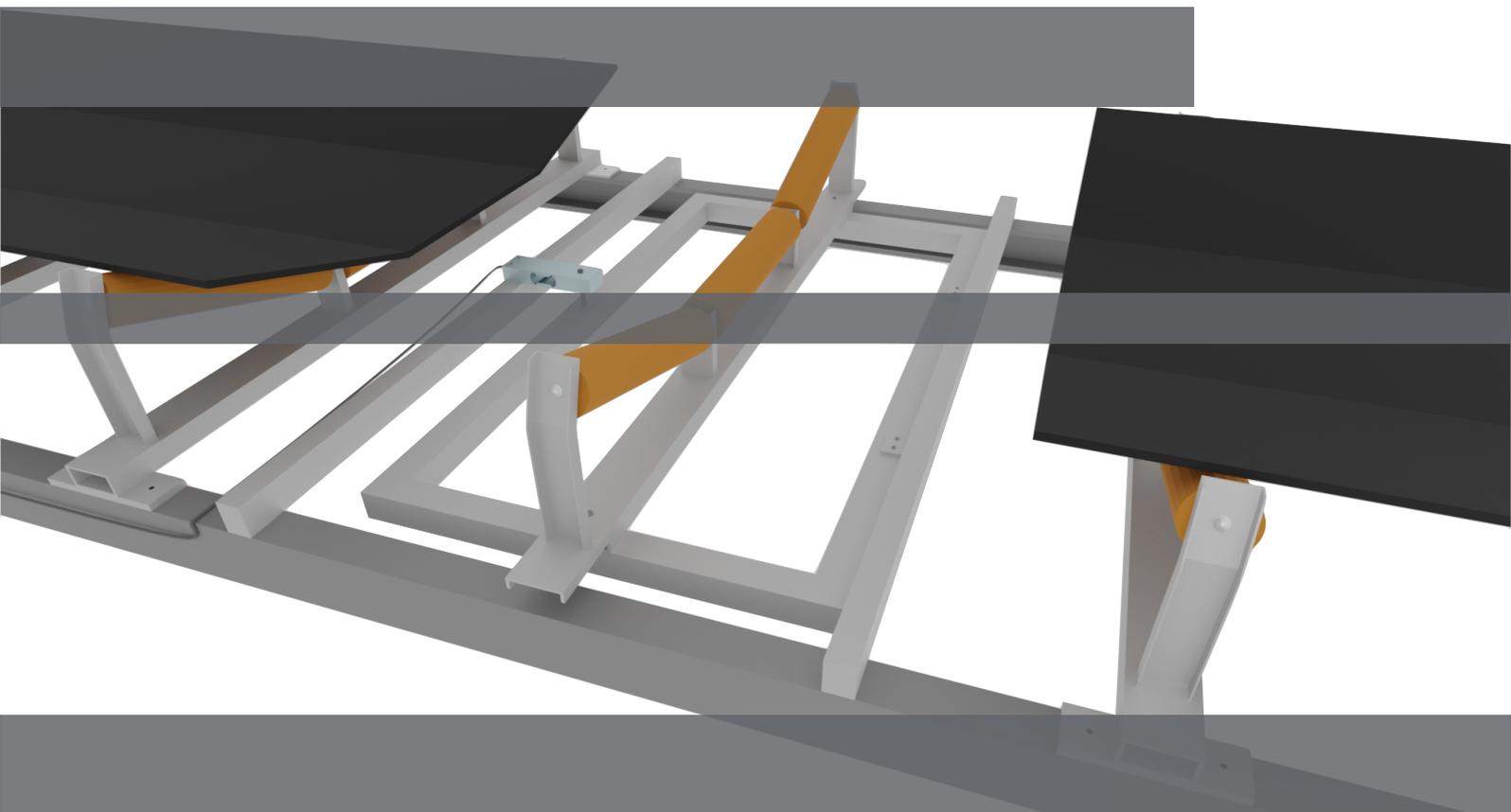


Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage für den Einsatz in Recyclinganlagen

Alexander Gönner
April 2023



Technische Universität Dortmund

Fakultät Raumplanung
Lehrstuhl für Ressourcen- und Energiesysteme

Inaugural-Dissertation

Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage für den Einsatz in Recyclinganlagen

Alexander Gönner

1. Gutachter **Prof. Dr. Martin Faulstich**
Fakultät Raumplanung
Technische Universität Dortmund

2. Gutachter **Prof. Dr. Michael ten Hompel**
Fakultät Maschinenbau
Technische Universität Dortmund

Vorsitzender Prof. Dr. Dietwald Gruehn

April 2023

Kurzfassung

Um die Automatisierung in der Recyclingindustrie voranzutreiben, ist eine zuverlässigere Überwachung der stattfindenden Prozessschritte und des verarbeiteten Materialstroms erforderlich. Der verstärkte Einsatz von Bandwaagen ist eine Möglichkeit, dieser Herausforderung zu begegnen. Herkömmliche Bandwaagen sind für diesen Zweck jedoch zu ungenau, unflexibel und kostspielig. Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine alternative Bandwaage zu entwickeln, die durch den Einsatz von faseroptischen Technologien verbesserte Eigenschaften aufweist. Der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik wird genutzt, um Messverfahren und -methoden speziell für diese Anwendung zu entwickeln und zu erproben. Die Ergebnisse zeigen, dass die faseroptische Bandwaage in Recyclinganlagen vielseitiger und zuverlässiger eingesetzt werden kann und ein positiver Skaleneffekt zu reduzierten Stückkosten führt. Diese Vorteile heben die faseroptische Bandwaage von herkömmlichen Bandwaagen ab, so dass sie in Recyclinganlagen wirtschaftlicher und ressourcenschonender eingesetzt werden kann.

Abstract

To advance automation in the recycling industry, more reliable monitoring of the process steps taking place and the material flow being handled is required. The increased use of belt scales is one way to meet this challenge. However, conventional belt scales are too inaccurate, inflexible and costly for this purpose. The aim of this thesis is therefore to develop an alternative belt scale that has improved properties through the use of fibre optic technologies. The current state of the art is used to develop and test measurement procedures and methods specifically for this application. The results show that the fibre optic belt scale can be used in recycling plants in a more versatile and reliable way and that a positive scale effect leads to reduced unit costs. These advantages set the fibre-optic belt scale apart from conventional belt scales so that it can be used in recycling plants in a more economical and resource-saving way.

Danksagungen

Zunächst möchte ich mich bei Herrn Professor Faulstich bedanken, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, an seinem Lehrstuhl *Ressourcen- und Energiesysteme* zu promovieren. Obwohl ich ein sehr technisches Thema für eine Fakultät der Raumplanung gewählt habe, hat er mich herzlich empfangen und mich bei der Zulassung an der Technischen Universität Dortmund unterstützt und sich für mich und mein Thema eingesetzt. Es gibt nicht viele Doktorväter mit denen dieses Projekt so gut funktioniert hätte.

Danken möchte ich dem Recyclingunternehmen REMONDIS, das meine Forschung und Entwicklung nicht nur finanziell, sondern auch fachlich gefördert hat. Besonders wichtig ist mir mein Betreuer Dr. Philipp Kempkes, der mich während der gesamten Zeit unterstützt und beraten hat. Ohne sein technisches, handwerkliches und zwischenmenschliches Wissen wäre dieses Projekt nicht möglich gewesen. Darüber hinaus hatte er immer ein offenes Ohr und kein Problem war ihm zu schwierig um es gemeinsam zu lösen. Das gilt auch für meine Kollegen in der Digitalisierungsabteilung, an die ich mich mit Fragen und Problemen immer wenden konnte. Alle meine Kolleginnen und Kollegen aus der Anlagentechnik und insbesondere ihr Geschäftsführer Dr. Ansgar Fendel waren mir eine große Hilfe auf meinem Weg.

Da sich viele Entwicklungsschritte nur durch Praxisversuche realisieren lassen, habe ich viel Zeit in Industrieanlagen verbracht. Bevor ich an meinem eigenen Förderband tätig werden konnte, habe ich mit Erlaubnis von Tilman Schöpp bei REMONDIS Münster gearbeitet. Meine Messungen konnte ich dann bei REMONDIS Elektrorecycling in Lünen fortsetzen. Vor allem der Instandhaltungsleiter Thorsten Kellermann und die beiden Monteure Alex und Isi haben mich in dieser Zeit sehr unterstützt, nicht zuletzt, weil ich aufgrund meiner begrenzten handwerklichen Fähigkeiten oft Hilfe brauchte. Natürlich ist hier auch der damalige Geschäftsführer der Elektrorecycling Torben Krafczyk zu erwähnen, der mir die Erlaubnis gab, meine Promotion bei ihm voranzutreiben. Um die faseroptische Bandwaage im Realbetrieb einer Recyclinganlage zu testen, wurde sie in ein Förderband der Phoenix Mining in Dortmund montiert, welches unter der Leitung Mathias Hoffmann steht. Fachliche und technische Unterstützung erhielt ich von den Mitarbeitern der Anlage und ihrem Vorarbeiter Claus-Peter Hornig - vielen Dank dafür. Auch die LVP-Sortieranlage in Erftstadt ist zu erwähnen. David Schumacher hat mir erlaubt, Schüttgutmessungen mit einer dort installierten herkömmlichen Bandwaage durchzuführen.

Das Promovieren umfasst neben der Entwicklungsarbeit auch andere Bereiche. Hilfe beim Schreiben, Literaturarbeit oder Motivationstiefs fand ich immer bei meinen Doktorand*innenkollegen, mit denen ich in einem vierteljährlich stattfindenden Seminar Wissen

und Erfahrungen austauschen konnte. Ich konnte nicht nur interessante Präsentationen hören, sondern auch selbst Vorträge halten und so mein Wissen in meinem eigenen Thema verbessern. Ich möchte mich auch bei der LaTeX-Vorlage Clean-Thesis und der Übersetzungssoftware DeepL bedanken. Beide waren eine große Hilfe beim Verfassen dieser Dissertation.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei Herrn Professor ten Hompel für die Zweitkorrektur dieser Dissertation und bei Herrn Professor Gruehn für den Vorsitz der Disputation bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Vorgehensweise	1
1.1	Problemstellung	1
1.2	Forschungsansatz und -methode	2
2	Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik	5
2.1	Konduktive Dehnungsmessstreifen	7
2.1.1	Physikalischer Hintergrund	7
2.1.2	Störquellen und Kompensation	10
2.1.3	Integratoren	15
2.2	Optische Sensoren aus Faser-Bragg-Gittern	17
2.2.1	Glasfasern	17
2.2.2	Faser-Bragg-Gitter	20
2.2.3	Messverfahren	22
2.2.4	Interrogatoren	25
2.3	Wägezellen	29
2.3.1	Aufbau	29
2.3.2	Federeigenschaften	30
2.4	Aktuelle Bandwaagensysteme	32
2.4.1	Förderbänder	32
2.4.2	Bandwaagen	34
2.4.3	Geschwindigkeitsmessung	36
3	Wiegesysteme mit Faser-Bragg-Gittern	39
3.1	Wägezellen-Varianten	40
3.1.1	Wägezelle WZ1	40
3.1.2	Wägezelle WZ2	42
3.1.3	Wägezelle WZ3	43
3.2	Messaufbau-Varianten	45
3.2.1	Stationäre Messungen mit Wägemodul	45
3.2.2	Messaufbau 1	46
3.2.3	Messaufbau 2	48
3.3	Datenerfassung und -verarbeitung	50

3.3.1	Ermittlung der Messdaten	50
3.3.2	Digitale Signalverarbeitung	51
4	Temperaturkompensation	53
4.1	Grundlagen	54
4.1.1	Verfahren	54
4.1.2	Nichtlinearität	56
4.1.3	Distanzkompensation	59
4.1.4	Housing	62
4.2	Einfluss der Wärmekopplung	65
4.2.1	Beobachtung	65
4.2.2	Theoretische Analyse	67
4.2.3	Experimente	70
4.3	Ergebnisse der Temperaturkalibrierungen	74
4.3.1	Wägezelle WZ1	74
4.3.2	Wägezelle WZ2	76
4.3.3	Wägezelle WZ3	78
5	Faseroptische Bandwaagen	81
5.1	Relaxationsverhalten	82
5.1.1	Wägezelle WZ1	82
5.1.2	Wägezelle WZ2	83
5.1.3	Wägezelle WZ3	85
5.2	Messalgorithmen	87
5.2.1	Messung der Vulkanisiererverbindung	87
5.2.2	Integration über ein konstantes Zeitintervall	90
5.3	Kalibrierkurven	95
5.3.1	Wägezelle WZ1 im Messaufbau 1	95
5.3.2	Wägezelle WZ2 im Messaufbau 1	97
5.3.3	Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2	99
5.4	Schüttgutmessungen	102
5.4.1	Wägezelle WZ1 im Messaufbau 1	103
5.4.2	Wägezelle WZ2 im Messaufbau 1	104
5.4.3	Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2	105
5.5	Genauigkeitsvergleich mit herkömmlichen Bandwaagen	109
5.5.1	Durchsatzmessungen in der Recyclingindustrie	109
5.5.2	Schüttgutmessung einer herkömmlichen Bandwaage	111
6	Anwendung in der Recyclingindustrie	113
6.1	Flexibilität	114

6.1.1	Montage	114
6.1.2	Bedienung	115
6.1.3	Anwendbarkeit	116
6.2	Kostenbeeinflussende Faktoren	119
6.2.1	Material	119
6.2.2	Produktion und Montage	121
6.3	Verwendungsmöglichkeiten	123
6.3.1	Echtzeit-Überwachung der Prozesskette	123
6.3.2	Materialbilanzierung	124
6.3.3	Langzeitanalysen	126
7	Fazit und Schlussfolgerungen	127
7.1	Zusammenfassung und Bewertung	127
7.2	Weiterer Forschungsbedarf	131
	Literatur	133

Der steigende Ressourcenverbrauch der Weltbevölkerung wird in Zukunft zu Problemen bei der Verfügbarkeit von natürlichen Rohstoffen führen [1]. Die Gewinnung und Verwendung von Primärrohstoffen verursacht nicht nur weitreichende ökologische, sondern auch ökonomische Belastungen [2]. Das Ziel einer nachhaltigen Industriegesellschaft ist es daher, das Wirtschaftswachstum nicht mehr an einen höheren Ressourcenverbrauch und die Umweltauswirkungen nicht mehr an den Rohstoffverbrauch zu koppeln. Eine Möglichkeit, dies zu verfolgen, ist die Umstellung des linearen Wirtschaftsmodells auf eine Kreislaufwirtschaft, in der Materialkreisläufe durch den verstärkten Einsatz von Recyclingrohstoffen geschlossen werden [3, 4]. Auch wenn der Zirkularität durch den steigenden Bedarf und energetische Einschränkungen Grenzen gesetzt sind, sollte eine größtmögliche Wiederverwertung von Rohstoffen angestrebt werden.

1.1 Problemstellung

Von besonderer Bedeutung für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist die Entwicklung innovativer Recyclingmethoden und -verfahren, mit denen Moleküle in einer Reinheit zurückgewonnen werden können, die *so-gut-wie-neu* ist [5]. Die dafür notwendigen Informationen über die eingesetzten Sortieraggregate und die verarbeiteten Materialströme sind jedoch in vielen Recyclinganlagen noch nicht vorhanden [6]. Oft werden Maschinendaten nicht genutzt und Materialströme nicht gemessen, was eine automatisierte Überwachung und Steuerung der Prozesskette unmöglich macht. Recycler müssen die vorhandenen Daten besser nutzen und durch den verstärkten Einsatz von Mess- und Sensortechnik eine breitere Datengrundlage schaffen. Schwierigkeiten ergeben sich jedoch aus der logistischen Komplexität von Recyclinganlagen [7]. In der Regel ist die genaue Zusammensetzung des Eingangsstroms nicht bekannt und die Sortierprozesse erzeugen eine Vielzahl von Materialströmen. Deren Menge und Beschaffenheit sind daher nicht vorhersehbar, so dass idealerweise jeder Schritt der Prozesskette einzeln überwacht werden sollte. Da für den Transport des Recyclingmaterials innerhalb der Anlage häufig Förderbänder verwendet werden, bietet sich hier der Einsatz von Bandwaagen an. Diese sind in der Lage, den Durchsatz des transportierten Förderguts zu bestimmen und so wichtige Informationen

über den Materialstrom zu ermitteln [8]. Allerdings sind herkömmliche Bandwaagen für den Einsatz in der Recyclingindustrie häufig zu ungenau, kostspielig und unflexibel, so dass sie nur an wenigen Stellen von Recyclern eingesetzt werden. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Alternative zur derzeit verwendeten Bandwaagentechnologie zu entwickeln, die das Recyclingmaterial genauer misst und kostengünstiger und einfacher eingesetzt werden kann. Je mehr Informationen über die Materialströme in einer Anlage zur Verfügung stehen, desto schneller und effektiver kann die Prozesskette im Sinne der Automatisierung optimiert werden.

Herkömmliche Bandwaagen bestehen aus einer Wiegekonstruktion, die das Gewicht des Fördergutes auf einen Gewichtsaufnehmer überträgt [8]. Hierbei werden in der Regel Wägezellen verwendet, die aus einem metallischen Federelement und daran befestigten Dehnungsmessstreifen bestehen [9, 10]. Wird das Federelement durch das Fördergut belastet, führt dies aufgrund der elastischen Eigenschaften des Metalls zu einer Verformung. An der Oberfläche entsteht eine Dehnung, die das elektrische Signal der Dehnungsmessstreifen proportional zum Gewicht des Fördergutes verändert. Diese Veränderungen werden mit einer Auswerteelektronik erfasst, die mit dem Gewichtsaufnehmer verbunden ist. Durch den Einsatz von Messverfahren und digitaler Signalverarbeitung werden die Rohdaten in Informationen über den Materialstrom umgewandelt, die der Recycler zur Überwachung und Steuerung der Prozesskette nutzen kann. Starke Temperatureinwirkungen und hohe elektromagnetische Felder können die Genauigkeit einer Wägezelle negativ beeinflussen, weshalb herkömmliche Bandwaagen vor Umwelteinflüssen geschützt werden müssen [11]. Darüber hinaus treten aufgrund der Dynamik eines Förderbandes Schwingungen auf, die das Gewichtssignal des Fördergutes überlagern und so zu Ungenauigkeiten führen, die sich insbesondere bei kleinen Gewichten bemerkbar machen. Die Konstruktion, Montage und Auswerteelektronik der Bandwaage ist zudem aufwendig in der Anschaffung und Handhabung, was zu hohen Kosten und einer eingeschränkter Anwendbarkeit führt.

1.2 Forschungsansatz und -methode

In dieser Arbeit wird versucht, die Defizite einer herkömmlichen Bandwaage zu beheben, indem das rein elektrische Messsystem durch ein faseroptisches ersetzt wird. Anstelle von Dehnungsmessstreifen auf dem metallenen Federelement einer Wägezelle, werden Faser-Bragg-Gitter eingesetzt [12, 13]. Zur Übertragung des Gewichts des Förderguts wird dabei weiterhin eine Wiegekonstruktion verwendet. Optische Sensoren aus Faser-Bragg-

Gittern werden in den letzten Jahren für eine zunehmende Anzahl von Anwendungen eingesetzt. Dazu gehören insbesondere die Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen, Pipelines und anderen Komponenten in der Industrie [14, 15], aber auch Anwendungen in der Medizin und in atomaren Umgebungen sind bekannt [16, 17]. Im Gegensatz zu Dehnungsmessstreifen werden keine Änderungen eines elektrischen Signals gemessen, sondern Faser-Bragg-Gitter beeinflussen das Spektrum des Lichts, welches in einer Glasfaser geleitet wird. Das Strecken des Gitters verändert diesen Einfluss und sendet somit ein optisches Signal entlang der Glasfaser, das direkt mit dem Gewicht des Materials auf dem Förderband in Verbindung gebracht werden kann. Licht wird durch elektromagnetische Felder nicht beeinflusst, und Temperatureinwirkungen können durch eine geeignete Temperaturkompensation ausgeglichen werden [18]. Darüber hinaus können Messalgorithmen entwickelt werden, um den Einfluss von Schwingungen des Förderbandes zu minimieren und so die Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage zu erhöhen. Die Multiplexing-Eigenschaften von faseroptischen Systemen können zur Kostensenkung genutzt werden, und Änderungen an der Bandwaagen-Konstruktion können die Flexibilität erhöhen [19].

Der Einsatz von Faser-Bragg-Gittern zur Verwiegung eines Materialstromes ist bisher wenig erforscht [20]. Bei der Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage kann daher nur auf wenige Erkenntnisse zurückgegriffen werden, so dass das Messsystem von Grund auf neu entwickelt wird. Dazu werden mit der wissenschaftlichen Methodik Störfaktoren gesucht, analysiert und experimentell nachgewiesen. Geeignete Kompensationsverfahren werden entwickelt und in Bezug auf Genauigkeit, Flexibilität und Kosten bewertet. Darüber hinaus werden das Messverfahren und die Wiegekonstruktion einer Bandwaage überarbeitet und für den Einsatz in der Recyclingindustrie angepasst. Aufgrund der Neuartigkeit der faseroptischen Bandwaage sind die Ergebnisse der Entwicklungsschritte nicht absehbar und müssen daher mit denen einer herkömmlichen Bandwaage verglichen werden.

In Kapitel 2 wird daher der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik von herkömmlichen Bandwaagen und Faser-Bragg-Gittern erarbeitet, um die so gewonnenen Kenntnisse für die Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage nutzen zu können. Außerdem wird dadurch ein späterer Vergleich zwischen den beiden Waagen ermöglicht.

Alle in dieser Arbeit verwendeten Wiegesysteme zur Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage werden in Kapitel 3 beschrieben. Es werden alle faseroptischen Gewichtsaufnehmer und Messaufbauten beschrieben und ihre Eigenschaften miteinander verglichen.

Da die Kompensation von Temperatureinwirkungen eine Voraussetzung für die Genauigkeit einer faseroptischen Bandwaage ist, werden in Kapitel 4 Besonderheiten und Herausforderungen aufgezeigt und deren Lösungen diskutiert.

1 Motivation und Vorgehensweise

In Kapitel 5 werden Lösungsansätze für die mechanischen Einflüsse auf faseroptische Bandwaage vorgestellt und bewertet. Darüber hinaus werden Kalibrier- und Testmessungen durchgeführt, um die Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage zu bestimmen, die dann mit der einer herkömmlichen Bandwaage für den Einsatz in Recyclinganlagen verglichen werden kann.

Der Einsatz der faseroptischen Bandwaage in der Recyclingindustrie wird in Kapitel 6 beschrieben. Es werden Vor- und Nachteile gegenüber herkömmlichen Bandwaagen aufgezeigt und der wirtschaftliche und ressourcenschonende Nutzen der entwickelten Bandwaagentechnologie dargestellt.

Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

Die derzeit im Einsatz befindlichen herkömmlichen Bandwaagen basieren auf einem elektrischen Messverfahren und sind für den großtechnischen Einsatz in der Recyclingindustrie zu ungenau, unflexibel und zu kostspielig. Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine neuartige faseroptische Bandwaage zu entwickeln, die ein deutlich besseres Kosten-Nutzen-Verhältnis aufweist und somit wesentlich häufiger in Recyclinganlagen gewinnbringend und ressourcenschonend eingesetzt werden kann. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es wichtig, den aktuellen Entwicklungsstand konventioneller Bandwaagen und faseroptischer Sensoren technisch detailliert zu kennen, um einen späteren Vergleich zwischen den beiden Bandwaagentypen zu ermöglichen.

Im Abschnitt 2.1 wird der Aufbau und die Funktionsweise von konduktiven Dehnungsmessstreifen beschrieben [10]. Diese werden mit einem elektrischen Messverfahren ausgelesen und sind die Grundlage herkömmlicher Bandwaagen [21]. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf Störquellen und deren Kompensationsmethoden gelegt, da diese teilweise für die Ungenauigkeit der Bandwaagen verantwortlich sind und für die Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage vermieden werden sollten. Einige Störquellen sind außerdem vom elektrischen Messsystem unabhängig, so dass die genaue Kenntnis bereits etablierter Kompensationsverfahren bei der Entwicklung eines faseroptischen Systems eingesetzt werden kann.

Für die faseroptische Bandwaage werden optische Sensoren aus Faser-Bragg-Gittern verwendet [13]. Daher werden in Abschnitt 2.2 der Aufbau und die Funktionsweise der Sensoren erläutert. Es wird beschrieben, wie Faser-Bragg-Gitter für eine Dehnungsmessung verwendet werden können und somit eine Alternative zu Dehnungsmessstreifen darstellen [22].

Der funktionelle Gewichtsaufnehmer einer Bandwaage ist die Wägezelle, die in Abschnitt 2.3 erläutert wird. Ihre Aufgabe ist es das Gewicht des geförderten Materials in eine Dehnung umzuwandeln, die dann vom entsprechenden Dehnungssensor aufgenommen wird [9]. Um dies bestmöglich zu gewährleisten sind der Aufbau und das Material der Wägezelle entscheidend.

2 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

Im Abschnitt 2.4 wird auf Bandwaagen im Allgemeinen und ihren Einbau unter Förderbändern eingegangen. Die Konstruktion der Bandwaage und die Position innerhalb des Förderbandes können die Genauigkeit der Messungen maßgeblich beeinflussen, so dass der korrekte Einbau für elektrische und auch faseroptische Bandwaagen von essentieller Bedeutung ist [23].

2.1 Konduktive Dehnungsmessstreifen

Der Widerstand eines elektrischen Leiters hängt von seiner Geometrie ab. Je länger und dünner der Leiter ist, desto schlechter kann er elektrischen Strom leiten. Bei konduktiven Dehnungsmessstreifen (DMS) wird diese Eigenschaft ausgenutzt, um die aktuelle Dehnung des DMS zu bestimmen. Diese bestehen aus langen Drähten, die sich beim Dehnen verformen und dadurch ihren Widerstand verändern. Auswerteeinheiten, auch Integratoren genannt, können diese Veränderungen messen und erlauben so Rückschlüsse auf die Dehnung [24].

2.1.1 Physikalischer Hintergrund

Jedem Material kann ein spezifischer Widerstand ρ zugeordnet werden, der seine Fähigkeit, elektrischen Strom zu leiten, beschreibt. Der tatsächliche Widerstand

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.1)$$

eines isotropen Leiters lässt sich aus dem Produkt des spezifischen Widerstandes und dem Verhältnis von der Länge L zur Querschnittsfläche A berechnen. Häufig verwendete Materialien für DMS sind Konstantan ($\rho \approx 0.49 \mu\Omega\text{m}$) und Nickel-Chrom-Legierungen ($\rho \approx 1.60 \mu\Omega\text{m}$) [10].

Kleine Änderungen des elektrischen Widerstands ΔR können nach Gleichung (2.1) drei verschiedene Ursachen haben [25].

- 1.) Wird der Leiter in Längsrichtung gedehnt $L \rightarrow L + \Delta L$, vergrößert sich die Länge um ΔL und der Widerstand steigt mit

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

an.

- 2.) Bei einer Vergrößerung des Leiterquerschnitts $A \rightarrow A + \Delta A$ ist der Effekt umgekehrt. Je größer der Querschnitt, desto kleiner wird der Widerstand:

$$\frac{\Delta R}{R} = -\frac{\Delta A}{A}. \quad (2.3)$$

Da sich der Querschnitt des Drahtes mit einer Längsdehnung verringert, kann folgende Beziehung zwischen den beiden Parametern hergestellt werden:

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.4)$$

wobei ν die Poisson-Zahl des Materials ist, die normalerweise nahe $\nu = 0.5$ liegt.

3.) Es existiert auch der piezoresistive Effekt [26], der die Änderung des spezifischen Widerstandes

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \rho_p \frac{\Delta L}{L} \quad (2.5)$$

unter Belastung beschreibt, wobei die Stärke des Effektes durch den piezoresistiven Koeffizienten ρ_p gegeben ist. Die durch die Dehnung hervorgerufene Verformung des Materials hat Einfluss auf die Bandstruktur des Festkörpers und verändert somit die leitenden Eigenschaften. Bei den meisten Metallen sind die durch den piezoresistiven Effekt verursachten relativen Widerstandsänderungen

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho}, \quad (2.6)$$

im Vergleich zu den geometrischen Einflüssen gering. Sie können jedoch nicht völlig vernachlässigt werden.

Zusammengefasst lässt sich die relative Änderung des elektrischen Widerstands eines Leiters unter Längsdehnung ausdrücken als:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} = (1 + 2\nu + \rho_p) \frac{\Delta L}{L}, \quad (2.7)$$

wobei häufig der Faktor $K_\varepsilon = (1 + 2\nu + \rho_p)$ als Empfindlichkeit des Dehnungsmessstreifens angegeben und eine Längsdehnung mit $\varepsilon = \Delta L/L$ abgekürzt wird:

$$\frac{\Delta R}{R} = K_\varepsilon \varepsilon. \quad (2.8)$$

Für Konstantan beträgt die Empfindlichkeit $K_\varepsilon \approx 2.15$ und für Nickel-Chrom-Legierungen beträgt sie $K_\varepsilon \approx 2.3$ [10].

Um eine Widerstandsänderung messen zu können, wird der Messdraht in einen Stromkreis eingebunden und der resultierende Spannungsabfall mit einem Voltmeter gemessen. Da die Änderungen nur sehr klein sind, wird häufig eine Wheatstone-Brückenkonfiguration verwendet, die sich aus vier DMS zusammensetzt, wie in Abbildung 2.1 gezeigt [27].

Die Nennwiderstände der DMS sind R_1 , R_2 , R_3 bzw. R_4 . Eine Versorgungsspannung U_0

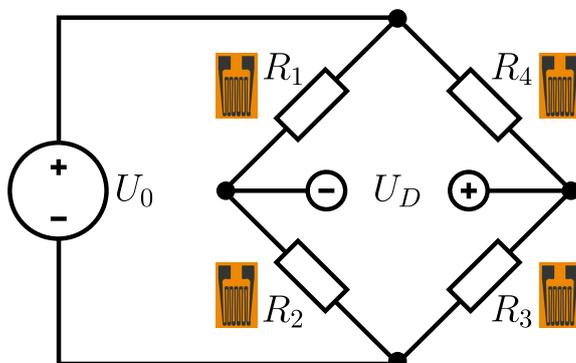


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung einer Wheatstone-Brückenschaltung, wie sie für Dehnungssensoren verwendet wird. Die Versorgungsspannung U_0 wird an zwei gegenüberliegenden Punkten der Schaltung angelegt. Zwischen den verbleibenden zwei Punkten kann eine Änderung der Diagonalspannung U_D gemessen werden, sobald eines der vier DMS eine Dehnung erfährt und dadurch seinen elektrischen Widerstand R_1 , R_2 , R_3 oder R_4 ändert.

wird zwischen den DMS an gegenüberliegenden Punkten eingespeist und die resultierende Diagonalspannung

$$U_D = \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U_0 \quad (2.9)$$

lässt sich aus den Kirchhoff'schen Regeln herleiten. Üblicherweise haben alle DMS den gleichen Nennwiderstand $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, da so die Empfindlichkeit der Wheatstone-Brücke maximiert wird und die Diagonalspannung $U_D = 0$ verschwindet [27]. Kommt es zu kleinen Änderungen des Widerstands eines DMS $R_1 \rightarrow R_1 + \Delta R_1$, da er beispielsweise gedehnt wird, lässt sich ein kleiner Wert für die Diagonalspannung

$$U_D = \frac{1}{4} \frac{\Delta R_1}{R_1} U_0 \quad (2.10)$$

messen, der normalerweise im Millivoltbereich liegt [24]. Für diese Messmethode müssen die Widerstände der DMS nicht bekannt sein, sodass eine Dehnungsmessung - unter Ausschluss von Störeinflüssen - nach Gleichung (2.7) nur von der Genauigkeit des Spannungsmessgeräts abhängig ist:

$$\varepsilon = \frac{4}{K_\varepsilon} \frac{U_D}{U_0}. \quad (2.11)$$

2.1.2 Störquellen und Kompensation

Der Umkehrschluss aus Gleichung (2.11) würde besagen, dass immer dann, wenn eine Diagonalspannung gemessen wird, eine mechanische Dehnung vorhanden sein muss. Diese Aussage ist allerdings nur teilweise richtig, da es in der Anwendung immer Störquellen gibt, die auf den Dehnungssensor wirken und eine Verschiebung des Messsignals verursachen können. Präzise DMS müssen daher Kompensationstechniken verwenden, um den Einfluss der einzelnen Störquellen zu minimieren. Zu den bedeutendsten Störquellen gehören Temperaturschwankungen, Relaxations- und Kriecheffekte, Schäden durch Überbelastung und elektromagnetische Interferenzen (EMI) [24].

Temperaturschwankungen

Die meisten Materialien dehnen sich bei Temperaturerhöhung aus. Der Grad der Ausdehnung für ein bestimmtes Material wird durch den Wärmeausdehnungskoeffizienten α bestimmt. Sowohl der DMS selbst als auch das darunter liegende Substrat verformen sich bei einer Temperaturschwankung ΔT , was zu einer Änderung des Messwerts führt, obwohl es keine Änderung der mechanischen Dehnung gibt. Hinzu kommt die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands $R = R(T)$, die ebenfalls zu einer Scheindehnung führt. Zusammen ergibt sich eine temperaturabhängige Dehnung

$$\varepsilon_T = (\alpha_S - \alpha_{\text{DMS}}) \Delta T + \frac{a_R}{K_\varepsilon} \Delta T \quad (2.12)$$

mit α_S , α_{DMS} , a_R und K_ε als die Wärmeausdehnungskoeffizienten des Substrats und des DMS, der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands bzw. die Empfindlichkeit des DMS. Bei einem selbstkompensiertem DMS wird das Material so gewählt, dass

$$a_R = K_\varepsilon (\alpha_S - \alpha_{\text{DMS}}) \quad (2.13)$$

und die Temperatureffekte sich gegenseitig aufheben $\varepsilon_T = 0$ [27]. Dies erfordert jedoch eine genaue Kenntnis der Materialeigenschaften des Substrats, welche nur durch eine langwierige Optimierung der aufgetragenen DMS erlangt werden kann.

Des Weiteren werden viele Temperatureinflüsse bereits durch die Wheatstone-Brücke kompensiert. Wenn zwei benachbarte DMS die gleiche temperaturabhängige Dehnung ε_T erhalten, wird diese durch Differenzbildung zu Null addiert. Falls die Anwendung

es zulässt, können die beiden DMS an Bereiche des Substrates mit entgegengesetzter Dehnung $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$ geklebt werden, wodurch sich die Signalstärke

$$(\varepsilon_2 + \varepsilon_T) - (\varepsilon_1 + \varepsilon_T) = \varepsilon_2 - \varepsilon_1 = 2 \varepsilon_2 \quad (2.14)$$

verdoppelt. Die interne Temperaturkompensation funktioniert jedoch nur, wenn benachbarte DMS immer auf der gleichen Temperatur sind. Temperaturänderungen, wie z.B. ein langsamer Anstieg der Raumtemperatur, können daher leicht kompensiert werden, während schnelle und lokale Temperatureinflüsse nicht kompensiert werden [27].

Ein weiterer zu berücksichtigender Faktor ist die Eigenerwärmung von stromdurchflossenen Drähten und Kabeln. Diese kann jedoch minimiert werden, indem die Versorgungsspannung U_0 der Schaltung niedrig gehalten wird. Die meisten Wheatstone-Brücken werden daher mit einer Spannung 5 – 12 V betrieben, so dass Eigenerwärmung vernachlässigt werden kann [24].

Relaxations- und Kriecheffekte

Wenn DMS gestreckt werden, treten Relaxationserscheinungen auf, die von der Form des Messgitters abhängen [10]. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Messdraht wie eine Feder wirkt und bei Dehnung eine Rückstellkraft erzeugt, die dann auf das Trägermaterial aus Kunststoff übertragen wird. Aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften des Kunststoffs gibt das Material mit der Zeit nach. Dieser Effekt wird noch dadurch verstärkt, dass der Träger in der Regel mit einem Klebstoff auf dem darunter liegenden Substrat befestigt ist, der ebenfalls viskoelastische Eigenschaften aufweist.

Schematisch wird der Effekt der Relaxation in Abbildung 2.2(a) dargestellt. Die Grafik zeigt das Anzeigesignal eines DMS als Funktion der Zeit t . Der DMS ist an einem Messobjekt angebracht und misst dessen Dehnung. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird das Objekt belastet, wodurch seine Dehnung und das Signal des DMS gleichzeitig auf denselben Wert ε_0 ansteigen. Mit der Zeit fällt das Signal ab, bis zum Zeitpunkt $t = t_1$, wo das Objekt entlastet wird und seine Dehnung entsprechend wieder auf Null fällt. Das Messsignal fällt ebenfalls ab, jedoch unterhalb des Nullpunktes. Danach steigt es wieder an, bis es schließlich wieder den Wert Null erreicht.

Eine quantitative Beschreibung des Effekts erweist sich als schwierig, da die Intensität der Relaxation von verschiedenen Faktoren beeinflusst wird, z. B. von der Temperatur, der Form des DMS, der Dicke des Trägermaterials und der Art und Menge des verwendeten Klebstoffs [24]. Relaxationseffekte können daher nicht aktiv aus dem Signal herausge-

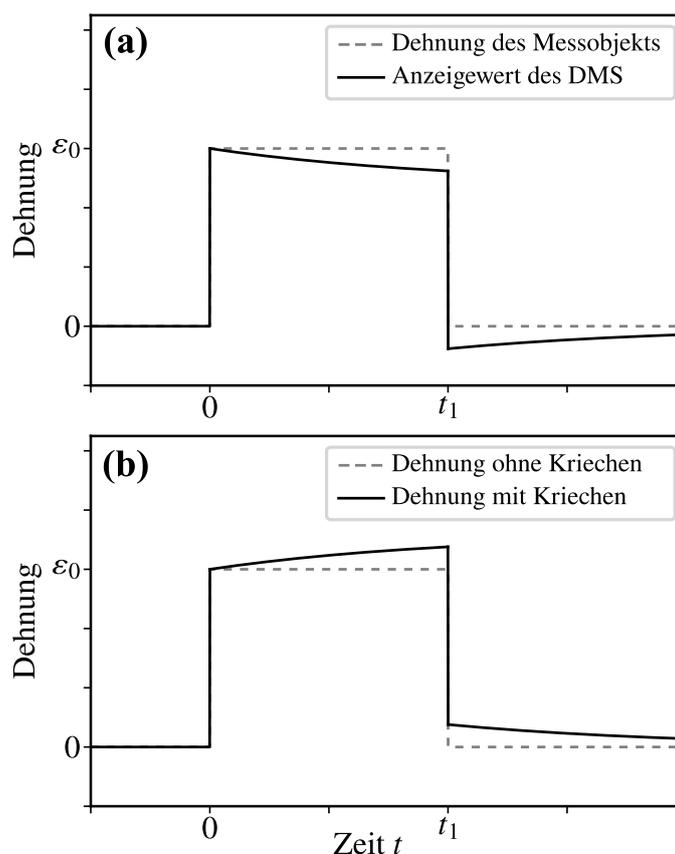


Abbildung 2.2: Zeitlicher Verlauf von Relaxation und Kriecheffekten. (a): Die durch Relaxation verursachte Differenz zwischen der Dehnung eines Messobjekts und dem Anzeigewert eines angebrachten DMS, wenn das Objekt belastet wird. (b): Das Kriechen eines Messobjekts unter Belastung. Da beide Effekte eine entgegengesetzte Wirkung haben, können sie sich gegenseitig aufheben.

rechnet werden, so dass eine passive Kompensationsmethode verwendet wird. Diese nutzt die Tatsache aus, dass die meisten Messobjekte, auf denen DMS installiert werden, einen entgegengesetzten Effekt aufweisen. Bei einer konstanten Belastung nimmt die Dehnung der meisten Materialien mit der Zeit zu. Dieser als Kriechen bezeichnete Effekt wird beispielsweise bei Metallen hauptsächlich durch die Bewegung von Versetzungen innerhalb des Kristallgitters verursacht und hängt vom Material und der Temperatur ab [28]. Bei den meisten Anwendungen müssen Kriecheffekte nicht berücksichtigt werden, da ihre Intensität bei Raumtemperatur vernachlässigbar ist. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der DMS können jedoch auch diese geringen Verschiebungen der Dehnung gemessen werden.

Der zeitliche Verlauf des Kriechens ist in Abbildung 2.2(b) schematisch dargestellt. Auch hier wird ein Messobjekt zur Zeit $t = 0$ belastet und zur Zeit $t = t_1$ entlastet. Zur Veranschaulichung zeigt die gestrichelte Linie die Dehnung ohne Kriechen, während die

durchgezogene Linie die tatsächliche Dehnung des Messobjekts mit Kriechen darstellt. Im Bereich der konstanten Belastung nimmt die Dehnung weiter zu, bis das Objekt entlastet wird und die Dehnung daher plötzlich abnimmt. Sie sinkt jedoch nicht auf Null, sondern nimmt zunächst einen höheren Wert ein und nähert sich dann mit der Zeit Null an.

Da sich Relaxations- und Kriecheffekte bis auf das Vorzeichen zeitlich sehr ähnlich verhalten, können sie so aneinander angepasst werden, bis sie sich gegenseitig aufheben. In der Regel wird das Design des Messgitters verändert, um die Kraftübertragung auf das Trägermaterial zu beeinflussen. Auch ohne detaillierte Kenntnis des Relaxations- und Kriechverhaltens aller Komponenten kann so für ein entsprechendes Messobjekt ein optimal abgestimmter DMS gefunden werden, bei dem die Auswirkungen der Effekte minimal werden.

Schäden durch Überbelastung

Die Messdrähte eines DMS können überdehnt werden, d.h. wenn ein DMS überbelastet wird, übersteigt die resultierende Dehnung die Elastizitätsgrenze ϵ_{YS} im Spannungs-Dehnungs-Diagramm, welches beispielhaft in Abbildung 2.3 gezeigt wird [28]. Unterhalb

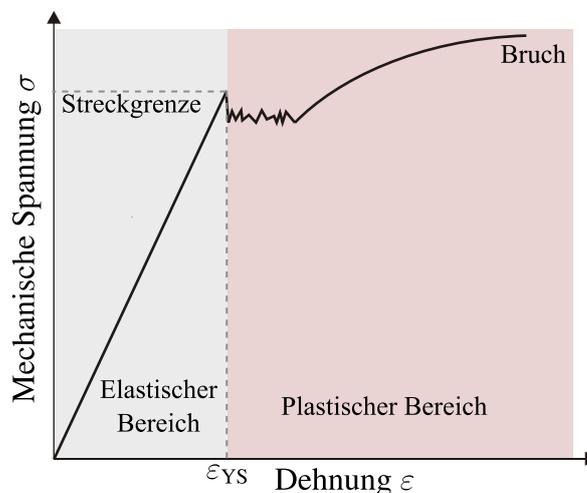


Abbildung 2.3: Beispielhaftes Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Metalls. Im Bereich geringer Dehnung $\epsilon < \epsilon_{YS}$ bis zur Elastizitätsgrenze reagiert das Material elastisch und die Spannung σ steigt linear an. Weiter erhöhte Dehnungen $\epsilon > \epsilon_{YS}$ verformen das Material plastisch und können sogar zum Bruch führen, wenn die Dehnung zu hoch wird.

der Elastizitätsgrenze ϵ_{YS} befindet sich das Material im linear-elastischen Bereich. Verformungen sind reversibel (elastisch) und unterliegen dem Hooke'schen Gesetz, so dass sich die Messdrähte wie eine Feder verhalten [27]. DMS sollten in diesem Bereich betrieben werden, da es eine einfache Beziehung zwischen mechanischer Spannung und

der zu messenden Dehnung gibt. Außerdem kehrt der DMS in seine ursprüngliche Form zurück, nachdem die Spannung aus dem Material entfernt wurde. Wird das Material jedoch weiter gedehnt, verformt es sich plastisch und verändert dadurch dauerhaft seine Form. Auch nach Wegnahme der mechanischen Spannung bleibt eine gewisse Dehnung erhalten. Im Messsignal des Sensors zeigt sich dies durch eine Verschiebung des Nullpunktes. Nachfolgende Messungen sind weniger genau, da sie um diese Verschiebung versetzt sind. Daher ist es für die Präzision von DMS wichtig immer im elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms zu bleiben. Eine Überlastung kann oft durch die richtige Wahl des Messobjekts vermieden werden. Steife Materialien wie Stahl werden bei gleicher Belastung deutlich weniger gedehnt als weiche Materialien, zum Beispiel Aluminium.

Elektromagnetische Interferenz

Externe elektrische Geräte können durch Induktions- oder Leitungsprozesse elektromagnetische Interferenzen (EMI) in Schaltkreisen verursachen [29]. Diese Prozesse erzeugen in der Regel schwache Signale im Hochfrequenzbereich, die in den meisten Fällen vernachlässigt werden können [30]. Aufgrund der Tatsache, dass DMS bei sehr niedrigen Spannungen arbeiten (die Diagonalspannung liegt oft im Bereich $U_D \in [-5, 5]$ mV) reagieren sie stark auf EMI [10]. Um Störungen zu minimieren, müssen DMS daher in einem Abstand zu leistungsstarken elektrischen Geräten platziert werden, die über Strahlung eine Scheinspannung induzieren können und so die Messergebnisse verfälschen. Darüber hinaus muss die Wheatstone-Brückenschaltung der DMS von integrierten Schaltungen isoliert werden, da auch diese über die Anschlussleiter Störungen erzeugen können. Dies ist jedoch nur bedingt möglich, da integrierte Schaltungen für die Verarbeitung und Auswertung der Diagonalspannung U_D benötigt werden und deshalb in die Auswerteeinheit (Integrator) der DMS eingebaut sind. Alle gemessenen Signale können daher durch EMI beeinflusst worden sein, so dass auf die Dehnung nur mit verminderter Genauigkeit geschlossen werden kann.

