

Die Entwicklung des revolutionären Smart Force Transducer (SFT)

Mitte der 1970er Jahre revolutionierte K-Tron die Schüttgüter-Dosierung mit der Einführung der ersten echten digitalen Wägezelle, die speziell für Wägeanwendungen in der Prozesstechnik entwickelt wurde. Auf dem innovativen Prinzip der schwingenden Saite basierend erwies sich die neue digitale Technologie bald als bedeutender Fortschritt gegenüber den damals weit verbreiteten analogen linear variablen Differentialtransformatoren (kurz LVDT) und Dehnmessstreifen.

Aufgrund der hohen Genauigkeit, der langfristigen Beständigkeit und der Betriebszuverlässigkeit hat die Schwingsaiten-Wägetechnologie in den der Einführung folgenden fast fünf Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen.

In diesem Dokument wird die Entwicklung der Schwingsaiten-Wägetechnologie aus anwendungstechnischer und wirtschaftlicher Sicht erläutert. Beschrieben werden spezielle Anwendungen mit dynamischem Wiegen und deren Herausforderungen. Ausserdem erfolgt ein Vergleich mit anderen ebenfalls verfügbaren Technologien.

Das Prinzip der schwingenden Saite

Seit langem ist die Abhängigkeit der Resonanzfrequenz eines Drahtes von der Drahtspannung bekannt. Mit der Einführung elektronischer Systeme wurde klar, dass eine schwingende Saite als variabler Oszillator oder Kraftsensor verwendet werden konnte. Heute werden schwingende Saiten in digitalen Hochleistungswaagen eingesetzt. In solch einem System bestimmt die zu messende Kraft direkt die Drahtspannung. Zur Ergebnisermittlung wird die Schwingungsfrequenz gemessen und ausgewertet.

Die Resonanzfrequenz einer idealen schwingenden Saite ergibt sich anhand folgender Gleichung:

$$f_0 = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

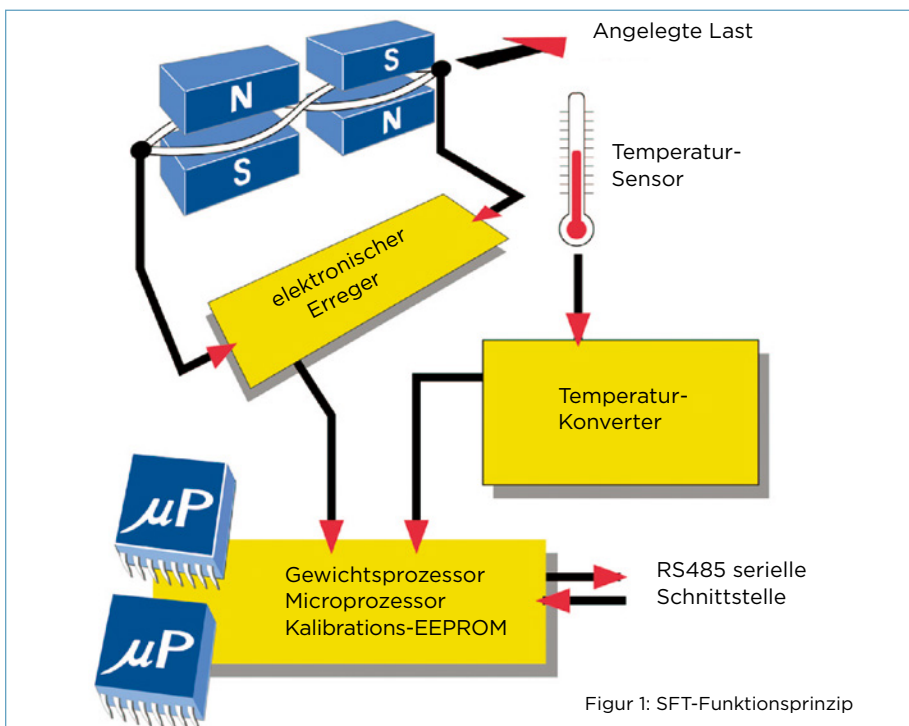
Dabei ist „n“ die Harmonische, „T“ die Drahtspannung, „l“ die Drahtlänge und „μ“ die lineare Dichte des Drahtes. Diese



Abhängigkeit gilt jedoch nur für einen reibungsfreien, unelastischen Draht bei einer konstanten Temperatur. Ein in der Praxis eingesetztes Schwingsaitensystem weist ein weitaus komplexeres Verhalten auf, da die schwingende Saite in der Längsrichtung elastisch, in der Querrichtung starr und an den Enden eingespannt ist. Sie erzeugt selbst bei Nullspannung eine Resonanzfrequenz. Temperaturänderungen wirken sich hauptsächlich aufgrund der Wärmeausdehnung, die zu einer Änderung der Drahtlänge führt, aber auch aufgrund des geänderten Elastizitätsmoduls des Materials auf die Resonanzfrequenz aus. Aufgrund dieser Probleme musste bei den ersten Systemen ein komplexer Bezugsmechanismus verwendet werden, um eine hohe Genauigkeit erreichen zu können. Glücklicherweise machen moderne Mikroprozessoren mathematische Linearisierungs- und Temperaturkompensations-Schemen praktisch und wirtschaftlich.

Die von Coperion K-Tron verwendeten Schwingsaiten zeichnen sich durch eine natürliche Resonanzfrequenz in der zweiten Harmonischen, die innerhalb des 12- bis 18-kHz-Bandes über dem Arbeitsspannungsbereich liegt, und einen hohen Q-Faktor über 3'000 aus. (Der Q-Faktor ist ein Mass für die Qualität einer bestimmten Resonanz. Er gibt die Anzahl der Schwingungen wieder, bis die Amplitude auf einen „geringen“ Wert abgefallen ist. Bei einem hohen Q-Faktor ist die Dämpfung gering und der Draht absorbiert unbedeutende Energiemengen, wenn die Antriebskraft der Resonanzfrequenz sehr nah ist.)

