgeschwindigkeit der Umgebungsluft.

Im Rahmen dieses Projektes wurde dieser Effekt nicht mehr weiterverfolgt.

7.5.3 Silizium-Resonatoren piezoelektrisch angeregt

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden von Firma BOSCH Silizium-Resonatoren in Form von Einbalkenschwingern mit passiven Verstärkungsstegen hergestellt.

Der Antrieb erfolgte bei diesen Resonatoren durch piezoelektrische Schichten aus ZnO, mit denen das schwingende Teil des Resonators beschichtet war.

Einen Überblick über die technischen Daten dieser Elemente findet man im Anhang, bezüglich detaillierterer Informationen sei hier auf den Bericht der Firma BOSCH verwiesen.

Das im Kapitel 7.8 beschriebene Funktionsmodell einer Waage mit einem Kraftaufnehmer mit frequenzanalogem Ausgang wurde auf Basis eines solchen Sensorelements entwickelt.

7.6 Messungen mit Silizium-Sensorelementen

Dieses Kapitel beschreibt Messungen an Kraftaufnehmern mit einem Siliziumresonator mit piezoelektrischer Anregung. Die verwendeten Sensorelemente sowie das Grundmodul der Erregerschaltung wurden bei BOSCH entwickelt.

7.6.1 Aufbau der Aufnehmer

Die zum Aufbau von Kraftaufnehmern notwendigen Krafteinleitungen wurden diesem Sensorelement angepasst. Es wurden sowohl Krafteinleitungen mit elastischer Kraftuntersetzung als auch solche mit echter Hebeluntersetzung verwendet [11].

Der Aufbau der Kraftaufnehmer mit Hebeluntersetzung entspricht im Prinzip den in Kapitel 7.4 beschriebenen Aufnehmern, Untersetzungsfaktor und Einbauverhältnisse wurden dem Si-Sensorelement angepasst.

Der schematische Aufbau eines Aufnehmers mit elastischer Kraftuntersetzung ist in Bild 11 dargestellt.

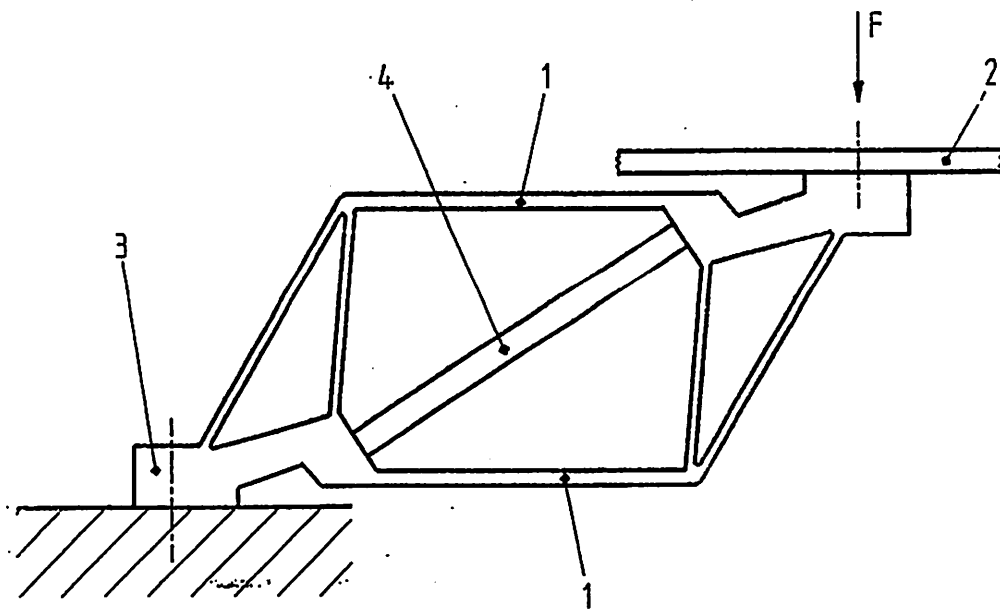


Bild 7.11: Schematische Querschnittsdarstellung eines Kraftaufnehmers mit elastischer Kraftuntersetzung.