Um EMI aus dem Signal herauszufiltern, wird eine Wechselspannung als Versorgungsspannung U_0 an die Wheatstone-Brücke angelegt. Die Trägerfrequenz wird im niedrigen Kilohertzbereich so gewählt, dass sie außerhalb der meisten elektromagnetischen Störungen liegt [31]. Das eigentliche Messsignal befindet sich dann als Amplitudenmodulation auf dem Trägersignal. Im Integrator werden dann alle elektromagnetischen Störungen im Hochfrequenzbereich und die Trägerfrequenz ausgefiltert, damit nur das Messsignal übrig bleibt.

2.1.3 Integratoren

Ein Integrator ist die Auswerteeinheit für DMS. Seine Aufgabe ist es, das Rohsignal der Diagonalspannung der Wheatstone-Brücke in einen Dehnungswert umzuwandeln [32]. Aufgrund der oben erwähnten elektromagnetischen Interferenzen wird an die Schaltung eine Wechselspannung im Millivoltbereich angelegt, auf deren Amplitude das eigentliche Messsignal aufmoduliert wurde. Für die Demodulation wird ein Lock-In-Verstärker verwendet, der im Englischen auch als carrier frequency amplifier bezeichnet wird. Der schematische Aufbau des Verstärkers ist in Abbildung 2.4 dargestellt. Um das Signal

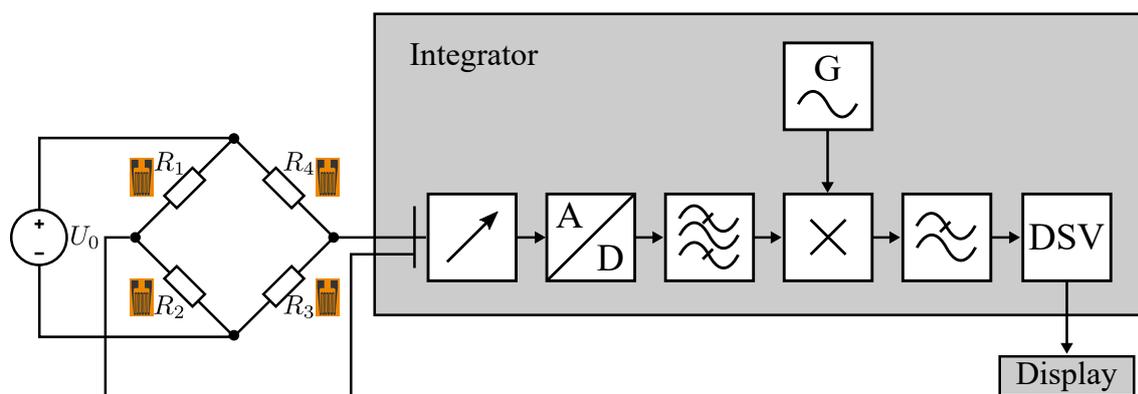


Abbildung 2.4: Schaltplan eines Integrators. Das Spannungssignal der Wheatstone-Brücke wird zunächst durch den Integrator verstärkt und dann in einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert. Da EMI und andere Störquellen herausgefiltert werden müssen, wird um Signal- und Trägerfrequenz ein Bandpass gelegt. Die Amplitudendemodulation erfolgt durch Multiplikation mit einem Referenzsignal, das in einem Generator digital erzeugt werden kann. Nach anschließender Filterung mit einem Tiefpass kann das resultierende Dehnungssignal dann der digitalen Signalverarbeitung (DSV) übergeben und danach auf einem Display angezeigt werden.

überhaupt verarbeiten zu können, muss es mit allen darin enthaltenen Störungen in einen höheren Spannungsbereich hinein verstärkt werden. Nur so kann das Signal in einem Analog-Digital-Wandler digitalisiert werden. Eine digitale Signalverarbeitung ist wesentlich flexibler und benötigt weniger Hardware als eine analoge. Darüber hinaus können digitale Fehlerkorrekturverfahren eingesetzt werden.

Das digitale Signal enthält mehrere Frequenzen. Die Trägerfrequenz ν_T liegt im unteren Kilohertzbereich, um außerhalb der hochfrequenten Störungen der EMI zu liegen [33]. Die Messfrequenz ν_S im Hertz-Bereich liegt in den Seitenbändern neben der Trägerfrequenz als Summe $\nu_T + \nu_S$ und Differenz $\nu_T - \nu_S$ vor (siehe Abbildung 2.5(a)). Der nächste Schritt besteht darin, einen Bandpass um die Träger- und Messfrequenz zu legen, so dass alle EMI-Störungen oder mögliche Störungen mit der Netzfrequenz bei 50 Hz

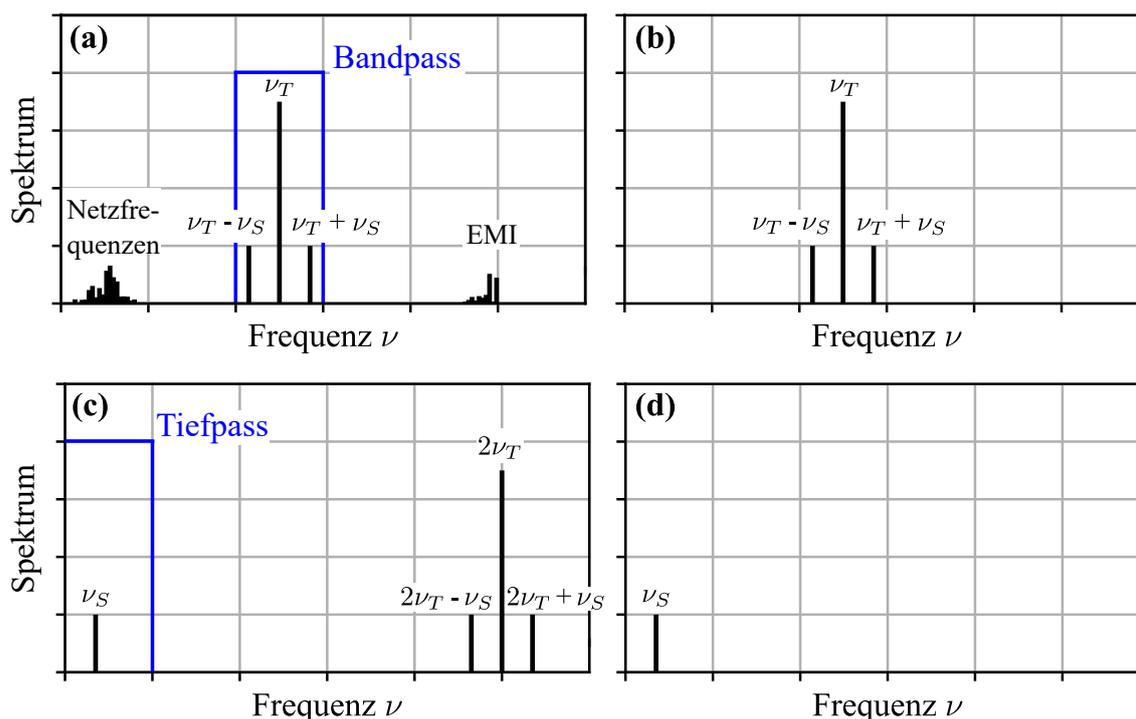


Abbildung 2.5: Ablauf einer Amplitudendemodulation im Frequenzbild. (a): Das Eingangssignal besteht aus der Trägerfrequenz ν_T und zwei Seitenbändern, die die Signalfrequenz ν_S enthalten. Darüber hinaus können Netzfrequenzen oder EMI Störfrequenzen erzeugen, die mit einem Bandpass herausgefiltert werden. (b): Das so gefilterte Signal wird mit einem Referenzsignal multipliziert, das die gleiche Phase und Frequenz wie das Trägersignal hat. (c): Das resultierende Spektrum, in dem die Signalfrequenz ν_S herausgetrennt werden konnte und in einem letzten Schritt mit einem Tiefpassfilter herausgefiltert wird. (d): Das Ausgangsspektrum enthält nun nur noch die gewünschte Signalfrequenz ν_S .

herausgefiltert werden (siehe Abbildung 2.5(b)). Die Demodulation beginnt, indem ein Referenzsignal der gleichen Phase und Frequenz wie das Trägersignal mit dem gefilterten Signal multipliziert wird [34]. Mittels der vorgeschalteten Analog-Digital-Wandler kann das Referenzsignal mit großer Genauigkeit digital erzeugt werden. Die Multiplikation trennt die Messfrequenz ν_S vom Träger und erzeugt ein niederfrequentes Signal nahe dem Gleichanteil (siehe Abbildung 2.5(c)). Im letzten Schritt müssen der Gleichanteil und alle höheren Frequenzen mit einem Tiefpass herausgefiltert werden, so dass nur noch das gewünschte Messsignal übrig bleibt, das dann digital weiterverarbeitet werden kann.

2.2 Optische Sensoren aus Faser-Bragg-Gittern

In Abschnitt 2.1.2 wurden die wichtigsten Störquellen und ihre Kompensationsmethoden für konduktive Dehnungsmessstreifen erläutert. Der Aufwand für eine optimale Materialauswahl, Verkabelung, Verklebung und digitale Datenverarbeitung erhöht einerseits die Komplexität und andererseits den Preis des Messsystems. Insbesondere Integratoren sind aufgrund ihrer zahlreichen fein abgestimmten Komponenten und der optimierten digitalen Signalverarbeitung sehr teuer. Darüber hinaus verursachen die verschiedenen Störquellen weiterhin Unsicherheiten, da Kompensationsmethoden niemals alle Ungenauigkeiten ausgleichen können. Aus diesen Gründen stellen faseroptische Dehnungssensoren eine Alternative zu herkömmlichen konduktiven DMS dar [18, 35, 36]. Anstatt die Widerstandsänderungen eines elektrischen Leiters zu messen, wird ein sogenanntes Faser-Bragg-Gitter (FBG) verwendet, das auf Glasfasertechnologie basiert und daher optisch ausgelesen werden kann [22]. FBG sind periodische Änderungen des Brechungsindex im Kern der Glasfaser, die mit einem hochenergetischen UV-Laser eingeschrieben werden [37]. Wenn das geleitete Licht in einer optischen Faser auf ein FBG trifft, gibt es eine Reflexion von nur einer bestimmten Wellenlänge, die als Bragg-Wellenlänge λ_B bezeichnet wird und von der Gitterperiode Λ abhängig ist. Dies ist der Grund, warum FBG als Dehnungssensoren eingesetzt werden können. Eine Längsdehnung verschiebt die Gitterperiode Λ und damit auch die Bragg-Wellenlänge λ_B , so dass durch deren Messung Rückschlüsse auf die ursächliche Dehnung gezogen werden können. Lichtquelle, Mess- und Auswerteeinheit der FBG-Sensoren ist der Interrogator, der ein Lichtsignal in die Faser koppelt, das Reflexionsspektrum aufnimmt und weiterverarbeitet [38].

2.2.1 Glasfasern

Auch als Lichtwellenleiter bekannt, sind Glasfasern derzeit die schnellste Technologie in der Telekommunikation [39]. Optische Signale können mit viel geringerer Dämpfung als elektrische Signale übertragen werden, und optische Multiplextechniken erhöhen die möglichen Datenraten von Glasfasern weit über die von Kupferkabeln. Der Grundaufbau eines Lichtwellenleiters ist sehr einfach. Im Inneren befindet sich ein sehr dünner Kern aus Quarzglas (Brechungsindex n_K), in dem die eigentliche Übertragung stattfindet. Der Kern ist von einem Mantel aus Quarzglas mit einem leicht verringerten Brechungsindex n_M umgeben, der in vielen Fällen wesentlich dicker als der Kern ist. Der Brechungsindexunterschied wird durch Dotierung des Kerns mit Germanium oder Phosphor erreicht, wodurch der Brechungsindex um etwa 0.03 erhöht wird [39]. Auf Grund dessen tritt an der

Grenzfläche zum Mantel das Phänomen der Totalreflexion ein, das mit dem Snellius'schen Brechungsgesetz

$$n_K \sin \theta_K = n_M \sin \theta_M \quad (2.15)$$

hergeleitet werden kann, wobei θ_K und θ_M der Einfallswinkel bzw. der Brechungswinkel sind [40]. Da $n_K > n_M$ ist der Brechungswinkel θ_M immer größer als der Einfallswinkel θ_K , d.h. der Strahl wird vom Lot weg gebrochen. Bei einem kritischem Einfallswinkel $\theta_K = \theta_c$ beträgt der Brechungswinkel 90° und der Strahl bewegt sich entlang der Grenzfläche. Mit Gleichung (2.15) kann der kritische Winkel

$$\theta_c = \arcsin \left(\frac{n_M}{n_K} \right) \quad (2.16)$$

berechnet werden. Bei Einfallswinkeln $\theta_K > \theta_c$ tritt Totalreflexion auf, bei der der Lichtstrahl beinahe vollständig reflektiert wird. Lediglich ein evaneszentes Feld entsteht, das mit exponentiell abklingender Amplitude in den Mantel hineinragt. Alle drei verschiedenen Strahlengänge sind in Abbildung 2.6 dargestellt.

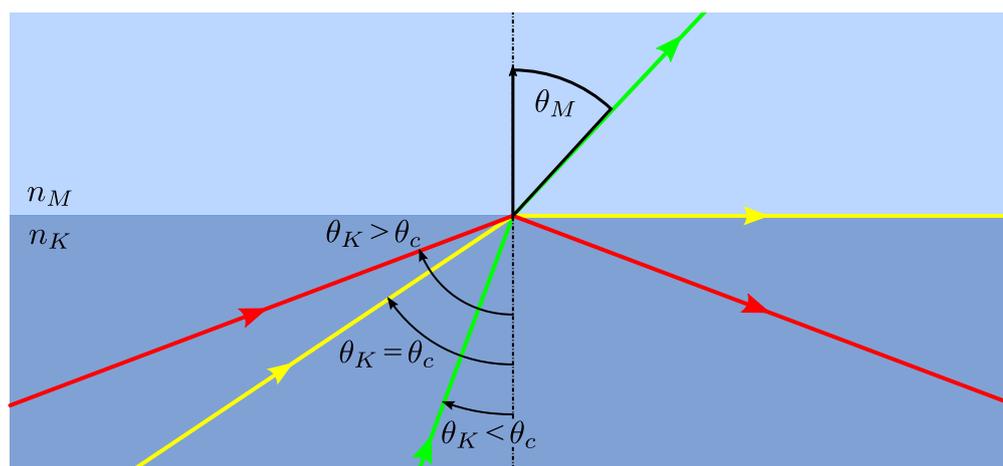


Abbildung 2.6: Veranschaulichung der Totalreflexion. Die drei Strahlen treffen von dem optisch dichteren Kern mit dem Brechungsindex n_K auf den optisch dünneren Mantel $n_M < n_K$. Bei kleinen Einfallswinkeln $\theta_K < \theta_c$ wird der Strahl mit dem Brechungswinkel θ_M in den Mantel gebrochen. Für den kritischen Winkel $\theta_K = \theta_c$ beträgt der Brechungswinkel 90° und der Strahl breitet sich entlang der Grenzfläche aus. Für noch größere Einfallswinkel $\theta_K > \theta_c$ wird der Strahl zurück in den Kern totalreflektiert.

Um zu gewährleisten, dass der Lichtstrahl mit einem ausreichend großen Einfallswinkel $\theta_K > \theta_c$ auf die Grenzfläche zwischen Kern und Mantel trifft, darf der Winkel bei der Einkopplung in die Faser nicht zu groß sein. Mit der Zeichnung des Strahlengangs in Abbildung 2.7 und einfachen trigonometrischen Überlegungen kann der maximale Akzeptanzwinkel

$$\theta_{\max} = \arcsin NA \quad (2.17)$$

bestimmt werden, wobei $NA = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$ die numerische Apertur der Glasfaser ist. Unterhalb des maximalen Akzeptanzwinkels θ_{\max} breitet sich das Licht innerhalb des Kerns mit einer Reihe von Totalreflektionen verlustarm aus.

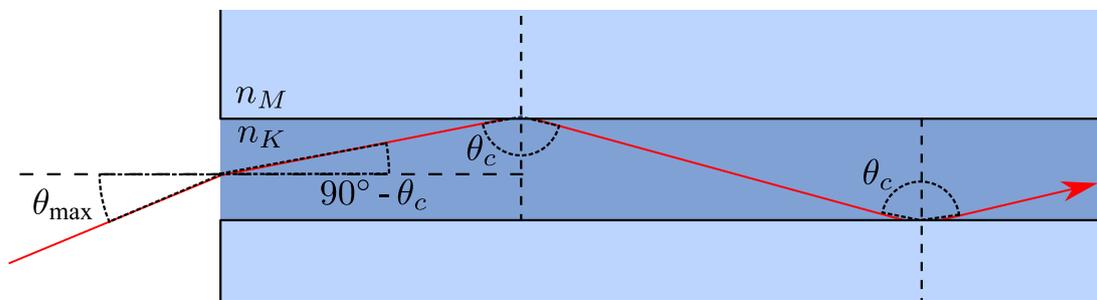


Abbildung 2.7: Illustration des Strahlenganges am Anfang einer Glasfaser. Solange der Strahl unter einem Winkel in die Faser eingekoppelt wird, der kleiner als der maximale Akzeptanzwinkel θ_M ist, breitet sich das Licht im Kern wie ein Zick-Zack aus.

Abhängig vom Kerndurchmesser d_K , der numerischen Apertur NA und der Wellenlänge des geleiteten Lichts λ können sich nur bestimmte Schwingungsmoden in der optischen Faser ausbreiten, die sich in ihrer transversalen Intensitätsverteilung unterscheiden. Häufig wird dazu die normierte Frequenz

$$V = \frac{d_K \pi}{\lambda} NA \quad (2.18)$$

betrachtet, die ein Parameter für das Ausbreitungsverhalten ist. Bei Werten $V < 2.405$ kann in der Faser nur die annähernd gaußförmige Grundmode geleitet werden, während eine größere normierte Frequenz V zu höheren Moden führt [39]. Diese Moden haben mehrere Maxima und Minima und können sich gegenseitig überlagern, so dass sich eine sehr komplexe Intensitätsverteilung ergeben kann. Glasfasern, die nur die Grundmode zulassen, werden als Single-Mode-Faser (SMF) bezeichnet. Effekte wie die Modendispersion können vollständig umgangen werden, so dass Lichtsignale auch über große Entfernungen ungestört übertragen werden können. Nach Gleichung (2.18) gibt es jedoch eine minimale Wellenlänge

$$\lambda_{\text{cutoff}} = \frac{d_K \pi NA}{2.405},$$

unter der auch höhere Moden unterstützt werden, so dass das Spektrum des eingekoppelten Lichts diese Wellenlänge nicht unterschreiten darf. Multimode-Fasern (MMF) haben eine besonders große Grenzwellenlänge λ_{cutoff} , so dass mehrere Moden gleichzeitig übertragen werden können. Da MMF in der Regel einen wesentlich größeren Kerndurchmesser d_K haben, werden sie überall dort eingesetzt, wo nur Leistungsübertragung erforderlich ist oder die Entfernungen so gering sind, dass die Modendispersion wenig Störungen verursacht.

2.2.2 Faser-Bragg-Gitter

Periodische Änderungen des Brechungsindex im Kern einer Glasfaser werden als Faser-Bragg-Gitter (FBG) bezeichnet. Zur Herstellung werden photosensitive Glasfasern und hochenergetische UV-Laser verwendet [12, 37]. Die hohen Intensitäten des Lasers verändern den Brechungsindex der Faser dauerhaft, wobei die Stärke von der Intensität, Dauer der Bestrahlung und der Photosensitivität abhängig ist. Um ein Gitter zu erzeugen, kann die Interferenz zweier Strahlen oder das Beugungsbild einer Phasenmaske verwendet werden. Das Interferenzverfahren und die daraus entstehenden Brechungsindexmodulationen sind in Abbildung 2.8 dargestellt. Die beiden UV-Laser kreuzen sich in der Glasfaser, wodurch

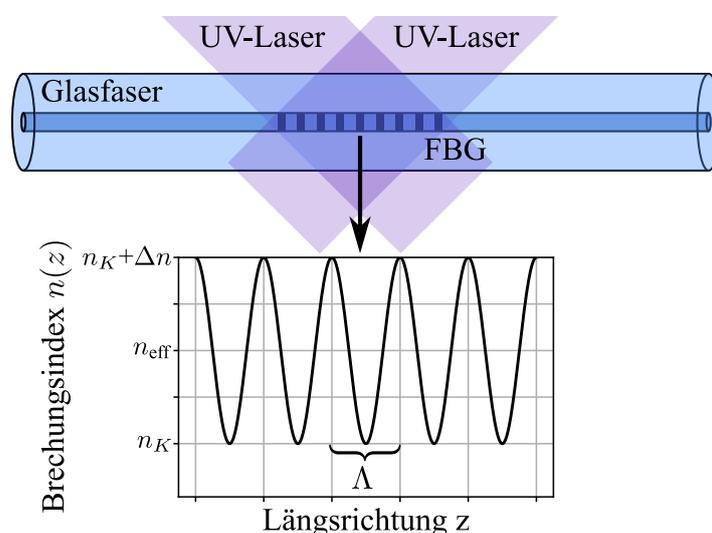


Abbildung 2.8: Herstellungsverfahren eines FBG. Das Intensitätsmuster zweier UV-Laser schreibt eine periodische Änderung des Brechungsindex $n(z)$ in den Kern einer Glasfaser. Der Brechungsindexunterschied Δn und die Gitterperiode Λ können während des Verfahrens eingestellt werden.

eine periodische Intensitätsverteilung

$$I(z) = 2I_0 \left(1 + \cos \frac{2\pi}{\Lambda} z \right) \quad (2.19)$$

in Längsrichtung z der Faser mit einer Gitterperiode Λ und der doppelten Intensität der Laser $2I_0$ als Amplitude erzeugt werden. Die Intensitätsverteilung ändert den Brechungsindex des Kerns

$$n(z) = n_K + \frac{\Delta n}{2} \left(1 + \cos \frac{2\pi}{\Lambda} z \right) \quad (2.20)$$

mit gleicher Periodizität, was zu einem FBG mit einem Brechungsindexunterschied Δn führt [41].

Jede Gitterstelle reflektiert einen kleinen Teil des in der Faser geleiteten Lichts. Diese Reflexion ist wellenlängenabhängig, was durch Interferenz der verschiedenen reflektierten Teilstrahlen hervorgerufen wird. Nur eine einzige Wellenlänge, die auch als Bragg-Wellenlänge bezeichnet wird, resultiert in konstruktive Interferenz, so dass sich alle an den Schichten des Bragg-Gitters reflektierten Teilstrahlen additiv überlagern. Alle anderen Wellenlängen führen zu einer destruktiven Interferenz, d.h. die entsprechenden Teilstrahlen heben sich gegenseitig auf. In einem Reflexionsspektrum kann dies an einem einzelnen hohen Peak an der Stelle der Bragg-Wellenlänge beobachtet werden, während im entsprechenden Transmissionsspektrum an dieser Stelle ein Tief auftritt. Die Bragg-Wellenlänge

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (2.21)$$

ist über den effektiven Brechungsindex $n_{\text{eff}} = n_K + \Delta n/2$ des FBG und die Gitterperiode Λ gegeben. Während der Herstellung des FBG kann die Bragg-Wellenlänge durch Wahl der Gitterperiode Λ und der Stärke des Brechungsindexunterschieds Δn eingestellt werden. Das Reflexions- und Transmissionsverhalten eines FBG ist in Abbildung 2.9 dargestellt. Um die

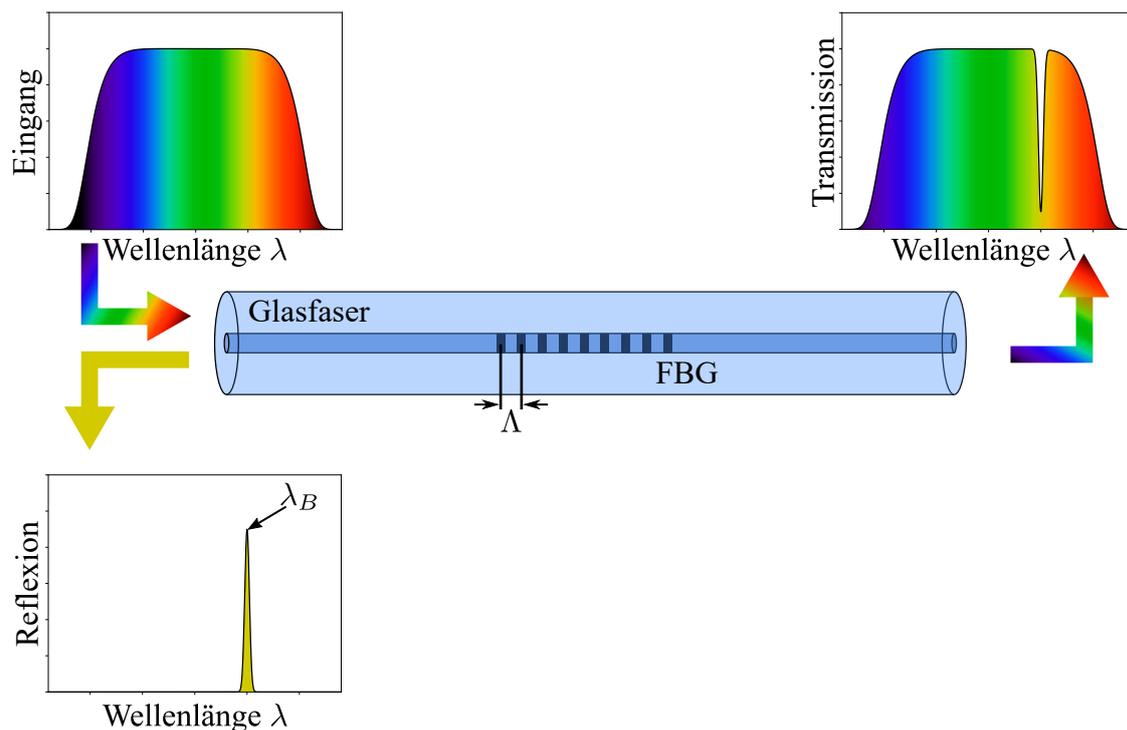


Abbildung 2.9: Reflexions- und Transmissionsverhalten eines FBG mit Gitterperiode Λ . Aus dem breitbandigen Eingangsspektrum wird ausschließlich die Bragg-Wellenlänge λ_B reflektiert, so dass im Reflexionsspektrum nur ein Peak sichtbar ist, der im Transmissionsspektrum fehlt.

Reflektivität der Bragg-Wellenlänge abzuleiten, reichen einfache Interferenzbetrachtungen nicht mehr aus und das FBG muss mit der Coupled-Mode-Theorie behandelt werden [12].

Diese betrachtet die reflektierten und transmittierten Teilstrahlen als Moden mit entgegengesetzter Ausbreitungsrichtung. Aufgrund der Brechungsindexänderungen des FBG koppeln die Moden und tauschen Energie aus. Dies kann durch zwei gekoppelte lineare Differentialgleichungen ausgedrückt werden, die mit den entsprechenden Randbedingungen gelöst werden können. Die sich daraus ergebenden Ausdrücke für die Reflexions- und Transmissionsmoden ergeben im Verhältnis die Reflektivität des FBG

$$R = \tanh^2 \left(\frac{\pi \Delta n N \eta(V)}{2 n_{\text{eff}}} \right), \quad (2.22)$$

mit $\eta(V) \approx 1 - 1/V^2$ als Funktion, die von der normierten Frequenz V aus Gleichung (2.18) anhängig ist [37]. Dementsprechend kann die Reflektivität durch Steigerung des Brechungsindexunterschieds Δn oder der Anzahl der Gitterstellen N erhöht werden, d.h. stärkere und längere FBG reflektieren die Bragg-Wellenlänge λ_B besser als schwache und kurze.

2.2.3 Messverfahren

Ein FBG kann als Dehnungs- und Temperatursensor verwendet werden, da die Bragg-Wellenlänge $\lambda_B = \lambda_B(\varepsilon, T)$ aus Gleichung (2.21) sowohl von der Dehnung ε als auch von der Temperatur T abhängt [22]. Da beide Einflüsse schwer voneinander zu unterscheiden sind, muss ein FBG-Dehnungssensor temperaturkompensiert werden, um genaue Messdaten zu liefern. Andererseits dürfen FBG-Thermometer nicht mechanisch beansprucht werden, so dass keine Dehnung auftritt.

Im Falle eines perfekt temperaturkompensierten FBG ist der Einfluss der Längsdehnung $\varepsilon = \Delta L/L$ in Abbildung 2.10 dargestellt, wobei L die Länge der Faser in Ruhe und $L + \Delta L$ die Länge der Faser im gedehnten Zustand ist. Durch das Strecken der Glasfaser verlängert sich die Gitterperiode Λ und der effektive Brechungsindex n_{eff} verändert sich durch den photoelastischen Effekt [42]. Für die relative Verschiebung der Bragg-Wellenlänge gilt dann:

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon. \quad (2.23)$$

Eine Längsdehnung verteilt sich gleichmäßig auf alle Gitterstellen, so dass die relative Änderung der Gitterperiode

$$\frac{\Delta \Lambda}{\Lambda} = \frac{\Delta L}{L} = \varepsilon \quad (2.24)$$

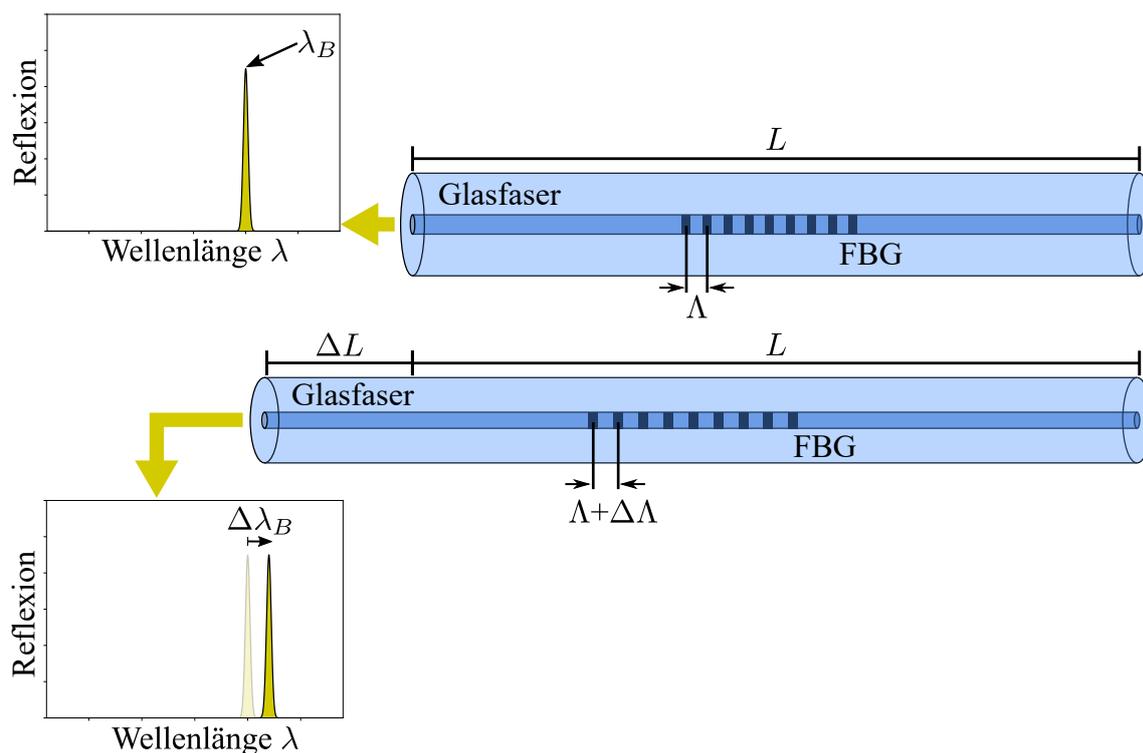


Abbildung 2.10: Einfluss einer Längsdehnung $\varepsilon = \Delta L/L$ auf das Reflexionsverhalten eines FBG mit Gitterperiode Λ . Das ungedehnte FBG reflektiert die Bragg-Wellenlänge $\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda$, die im Reflexionsspektrum als einzelner Peak erkennbar ist. Wird das FBG gedehnt, vergrößert sich die Gitterperiode um $\Delta\Lambda$ und der effektive Brechungsindex n_{eff} verändert sich durch den photoelastischen Effekt. Die daraus resultierende Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda_B$ kann im Reflexionsspektrum beobachtet werden.

gleich der relativen Längenänderung der Faser ist. Da $\Delta\Lambda$ und ε klein sind und die Bezugsdehnung auf den ungedehnten Zustand gesetzt wird, kann die Näherung

$$\Lambda = \frac{\Delta\Lambda}{\varepsilon} \approx \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} \quad (2.25)$$

verwendet werden, wodurch sich der erste Term

$$\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} = 1 \quad (2.26)$$

aus Gleichung (2.23) ergibt.

Um den zweiten Term zu berechnen, betrachtet man den photoelastischen Effekt in einem isotropen Medium unter Längsdehnung [43]. Die Änderung der relativen Impermittivität in allen drei Raumrichtungen

$$\begin{pmatrix} \Delta \left(1/n_x^2 \right) \\ \Delta \left(1/n_y^2 \right) \\ \Delta \left(1/n_z^2 \right) \end{pmatrix} = \underline{\mathbf{P}} \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

wird durch den photoelastischen Tensor $\underline{\mathbf{P}}$ gegeben, der auf den Dehnungstensor $(\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z)^T$ angewendet wird. Durch Dehnung der Faser in Längsrichtung z wird sie in den beiden Querrichtungen x und y mit ihrer Poissonzahl ν gestaucht, so dass:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = -\nu\varepsilon_z := -\nu\varepsilon. \quad (2.28)$$

Für isotrope Medien hat der photoelastische Tensor

$$\underline{\mathbf{P}} = \begin{pmatrix} p_1 & p_2 & p_2 \\ p_2 & p_1 & p_2 \\ p_2 & p_2 & p_1 \end{pmatrix} \quad (2.29)$$

nur zwei unabhängige Elemente p_1 und p_2 , wodurch die relativen Impermittivitäten in Querrichtung

$$\Delta \left(\frac{1}{n_x^2} \right) = \Delta \left(\frac{1}{n_y^2} \right) = (-\nu p_1 - \nu p_2 + p_2)\varepsilon := \Delta \left(\frac{1}{n_{\text{eff}}^2} \right) \quad (2.30)$$

nach Gleichung (2.27) gleich sind. Zusammen mit der Umformung $\Delta \left(1/n_{\text{eff}}^2 \right) = -2/n_{\text{eff}}^3 \Delta n_{\text{eff}}$ und der Näherung $\Delta n_{\text{eff}}/\varepsilon \approx \partial n_{\text{eff}}/\partial \varepsilon$ kann schließlich der zweite Term aus Gleichung (2.23)

$$\frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial \varepsilon} = -\frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_2 - (p_1 + p_2)\nu] \quad (2.31)$$

berechnet werden, wodurch sich die relative Verschiebung der Bragg-Wellenlänge

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left(1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [p_2 - (p_1 + p_2)\nu] \right) \varepsilon := K_\varepsilon \varepsilon \quad (2.32)$$

ergibt, mit K_ε als Dehnungsempfindlichkeit des FBG. Da der photoelastische Effekt im Vergleich zur Längenänderung der Gitterperiode einen entgegengesetzten Effekt hat, ist die Empfindlichkeit $K_\varepsilon < 1$ immer kleiner eins und damit wesentlich geringer als die eines Dehnungsmessstreifens $K_\varepsilon^{\text{DMS}} = 2.1$ aus Gleichung (2.8). Eine gleiche Dehnung ε führt

daher bei einem DMS zu einem größeren Signal als bei einem FBG. Da Wellenlängen jedoch im Vergleich zu Widerständen mit viel höherer Präzision bestimmt werden können, kann mit einem FBG trotzdem eine höhere Messgenauigkeit erreicht werden [44, 45].

FBG können auch als Thermometer eingesetzt werden, indem sie vor mechanischen Einflüssen geschützt werden und so keine Dehnung auftreten kann. Bei einer Temperaturänderung ΔT kann dann eine relative Änderung der Bragg-Wellenlänge

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = \left(\frac{1}{\Lambda} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} + \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T} \right) \Delta T = (\alpha_{\text{GF}} + a_n) \Delta T \quad (2.33)$$

gemessen werden, die vom Wärmeausdehnungskoeffizienten α_{GF} und dem thermooptischen Koeffizienten a_n der Glasfaser abhängt [42]. Die thermische Empfindlichkeit des FBG $K_T = \alpha_{\text{GF}} + a_n$ ist jedoch nicht konstant und muss für höhere Temperaturen mit einem Polynom zweiten Grades beschrieben werden [46]. FBG-Thermometer werden häufig zur Temperaturkompensation von FBG-Dehnungssensoren verwendet. Dabei ist darauf zu achten, dass beide FBG immer die gleiche Temperatur haben und dass das FBG-Thermometer nicht gedehnt wird. Dann kann die temperaturinduzierte Dehnung des Dehnungssensors

$$\varepsilon_T = \left(\frac{K_T}{K_\varepsilon} + \alpha_S - \alpha_{\text{GF}} \right) \Delta T \quad (2.34)$$

vom Messergebnis subtrahiert werden, um ein temperaturkompensiertes Signal

$$\varepsilon_{\text{TK}} = \varepsilon - \varepsilon_T \quad (2.35)$$

zu erhalten. Bei funktionierender Temperaturkompensation beinhaltet ε_{TK} nur noch mechanische Einflüsse. In Gleichung (2.34) wurde dabei zusätzlich berücksichtigt, dass das Substrat, auf dem der Dehnungssensor aufgebracht ist, ebenfalls einen Wärmeausdehnungskoeffizienten α_S hat und somit auch eine temperaturinduzierte Dehnung verursacht [47].

2.2.4 Interrogatoren

Genau wie konduktive DMS benötigen auch FBG eine Auswerteeinheit, die Rohdaten sammelt und zu einem Dehnungssignal verarbeitet. Diese werden Interrogatoren genannt und enthalten zusätzlich eine Lichtquelle, die in eine Glasfaser eingekoppelt werden kann. Trifft das Licht auf ein FBG, kommt es zur Reflexion der Bragg-Wellenlänge λ_B , die zurück zum Interrogator propagiert. Durch ein optischen Zirkulator wird das Reflexionsspektrum zu Detektoren geleitet, um die Bragg-Wellenlänge λ_B zu erfassen und eine Dehnung ε mit Gleichung (2.32) zu berechnen [39, 48]. Abhängig von der Bandbreite der Licht-

quelle können auch mehrere FBG in einer einzigen Faser eingesetzt werden. Beim so genannten Wellenlängenmultiplexing werden die Bragg-Wellenlängen der einzelnen FBG unterschiedlich gewählt, so dass das am Interrogator ankommende Reflexionsspektrum nun mehrere Peaks enthält, die jeweils einem FBG zugeordnet werden können [49]. Limitiert wird das Multiplexing-Verfahren durch die Breite der Bragg-Peaks und der maximalen Verschiebung $\Delta\lambda_B$, die ein FBG unter Dehnung oder Temperatureinfluss erhalten kann. Im Wellenlängenbereich von 1510 nm bis 1590 nm können daher etwa 15 FBG eingesetzt werden [42].

Die Messmethode eines Interrogators hat sich im Laufe der Zeit stark gewandelt. Das bisherige Verfahren ist in Abbildung 2.11(a) dargestellt und verwendet eine breitbandige Lichtquelle, die in eine Glasfaser eingekoppelt wird [38]. Für jedes FBG enthält das Reflexionsspektrum einen Peak bei den jeweiligen Bragg-Wellenlängen λ_{B1} , λ_{B2} , λ_{B3} , die durch einen optischen Zirkulator zu einem abstimmbaren Faser-Fabry-Pérot-Filter (engl. Fiber Fabry-Pérot Tunable Filter, FFP-TF) geleitet werden. Dieser wirkt wie ein Bandpass, der nur für einen kleinen Wellenlängenbereich durchlässig ist. Durch einen piezoelektrischen Wandler wird der Spiegelabstand des FFP-TF so abgestimmt, dass der durchlässige Wellenlängenbereich über das gesamte Spektrum durchfahren werden kann. Ein nachgeschalteter Photodetektor misst permanent das vom FFP-TF durchgelassene Licht und kann so das Reflexionsspektrum des FBG zusammensetzen. Befindet sich der Bandpass genau über einer Bragg-Wellenlänge, misst der Photodetektor einen starken Ausschlag, da das Licht einer FBG-Reflexion den Filter durchquert. An Positionen zwischen den Peaks wird jedoch kaum Licht detektiert, da der FFP-TF die Reflexionspeaks der Bragg-Wellenlängen herausfiltert. Das Signal des Photodetektors wird dann an eine Signalverarbeitungseinheit weitergeleitet, die die genaue Position der Bragg-Peaks herausfindet und die drei Dehnungen ε_1 , ε_2 , ε_3 berechnet, die zum jeweiligen FBG1, FBG2 oder FBG3 gehören. Ein Problem der Messmethode ist die Nichtlinearität des piezoelektrischen Wandlers, die eine präzise Einstellung des Spiegelabstands erschwert. Eine unsichere Position des Bandpass führt zu Ungenauigkeiten in den Messergebnissen.

Heutzutage befindet sich der FFP-TF nicht mehr vor dem Photodetektor, sondern in oder direkt hinter einem Halbleiterlaserverstärker (engl. Semiconductor Optical Amplifier, SOA) [50]. Durch die Verstärkung von spontaner Emission produziert dieser ein breitbandiges Lichtspektrum mit hoher Intensität. Der Aufbau des Interrogators ist in Abbildung 2.11(b) dargestellt. Nach Passieren des Bandpassfilters hat der Laser nur noch ein sehr schmales Spektrum, das durch den piezoelektrischen Wandler verschoben werden kann. Die hohen Intensitäten des SOA ermöglichen es, das Licht durch einen optischen Splitter in mehrere Glasfasern aufzuteilen. Das in die Fasern eintretende Licht kann bereits durch den FFP-TF verändert werden, so dass die Reflexionen der FBG bereits von seiner Position

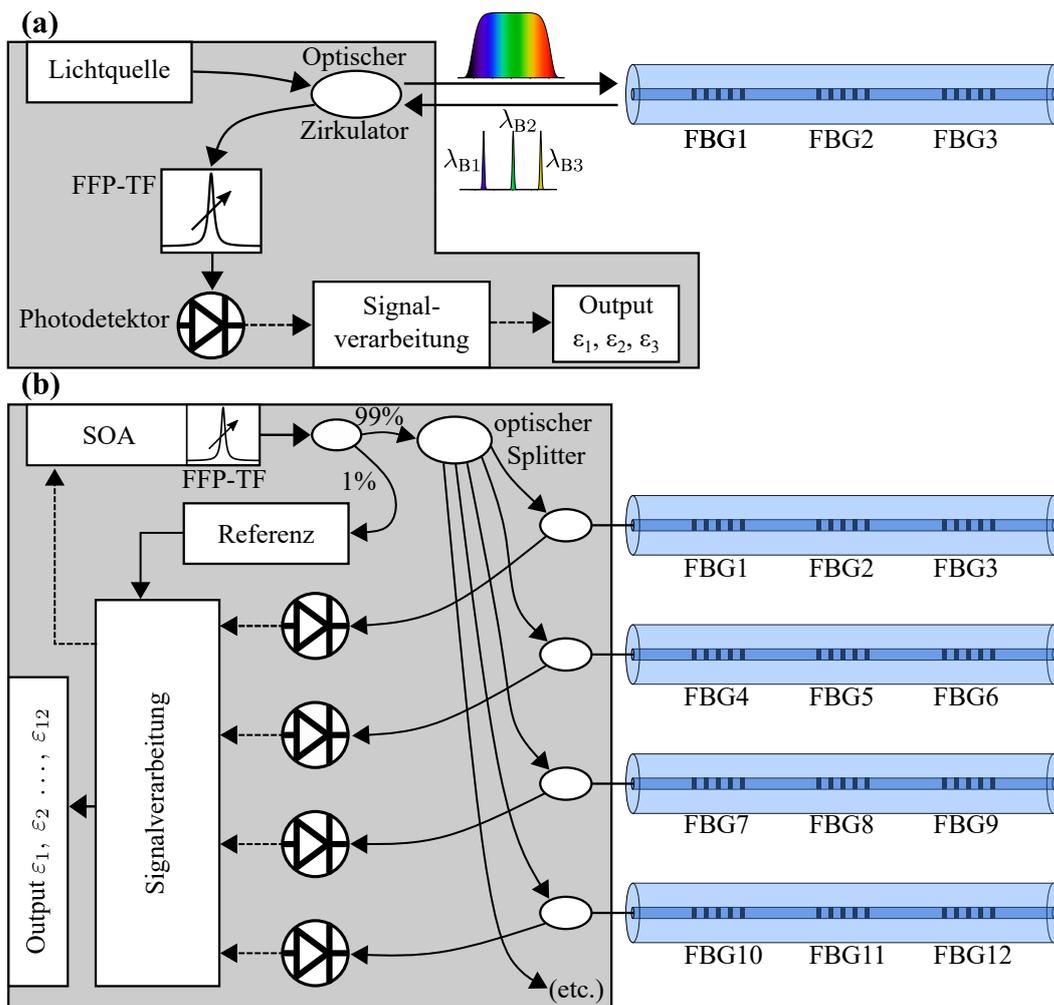


Abbildung 2.11: Funktionsweise von zwei Interrogatortypen. (a): Eine breitbandige Lichtquelle wird in eine Glasfaser mit mehreren FBG eingekoppelt. Das Reflexionsspektrum enthält die Bragg-Wellenlängen λ_{B1} , λ_{B2} und λ_{B3} und wird durch einen optischen Zirkulator zu einem FFP-TF geleitet, der nur einen kleinen Wellenlängenbereich passieren lässt. Da der Filter mit einem piezoelektrischen Wandler verbunden ist, kann der Wellenlängenbereich verschoben werden, und der nachgeschaltete Photodetektor kann das gesamte Spektrum messen und weiterleiten. Eine anschließende Signalverarbeitung berechnet die Dehnungen ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 der FBG. (b): Der derzeit verwendete Interrogatortyp, bei dem sich der FFP-TF hinter einem SOA befindet und zur Steuerung des Laserspektrums verwendet wird. Somit ist kein weiterer Filter vor den Photodetektoren notwendig. Die hohe Intensität des Lasers erlaubt das gleichzeitige Auslesen mehrerer Glasfasern, und die Position des FFP-TF erlaubt eine Wellenlängenreferenzierung, die den piezoelektrischen Wandler regelmäßig neu kalibriert.

abhängen. Für jede Faser gibt es einen Photodetektor, der die Intensität der momentanen Wellenlänge, die durch die FFP-TF gegeben ist, erfasst. Wenn der piezoelektrische Sensor das gesamte Spektrum durchlaufen hat, können aus diesen Daten die Reflexionsspektren

der einzelnen Fasern zusammengestellt werden. Eine Signalverarbeitungseinheit verwendet die Signale, um schließlich die entsprechenden Dehnungen $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_{12}$ zu berechnen. Der Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Wellenlängenreferenzierung. Zu diesem Zweck wird ein kleiner Teil des Lichts ($\sim 1\%$) vor der Einkopplung in die Glasfasern in einen Referenzarm geleitet. Dieser kann die aktuelle Wellenlänge des Lasers genau bestimmen und gibt diese Information durch die Signalverarbeitungseinheit an den FFP-TF weiter. Durch die permanente Rekalibrierung werden nichtlineare Einflüsse minimiert, so dass genauere Messergebnisse erzielt werden können.