Die Drähte sind aus Berylliumkupfer. Dieses ist nicht magnetisch, stellt aber einen



Figur 1: SFT-Funktionsprinzip

guten elektrischen Leiter dar und zeichnet sich durch eine gute Wärmebeständigkeit aus. Wie in Figur 1 zu sehen ist, schwingt der Draht in einem Magnetfeld, das durch Dauermagneten erzeugt wird. Der Draht ist ausserdem mit einem elektronischen Verstärkerkreis verbunden, der Strom durch den Draht leitet und damit den Draht in Schwingung setzt. Die Drahtschwingung im Magnetfeld erzeugt gleichzeitig ein Millivolt-Signal, das an den Differentialeingang des Verstärkers zurückgeleitet wird, um die Schwingung zu erzeugen. Dieser sinusförmige Erregerkreis enthält eine automatische Verstärkungsregelung, um die Drahtschwingung auf einen zulässigen Pegel zu beschränken. Anschliessend gibt eine Präzisionsvergleichsschaltung Rechteckwellen aus, die an das Wägesystem übertragen werden. Anzumerken ist, dass sehr wenig Energie für die kontinuierliche Schwingung des Drahtes erforderlich ist. Grund dafür ist der hohe Q-Faktor des Drahtes. Aus demselben Grund ist der Erregerkreis äusserst unempfindlich gegenüber Schwankungen der Betriebsspannung und der Parameter der Schaltungskomponenten sowie gegenüber mechanischen oder akustischen Störungen des Drahtes.

Obwohl der für die schwingende Saite angegebene hohe Q-Faktor verhindert, dass Störungen zu Frequenzabweichungen führen, wird dadurch nicht sichergestellt, dass der Draht nicht in anderen harmonischen Oberwellen oder in einer anderen Ebene schwingt. Diesen potenziellen Problemen wird vorgebeugt, indem die Magnetpole entlang des Drahtes positioniert werden und ein Draht mit rechteckigem Querschnitt verwendet wird. Der Draht wird gegen die Auswirkungen parasitärer Resonanzen an anderen Stellen im System abgeschirmt. Dazu werden die Endmassen auf hochfeinen mechanischen Filtern angebracht. Aufgrund der extrem niedrigen Krümmung des Drahtes (0.001 mm) ist die Ermüdungsfestigkeit im Wesentlichen unbeschränkt. Trotz der geringen Krümmung sorgt die hohe Beschleunigung, die auf der hohen Schwingungsfrequenz basiert, dafür, dass sich auf dem Draht keine Fremdpartikel absetzen können.

Der grösste Vorteil der Schwingensaite gegenüber einem Dehnmessstreifen ist die Tatsache, dass obwohl sich beide Systeme bei Volllast typischerweise um 0.1% dehnen, sich die Dehnung direkt auf den Dehnmessstreifen auswirkt, jedoch für die Frequenz der Schwingensaite unbedeutend ist. Folglich wirkt sich die Dehnung, die sich im Laufe der Zeit durch metallisches Kriechen einstellt, direkt auf das Messergebnis eines Dehnmessstreifens aus. Bei einer schwingenden Saite ist sie jedoch nicht sichtbar. Das bei einem Schwingsaiten-Messzellensystem charakteristische Kriechen stammt praktischerweise von anderen Elementen

im Kraftmessweg. Da keine nicht-metallischen Bindemittel verwendet werden, ist das System unempfindlich gegenüber der Luftfeuchtigkeit. Ausserdem werden Probleme der Langzeitstabilität, die durch den Verschleiss dieser Materialien verursacht werden, vermieden.

Schwingsaiten-Messzellen geben eine Dualfrequenz aus. Damit wird Problemen vorgebeugt, die im Zusammenhang mit der Übertragung, Verstärkung und digitalen Wandlung analoger Kleinsignale entstehen können. Bei einem Dehnmessstreifen ist die Messauflösung theoretisch unendlich. Praktisch ist sie jedoch durch die Analog-Digital-Wandlung beschränkt. Bei einer schwingenden Saite erfolgt keine A/D-Wandlung, so dass die Auflösung eher proportional zur Wandlungszeit steigt. Je länger die Zählung, desto besser die Auflösung. Lange Wandlungszeiten sind für die Echtzeit-Regelung nicht praktikabel. Daher wird die Periodenmessung verwendet. Die Messung einer einzelnen Periode mit hoher Präzision wäre mit hohen Kosten verbunden. Deshalb wurden mehrere Techniken entwickelt, um die Zeit zur Zählung einer ganzzahligen Anzahl von Perioden genau zu messen.

Ein zusätzlicher und wichtiger Vorteil von Schwingsaiten-Messzellen in der Praxis, der hier besprochen wird, besteht darin, dass während der Betriebslebensdauer keine Nachkalibrierung erforderlich ist.

Chronologie der Technologie

Generation 1: 1976

Digital Mass Transducer MK-I

- Erster echter digitaler Gewichtssensor der Industrie
- Keine Nachkalibrierung erforderlich



Der Digital Mass Transducer (DMT) von K-Tron war die erste kommerzielle Wägezelle mit schwingender Saite in der Prozesstechnik. Der DMT unterscheidet sich von nahezu allen anderen Wägezellen, da mit ihm die Masse und nicht die Kraft gemessen wird. Dies ist möglich, da das Verhältnis zwischen der Gewichtskraft der unbekannten Masse und der Gewichtskraft einer internen Bezugsmasse der Messzelle gemessen wird. Daher sind mit der Mes-

szelle genaue Messungen bei fehlender Nivellierung oder Abweichungen der Schwerebeschleunigung aufgrund der geografischen Position oder anlagenbedingter Schwingungen möglich. Obwohl sich diese Bedingungen auf die durch die Messzelle ermittelte Gewichtskraft auswirken, bleibt das Verhältnis gleich, da die Gewichtskraft der internen Bezugsmasse in gleichem Masse beeinflusst wird.