Der Aufnehmer besteht aus einer Parallelführung (1) zur Führung der Lastplatte (2), dem Fixteil (3) und dem diagonal in der Parallelführung angebrachten Resonator (4).

Die Kraftuntersetzung entsteht durch die relativ hohe Federsteifigkeit des rautenförmigen Rahmens; diese Feder ist im Kraftfluss parallel zum Resonator angebracht und trägt den grössten Teil der eingeleiteten Kraft F .

7.6.2 Ergebnisse der Messungen

Bild 7.12 zeigt den Zusammenhang zwischen Resonatorfrequenz und der auf den Aufnehmer aufgetragenen Last für einen Aufnehmer mit elastischer Kraftuntersetzung.

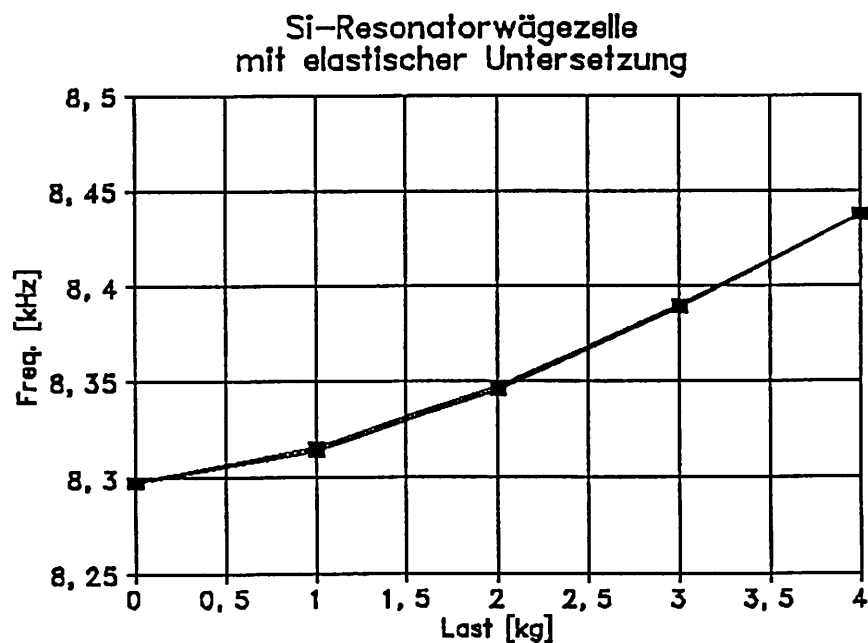


Bild 7.12: Lastkurve für einen Kraftaufnehmer mit Si-Resonator und elastischer Kraftuntersetzung.

Im Gegensatz zu den im Kapitel 7.4 beschriebenen Ergebnissen ist die Frequenz-Lastkurve bei diesem Aufnehmer nach links gekrümmt.

Das Ergebnis einer relativ einfachen Linearisierung mit einem Polynom zweiten Grades ist in Bild 7.13 dargestellt.