2.3 Wägezellen

Wägezellen werden in einer Vielzahl von Wägeanwendungen eingesetzt. In der Industrie werden sie für hochpräzise Laborwaagen, Hochlastwaagen für Fahrzeuge oder auch Förderbandwaagen verwendet [9]. Sie bestehen aus einem metallischen Federelement, an dem ein oder mehrere Dehnungssensoren befestigt sind. Wenn eine Last auf die Wägezelle aufgebracht wird, bewirkt die Elastizität des Metalls eine Verformung des Federelements und damit der Dehnungssensoren. Das resultierende Signal ist proportional zur Last, so dass sein Gewicht direkt bestimmt werden kann. Je genauer die Sensoren und je besser diese auf das Federelement abgestimmt sind, desto genauer kann das Gewicht bestimmt werden [51].

2.3.1 Aufbau

Eine Biegebalken-Wägezelle hat einen stabförmigen Metallträger als Federelement. Ein Ende muss fest an einer Struktur verankert sein, während das zweite Ende frei schwingen kann. Wenn das freie Ende mit einem Gewicht belastet wird, dehnt sich der gesamte Biegebalken [52]. Diese Dehnung wird mit Dehnungssensoren gemessen, deren Signal von einer Auswerteeinheit ausgelesen und verarbeitet wird. Das Signal ist direkt proportional zum aufgetragenen Gewicht, so dass die Wägezelle als Waage benutzt werden kann.

Belastungen F auf das freie Ende führen zu einer Durchbiegung des Federelements, in dem sich das Material krümmt. Der obere Bereich des Biegebalkens wird gedehnt, während der untere Bereich gestaucht wird. Diese Art der Verformung ist in Abbildung 2.12(a) dargestellt. Dehnungssensoren können an der Ober- und Unterseite des Federelements angebracht werden, um die resultierende Dehnung bzw. Stauchung an der Oberfläche zu messen. Diese ist jedoch stark von der Längsposition der Last abhängig, d.h. gleiche Gewichte führen je nach Position zu unterschiedlichen Dehnungs- und Stauchungswerten. Aus diesem Grund werden Federelemente mit nur einem Biegebalken für Wägezellen kaum noch eingesetzt [52].

Durch eine Aussparung in der Mitte des Federelements wird dieses in zwei übereinander liegende Biegebalken geteilt, so dass diese Art von Wägezelle als Doppelbiegebalken bezeichnet wird. In Abbildung 2.12(b) wird die Verformung einer Doppelbiegebalken-Wägezelle veranschaulicht. Diese Konstruktion gewährleistet eine rein vertikale Absenkung des Belastungspunktes, wodurch die Wägezelle unempfindlicher auf die Längsposition der Belastung F reagiert [9]. Anstelle einer gleichmäßigen Dehnung bzw. Stauchung an der

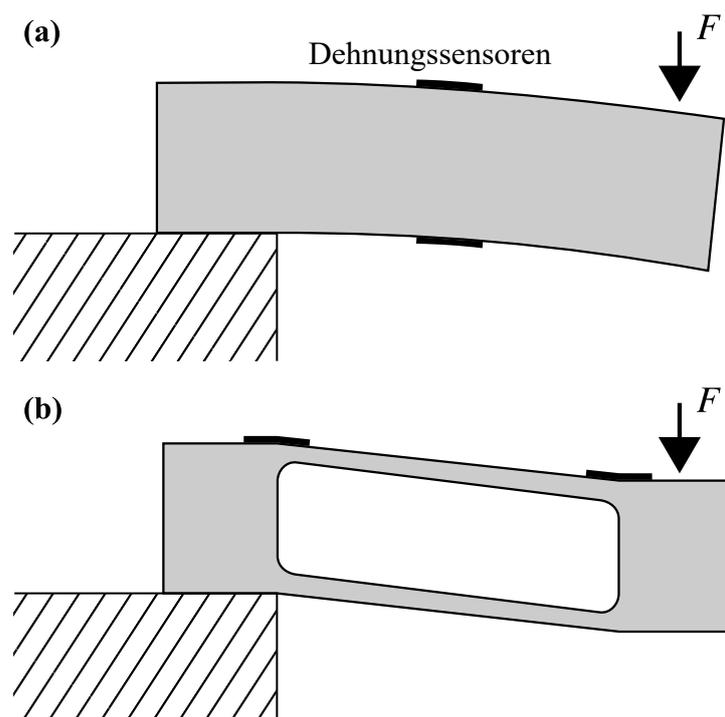


Abbildung 2.12: Durchbiegung von Federelementen für zwei verschiedene Wägezellentypen. (a): Federelement mit nur einem Biegebalken, wodurch es auf eine Belastung F mit einer gekrümmten Verformung reagiert. (b): Eine Doppelbiegebalken-Wägezelle, welche sich durch die Belastung F s-förmig verformt. Für beide Wägezellen werden Dehnungssensoren verwendet, um die Verformung zu messen.

Oberfläche, wie es bei Wägezelle mit nur einem Biegebalken der Fall wäre, entstehen durch die s-förmige Verformung des Doppelbiegebalkens lokale Punkte, an denen ein Dehnungs- bzw. Stauchungsmaximum angenommen wird. Wo sich diese Punkte befinden, kann durch die Form und Größe der mittigen Aussparung gesteuert werden. Dehnungssensoren an diesen Punkten reagieren empfindlicher auf Belastungen, weshalb dieser Wägezellentyp häufig für kleinere Lasten (<5 t) eingesetzt wird.

2.3.2 Federeigenschaften

Im linear-elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramms verhält sich Metall wie eine Feder. Bei jeder Verformung wird eine Rückstellkraft erzeugt, die bestrebt ist, die ursprüngliche Form wiederherzustellen. Die Stärke dieser Kraft ist durch die Federkonstante k gegeben und hängt von der Geometrie und den Materialeigenschaften

des Metalls ab. Bei einem Metallträger, der an einem Ende fest verankert ist, ergibt sich eine Federkonstante [53]

$$k = E \frac{wt^3}{4L^3}, \quad (2.36)$$

mit E , w , t und L als Elastizitätsmodul, Breite, Dicke bzw. Länge des Metallträgers. Das Elastizitätsmodul E ist der Koeffizient, der die lineare Beziehung zwischen Spannung σ und Dehnung ε beschreibt:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.37)$$

und somit aus der Steigung des Spannungs-Dehnungs-Diagramms abgelesen werden kann.

Die Federelemente von Wägezellen bestehen in der Regel aus Aluminium ($E = 69 \text{ GPa}$ [54]) oder Edelstahl ($E = 200 \text{ GPa}$ [55]). Bei gleicher Belastung verformt sich Aluminium daher etwa dreimal so stark wie Edelstahl. Bei Aluminium mit einer Streckgrenze σ_{YS} zwischen 124 MPa und 290 MPa besteht jedoch ein hohes Risiko der Überlastung, sobald große Gewichte gemessen werden müssen. Bestimmte Edelstahl-Legierungen können dahingegen Streckgrenzen $\sigma_{YS} = 1490 \text{ MPa}$ erreichen und bleiben damit selbst unter großer Belastung im linear-elastischen Bereich.

Eine Fehlerquelle sind Resonanzeffekte, die auftreten können, wenn die Wägezelle bei ihrer Eigenfrequenz

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.38)$$

angeregt wird, wobei m die Masse der Wägezelle ist [23]. Da die Eigenfrequenz für Aluminium- und Edelstahl-Wägezellen üblicherweise einige hundert Hertz beträgt, kann die Belastungsrate der Gewichte keine Resonanzeffekte verursachen. Größere Aggregate oder Geräte in unmittelbarer Nähe können jedoch mechanische Schwingungen erzeugen, die über die Tragstruktur der Wägezelle zum Federelement gelangen. Frequenzen $f > 0.2f_e$, die höher als 20% der Eigenfrequenz sind, können Fehler im Messsignal verursachen. Noch höhere Frequenzen $f \approx f_e$ in der Nähe der Eigenfrequenz können sogar zur Beschädigung oder Zerstörung der Wägezelle führen [23]. Aus diesem Grund ist es wichtig, mechanische Schwingungen an der Tragstruktur zu messen und gegebenenfalls Dämpfer oder Materialien einzubauen, die höhere Frequenzen herausfiltern.

2.4 Aktuelle Bandwaagensysteme

Wägezellen können als Gewichtssensor einer Bandwaage verwendet werden. Diese speziellen Waagen werden unter einem Förderband montiert, um das Gewicht eines Fördergutes zu bestimmen. Da Förderbänder in der Industrie vielfältig zum Transport eingesetzt werden, kommen Bandwaagen überall dort zum Einsatz, wo das Gewicht schnell und kontinuierlich gemessen werden muss. Der große Vorteil einer Bandwaage im Vergleich zu einer Plattformwaage ist, dass der Materialstrom für das Wiegen nicht angehalten werden muss, was Zeit und zusätzliche Arbeitsschritte spart [56].

Das Design einer Bandwaage hat zum Ziel, das Gewicht des darüber liegenden Materials möglichst störungsfrei auf eine oder mehrere Wägezellen zu übertragen, die dieses dann in ein verarbeitbares Signal umwandeln. Neben dem Gewicht des Materialflusses wird oft auch die Fördergeschwindigkeit gemessen, um die pro Zeit transportierte Materialmenge zu berechnen, die auch als Durchsatz bezeichnet wird. Auch für die Geschwindigkeitsmessung können je nach Anwendung unterschiedliche Sensortypen eingesetzt werden. Das Dehnungssignal der Wägezellen und die Geschwindigkeit werden zusammen in einer Auswerteeinheit verarbeitet, die mit Hilfe von digitaler Signalverarbeitung das Gewicht des Materials und den Durchsatz berechnen kann.

2.4.1 Förderbänder

Förderbänder werden zum Transport von Material auf stationären Wegen eingesetzt. Dabei wird das Material auf einem Gurt befördert, der um eine Antriebs- und Umlenktrummel gespannt ist [57]. Die Antriebstrummel bringt den Gurt so in Bewegung, dass das Obertrum in Förderrichtung gezogen wird, während das Untertrum in die entgegengesetzte Richtung geschoben wird. Beide Abschnitte müssen stabilisiert und arretiert werden, damit sich der Gurt nicht verschiebt. Diese Funktion wird durch eine Unterkonstruktion aus Tragrollen oder Gleitblechen übernommen. Hierbei sind die Tragrollen in regelmäßigen Abständen montiert, während das Gleitblech den Gurt durchgehend stabilisiert und arretiert. Eine Spannstation am Untertrum hält den Gurt unter Spannung, damit er nicht durchhängt und die Antriebstrummel einwandfrei arbeiten kann. Da der Gurt ständig mit dem Fördermaterial in Kontakt ist, muss er über einen langen Zeitraum hohen Belastungen standhalten. Scharfkantige Gegenstände dürfen keine Risse verursachen und damit den Gurt beschädigen. Der schematische Aufbau eines Förderbandes ist in Abbildung 2.13 dargestellt. Bei Schüttgütern, wie Kohle oder Recyclingmaterial, ist es wichtig, dass beim Transport kein Material von den Bandkanten fällt. Um diesem Problem entgegenzuwirken, kann das Obertrum in

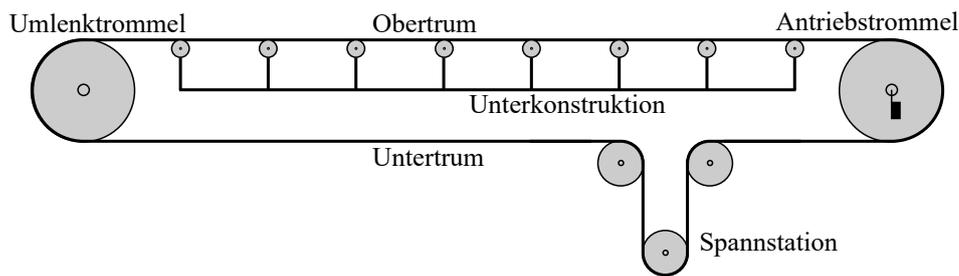


Abbildung 2.13: Schematischer Aufbau eines Förderbandes. Ein Gurt ist über eine Antriebs- und Umlenktrummel gespannt. Das Obertrum, auf dem das Fördergut lastet, wird von einer Unterkonstruktion getragen, während sich am Untertrum eine Spannstation befindet, die die Bandspannung aufrechterhält.

zwei verschiedenen Formen vorliegen [58]. Beim Muldengurt sind die Bandkanten nach oben gewölbt, so dass sich das Material in der Mitte zentriert. Die Muldenform wird in der Regel durch dreiteilige Tragrollen gestützt. Zwischen den Tragrollen wird der Gurt nicht stabilisiert, wodurch schwere oder herabfallende Gegenstände nur schlecht gehalten werden können. Aufgrund der geringen Reibung der Tragrollen kann ein Muldengurt jedoch mit geringer Antriebsleistung und hoher Fördergeschwindigkeit betrieben werden. Im Gegensatz dazu haben sogenannte Gleitgurte mehr Reibung, sind aber auch wesentlich stabiler. Ein flacher Gurt gleitet auf einer darunter liegenden Metallplatte und die Bandkanten haben abgeschrägte Seitenwände, so dass das Material auf dem Gurt verbleibt. Im Hohlraum zwischen der Seitenwand und dem Gurt kann sich jedoch Material ansammeln und Störungen verursachen, so dass das Förderband gegebenenfalls gereinigt werden muss. Die flache Form führt zu einer stärker verteilten Bandbelegung, was z.B. für Sortieraggregate wichtig ist. In Abbildung 2.14 werden die beiden Gurtformen im Profil dargestellt.



Abbildung 2.14: Mulden- und Gleitgurt im Profil. Muldengurte werden in der Regel von Tragrollen gehalten, während Gleitgurte auf einer Metallplatte gleiten und das Material durch Seitenwände vor dem Herabfallen geschützt wird.

Gurte sind in der Regel nicht in der richtigen Länge erhältlich, so dass sie zugeschnitten werden müssen. Nachdem der Gurt in den Förderer eingebaut wird, werden die beiden Schnittstellen daher wieder miteinander verbunden. Besonders bei hohen Gurtspannungen stellt diese Verbindung die Schwachstelle des Gurtes dar, an der Risse oder andere Beschädigungen auftreten können. Um die Lebensdauer des Gurtes zu erhöhen, ist es daher wichtig, die beiden Gurtenden möglichst stabil miteinander zu verbinden [57]. Hierfür gibt

es zwei Methoden: Zum einen können Klammern aus Metall eine mechanische Verbindung zwischen den Gurtenden herstellen. Zum anderen kann eine Vulkanisierlösung verwendet werden, um die Gurtenden zusammenzukleben. Die mechanische Methode ist schneller und kostengünstiger, aber Klemmverbindungen sind nicht so stabil und langlebig wie Vulkanisierverbindungen. Dementsprechend werden mechanische Verbindungen nur dann eingesetzt, wenn eine Vulkanisation der Gurtenden nicht möglich ist.

2.4.2 Bandwaagen

Bandwaagen werden in der Regel unter Muldengurten montiert. Mittige Gewichte sind leichter zu messen als die breite Bandverteilung eines Gleitgurtes, und Tragrollen zentrieren das Gewicht auf einzelne Stellen unter dem Förderband, während eine durchgängige Metallplatte das Gewicht breit verteilt [56]. Eine herkömmliche Konstruktion einer Muldengurt-Bandwaage ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Normalerweise werden

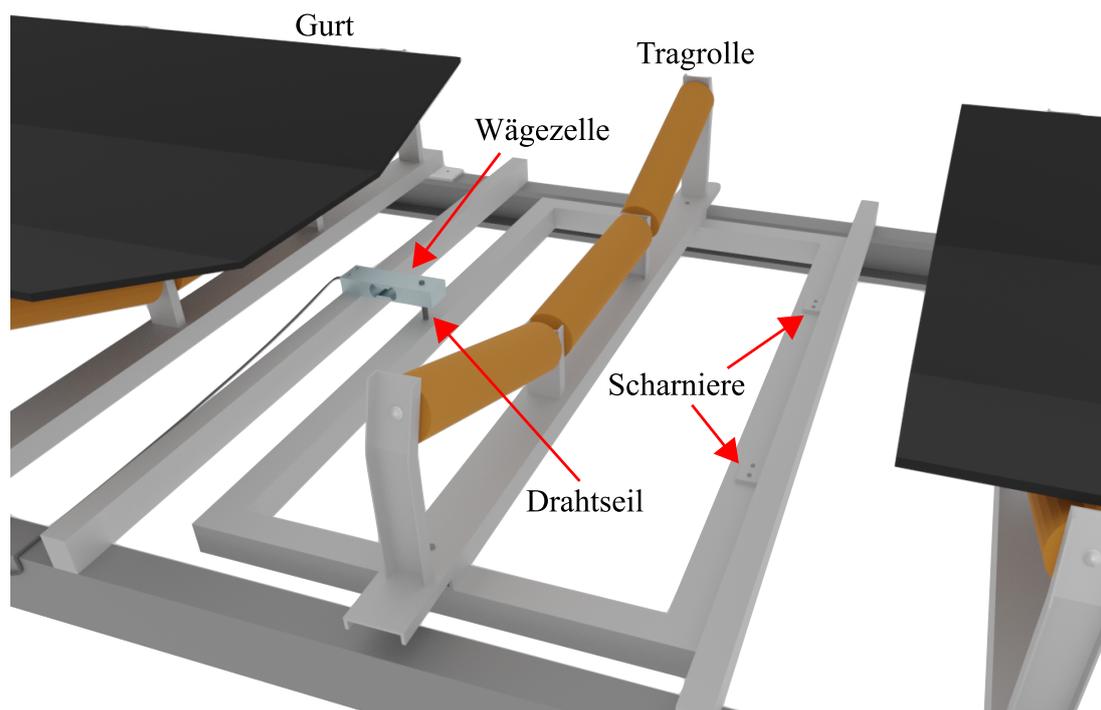


Abbildung 2.15: Konstruktion einer herkömmlichen Muldengurt-Bandwaage. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist ein kleiner Teil des Gurtes nicht dargestellt. Die Bandwaage besteht aus einer Tragrolle, die auf einem Wiegerahmen montiert ist. Um Querkräfte zu vermeiden, ist der Rahmen über ein Drahtseil mit der Wägezelle verbunden. Sobald Material auf dem Förderband transportiert wird, drückt das zusätzliche Gewicht auf den Wiegerahmen und damit auch auf die Wägezelle.

Tragrollen auf Stahlträger geschraubt und auf diese Weise befestigt [57]. Zur Montage einer Bandwaage wird eine Tragrolle vom Stahlträger gelöst und auf einem Wiegerahmen angebracht. Dieser ist auf der einen Seite über Scharniere mit einem Querbalken und auf der anderen Seite über ein Drahtseil mit einer Wägezelle verbunden. Das Drahtseil dient zur Vermeidung von Querkräften auf die Wägezelle, da es nur zur Belastung an einem einzigen Punkt kommt. Das Gesamtgewicht des Wiegerahmens, der Tragrolle, des Bandabschnitts und des auf diesem Abschnitt geförderten Materials wird auf die Wägezellen geladen. Das konstante Gewicht kann als Offset vom Messsignal abgezogen werden, so dass nur das Gewicht des oben liegenden Materials gemessen wird.

Um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen, ist die Konstruktion und präzise Montage von größter Bedeutung [23]. Die Genauigkeit der Bandwaage hängt zum Beispiel stark von der Höhe der Tragrolle ab. Ist diese im Verhältnis zu den benachbarten Tragrollen zu niedrig eingestellt, liegt der Gurt nicht richtig auf und kleine Gewichte können unerkannt passieren. Dagegen führt eine zu hohe Tragrolle zu mehr Gurtspannung und damit zu einer nach unten gerichteten Kraft, was vor allem bei schweren Gewichten Messungen ungenau macht. Die optimale Höhe muss millimetergenau eingestellt werden, da schon kleine Abweichungen das Ergebnis stark beeinflussen können.

Ein damit zusammenhängendes Problem ist die Gurtspannung. Zu hohe Gurtspannungen können ebenfalls zu einer schlechten Auflage des Gurtes auf die Tragrollen führen, während zu niedrige Gurtspannungen einen Buckel erzeugen, über den das Fördergut laufen muss. Der daraus resultierende kleine Hüpfen führt zu Messfehlern oder sogar zum Verschütten von Material. Bei der Einstellung der Gurtspannung ist zu beachten, dass sich diese aufgrund von Reibungswärme verändern kann [59]. Förderbänder benötigen in der Regel eine Einlaufzeit von 15 Minuten, in der sich der Gurt erwärmt und dadurch elastischer und länger wird. Die Gurtspannung während des Betriebs ist daher in der Regel geringer als im Stillstand des Förderbandes.

Darüber hinaus spielt auch die unmittelbare Umgebung der Bandwaage eine wichtige Rolle. Neigungen des Förderbandes können dazu führen, dass Material zurückrollt und ein zweites Mal gemessen wird. Um ein Zurückrollen des Materials zu verhindern, gibt es Förderbänder mit Mitnehmern, die aber das Messergebnis ebenfalls verfälschen können, so dass eine horizontale Messung immer bevorzugt werden sollte.

Wie in Abschnitt 2.3.2 erwähnt, können Schwingungen vom Förderband oder anderen Aggregaten die Wägezellen in Resonanz bringen. Die daraus resultierenden Schwingungen beeinflussen die Gewichtsbestimmung und können im ungünstigsten Fall sogar zum Ausfall

des Wägesystems führen. Resonanz kann weitestgehend verhindert werden, indem die Bandwaage in der Nähe einer tragenden Struktur montiert wird.

2.4.3 Geschwindigkeitsmessung

Der Durchsatz eines Förderbandes kann nur berechnet werden, wenn die Fördergeschwindigkeit bekannt ist. Häufig kann die Geschwindigkeit an der Antriebstrommel eingestellt werden, aber dieser Richtwert kann von der tatsächlichen Geschwindigkeit geringfügig abweichen. Jede Unsicherheit wird bei der Berechnung des Durchsatzes weitergegeben, so dass selbst mit einer absolut genauen Bandwaage, nur fehlerhafte Durchsatzwerte bestimmt werden können.

Im einfachsten Fall wird die Fördergeschwindigkeit durch ein Messrad bestimmt, das mit dem Ober- oder Untertrum des Förderbandes in Kontakt gebracht wird [56]. Ein magnetischer Sensor misst die Zeitspanne T zwischen den Umdrehungen des Rades. Bei bekanntem Durchmesser d kann die Geschwindigkeit

$$v = \frac{\pi d}{T} \quad (2.39)$$

dann direkt berechnet werden. Messräder sind preiswert und sehr einfach zu installieren, können aber bei zu hoher Feuchtigkeit oder bei Verunreinigungen vom Förderband rutschen. Dadurch wird die gemessene Geschwindigkeit reduziert, obwohl sich die tatsächliche Geschwindigkeit nicht notwendigerweise verändert hat.

Dieses Problem kann durch die Verwendung eines Wechselstromgenerators als Geschwindigkeitssensor vermieden werden [60]. Der Rotor des Generators kann direkt an die Umlenk- oder Antriebstrommel gekoppelt werden, was ein Durchrutschen weitgehend verhindert. Der Rotor induziert eine Wechselspannung

$$U_{\text{ind}} = U_0 \sin [\omega(v) t] \quad (2.40)$$

deren Frequenz $\omega(v)$ von der Geschwindigkeit v abhängt. Zusammen mit dem Durchmesser d der entsprechenden Trommel kann dann die Geschwindigkeit

$$v = \frac{\omega d}{2} \quad (2.41)$$

bestimmt werden. Das Problem dieser Messmethode ist der Abstand zwischen Geschwindigkeitssensor und Bandwaage. Um Resonanzeffekte zu vermeiden, wird die Bandwaage

so weit wie möglich von der Umlenk- oder Antriebstrommel entfernt aufgestellt. Wenn sich das Band über diesen Abstand bewegt, kann sich seine Geschwindigkeit ändern.

Noch genauere Ergebnisse der Geschwindigkeitsmessung lassen sich mit einer zweiten Bandwaage erzielen, die direkt hinter der ersten montiert wird [20]. Da beide Waagen das gleiche Signal, aber mit einem Zeitversatz $DS_2(t) = DS_1(t - T)$ aufzeichnen, zeigt die Kreuzkorrelation

$$R(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} DS_1(t) DS_2(t - \tau) dt \quad (2.42)$$

einen deutlichen Hochpunkt am Punkt $\tau = T$. Dieser gibt die Zeit an, die das Material von der ersten zur zweiten Bandwaage benötigt, da dort die beiden Signale optimal korrelieren. Die Signale der beiden Bandwaagen sind in Abbildung 2.16(a) und (b) dargestellt. In Abbildung 2.16(c) ist die Kreuzkorrelation mit markiertem Hochpunkt zu sehen. Da der

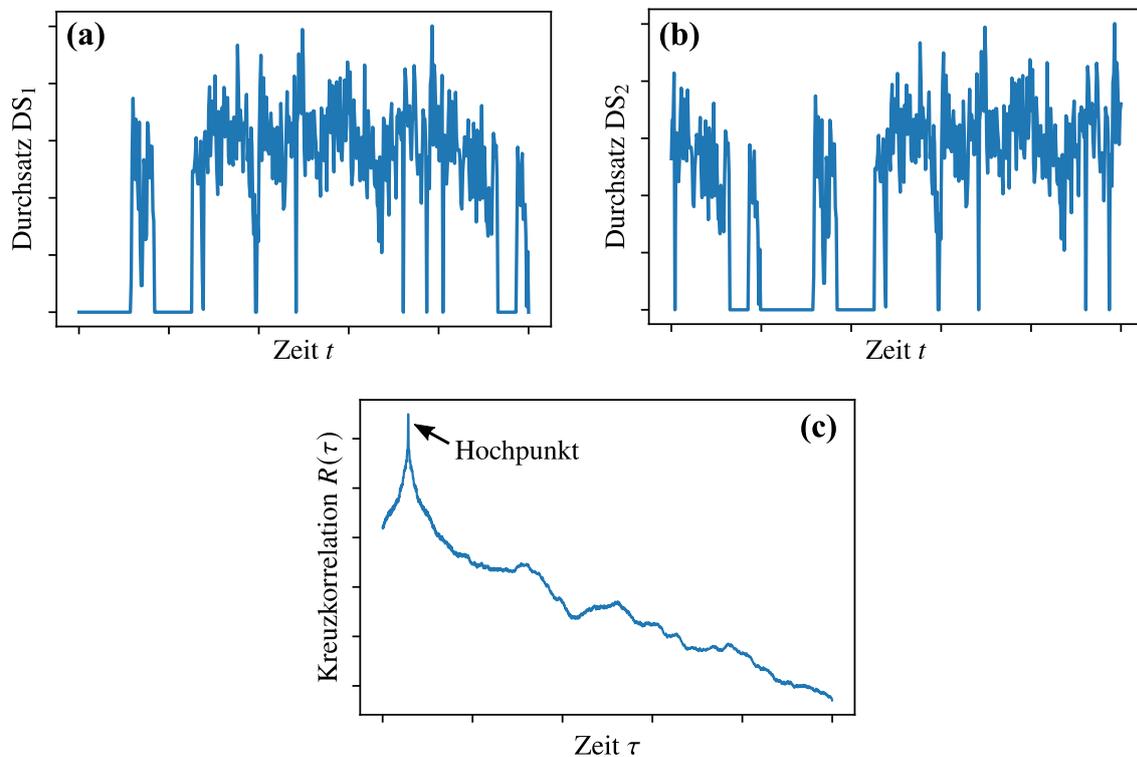


Abbildung 2.16: Kreuzkorrelations-Methode zur Messung der Geschwindigkeit. (a) und (b): Durchsatzsignale DS_1 und DS_2 der beiden benachbarten Bandwaagen als Funktion der Zeit t . (c): Kreuzkorrelation der beiden Signale $R(\tau)$ mit einem ausprägten Hochpunkt, der die Zeit $\tau = T$ angibt, die das Material von der ersten bis zur zweiten Bandwaage benötigt hat.

Abstand zwischen den beiden Waagen D exakt gemessen werden kann, kann mit dieser Methode die Fördergeschwindigkeit

$$v = \frac{D}{T} \quad (2.43)$$

2 Aktueller Stand von Wissenschaft und Technik

sehr genau bestimmt werden, ohne dass Störquellen wie Durchrutschen das Messergebnis stark verfälschen können. Bei dieser Messmethode steigen jedoch Kosten und Platzbedarf wesentlich an.

Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse über die herkömmliche und faseroptische Bandwaagetechnik bilden die Grundlage für alle weiteren Entwicklungsschritte. Bevor jedoch empirische Ergebnisse durch Messungen gewonnen werden, werden die in dieser Arbeit verwendeten Messkomponenten und -aufbauten beschrieben. Dies ermöglicht eine wissenschaftliche Einordnung und Bewertung der späteren Messergebnisse.

Wiegesysteme mit Faser-Bragg-Gittern

Zur Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage für den Einsatz in Recyclinganlagen werden verschiedene Prototypen hergestellt und auf ihre Genauigkeit und großtechnische Umsetzbarkeit hin untersucht. Faseroptische Wägezellen werden gefertigt, indem optische Sensoren aus Faser-Bragg-Gittern an das Federelement einer Wägezelle angebracht werden. Dabei gibt es Unterschiede im verwendeten Sensormodell und in der Befestigung am Federelement. Einige Prototypen werden abstrahiert in einem vor Umgebungseinflüssen geschützten Messaufbau untersucht. Auf diese Weise können Störquellen gesondert betrachtet und Erkenntnisse für die Entwicklung geeigneter Kompensationsverfahren gewonnen werden. Die Anwendbarkeit von faseroptischen Wägezellen in der Recyclingindustrie wird anhand eines Messaufbaus untersucht, der sich im Realbetrieb einer Recyclinganlage befindet. Die so gewonnenen Erkenntnisse lassen sich im Rahmen einer großtechnischen Umsetzung leichter auf andere Recyclinganlagen übertragen.

In Abschnitt 3.1 werden die Wägezellen-Varianten WZ1, WZ2 und WZ3 erläutert. Es werden die Herstellungsverfahren und Besonderheiten beschrieben und die Wägezellen im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit in Recyclinganlagen bewertet.

Die in dieser Arbeit verwendeten Messaufbauten werden in Abschnitt 3.2 beschrieben. Um langsame Effekte getrennt von der Dynamik eines Förderbandes betrachten zu können, werden Messungen mit einem stationären Wägemodul durchgeführt. Messaufbau 1 und Messaufbau 2 unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Bandwaagen-Konstruktion und der Umgebungsbedingungen. In Messaufbau 1 werden die Wägezellen WZ1 und WZ2 begutachtet, in Messaufbau 2 die Wägezelle WZ3.

Die Daten der faseroptischen Wägezellen werden mit einem Messsystem erfasst und verarbeitet. Der Aufbau und die Funktionsweise dieses Messsystems wird in Abschnitt 3.3 beschrieben und erläutert.

3.1 Wägezellen-Varianten

Für den Aufbau einer faseroptischen Wägezelle können verschiedene FBG-Sensoren verwendet werden. Ziel ist es, eine möglichst genaue Gewichts- bzw. Durchsatzmessung zu erreichen, jedoch muss auch auf die Schnelligkeit und Einfachheit der Serienfertigung geachtet werden. Je schneller und einfacher die faseroptische Wägezelle für den Einsatz in einer Bandwaage bereit ist, desto kostengünstiger und effizienter können faseroptische Bandwaagen großtechnisch in Recyclinganlagen eingesetzt werden. In dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Wägezellen-Varianten untersucht und hinsichtlich ihrer Genauigkeit und großtechnischen Umsetzbarkeit bewertet.

Da die Federelemente einer Wägezelle nicht im Einzelhandel erhältlich sind, werden herkömmliche elektrische Wägezellen gekauft und anschließend bearbeitet. Die angebrachten Dehnungsmessstreifen werden mit einer Poliermaschine entfernt und das Kupferkabel, das aus der Wägezelle herausragt, wird abgeschnitten. Dadurch bleibt nur noch das Federelement der Wägezelle übrig. Das Wägezellen-Modell H20A der Firma Bosche GmbH & Co. KG. wird für alle drei Varianten verwendet [61]. Diese besteht aus Aluminium und als Nennlast wird ein Gewicht von 100 kg gewählt, da es in den Messungen zu keinen höheren Belastungen kommt. Die Abmessungen und die Form der Wägezelle sind in der Abbildung 3.1 zu sehen.

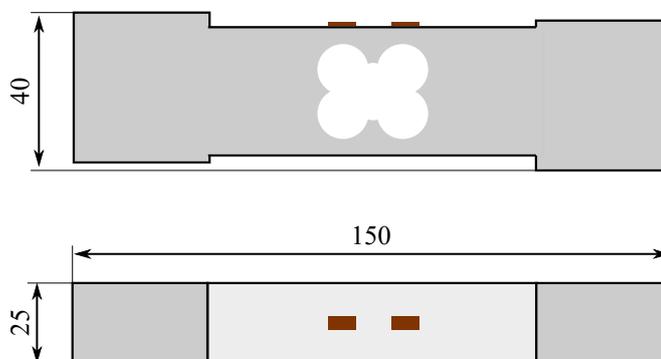


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der H20A Wägezelle, die für alle drei Varianten der faseroptischen Wägezelle verwendet wird. Angegebene Maße sind in Millimeter.

3.1.1 Wägezelle WZ1

Als Dehnungssensor wird das Modell os3200 von Micron Optics mit einer Nullwellenlänge $\lambda_{B0} = 1528.000$ nm und einer Dehnungsempfindlichkeit $K_\epsilon = 0.796$ verwendet [62]. Das FBG befindet sich in einem Kunststoffträger, der mit dem Epoxidharz Loctite HY 4090

auf das Metall des Federelements geklebt wird [63]. Aufgrund der speziellen Form des Trägers dauert die Installation nur wenige Minuten, Messungen können aber erst nach dem Aushärten des Klebers durchgeführt werden. Eine unebene oder raue Oberfläche sowie Verunreinigungen durch Fett, Staub oder ähnliches können die Haftung des Klebers verringern, wodurch die Dehnungsübertragung vom Federelement auf den FBG-Sensor gestört wird. Vor der Installation muss die Oberfläche daher poliert und gereinigt werden. Darüber hinaus sind der Kunststoffträger und der Kleber auch im gehärteten Zustand viskoelastisch und zeigen unter langanhaltender Belastung ein Relaxationsverhalten, welches vom Dehnungssensor wahrgenommen wird.

Zur Messung der Temperatur wird ein weiteres FBG als Thermometer eingesetzt. Zu diesem Zweck wird das Modell os4310 von Micron Optics mit einer Nullwellenlänge $\lambda_{B0} = 1563.985$ nm verwendet [64]. Durch Wellenlängenmultiplexing befinden sich beide Sensoren auf derselben Glasfaser. Das FBG wird durch ein Rohr aus Aluminium und Keramik vor mechanischen Einflüssen geschützt und ist nicht mit dem Federelement verklebt, sondern liegt lediglich auf ihm auf. Micron Optics liefert das Thermometer einschließlich einer Temperaturkalibrierung von -40 °C bis 120 °C, so dass mit folgender Gleichung die Temperatur

$$\begin{aligned}
 T &= C_3(\lambda_B + \lambda_0)^3 + C_2(\lambda_B + \lambda_0)^2 + C_1(\lambda_B + \lambda_0) + C_0 \quad \text{mit} \\
 C_3 &= 3.471656322026320 & C_2 &= -16427.2422292774 \\
 C_1 &= 25910320.73721130 & C_0 &= -13622634507.9814 \\
 \lambda_0 &= 12.0144
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

aus der gemessenen Bragg-Wellenlänge λ_B berechnet werden kann. Ein Foto der Wägezelle ist in Abbildung 3.2 zu sehen. Ein weiterer Dehnungssensor des Modells os3200 befindet

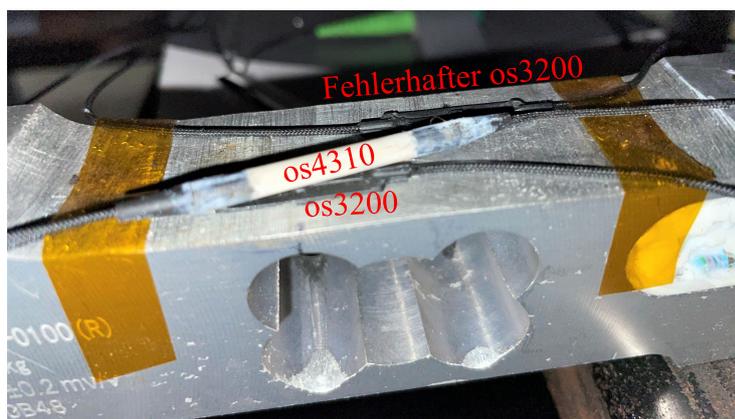


Abbildung 3.2: Foto der Wägezelle WZ1. Der Dehnungssensor befindet sich in einem Kunststoffträger und ist auf die Oberfläche geklebt, während das Thermometer daneben liegt.

sich ebenfalls auf der Wägezelle. Allerdings traten bei der Installation des Sensors technische Schwierigkeiten auf, wodurch das Signal des Sensors unbrauchbar wurde und in späteren Messungen ignoriert wird. Dies zeigt, dass die Serienfertigung dieser Wägezelle mit einer hohen Fehlerquote verbunden ist, die Kosten und Zeitverluste verursacht.

3.1.2 Wägezelle WZ2

Der Dehnungssensor und das Thermometer werden von der Firma INFAP GmbH hergestellt. Die Grundwellenlänge des Dehnungssensors ist $\lambda_{B0} = 1579.83 \text{ nm}$ und die des Thermometers ist $\lambda_{B0} = 1583.26 \text{ nm}$. Die Dehnungsempfindlichkeit beträgt $K_\varepsilon = 0.796$. Beide Sensoren befinden sich in einem Aluminiumträger, der so konstruiert ist, dass eine Dehnungsübertragung von der Oberfläche auf den Dehnungssensor stattfindet, während das FBG des Thermometers nicht gedehnt wird. Die Glasfaser wird mit drei kleinen Klebepunkten, die sich am Rand des Trägers und zwischen den Sensoren befinden, auf dem Träger befestigt. Dieser wird mit sechs Schrauben an der Oberfläche befestigt, für die passende Löcher in das Federelement der Wägezelle gebohrt und mit einem Gewinde versehen werden. Um zu verhindern, dass sich die Schrauben im Laufe der Zeit lockern, wird Schraubensicherungslack verwendet.

Da als Träger Aluminium verwendet wird und dieser aufgeschraubt und nicht geklebt ist, ist eine geringere Relaxation des Dehnungssignals zu erwarten. Allerdings erfolgt die Dehnungsübertragung vom Träger auf die Sensoren nur über kleine Klebepunkte. Je nachdem, wie hart und stark der Klebstoff ist, wird er mit der Zeit nachgeben. Bei einer lang anhaltenden Belastung wird das Dehnungssignal der Sensoren daher langsam abnehmen. Ein Foto der Wägezelle ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Dank der kompakten Bauweise

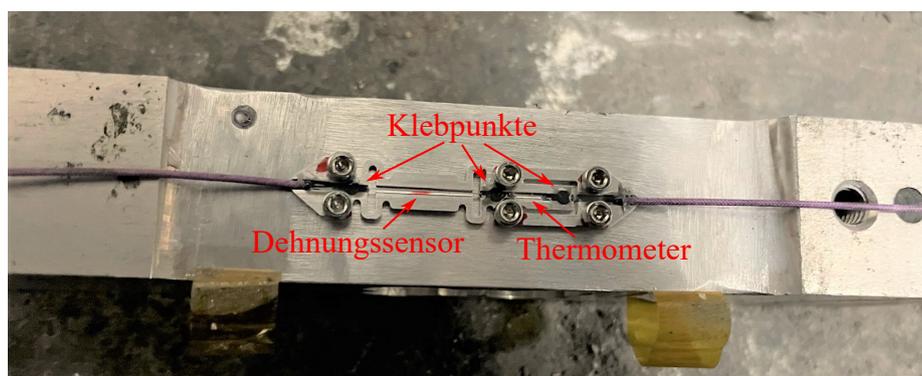


Abbildung 3.3: Foto der Wägezelle WZ2. Das Thermometer befindet sich zusammen mit dem Dehnungssensor in einem Aluminiumträger, welcher über Schrauben mit dem Federelement verbunden ist. Drei Klebepunkte halten die Glasfaser am Träger fest.

des Doppelsensors und der einfachen Montage mit Schrauben ist diese Wägezelle für die Serienfertigung geeignet. Für die Fertigung müssen nur sechs Löcher inklusive Gewinde in ein Federelement gebohrt werden.

3.1.3 Wägezelle WZ3

Das Modell os3110 von Micron Optics ist ein FBG-Dehnungssensor mit einem Träger aus Edelstahl [65]. Dieser ist so konzipiert, dass er an einer Oberfläche mit mehreren Schweißpunkten befestigt werden kann. Da sich Edelstahl jedoch nicht mit ausreichender Festigkeit an das Aluminium des Federelements schweißen lässt, werden vier Schrauben zur Befestigung gewählt. Zu diesem Zweck werden Löcher durch den Träger und in das Federelement gebohrt und ein Gewinde hineingeschnitten. Beim Bohren wird streng darauf geachtet, dass das FBG keinen mechanischen oder thermischen Schaden erleidet. Anschließend werden die Schrauben mit Schraubensicherungslack versehen, um ein Lösen mit der Zeit zu unterbinden. Die Glasfaser wird ohne Epoxidharz, sondern mit einer mechanischen Vorrichtung am Träger befestigt. Die Grundwellenlänge befindet sich bei $\lambda_{B0} = 1512.056$ nm mit einer Dehnungsempfindlichkeit $K_\varepsilon = 0.89$.