Das DMT-System lässt sich am besten anhand einer einfachen Darstellung erklären (siehe Figur 2). Die Frequenz jeder schwingenden Saite wird durch die eigene Spannung in Übereinstimmung mit der nicht-linearen Abhängigkeit in Gleichung 1 des vorherigen Abschnitts bestimmt. Die Drahtspannungen werden sowohl durch die Gewichtskraft P der Bezugsmasse p als auch durch die Gewichtskraft X der unbekannten Masse x beeinflusst, jedoch nicht in derselben Art und Weise. Aufgrund der Winkelabhängigkeit der Elemente werden beide Drähte durch die Kraft P mit derselben Vorlast belastet. Eine Erhöhung der Kraft X führt jedoch zu einem Anstieg der Spannung des Drahtes 1 und einer weitaus geringeren Senkung der Spannung des Drahtes 2. Bei Auswahl der relativen Grössenordnungen der beteiligten Kräfte und der richtigen Winkel ist die Abhängigkeit zwischen dem Frequenzverhältnis f_1/f_2 und dem Kraftverhältnis X/P über Grossteile der Kurve hinweg nahezu linear.

Zum Zeitpunkt der Entwicklung des DMT zu Beginn der 1970er Jahre war dies ausserordentlich wichtig, da die Linearisierung in elektronischer Hardware und Software aus wirtschaftlicher Sicht nicht anwendbar war. Bei der Einführung des Systems wurde die Masse in Kilogramm aus den Ergebnissen der Messzelle anhand folgender Gleichung berechnet:

$$m = \frac{256 f_1}{f_2} - 260$$

Dabei ist „m“ die Masse und „f1“ und „f2“ sind die Frequenzen der Drähte 1 bzw. 2. Der einfache Aufbau der Gleichung ermöglichte die Berechnung in der CMOS-Digital-Logik. Um kürzere Gewichtswandlungszeiten und eine hohe Genauigkeit zu gewährleisten, wurde die Frequenz f1 mithilfe einer PLL-Multiplizierschaltung mit 256 multipliziert. Die resultierende hohe Frequenz wurde dann zur Messung einer ganzzahligen Anzahl von Perioden der Frequenz f2 verwendet.

Mit den damals verfügbaren Techniken konnte der DMT eine Auflösung von bis zu 1:192'000 in 2.5 Sekunden erreichen. Da der DMT nur für einen Lastbereich von 6 kg ausgelegt war, musste die Messzelle bei höheren Lasten in einen konventionellen Hebelwaagenmechanismus eingebaut werden. Selbst bei Lasten von 6 kg oder

weniger erforderte der DMT ein Schutzgehäuse, da er nicht gekapselt war. Als Datenschnittstelle wurde für den DMT eine 4-Draht-Schnittstelle mit einem Drahtpaar pro Frequenz verwendet. Jede Frequenz wurde über einen frequenzmodulierten Strom übertragen. Die Stromquelle des Regelsystems lieferte den Strom für die Messzelle und ermöglichte den Einsatz langer Kabel ohne Spannungsabfall. Aufgrund der hohen Kosten und der Komplexität der Datenschnittstelle und der Elektronik des Wägesystems konnte nur ein DMT mit dem Regelsystem verbunden werden.

Der DMT war eine technisch ausgereifte elektromechanische Messzelle. Sein aus maschinell bearbeitetem Gussmessing bestehendes Gehäuse beherbergte nahezu 100 Präzisionskomponenten. Die Verhältnismessung reduzierte die Temperatur- und Schwingungsauswirkungen. Nach der Montage des Systems waren jedoch zwölf einzelne manuelle Anpassungen erforderlich, um Fertigungstoleranzen, Abweichungen in den Materialeigenschaften und Temperatureauswirkungen auszugleichen. Leistung und Zuverlässigkeit des DMT waren ausgezeichnet, die Herstellung aber schwierig und kostspielig.

Generation 2: 1980

The Digital Mass Transducer MK-II

- Auflösung von 1:1'000'000 in 1.3 Sekunden
- Echtzeit-Linearisierung



Zum Zeitpunkt der Entwicklung des DMT steckten Mikroprozessoren noch in den Kinderschuhen und waren extrem teuer. Als die Kosten sanken, boten Mikroprozessoren die Möglichkeit, die Fertigungskosten zu reduzieren und die Leistung des DMT zu steigern. Die Nicht-Linearität des DMT war hauptsächlich auf die Temperatureauswirkungen auf das Gehäuse und die internen Komponenten zurückzuführen. Mit dem Mikroprozessor konnten die für die Echtzeit-Linearisierung des Gewichtssignals erforderlichen mathematischen Vorgänge ausgeführt werden.

An dem DMT wurden mehrere Änderungen vorgenommen, die schliesslich zum DMT MK-II führten. Zunächst wurden für das Gehäuse und mehrere andere Komponenten anstelle des maschinell bearbeiteten Messings Spritzgussteile aus

Zinklegierungen verwendet. Des Weiteren wurde in das Gehäuse ein Temperaturfühler eingebaut, um die Temperatur in Echtzeit zu überwachen. Und schliesslich wurde die Datenschnittstelle mit 5V-TTL-Pegeln ausgestattet, um die Kosten für den Anschluss an die digitale Elektronik zu senken. Die Wägezelle lieferte nun als Ergebnis die beiden Gewichtsfrequenzen (f_1 und f_2) sowie eine neue Temperaturfrequenz (f_t). Viele der manuellen Anpassungen wurden durch den Einsatz einer automatischen Temperaturkammer, in der das System zur Korrektur von Gewichts- und Temperaturfehlern linearisiert wurde, hinlänglich. Die resultierenden Koeffizienten wurden an ein zusammen mit der Wägezelle verwendetes EPROM geschrieben.