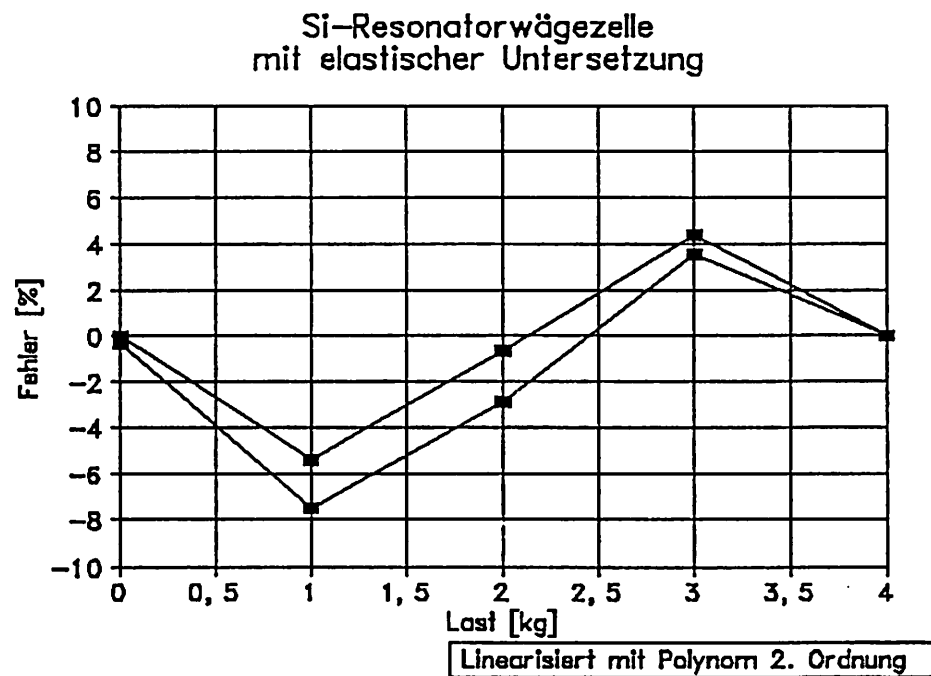


Bild 7.13: Restlinearitätsfehler nach Linearisierung

Es ist aus diesem Bild deutlich, dass ein quadratisches Polynom zur Linearisierung dieses Aufnehmers nicht ausreicht, da die Frequenz-Last-Kurve offensichtlich einen Wendepunkt aufweist.

Bei diesem Aufnehmer wurde keine weitere Optimierung der Linearisierung durchgeführt, da der Aufnehmer, wie ebenfalls aus Bild 7.13 ersichtlich, eine grosse Hysterese besitzt.

Ein weiterer Versuch wurde mit einem Aufnehmer durchgeführt, der in der Krafteinleitung eine Hebeluntersetzung aufwies. Die Fehlerkurve dieses Aufnehmers, d.h. die Abweichung der Lastkurve von der Idealkurve nach der Linearisierung ist in Bild 7.14 dargestellt.

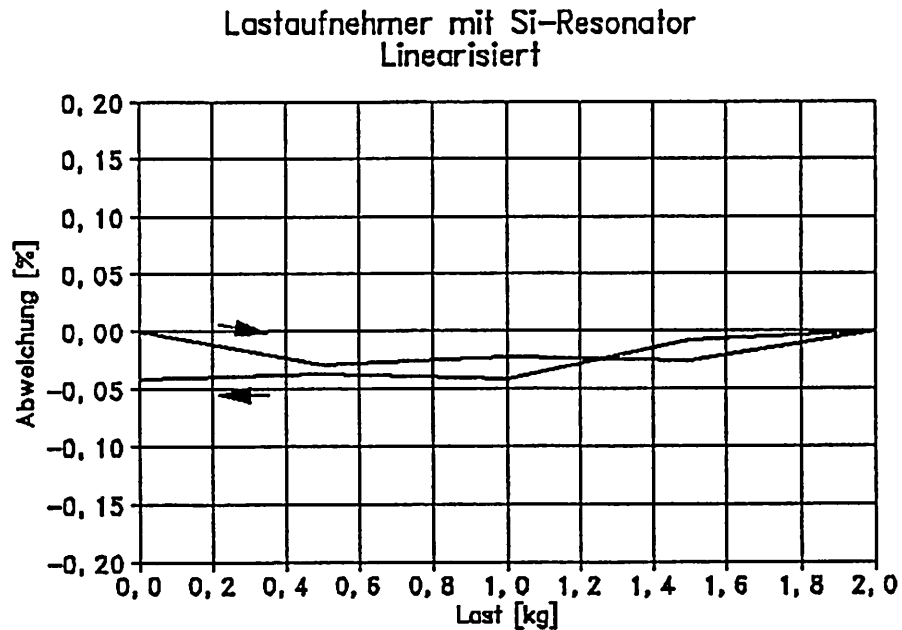


Bild 7.14: Fehlerkurve eines Aufnehmers mit Si-Resonator und Hebeluntersetzung

Zur Linearisierung dieses Aufnehmers wurde ein Tschebyscheffpolynom 4. Grades verwendet.