Das Modell os4310 wird als Thermometer verwendet, das von einem Rohr aus Keramik und Aluminium umgeben ist. Die Grundwellenlänge ist $\lambda_{B0} = 1527.499$ nm, so dass mit Wellenlängenmultiplexing beide FBG auf einer Faser liegen können. Das Rohr befindet sich neben dem Dehnungssensor auf dem Federelement. Mit Hilfe der Temperaturkalibrierung von -40 °C bis 120 °C von Micron Optics lässt sich aus der gemessenen Bragg-Wellenlänge λ_B die Temperatur

$$\begin{aligned}
 T &= C_3(\lambda_B + \lambda_0)^3 + C_2(\lambda_B + \lambda_0)^2 + C_1(\lambda_B + \lambda_0) + C_0 \quad \text{mit} \\
 C_3 &= 4.13980947477103 & C_2 &= -18843.3096330642 \\
 C_1 &= 28589996.8590683 & C_0 &= -14459428216.8898 \\
 \lambda_0 &= -11.4251
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

berechnen. Ein Foto der Wägezelle ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Im Vergleich zu den Wägezellen WZ1 und WZ2 ist die Installation der Sensoren aufwendiger, da sowohl in den Träger als auch in das Federelement Löcher gebohrt werden müssen. Durch die hohe mechanische und thermische Belastung kann das FBG beschädigt werden. Dennoch treten im Vergleich zur Wägezelle WZ1 weniger technische Defekte auf, die die Sensoren unbrauchbar machen, was eine Serienfertigung weniger kostspielig und zeitaufwändig macht.

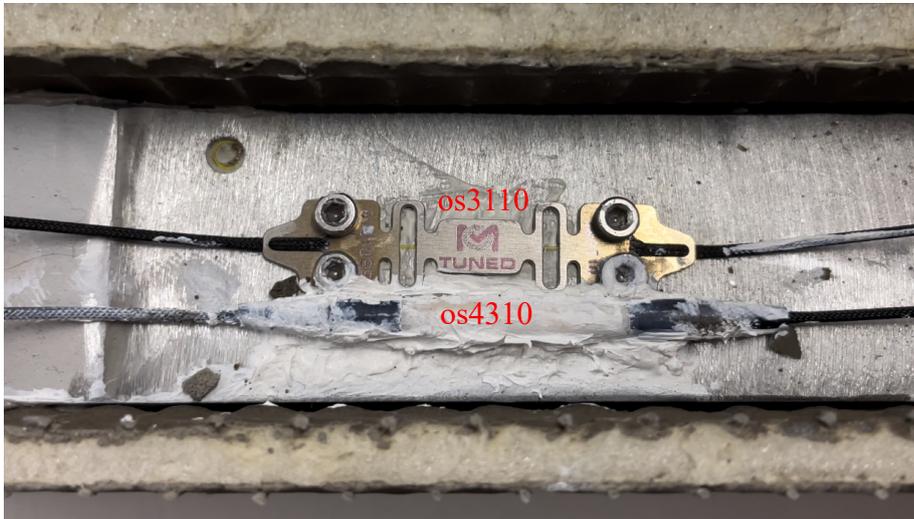


Abbildung 3.4: Foto der Wägezelle WZ3. Der Dehnungssensor befindet sich in einem Edelstahlträger, der an das Federelement angeschraubt ist. Neben dem Dehnungssensor befindet sich das Thermometer, das mit einem Rohr vor mechanischen Einflüssen geschützt wird.

3.2 Messaufbau-Varianten

Die Wägezelle stellt den Gewichtsaufnehmer einer Bandwaage dar. Die Konstruktion einer Bandwaage muss das Gewicht des Fördergutes auf die Wägezelle möglichst störungsfrei übertragen. Da sich Förderbänder in der Regel bewegen, ist dies eine technische Herausforderung, bei der die Struktur des Förderbandes, die Fördergeschwindigkeit und die Umgebung berücksichtigt werden müssen, was in Abschnitt 2.4.2 erläutert wird. Für die Montage werden die einzelnen Komponenten millimetergenau zugeschnitten und anschließend verschweißt oder verschraubt. Die fertige Bandwaage wird dann an der Unterkonstruktion des Förderbandes zwischen Ober- und Untertrum befestigt.

Zur Bestimmung des Relaxationsverhaltens der faseroptischen Wägezellen, das im Abschnitt 2.1.2 beschrieben wird, wird ein Messaufbau außerhalb eines Förderbandes gewählt, da die Konstruktion der Bandwaage und des Förderbandes auch im ausgeschalteten Zustand einen Einfluss auf die Messung haben kann.

3.2.1 Stationäre Messungen mit Wägemodul

Bei längerer Belastung kommt es zu einem Kriech- und Relaxationsverhalten der Wägezelle, das sich in einer stetigen Abnahme oder Zunahme des Messsignals bemerkbar macht. Um das Ausmaß dieser Drift zu bestimmen, wird ein stationärer Aufbau mit einem Wägemodul verwendet, der schematisch in Abbildung 3.5 dargestellt ist. Die Wägezelle befindet sich

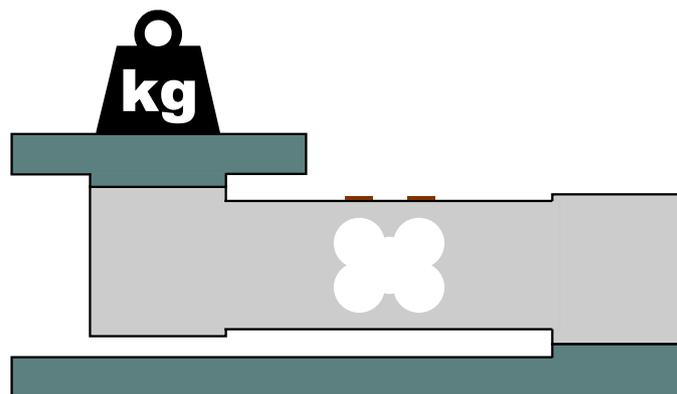


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung des Wägemoduls, das aus zwei Wägeplatten besteht. Das gemessene Gewicht wird direkt auf die Wägezelle übertragen, so dass Kriechen oder Relaxation unabhängig von anderen Einflüssen gemessen werden können.

zwischen zwei Wägeplatten, die durch Schrauben mit der Wägezelle verbunden sind. Eine Belastung der oberen Wägeplatte drückt das freie Ende der Wägezelle nach unten, wodurch

diese gedehnt wird. Da die gemessenen Gewichte im Allgemeinen wärmer sein können als die Wägezelle, können lokale Temperaturschwankungen auftreten, die die Messung stören. Deshalb wird vor jeder Messung eine Styrodurplatte auf das Wägemodul gelegt, die eine thermische Barriere zwischen den Gewichten und dem Messsystem bildet.

Im Vergleich zur Bandwaagen-Konstruktion wird das Gewicht direkt auf die Wägezelle übertragen. Mechanische oder thermische Einflüsse des Gurtes, des Förderbandes oder des Drahtseils sind somit ausgeschlossen. Zudem ist das Messsignal weitgehend unabhängig von der Position des Gewichts, so dass die Messergebnisse mit dem Wägemodul eine deutlich höhere Reproduzierbarkeit aufweisen als stationäre Messungen an der Bandwaage.

3.2.2 Messaufbau 1

Um die Messungen ohne die Störungen einer Recyclinganlage durchführen zu können, wird ein separates Förderband verwendet, das in einer unbeheizten Industrielagerhalle aufgestellt ist, die bei geschlossenen Türen Schutz vor dem Wind bietet. Das Förderband ist im Schatten einiger Paneele untergebracht, um zu verhindern, dass Sonnenlicht auf das Förderband scheint. Damit Transport- und Anschaffungskosten möglichst gering bleiben, wird ein kleines Förderband gewählt, auf dem ein Gurt mit den Maßen $20\text{ m} \times 0,62\text{ m}$ aufgespannt ist. Es befindet sich in horizontaler Lage und es gibt keine Mitnehmer auf dem Gurt. Die Fördergeschwindigkeit beträgt etwa $0,87\text{ m/s}$ und eine Spannstation an der Umlenktrummel hält den Gurt unter Spannung. Die Rollenstühle bestehen aus drei Rollen und befinden sich in einem Abstand von 1 m zueinander, was genügend Platz für den Aufbau einer Bandwaage bietet. Eine maßstabgetreue Zeichnung im Verhältnis $1 : 4$ der verwendeten Bandwaagen-Konstruktion ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Ein Rollenstuhl des Förderbandes wird abgenommen und auf einen Wiegerahmen geschraubt. Dieser besteht aus vier Vierkantrohren, die nach einem Gehrungsschnitt zusammengeschweißt werden. Um den Rollenstuhl zwischen Ober- und Untertrum zu fixieren, werden zwei weitere Vierkantrohre an den Unterkonstruktion des Förderbandes geschweißt. Auf einer Seite ist der Wiegerahmen mit zwei Scharnieren an einem der beiden Rohre befestigt. Auf der anderen Seite befindet sich die Wägezelle, die über ein Drahtseil mit dem Wiegerahmen verbunden ist. Der Vorteil dieses Aufbaus wird in Abschnitt 2.4.2 beschrieben. Konstruktionsbedingt ruht das gesamte Gewicht von Gurt, Rollenstuhl und Wiegerahmen auf der Wägezelle, was als Offset im Signal abgezogen werden kann. Das Fördergut wird dann von der Wägezelle als zusätzliches Gewicht erfasst.

Die Höhe des Rollenstuhls kann auf zwei Arten eingestellt werden. Für eine grobe

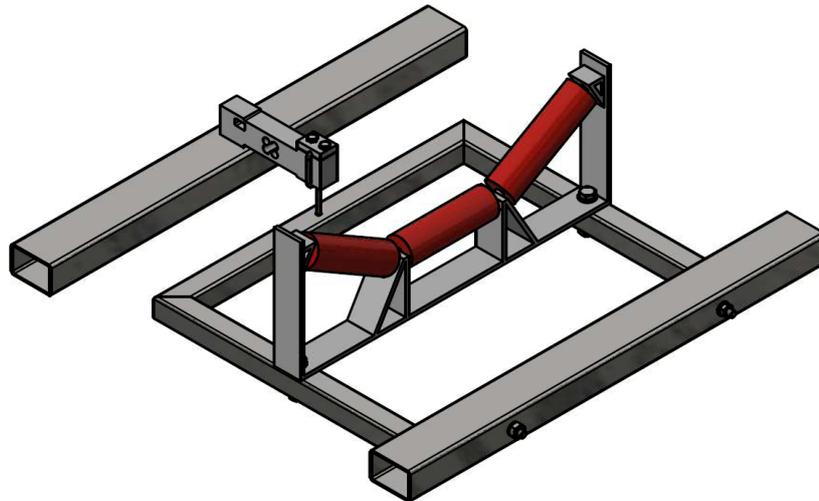


Abbildung 3.6: Maßstabgetreue Zeichnung der verwendeten Bandwaagen-Konstruktion im Verhältnis 1 : 4. Die Konstruktion orientiert sich am Aufbau einer herkömmlichen Bandwaage in Abbildung 2.15.

Voreinstellung können Unterlegscheiben zwischen dem Rollenstuhl und dem Wiegerahmen eingelegt werden. Außerdem kann die Länge des Drahtseils verändert werden, was eine sehr feine Anpassung der Höhe des Rollenstuhls ermöglicht. Da die Bandbelegung bei den Messungen in der Regel nur wenige Kilogramm pro Meter beträgt, wird der Rollenstuhl entsprechend hoch eingestellt. So kann ein geringes Gewicht besser erfasst werden, was im Abschnitt 2.4.2 erläutert wird. Außerdem werden die Rollenstühle vor und nach der Bandwaage leicht angehoben. Dadurch entsteht ein Plateau um die Bandwaage, auf dem die Gurtspannung zusätzlich erhöht wird, was die Präzision bei niedrigen Gewichten weiter steigert.

Da ein Rollenstuhl für die Montage vom Förderband abgenommen werden muss, kann die Konstruktion nur an leicht zugänglichen Stellen verwendet werden. Das macht die Montage zudem langwierig und aufwändig und führt dazu, dass das Förderband eine Zeit lang nicht einsatzbereit ist. Darüber hinaus erfordert die Konstruktion Platz in vertikaler Richtung, der bei vielen Förderbändern in der Recyclingindustrie nicht vorhanden ist. Bereits in Betrieb befindliche Förderbänder können daher nur schwer oder in manchen Fällen gar nicht nachgerüstet werden, so dass sich die Konstruktion nicht für den großflächigen Einsatz in Recyclinganlagen eignet. Nichtsdestoweniger ist die Konstruktion vorteilhaft für die Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage, da die Höhe des Rollenstuhls genau eingestellt werden kann und die Drahtseilverbindung das Rauschen des Förderbandes und das Messen von Querkräften unterdrückt. Außerdem wird die gesamte horizontale Breite des Förderbandes von der Konstruktion erfasst, so dass selbst außermittig liegendes

Material von der Bandwaage erkannt wird. Da das Förderband nicht in eine Industrieanlage eingebaut ist, können Messungen jederzeit und ohne betriebliche Unterbrechungen durchgeführt werden, was die Entwicklungsphase der faseroptischen Bandwaage erheblich vereinfacht und beschleunigt. Die **Wägezelle WZ1** und die **Wägezelle WZ2** werden beide mit dem hier beschriebenen **Messaufbau 1** untersucht, um das grundlegende Verhalten einer faseroptischen Bandwaage zu ermitteln.

3.2.3 Messaufbau 2

Zusätzlich zu dem oben beschriebenen Förderband wird auch eines verwendet, das sich in einer Recyclinganlage befindet. Dadurch werden Störfaktoren wie Vibrationen und Abwärme von externen Maschinen oder industriellen Förderfahrzeugen real abgebildet. Außerdem ist der Gurt des verwendeten Förderbandes nicht neuwertig, sondern bereits seit mehreren Jahren im Einsatz. Der Einfluss dieser Faktoren auf die Genauigkeit einer faseroptischen Bandwaage kann so untersucht werden.

Das Förderband befindet sich in einer Recyclinganlage für die Nichteisenfraktion von Müllverbrennungsschlacke. Es handelt sich um eine unbeheizte Industriehalle und in unmittelbarer Nähe des Förderbandes befinden sich Tore und Industrieaggregate. Da das Förderband nicht direkt mit einer festen Struktur verbunden ist, können Vibrationen und Spannungsschwankungen auf das Band übertragen werden. Der Gurt mit den Abmessungen $10\text{ m} \times 0.56\text{ m}$ verläuft horizontal und es gibt keine Mitnehmer. Er bewegt sich mit einer Fördergeschwindigkeit von etwa 0.45 m/s , was ungefähr der Hälfte der Geschwindigkeit in Messaufbau 1 entspricht. Getragen wird der Muldengurt von Rollenstühlen, die einen Abstand von 60 cm zueinander haben. Da der Abstand zwischen Ober- und Untertrum nur 47 cm beträgt und das Förderband nur wenige Stunden nicht einsatzbereit sein kann, ohne den Betrieb zu stören, wird eine andere Konstruktion als in Abbildung 3.6 verwendet. Anstatt einen systemeigenen Rollenstuhl mittels eines Wiegerahmens und eines Drahtseils mit der Wägezelle zu verbinden, werden zwei einfache Bockrollen verwendet. Die Konstruktion ist in der Abbildung 3.7 dargestellt und ermöglicht eine einfache und schnelle Montage, da nur ein Querbalken am Förderband befestigt werden muss. Die Rollen befinden sich auf einem schmalen Metallbalken, der mit der Wägezelle verschraubt ist. Zur Montage muss die Wägezelle dann nur noch am Querbalken befestigt und die Höhe der Rollen eingestellt werden. Dies kann über die Gewindestange der beiden Bockrollen erfolgen. Die Bandwaagen-Konstruktion kann schnell und einfach an unterschiedliche Unterkonstruktionen eines Förderbands anpassen werden, was den Einsatz in Recyclinganlagen flexibler macht. Aufgrund der Tatsache, dass es nur an zwei Punkten eine mechanische Verbindung zwischen dem Gurt und der Wägezelle gibt, kann es bei geringem Durchsatz zu einer

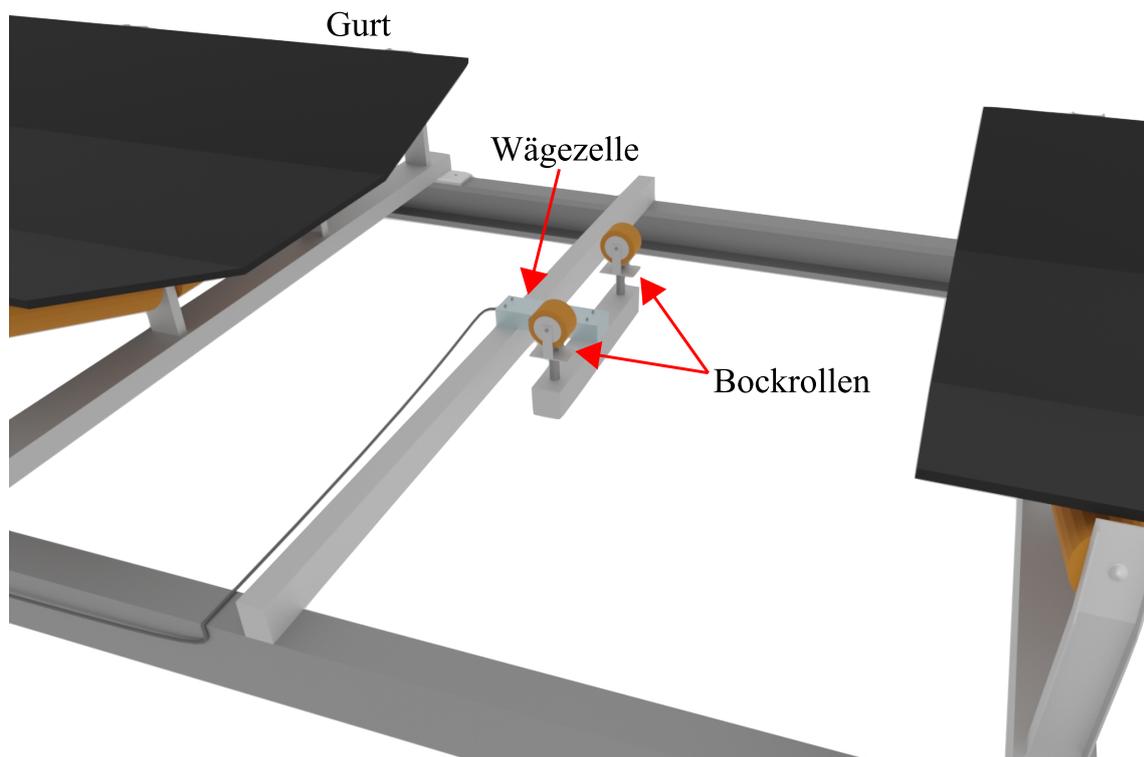


Abbildung 3.7: Verwendete Bandwaagen-Konstruktion des Messaufbaus 2. Die Wägezelle befindet sich auf einem Querbalken, der mit der Unterkonstruktion des Förderbandes verbunden ist. Das Gewicht des Förderguts wird über zwei Bockrollen und einen schmalen Metallbalken auf die Wägezelle übertragen. Aufgrund der wenigen Einzelteile und des einfachen Aufbaus ist die Montage der Bandwaage leicht und schnell durchführbar.

Abhängigkeit von der Querverteilung des Förderguts kommen. Material, das direkt über die Rollen transportiert wird, übt einen stärkeren Druck aus als Material, das außermittig transportiert wird. Außerdem werden Vibrationen nicht durch ein Drahtseil unterdrückt und auch Querkräfte werden direkt auf die Wägezelle übertragen. Die Konstruktion ist daher weniger genau als die Konstruktion aus dem Abschnitt 3.2.2, aber schneller und einfacher zu montieren. Die **Wägezelle WZ3** wird mit dem hier beschriebenen **Messaufbau 2** untersucht, um die Einflüsse einer Recyclinganlage auf die faseroptische Bandwaage zu ermitteln.

3.3 Datenerfassung und -verarbeitung

Zum Auslesen eines FBG-Messsystems wird ein Interrogator verwendet. Dieser enthält einen Laser, der Licht zu den FBG sendet und das Reflexionsspektrum misst. Die genaue Funktionsweise eines Interrogators wird im Abschnitt 2.2.4 erläutert. Die faseroptischen Wägezellen werden über Glasfasern mit dem Interrogator verbunden, wozu herkömmliche Lichtwellenleiter und deren Steckverbindungen verwendet werden. Da die Wellenlängenverschiebungen der FBG in der Regel unter einem Nanometer liegen, werden alle wellenlängenabhängigen Effekte bei der Übertragung vermieden und der Interrogator weist eine Pikometergenauigkeit auf, um präzise Messungen zu gewährleisten [66]. Darüber hinaus muss die Abtastrate hoch genug sein, um alle dynamischen Effekte während einer Messung zu erfassen.

Die Daten des Interrogators werden dann weiterverarbeitet. Zu diesem Zweck wird der Interrogator an einen Computer angeschlossen, auf dem eine spezielle Software von Micron Optics installiert ist. Mit den eingestellten Parametern werden die Daten gespeichert und können dann mittels digitaler Signalverarbeitung untersucht und visualisiert werden.

3.3.1 Ermittlung der Messdaten

Der verwendete Messaufbau zur Datenermittlung ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Die Glasfaser, auf der sich die FBG befinden, ist in der Regel nur wenige Meter lang. Befindet

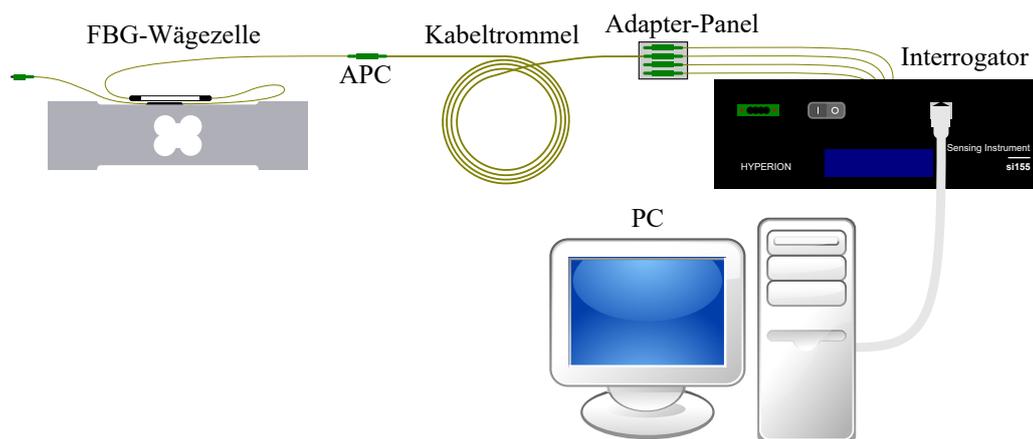


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung der Datenerfassung einer faseroptischen Wägezelle. Das von den FBG reflektierte Licht wird über APC-Steckverbinder, Kabeltrommel und Adapter-Panel zu den Eingangsbuchsen des Interrogators geführt. Dieser ermittelt die Bragg-Wellenlängen der FBG und leitet sie an einen Computer weiter.

sich der Interrogator in größerer Entfernung, muss ein Verlängerungskabel bzw. eine Kabeltrommel dazwischengeschaltet werden. Aufgrund der geringen Dämpfung von Glasfasern kann das Kabel mehrere Kilometer lang sein, ohne dass die Intensität zu stark abnimmt [39]. Für die Messungen in dieser Arbeit ist es jedoch nicht notwendig, eine Entfernung von mehr als 100 m zu nehmen. Als Steckverbindung zwischen den Kabeln wird eine gewinkelt-polierete Verbindung gewählt, um Rückreflexionen zu reduzieren, die das FBG-Signal stören können. Die Steckverbinder enthalten das Suffix *APC* für Angled Physical Contact [67]. Normalerweise liegt der Polierwinkel bei 8 Grad, damit das rückreflektierte Licht in das Cladding der Faser geleitet wird und sich nicht in den Faserkern ausbreitet. Da es beim Ein- und Ausstecken der Steckverbindungen zu Beschädigungen kommen kann, werden die Buchsen am Interrogator durch Zwischenschalten eines Adapter-Panels geschützt. Dieses kann schnell und einfach ausgetauscht werden, während die Buchsen am Interrogator nur mit großem Aufwand ersetzt werden können [68].

Der verwendete Interrogator ist vom Modell si155 von Micron Optics mit einer Abtastrate bis zu 1000 Hz und vier Eingangsbuchsen, die jeweils in einem Wellenlängenbereich von 1500 nm bis 1600 nm abgetastet werden [66]. So ist es möglich, vier Glasfasern gleichzeitig auszulesen, auf denen sich je nach Verteilung bis zu 19 FBG befinden können [42]. Das Modell besitzt eine ausreichende Genauigkeit und Stabilität von 1 pm. Da in Recyclinganlagen viel Staub entstehen kann, befindet sich der Interrogator in einer staubdichten Kiste. Diese enthält auch eine Heizung mit Temperaturregelung, so dass Innentemperaturen unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine relative Luftfeuchtigkeit über 80 % ausgeschlossen sind. Darüber hinaus ist die Kiste mit Styroporplatten versehen, um starke Erschütterungen auf den Interrogator zu reduzieren. Insgesamt werden so Beschädigungen des Interrogators vermieden und seine Lebensdauer erhöht. Die vom Interrogator ermittelten Daten werden über ein Ethernet-Kabel an einen Computer gesendet, wo sie mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung analysiert und visualisiert werden können.

3.3.2 Digitale Signalverarbeitung

Die am Computer ankommenden Daten werden mit der Software *ENLIGHT* von Micron Optics eingelesen [69]. Damit können Verbindungseinstellungen und die Abtastrate des Interrogators geändert werden. Die Registerkarte *Aquisition* zeigt die Reflexionsspektren der vier Eingänge an. Jedes FBG kann als Peak um seine Bragg-Wellenlänge erkannt werden und wellenlängenabhängige Störungen können schnell und einfach festgestellt werden. Die Peaks werden mit einem Detektionsalgorithmus erfasst und auf der Registerkarte *Sensors* tabellarisch dargestellt. Jedes FBG-Signal kann benannt und mit einem Mittelwert versehen werden. Darüber hinaus können für jedes FBG das Minimum und das

3 Wiegesysteme mit Faser-Bragg-Gittern

Maximum des Detektionsbereichs eingestellt werden, was besonders für FBG wichtig ist, deren Bragg-Wellenlängen nicht weit auseinander liegen. Unter der Registerkarte *Charts* können die aktuell aufgezeichneten Signale von bis zu vier FBG angezeigt werden, was zur Kontrolle während der Datenerfassung genutzt werden kann. Um die Daten zu speichern, wird die Registerkarte *Save* verwendet. Hier kann festgelegt werden, welche Signale mit welcher Frequenz gespeichert werden.

Mit Hilfe der Programmiersprache *Python* werden die Rohdaten in Form von Wellenlängen mit Gleichung (2.32) und Gleichung (2.33) in eine Dehnung bzw. Temperatur überführt. Durch die Anwendung von Berechnungen, Analyseverfahren und Mess- und Optimierungsalgorithmen werden die Messdaten aufbereitet. Wichtige Informationen, die für die Weiterentwicklung der faseroptischen Bandwaage notwendig sind, werden hervorgehoben und möglichst übersichtlich dargestellt.

Nach einer Beschreibung der verwendeten Messkomponenten und -aufbauten in diesem Kapitel werden im Folgenden die Messergebnisse hinsichtlich der Temperaturkompensation von faseroptischen Wägezellen dargestellt und bewertet. Die Entwicklung einer zuverlässigen Temperaturkompensation ist ein wesentlicher Schritt zur genauen Gewichtsbestimmung von Fördergut mit einer faseroptischen Bandwaage.

Temperaturkompensation

Das Signal eines optischen Dehnungssensors aus einem Faser-Bragg-Gitter (FBG) setzt sich aus einer mechanischen Dehnung (siehe Gleichung (2.32)) und einer temperaturinduzierten Dehnung (siehe Gleichung (2.33)) zusammen. Faseroptische Bandwaagen verwenden Faser-Bragg-Gitter, um eine mechanische Dehnung zu messen, die durch das Gewicht des transportierten Förderguts verursacht wird. Um Temperatureffekte aus den Gewichtsdaten zu entfernen, ist eine Temperaturkompensation erforderlich, für die ein Thermometer neben dem optischen Dehnungssensor verwendet wird. Da keine weiteren Auswerteeinheiten verwendet werden müssen und die Sensoren immer synchronisiert sind, hat es sich als am praktischsten erwiesen, zu diesem Zweck ein Doppelsensorsystem bestehend aus einem FBG-Dehnungssensor und einem FBG-Thermometer einzusetzen [70]. Um ein FBG als Thermometer einsetzen zu können, muss es so in das System integriert werden, dass eine Dehnung oder Stauchung der Glasfaser vermieden wird. Nur wenn das Temperaturverhalten der beiden FBG-Sensoren genau bekannt ist und eine homogene Temperaturverteilung vorliegt, ist eine genaue Temperaturkompensation möglich.

In Abschnitt 4.1 werden die Grundlagen der Temperaturkompensation mit einem FBG-Thermometer beschrieben. Störquellen wie Nichtlinearitäten, Abstandsabhängigkeiten und lokale Temperaturschwankungen werden aufgezeigt und geeignete Kompensationsmethoden entwickelt.

Aufgrund der hohen Empfindlichkeit von FBG werden selbst kleine Temperaturschwankungen wahrgenommen. In Abschnitt 4.2 wird erläutert, wie unterschiedliche Wärmekopplungen im Messsystem zu Abweichungen bei der Temperaturkompensation führen können. Darüber hinaus werden analytische und instrumentelle Kompensationsmethoden hierfür vorgestellt.

Die Ergebnisse der Temperaturkalibrierungen der drei Wägezellen WZ1, WZ2 und WZ3 sind in Abschnitt 4.3 dargestellt. Diese geben Aufschluss über das Temperaturverhalten im Messsystem, das für eine funktionierende Temperaturkompensation unerlässlich ist.

4.1 Grundlagen

Das Signal eines FBG-Dehnungssensors

$$\varepsilon_{\text{dehn}} = \varepsilon_m + \xi_{\text{dehn}}(T_{\text{dehn}}) \quad (4.1)$$

ist stets die Überlagerung einer mechanischen Dehnung ε_m , die durch das Strecken oder Stauchen der Wägezelle hervorgerufen wird und einer temperaturinduzierten Dehnung $\xi_{\text{dehn}}(T_{\text{dehn}})$, die von der Temperatur des Dehnungssensors T_{dehn} abhängig ist. Nach Gleichung (2.34) wird die temperaturinduzierte Dehnung durch die Wärmeausdehnung der Wägezelle und der Glasfaser, sowie dem thermooptischen Effekt verursacht. Die Stärke variiert von Sensor zu Sensor aufgrund kleiner Unterschiede, die während der Herstellung auftreten und der Tatsache, dass die Befestigung der Sensoren auf die Wägezelle nicht immer gleich ist. Da die mechanischen und thermischen Einflüsse im Allgemeinen nicht von einander separiert werden können, muss eine Temperaturkompensation mit Hilfe eines FBG-Thermometer durchgeführt werden. Die Signale der beiden Sensoren werden verwendet, um ein temperaturkompensiertes Signal (TK-Signal)

$$\varepsilon_{\text{TK}} = \varepsilon_{\text{dehn}} - \xi_{\text{dehn}}(T_{\text{therm}}) \stackrel{(T_{\text{dehn}}=T_{\text{therm}})}{=} \varepsilon_m \quad (4.2)$$

zu berechnen. Wenn die Temperatur des Dehnungssensors T_{dehn} und des Thermometers T_{therm} gleich sind, enthält das temperaturkompensierte Signal nur noch die mechanische Dehnung ε_m . Wenn eine faseroptische Wägezelle als Gewichtsaufnehmer in einer Bandwaage verwendet wird, drückt das über das Förderband transportierte Material auf die Wägezelle und verursacht eine mechanische Dehnung, die durch das temperaturkompensierte Signal ε_{TK} gemessen werden kann. Die Genauigkeit dieser Messung hängt daher maßgeblich von einer funktionierenden Temperaturkompensation ab.

4.1.1 Verfahren

FBG-Thermometer nutzen die Temperaturabhängigkeit eines FBG ξ_{therm} zur Berechnung der Temperatur des Sensors T_{therm} . Das vom Interrogator aufgezeichnete Rohsignal des Thermometers

$$\varepsilon_{\text{therm}} = \xi_{\text{therm}}(T_{\text{therm}}) \quad (4.3)$$

hat die Dimension einer Dehnung und hängt vom thermooptischen Effekt und der Wärmeausdehnung des FBG ab. Da die Stärke dieser Effekte für jedes FBG unterschiedlich ist, muss für jedes Thermometer eine Kalibrierung durchgeführt werden. Dies geschieht

in der Regel in einer Klimakammer, in der die Innentemperatur reguliert werden kann. Über einen gewünschten Bereich wird die Temperatur variiert und gleichzeitig die temperaturinduzierte Dehnung des FBG-Thermometers gemessen. Für jeden Temperaturwert wird ein entsprechender Wert der Dehnung ermittelt, so dass die Funktion ξ_{therm} über den Temperaturbereich durch Regressionsanalyse genau bestimmt werden kann. Um die Temperatur

$$T_{\text{therm}} = \xi_{\text{therm}}^{-1}(\varepsilon_{\text{therm}}) \quad (4.4)$$

zu erhalten wird dann die Umkehrfunktion ξ_{therm}^{-1} auf das Rohsignal des FBG-Thermometers angewendet. Die Genauigkeit eines FBG-Thermometers hängt somit unmittelbar von der Genauigkeit der verwendeten Klimakammer und der sorgfältigen Durchführung der Kalibrierung ab. Es muss sichergestellt werden, dass die Temperatur der Klimakammer zu jedem Zeitpunkt der Temperatur des FBG-Thermometers entspricht. Luftbewegungen sollten ausgeschlossen sein und die Innentemperatur sollte nicht zu schnell variiert werden, um eine homogene Temperaturverteilung zu gewährleisten. Die entsprechenden Ergebnisse einer Temperaturkalibrierung werden in der Regel vom Hersteller des FBG-Thermometers beim Kauf zur Verfügung gestellt, so dass der erworbene Sensor direkt als Thermometer verwendet werden kann.

Zur Temperaturkompensation eines FBG-Dehnungssensor wird die Temperatur des FBG-Thermometers T_{therm} verwendet, um das TK-Signal ε_{TK} aus Gleichung (4.2) zu bestimmen. Zu diesem Zweck muss die genaue Form der temperaturinduzierten Dehnung des Dehnungssensors ξ_{dehn} bekannt sein, die sich im Allgemeinen von der des Thermometers unterscheidet. Aus diesem Grund muss auch für den FBG-Dehnungssensor eine Temperaturkalibrierung durchgeführt werden. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass mechanische Einflüsse ausgeschlossen werden und der Sensor bereits an der Wägezelle befestigt sein muss, da die Wärmeausdehnung des Metalls vom Dehnungssensor gemessen wird und somit einen thermischen Einfluss auf das Signal hat. Da der genaue Wert des Wärmeausdehnungskoeffizienten und die Art der Befestigung des Sensors an der Wägezelle dem Hersteller nicht bekannt sind, werden Temperaturkalibrierungen für FBG-Dehnungssensoren nicht von ihm durchgeführt.

Die Genauigkeit der Temperaturkompensation eines FBG-Dehnungssensors hängt dadurch von zwei separaten Temperaturkalibrierungen ab. Sollte es nur bei einer der beiden Kalibrierungen zu Luftbewegungen oder einer inhomogenen Temperaturverteilung kommen, werden die daraus resultierenden Abweichungen die Genauigkeit einer späteren Dehnungsmessungen beeinträchtigen. Um eine gewisse Unabhängigkeit von den verwendeten Klimakammern zu schaffen, kann die Temperaturkompensation auch in veränderter Form durchgeführt werden. Anstatt den Umweg über die Temperatur zu nehmen, wird

4 Temperaturkompensation

das Rohsignal des FBG-Thermometers aus Gleichung (4.3) direkt zur Berechnung der temperaturinduzierten Dehnung des FBG-Dehnungssensors benutzt:

$$\xi_{\text{dehn}}(T_{\text{therm}}) \stackrel{\text{Gl. (4.4)}}{=} \xi_{\text{dehn}}\left(\xi_{\text{therm}}^{-1}(\varepsilon_{\text{therm}})\right) = \xi_{\text{dehn}}(\varepsilon_{\text{therm}}). \quad (4.5)$$

Da bei dieser Methode lediglich die Rohsignale der FBG-Sensoren erfasst werden müssen, spielt die Genauigkeit der Klimakammer keine Rolle mehr. Außerdem muss nur noch für eine homogene Temperaturverteilung innerhalb des Messsystems gesorgt werden und nicht mehr über die gesamte Klimakammer. Spätere Dehnungsmessungen sind unabhängig von der Temperaturkalibrierung durch den Hersteller. Wie genau diese durchgeführt werden und welche Klimakammer verwendet wird, ist nicht bekannt. Daher können die entsprechenden Ergebnisse nicht auf ihre Genauigkeit hin bewertet werden. Darüber hinaus sind nicht länger zwei Regressionsanalysen für $\xi_{\text{therm}}(T_{\text{therm}})$ und $\xi_{\text{dehn}}(T_{\text{therm}})$ notwendig, da nur noch die unbekannte Funktion $\xi_{\text{dehn}}(\varepsilon_{\text{therm}})$ bestimmt werden muss, wodurch numerische Ungenauigkeiten ebenfalls minimiert werden.

4.1.2 Nichtlinearität

Der thermooptische Effekt beschreibt die Temperaturabhängigkeit des Brechungsindex. Für FBG ist diese nichtlinear, so dass Terme höherer Ordnung benötigt werden, um den effektiven Brechungsindex n_{eff} aus Gleichung (2.33) zu beschreiben. Da die temperaturinduzierte Dehnung eines FBG-Dehnungssensors oder FBG-Thermometers teilweise durch den thermooptischen Effekt verursacht wird, kann die Temperaturabhängigkeit der Sensoren nicht durch eine lineare Gerade beschrieben werden, sondern es muss mindestens eine quadratische Funktion angenommen werden:

$$\xi_{\text{dehn}} = \alpha_0 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + O(T^3) \quad \xi_{\text{therm}} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 T^2 + O(T^3), \quad (4.6)$$

mit $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$ und $(\beta_0, \beta_1, \beta_2)$ als konstante Parameter. In Gleichung (4.6) wurde berücksichtigt, dass die temperaturinduzierte Dehnung von FBG-Sensoren im Allgemeinen unterschiedlich ist. Darüber hinaus sind Terme der Ordnung $O(T^3)$ oder höher sehr klein gegenüber den linearen oder quadratischen Termen und können daher vernachlässigt werden [71].

In Abbildung 4.1(a) ist die temperaturinduzierte Dehnung ξ eines FBG über einen Temperaturbereich von -7°C bis 29°C dargestellt. Das Rohsignal des FBG-Sensors ändert sich aufgrund der Temperaturänderung von $-325 \mu\varepsilon$ bis $750 \mu\varepsilon$. Abbildung 4.1(b) zeigt den Fit-Fehler einer linearen Regression, die an den Graphen angepasst wird. Die Differenz

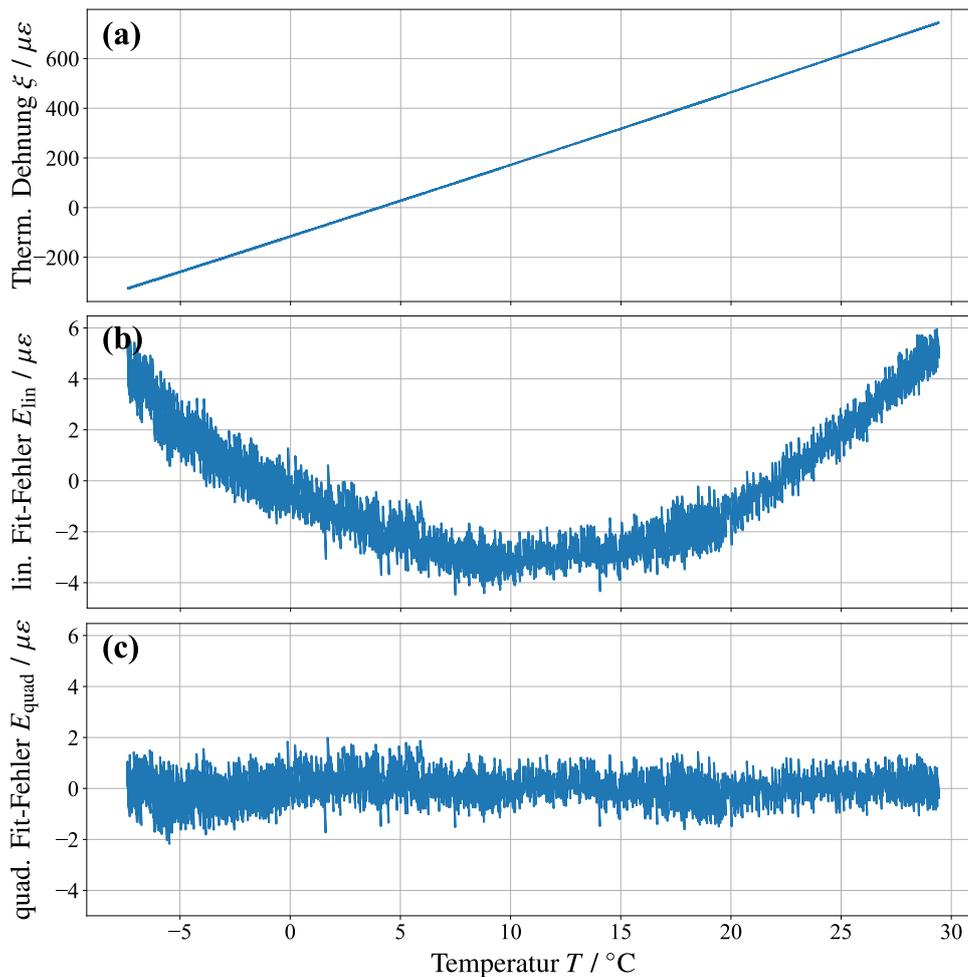


Abbildung 4.1: Regressionsanalyse der temperaturinduzierten Dehnung eines FBG-Sensors. (a): Gemessene thermische Dehnung ξ über einen Temperaturbereich von -7°C bis 29°C . (b): Fit-Fehler einer linearen Regression. (c): Fit-Fehler einer quadratischen Regression. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.1 angegeben. Während die Differenz zwischen einer linearen Regression und den Messdaten bis zu $6 \mu\epsilon$ entspricht, verbessert eine quadratische Regression die Ergebnisse deutlich und senkt den Fit-Fehler bis auf das Rauschniveau.

zwischen der linearen Regression und den Messdaten ist im Bereich niedriger bzw. hoher Temperaturen am größten und beträgt bis zu $6 \mu\epsilon$. Ungefähr in der Mitte des Messbereichs erreicht der lineare Fit-Fehler sein Minimum mit ungefähr $-4 \mu\epsilon$. Die parabolische Form des Graphen zeigt, dass eine lineare Regression nicht ausreichend ist, um die temperaturinduzierte Dehnung eines FBG zu beschreiben. Daher wird in Abbildung 4.1(c) der Fit-Fehler einer quadratischen Regression gezeigt. Durch Hinzufügen eines Terms höherer Ordnung verbessert sich das Ergebnis deutlich und die Differenz zwischen Regression und Messdaten sinkt über den gesamten Temperaturbereich auf das Rauschniveau ab. Die erhaltenen Parameter der beiden Regressionsanalysen sind in Tabelle 4.1 aufgeführt. Da

4 Temperaturkompensation

der Fit-Fehler bereits minimal ist, würde eine kubische Regression die Ergebnisse nicht wesentlich verbessern, was die in [71] veröffentlichten Ergebnisse bestätigt.

Tabelle 4.1: Erhaltene Parameter einer linearen und quadratischen Regression für die Messdaten aus Abbildung 4.1.

Regression	$\beta_0 / \mu\epsilon$	$\beta_1 / (\mu\epsilon/^\circ\text{C})$	$\beta_2 / (\mu\epsilon/^\circ\text{C}^2)$
linear	-115.2 ± 0.1	29.04 ± 0.01	0.0
quadratisch	-115.8 ± 0.1	28.55 ± 0.01	$(2.329 \pm 0.001) \times 10^{-2}$

Die Nichtlinearität der Temperaturkompensation eines FBG-Dehnungssensors bedeutet, dass die im Abschnitt 4.1.1 erwähnte Temperaturkalibrierung über einen großen Temperaturbereich durchgeführt werden muss, um noch genaue Ergebnisse erhalten zu können. Bei einer linearen Temperaturkompensation wäre es möglich, nur einen kleinen Temperaturbereich zu betrachten und niedrigere oder höhere Temperaturen zu extrapolieren, ohne zu viel Genauigkeit zu verlieren. Aufgrund der nichtlinearen Terme in Gleichung (4.6) muss jedoch eine polynomielle Extrapolation höherer Ordnung durchgeführt werden, deren Unsicherheit mit dem Abstand zu den Messwerten erheblich zunimmt. Da faseroptische Bandwaagen für den Einsatz in Recyclinganlagen saisonalen Temperaturschwankungen unterliegen können, muss ein Temperaturbereich von etwa -10°C bis $+30^\circ\text{C}$ betrachtet werden. Die Temperaturkalibrierung kann daher nicht in einem Wärmeschrank ohne Kühlung durchgeführt werden, da keine kälteren Temperaturen als Raumtemperatur erreicht werden können. Es müssen Klimakammern verwendet werden, in denen Temperaturen weit unter 0°C erreicht werden können, was die Temperaturkalibrierung für FBG-Dehnungssensoren wesentlich aufwendiger macht.