Auf Seite des Regelsystems wurde neben dem Mikroprozessor eine spezielle integrierte Schaltung entwickelt, um die drei Frequenzen effizienter und mit einer höheren Auflösung zu verarbeiten. Mit dem im Regelsystem installierten EPROM konnte der DMT MK-II eine Gewichtsauflösung von 1 ppm in 1.3 Sekunden erreichen. Bei niedrigeren Auflösungen war die Abtastzeit proportional kürzer. Die Abtasttechnik glich der des DMT. Die spezielle integrierte Schaltung konnte jedoch höhere Frequenzen verarbeiten und verfügte über grössere Erfassungsregister für die Zählungen.

Generation 3: 1986

The Digital Force Transducer

- Einführung der Einzel-Schwingsaiten-Version
- Auflösung von 1:1'000'000 in 0.125 Sekunden



Die Notwendigkeit, die Kosten weiter zu senken, und die Erfahrung mit den Linearisierungstechniken des DMT MK-II resultierten in der Erkenntnis, dass eine ähnliche Genauigkeit anhand einer Messzelle mit nur einer Schwingsaiten erzielt werden konnte. Der Digital Force Transducer (DFT) mit nur einem Draht und keiner Bezugsmasse war keine echte Messzelle für Gewichtsmessungen. Mit verbesserten Fertigungsverfahren, einer geringeren Anzahl von Teilen, die mögliche Fehlerquellen darstellten, und verfeinerten Linearisierungsalgorithmen konnte der DFT jedoch eine Auflösung von 1 ppm in 125 ms erreichen. Dies wurde erreicht, indem eine ganzzahlige Anzahl von Perioden der Gewichtsfrequenz mithilfe eines 8-MHz-Quarzoszillators als Zeitbasis gemessen wurde. Die Datenschnittstelle

wurde auf zwei Frequenzen vereinfacht, einer Gewichtsfrequenz f_w und einer Temperaturfrequenz f_t .

Ohne interne Bezugsmasse konnte der DFT externe anlagenbedingte Schwingungen nicht selbst filtern. Dank schnellerer Abtastzeiten wurde diese Aufgabe jedoch von dem Regelsystem des Dosierers übernommen. In der Praxis war der DMT in der Schwingungskompensation nur effektiv, wenn die Bezugsmasse und die externe Last denselben Dämpfungsfaktor aufwiesen. Für den DFT war immer noch eine integrierte Speicherschaltung mit Linearisierungs- und Temperaturkompensationsdaten erforderlich. Wie beim DMT MK-II war der Chip eine separate im Regelsystem installierte Komponente. Die integrierte Schaltung konnte leicht verloren gehen oder fälschlicherweise für eine andere Messzelle eingebaut werden. Der DFT war ein Ersatz für die DMT-Messzelle und erforderte weiterhin ein Schutzgehäuse oder eine Hebelwaage für Lasten über 6 kg.

Generation 4: 1988

The Smart Force Transducer I

- Eigenständiges Gerät in RS-485 Netzwerk
- Integrierte Elektronik



Es wurden mehrere Versuche unternommen, den Waagenmechanismus zu umgehen. Bei kleineren Dosiersystemen stellte die Anbringung einer Differential-Dosierwaage und eines Vorratsbehälters auf einer Waage kein Problem dar. Bei grösseren Dosiersystemen wurde das System dadurch jedoch kopflastig. Dies führte zu ernsthaften Stabilitätsproblemen. Beim Auffüllen des Dosiersystems mit Material würde das System jedes Mal wie ein umgekehrtes Pendel nach hinten und vorne schwingen. Neben der dadurch auf den Waagenmechanismus aufgetragenen Belastung war das Gewichtssignal zur Regelung des Dosiersystems während dieser Zeit nicht brauchbar. Die Lösung bestand darin, den Dosierer und den Vorratsbehälter mit einer für Dehnmessstreifen typischen Dreipunkt-Aufhängung zu versehen. Da die DFTs nicht wie Dehnmessstreifen parallel geschaltet werden konnten, musste eine noch flexiblere Lösung entwickelt werden.

Der Smart Force Transducer I (SFT-I) wurde als vernetztes eigenständiges Wäegerät entwickelt. Jede Wägezelle verfügte über einen eigenen Mikrocontroller, einen

eigenen speziellen Frequenzprozessor, einen eigenen Kalibrierungsspeicher und einen eigenen Spannungsregler. Als Datenschnittstelle wurde eine serielle RS-485 Schnittstelle gewählt, die 32 Geräte im Netzwerk mit einer Übertragungsgeschwindigkeit von bis zu 1 Megabit pro Sekunde und Abständen von bis zu 600 Metern unterstützen konnte. Und da die Kalibrierungskonstanten mithilfe eines nichtflüchtigen Speichers in das Gerät eingebaut waren, konnten sie nicht länger verwechselt werden. Die verschiedenen SFT-Modelle waren wasser- und staubdicht, so dass ein externer Schutz überflüssig wurde. Weitere mechanische Verbesserungen wurden durch die Integration der Halterung für die schwingende Saite und des erforderlichen Kraftreduzierungsmechanismus in eine einzelne Baugruppe erzielt, die auf einem dünnen Rahmen aus geätztem Berylliumkupfer basierte.