Der Restlinearitätsfehler bei diesem Aufnehmer liegt deutlich unter 0.05 % und ist erheblich geringer als bei dem Aufnehmer mit elastischer Kraftuntersetzung (Bild 7.13). Auch bezüglich der Hysterese hat dieser Aufnehmer verglichen mit der elastischen Kraftuntersetzung ein wesentlich besseres Verhalten.

Der Grund für das deutlich bessere Abschneiden der Aufnehmer mit Hebeluntersetzung gegenüber den Varianten mit elastischer Untersetzung liegt darin, dass bei der Hebeluntersetzung die Krafteinleitung, die ja eine Federsteifigkeit besitzt und als Feder parallel zum Resonator liegt, wesentlich weicher ist als bei der elastischen Kraftuntersetzung.

Fehler, die durch thermische Einflüsse (verschiedene Ausdehnungskoeffizienten) oder durch mechanische Einflüsse der Verklebung verursacht werden, werden ja erst durch die mechanisch parallelgeschaltete Feder der Krafteinleitungsumgebung in Kräfte umgesetzt, die dann vom Resonator detektiert werden.

Bild 7.15 zeigt eine weitere Fehlerkurve eines Kraftaufnehmers (Abweichungen von der Idealkennlinie):

Der Kraftaufnehmer war mit einem Hebellenker mit Untersetzung 7:1 und einem Si-Resonator mit ca. 7 kHz Grundfrequenz aufgebaut.

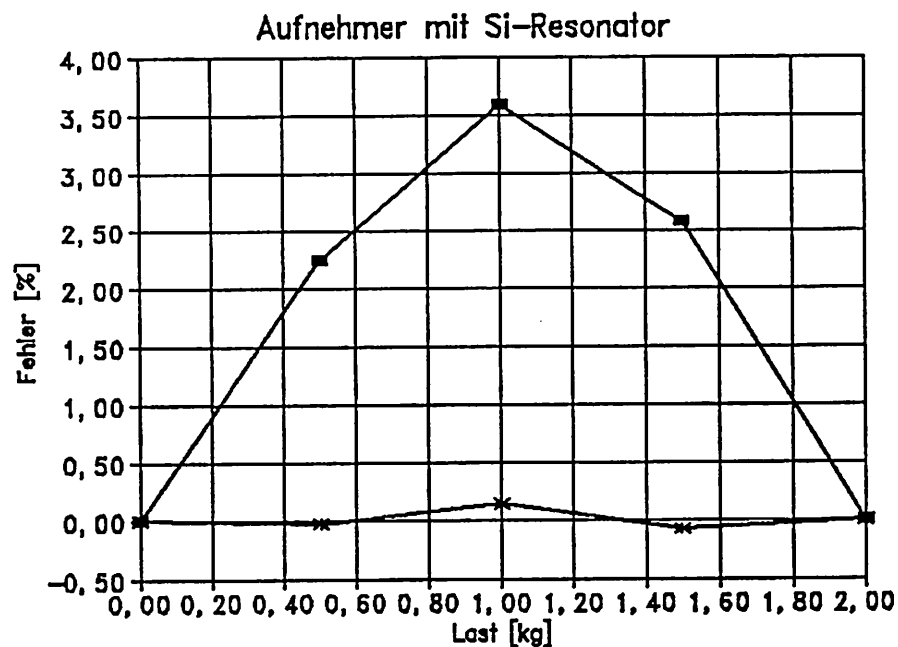


Bild 7.15: Fehlerkurve eines Kraftaufnehmers mit Si-Resonator, Rohdaten (oben), linearisierte Daten (unten).