Darüber hinaus treten aufgrund der nichtlinearen Temperaturabhängigkeit der FBG-Sensoren Terme höherer Ordnung bei der alternativen Methode der Temperaturkompensation aus Gleichung (4.5) auf. Diese entstehen durch das mehrfache Potenzieren der Terme, so dass angenommen werden muss, dass die thermische Dehnung des Dehnungssensors

$$\xi_{\text{dehn}} = a_0 + a_1 \epsilon_{\text{therm}} + a_2 \epsilon_{\text{therm}}^2 + a_3 \epsilon_{\text{therm}}^3 + O(\epsilon_{\text{therm}}^4) \quad (4.7)$$

mindestens kubisch vom Rohsignal des FBG-Thermometers ϵ_{therm} abhängt. Die konstanten Parameter (a_0 , a_1 , a_2 , a_3) ergeben sich aus den Temperaturparametern (α_0 , α_1 , α_2) und (β_0 , β_1 , β_2) aus Gleichung (4.6). Folglich würden die negativen Auswirkungen einer quadratischen Temperaturkompensation noch verstärkt, so dass selbst Extrapolationen mit geringem Abstand zu den Messdaten große Unsicherheiten aufweisen. Anhand der Ergebnisse aus [71] kann jedoch gezeigt werden, dass der kubische Term in Gleichung (4.7) vernachlässigbar ist und ein Polynom zweiter Ordnung ausreicht, um die

temperaturinduzierte Dehnung eines FBG-Dehnungssensors als Funktion des Rohsignals des FBG-Thermometer zu beschreiben:

Für die Größe der Parameter können die folgenden Annahmen getroffen werden:

$$\alpha_0, \beta_0 \propto \epsilon^{-1} \quad \alpha_1, \beta_1 \propto 1 \quad \alpha_2, \beta_2 \propto \epsilon \quad \text{mit } \epsilon \ll 1. \quad (4.8)$$

Je größer die Ordnung des Terms, desto geringer ist dessen Wirkung. Nun wird das Thermometersignal ξ_{therm} aus Gleichung (4.6) in Gleichung (4.7) eingesetzt und nach Ordnungen der Temperatur T aufgelöst. Alle Ordnungen $O(\epsilon^2)$ oder höher werden vernachlässigt. Die sich ergebenden Terme

$$\begin{aligned} T^0 : & \quad a_0 + a_1\beta_0 + a_2\beta_0^2 + a_3\beta_0^3 \stackrel{!}{=} \alpha_0 \\ T^1 : & \quad a_1\beta_1 + 2a_2\beta_0\beta_1 + 3a_3\beta_0^2\beta_1 \stackrel{!}{=} \epsilon^0\alpha_1 \\ T^2 : & \quad a_1\epsilon\beta_2 + a_2\beta_1 + 2a_2\beta_0\beta_2 + 3a_3\beta_2\beta_0^2 \stackrel{!}{=} \alpha_2 \end{aligned} \quad (4.9)$$

können dann durch einen Koeffizientenvergleich mit Gleichung (4.6) mit den Parametern $(\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$ identifiziert werden. Da sowohl die linke als auch die rechte Seite in Gleichung (4.9) von der gleichen Größenordnung sein müssen, ergibt sich für die Parameter

$$a_0 \propto \epsilon^{-1}; \quad a_1 \propto \epsilon^0; \quad a_2 \propto \epsilon^1; \quad a_3 \propto \epsilon^2 \approx 0, \quad (4.10)$$

was zeigt, dass der kubische Parameter a_3 vernachlässigbar klein ist. Als Resultat kann weiterhin eine quadratische Temperaturkompensation durchzuführen werden, obwohl der alternative Ansatz aus Gleichung (4.5) verwendet wird. Zur Berechnung des TK-Signals

$$\varepsilon_{\text{TK}} = \varepsilon_{\text{dehn}} - \xi_{\text{dehn}}(\varepsilon_{\text{therm}}) = \varepsilon_{\text{dehn}} - (a_0 + a_1\varepsilon_{\text{therm}} + a_2\varepsilon_{\text{therm}}^2) \quad (4.11)$$

aus Gleichung (4.2) müssen daher nur die Parameter (a_0, a_1, a_2) bekannt sein, welche mit Hilfe einer Temperaturkalibrierung und einer quadratischen Regressionsanalyse bestimmt werden können.

4.1.3 Distanzkompensation

Der Aufbau des bei den Messungen verwendeten si155 Interrogators von Micron Optics ist in Abbildung 2.11(b) beschrieben. Der Halbleiterlaserverstärker mit dem abstimmbaren Faser-Fabry-Pérot-Filter tastet alle angeschlossenen FBGs mit einer Rate von 1 kHz im Spektrum von 1500 nm bis 1600 nm ab. Da sich die FBG im Allgemeinen nicht in unmittelbarer Nähe

4 Temperaturkompensation

des Interrogators befinden, benötigt das Licht eine nicht zu vernachlässigende Zeit, um vom Interrogator zu den FBG und wieder zurück zu gelangen. Die Flugzeit

$$\Delta t = \frac{2Ln}{c} \quad (4.12)$$

hängt von der Distanz zwischen Interrogator und FBG L , dem Brechungsindex der Glasfaser $n = 1.4682$ und der Lichtgeschwindigkeit c ab [72]. Bei einer Entfernung von 1 km beträgt die Zeitdifferenz lediglich etwa $1 \mu\text{s}$. Aufgrund der hohen Abtastrate des Interrogators reichen jedoch selbst diese kleinen Zeiten aus, um einen messbaren Unterschied zu bewirken. Innerhalb der Flugzeit des Lichts hat sich der Fabry-Pérot-Filter weiterbewegt und befindet sich an einer anderen Wellenlänge. Der Referenzarm misst die nun ausgesendete Wellenlänge und leitet sie an die Signalverarbeitung weiter. Währenddessen nehmen die Photodioden das von den FBG reflektierte Licht auf, das eine kürzere Wellenlänge hat als das ausgesendete Licht. Da die Photodioden die Wellenlängen nicht unterscheiden können, geben sie nur die Intensität des Lichts an die Signalverarbeitung weiter. Diese ordnet diese Information der emittierten Wellenlänge zu und nicht der eingehenden Wellenlänge. Als Resultat werden die vom Interrogator aufgezeichneten FBG-Signale um eine Wellenlängendifferenz verschoben, die für jedes FBG konstant ist. Mit Hilfe der Geschwindigkeit des Interrogators $v_I = 0.408 \text{ nm}/\mu\text{s}$, die vom Laser, dem Fabry-Pérot-Filter und dem abgetasteten Wellenlängenbereich abhängt, kann die distanzabhängige Wellenlängenschiebung $\Delta\lambda_c = v_I\Delta t$ bestimmt werden. Zur Berechnung des distanzkompensierten Signals eines FBG

$$\varepsilon_{\text{DK}} = \frac{1}{K_\varepsilon} \frac{\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_c}{\lambda_B} \quad (4.13)$$

wird die Wellenlängenschiebung von der gemessenen Wellenlängendifferenz der Bragg-Wellenlänge $\Delta\lambda_B$ aus Gleichung (2.32) subtrahiert, wobei K_ε die Dehnungsempfindlichkeit der FBG ist. Solange der Abstand zwischen Interrogator und FBG nicht verändert wird, bleibt der Einfluss der Distanz konstant.

Im Falle einer FBG-Dehnungsmessung bedeutet eine konstante Verschiebung des Messsignals lediglich einen Offset, der später vom Signal abgezogen werden kann. Aufgrund der im Abschnitt 4.1.2 beschriebenen Nichtlinearität der Temperaturkompensation entstehen jedoch Mischterme, die einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Kompensation haben. Mit Hilfe der Gleichung (4.11) kann gezeigt werden, dass eine konstante Verschiebung des Rohsignals des Thermometers $\varepsilon_{\text{therm}} \rightarrow \varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{Off}}$ nicht nur einen Einfluss auf

den Offset a_0 der Temperaturkompensation hat, sondern auch den linearen Term mit dem Parameter a_1 verändert:

$$\begin{aligned}\xi_{\text{dehn}}(\varepsilon_{\text{therm}}) &= a_0 + a_1(\varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{Off}}) + a_2(\varepsilon_{\text{therm}} + \varepsilon_{\text{Off}})^2 \\ &= (a_0 + a_1\varepsilon_{\text{Off}} + a_2\varepsilon_{\text{Off}}^2) + (a_1 + 2a_2\varepsilon_{\text{Off}})\varepsilon_{\text{therm}} + a_2\varepsilon_{\text{therm}}^2.\end{aligned}\quad (4.14)$$

Temperaturänderungen in einem FBG-Messsystem werden daher nicht mehr korrekt aus dem Dehnungssignal kompensiert, was die Unsicherheit der Messungen erheblich erhöht. Um die Auswirkung der distanzabhängigen Verschiebung auf die Temperaturkompensation zu veranschaulichen, ist in Abbildung 4.2(a) das TK-Signal ε_{TK} aus Gleichung (4.11) während einer Temperaturkalibrierung dargestellt. Das FBG-Messsystem befindet sich

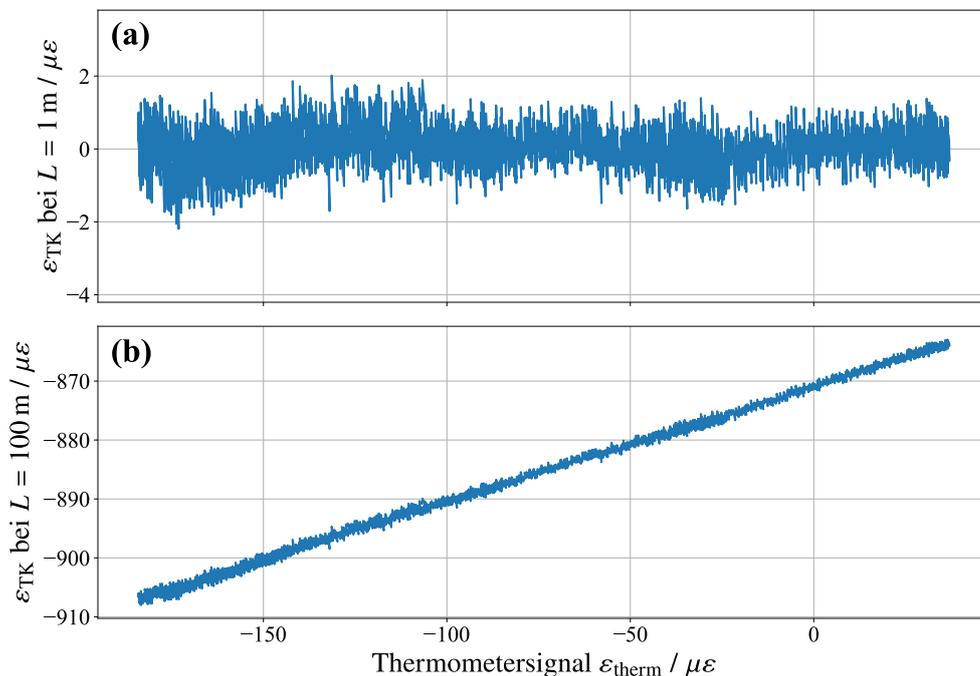


Abbildung 4.2: Einfluss der Distanz zwischen FBG und Interrogator auf eine Temperaturkalibrierung. (a): TK-Signal eines FBG-Dehnungssensors ε_{TK} als Funktion des Thermometersignals $\varepsilon_{\text{therm}}$ bei einer Distanz $L < 1$ m. (b): Die selbe Messung mit einer erhöhten Distanz $L = 100$ m. Aufgrund der distanzabhängigen Wellenlängenverschiebung ändern sich Offset und linearer Term der Temperaturkompensation, wodurch das TK-Signal ε_{TK} eine Temperaturabhängigkeit erhält. Dies erhöht die Unsicherheit einer Dehnungsmessung erheblich.

während der Messung in einem Abstand $L < 1$ m vom Interrogator. Jegliche mechanische Belastung des FBG-Dehnungssensors wird vermieden und es wird keine Distanzkomensation durchgeführt. Aufgrund des geringen Abstands und des Fehlens mechanischer Einflüsse liegt das TK-Signal über den gesamten beobachteten Bereich auf der Nulllinie, was eine funktionierende und genaue Temperaturkompensation zeigt. Abbildung 4.2(b) zeigt die Auswirkungen einer Vergrößerung des Abstands auf $L = 100$ m. Wie aus der

4 Temperaturkompensation

Gleichung (4.14) ersichtlich ist, hat sich der Offset stark verringert und es ist eine lineare Abhängigkeit des TK-Signals vom Rohsignal des Thermometers zu erkennen. Folgende Parameter wurden für die Erstellung der Abbildung verwendet:

$$\begin{aligned} a_0 &= 568.1 \pm 0.1 \mu\epsilon & a_2 &= (-3.824 \pm 0.001) \times 10^{-4} \mu\epsilon^{-1} \\ a_1 &= 4.78 \pm 0.01 & \epsilon_{\text{Off}} &= 256 \mu\epsilon. \end{aligned} \quad (4.15)$$

Für die Temperaturkompensation einer FBG-Dehnungsmessung bedeutet dies, dass der Abstand zwischen dem FBG und dem Interrogator bekannt sein muss. Eine Distanzkom-pensation mit Gleichung (4.13) sollte direkt nach der Datenerfassung durchgeführt werden, um die Bildung von Mischtermen wie in Gleichung (4.14) zu vermeiden. Auf diese Weise gibt es keinen distanzabhängigen Einfluss auf die Temperaturkompensation.

4.1.4 Housing

Lokale Temperaturunterschiede zwischen dem FBG-Dehnungssensor und dem FBG-Thermometer führen zu einer fehlerhaften Temperaturkompensation und Ungenauigkeiten im TK-Signal ϵ_{TK} . Um eine genaue Dehnungsmessung zu gewährleisten, müssen daher schnelle Luftbewegungen und direkte Sonneneinstrahlung ausgeschlossen werden. Dies kann durch ein Housing um das FBG-Messsystems erreicht werden, welches schematisch in Abbildung 4.3 dargestellt ist. Dazu werden dünne Platten aus Styrodur verwendet, die mit

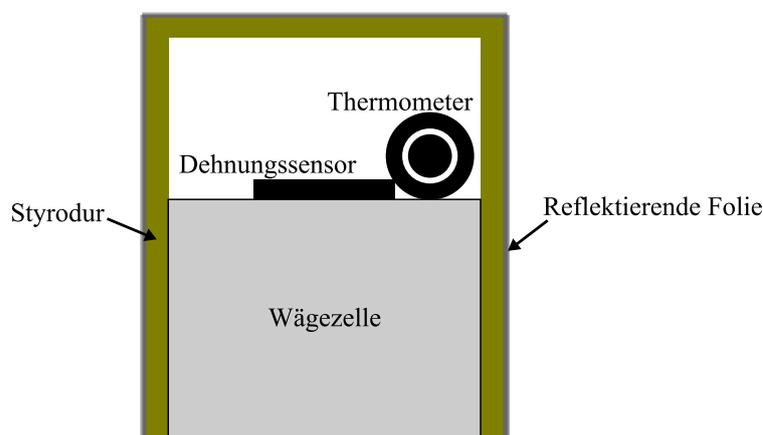


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines Housings für eine faseroptische Wägezelle. Das Styrodur schützt vor Luftbewegungen und dämpft schnelle Änderungen der Umgebungstemperatur. Eine Erwärmung des Messsystems durch Wärmestrahlung wird durch eine Reflexionsfolie verhindert.

einer reflektierenden Folie abgedeckt werden. Styrodur ist ein Isoliermaterial mit ähnlichen thermischen Eigenschaften wie Styropor, mit dem Unterschied, dass Styrodur viel fester ist

und somit die Konstruktion eines stabileren Housings ermöglicht. Die Platten stellen eine mechanische Barriere für Luftbewegungen dar und ihre geringe Wärmeleitfähigkeit verlangsamt Schwankungen der Umgebungstemperatur. Die Folie reflektiert Wärmestrahlung, so dass das Messsystem nicht inhomogen durch Strahlung aufgeheizt werden kann.

Um die Auswirkungen des Housings zu veranschaulichen, zeigt Abbildung 4.4(a) die Temperaturkalibrierung einer faseroptischen Wägezelle ohne Housing und Abbildung 4.4(b) mit Housing. Die Temperatur wird schrittweise von -10 °C auf $+30\text{ °C}$ über einen Zeitraum

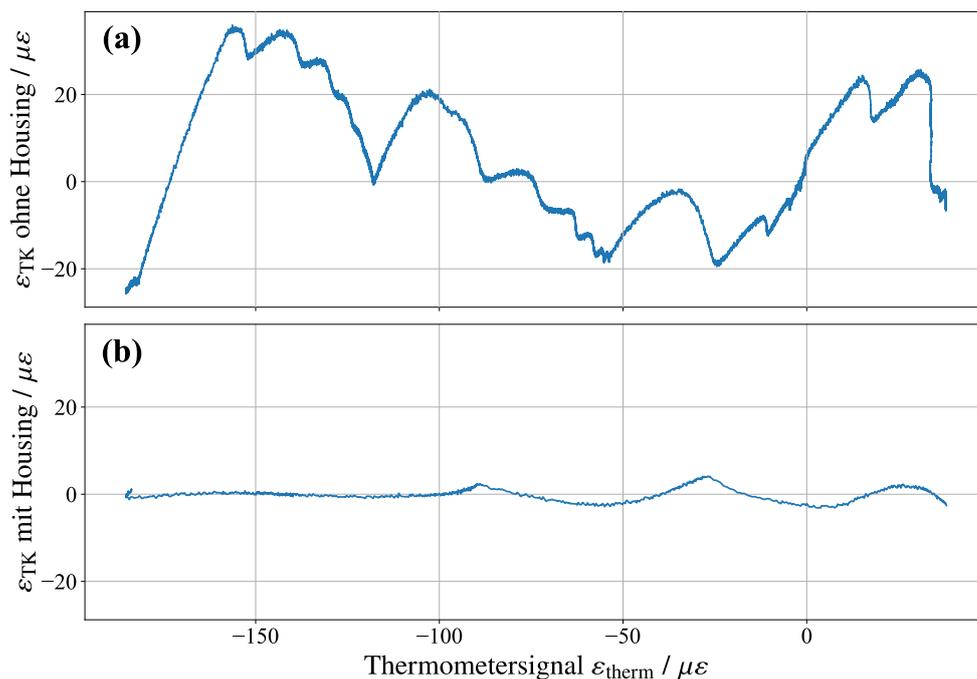


Abbildung 4.4: Temperaturkalibrierung von zwei faseroptischen Wägezellen. (a): TK-Signal ϵ_{TK} des FBG-Messsystems als Funktion des Thermometersignals ϵ_{therm} ohne den Schutz eines Housings. (b): TK-Signal mit dem Schutz eines Housings. Schnelle Änderungen der Umgebungstemperatur wirken sich wesentlich stärker auf das TK-Signal der Wägezelle ohne Housing aus. Es treten Schwankungen von bis zu $50\ \mu\epsilon$ auf, während es beim TK-Signal mit Housing nur Schwankungen von bis zu $6\ \mu\epsilon$ gibt.

von etwa 4 Stunden erhöht. Das TK-Signal ohne Housing weist erhebliche Schwankungen von bis zu $50\ \mu\epsilon$ auf, die besonders ausgeprägt sind, wenn die Temperatur um einen Schritt erhöht wird und es zu schnellen Änderungen der Umgebungstemperatur kommt. Obwohl der Abstand zwischen Dehnungssensor und Thermometer nur wenige Millimeter beträgt, nehmen die Sensoren schnelle Temperaturänderungen unterschiedlich wahr und es entstehen Temperaturunterschiede, die sich im TK-Signal bemerkbar machen. Im Gegensatz dazu zeigt das TK-Signal der Wägezelle mit Housing deutlich geringere Schwankungen von höchstens $6\ \mu\epsilon$. Das Erhöhen einer Temperaturstufe zeigt zwar immer noch Auswirkungen

4 Temperaturkompensation

auf die Temperaturkompensation, aber in deutlich geringerem Maße. Die Messungen zeigen, dass ein Housing für eine genaue und funktionierende Temperaturkompensation notwendig ist, da schnelle Temperaturschwankungen in der Umgebung oder direkte Wärmestrahlung zu Temperaturunterschieden zwischen FBG-Dehnungssensor und FBG-Thermometer führen können.

4.2 Einfluss der Wärmekopplung

Eine ungenaue Temperaturkompensation führt zu einer unsicheren Dehnungsmessung. Wenn das TK-Signal aus Gleichung (4.2) nicht vollständig von allen Temperatureinflüssen befreit ist, überlagern thermische Einflüsse die gesuchte mechanische Dehnung ε_m . Je nach Temperaturänderung wird dann eine vermeintliche mechanische Dehnung gemessen, die teilweise auf eine ungenaue Temperaturkompensation zurückzuführen ist. Zum einen entstehen Ungenauigkeiten durch die falsche Wahl der Kompensationsparameter. Dies kann z.B. durch fehlende Berücksichtigung der Nichtlinearitäten oder eine falsch durchgeführte Distanzkompensation geschehen. Zum anderen führen lokale Temperaturunterschiede zwischen dem FBG-Dehnungssensor und dem FBG-Thermometer zu einem temperaturabhängigen Signal ε_{TK} . Dies ist dadurch begründet, dass für die Temperaturkompensation die Temperatur des Dehnungssensors gemessen werden muss, was aber nicht direkt möglich ist. Daher wird ein FBG-Thermometer in der Nähe platziert und die Annahme getroffen, dass die Temperatur des Thermometers der des Dehnungssensors entspricht. In diesem Abschnitt wird beschrieben, dass diese Annahme aufgrund einer unterschiedlichen Wärmekopplung zwischen den Sensoren und dem darunter liegenden Substrat nicht mehr getroffen werden kann [73].

4.2.1 Beobachtung

Unter Berücksichtigung der Nichtlinearität und des Abstands zwischen Interrogator und FBG wird eine Messung über mehrere Tage mit dem Messsystem aus Abbildung 3.2 durchgeführt. Die Wägezelle wird während der Messung nicht belastet, so dass mechanische Effekte keinen Einfluss auf das Signal haben können. Das gemessene Dehnungssignal ε_{dehn} ist in Abbildung 4.5(a) und das Thermometersignal ε_{therm} ist in Abbildung 4.5(b) dargestellt. Die Temperatur schwankte über den Zeitraum der Messung um etwa $2\text{ }^\circ\text{C}$, was sich durch den Tag-Nacht-Zyklus erklären lässt. Nach 220 000 s ist ein Tor zum Messbereich geöffnet, so dass die Temperatur zunächst stark abfällt und dann aufgrund der stark steigenden Außentemperatur wieder zunimmt. Die Temperaturschwankungen führen zu Veränderungen des Dehnungssignals ε_{therm} von etwa $60\ \mu\varepsilon$, während sich das Thermometersignal ε_{therm} nur um etwa $15\ \mu\varepsilon$ ändert. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Dehnungssensor von der Wärmeausdehnung der darunter liegenden Wägezelle beeinflusst wird, während dies beim Thermometer nicht der Fall ist. Abbildung 4.5(c) zeigt das TK-Signal ε_{TK} , das mit den Parametern aus Gleichung (4.15) berechnet wird. Da es keine mechanische Belastung $\varepsilon_m = 0$ gibt, die Temperaturkompensationsparameter durch Kalibrierung bestimmt wurden und das Messsystem vor äußeren Einflüssen wie Wind und Sonne geschützt ist, ist zu erwarten,

4 Temperaturkompensation

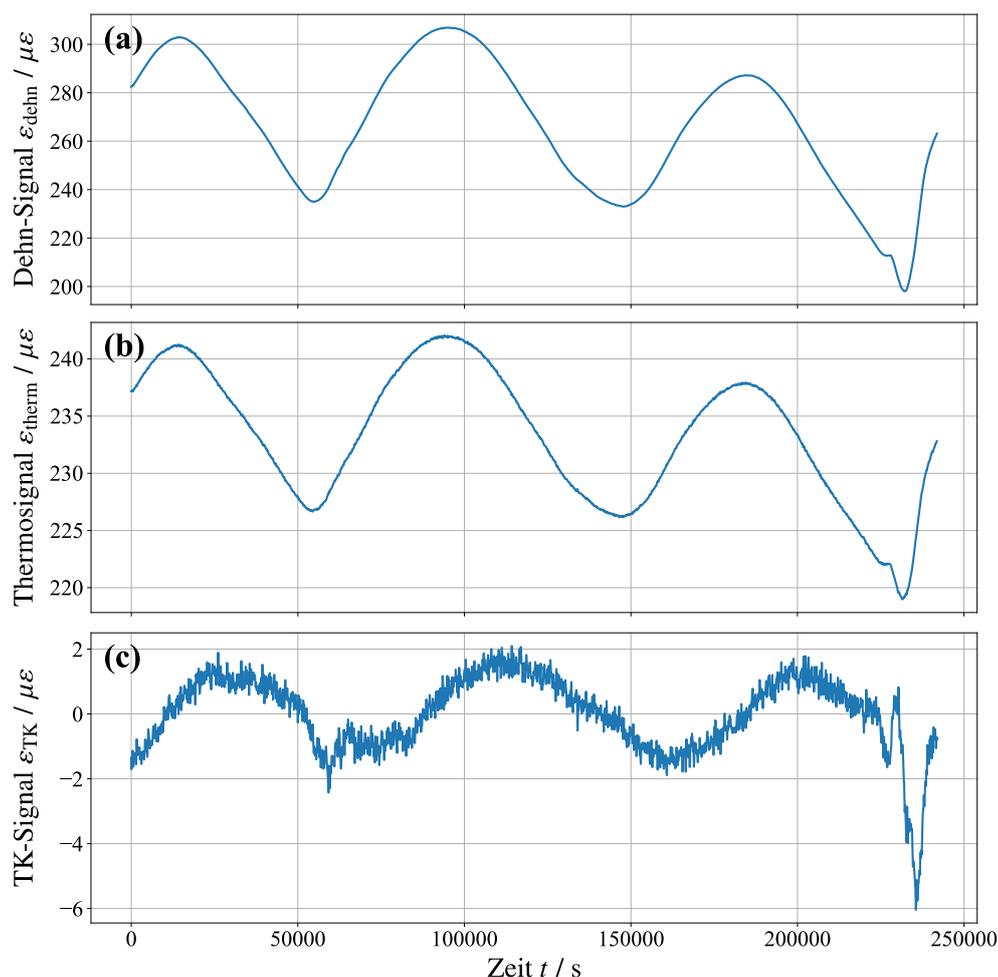


Abbildung 4.5: Messung eines FBG-Messsystems ohne mechanische Belastung über einen Zeitraum von mehreren Tagen. (a): Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}}$. (b): Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$. (c): TK-Signal ε_{TK} , das mit den Parametern aus Gleichung (4.15) berechnet wird. Temperaturschwankungen von etwa 2°C führen zu Veränderungen im Dehnungs- und Thermometersignal. Diese Änderungen sollten durch eine Temperaturkompensation eliminiert werden, so dass das TK-Signal über den gesamten Zeitraum ein Nullsignal ergibt. Die bis zu $6\ \mu\varepsilon$ auftretenden Schwankungen deuten darauf hin, dass es einen noch nicht berücksichtigten physikalischen Effekt gibt, der nicht direkt mit der Temperatur korreliert.

dass keine Schwankungen im TK-Signal zu beobachten sind. Nach Gleichung (4.11) ist ein Signal $\varepsilon_{\text{TK}} = 0$ zu erwarten, welches über die gesamte Dauer der Messung auf der Nulllinie liegt. Die Tatsache, dass dennoch Schwankungen von bis zu $6\ \mu\varepsilon$ auftreten, ist ein Hinweis darauf, dass es einen physikalischen Effekt gibt, der noch nicht berücksichtigt wurde. Da es keine Korrelation zwischen den Schwankungen des Thermometersignals und denen des TK-Signals gibt, kann eine falsche Wahl der Temperaturparameter ausgeschlossen werden. Folglich muss der unberücksichtigte physikalische Effekt eine Temperaturdifferenz zwischen dem Dehnungssensor und dem Thermometer verursachen, die nicht direkt vom

zeitlichen Verlauf der Temperatur abhängig ist. Die Hypothese ist, dass die unterschiedliche Wärmekopplung der Sensoren zur unterliegenden Wägezelle zu einer verzögerten Reaktion des Dehnungssensors auf Temperaturänderungen führt.

4.2.2 Theoretische Analyse

Wärmekopplung beschreibt das Ausmaß des thermischen Kontakts zwischen zwei thermodynamischen Systemen [74]. Je höher die Wärmekopplung ist, desto stärker wird die Temperatur des einen Systems durch die des anderen beeinflusst. Zwischen dem FBG-Dehnungssensor in Abbildung 3.2 und der Wägezelle besteht ein enger Kontakt, da das FBG mit Klebstoff auf der Oberfläche befestigt ist. Darüber hinaus schützt der Träger aus Kunststoff oder Metall den Sensor vor der Umgebung. Die Wärmekopplung zwischen dem Dehnungssensor und der Wägezelle ist daher deutlich höher als zur Umgebung. Im Gegensatz dazu liegt das FBG-Thermometer lediglich auf der Wägezelle auf, was bedeutet, dass es eine geringe Wärmekopplung zu ihr hat und hauptsächlich von den Änderungen der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Eine Temperaturdifferenz zwischen der Wägezelle und der Umgebung führt somit zu einem Temperaturunterschied zwischen dem FBG-Dehnungssensor und dem FBG-Thermometer, was dann im TK-Signal ε_{TK} zu erkennen ist. Die Annahme ist, dass sich die Wägezelle aufgrund ihrer höheren Wärmekapazität langsamer erwärmt als die Luft in der Umgebung. Ein Anstieg der Umgebungstemperatur führt daher nicht zu einem sofortigen Anstieg der Wägezellentemperatur, sondern zu einer verzögerten Reaktion.

Zur theoretischen Beschreibung des Effekts werden das Fouriersche Gesetz der Wärmeleitung und einfache thermodynamische Annahmen verwendet. Das Gesetz beschreibt die Wärme, die von einem heißeren zu einem kühleren Körper fließt, wenn die beiden Körper in thermischem Kontakt sind [74]. Die Umgebungstemperatur $T_R = T_0 + u(t)$ wird in einen konstanten Term T_0 und einen zeitlich veränderlichen Term $u(t)$ aufgeteilt. Für die Wägezellentemperatur $T_{WZ} = T_0 + v(t)$ wird derselbe konstante Term T_0 angenommen, aber die Zeitabhängigkeit $v(t)$ wird anders gewählt. Da die Wägezelle in thermischem Kontakt mit der Umgebung steht, ergibt sich nach dem Fourierschen Gesetz ein Wärmestrom

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{kA}{d}(T_R - T_{WZ}) = \frac{kA}{d}(u(t) - v(t)), \quad (4.16)$$

4 Temperaturkompensation

wobei k , A und d die Wärmeleitfähigkeit, die Fläche, durch die die Wärme fließt, bzw. ein Maß für die Größe der Wägezelle sind [75]. Die Wärme, die in die Wägezelle fließt, führt zu einer Temperaturerhöhung. Die Wärmemenge

$$dQ = c_V m dT_{WZ}, \quad (4.17)$$

die erforderlich ist, um die Temperatur der Wägezelle um ein kleines Inkrement dT_{WZ} zu erhöhen, hängt von der spezifischen Wärmekapazität c_V und der Masse m ab. Zusammenfügen der Gleichungen (4.16) und (4.17) ergibt eine Differenzialgleichung für die Wägezellentemperatur T_{WZ} :

$$T_{WZ} + t_r \frac{dT_{WZ}}{dt} = T_R \quad \text{bzw.} \quad v(t) + t_r \frac{dv(t)}{dt} = u(t), \quad (4.18)$$

mit einer Verzögerungszeit $t_r = c_V m d / k A$. Gleichung (4.18) hat die gleiche Form wie ein PT_1 -Verzögerungsglied aus der Regelungstechnik mit einem Verstärkungsfaktor von eins [76]. Daraus lässt sich ableiten, dass es eine Verzögerung zwischen der Wägezellentemperatur und der Umgebungstemperatur gibt, deren Größe durch die Verzögerungszeit t_r gegeben ist. Die bekannte Übertragungsfunktion des Verzögerungsglieds

$$G(s) = \frac{V(s)}{U(s)} = \frac{1}{1 + t_r s} \quad (4.19)$$

mit $V(s) = \mathcal{L}[v(t)]$ und $U(s) = \mathcal{L}[u(t)]$ als die Laplace-Transformierten der zeitlich veränderlichen Terme $v(t)$ und $u(t)$, kann zur Lösung der Differentialgleichung (4.18) verwendet werden. Die Änderung der Wägezellentemperatur

$$v(t) = \mathcal{L}^{-1} [G(s)U(s)] = \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{U(s)}{1 + t_r s} \right] \quad (4.20)$$

kann als inverse Laplace-Transformation des Produkts der Übertragungsfunktion $G(s)$ aus Gleichung (4.19) und $U(s)$ berechnet werden. Gemäß dem Faltungstheorem kann eine Multiplikation im Bildbereich mit der komplexen Frequenz s in eine Faltung im Zeitbereich umgewandelt werden [77]. Die Gleichung (4.20) kann daher direkt im Zeitbereich mit folgender Formel berechnet werden:

$$v(t) = \mathcal{L}^{-1} [U(s)] * \mathcal{L}^{-1} \left[\frac{1}{1 + t_r s} \right] = \frac{1}{t_r} \int_0^t u(t - \tau) e^{-\tau/t_r} d\tau, \quad (4.21)$$

wodurch ein direkter Zusammenhang zwischen Umgebungstemperatur $T_R = T_0 + u(t)$ und Wägezellentemperatur $T_{WZ} = T_0 + v(t)$ gegeben ist.

Zum besseren Verständnis von Gleichung (4.21) wird in Abbildung 4.6 ein möglichst einfacher Verlauf der Umgebungstemperatur T_R als durchgezogene Linie dargestellt. Diese

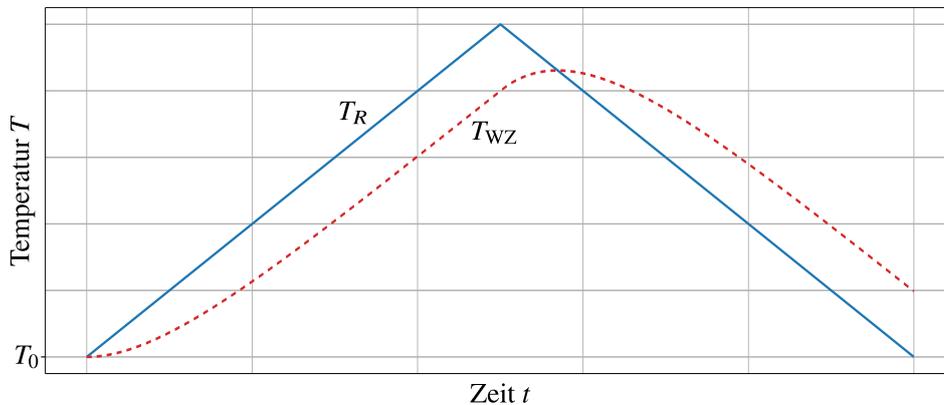


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung der Reaktion der Wägezellentemperatur T_{WZ} (gestrichelte Linie) auf einen einfachen Verlauf der Umgebungstemperatur T_R (durchgezogene Linie) als Funktion der Zeit t . Die Wägezelle reagiert verzögert auf den linearen Anstieg der Umgebungstemperatur, so dass nach einiger Zeit eine Temperaturdifferenz auftritt. In der Abkühlungsphase ist ein sehr ähnliches Verhalten zu beobachten, nur mit anderem Vorzeichen.

startet bei einer beliebig gewählten Temperatur T_0 und steigt dann linear mit der Zeit t an. Nach Erreichen eines Hochpunktes sinkt die Umgebungstemperatur linear mit der gleichen Rate ab. Eine gestrichelte Linie zeigt die Reaktion der Wägezellentemperatur T_{WZ} auf Änderungen der Umgebungstemperatur T_R . Diese beginnt ebenfalls bei der Temperatur T_0 , reagiert aber verzögert. Es kommt also nicht zu einem sofortigen linearen Anstieg, der dem der Umgebungstemperatur entspricht, sondern die Wägezellentemperatur tritt zunächst in eine Verzögerungsphase ein und geht erst dann in einen linearen Anstieg über. Ein ähnliches Verhalten ist in der Abkühlphase der Umgebungstemperatur zu beobachten. Erst nach einer verzögerten Reaktion geht die Wägezellentemperatur in eine linearen Abnahme über. Allgemein kann folgende Aussage getroffen werden: In Erwärmungsphasen ist die Wägezelle kühler ($T_{WZ} < T_R$) und in Abkühlungsphasen ist die Wägezelle wärmer ($T_{WZ} > T_R$) als die Umgebung.

Die daraus resultierende Temperaturdifferenz wird vom FBG-Dehnungssensor und vom FBG-Thermometer unterschiedlich wahrgenommen. Aufgrund der niedrigeren Wärmekopplung des Thermometers zur Wägezelle im Vergleich zum Dehnungssensors reagiert das Thermometer eher auf Änderungen der Umgebungstemperatur $T_R \approx T_{\text{therm}}$, während der Dehnungssensor eher auf Änderungen der Wägezellentemperatur $T_{WZ} \approx T_{\text{dehn}}$ reagiert. Dementsprechend wird für eine Temperaturkalibrierung des FBG-Messsystems ein qualitativ sehr ähnliches Verhalten wie in Abbildung 4.6 erwartet. Die verzögerte Reaktion des FBG-Dehnungssensors auf Temperaturänderungen führt dann zu Schwankungen im TK-Signal ε_{TK} , die in Abbildung 4.5(c) zu sehen sind.

4.2.3 Experimente

Um die Hypothese experimentell zu bestätigen, wird das Ergebnis aus Gleichung (4.21) verwendet, um die Temperaturkalibrierung des FBG-Messsystems aus Abbildung 4.5 zu verbessern. Die Verzögerungszeit zwischen der Temperatur des Dehnungssensors T_{dehn} und der Temperatur des Thermometers T_{therm} unterscheidet sich im Allgemeinen von der Verzögerungszeit zwischen der Umgebungstemperatur T_R und der Wägezellentemperatur T_{WZ} . Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Dehnungssensor in geringem, aber unbekanntem Maße auch von der Umgebungstemperatur beeinflusst wird. Dies gilt auch für das Thermometer und die Temperatur der Wägezelle. Es ist daher nicht möglich, eine analytische Berechnung anhand der Werte der Wägezelle durchzuführen, um die Verzögerungszeit t_r zwischen den Sensoren zu bestimmen. Aus diesem Grund wird ein Optimierungsalgorithmus verwendet, der das Signal des Thermometers $\varepsilon_{\text{therm}}$ mit einer variierenden Verzögerungszeit berechnet. Anschließend wird das TK-Signal ε_{TK} anhand der Gleichung (4.11) ermittelt. Da das optimale TK-Signal während der gesamten Messdauer auf der Nulllinie liegt, reduziert die optimale Verzögerungszeit t_r die Standardabweichung des TK-Signals auf ein Minimum. Je kleiner die Standardabweichung ist, desto mehr nähert sich das TK-Signal dem Ziel eines Nullsignals $\varepsilon_{\text{TK}} = 0$, so dass die Standardabweichung als Optimierungsparameter verwendet werden kann.

Die Messdaten aus Abschnitt 4.2.1 werden nun mit Hilfe von Gleichung (4.21) optimiert. Die durch den Optimierungsalgorithmus berechnete Verzögerungszeit beträgt $t_r = 400$ s. Das verzögerte Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}^{t_r=400\text{s}}$ ist in Abbildung 4.7(a) dargestellt und zeigt keine qualitativen Unterschiede zu dem unverzögerten Signal $\varepsilon_{\text{therm}}^{t_r=0}$ aus Abbildung 4.5(b), da die Verzögerungszeit $t_r \ll 50\,000$ s sehr viel kleiner ist als die Zeitkonstante der auftretenden Temperaturänderungen. Im Gegensatz dazu sind im TK-Signal ε_{TK} aus Abbildung 4.7(b) signifikante Änderungen zu beobachten, die im Zeitbereich nach 225 000 s am stärksten sind. Zum direkten Vergleich sind die Ergebnisse des unverbesserten TK-Signals aus Abbildung 4.5(c) halbtransparent dargestellt. Die zuvor beobachteten Schwankungen haben sich deutlich reduziert und die Standardabweichung des Signals über den betrachteten Zeitraum hat sich von $1.17\ \mu\varepsilon$ auf $0.33\ \mu\varepsilon$ verringert, was einem Faktor von ungefähr 3.5 entspricht. Während der Messung schwankt die Temperatur um $2\ ^\circ\text{C}$. Größere Temperaturänderungen würden den im Abschnitt 4.2.2 erläuterten Verzögerungseffekt verstärken, so dass ein noch höherer Verbesserungsfaktor zu erwarten ist. Die Ergebnisse bestätigen das es zu Temperaturunterschieden zwischen Dehnungssensor und Thermometer kommt, die auf eine unterschiedliche Wärmekopplung der Sensoren an die Wägezelle zurückzuführen sind. Die daraus resultierende Verzögerung kann mit Gleichung (4.21) und einem

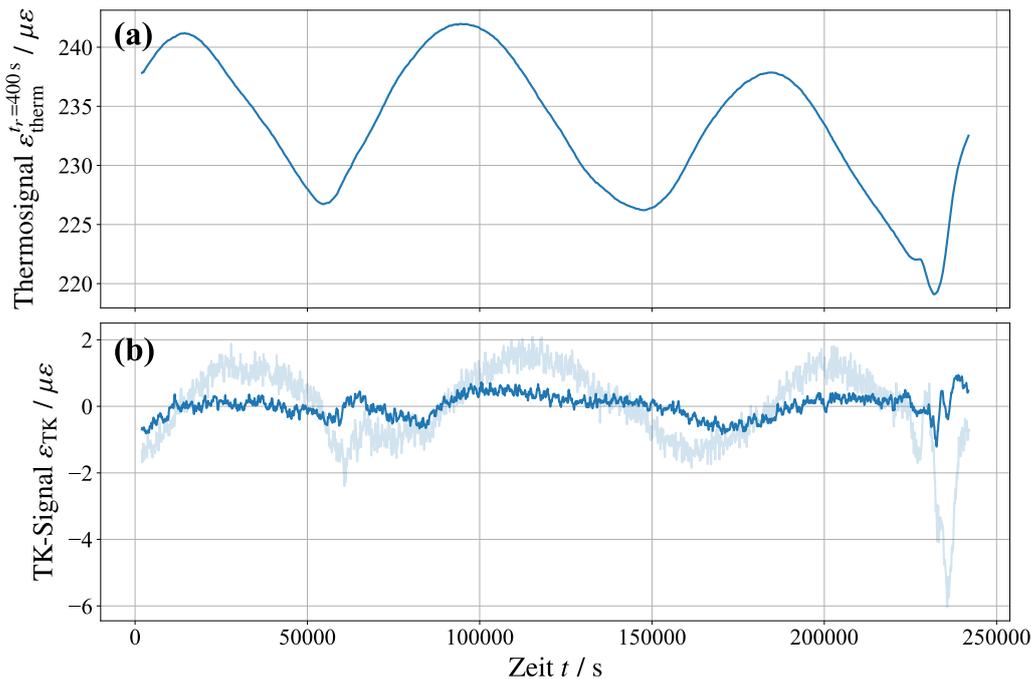


Abbildung 4.7: Optimierte Temperaturkompensation unter Verwendung der Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.2. (a): Verzögertes Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}^{t_r=400\text{s}}$ mit einer Verzögerungszeit $t_r = 400\text{s}$ als Funktion der Zeit t . (b): TK-Signal ε_{TK} , das mit dem verzögerten Signal berechnet wird. Im Hintergrund wird halbtransparent das TK-Signal aus Abbildung 4.5(c) dargestellt. Das Thermometersignal zeigt keine qualitativen Veränderungen. Die Schwankungen im TK-Signal haben sich aufgrund der Verwendung von Gleichung (4.21) um einen Faktor von ungefähr 3.5 verringert, was die Hypothese und die Ergebnisse aus Abschnitt 4.2.2 bestätigt.

Optimierungsalgorithmus korrigiert werden, was zu einer deutlichen Verbesserung der Temperaturkompensation führt.