Die Fähigkeit, mehrere Wägezellen auf einem Draht zu vernetzen, eröffnete zahlreiche interessante Möglichkeiten. Die Aufhängung eines Dosiersystems an drei oder mehreren Wägezellen war nun kein Problem mehr. Tatsächlich müssen mehrere SFTs auf einem Kabel nicht als einzelnes Wägesystem behandelt werden. Die Zusammenfassung einiger oder aller Gewichte erfolgt nach Ermessen des Regelsystems, das mit den Wägezellen kommuniziert. Dadurch wird das Problem bei gravimetrischen Durchflussmessern und Dosierbanddoppelwaagen gelöst, bei denen zum Beispiel alle Gewichte einzeln verarbeitet werden müssen. Weiterhin müssen die Wägezellen, die miteinander vernetzt sind, nicht über die gleiche Wägekapazität verfügen, um korrekt zusammengefasst zu werden. Bei einem kostengünstigen Differential-Dosierwaagensystem kann ein 68000 Mikroprozessor, der vier Kopien des Algorithmus ausführt, vier Motorantriebe regeln und mit zwölf SFTs auf vier verschiedenen Dosiersystemen kommunizieren. Alle Dosier- und Wägesysteme arbeiten vollkommen unabhängig voneinander.

Natürlich ist eine Echtzeit-Regelung nur möglich, wenn der Zeitpunkt bestimmter Ereignisse genau bekannt ist. Da die Waage nun ein eigenständiges Gerät ist, kann die Regeleinheit nicht genau kontrollieren, zu welchem Zeitpunkt das Gewicht gemessen wird. Dies erfordert die Verwendung von Daten, die mit einem Zeitstempel versehen sind. Alle Gewichtsdaten werden mit einem präzisen Zeitstempel des SFT übertragen. Bei Systemen, in denen das Wägesystem aus zwei oder mehreren SFTs besteht, ist eine Synchronisierung erforderlich, um Aliasing zu vermeiden. Um sicherzustellen, dass der Zeitfehler zwischen den SFTs weitaus geringer als eine Millisekunde ist, wird ein neues Synchronisierungsschema eingeführt.

Generation 5: 1998

Smart Force Transducer II/III

- Auflösung von bis zu 1:4'000'000 in 80 ms
- Fortschrittliches digitales Filtersystem



Die Verbesserungen an der nächsten generation des Smart Force Transducer waren das Ergebnis einer speziellen integrierten Schaltung, mit der eine kontinuierliche Messung und digitale Filterung zu noch höheren Abtastraten möglich wurden. Zuvor gab es zwischen der Erfassung der Drahtfrequenz, der Verarbeitung des Gewichts und dem Neustart der Frequenzfassung kurze Pausen. Das neue System konnte eine ganzzahlige Anzahl von Perioden der Gewichtsfrequenz mit einer Bezugsfrequenz von 30 MHz erfassen, ohne dabei auch nur einen Impuls auszulassen. Das Ergebnis war eine perfekt kontinuierliche Messung. Im Gegensatz zu einem Periodenmesssystem gingen hier keine Gewichtsdaten verloren. Das Gewicht wurde intern in der Wägezelle erfasst, linearisiert und 112 Mal pro Sekunde temperaturkompensiert und an ein digitales Tiefpassfilter weitergegeben. Der Filter verfügte über eine auswählbare Grenzfrequenz und das Regelsystem konnte alle 80 bis 4'500 ms ein Gewichtssignal anfordern, um die Auswirkungen von anlagenbedingten Schwingungen zu reduzieren.

Bei dieser Generation waren Auflösungen von bis zu 1:4'000'000 möglich.

Diese Verbesserungen wurden sowohl im SFT II als auch im SFT III umgesetzt. Im Gegensatz zum SFT II, bei dem die gemessene Last am Mittelpunkt des Sensors wie bei Differential-Dosierwaagen mit mehreren Punkten aufgebracht wird, wurde der SFT III speziell für Einzelpunktanwendungen zum Einsatz in freitragenden oder Plattformwaagen entwickelt, bei denen die Last nicht-axial aufgebracht werden kann, wie z. B. in zentral angebrachten Differential-Dosierwaagen für Kunststoffextrusions- oder Mischvorgänge, Dosierbandwaagen oder gravimetrischen Durchflussmessern.

Generation 6: 2019-heute

Smart Force Transducer II/III

- Auflösung von bis zu 1:8,000,000 in 20 ms
- Neue, fortschrittliche Mikrocontroller

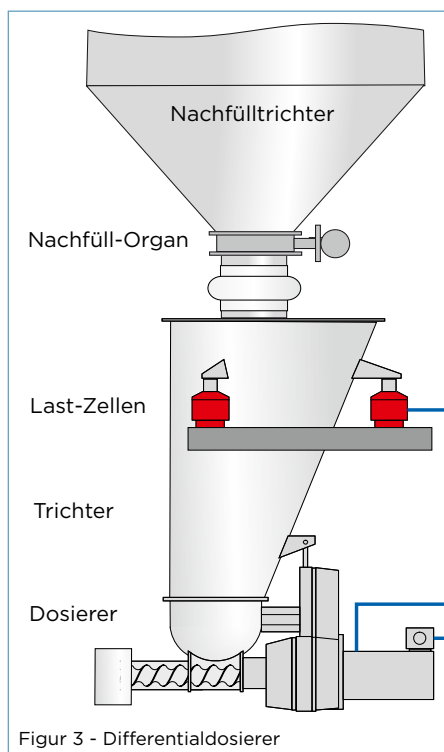


Die sechste Generation der Smart Force Transducer Lastzellen sieht zwar äusserlich gleich aus, verfügt jedoch über eine neue elektrische Hardware und eine neue Software im Inneren. Zu den Änderungen an der Hardware gehören zwei komplett neue Leiterplatten. Die neue Erregerplatine des SFT der sechsten Generation beinhaltet eine Verbesserung der Temperaturkompensation der Stromzufuhr zum schwingenden Draht, um einen konstanten Strom über den gesamten spezifizierten Temperaturbereich zu gewährleisten. Dies führt zu einer verbesserten Gewichtsmessung über den gesamten Temperaturbereich.

Eine weitere Änderung an der Erregerplatine betrifft die Messung und Meldung der elektromagnetischen Kraft (EMK) des schwingenden Drahtes. Die EMK des schwingenden Drahtes im SFT ist ein Mass für die Signalqualität. Um die EMK zu melden, wurde eine zusätzliche Verbindung zwischen der Erreger- und der CPU-Platine hergestellt.