Der Linearitätsfehler der Rohdaten entspricht etwa dem Wert, der mit Quarzresonatoraufnehmern gemessen wurde (siehe etwa Bild 7.4).

Zur Linearisierung wurde hier ein Polynom dritten Grades benutzt, der Restlinearitätsfehler liegt unter 0,25 %.

Die Messungen mit diesem Aufnehmer wurden bei drei Temperaturen ($T_1=20^\circ\text{C}$, $T_2=25^\circ\text{C}$, $T_3=30^\circ\text{C}$) wiederholt. Es zeigte sich, dass der Linearitätsfehler nicht von der Temperatur abhängig ist. Für den Nullpunkt (TK0) und die Empfindlichkeit (TKC) des Aufnehmers ergaben sich für die Temperaturintervalle T_1/T_2 und T_2/T_3 folgende Werte:

	Rohwerte		Lin. Werte	
	T_1/T_2	T_2/T_3	T_1/T_2	T_2/T_3
TK0 [%/°C]	11.65	-2.63	-----	-----
TKC [%/°C]	-3.19	0.85	0.03	0.03

Es ist auffallend, dass der Temperaturkoeffizient des Nullpunkts TK0 im Vergleich zu den mit vergleichbaren Quarzresonatoraufnehmern sehr gross und nichtlinear ist. Es konnte im Rahmen dieses Projekts nicht mehr untersucht werden, worin dieser Unterschied begründet ist. Die Werte des TK0 für die linearisierten Daten wurden wegen einer automatischen Nullung bei diesen Werten nicht ermittelt.

Der Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit ist hingegen mit $0.03\text{ \%/}^\circ\text{C}$ für einen Aufnehmer ohne Temperaturabgleich sehr gering.

Das zunächst sehr seltsam erscheinende Ergebnis, dass bei einem Aufnehmer, bei dem keine Temperaturkorrektur vorgenommen wurde, der Wert für den Temperaturkoeffizienten der Empfindlichkeit TKC bei den Rohdaten und den linearisierten Daten sehr stark unterschiedlich ist (siehe obige Tabelle) hat folgende Ursache.

Bedingt durch den Temperaturgang des Nullpunkts liegen bei verschiedenen Temperaturen die 'Arbeitsbereiche' (der Frequenzbereich, der für Änderungen zwischen Nullast und Vollast vom Aufnehmer durchfahren wird), an unterschiedlichen Stellen der gekrümmten Frequenz-Kraftkennlinie des Aufnehmers. Dadurch ist die Frequenzdifferenz für Vollast und Nullast unterschiedlich, d.h. man misst einen scheinbaren Temperaturkoeffizienten der Empfindlichkeit, der in Wirklichkeit die Auswirkung des Temperaturgangs des Nullpunkts an der gekrümmten Aufnehmerkennlinie ist.

Da die Linearisierung die Wirkung dieser Krümmung ausgleicht, verschwindet bei den linearisierten Daten dieser scheinbare TKC, was übrigbleibt, ist der tatsächliche Temperaturkoeffizient der Empfindlichkeit.

Daraus folgt, dass bei einem vollständig korrigierten System (linearisiert und temperaturkompensiert) die Linearisierung vor der Korrektur der Temperatureinflüsse erfolgen muss.

7.7 Andere Anwendungen

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens zeigten sich Möglichkeiten der Anwendung von Resonator-Sensorelementen, die mit der vorliegenden Aufgabenstellung nichts zu tun hatten. Diese Anwendungen beruhen auf Effekten, die für die vorliegende Aufgabenstellung eines Kraftaufnehmers sogar ausgesprochen störend sind.

Zwei solcher Anwendungen sind im folgenden kurz skizziert.