Nach Gleichung (4.18), die einen direkten Zusammenhang zwischen der Wägezellen-temperatur T_{WZ} und der Umgebungstemperatur T_R herstellt, entsteht eine Temperaturdifferenz durch die Existenz einer Verzögerungszeit t_r . Je größer diese ist, desto größer ist der Temperaturunterschied zwischen Wägezelle und Umgebung und damit zwischen Dehnungssensor und Thermometer. Eine beschleunigte Wärmeleitung im Messsystem führt zu kleineren Verzögerungszeiten und somit zu einer besseren Temperaturkompensation. Dies wird durch die Verwendung von Wärmeleitpaste erreicht, die eine hohe Wärmeleitfähigkeit $k_{\text{WLP}} \approx 11\text{ W/m/K}$ aufweist und damit eine wesentlich stärkere Wärmekopplung zwischen Thermometer und Wägezelle herstellt als Luft, deren Wärmeleitfähigkeit $k_{\text{Luft}} = 0.024\text{ W/m/K}$ um drei Größenordnungen geringer ist [78]. Das Messsystem wird mit Wärmeleitpaste versehen und die Messung aus Abschnitt 4.2.1 wird wiederholt. Der Verlauf des verzögerten Thermometersignals $\varepsilon_{\text{therm}}^{t_r=10\text{s}}$ über einen Zeitraum

4 Temperaturkompensation

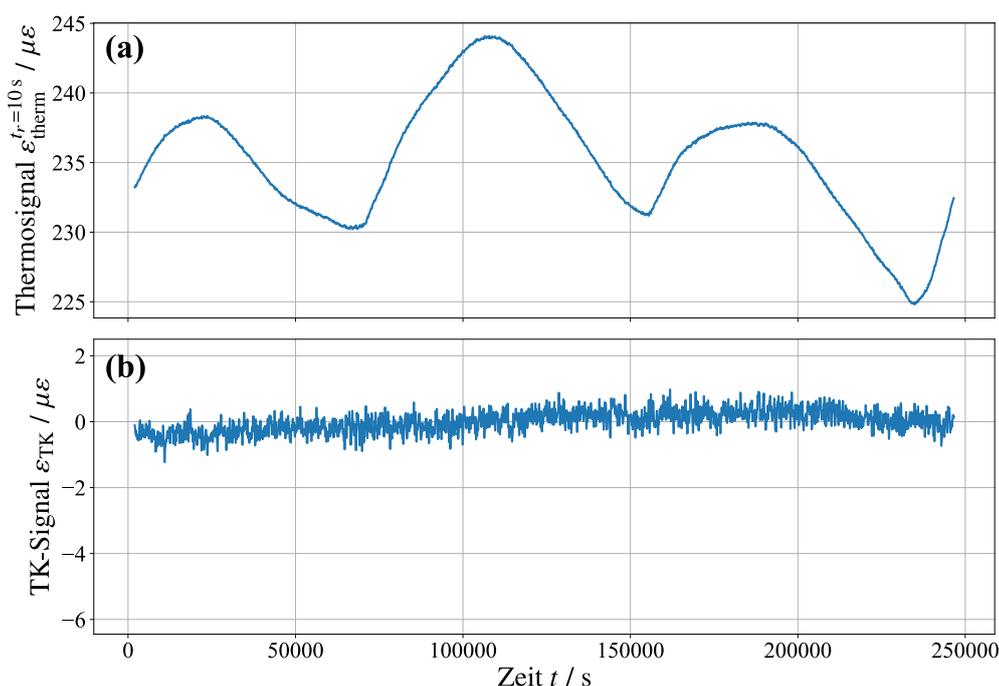


Abbildung 4.8: Messung eines FBG-Messsystems über einen Zeitraum von mehreren Tagen mit den gleichen Parametern wie in Abbildung 4.5, außer dass dem Messsystem Wärmeleitpaste hinzugefügt wird. (a): Unverzögertes Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$. (b): TK-Signal ε_{TK} als Funktion der Zeit t . Der Temperaturverlauf ist vergleichbar mit der Messung ohne Wärmeleitpaste. Nichtsdestoweniger gibt es deutlich weniger Schwankungen im TK-Signal. Es gibt keine Verzögerung mehr zwischen dem Dehnungssensor und dem Thermometer und damit keine Temperaturdifferenz, die Schwankungen im TK-Signal verursacht.

von mehreren Tagen ist in Abbildung 4.8(a) dargestellt und ähnelt dem bisherigen Verlauf aus Abbildung 4.5(b), da es während der Messung ebenfalls zu Temperaturschwankungen von $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ kommt. Die Temperaturschwankungen des Tag-Nacht-Zyklus führen zu mehreren Hoch- und Tiefpunkten und zu Änderungen des Thermometersignals um $15\ \mu\varepsilon$. Somit sind die Ergebnisse vergleichbar mit der zuvor durchgeführten Messung ohne Wärmeleitpaste. Abbildung 4.8(b) zeigt das mit Gleichung (4.11) berechnete TK-Signal ε_{TK} . Änderungen aufgrund von Temperaturschwankungen sind nicht erkennbar und die Standardabweichung beträgt $0.27\ \mu\varepsilon$. Aufgrund der verbesserten Wärmekopplung im System wird die Temperaturverteilung homogenisiert und die Wärmeleitung beschleunigt. Der Optimierungsalgorithmus errechnet eine Verzögerungszeit $t_r = 10\text{ s}$, die deutlich kleiner ist als beim Messsystem ohne Wärmeleitpaste. Eine kleine Verzögerungszeit bedeutet, dass die Temperaturdifferenz zwischen Dehnungssensor und Thermometer ebenfalls klein ist. Daher führt eine analytische Verzögerung mit Gleichung (4.21) zu keinen wesentlichen Änderungen. Das Ziel eines TK-Signals $\varepsilon_{\text{TK}} = 0$, das über die gesamte Messdauer ein Nullsignal annimmt, kann somit ohne analytische Kompensation erreicht werden. Folglich

führt der Einsatz von Wärmeleitpaste im Messsystem zu einer verbesserten Temperaturkompensation, die nicht mehr analytisch korrigiert werden muss. Vor jeder Messung muss sichergestellt werden, dass der FBG-Dehnungssensor und das FBG-Thermometer eine vergleichbare Wärmekopplung zur Wägezelle aufweisen. Zur Überprüfung werden die Ergebnisse einer Temperaturkalibrierung verwendet, um die Verzögerungszeit mit Hilfe des Optimierungsalgorithmus zu berechnen. Verzögerungszeiten $t_r > 50$ s weisen auf eine nicht angepasste Wärmekopplung der Sensoren hin, die auf eine zu geringe oder schlechte Verteilung der Wärmeleitpaste zurückzuführen ist.

4.3 Ergebnisse der Temperaturkalibrierungen

Um eine Temperaturkompensation der faseroptischen Wägezellen durchführen zu können, muss die genaue Form der temperaturinduzierten Dehnung $\xi_{\text{dehn}}(\varepsilon_{\text{therm}})$ des FBG-Dehnungssensors als Funktion des Thermometersignals $\varepsilon_{\text{therm}}$ bekannt sein. Unter Berücksichtigung aller Faktoren werden Temperaturkalibrierungen für alle drei Wägezellen-Varianten durchgeführt. Die Temperaturkompensation erfolgt über die temperaturinduzierte Dehnung des Thermometers $\varepsilon_{\text{therm}}$, um nicht den Umweg über die Temperatur zu gehen. Die Vorteile dieser Methode sind in Abschnitt 4.1.1 aufgelistet. Eine quadratische Regressionsanalyse wird angewendet, um die Nichtlinearität der Temperaturkompensation zu berücksichtigen, die in Abschnitt 4.1.2 verdeutlicht ist. Darüber hinaus wird der Abstand zwischen dem Interrogator und den FBG-Sensoren für jeden Sensor berücksichtigt, um sicherzustellen, dass die Temperaturkompensation nicht verfälscht wird, wie in Abschnitt 4.1.3 erläutert. Jede Wägezelle ist mit einem Housing aus Styrodur und eine reflektierende Folie umgeben, welches in Abschnitt 4.1.4 beschrieben ist. Um den Unterschied in der Wärmekopplung zwischen dem FBG-Dehnungssensor und dem FBG-Thermometer auszugleichen, werden die Sensoren mit Wärmeleitpaste beschichtet. Die Auswirkung der Wärmeleitpaste auf Temperaturmessungen ist im Abschnitt 4.2 ausführlich beschrieben.

Die Temperaturkalibrierung wird in einer Klimakammer durchgeführt. Die Innentemperatur wird in 10 °C-Schritten pro Stunde von -10 °C aus $+30\text{ °C}$ erhöht. Der Temperaturbereich deckt somit die meisten in einer Recyclinganlage auftretenden Temperaturen ab, so dass die Wägezellen anschließend zur Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage eingesetzt werden können.

4.3.1 Wägezelle WZ1

Der genaue Aufbau des Wägezelle WZ1 ist im Abschnitt 3.1.1 beschrieben. Der Abstand zum Interrogator beträgt 33.2 m, was eine Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda_c = 0.133\text{ nm}$ zur Folge hat.

In Abbildung 4.9 ist die Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ1 als Funktion der Zeit t abgebildet. Zu Beginn der Messung kühlt die Klimakammer noch ab, so dass die Temperatur sinkt. Im Minimum beträgt die Temperatur -7.4 °C , wobei das Signal des Dehnungssensors in Abbildung 4.9(a) einen Wert von $\varepsilon_{\text{dehn}} = -325\text{ }\mu\varepsilon$ und das Thermometersignal in Abbildung 4.9(b) einen Wert von $\varepsilon_{\text{therm}} = -184\text{ }\mu\varepsilon$ annimmt. Nach $t = 2000\text{ s}$ wird die Solltemperatur der Klimakammer von -10 °C auf 0 °C erhöht. Mit einer Verzögerung

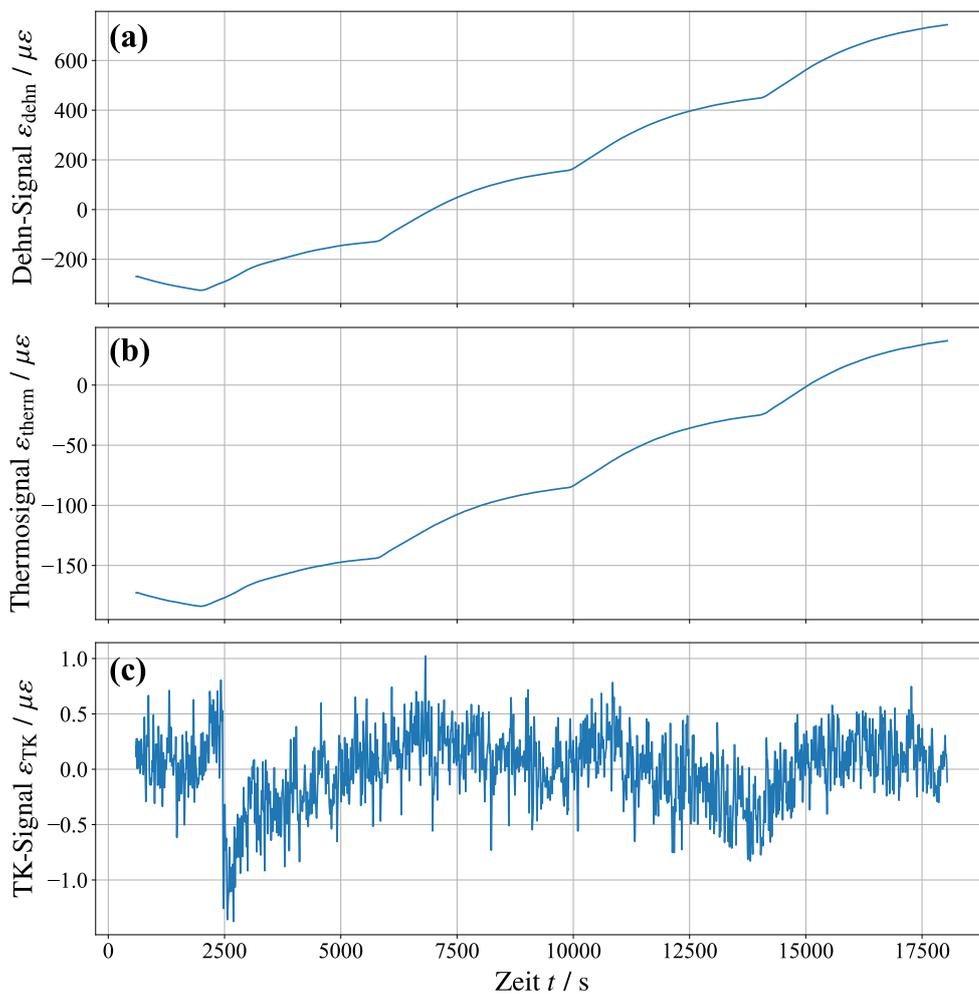


Abbildung 4.9: Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ1 als Funktion der Zeit t . (a): Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}}$. (b): Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$. (c): TK-Signal ε_{TK} . Die Innentemperatur der Klimakammer wird schrittweise von $-7.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. Das Housing flacht den Anstieg der Signale ab. Die Schwankungen des TK-Signals liegen leicht über dem Rauschniveau, mit einer Standardabweichung von $0.317\text{ }\mu\text{e}$, was auf eine genaue und funktionierende Temperaturkompensation hinweist.

von etwa 4 min reagieren die beiden Signale und beginnen zu steigen. Die Wirkung des Housings ist deutlich zu erkennen, da der Anstieg sehr flach ist. Darüber hinaus treten in der Klimakammer aufgrund der verwendeten Regelung Temperaturschwankungen auf. Die Temperatur in der Kammer schwankt um den Sollwert, bis dieser schließlich erreicht wird. Die Tatsache, dass diese Schwankungen im Signal nicht sichtbar sind, zeigt, dass das Housing schnelle Temperaturschwankungen abbremst und die Temperaturkompensation verbessert. Da die Nullwellenlänge des Thermometers bei einer Temperatur von $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen wird und das Signal die Differenz der aktuellen Wellenlänge zur Nullwellenlänge darstellt, schneidet das Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$ die Nulllinie bei genau $23.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dies

4 Temperaturkompensation

ist beim Signal des Dehnungssensors $\varepsilon_{\text{dehn}}$ nicht der Fall. Die Installation verändert die Vorspannung des FBG, was zu einem Offset unbekannter Größe führt. Am Ende der Messung beträgt die Temperatur 29.4°C und das Dehnungssignal hat einen Wert von $\varepsilon_{\text{dehn}}$ erreicht, während das Thermometersignal bei $\varepsilon_{\text{therm}} = 37 \mu\varepsilon$ liegt.

Im TK-Signal ε_{TK} in Abbildung 4.9(c) sind Schwankungen von bis zu $1 \mu\varepsilon$ zu beobachten, die ungefähr nach $t = 2500 \text{ s}$ auftreten. In diesem Bereich ist die Temperaturänderung der Klimakammer am schnellsten, da ein Übergang von Abkühlung zu Erwärmung stattfindet. Abgesehen davon liegen die Schwankungen nur geringfügig über dem Rauschniveau, so dass das Ziel eines Nullsignals über die gesamte Messdauer weitgehend erreicht wird. Die Standardabweichung des TK-Signals beträgt $0.317 \mu\varepsilon$. Der Optimierungsalgorithmus errechnet folgende Parameter für die Temperaturkompensation:

$$\begin{aligned} a_0 &= 568.1 \pm 0.1 \mu\varepsilon & a_1 &= 4.78 \pm 0.01 \\ a_2 &= (-3.824 \pm 0.001) \times 10^{-4} \mu\varepsilon^{-1} \end{aligned} \quad (4.22)$$

4.3.2 Wägezelle WZ2

Eine ausführliche Beschreibung des Aufbaus der Wägezelle WZ2 ist im Abschnitt 3.1.2 enthalten. Eine Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda_c = 0.15 \text{ nm}$ ergibt sich durch einem Abstand $L = 37.2 \text{ m}$ zwischen dem Messsystem und dem Interrogator.

Die Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ2 als Funktion der Zeit t ist in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Messung beginnt bei einer Temperatur von -7.7°C , bei der der Dehnungssensor in Abbildung 4.10(a) eine Dehnung $\varepsilon_{\text{dehn}} = 146 \mu\varepsilon$ und das Thermometer in Abbildung 4.10(b) einen Wert $\varepsilon_{\text{therm}} = -663 \mu\varepsilon$ annimmt. Nachdem die Solltemperatur der Klimakammer nach 380 s um 10°C erhöht wird, steigt die Innentemperatur schnell an. Beide Sensoren reagieren darauf nach einer Verzögerung von 120 s mit einem deutlich langsameren Anstieg, was durch die abschirmende Wirkung des Housings begründet ist. Der Nulldurchgang des Thermometersignals liegt erneut bei einer Temperatur von 23.1°C . Am Ende der Messung liegt die Temperatur bei 29.1°C , das Dehnungssignal bei $\varepsilon_{\text{dehn}} = 924 \mu\varepsilon$ und das Thermometersignal bei $\varepsilon_{\text{therm}} = 118 \mu\varepsilon$.

Im Vergleich zur vorherigen Wägezelle WZ1 hat das Dehnungssignal der Wägezelle WZ2 $\varepsilon_{\text{dehn}}$ einen geringeren Offset ($796 \mu\varepsilon > 568 \mu\varepsilon$) und eine geringere Temperaturempfindlichkeit ($21.2 \mu\varepsilon/\text{K} < 29.1 \mu\varepsilon/\text{K}$). Das Thermometersignal der Wägezelle WZ2 $\varepsilon_{\text{therm}}$ zeigt jedoch eine viel höhere Temperaturempfindlichkeit als das Thermometer der Wägezelle WZ1 ($21.3 \mu\varepsilon/\text{K} > 6.0 \mu\varepsilon/\text{K}$). Dies lässt sich dadurch erklären, dass sich das FBG

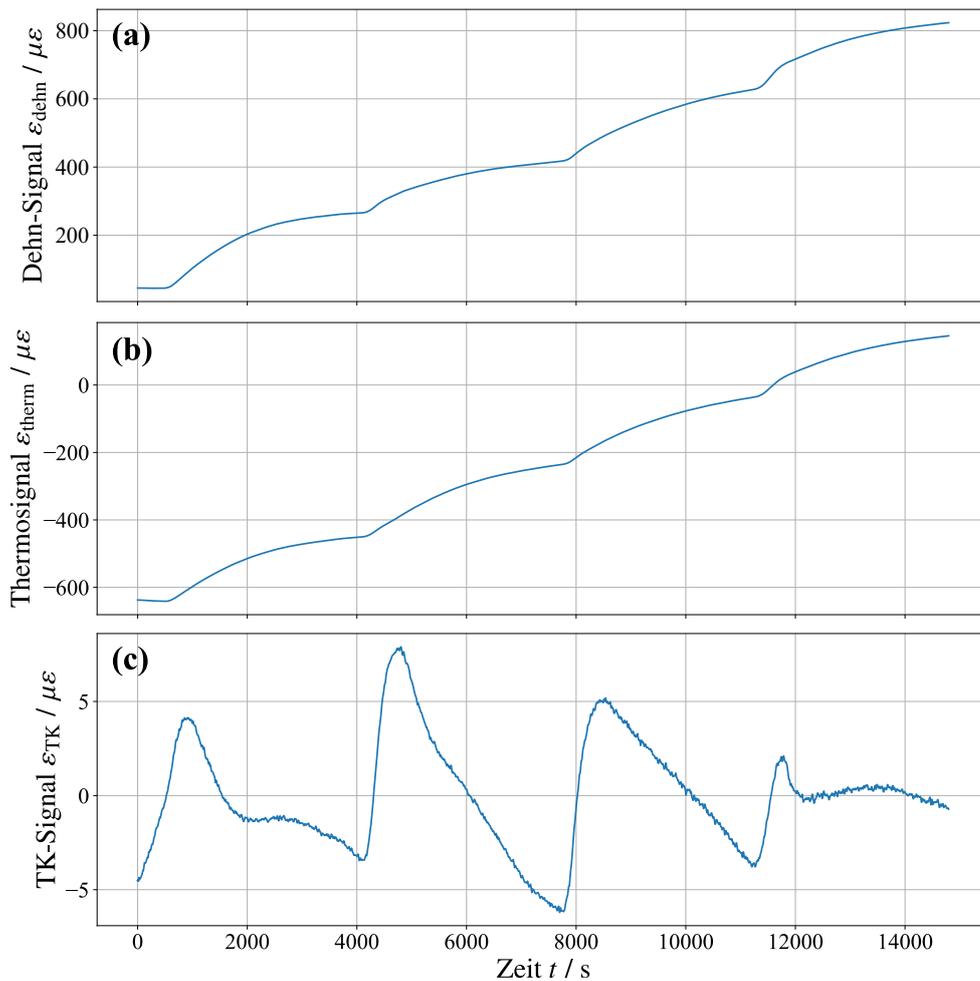


Abbildung 4.10: Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ2 als Funktion der Zeit t . (a): Dehnungssignal ϵ_{dehn} . (b): Thermometersignal ϵ_{therm} . (c): TK-Signal ϵ_{TK} . Die Innentemperatur der Klimakammer wird schrittweise von -7.7°C auf 29.1°C erhöht. Die Temperaturempfindlichkeit des Thermometers ist im Vergleich zur Wägezelle WZ1 deutlich größer ($21.3 \mu\epsilon/\text{K} > 6.0 \mu\epsilon/\text{K}$). Ursache hierfür ist, dass sich die thermische Ausdehnung der Wägezelle auf das Thermometer überträgt, was die Temperaturkompensation verfälscht. Dies spiegelt sich auch im TK-Signal wider, dessen Standardabweichung im Vergleich zur Wägezelle WZ1 deutlich höher ist ($2.860 \mu\epsilon > 0.317 \mu\epsilon$).

des Thermometers neben dem des Dehnungssensors im Träger aus Edelstahl befindet. Nach Gleichung (2.34) lässt sich daraus schließen, dass die Dehnung der Wägezelle auch auf das Thermometer übertragen wird, was auf eine falsche Konstruktion oder Handhabung des Sensors zurückzuführen ist. Folglich wird die mechanische Belastung, die bei der Anwendung der Wägezelle in einer faseroptischen Bandwaage entsteht, auch auf das Thermometer übertragen. Die Ungenauigkeit von Gewichts- und Durchsatzmessungen wird dadurch je nach Temperaturverlauf erheblich zunehmen.

4 Temperaturkompensation

Da das Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}}$ und das Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$ nicht mehr unabhängig voneinander sind, wird die Temperaturkompensation beeinträchtigt, was an den großen Schwankungen des TK-Signals in Abbildung 4.10(c) zu erkennen ist. Die schnellen Änderungen der Innentemperatur der Klimakammer nach Anhebung der Solltemperatur führen zu einem Anstieg des TK-Signals um bis zu $11.4 \mu\varepsilon$. Mit einer Standardabweichung von $2.860 \mu\varepsilon$ ist die Temperaturkompensation von Wägezelle WZ2 im Vergleich zur Wägezelle WZ1 mit einer Standardabweichung von $0.317 \mu\varepsilon$ deutlich ungenauer. Die Parameter der Temperaturkompensation sind:

$$\begin{aligned} a_0 &= 796.4 \pm 0.1 \mu\varepsilon & a_1 &= 1.02 \pm 0.01 \\ a_2 &= (1.478 \pm 0.001) \times 10^{-4} \mu\varepsilon^{-1}. \end{aligned} \quad (4.23)$$

Die Messdaten zeigen, dass das FBG-Thermometer nicht mit im Träger sein sollte und dass ein Thermometer der Form os4310, wie im Aufbau von Wägezelle WZ1, vorzuziehen ist.

4.3.3 Wägezelle WZ3

Die Wägezelle WZ3 hat ein ähnlichen Aufbau wie die Wägezelle WZ1, da Dehnungssensor und Thermometer voneinander getrennt vorliegen. Die Unterschiede bestehen im Material des Trägers des Dehnungssensors und seiner Befestigung an der Wägezelle (Abschnitt 3.1.3). Während der Temperaturkalibrierung ist das Messsystem $L = 32.2 \text{ m}$ vom Interrogator entfernt, so dass es zu einer distanzabhängigen Wellenlängenverschiebung $\Delta\lambda_c = 0.133 \text{ nm}$ kommt.

Abbildung 4.11 zeigt die Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ3 in Abhängigkeit von der Zeit t . Bei einer Temperatur von $-8.1 \text{ }^\circ\text{C}$, einem Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}} = -368 \mu\varepsilon$ in Abbildung 4.11(a) und einem Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}} = 183 \mu\varepsilon$ in Abbildung 4.11(b), beginnt die Messung. Schnelle Änderungen der Innentemperatur der Klimakammer treten auf, nachdem die Solltemperatur erhöht wird und führen zu einem flachen Anstieg beider Signale. Die Messung endet bei einer Temperatur von $29.4 \text{ }^\circ\text{C}$, wobei das Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}} = 1331 \mu\varepsilon$ und das Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}} = 37 \mu\varepsilon$ ist.

Die Wägezelle WZ3 hat aufgrund der gewählten Befestigungsart mit Schrauben einen höheren Offset von $1162 \mu\varepsilon$ als die beiden anderen Wägezellen ($568 \mu\varepsilon$ bzw. $796 \mu\varepsilon$). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bohrungen im Träger und die Gewinde in der Wägezelle leicht zueinander versetzt sind. Die Schrauben halten daher den Träger unter permanenter Spannung, die auf den Dehnungssensor übertragen wird. Die Temperaturempfindlichkeit

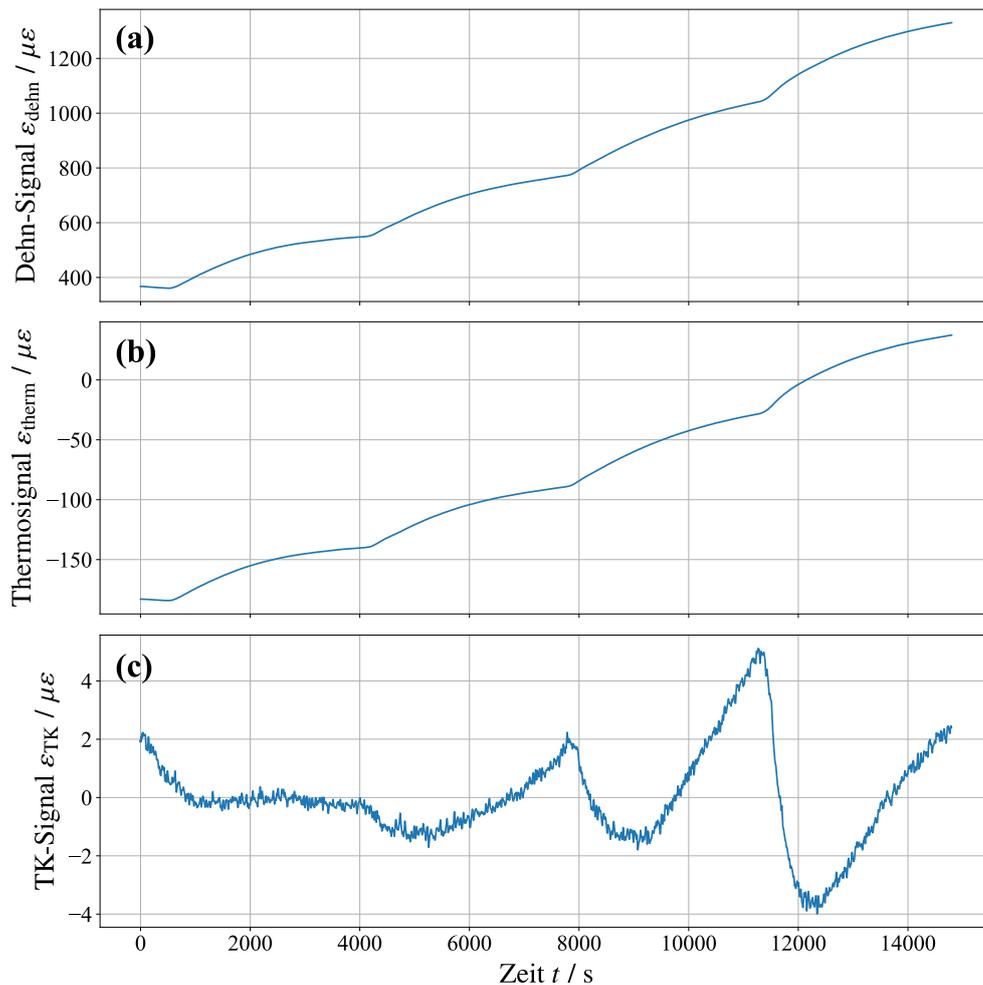


Abbildung 4.11: Temperaturkalibrierung der Wägezelle WZ2 als Funktion der Zeit t . (a): Dehnungssignal $\varepsilon_{\text{dehn}}$. (b): Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$. (c): TK-Signal ε_{TK} . Die Innentemperatur der Klimakammer wird schrittweise von $-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $29.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht. Wie bei der Wägezelle WZ1, ist das Thermometer nicht mit der Wägezelle verbunden, so dass es nicht von deren Wärmeausdehnung beeinflusst wird. Die Temperaturempfindlichkeit des Thermometers ist daher die gleiche wie die der Wägezelle WZ1 ($6.0\text{ }\mu\text{E}/\text{K}$). Das TK-Signal zeigt Schwankungen bis zu $8\text{ }\mu\text{E}$, die bei schnellen Änderungen der Innentemperatur der Klimakammer auftreten, was zu einer erhöhten Standardabweichung von $1.628\text{ }\mu\text{E}$ im Vergleich zur Wägezelle WZ1 führt.

des Dehnungssensors beträgt $26.2\text{ }\mu\text{E}/\text{K}$ und liegt damit quantitativ zwischen den beiden anderen Dehnungssensoren. Darüber hinaus ist das Thermometer in einem Schutz aus Keramik und Aluminium untergebracht, der nicht mit der Wägezelle verbunden ist. Dadurch wird das im vorigen Abschnitt beschriebene Problem der Dehnungsübertragung von der Wägezelle auf das Thermometer vermieden, was sich in einer gleichen Temperaturempfindlichkeit des Thermometers gegenüber der Wägezelle WZ1 von $6.0\text{ }\mu\text{E}/\text{K}$ zeigt.

4 Temperaturkompensation

Obwohl der Aufbau der Wägezelle dem der Wägezelle WZ1 sehr ähnlich ist und die Temperaturkalibrierung auf die gleiche Weise erfolgt, sind im TK-Signal ε_{TK} in Abbildung 4.11(c) mehr Schwankungen zu erkennen. Insbesondere um den Temperatursprung von 20 °C auf 30 °C treten Abweichungen von bis zu 8 $\mu\varepsilon$ auf. Dies lässt sich damit erklären, dass die Innentemperatur der Klimakammer im Vergleich zu den anderen Temperaturstufen besonders schnell angestiegen ist. Trotz des Housings reagiert das Thermometer stärker auf diese Temperaturänderung als der Dehnungssensor, der durch den Träger aus Edelstahl zusätzlich isoliert ist. Für den späteren Einsatz der Wägezelle in einer Recyclinganlage muss daher darauf geachtet werden, dass keine schnellen Temperaturänderungen auftreten. Dies kann zum Beispiel dadurch erreicht werden, dass keine starken Wärmequellen in unmittelbarer Nähe der Wägezelle platziert werden und direkte Sonneneinstrahlung ausgeschlossen wird. Bei der Temperaturkalibrierung führt dies jedoch zu einer Standardabweichung von 1.628 $\mu\varepsilon$, die höher ist als die der Wägezelle WZ1 von 0.317 $\mu\varepsilon$, was bedeutet, dass die Temperaturkompensation ungenauer sein wird. Die mit dem Optimierungsalgorithmus berechneten Parameter der Temperaturkompensation sind:

$$\begin{aligned} a_0 &= 1162.0 \pm 0.1 \mu\varepsilon & a_1 &= 4.45 \pm 0.01 \\ a_2 &= (5.363 \pm 0.001) \times 10^{-4} \mu\varepsilon^{-1}. \end{aligned} \tag{4.24}$$

Die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass eine zuverlässige Temperaturkompensation für faseroptische Wägezellen trotz vieler Einflussfaktoren möglich ist. Ohne Temperatureinwirkung enthält das Signal der Wägezelle nur noch mechanische Informationen. Im folgenden Kapitel wird daher erläutert, wie aus dem temperaturkompensierten Signal der Bandwaage das Gewicht bzw. der Durchsatz des Fördergutes ermittelt werden kann.

Faseroptische Bandwaagen

Neben den Temperatureinflüssen wirken sich auch mechanische Faktoren auf die Gewichtsmessung mit einer faseroptischen Bandwaage aus. Sowohl die dynamische Umgebung eines Förderbandes als auch langsame Materialveränderungen des Messsystems überlagern das Signal des Förderguts und führen so zu Ungenauigkeiten. Anhand von Messalgorithmen und Kalibriermessungen werden diese Ungenauigkeiten minimiert und die Information über das Gewicht des Fördergutes aus dem Dehnungssignal der Bandwaage entnommen. Um einen Genauigkeitsvergleich mit herkömmlichen Bandwaagen durchführen zu können, werden die Genauigkeiten der faseroptischen Bandwaagen ermittelt. Dazu werden die Einflüsse der Messalgorithmen, der Temperaturkompensation aus Kapitel 4 und der gewählten Wägezellen-Varianten und Messaufbauten aus Kapitel 3 berücksichtigt.

Faser-Bragg-Gitter zeigen unter anhaltender Belastung ein Relaxations- und Kriechverhalten. Daher werden in Abschnitt 5.1 Relaxationsmessungen für die drei Prototypen der faseroptischen Bandwaagen durchgeführt und ausgewertet.

In Abschnitt 5.2 werden zwei Messalgorithmen entwickelt, die die Grundschrumpfungen eines Förderbandes minimieren. Dies erleichtert die Identifizierung und Bestimmung des Signals des Förderguts, was die Genauigkeit der Messungen verbessert.

Die Genauigkeit der drei faseroptischen Bandwaagen wird durch Schüttgutmessungen bestimmt, die in Abschnitt 5.4 vorgestellt und ausgewertet werden. Mit den faseroptischen Bandwaagen wird eine große Menge an Fördergut über einen längeren Zeitraum gemessen. Die Genauigkeit der Messung wird durch den Vergleich des tatsächlichen Gewichts mit dem gemessenen Gewicht ermittelt.

Abschnitt 5.5 zeigt die Schüttgutmessung einer herkömmlichen Bandwaage und einen Vergleich mit den Ergebnissen der faseroptischen Bandwaagen. Die Unterschiede in der Genauigkeit werden analysiert und in Bezug auf die Anwendung in der Recyclingindustrie diskutiert.

5.1 Relaxationsverhalten

Wie im Abschnitt 2.1.2 unter *Relaxations- und Kriecheffekte* beschrieben, treten in elektrischen Dehnungsmessstreifen Relaxationserscheinungen auf, die dazu führen können, dass das gemessene Dehnungssignal mit der Zeit abnimmt. Durch Designänderungen am Messgitter kann dieser Effekt an das Kriechen des Federelements der Wägezelle angepasst werden. Das Ergebnis ist ein annähernd konstantes Dehnungssignal, das sich im Laufe der Zeit kaum verändert. Dehnungssensoren aus Faser-Bragg-Gittern weisen ebenfalls ein Relaxationsverhalten auf, aber es sind keine Designänderungen möglich, die dieses abschwächen oder verstärken können [36]. Entweder die Relaxation oder das Kriechen wird daher dominieren und zu einem stetigen Anstieg oder Abfall des Signals führen, was die Genauigkeit der Wägezelle und damit der faseroptischen Bandwaage beeinträchtigt.

Um diesen Effekt zu quantifizieren, wird für jede der Wägezellen WZ1, WZ2 und WZ3 eine Messung der Relaxation durchgeführt. Mit Hilfe des Kapitels 4 wird dazu das TK-Signal ε_{TK} berechnet, welches von allen thermischen Einflüssen befreit ist. Folglich sind alle beobachteten Veränderungen rein mechanischen Ursprungs. Das Wägemodul im Abschnitt 3.2.1 wird verwendet, um die Wägezellen mit einem Gewicht von 13.28 kg zu belasten. Die daraus resultierende Dehnungszunahme wird direkt nach der Belastung und nach einer Stunde gemessen. Dann wird das Gewicht entfernt und die beiden Messungen werden wiederholt. Die Dehnungsdifferenzen nach einer Stunde Be- bzw. Entlastung sind ein Maß für das Relaxations- und Kriechverhalten der Wägezelle.

5.1.1 Wägezelle WZ1

Abbildung 5.1 zeigt die Relaxationsmessung der Wägezelle WZ1. Das TK-Signal ε_{TK} wird über einen Zeitraum von etwa 2.5 Stunden gemessen und gegen die Zeit t aufgetragen. Bei Messstart befindet sich kein Gewicht auf dem Wägemodul, so dass das Signal bei Null liegt. Bei $t = 1800$ s werden 13.28 kg auf das Wägemodul geladen, wodurch das TK-Signal auf $\varepsilon_{TK} = 191 \mu\varepsilon$ ansteigt. Nach einer Stunde sinkt das TK-Signal auf $\varepsilon_{TK} = 190 \mu\varepsilon$, was einem relativen Rückgang des Signals von etwa 0.5% entspricht. Zum Zeitpunkt $t = 5409$ s wird das Gewicht wieder entfernt und das TK-Signal sinkt auf $\varepsilon_{TK} = -1 \mu\varepsilon$. Nach einer weiteren Stunde steigt das TK-Signal dann wieder auf $\varepsilon = 0 \mu\varepsilon$ an.

Die Wägezelle WZ1 verwendet einen Träger aus Kunststoff, der mit einem Klebstoff am Federelement der Wägezelle befestigt ist. Wenn der Sensor gedehnt wird, führen die viskoelastischen Eigenschaften der beiden Materialien zu einer Relaxation, die stärker ist

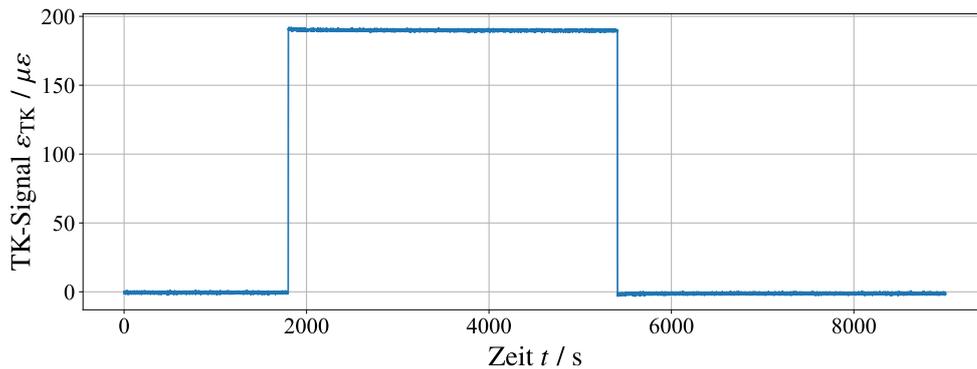


Abbildung 5.1: Relaxationsmessung der Wägezelle WZ1. Bei einer Belastung von 13.28 kg sinkt das Signal um $1 \mu\varepsilon$, was einer relativen Verringerung von 0.5 % entspricht. Nach der Entlastung tritt eine Unterschreitung von $-1 \mu\varepsilon$ auf, die nach einer Stunde wieder verschwindet.

als das Kriechen des Federelements. Die Messung zeigt jedoch, dass die Relaxationseffekte für die Wägezelle WZ1 so gering sind, dass sie vernachlässigt werden können.

5.1.2 Wägezelle WZ2

Abbildung 5.2 zeigt die Relaxationsmessung für die Wägezelle WZ2. Neben dem TK-Signal ε_{TK} in Abbildung 5.2(a) ist auch das Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$ in Abbildung 5.2(b) dargestellt. Zur Berechnung des TK-Signals werden die Temperaturparameter aus Gleichung (4.23) verwendet. Bis zu einem Zeitpunkt $t = 1800 \text{ s}$ liegt kein Gewicht auf dem Wägemodul, so dass das TK-Signal $\varepsilon_{TK} = 0 \mu\varepsilon$ ist. Sobald die Wägezelle mit einem Gewicht von 13.28 kg beladen wird, steigt das TK-Signal auf $\varepsilon_{TK} = 132.5 \mu\varepsilon$ und beginnt mit einer Abnahme von bis zu $-16\,457 \mu\varepsilon/\text{h}$ zu sinken. Die Stärke der Abnahme verringert sich mit der Zeit deutlich, so dass sie nach einer Stunde nur noch $-2.8 \mu\varepsilon/\text{h}$ beträgt. Nach dem Entfernen des Gewichts nach $t = 6344 \text{ s}$ wird ein ähnliches Verhalten beobachtet, allerdings mit einem anderen Vorzeichen. Das TK-Signal fällt auf $\varepsilon_{TK} = -74.0 \mu\varepsilon$ weit unter Null und nimmt dann steil mit einem Anstieg von bis zu $20\,888 \mu\varepsilon/\text{h}$ zu. Eine Stunde später ist der Anstieg auf $4.1 \mu\varepsilon/\text{h}$ zurückgegangen und das Signal nähert sich wieder dem Nullpunkt. Das Thermometersignal $\varepsilon_{\text{therm}}$ zeigt zunächst einen leichten Abfall, bevor das Gewicht auf das Wägemodul geladen wird, was auf einen leichten Rückgang der Raumtemperatur hinweist. Durch das Gewicht steigt das Thermometersignal um $36 \mu\varepsilon$, während es durch das Entfernen des Gewichts wieder um $36 \mu\varepsilon$ sinkt. In der Zeit, nachdem die Wägezelle entlastet wird, beginnt das Thermometersignal leicht anzusteigen.

Der Grund für die deutlich stärkere Relaxation der Wägezelle WZ2 im Vergleich zur Wägezelle WZ1 liegt zum einen an den Klebpunkten, die die Glasfaser mit dem Alu-

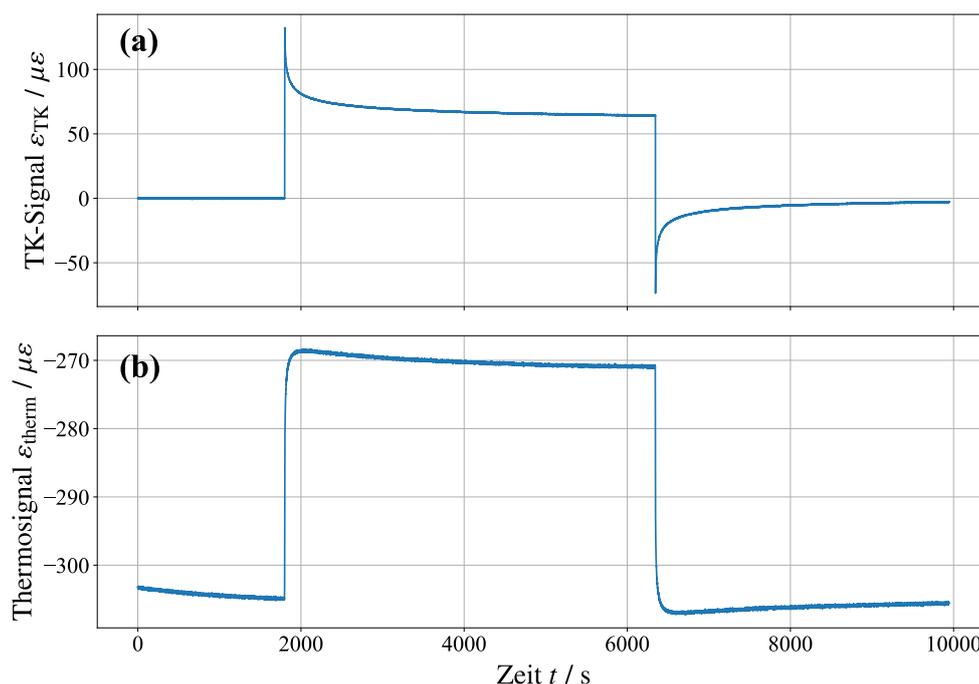


Abbildung 5.2: Relaxationsmessung der Wägezelle WZ2. (a): TK-Signal ε_{TK} gegen die Zeit t . (b): Thermometersignal ε_{TK} über den gleichen Zeitraum. Aufgrund der Belastung der Wägezelle mit 13.28 kg kommt es zu einer starken Relaxation des TK-Signals ε_{TK} , was auf eine schlechte Qualität der Klebpunkte zwischen dem Träger und der Glasfaser hinweist. Darüber hinaus zeigt das Thermometersignal ε_{therm} eine mechanische Abhängigkeit, die die Temperaturkompensation behindert und somit das TK-Signal weiter verzerrt.

miniumträger verbinden (vgl. Abbildung 3.3). Wenn das Wägemodul mit dem Gewicht beladen wird, wird der Aluminiumträger gedehnt und überträgt diese Dehnung über die Klebpunkte auf die Glasfaser. Die gedehnte Faser besitzt eine Rückstellkraft, die versucht, die Faser in ihren ursprünglichen Zustand zurückzuführen. Die Klebpunkte sind eigentlich dazu gedacht, dies zu verhindern. Entweder konnte der Klebstoff nicht richtig aushärten oder er ist generell von minderer Qualität. In jedem Fall sind die Klebpunkte nicht in der Lage, die Faser gestreckt zu halten, was zu einer Verringerung des TK-Signals ε_{TK} mit der Zeit führt. Da die Rückstellkraft proportional zur Dehnung ist, nimmt sie mit der Zeit ab, wenn sich die Faser mehr und mehr dem ungedehnten Ausgangszustand nähert. Dies erklärt den sehr starken Abfall unmittelbar nach der Belastung der Wägezelle, während der Abfall nach einer Stunde um fünf Größenordnungen gesunken ist. Nachdem das Gewicht entfernt wird, tritt ein gegenteiliger Effekt ein. Die relaxierte Glasfaser wird durch die Klebpunkte zusammengedrückt und es entsteht eine Kraft, die die Glasfaser zum Ausdehnen bringt. Da die Klebpunkte dies nicht verhindern können, steigt das TK-Signal ε_{TK} mit der Zeit an. Die Geschwindigkeit dieses Effekts ist von der Dauer der Belastung abhängig und ist im Allgemeinen schneller als die Relaxation im belasteten Zustand.