Die grössten Änderungen wurden an der CPU-Platine vorgenommen und werden durch den neuen Mikrocontroller der EFM-Serie von Silicon Labs hervorgehoben. Mit dem neuen Mikrocontroller konnten wir die Abtastrate des schwingenden Drahtes von 112,5 Abtastungen pro Sekunde (SPS) auf 450 SPS erhöhen. Die schnellere Abtastrate bei der Messung der Schwingungen des vibrierenden Drahtes verringert die Gewichtsverlagerung bei Vibrationen um etwa den Faktor fünf. Dies ist nicht zu verwechseln mit der Abtastzeit der KCM-Steuerung, die im Bereich von 160 ms/Aktualisierung liegen kann.

Ausserdem haben wir für die Linearisierung, die Temperaturkompensation und die digitalen Filterfunktionen nicht mehr die IEEE-Fließkomma-Mathematik verwendet, die bis auf etwa 7,5 Stellen genau war, sondern eine 64-Bit-Festkomma-Mathematikbibliothek mit deutlich verbesserter Auflösung. Tests haben gezeigt, dass diese neue Mathematik bis auf etwa 10 ppb (Teile pro Milliarde) stabil ist. Das bedeutet nicht, dass der SFT eine Auflösung von PPB hat, aber die Mathematik setzt ihm keine Grenzen mehr.



Figur 3 - Differentialdosierer

Der neue, schnellere Mikrocontroller ermöglicht auch eine bessere Synchronisierung zwischen den SFTs. Dies ist eine erhebliche Verbesserung für Feeder, die an mehreren SFTs aufgehängt sind. Das CPU-Board enthält jetzt zuverlässigere RS485-Treiberchips, die bis zu 60 Volt tolerant sind. Die neue CPU-Platine enthält ausserdem einen Beschleunigungssensor zur Messung der Umgebungsvibrationen der Wägezelle sowie zur Messung und Aufzeichnung von Kraftspitzen, wie z. B. Stössen durch Aufprall. Alle SFT-Wägezellen sowie die Plattformwaagen sind jetzt mit dieser neuen Hard- und Software ausgestattet, so dass die Wägesysteme von Coperion K-Tron genauer und zuverlässiger sind als je zuvor.

Anwendung bei Dosierwaagen

Der Grossteil kontinuierlicher gravimetrischer Dosiergeräte, die heute eingesetzt werden, kann in zwei Kategorien unterteilt werden: Differential-Dosierwaagen und Dosierbandwaagen. Ein drittes Gerät, das ebenfalls zur Regelung von kontinuierlichen Dosierwaagen eingesetzt wird, ist ein gravimetrischer Durchflussmesser. Der Durchflussmesser misst den gravimetrischen Materialstrom. Das Ausgabesignal wird dann in der Regel über einen PID-regler verarbeitet, dessen Ausgabe ein Materialdosiergerät antreibt. Die Funktionsweisen dieser Geräte sind unterschiedlich und stellen daher verschiedene Anforderungen an das Wägesystem.

Um die Anforderungen an die in diesem

Dokument beschriebenen Wägesysteme zu veranschaulichen, ist es hilfreich, sich mit den Funktionsweisen der Dosiergeräte vertraut zu machen. Im Folgenden finden Sie eine kurze Beschreibung dieser Funktionsweisen und der unterschiedlichen Anforderungen an das Wägesystem.

Differential-Dosierwaagen

Vorratsbehälter und das Schüttgut kontinuierlich gewogen. Geregelt wird die Geschwindigkeit des Schüttgut-Austrags, um die vorgegebene Dosierleistung einzuhalten. Das System unterliegt einem kontinuierlichen Gewichtsverlust. Gestartet wird mit einem vollen Vorratsbehälter und Dosiermechanismus auf der Waage. Anschliessend gibt das Dosiersystem Material ab, das dann aus der Waage fällt. Das Regelsystem überwacht das Gewicht auf der Waage und passt die Abgabe des Dosiergeräts an, so dass der Gewichtsverlust pro Zeiteinheit mit dem Sollwert für die Dosierleistung übereinstimmt. Die zur Bestimmung der Durchflussrate bei einer Differential-Dosierwaage verwendete Gleichung lautet wie folgt:

$$\dot{m} = \frac{\Delta w}{\Delta t \times g}$$

Dabei ist „w“ das Materialgewicht, „t“ die Zeit und „g“ die Schwerkraftkonstante. Wenn das Gewicht auf der Waage auf ein vordefiniertes Mindestniveau sinkt, fordert das Regelsystem die Auffüllung des Vorratsbehälters mit Material an. Während der Auffüllung gibt das Dosiersystem weiter Schüttgut ab, während in den Vorratsbehälter automatisch oder manuell Schüttgut bis zu einer vordefinierten Gewichtshöchstgrenze gefüllt wird. Natürlich kann das Regelsystem während der Auffüllung nicht allein anhand des Gewichtssignals die Rate bestimmen, mit der das Dosiersystem Schüttgut abgibt. Daher werden andere Verfahren angewendet, um in dieser Zeit eine genaue Dosierung sicherzustellen.

Betrachten wir nun einige spezielle Wägeaspekte bezüglich der Differential-Dosierung. Ob bei mehreren Wägezellen, die das Dosiersystem unterstützen, oder bei einer einzelnen Plattformwaage – die Differential-Dosierwaage gibt immer nur ein Gewichtssignal aus. Gibt es mehrere Wägezellen, müssen die Signale zu einem einzelnen Gewicht zusammengefasst werden. Diese Zusammenfassung kann mit den meisten Arten von Wägezellen einfach durchgeführt werden.