7.7.1 Temperaturlaufnehmer

Verbindet man ein Resonator-Sensorelement an seinen beiden Enden mechanisch mit einem zusammenhängenden Stück eines zweiten Werkstoffes, so treten, falls die Ausdehnungskoeffizienten α des Resonators und der Umgebung unterschiedlich sind, bei Variation der Temperatur erhebliche mechanische Spannungen am Resonator auf. Die auf Grund solcher Spannungen auftretenden Änderungen der Resonanzfrequenz können zur Messung der Temperatur verwendet werden.

Verwendet man etwa die Werkstoffkombination Quarz-Aluminium, so treten bereits bei kleinen Temperaturänderungen sehr grosse Frequenzänderungen auf, die für eine praktische Nutzung eher hinderlich wären.

Die Empfindlichkeit (relative Frequenzänderung pro Temperaturänderung) kann nun durch Anbringen einer Koppel, die als Zwischenschicht zwischen Resonator und umgebendem Werkstück realisiert werden kann, eingestellt werden. Das folgende Zahlenbeispiel soll dies aufzeigen.

Angenommen sei eine Sandwich-Struktur aus Resonator, Koppel und Substrat. Die materialspezifischen Parameter sind wie folgt angesetzt:

a. Substrat	α	: 22 ppm/°C
	E	: 70000 N/mm ²
	l	: 10 mm
	Q	: 20 mm ²
b. Koppel	α	: 22 ppm/°C
	k	: 10000 N/mm
	Q	: 5 mm ²
c. Resonator	α	: 13 ppm/°C
	E	: 87000 N/mm ²
	l	: 8 mm
	d	: 0.3 mm
	b	: 0.3 mm

Hierbei ist α der lineare Ausdehnungskoeffizient, E der E-Modul, l die Länge (in Schenkelrichtung des Resonators), d und b die Dicke bzw. Breite der Resonatorschenkel, Q der Querschnitt und k die Federsteifigkeit.

Bild 7.16 zeigt die für diese Materialparameter berechnete Frequenzänderung des Resonators als Funktion der Temperatur.

Zur Berechnung der Frequenzdaten wurden die Beziehungen aus [1] verwendet.

Man findet folgenden Zusammenhang für die Frequenzänderung über der Temperatur:

$$\frac{df}{dT} = \frac{l_1 \cdot \alpha_1 - l_2 \cdot \alpha_2 - l_3 \cdot \alpha_3}{\frac{l_1}{Q_1 \cdot E_1} + \frac{l_2}{Q_2 \cdot E_2} + \frac{l_3}{Q_3 \cdot E_3}} \quad (8)$$

Die Indizes beziehen sich auf die Materialparameter von Substrat, Koppel und Resonator.