Ein weiterer Grund für das in Abbildung 5.2(a) gezeigte Verhalten sind die mechanischen Einflüsse auf das FBG-Thermometer. Wie in Abbildung 5.2(b) zu sehen ist, führt die Belastung der Wägezelle zu einem deutlichen Anstieg des Thermometersignals $\varepsilon_{\text{therm}}$. Dadurch wird die Temperaturkompensation von der mechanischen Belastung der Wägezelle abhängig, was zu einem verzerrten TK-Signal ε_{TK} führt. Da sich das Thermometer der Wägezelle WZ2 im Aluminiumträger befindet und nicht, wie bei der Wägezelle WZ1, separat neben dem Träger, wird ein Teil der Dehnung des Trägers auch auf das Thermometer übertragen. Dieser Effekt ließe sich durch widerstandsfähigere Klebpunkte und ein anderes Design des Trägers verringern oder aufheben. Die Ergebnisse der Relaxationsmessung zeigen jedoch, dass alle Gewichtsmessungen mit der Wägezelle WZ2 eine deutlich verringerte Genauigkeit aufweisen werden und sie daher für den großtechnischen Einsatz in einer faseroptischen Bandwaage nicht geeignet ist. Darüber hinaus werden separate Thermometer den Thermometern im Inneren des Trägers vorgezogen, um den soeben erwähnten Effekt vollständig ignorieren zu können.

5.1.3 Wägezelle WZ3

Die Relaxationsmessung der Wägezelle WZ3 ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Das TK-Signal ε_{TK} wird mit Hilfe der Temperaturparameter aus Gleichung (4.24) berechnet und gegen die Zeit t aufgetragen. Die Messung zeigt sehr ähnliche Ergebnisse wie die Wägezelle WZ1 in Abbildung 5.1, da eine vernachlässigbare Relaxation auftritt. Die Belastung der Wägezelle WZ3 mit 13.28 kg bewirkt, dass das TK-Signal innerhalb einer Stunde von $\varepsilon_{\text{TK}} = 118 \mu\varepsilon$ auf $\varepsilon_{\text{TK}} = 117 \mu\varepsilon$ abfällt, ein Rückgang von etwa 0.8%. Nach Entlastung tritt eine Unterschreitung von $-1 \mu\varepsilon$ auf, die nach einer Stunde wieder verschwindet.

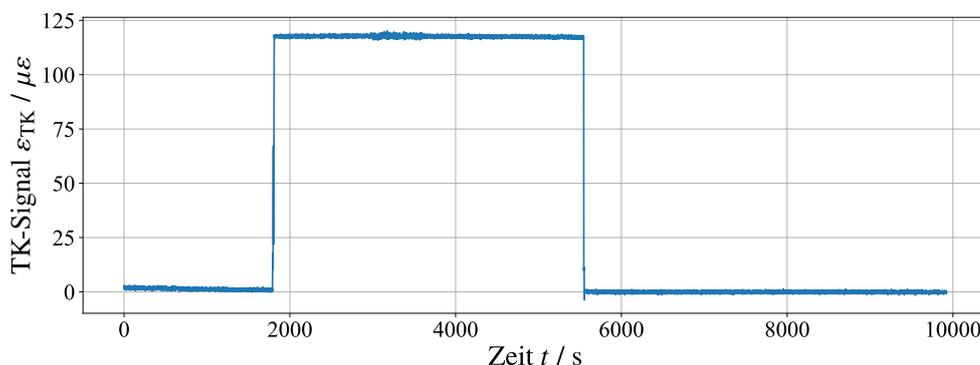


Abbildung 5.3: Relaxationsmessung der Wägezelle WZ3. Bei einer Belastung von 13.28 kg sinkt das Signal um $1 \mu\varepsilon$, was einer relativen Verringerung von 0.8% entspricht. Nach der Entlastung tritt eine Unterschreitung von $-1 \mu\varepsilon$ auf, die nach einer Stunde wieder verschwindet.

5 Faseroptische Bandwaagen

Entfernen des Gewichts tritt ein gegenteiliger Effekt mit einer ebenfalls geringen Stärke von $1 \mu\epsilon$ innerhalb einer Stunde auf.

Da die Wägezelle WZ3 einen Edelstahlträger verwendet, der über mechanische Vorrichtungen mit der Glasfaser verbunden ist, gibt es keine viskoelastischen Effekte, die zu einer Relaxation führen könnten. Die Tatsache, dass es dennoch eine geringe Relaxation gibt, die stärker ist als das Kriechen des Federelements, ist auf ein geringes Nachgeben der Schrauben oder der Vorrichtungen zurückzuführen. Insgesamt zeigt die Relaxationsmessung der Wägezelle WZ3, dass sie bei Verwendung in einer faseroptischen Bandwaage keine signifikanten Ungenauigkeiten aufgrund von Relaxation verursacht.

5.2 Messalgorithmen

Ein laufendes Förderband weist eine hohe Dynamik auf, die von der faseroptischen Bandwaage aufgenommen wird. Dies zeigt sich in einer Grundschiwingung, die das gewünschte Signal des Fördergutes überlagert. Ohne einen Messalgorithmus, der die Grundschiwingung reduziert, sinkt die Messgenauigkeit bei kleinen Gewichten erheblich oder es kann sogar vorkommen, dass Material unerfasst über die Bandwaage läuft. Die Grundschiwingungen werden hauptsächlich durch die Inhomogenität der Gurtoberfläche verursacht. Selbst kleine Erhebungen und Vertiefungen werden von der Bandwaage wahrgenommen. Insbesondere die Vulkanisierverbindung des verwendeten Förderbands, die im Abschnitt 2.4.1 erläutert wird, zeigt einen deutlichen Ausschlag im Dehnungssignal, der sich nach jedem Umlauf wiederholt. Diese Tatsache wird genutzt, um die Umlaufzeit und damit die Geschwindigkeit des Förderbandes zu messen, die für die Berechnung des Durchsatzes notwendig ist. Außerdem kann der periodische Charakter der Grundschiwingungen genutzt werden, um sie vom Signal des Fördergutes zu unterscheiden. Die Messalgorithmen erzeugt somit ein von der Struktur der Gurtoberfläche unabhängiges Signal, das direkt proportional zum Durchsatz bzw. zur Bandbelegung ist.

5.2.1 Messung der Vulkanisierverbindung

Im Gegensatz zu den in Abschnitt 2.4.3 beschriebenen herkömmlichen Methoden der Geschwindigkeitsmessung verwendet die faseroptische Bandwaage keinen zusätzlichen Sensor, sondern ermittelt die Geschwindigkeit direkt aus dem Messsignal. Dazu wird im Zeitsignal die genaue Position der Vulkanisierverbindung ermittelt und die Differenz zwischen den einzelnen Peaks der Verbindung ergibt die Umlaufzeit des Förderbandes. Eine grafische Beschreibung des Algorithmus für eine Messung über 10 min ist in Abbildung 5.4 dargestellt. Abbildung 5.4(a) zeigt das von der faseroptischen Bandwaage aufgezeichnete TK-Signal ε_{TK} . Zu Beginn befindet sich kein Material auf dem Förderband, so dass nur die Grundschiwingungen zu sehen sind. Im Bereich zwischen 296 s und 319 s wird 25 kg schweres Material ungleichmäßig über das Förderband transportiert. Danach befindet sich bis zum Ende der Messung wieder kein Material auf dem Band. Der Peak der Vulkanisierverbindung tritt in regelmäßigen Abständen auf und ist im Durchschnitt etwa $11 \mu\varepsilon$ hoch, während das Signal des Fördergutes Peaks bis zu $18 \mu\varepsilon$ aufweist. Mit einem einfachen Peak-Finding-Algorithmus ist es daher nicht möglich, die Peaks der Verbindung von den Peaks des Materials zu unterscheiden. Stattdessen wird eine zeitliche Ableitung des TK-Signals $\dot{\varepsilon}_{TK}$ berechnet, die in Abbildung 5.4(b) dargestellt ist. Die Peaks der Vulkanisierverbindung in der Zeitableitung haben eine durchschnittliche

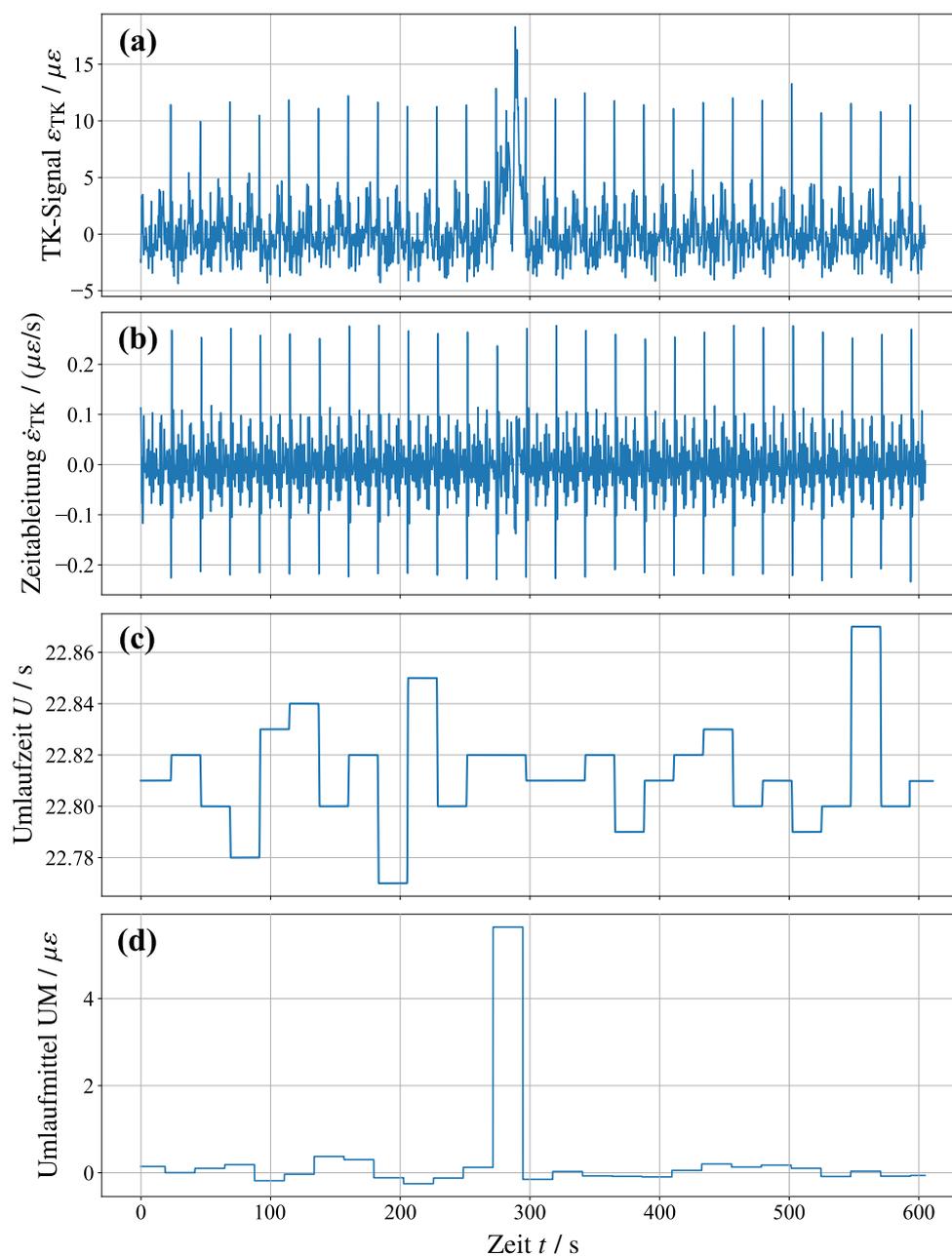


Abbildung 5.4: Grafische Darstellung des Messalgorithmus. (a): Ein 10-Minuten-Abschnitt des TK-Signals ε_{TK} bei eingeschaltetem Förderband. Während eines Umlaufs wird Material über das Band transportiert. (b): Zeitableitung des TK-Signals $\dot{\varepsilon}_{TK}$. (c): Ermittelte Umlaufzeit U . (d): Umlaufmittel UM , welches die mittlere Dehnung des TK-Signals während eines Umlaufs angibt. Die Bildung der Zeitableitung $\dot{\varepsilon}_{TK}$ ermöglicht es einem Peak-Finding-Algorithmus die Positionen der Vulkanisierverbindung zu detektieren, welche zur Berechnung der Umlaufzeit U und des Umlaufmittels UM verwendet wird. Der Messalgorithmus reduziert die Grundschwingungen des Förderbands um einen Faktor 20.

Höhe von etwa $0.25 \mu\epsilon/s$, während die Peaks des Förderguts im Hintergrundrauschen kaum zu erkennen sind. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das ankommende Material bereits von der Bandwaage erfasst wird, bevor es diese überquert. Sobald sich das Material am Anfang des Bandabschnitts befindet, der von der Bandwaage gemessen wird, drückt sein Gewicht teilweise bereits auf die Bandwaage. Erst wenn sich das Gewicht direkt über der Waage befindet, wird sein Gewicht vollständig erfasst. Beim Verlassen des Bandabschnitts reduziert sich das gemessene Gewicht wieder bis es schließlich nicht mehr detektiert wird. Dementsprechend können keine spitzen und schmalen Peaks durch das Fördergut entstehen, da das Material immer einige Zeit vor der Bandwaage erfasst wird. Die Vulkanisierverbindung hingegen wird nicht vorher erkannt, sondern erzeugt erst dann einen Peak, wenn sie sich direkt über der Bandwaage befindet. Folglich sind die Peaks der Verbindung sehr dünn und spitz, was sich in einer hohen zeitlichen Ableitung widerspiegelt. Dadurch wird es für einen auf die Zeitableitung $\dot{\epsilon}_{TK}$ angewandten Peak-Finding-Algorithmus wesentlich einfacher, die Vulkanisierverbindung vom Fördergut zu unterscheiden. Das Zeitintervall zwischen den Peaks ergibt dann die Umlaufzeit U des Förderbandes, die in Abbildung 5.4(c) dargestellt ist. Die Umlaufzeit ist nicht konstant, sondern schwankt zwischen 22.77 s und 22.87 s. Schwankungen in dieser Größenordnung sind bei einem Gurt mit einer Länge von 20 m zu erwarten. Aus den Positionen der Vulkanisierverbindung und der Umlaufzeit U wird dann das Umlaufmittel

$$UM = \frac{1}{U} \sum_{\substack{i \in \\ \text{Umlauf}}} (\dot{\epsilon}_{TK})_i \Delta t \quad \text{mit } \Delta t = \frac{1}{\nu} \quad (5.1)$$

berechnet, wobei ν die verwendete Abtastrate des Interrogators ist. Dieses beschreibt die durchschnittliche Dehnung des TK-Signals $\dot{\epsilon}_{TK}$ über jeden Umlauf des Förderbandes und ist in Abbildung 5.4(d) dargestellt. Überall dort, wo sich kein Material auf dem Förderband befindet, ist das Umlaufmittel UM nahe Null mit einer mittleren Abweichung von $\pm 0.15 \mu\epsilon$. Während des 13. Umlaufs zwischen 296 s und 319 s wird insgesamt 25 kg Material über das Band transportiert. Das zusätzliche Gewicht führt zu einem stark erhöhten Umlaufmittel $UM = 5.64 \mu\epsilon$. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird durch den Messalgorithmus von $SNR = 1.8$ auf $SNR_{VV} = 36.3$ erhöht, was eine Reduzierung der Grundschwingungen um einen Faktor 20 bedeutet.

Insgesamt bestimmt der Messalgorithmus die Umlaufzeit U mit einer Genauigkeit von ± 10 ms, was mit einer höheren Abtastrate des Interrogators noch gesteigert werden könnte. Obwohl kein zusätzlicher Geschwindigkeitssensor aus Abschnitt 5.2 verwendet wird, ermöglicht der Messalgorithmus die Bestimmung der Umlaufzeit U mit ausreichender Genauigkeit. Im Vergleich zu herkömmlichen Bandwaagen spart dies Anschaffungs- und Montagekosten und macht die Synchronisation und Abstimmung des Geschwindigkeitssen-

sors mit der Bandwaage nicht mehr erforderlich. Allerdings ist die zeitliche Auflösung dieser Methode sehr gering, da die Geschwindigkeit nur einmal pro Umdrehung ermittelt wird. Je nach Länge und Geschwindigkeit des Förderbandes kann dies zu Zeitaufösungen von Minuten führen. Zwischen den Messpunkten kann die Geschwindigkeit des Förderbandes unbemerkt schwanken. Abbildung 5.4(c) zeigt jedoch, dass diese Schwankungen in der Regel nur wenige Millisekunden betragen werden, was für die Durchsatzmessung mit einer Bandwaage vernachlässigbar ist. Die Messung der Vulkanisierverbindung ermöglicht auch die Berechnung des Umlaufmittels UM, das direkt proportional zur Bandbelegung des Förderbandes ist. Ohne Material liegt das Umlaufmittel nahe bei Null, während Fördergut das Umlaufmittel signifikant erhöht, was zu einer deutlich erhöhten Genauigkeit der Messergebnisse führt, insbesondere bei geringen Bandbelegungen.

5.2.2 Integration über ein konstantes Zeitintervall

Der oben beschriebene Messalgorithmus basiert auf der Detektion der Vulkanisierverbindung. Je ausgeprägter die Verbindung von der Bandwaage gemessen wird, desto genauer und zuverlässiger funktioniert der Messalgorithmus. Förderbänder ohne eine ausgeprägte Vulkanisierverbindung führen zu kleineren Peaks in der Zeitableitung des TK-Signals. Dadurch wird es schwieriger, die Peaks der Verbindung von den Peaks des Förderguts zu unterscheiden. Je nach Bandbelegung kann dies zum Versagen des Messalgorithmus führen. Ist der detektierte Bandabschnitt kurz und die Fördergeschwindigkeit hoch, wird dieser Effekt noch verstärkt, da die Peaks des Fördergutes spitzer und schmaler werden und somit eine größere Zeitableitung aufweisen. In diesem Fall wird eine Integration über ein konstantes Zeitintervall t_{int} verwendet. Statt ein Umlaufmittel UM mit Gleichung (5.1) zu berechnen, wird die durchschnittliche Dehnung

$$\bar{\varepsilon}_{t_{\text{int}}} = \frac{1}{t_{\text{int}}} \sum_{\substack{i \in \\ \text{Zeitraum}}} (\varepsilon_{\text{TK}})_i \Delta t \quad \text{mit } \Delta t = \frac{1}{\nu} \quad (5.2)$$

in periodischen Abständen berechnet. Diese Methode ist wesentlich weniger aufwendig in der Implementierung, da keine Zeitableitungen oder Peak-Finding-Algorithmen verwendet werden müssen. Allerdings entsteht ein weiterer Freiheitsgrad in Form des Zeitintervalls t_{int} . Abbildung 5.5 zeigt den Einfluss des Zeitintervalls t_{int} auf die Messergebnisse des 10-Minuten-Abschnitts aus Abbildung 5.4(a). In Abbildung 5.5(a) wird das TK-Signal alle 10 s gemittelt. Die verbesserte Zeitauflösung im Vergleich zur Methode in Abschnitt 5.2.1 geht mit einem deutlich verringerten Signal-zu-Rausch-Verhältnis $\text{SNR}_{10\text{s}} = 6.9$ einher. Das liegt daran, dass die Zeitintervalle von 10 s unterschiedliche Bereiche der Gürteloberfläche wahrnehmen. Daher erhöht ein Zeitabschnitt mit vielen Erhebungen die durchschnittli-

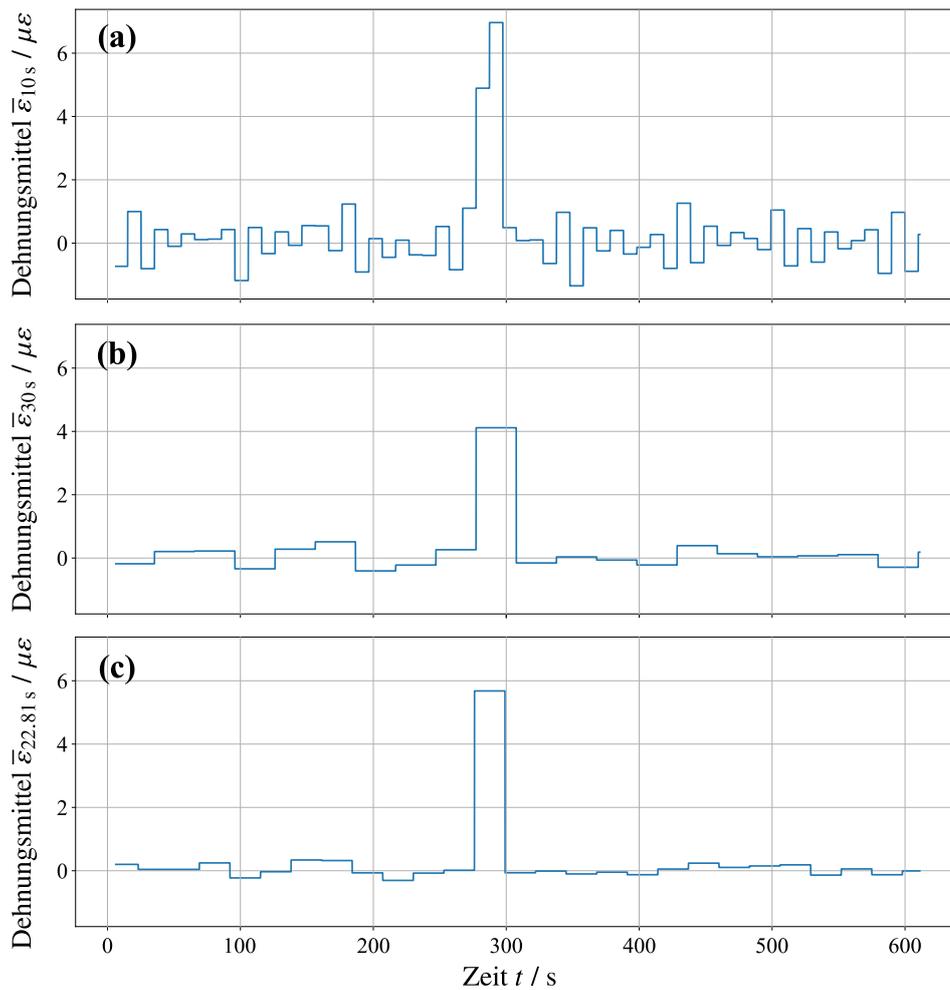


Abbildung 5.5: Vergleich zwischen verschiedenen Zeitintervallen t_{int} . (a): Mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_{10s}$ in 10 Sekunden Intervallen. (b): Mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_{30s}$ in 30 Sekunden Intervallen. (c): Mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_{22.81s}$ in 22.81 Sekunden Intervallen. Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis ist bei einem Zeitintervall $t_{\text{int}} = 22.81$ s nahe der Umlaufzeit U des Förderbands am größten, da das periodische Verhalten der Grundswingungen am besten herausgefiltert wird.

che Dehnung, während Zeitabschnitte mit vielen Vertiefungen der Gürteloberfläche die durchschnittliche Dehnung verringern. Das Signal des Förderguts erhöht sich auf bis zu $\bar{\epsilon}_{10s} = 6.97 \mu\epsilon$, was sich durch die inhomogene Bandbelegung während der Beladung erklären lässt. In kurzen Zeiträumen ist die durchschnittliche Dehnung $\bar{\epsilon}_{10s}$ daher höher als das Umlaufmittel $UM = 5.64 \mu\epsilon$.

Eine Vergrößerung des Zeitintervalls auf $t_{\text{int}} = 30$ s in Abbildung 5.5(b) führt zu einem verbesserten Signal-zu-Rausch-Verhältnis $SNR_{30s} = 17.8$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass längere Zeitintervalle mehr Frequenzen herausfiltern und so die Grundswingungen des Förderbandes mehr dämpfen. Allerdings sind weiterhin mehr Schwankungen als im

Umlaufmittel UM aus Abbildung 5.4(d) zu beobachten. Das Signal des Förderguts hat sich auf $\bar{\varepsilon}_{30\text{ s}} = 4.12 \mu\varepsilon$ verringert, da das Zeitintervall $t_{\text{int}} = 30\text{ s}$ länger ist als die Ladezeit des Förderbandes von 23 s. Bereiche ohne Material werden in die Berechnung der durchschnittlichen Dehnung $\bar{\varepsilon}_{30\text{ s}}$ mit Gleichung (5.2) einbezogen. Dementsprechend würde eine längere Ladezeit ein ähnlich hohes Signal wie das Umlaufmittel $UM = 5.64 \mu\varepsilon$ hervorrufen.

In Abbildung 5.5(c) wird ein Zeitintervall $t_{\text{int}} = 22.81\text{ s}$ verwendet, welcher in etwa der mittleren Umlaufzeit des betrachteten 10-Minuten-Abschnitts entspricht. Obwohl im Vergleich zu längeren Zeitintervallen weniger Frequenzen herausgefiltert werden, ergibt sich ein besseres Signal-zu-Rausch-Verhältnis $SNR_{22.81\text{ s}} = 35.2$ als bei einem Zeitintervall $t_{\text{int}} = 30\text{ s}$. Die Grundswingungen des Förderbandes werden im Vergleich zum Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1, der die genaue Umlaufzeit verwendet, beinahe ebenso gut herausgefiltert. Das lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die Umlaufzeit U aus Abbildung 5.4(c) nur um wenige Millisekunden von ihrem Mittelwert abweicht. Daher macht es keinen großen Unterschied, ob die mittlere Umlaufzeit oder die aktuelle Umlaufzeit verwendet wird. Das spiegelt sich auch in der Höhe des Signal des Förderguts wieder, das mit $\bar{\varepsilon}_{22.81\text{ s}} = 5.68 \mu\varepsilon$ sehr nahe am Ergebnis des Umlaufmittels liegt.

Um das Zeitintervall $t_{\text{int}} = U$ gleich der mittleren Umlaufzeit zu setzen, muss diese gemessen werden. Für Förderbänder, in denen die Detektion der Vulkanisierverbindung nicht möglich ist, wird ein alternativer Messalgorithmus verwendet, der in Abbildung 5.6 grafisch dargestellt ist. Das TK-Signal ε_{TK} des gleichen 10-Minuten-Abschnitts wie in Abbildung 5.4(a) ist zur Übersichtlichkeit ebenfalls in Abbildung 5.6(a) dargestellt. Anstatt die Zeitableitung des TK-Signals $\dot{\varepsilon}_{\text{TK}}$ zu bestimmen, wird die Autokorrelationsfunktion (AKF) berechnet, die in Abbildung 5.6(b) zu sehen ist. Diese gibt die Ähnlichkeit des Signals mit sich selbst zu einem früheren Zeitpunkt an. Bei einer Zeitdifferenz $\tau = 0$ hat die AKF zwangsläufig ein globales Maximum. Periodische Funktionen erzeugen ein lokales Maximum der AKF bei einer Zeitdifferenz, die genau der Periode des Signals entspricht. Da die Grundswingungen des Förderbandes periodisch sind und sich bei jedem Umlauf wiederholen, entspricht das erste lokale Maximum der AKF genau der Umlaufzeit U des Förderbandes. Ein Peak-Finding-Algorithmus identifiziert das erste lokale Maximum und ermittelt daraus die mittlere Umlaufzeit $U = 22.81\text{ s}$ in den betrachteten 10 Minuten, die in Abbildung 5.6(c) dargestellt ist. Die über die Vulkanisierverbindung gemessene Umlaufzeit ist halbtransparent im Hintergrund dargestellt und zeigt Abweichungen von höchstens 60 ms vom berechneten Mittelwert durch die AKF.

Fördergut, das eine zufällige Periodizität aufweist, oder externe Maschinen mit konstanten Frequenzen können die AKF stören und so zu fehlerhaften Ergebnissen führen. Für die meisten Förderbänder ist es jedoch ausreichend, diesen Vorgang täglich zu wiederholen,

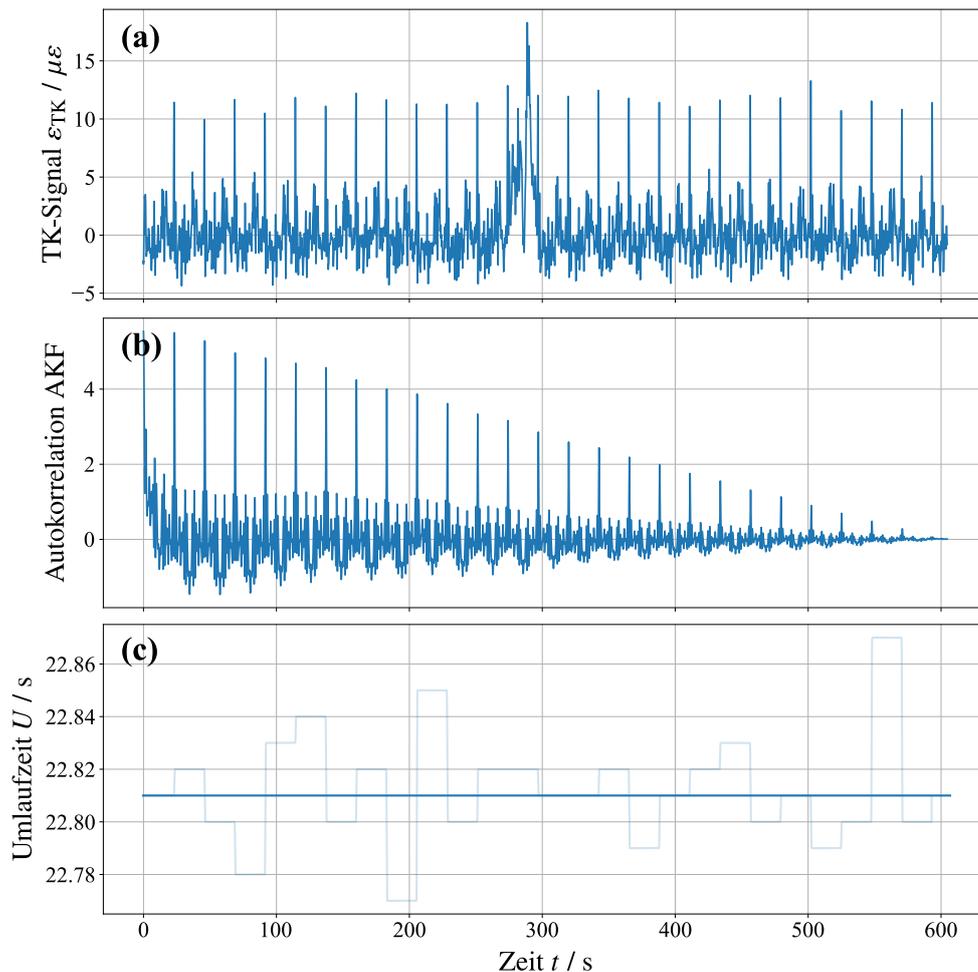


Abbildung 5.6: Grafische Darstellung des Messalgorithmus zur Bestimmung der Umlaufzeit U . (a): Ein 10-Minuten-Abschnitt des TK-Signals ε_{TK} bei eingeschaltetem Förderband. Während eines Umlaufs wird Material über das Band transportiert. (b): Autokorrelationsfunktion des TK-Signals AKF. (c): Mittlere Umlaufzeit im Vergleich zur tatsächlichen Umlaufzeit. Das erste lokale Maximum der AKF entspricht der mittleren Umlaufzeit des 10-Minuten-Abschnitts, da sich die Grundschwingungen mit jedem Umlauf wiederholen. Im Vergleich zur tatsächlichen Umlaufzeit gibt es Abweichungen von 60 ms, die in der Regel vernachlässigt werden können.

da in kleineren Zeiträumen keine signifikanten Geschwindigkeitsänderungen zu erwarten sind. Es kann also ein Zeitraum am Tag gewählt werden, der wenig oder kein Material enthält, um die Genauigkeit des Algorithmus zu gewährleisten. Durch Autokorrelation ist es möglich, die Umlaufzeit U der meisten Förderbänder mit hinreichender Genauigkeit zu bestimmen, so dass die Geschwindigkeitssensoren im Abschnitt 2.4.3 obsolet werden. Nur bei Förderbändern, die keinen starken Ausschlag der Vulkanisierverbindung aufweisen und ihre Geschwindigkeit häufig ändern, muss ein zusätzlicher Geschwindigkeitssensor montiert werden. In diesen Fällen kann der Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1 nicht

5 Faseroptische Bandwaagen

verwendet werden und eine tägliche Geschwindigkeitsmessung ist nicht aussagekräftig genug.

Insgesamt zeigt die Integration über ein konstantes Zeitintervall eine Genauigkeit der Messergebnisse, die nur geringfügig schlechter ist als die Berechnung des Umlaufmittels unter Verwendung der Vulkanisierverbindung. Für die Wägezellen WZ1 und WZ2 wird der Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1 verwendet, da sie sich im Messaufbau 1 mit einer stark ausgeprägten Vulkanisierverbindung befinden. Bei der Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2 erfolgt die Integration über ein konstantes Zeitintervall, da die Vulkanisierverbindung im Signal kaum zu erkennen ist.

5.3 Kalibrierkurven

Um einen Zusammenhang zwischen dem Rohsignal der Wägezelle in Form des Umlaufmittels UM aus Gleichung (5.1) oder der mittleren Dehnung $\bar{\varepsilon}_{t_{im}}$ aus Gleichung (5.2) und dem Gewicht des Förderguts herzustellen, wird eine Durchsatzkalibrierung durchgeführt. Dabei wird ein zuvor mit einer externen Plattenwaage ermitteltes Gewicht M innerhalb einer Umdrehung des Förderbandes auf das Förderband gelegt. Der Durchsatz $DS = M/U$ ergibt sich dann als Quotient aus der Masse M und der Umlaufzeit U . Bei der Kalibrierung wird versucht, das Material möglichst gleichmäßig zu verteilen, um eine größtmögliche Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der einzelnen Messungen zu erreichen.

Die Kalibrierung erfolgt mit Kunststoffgranulat mit einem Durchmesser von etwa 4 mm und einer Schüttdichte von etwa 55 kg/m^3 . Die Plattenwaage, die für die Referenzmessung verwendet wird, hat eine Genauigkeit von $\pm 20 \text{ g}$, und die Beladung des Förderbandes erfolgt manuell mit großen Kunststoffbehältern. Die Messpunkte befinden sich bei 0 kg, 5 kg, 10 kg, 15 kg, 20 kg und 25 kg, wobei der Nullwert aus dem Durchschnitt aller Umdrehungen ohne Material ermittelt wird. Jedes Gewicht wird dreimal gemessen, um die Wiederholgenauigkeit anhand der Standardabweichung zu bestimmen. Um Wechselwirkungen zu vermeiden, wird zwischen den Messungen ein Mindestabstand von einer Umdrehung eingehalten. Außerdem läuft das Förderband vor und nach der Messung eine Stunde lang ohne Material, um das Signal so genau wie möglich zu tarieren und Veränderungen der Gurtspannung durch Reibungswärme beim Einlaufen des Förderbandes zu vermeiden (siehe Abschnitt 2.4.2).

5.3.1 Wägezelle WZ1 im Messaufbau 1

Die Wägezelle WZ1 befindet sich im Messaufbau 1, der im Abschnitt 3.2.2 beschrieben wird. Aufgrund der deutlich sichtbaren Vulkanisierverbindung des Gurtes wird der Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1 verwendet. Die so ermittelten Umlaufzeiten betragen $U = (22.80 \pm 0.04) \text{ m/s}$, so dass sich die Messpunkte bei Durchsätzen $DS \in [0, 0.794, 1.584, 2.368, 3.161, 3.945] \text{ t/h}$ befinden.

In Abbildung 5.7 wird die Kalibrierung der Wägezelle WZ1 dargestellt. Abbildung 5.7(a) zeigt das Umlaufmittel UM als Funktion der Zeit t . Die Nulllinie zeigt einige Schwankungen bis zu $\pm 0.4 \mu\epsilon$. Es sind keine langsamen Veränderungen der Nulllinie zu beobachten, die zum Beispiel auf Relaxationseffekte, die Wärmeausdehnung des Gurtes oder anderen externen Einflüssen zurückgeführt werden könnten. Dies lässt sich dadurch erklären, dass

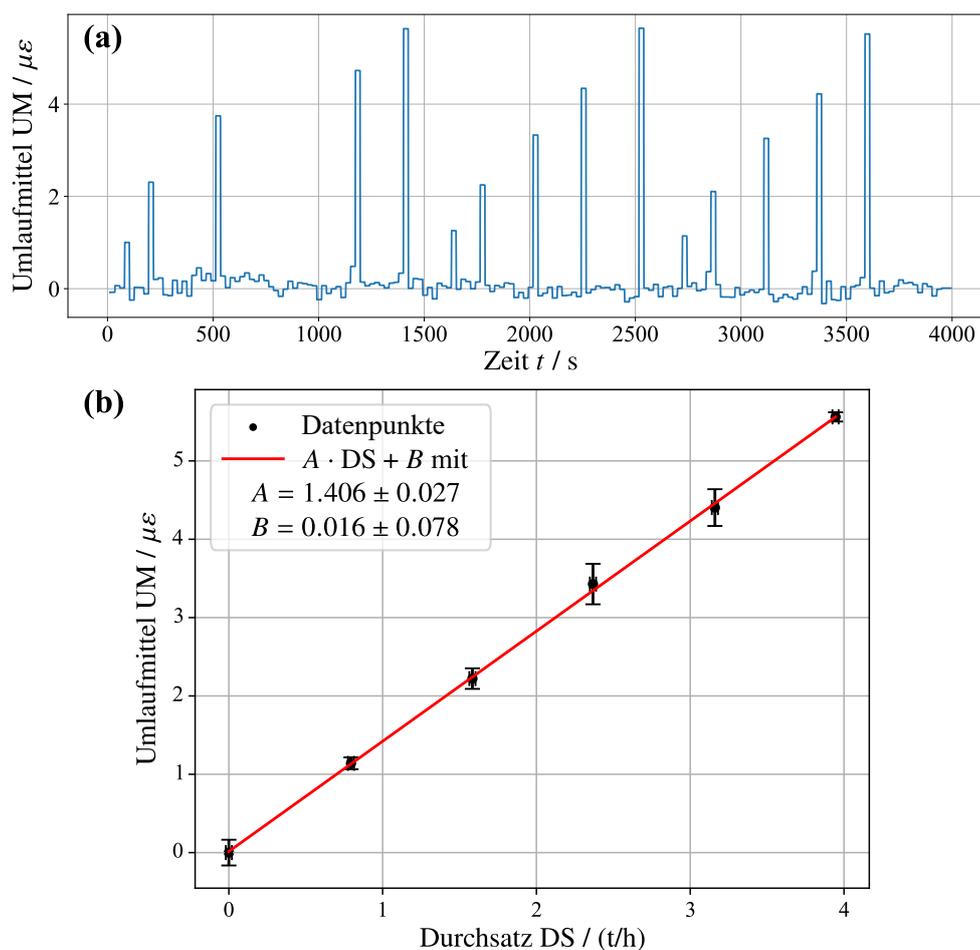


Abbildung 5.7: Durchsatzkalibrierung der Wägezelle WZ1. (a): Das aufgenommene Umlaufmittel UM als Funktion der Zeit t . (b): Kalibriergerade des Umlaufmittels UM als Funktion des Durchsatzes DS . Es werden nur geringe Schwankungen und keine langsamen Änderungen der Nulllinie beobachtet. Dadurch enthält die Kalibriergerade eine geringe systematische Abweichung mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99.993\%$. Die teilweise geringen Wiederholgenauigkeiten sind auf Fehler bei der manuellen Durchführung der Kalibrierung zurückzuführen.

die Wägezelle WZ1 keine ausgeprägte Relaxation aufweist und es keine starken Temperaturänderungen während der Messung gibt. Darüber hinaus befindet sich das Förderband in einer windgeschützten Lagerhalle, in der es keine weiteren Störfaktoren wie größere Maschinen oder laufende Fahrzeuge gibt.

Die gemessenen Umlaufmittel UM werden in Abbildung 5.7(b) gegen den Durchsatz DS aufgetragen. Zu jedem Datenpunkt wird ein Fehlerbalken hinzugefügt, der die Standardabweichung der drei Messungen darstellt. Es wird eine lineare Regression auf der Grundlage

des Abstands der kleinsten Quadrate berechnet und als rote Gerade eingezeichnet. Die so berechneten Kalibrierparameter der Wägezelle WZ1 sind:

$$\begin{aligned} A &= (1.406 \pm 0.027) \mu\epsilon / (\text{t/h}) & B &= (0.016 \pm 0.078) \mu\epsilon \\ R^2 &= 99.993\%, \end{aligned} \quad (5.3)$$

wobei R^2 das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression ist. Zusammen mit den kleinen Fehlern der Parameter A und B deutet dies auf eine geringe systematische Abweichung hin. Es ist also zu erwarten, dass auch Durchsätze, die weit von den sechs Messpunkten entfernt sind, genau bestimmt werden können. Im Gegensatz dazu ist die Wiederholgenauigkeit der Wägezelle WZ1 geringer, mit Abweichungen von bis zu 7.5% bei einem Durchsatz $DS = 2.368 \text{ t/h}$, was an den langen Fehlerbalken zu erkennen ist. Daher kann die Messung desselben Durchsatzes zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Da die Wiederholgenauigkeit der einzelnen Datenpunkte sehr unterschiedlich ist, sind diese Abweichungen auf Störungen zurückzuführen, die durch die manuelle Durchführung der Kalibrierung verursacht werden. Das Material ist nicht immer gleichmäßig in einem Umlauf verteilt oder es kann Material verschüttet werden. Nichtsdestoweniger zeigt die Wägezelle WZ1 eine hohe Genauigkeit über den gesamten Messbereich. Gerade bei geringen Durchsätzen sind die Grundschwingungen des Förderbandes relativ am stärksten, was zu einer geringeren Genauigkeit führen sollte. Da dies bei der Kalibrierung jedoch nicht auftritt, zeigt sich, dass der verwendete Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1 eine hohe Effektivität aufweist und somit eine genaue Messung selbst bei geringen Gewichten und Durchsätzen ermöglicht.

5.3.2 Wägezelle WZ2 im Messaufbau 1

Die Wägezelle WZ2 befindet sich ebenfalls im Messaufbau 1, der in Abschnitt 3.2.2 beschrieben wird. Entsprechend wird auch der Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.1 verwendet. Die Umlaufzeit beträgt $U = (22.82 \pm 0.04) \text{ m/s}$ und der Durchsatz befindet sich bei den Werten $DS \in [0, 0.836, 1.672, 2.506, 3.344, 4.182]$.

Die Kalibrierung der Wägezelle WZ2 ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Zeitreihe in Abbildung 5.8(a) zeigt die 15 durchgeführten Messungen. Mit $\pm 0.089 \mu\epsilon$ sind die Schwankungen der Nulllinie weiterhin zu gering, um eine signifikante Änderung der Genauigkeit zu bewirken. Außerdem sind keine langsamen Veränderungen der Nulllinie zu erkennen, da derselbe Messaufbau wie zuvor verwendet wird.

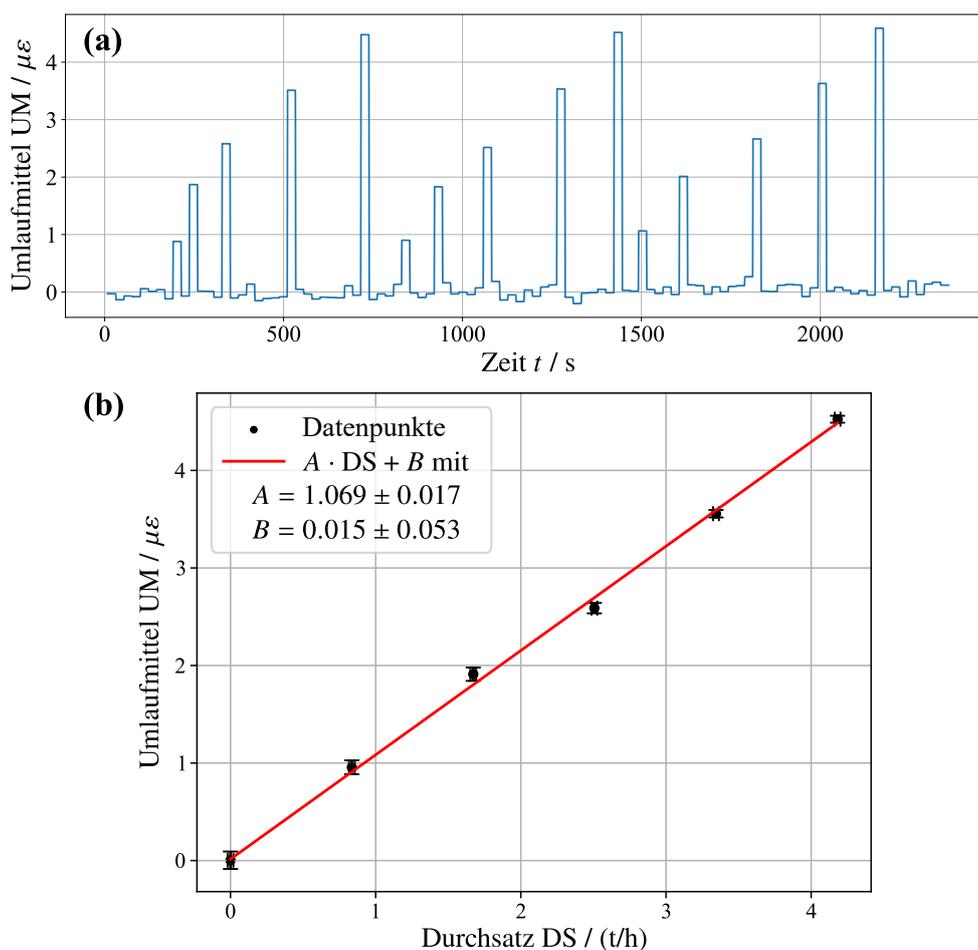


Abbildung 5.8: Durchsatzkalibrierung der Wägezelle WZ2. (a): Das aufgenommene Umlaufmittel UM als Funktion der Zeit t . (b): Kalibriergerade des Umlaufmittels UM als Funktion des Durchsatzes DS . Trotz des schlechten Temperatur- und Relaxationsverhaltens werden nur geringe Schwankungen und keine langsamen Änderungen der Nulllinie beobachtet. Dennoch haben diese Effekte einen negativen Einfluss auf die systematische Abweichung mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99.789\%$. Nichtsdestoweniger zeigt die Kalibriergerade eine gute Wiederholgenauigkeit.