Das Gewichtssignal der Differential-Dosierwaage deckt nahezu den gesamten Wägebereich der Wägezelle ab, da das Dosiergerät von

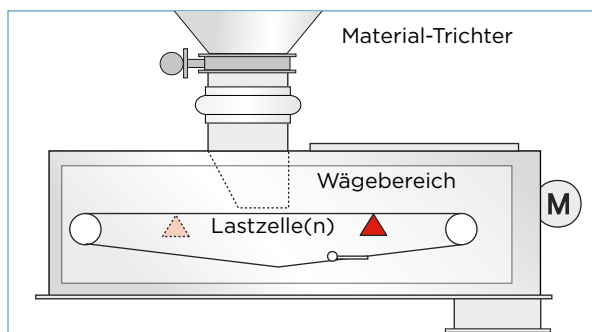
der vollen Befüllung bis zum Auffüllpunkt Schüttgut abgibt. Daher ist die Linearität der Wägezelle sehr wichtig. Die Linearität bezieht sich auf die Qualität, mit der über die gesamte Wägekapazität der Waage eine einheitliche Sensitivität erzielt wird. Linearitätsfehler im Wägesystem werden direkt in einen Dosierfehler der Differential-Dosierwaage umgesetzt.

Die Auflösung des Wägesystems kann bei der Differential-Dosierwaage äusserst wichtig sein, wenn der Sollwert für den Durchfluss im Vergleich zum Wägebereich der Wägezelle gering ist. Wenn die Differential-Dosierwaage bei vollständiger Schüttgutbefüllung zum Beispiel 80 kg wiegt, kann der Bereich des Wägesystems 150 kg betragen. Wenn der Sollwert für den Durchfluss dieser Dosierwaage gering ist, z. B. 2,0 kg pro Stunde, wird die Auflösung des Systems sehr bedeutend. In diesem Fall liegt der Sollwert nur bei 0,022 % des Gesamtbereichs pro Minute oder 0,00037 % des Gesamtbereichs pro Sekunde. Die Auflösung kann auch in ppm (parts per million) ausgedrückt werden. Die Wägezelle mit schwingender Saite hat in der Regel eine Auflösung von 8'000'000 gültigen Zählungen über den Wägebereich. Wenn wir nun mit dem gleichen Beispiel fortfahren, liegt der Sollwert bei 1778 ppm pro Minute oder 30 ppm pro Sekunde.

Temperaturdrift und Kriechen sind bei Differential-Dosierwaagen von geringerer Bedeutung, da das gravimetrische Regelsystem der Differential-Dosierwaage Moment-zu-Moment-Änderungen des Gewichts verwendet, anstelle das aktuelle Gewicht mit einem gespeicherten Bezugswert, wie z. B. dem Tara, zu vergleichen.

Dosierbandwaagen

Eine Dosierbandwaage ist in der Regel ein relativ kurzes Förderband, wobei ein Teil des Bandes durch eine Wägebrücke unterstützt und von einem Regelmotor angetrieben wird. Während das Schüttgut über die Wägebrücke transportiert wird, wird für diesen Teil des Bandes ein Gewicht pro Längeneinheit bestimmt. Die Geschwindigkeit des Bandes wird fortlaufend angepasst, so dass das Material, das



Figur 4 - Bandwaage

am Ende des Förderbandes vom Band fällt, mit der gewünschten Rate gefördert wird. Das Gewicht pro Längeneinheit wird oft als Bandlast bezeichnet und ist eine Funktion der Dosierbandwaagenkonstruktion. Die zur Bestimmung der Durchflussrate bei einer Dosierbandwaage verwendete Gleichung lautet wie folgt:

$$\dot{m} = \frac{w}{l \times g} \times s$$

Dabei ist „w“ das Materialgewicht, „l“ die Länge des gewogenen Bereichs, „s“ die Bandgeschwindigkeit und „g“ die Schwerkraftkonstante. In den meisten Fällen tritt das Schüttgut in die Dosierwaage über einen Vorratsbehälter ein, der oberhalb der Dosierwaage angebracht ist. Das Förderband zieht das Material aus dem Vorratsbehälter durch eine Öffnung, so dass das Schüttgut mehr oder weniger konstant auf das Band fällt.

Die an das Wägesystem durch die Dosierbandwaage gestellten Anforderungen stehen nahezu im Gegensatz zu denen, die durch die Differential-Dosierwaage an das System gestellt werden. Im Gegensatz zum Differential-Dosierwaagensystem überschreitet das Gewichtssignal bei der Dosierbandwaage kaum den Wägebereich der Wägezelle. Eine Dosierbandwaage gibt ein Gewichtssignal aus, das sich kaum verändert, wenn das Schüttgut kontinuierlich auf das Band fällt. Das gravimetrische Regelsystem der Dosierbandwaage vergleicht das aktuelle Gewicht kontinuierlich mit einem gespeicherten Tara-Wert des leeren Bandes. Die Dosierbandwaage reagiert

extrem empfindlich auf Drift und Kriechen. Daher führen Änderungen am Band selbst, wie z. B. Materialstau oder Streckung, zu einem geänderten Gewicht des leeren Bandes. Für Betreiber von Dosierbandwaagen sind häufige Unterbrechungen der Produktion und Neukalibrierungen des Taras oft nicht akzeptabel. Daher ist ein stabiles Wägesystem extrem wichtig. Hinsichtlich der im System verwendeten Technologie werden Dosierbandwaagen oft geringer eingestuft als Differential-Dosierwaagen. Die Wäganforderungen sind in der Regel jedoch höher.