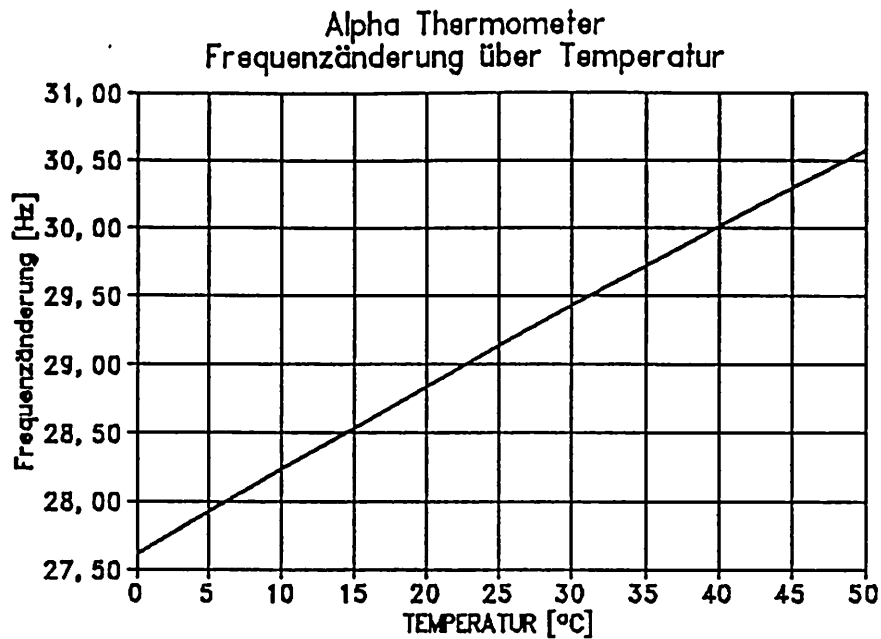


Bild 7.17: Frequenzänderung über Temperatur für einen Sandwich-Temperaturaufnehmer.

Die Materialparameter der Koppelschicht wurden in diesem Beispiel so gewählt, dass sich eine mittlere Empfindlichkeit bei einem Anwendungsbereich von ca. 50°C einstellt.

Die Empfindlichkeit beträgt etwa 60 Hz/°C, mit einem solchen Wert kann leicht eine Temperaturänderung von 0.001 °C aufgelöst werden.

7.7.2 Taupunktsensor

Ein Taupunktsensor ist ein Sensor zur Messung der Taupunkt-temperatur von Luft mit einem bestimmten Anteil an Wasserdampf. Durch Kenntnis dieses Werts ist es möglich, andere psychrometrische Größen wie relative Luftfeuchte und Wassergehalt zu berechnen.

Bekannte Taupunktsensoren arbeiten mit einem optischen Prinzip. Bei diesen Aufnehmern ist ein Spiegel auf einem Peltierelement angebracht, über dem Spiegel sitzt eine Reflexlichtschranke. Über einen Regler wird das Peltierelement an der Taupunkttemperatur gehalten, die Taupunkttemperatur wird erkannt durch wechselseitiges Betauen und Enttauen des Spiegels. Solche Elemente gestatten eine sehr genaue Bestimmung der Luftfeuchtigkeit, sie haben aber den Nachteil, dass die Funktion z.B durch Staubablagerungen gestört wird.

Sowohl die Resonanzfrequenz als auch die Dämpfung eines Resonators ändern sich erheblich, wenn das schwingende Teil des Resonators betaut.

Es ist also ein Taupunktsensor denkbar, der ähnlich aufgebaut ist wie der oben beschriebene optische Sensor, nur dass Spiegel und Lichtschranke durch einen Resonator ersetzt werden.

Beobachtungen an Saiten-Kraftaufnehmern haben gezeigt, dass schwingende Sensorelemente (wegen der ständigen Bewegung) sehr unempfindlich gegen Staub sind.

Es kann erwartet werden, dass ein Resonator-Taupunktsensor diesbezüglich die Nachteile des optischen Prinzips nicht aufweist.

7.8 Demonstrationswaage mit Si-Resonatoraufnehmer

Auf Basis der im Kapitel 7.6 beschriebenen Technik wurde ein Funktionsmodell einer Waage mit einem Si-Resonatoraufnehmer aufgebaut.

Basis war eine Krafteinleitung in Monoblock-Konstruktion mit einem Si-Resonator der Firma BOSCH. Die Krafteinleitung bestand aus einer Parallelführung mit integrierter Hebeluntersetzung im Verhältnis 7:1.

Zur Erregung des Resonators wurde eine von BOSCH entwickelte Oszillatorschaltung, die etwas modifiziert wurde, verwendet.

Die Messung der Periodendauer des Resonator-Ausgangssignals wurde mit Hilfe eines Einplatinencomputers realisiert; dieser Rechner ist mit dem Mikrocontroller MCS 8051 bestückt und ermöglicht durch Nutzung der im Controller integrierten Zähler die Periodendauermessung ohne zusätzlichen Hardwareaufwand.

Im Einplatinenrechner erfolgt die Signalaufbereitung, die Daten werden im Textformat über eine serielle Schnittstelle (RS232) an einen Arbeitsplatzrechner übergeben, der als Anzeige dient.

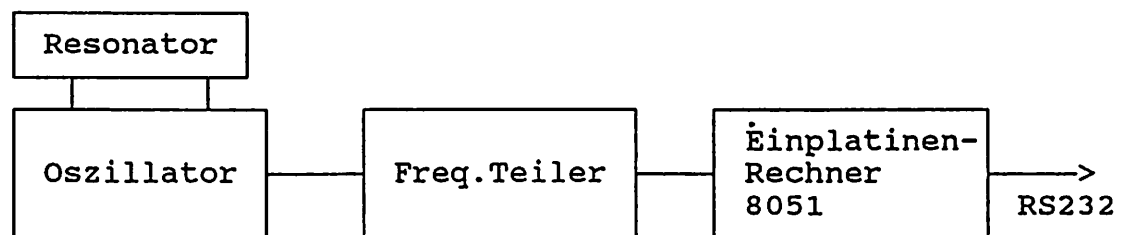


Bild 7.17: Prinzipanordnung des Aufnehmers der Demonstrationswaage.

Diese Anordnung hat folgende technische Daten:

- Nennlast	2 kg
- Auflösung	ca. 10000 digits
- Messzeit	100 msec
- Genauigkeit	ca. +/- 0.5%

Da es mit der verwendeten Elektronik nicht möglich war, einen Temperaturfühler einzulesen, konnte für die Waage keine automatische Korrektur von Temperatureinflüssen auf Nullpunkt und Empfindlichkeit durchgeführt werden.

Die angegebene Genauigkeit bezieht sich daher nur auf eine konstante Umgebungstemperatur.

7.9 Literaturverzeichnis

- [1] R.G. Kirman,
Vibrating Quartz Force Sensor,
Transducer Tempcon Conference Papers, 1983
- [2] K. Petersen,
Silicon as a mechanical material,
Proc. IEEE, 70, 5, 420, 1982
- [3] B. Brand,
Algorithmen zur praktischen Mathematik,
Oldenbourg Verlag 1981
- [4] H. Späth,
Spline-Algorithmen,
Oldenbourg Verlag 1986
- [5] T.E. Shoup,
Numerische Verfahren für Arbeitsplatzrechner
Hanser Verlag 1985
- [6] TURBO-PASCAL Toolbox Numerical Methods,
Borland International 1987
- [7] H. Götz, Einführung in die digitale
Signalverarbeitung,
Teubner Verlag 1990
- [8] S.D. Stearns, digitale Verarbeitung analoger
Signale,
Oldenbourg Verlag 1987.
- [9] AEG-Telefunken Systembeschreibung "LOGISTAT CP 550/
Software DOMAT",
AEG-TELEFUNKEN, Seligenstadt

- [10] BIZERBA-Bericht 1/1991 zum Verbundforschungsprojekt
 'Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
 frequenzanaloger Sensoren'

- [11] BIZERBA-Bericht 2/1991 zum Verbundforschungsprojekt
 'Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
 frequenzanaloger Sensoren'

- [12] BIZERBA-Bericht 1/1992 zum Verbundforschungsprojekt
 'Einsatz der Mikromechanik zur Herstellung
 frequenzanaloger Sensoren'

7.10 Anhang (Daten der verwendeten Resonatoren)

Technische Daten vom verwendeten Quarzresonator (ETA):

Gesamtlänge	: 15 mm.
Schwingbalkenlänge	: 5.17 mm.
Gesamtbreite	: 2.9 mm.
Dicke	: 0.2 mm.
Grundfrequenz	: 47 kHz.

Technische Daten der verwendeten Siliziumresonatoren (BOSCH):

Gesamtlänge	: 22 mm.
Schwingbalkenlänge	: 4 mm bis 10 mm.
Gesamtbreite	: 8 mm.
Dicke	: 0.5 mm.
Grundfrequenz	: 4 kHz bis 27 kHz.