Eine einzigartige Lösung für das Problem der Empfindlichkeit gegenüber Drift, Kriechen oder Änderungen des Bandgewichts besteht darin, eine zweite Wägestation hinzuzufügen, mit der das Band vor der Schüttgut-Zugabe gewogen wird. Damit kann das leere Band kontinuierlich neu tarieren werden. Ausserdem wird dem Problem von Materialstau auf dem Band, wodurch Dosierfehler hervorgerufen werden, vorgebeugt. Solange Drift oder Kriechen in der gleichen Richtung auf beiden Wägesystemen auftritt, werden damit ausserdem die durch diese Probleme verursachten Dosierfehler reduziert. Durch das Hinzufügen einer zweiten Wägestation müssen zwei separate Wägesysteme in einem Dosiersystem betrieben und überwacht werden. Im Gegensatz zur Differential-Dosierwaage, bei der mehrere Wägezellen zusammengefasst werden, müssen hier die Gewichte getrennt gehalten werden.

Gravimetrische Durchflussmesser

Der gravimetrische Durchflussmesser ist ein patentiertes Gerät, das zur Messung des Durchflusses von frei fliessenden Schüttgütern verwendet werden kann. Der Materialfluss durch das Messgerät erfolgt lediglich durch die Schwerkraft, was zu einer sehr behutsamen Handhabung des Materials führt.

Die Funktionsweise ist mit der einer schräg geneigten Dosierbandwaage mit konstanter Bandgeschwindigkeit und Prallplatte zu vergleichen. Das Schüttgut gelangt in den Durchflussmesser über eine Beruhigungsstation, um die Vertikalgeschwindigkeit zu reduzieren. Es tritt dann in den oberen Messkanal ein, in der es über eine schräg geneigte Oberfläche fliesst. Der obere Messkanal sitzt auf einer Wägezelle mit schwingender Saite und wird kontinuierlich gewogen. Daraus ergibt sich die erste Kraftmessung F1. Anschliessend fliesst das Schüttgut durch einen separaten vertikalen Messkanal, der an einer zweiten Wägezelle mit schwingender Saite hängt und die Kraftmessung F2 erzeugt. Anhand dieser beiden kontinuierlichen Messungen können der Durchfluss und die Geschwindigkeit mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$\dot{m} = \frac{\sqrt{F_1 \times F_2}}{g \times \cos \alpha}$$

Dabei ist „F1“ die Kraft auf dem schräg geneigten Kanal, „F2“ die Kraft auf dem vertikalen Kanal, „l“ die Länge des schräg geneigten Kanals, „a“ der Winkel des schräg geneigten Kanals und „g“ die Schwerkraftkonstante.

Die durch den Durchflussmesser an das Wägesystem gestellten Anforderungen sind denen der Dosierbandwaage sehr ähnlich. Insbesondere wird die Genauigkeit mehr durch Drift- und Kriechfehler als durch Linearitätsfehler gesenkt. Für den Betrieb des Dosiergeräts ist ein kontinuierlicher Vergleich des aktuellen Gewichts mit den gespeicherten Tara-Gewichten erforderlich. In diesem Fall stellen die Gewichte der leeren Kanäle die Tara-Gewichte dar. Materialablagerungen stellen kein Problem dar, da eine automatische Tarierung durch Ablenkung des Materials um die Kanäle erfolgen kann. Da zwei unabhängige Kräfte erforderlich sind, um die Durchflussgleichung zu lösen, benötigt der Durchflussmesser zwei unabhängige Wägesysteme.

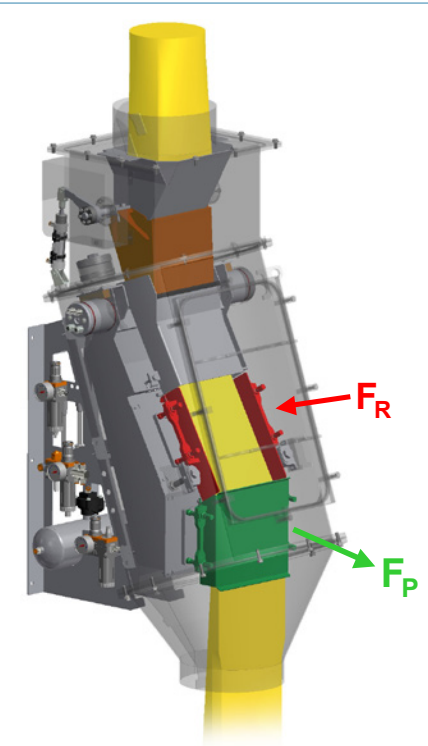
Unabhängig ob als Durchflussmesser zur einfachen Totalisierung, oder als Dosiergerät wobei ein Austragsgerät über dem Durchflussmesser den Materialstrom regelt, periodische Messungen sind nur ausreichend bei einem konstanten Materialstrom. Ist der Materialfluss nicht konsistent aufgrund eines unregelmässigen Schüttgutstroms oder pulsierendes Austragsgerät (z. B. bei niedrigeren Geschwindigkeiten), kann es bei Wägesystemen mit periodischer Messung zu fehlerhaften Ergebnissen kommen. Die Schwingsaiten-Messzelle ist perfekt geeignet für solche dynamischen Anwendungen, da er die Gewichtsmessung kontinuierlich integriert, so dass keine Wägedaten verloren gehen. Andere Wägesysteme, wie z. B. ein einfacher Dehnmessstreifen mit einem normalen A/D-Wandler, lassen Daten zwischen den Messungen aus.

Schlussfolgerung

Die Wägezelle mit schwingender Saite ist ideal für kontinuierliche Dosieranwendungen. Sie hat sich als flexibel, zuverlässig, genau, linear und kosteneffizient erwiesen. Es ist kein Zufall, dass alle führenden Hersteller von Dosierwaagen auf der ganzen Welt heute eine Version der von K-Tron vor fast 50 Jahren eingeführten Wägezelle mit schwingender Saite einsetzen.

Um zusätzliche Blätter aus dieser Serie als PDF herunterzuladen oder für weitere Angaben über die Produkte und Dienstleistungen der Coperion K-Tron, besuchen Sie

www.coperion.com



Figur 5 - Smart Flow Meter