Die Kalibrierkurve der Wägezelle WZ2 mit den Parametern

$$A = (1.069 \pm 0.017) \mu\epsilon / (t/h) \quad B = (0.015 \pm 0.053) \mu\epsilon \quad (5.4)$$

$$R^2 = 99.789\%$$

ist in Abbildung 5.8(b) dargestellt. Die geringere Steigung A im Vergleich zur Wägezelle WZ1 zeigt, dass der gleiche Durchsatz im Allgemeinen zu einem geringeren Signal führt. Da dasselbe Förderband und dieselbe Konstruktion verwendet wird, wird sich

das Federelement der Wägezelle in ähnlichem Maße dehnen. Die geringere Steigung begründet sich daher durch eine geringere Dehnungsübertragung vom Federelement auf den FBG-Sensor, was durch den stark unterschiedlichen Sensoraufbau zu erklären ist. Zudem ist das Thermometer nicht vollständig dehnungsunabhängig und reduziert somit das Umlaufmittel UM weiter. Im Vergleich zur Wägezelle WZ1 weist die Kalibrierung der Wägezelle WZ2 eine höhere Wiederholgenauigkeit und eine höhere systematische Abweichung auf. Dementsprechend führt die Messung des gleichen Durchsatzes zu einem sehr ähnlichen Ergebnis, das jedoch nicht unbedingt dem tatsächlichen Wert entspricht. Da die systematische Abweichung bei den einzelnen Datenpunkten jedoch klein und zufällig verteilt ist, können die Fehler ebenfalls auf Störungen bei der Durchführung der Kalibrierung zurückgeführt werden. Trotz der fehlerhaften Temperaturkalibrierung und des stark erhöhten Relaxationsverhaltens zeigen die Ergebnisse der Durchsatzkalibrierung der Wägezelle WZ2 eine hohe Genauigkeit über den gesamten Messbereich. Dies deutet darauf hin, dass keine schnellen und starken Temperaturänderungen während der Kalibrierung auftreten, die zu einer fehlerhaften Temperaturkompensation wie in Abbildung 4.10 führen. Darüber hinaus sind die Zeiten zwischen den einzelnen Messpunkten ausreichend, um den Einfluss der Relaxation zu vernachlässigen.

5.3.3 Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2

Die Wägezelle WZ3 befindet sich im Messaufbau 2, der in Abschnitt 3.2.3 beschrieben wird. Da die Vulkanisierverbindung des eingesetzten Gurtes nicht ausgeprägt ist, wird der Messalgorithmus aus Abschnitt 5.2.2 verwendet. Zur Messung der Umlaufzeit $U = (22.22 \pm 0.04)$ m/s wird die Autokorrelationsfunktion eines 10-Minuten-Abschnitts kurz vor der Kalibrierung verwendet. Daraus ergeben sich die Durchsatzwerte $DS \in [0, 0.810, 1.620, 2.430, 3.240, 4.050]$ t/h.

In Abbildung 5.9 wird die Kalibrierung der Wägezelle WZ3 dargestellt. Abbildung 5.9(a) zeigt die mittlere Dehnung $\bar{\epsilon}_{22.22s}$ mit einem Zeitintervall $t_{\text{int}} = 22.22$ s als Funktion der Zeit t . Die Dehnungsmittelwerte sind für die jeweiligen Gewichte deutlich größer im Vergleich zu den Wägezellen WZ1 oder WZ2. Das liegt daran, dass die Geschwindigkeit des Förderbandes nur noch halb so groß ist wie die des zuvor verwendeten Förderbandes. Der gleiche Durchsatz führt also zu einer doppelt so großen Bandbelegung und damit zu einem doppelt so großen Dehnungssignal der Bandwaage. Darüber hinaus hat die hier verwendete Konstruktion eine bessere Gewichtsübertragung des Förderguts auf die Wägezelle. Zum einen wird die Gewichtskraft nicht über ein Drahtseil übertragen, und zum anderen sind die beiden Rollen der Konstruktion sehr hoch eingestellt. Dadurch wird die Gewichtskraft des Förderguts kaum durch den Gurt verringert.

5 Faseroptische Bandwaagen

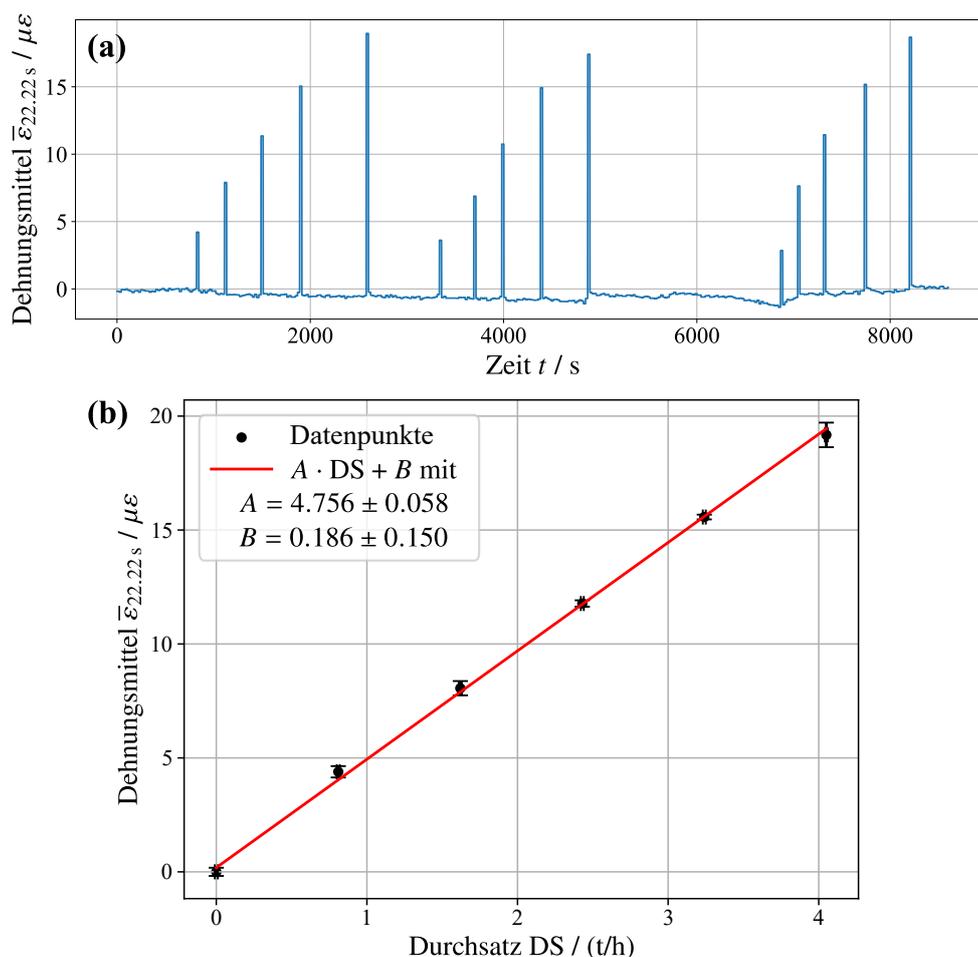


Abbildung 5.9: Durchsatzkalibrierung der Wägezelle WZ3. (a): Die aufgenommene mittlere Dehnung $\bar{\varepsilon}_{22,22s}$ als Funktion der Zeit t . (b): Kalibriergerade als Funktion des Durchsatzes DS . Die Nulllinie ist nicht konstant, sondern weist Veränderungen von bis zu $1.5 \mu\epsilon$ auf, was auf die Besonderheiten des Messaufbaus 2 zurückzuführen ist. Zur Anpassung der Kalibriergeraden werden die Messwerte relativ zur Nulllinie verwendet, so dass die langsamen Veränderungen der Nulllinie keinen Einfluss mehr auf die Kalibrierung haben. So entsteht eine Kalibriergerade mit einer geringen systematischen Abweichung mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 = 99.945\%$ und einer hohen Wiederholgenauigkeit.

Die Nulllinie zeigt deutlich größere Abweichungen im Vergleich zu den beiden vorherigen Kalibrierungen. Im Bereich zwischen 800 s und 4800 s besteht eine negative Drift von etwa $-0.54 \mu\epsilon/h$. Zwischen 5000 s und 6300 s ist die Nulllinie leicht angehoben und geht dann in eine Senke über, in der sich die dritte Messung mit 5 kg befindet. Nach der Senke steigt die Nulllinie wieder an. Da die Relaxation der Wägezelle WZ3 sehr gering ist, lassen sich diese langsamen Veränderungen des Signals nur durch den unterschiedlichen Messaufbau erklären. Aufgrund der direkten Übertragung der Gewichtskraft vom Gurt

auf die Wägezelle, die nicht durch einen Wiegerahmen oder ein Drahtseil reduziert wird, werden Änderungen der Gurtspannung eher von der Wägezelle wahrgenommen. Einerseits ist es möglich, dass es während der Messung zu starken Temperaturschwankungen kommt, die zu einer Ausdehnung des Gurtes und damit zu einer Abnahme der Gurtspannung führen. Dieser Effekt kann durch den veralteten und abgenutzten Gurt und den geringen Schutz vor der Witterung noch verstärkt werden. Andererseits befindet sich das Förderband in der Recyclinganlage auf einem Gestell, auf dem auch andere Maschinen montiert sind. Mechanische Einflüsse durch das Ein- und Ausschalten oder die Beladung der Maschinen mit Recyclingmaterial können sich auf das Förderband übertragen und so zu kleinen Veränderungen der Spannung führen. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit der faseroptischen Wägezelle kann dies zu langsamen Änderungen des Dehnungssignals führen.

Um die Kalibrierkurve unabhängig von der Nulllinie zu ermitteln, werden zur Berechnung der mittleren Dehnung $\bar{\varepsilon}_{22.22s}$ in Abbildung 5.9(b) nicht die absoluten Werte verwendet. Stattdessen wird die Differenz zwischen dem Messwert und der Nulllinie in unmittelbarer Umgebung berechnet. Auf diese Weise wird der tatsächliche Ausschlag der Bandwaage unabhängig von den langsamen Veränderungen der Nulllinie ermittelt. Diese Methode kann jedoch nur für Kalibrierungsmessungen verwendet werden, da bei jeder Umdrehung bekannt ist, wie viel Material sich auf dem Förderband befindet. Bei der späteren Verwendung der Bandwaage im Realbetrieb einer Recyclinganlage ist dies im Allgemeinen nicht der Fall.

Ohne den Einfluss der veränderlichen Nulllinie ergeben sich folgende Kalibrierparameter für die Wägezelle WZ3:

$$\begin{aligned} A &= (4.756 \pm 0.058) \mu\varepsilon/(t/h) & B &= (0.186 \pm 0.150) \mu\varepsilon \\ R^2 &= 99.945 \%. \end{aligned} \quad (5.5)$$

Das hohe Bestimmtheitsmaß R^2 und die kleinen Fehler der Parameter A und B zeigen, dass die Waage eine geringe systematische Abweichung aufweist. Außerdem sind die Fehlerbalken der einzelnen Messungen mit denen der Wägezelle WZ2 vergleichbar, was auf eine gute Wiederholgenauigkeit hindeutet. Insgesamt zeigt die Wägezelle WZ3 die höchste Genauigkeit unter den drei Wägezellen. Dies ist jedoch nur möglich, wenn die Messwerte relativ zu ihrem umgebenden Nullpunkt ermittelt werden. Inwieweit die langsamen Veränderungen der Nulllinie zu Ungenauigkeiten bei längeren Messungen eines unbekanntes Gewichts führen, muss noch durch Schüttgutmessungen ermittelt werden.

5.4 Schüttgutmessungen

Um den Realbetrieb einer Recyclinganlage so genau wie möglich zu simulieren, wird das Förderband mit einem kontinuierlichen Materialfluss über 20 min beschickt. Der Beginn und das Ende der Messung werden genau dokumentiert. Die gemessenen Umlaufmittel UM der faseroptischen Bandwaage zwischen den beiden Zeitpunkten werden mit Hilfe der Kalibrierparameter aus Abschnitt 5.3 in einen Durchsatz

$$DS = \frac{UM - B}{A} \quad (5.6)$$

umgerechnet. Die Summe aller ermittelten Durchsätze DS multipliziert mit der Messzeit T ergibt dann das Gesamtgewicht

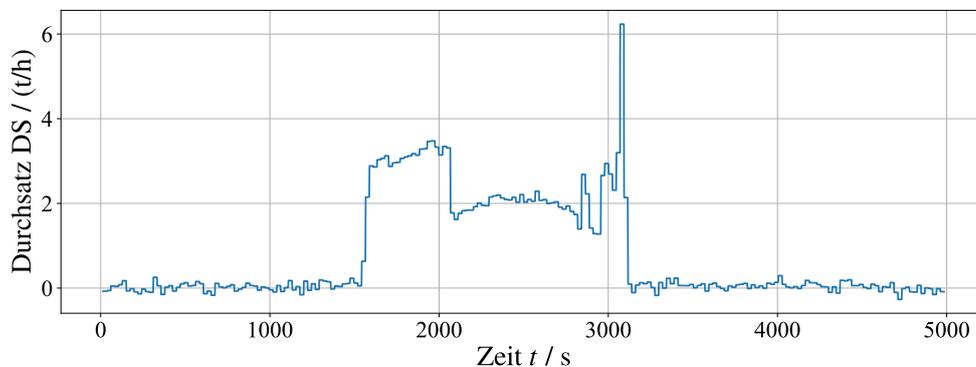
$$M_{BW} = \sum_{i \in T} DS_i T, \quad (5.7)$$

das mit Hilfe der Bandwaage ermittelt wird. Die absolute und relative Differenz zwischen dem tatsächlichen Gewicht über die Plattenwaage M_{PW} und dem gemessenen Gewicht über die Bandwaage ist ein Maß für die Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage. Der Vorteil einer Schüttgutmessung gegenüber Kalibrierungsmessungen ist, dass langsame Veränderungen des Signals, wie sie in Abbildung 5.9(a) an der Nulllinie zu sehen sind, vollständig gemessen werden, wie es im Realbetrieb der Fall wäre.

Die Schüttgutmessungen für die Wägezellen $WZ1$ und $WZ2$, die sich im Messaufbau 1 aus Abschnitt 3.2.2 befinden, werden mit Kunststoffgranulat durchgeführt. Dies ist das gleiche Material, das für die Kalibrierungsmessungen verwendet wird. Ein Big-Bag mit einem Volumen von etwa zwei Kubikmetern wird von einem Gabelstapler über das Förderband gehoben. Am Boden des Big-Bags wird eine kleine Öffnung geschaffen, aus der das Material langsam herausrieselt. Die Größe dieser Öffnung wird als Dosiereinrichtung genutzt, um den Durchsatz zu regulieren. Die Wägezelle $WZ3$ befindet sich im Messaufbau 2 aus Abschnitt 3.2.3. Somit ist es möglich, die Schüttgutmessung mit dem vorliegenden Recyclingmaterial, das mit der Anlage verarbeitet wird, durchzuführen. Da die Messung im Realbetrieb durchgeführt wird, kann von den Ergebnissen direkt auf die Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage in Recyclinganlagen geschlossen werden.

5.4.1 Wägezelle WZ1 im Messaufbau 1

Um das Signal zu tariieren, wird das Förderband vor der Messung 1540 s und nach der Messung 1870 s nicht mit Material beladen. Innerhalb von 26 min wird ein Gesamtgewicht von (1099 ± 2) kg Kunststoffgranulat über das Förderband transportiert. Dieses wird vorher mit einer Plattenwaage ermittelt. Der Durchsatz wird mit der Öffnung am Boden des Big-Bags über den Zeitraum der Schüttgutmessung variiert. Damit wird das tatsächliche Durchsatzverhalten eines Förderbandes in einer Recyclinganlage simuliert. Der mittlere Durchsatz während der Messung beträgt 2.5 t/h. Bei einer Umlaufzeit $U = (22.80 \pm 0.04)$ s und der Länge des Gurtes $L = 20$ m ergibt sich so eine mittlere Bandbelegung von etwa 0.8 kg/m.



Gesamtgewicht über Plattenwaage	(1099 ± 2) kg
Gesamtgewicht über Bandwaage	(1057 ± 32) kg
Absolute Differenz	-42 kg
Relative Differenz	3.8 %

Abbildung 5.10: Schüttgutmessung der Wägezelle WZ1. Dargestellt ist der Durchsatz DS in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Ergebnisse der Messung sind in einer Tabelle dargestellt. Zwischen den Zeitpunkten $t = 1540$ s und $t = 3130$ s wird Kunststoffgranulat mit einem Gesamtgewicht von (1099 ± 2) kg über die faseroptische Bandwaage geführt. Die Summe aller Durchsatzwerte zwischen Messbeginn und Messende multipliziert mit der Messdauer ergibt ein Gesamtgewicht von (1057 ± 32) kg. Die absolute Differenz zwischen Platten- und Bandwaage beträgt somit -42 kg und die relative Differenz 3.8 %.

Abbildung 5.10 zeigt die Zeitreihe der Schüttgutmessung. Der Durchsatz DS wird mit den Kalibrierparametern A und B aus Abschnitt 5.3.1 und Gleichung (5.6) berechnet. Vor und nach der Schüttgutmessung werden keine Drifts oder langsame Veränderungen der Nulllinie beobachtet. Dies erklärt sich durch das geringe Relaxationsverhalten der Wägezelle WZ1 und den störungsfreien Betrieb des Messaufbaus 1. Der Durchsatz variiert während der Messung von etwa 1.2 t/h bis etwa 6.2 t/h. Unter Verwendung von Gleichung (5.7) beträgt das mit der faseroptischen Bandwaage gemessene Gesamtgewicht des Kunststoffgranulats

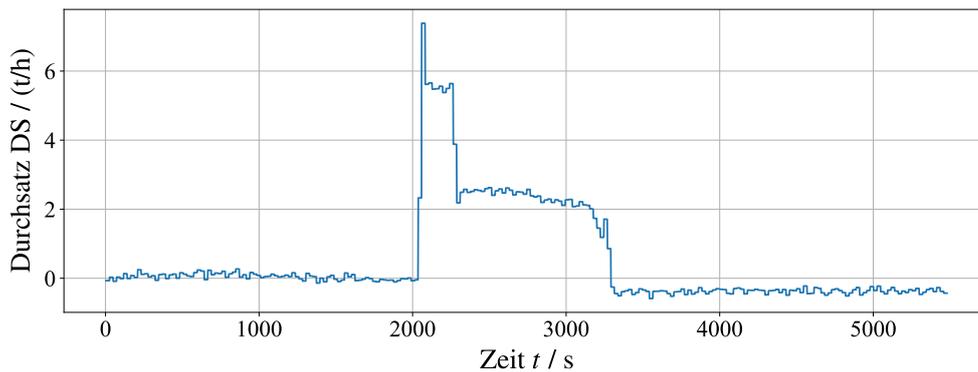
(1057±32) kg. Die systematische Abweichung von 32 kg ergibt sich aus Fehlerfortpflanzung der Kalibrierparameter A und B und der gemessenen Umlaufzeit U . Die absolute Differenz zwischen dem gemessenen Gewicht der Plattenwaage und der Bandwaage beträgt -42 kg, was einer relativen Differenz von 3.8 % entspricht.

Trotz der Varianz im Durchsatz und einer teilweise sehr geringen Bandbelegung von weniger als 1 kg/m misst die faseroptische Bandwaage das Gesamtgewicht mit besserer Genauigkeit als eine vergleichbare herkömmliche Bandwaage. Dies ist vor allem auf den verwendeten Messalgorithmus zurückzuführen, der die Grundschrägungen des Förderbandes kompensiert. Andernfalls würden kleinere Gewichte in den Schwingungen verloren gehen, was die Genauigkeit erheblich beeinträchtigen kann. Je mehr Gewicht auf dem Förderband transportiert wird, desto weniger machen sich die Grundschrägungen bemerkbar, was die Genauigkeit im Verhältnis zum Gesamtgewicht erhöht. In der Recyclingindustrie gibt es jedoch viele Materialströme mit einer sehr geringen Schüttdichte, was zu kleinen Gewichten führt. Die hohe Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage, auch bei geringer Bandbelegung, zeigt ihre Eignung für eine Anwendung in der Recyclingindustrie.

5.4.2 Wägezelle WZ2 im Messaufbau 1

Die Vorgehensweise bei der Schüttgutmessung der Wägezelle WZ2 ist die selbe wie bei der Wägezelle WZ1. Bis zu einer Zeit $t = 2035$ s wird kein Material gefördert, um die Bandwaage vor der Messung zu tariieren. Dann werden innerhalb von 21 min (1100 ± 2) kg Kunststoffgranulat über die Bandwaage transportiert. Bis zum Ende der Messung bei $t = 5480$ s wird kein Material mehr gefördert. Aufgrund der etwas kürzeren Messzeit bei gleicher Kunststoffgranulatmenge ist der mittlere Durchsatz mit 3.1 t/h höher als bei der vorherigen Messung. Durch die gleiche Umlaufzeit $U = (22.80 \pm 0.04)$ s und die gleiche Länge des Gurtes $L = 20$ m ergibt sich auch eine etwas höhere Bandbelegung von 1.0 kg/m.

Der gemessene Durchsatz der Wägezelle WZ2 als Funktion der Zeit t ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Die dazu verwendeten Kalibrierparameter A und B werden aus Abschnitt 5.3.2 entnommen und in Gleichung (5.6) eingesetzt. Vor der Messung wird keine starke Abweichung von der Nulllinie beobachtet, da kein Material auf die Bandwaage geladen wird. Während der Schüttgutmessung wird der Durchsatz von etwa 1.0 t/h bis 7.4 t/h variiert. Nachdem der Materialstrom verschwunden ist, fällt das Signal unter die Nulllinie auf -0.4 t/h und bleibt dort für den Rest der Messung. Dies lässt sich durch das stark erhöhte Relaxationsverhalten der Wägezelle WZ2 erklären, das im Abschnitt 5.1.2 erläutert wird. Da der Einfluss der Relaxation mit der Stärke und Dauer einer Belastung



Gesamtgewicht über Plattenwaage	(1100 ± 2) kg
Gesamtgewicht über Bandwaage	(997 ± 24) kg
Absolute Differenz	-103 kg
Relative Differenz	9.4 %

Abbildung 5.11: Schüttgutmessung der Wägezelle WZ2. Dargestellt ist der Durchsatz DS in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Ergebnisse der Messung sind in einer Tabelle dargestellt. Zwischen den Zeitpunkten $t = 2035$ s und $t = 3290$ s wird Kunststoffgranulat mit einem Gesamtgewicht von (1100 ± 2) kg über die faseroptische Bandwaage geführt. Die Summe aller Durchsatzwerte zwischen Messbeginn und Messende multipliziert mit der Messdauer ergibt ein Gesamtgewicht von (997 ± 24) kg. Die absolute Differenz zwischen Platten- und Bandwaage beträgt somit -103 kg und die relative Differenz 9.4 %.

zunimmt, führt er bei einer Schüttgutmessung zu einem deutlich stärkeren Effekt als bei einer Kalibrierung. Dort wird die Wägezelle nur für eine Umdrehung des Gurtes belastet, also für etwa 22.80 s. Dementsprechend werden bei der Kalibrierung der Wägezelle WZ2 in Abbildung 5.8 keine sichtbaren Relaxationseffekte festgestellt. Im Gegensatz dazu wird hier die Wägezelle über 20 min lang permanent belastet, was den Signalabfall nach dem Schüttgut erklärt. Darüber hinaus führt die Relaxation auch zu einem von der Bandwaage gemessenen Gesamtgewicht von (997 ± 24) kg, was eine Differenz von -103 kg zum tatsächlichen Gewicht bedeutet. Daraus ergibt sich eine relative Differenz von 9.4 %, die im Vergleich zur Wägezelle WZ1 deutlich schlechter ist. Wenn noch mehr Material über einen noch längeren Zeitraum gemessen wird, was in der Recyclingindustrie durchaus vorkommen kann, würde das Ergebnis noch schlechter ausfallen. Dies zeigt, dass die Wägezelle WZ2 nicht für den Einsatz in Recyclinganlagen geeignet ist.

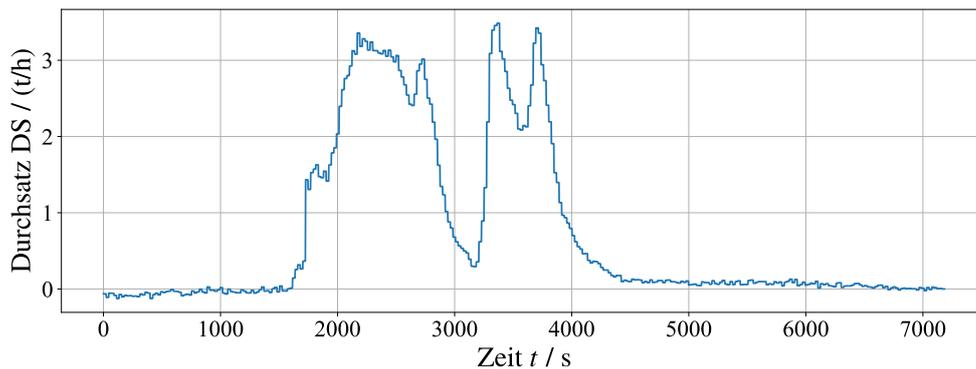
5.4.3 Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2

Da sich die Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2 befindet, ist es möglich, die Schüttgutmessung mit Material aus der Recyclinganlage durchzuführen. Ein Metallgranulat aus Aluminium

mit einer Korngröße zwischen 10 mm bis 15 mm und einer Schüttdichte von etwa 2.1 kg/l wird von dem gemessenen Förderband aus der Anlage in einen Metallbehälter transportiert. Dieser dient dazu das Gesamtgewicht des Materials nach der Schüttgutmessung über eine Plattenwaage zu wiegen. Zu Beginn der Messung wird das Förderband für 1600 s im Leerlauf gefahren, um die Bandwaage zu tarieren. Das Material wird am Eingang der Anlage aufgegeben und durchläuft mehrere Aggregate, bis es das Abwurförderband erreicht, auf dem die faseroptische Bandwaage montiert ist. Der Durchsatz auf dem Förderband ist daher von den Aggregaten, dem Material und anderen externen Faktoren abhängig und schwankt daher stark. Außerdem ist es nicht möglich, den Materialfluss sofort zu stoppen. Selbst wenn kein Material mehr in die Anlage zugeführt wird, sinkt der Durchsatz nur langsam. Einzelne Aluminiumstücke werden auch nach einer Stunde ohne Materialzufuhr über das Abwurförderband transportiert. Aus diesem Grund wird das Ende der Messung auf den Zeitpunkt $t = 4422$ s festgelegt, wenn der Metallbehälter entnommen wird und kein Material mehr hineinfallen kann. Das Gewicht des Behälterinhalts wird dann mit einer Plattenwaage gemessen und ergibt einen Wert von (1487 ± 2) kg, während das Gesamtgewicht über die Bandwaage mit Gleichung (5.7) und einer Messzeit von $t = 1600$ s bis $t = 4422$ s ermittelt wird. So ergibt sich ein mittlerer Durchsatz von 1.9 t/h, eine Umlaufzeit $U = (22.11 \pm 0.04)$ s und eine mittlere Bandbelegung von 1.2 kg/m.

In Abbildung 5.12 wird die Schüttgutmessung der Wägezelle WZ3 dargestellt. Der Durchsatz DS wird mit den Kalibrierparametern A und B aus Abschnitt 5.3.2 und Gleichung (5.6) berechnet. Vor der Messung befindet sich kein Material auf dem Förderband, so dass der Durchsatz nahe der Nulllinie liegt. Ab dem Zeitpunkt $t = 1600$ s wird Aluminium aus der Recyclinganlage transportiert, sodass ein Anstieg bis zum Zeitpunkt $t = 2175$ s zu beobachten ist, wo der Durchsatz einen Wert $DS = 3.35$ t/h erreicht. Im Bereich um $t = 3160$ s erfährt der Durchsatz einen starken Einbruch, wo er bis auf $DS = 0.30$ t/h abfällt. Danach steigt der Durchsatz wieder bis zu einem Wert $DS = 3.49$ t/h an. Vor dem Ende der Messung bei $t = 4422$ s kommt es zu einem flachen Absinken. An diesem Punkt kann kein kontinuierlicher Materialfluss mehr beobachtet werden und der Auffangbehälter wird entfernt. Die Summe aller gemessenen Durchsatzwerte multipliziert mit der Messzeit $T = 2822$ s ergibt ein über die Bandwaage gemessenes Gesamtgewicht von (1416 ± 32) kg. Die absolute Differenz zwischen den Ergebnissen der Plattenwaage und der faseroptischen Bandwaage beträgt -74 kg und die relative Differenz beträgt 5.0 %.

Im Vergleich zur Wägezelle WZ1 ist die Genauigkeit der Wägezelle WZ3 nur geringfügig schlechter, trotz der schwierigeren Bedingungen des Messaufbaus 2, die im Abschnitt 3.2.3 erläutert werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Fördergeschwindigkeit hier nur etwa halb so groß ist wie im Messaufbau 1. Der mittlere Durchsatz ist daher niedriger als bei der Schüttgutmessung der Wägezelle WZ1, aber die mittlere Bandbelegung ist deutlich höher.



Gesamtgewicht über Plattenwaage	(1487 ± 2) kg
Gesamtgewicht über Bandwaage	(1413 ± 32) kg
Absolute Differenz	-74 kg
Relative Differenz	5.0 %

Abbildung 5.12: Schüttgutmessung der Wägezelle WZ3. Dargestellt ist der Durchsatz DS in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Ergebnisse der Messung sind in einer Tabelle dargestellt. Zwischen den Zeitpunkten $t = 1600$ s und $t = 4422$ s wird Aluminiumgranulat mit einem Gesamtgewicht von (1487 ± 2) kg über die faseroptische Bandwaage geführt. Die Summe aller Durchsatzwerte zwischen Messbeginn und Messende multipliziert mit der Messdauer ergibt ein Gesamtgewicht von (1413 ± 32) kg. Die absolute Differenz zwischen Platten- und Bandwaage beträgt somit -74 kg und die relative Differenz 5.0 %.

Dies führt zu einer steileren Kalibriergeraden der Wägezelle WZ3 in Abbildung 5.9 im Vergleich zur Kalibriergeraden der Wägezelle WZ1 in Abbildung 5.7. Kleinere Durchsatzwerte lassen sich daher mit der Wägezelle WZ3 leichter erkennen, was sich besonders beim Einbruch in der Mitte der Schüttgutmessung und beim Abstieg vor dem Ende der Messung bemerkbar macht. Eine mit dem Messaufbau 1 vergleichbare Fördergeschwindigkeit könnte die Genauigkeit in diesen Bereichen verringern. Die Genauigkeit der Wägezelle WZ3 von 5.0 % ist daher zum Teil auf die geringere Fördergeschwindigkeit zurückzuführen.

Darüber hinaus existieren im Messaufbau 2 langsame Veränderungen der Nulllinie. Diese sind in der Kalibriermessung in Abbildung 5.9(a) zu sehen und werden voraussichtlich durch die Wärmeausdehnung des Gurtes und mechanischen Einflüssen von nahegelegenen Sortieraggregaten verursacht. Messungen mit einer kurzen Messdauer sind nur geringfügig von langsamen Veränderungen der Nulllinie betroffen. Die Schüttgutmessung der Wägezelle WZ3 hat jedoch eine Messdauer von etwa 47 min, so dass ein deutlich größerer Einfluss zu erwarten ist. Inwieweit die Schüttgutmessung durch diese Effekte beeinflusst wird, lässt sich nicht feststellen, da sich nach dem Messbeginn immer eine unbekannte Menge an Material auf dem Förderband befindet. Daher ist es nicht möglich, zwischen Änderungen im Materialfluss und Änderungen in der Nulllinie zu unterscheiden. Eine Genauigkeit von

5 Faseroptische Bandwaagen

5.0 % zeigt, dass sich der Einfluss weniger auf die Genauigkeit auswirkt als angenommen oder dass es keine langsamen Änderungen der Nulllinie während der Schüttgutmessung gibt.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der Wägezelle WZ3, dass die faseroptische Bandwaage in der Lage ist, das Recyclingmaterial innerhalb einer Recyclinganlage genau zu bestimmen. Geringe Durchsatzmengen können durch eine Reduzierung der Fördergeschwindigkeit kompensiert werden. Darüber hinaus wird für den Messaufbau 2 eine vereinfachte Konstruktion der Bandwaage verwendet, die schneller und einfacher in ein Förderband eingebaut werden kann als die Konstruktion des Messaufbaus 1, ohne dass dies zu einer signifikanten Verringerung der Genauigkeit führt.

5.5 Genauigkeitsvergleich mit herkömmlichen Bandwaagen

Ziel der in dieser Arbeit beschriebenen Entwicklungsschritte ist es, die Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage auf das Niveau einer herkömmlichen Bandwaage zu bringen oder sogar zu übertreffen. Um die Ergebnisse dieser Entwicklungsschritte zu bewerten, werden die Unterschiede zwischen den beiden Bandwaagentypen hervorgehoben und im Hinblick auf ihren Einsatz in der Recyclingindustrie beurteilt. Es werden Besonderheiten des Recyclingmaterials herausgearbeitet und deren Auswirkungen auf die Genauigkeiten untersucht. Darüber hinaus wird eine Schüttgutmessung wie in Abschnitt 5.4 mit einer herkömmlichen Bandwaage in einer Recyclinganlage durchgeführt. Dadurch können beide Bandwaagentypen hinsichtlich ihrer Genauigkeit direkt miteinander verglichen werden.

5.5.1 Durchsatzmessungen in der Recyclingindustrie

Das Fördergut in der Recyclingindustrie kann eine geringe Schüttdichte haben und viele Sortieraggregate arbeiten besser bei einer niedrigen Bandbelegung, so dass mitunter sehr geringe Gewichte mit einer Bandwaage gemessen werden müssen [79]. Darüber hinaus kann Recyclingmaterial sehr inhomogen sein, so dass es Phasen mit geringem oder keinem Durchsatz und Phasen mit sehr hohem Durchsatz gibt. Bandwaagen müssen daher in der Lage sein, sehr kleine und stark schwankende Durchsatzwerte ohne nennenswerte Genauigkeitsverluste zu messen. Konventionelle Bandwaagen werden hauptsächlich in der Schwer- und Rohstoffindustrie eingesetzt, wo die Materialströme schwer und homogen sind [11]. Dadurch sind die Bandwaagen an diese Bedingungen angepasst und nicht an die unterschiedlichen Gegebenheiten der Recyclingindustrie.

Eine Kompensation der Grundschwingungen des Förderbandes findet in der Regel nicht statt, sondern es wird ein Schwellenwert festgelegt, unterhalb dessen jedes Messsignal auf Null gesetzt wird [80]. Zur Bestimmung des Schwellenwertes wird die größte Auslenkung der Grundschwingungen, die meist durch die Vulkanisierverbindung verursacht wird, herangezogen. Befindet sich kein Material auf dem Förderband, verhindert der Schwellenwert die Messung der Grundschwingungen und der Durchsatz wird korrekt auf Null gesetzt. Allerdings führt dies auch dazu, dass Gewichte unterhalb des Schwellenwertes ignoriert werden. Die Auswirkungen dieses Verfahrens sind stark vom Förderband und der montierten Bandwaagen-Konstruktion abhängig. Wie in Abbildung 5.4(a) zu sehen ist, misst die Wägezelle WZ1 im Messaufbau 1 Auslenkungen der Vulkanisierverbindung von etwa $11 \mu\epsilon$. Bei Verwendung eines Schwellenwertes würden also alle Signalwerte unter

11 $\mu\epsilon$ auf Null gesetzt werden. Mit den Kalibrierparametern aus Abschnitt 5.3.1 ergibt sich ein Schwellenwert für den Durchsatz $DS = 7.8$ t/h bzw. für die Bandbelegung von 2.5 kg/m. Angewendet auf die Schüttgutmessung der Wägezelle WZ1 in Abschnitt 5.4.1 würde der Materialstrom vollständig ignoriert werden, da keiner der Durchsatzwerte über dem Schwellenwert von 7.8 t/h liegt. Das Förderband des Messaufbaus 1 zeigt zwar einen sehr starken Ausschlag der Vulkanisierverbindung, die bei den meisten Förderbändern, so auch bei dem Förderband des Messaufbaus 2, nicht zu beobachten ist. Dennoch zeigt das Beispiel die Genauigkeitssteigerung, die die Messalgorithmen der faseroptischen Bandwaage im Vergleich zu herkömmlichen Bandwaagen bewirken können.

Die Verwendung eines Schwellenwertes bei herkömmlichen Bandwaagen reduziert die Genauigkeit bei inhomogenen Materialströmen weiter. So ist es möglich, dass sich schwere Einzelgewichte zufällig über den Peaks der Grundschrwingungen befinden und somit wiederholt überbewertet werden. Über einen längeren Messzeitraum ist das gemessene Gesamtgewicht in diesem Fall deutlich höher als das tatsächliche Gesamtgewicht. Ohne einen Schwellenwert werden die Übergewichtung der Peaks in den Grundschrwingungen durch eine Untergewichtung an anderen Stellen des Gurtes ausgeglichen, wodurch sich die Differenz zwischen dem gemessenen und dem tatsächlichen Gesamtgewicht verringert. Inhomogenitäten können also zu Abweichungen führen, die ohne Schwellenwert nicht auftreten. Im Falle homogener Materialströme oberhalb des Schwellenwerts wird kein Signal abgeschnitten und alle durch den Gurt verursachten Über- und Untergewichtungen werden berücksichtigt. Da der Schwellenwert nicht angewendet wird, gibt es auch keinen Verlust an Genauigkeit, weshalb die Hersteller herkömmlicher Bandwaagen eine gleichmäßige Bandbelastung empfehlen [11, 56]. Da faseroptische Bandwaagen ohne Schwellenwert arbeiten und stattdessen Grundschrwingungen kompensieren, sind inhomogene Materialströme kein Faktor für den Genauigkeitsverlust bei faseroptischen Bandwaagen.

Ein weiterer Vorteil der faseroptischen Bandwaage ist die Geschwindigkeitsmessung. Herkömmliche Bandwaagen arbeiten oft mit Messrädern, die die Fördergeschwindigkeit an der Unterseite des Obertrums messen [56]. In der Recyclingindustrie kann sich Material zwischen Ober- und Untertrum verfangen und an der Innenseite des Gurtes haften bleiben. Dies kann bei Messrädern zum Abrutschen und damit zu Abweichungen bei der Geschwindigkeitsmessung führen. Faseroptische Bandwaagen hingegen messen die Geschwindigkeit ohne externen Sensor mit Hilfe der Messalgorithmen in Abschnitt 5.2. Wenn die Vulkanisierverbindung hinreichend erkennbar ist, kann die Umlaufzeit jeder Umdrehung des Förderbandes mit Hilfe des Algorithmus in Abschnitt 5.2.1 genau gemessen werden. Zusammen mit der Länge des Gurtes ergibt sich daraus die Geschwindigkeit. Bei dem Algorithmus in Abschnitt 5.2.2 wird die Autokorrelationsfunktion auf einen Zeitabschnitt ohne Fördergut angewendet. Es wird dann angenommen, dass die Fördergeschwindigkeit

über einen längeren Zeitraum annähernd konstant bleibt. Die Messungen in Abbildung 5.4 bestätigen diese Annahme, so dass beide Methoden der Geschwindigkeitsmessung mit einem Messrad vorzuziehen sind.

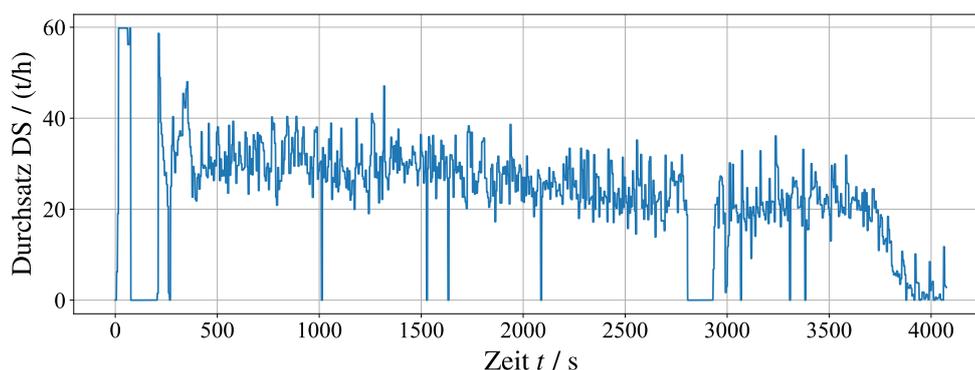
5.5.2 Schüttgutmessung einer herkömmlichen Bandwaage

Für einen Genauigkeitsvergleich mit einer faseroptischen Bandwaage wird eine Schüttgutmessung mit einer herkömmlichen Bandwaage in einer Recyclinganlage für Leichtverpackungen durchgeführt. Diese befindet sich am Eingang der Anlage und misst einen schweren und homogenen Materialstrom, der günstige Messbedingungen für die herkömmliche Bandwaage bietet.

Es werden die Bandwaage Ramsey Serie Idea und der Integrator Ramsey Micro-Tech 9101 von Thermo Fisher Scientific verwendet [81, 82]. Das Förderband hat eine Länge $L = 61$ m, eine Umlaufzeit $U = 69$ s, ist um 18° geneigt und es befinden sich keine Mitnehmer auf dem Gurt. Die Bandwaagen-Konstruktion ist vor Witterungseinflüssen geschützt und ähnelt dem Aufbau in Abbildung 3.6. Ein systemeigener Rollenstuhl ist über ein Drahtseil mit zwei Wägezellen verbunden, ohne dass ein Wiegerahmen verwendet wird. Die Bandwaage wird direkt vor der Messung tariert und der Durchsatz-Schwellenwert liegt bei etwa 0.9 t/h. Das tatsächliche Gewicht des Leichtverpackungsmaterials von (28.16 ± 0.08) t wird mit einer Fahrzeugwaage gemessen. Innerhalb eines Zeitraums von 4075 s wird das Material über die Bandwaage transportiert, was zu einem durchschnittlichen Durchsatz von 23.2 t/h und einer durchschnittlichen Bandbelegung von 7.4 kg/m führt. Diese Werte liegen um ein Vielfaches höher als die Schüttgutmessungen der faseroptischen Bandwaagen in Abschnitt 5.4.

Abbildung 5.13 zeigt den Durchsatz DS der Schüttgutmessung als Funktion der Zeit t . Um die Datenmenge zu reduzieren, werden die Daten als Mittelwerte von 5-Sekunden-Abschnitten ausgegeben. Jeder Datenpunkt ist also der durchschnittliche Durchsatz, der innerhalb von fünf Sekunden über die Bandwaage transportiert wird. In den Zeitbereichen $t \in [76, 205]$ s und $t \in [2806, 2930]$ s wird aus betrieblichen Gründen kein Fördergut transportiert. Der Durchsatz liegt unter dem Schwellenwert $DS = 0.9$ t/h und wird daher auf Null gesetzt. Nach dem Start der Messung und vor dem Ende der Messung ist der Materialstrom inhomogen und schwankt teilweise stark zwischen den Durchsatzwerten $DS = 0$ t/h und $DS = 59.8$ t/h. Ansonsten ist aber ein homogener Durchsatz bei $DS \approx 25$ t/h vorhanden. Die Grundschwingungen und die in Abschnitt 5.5 beschriebenen negativen Einflüsse des Schwellenwertes wirken sich nur minimal auf die Durchsatzmessung aus. Dies zeigt

5 Faseroptische Bandwaagen



Gesamtgewicht über Fahrzeugwaage	$(28.16 \pm 0.08) \text{ t}$
Gesamtgewicht über Bandwaage	$(26.67 \pm 0.53) \text{ t}$
Absolute Differenz	-1.49 t
Relative Differenz	5.3%

Abbildung 5.13: Schüttgutmessung einer herkömmlichen Bandwaage. Dargestellt ist der Durchsatz DS als 5-Sekunden-Mittelwerte in Abhängigkeit von der Zeit t . Die Ergebnisse der Messung sind in einer Tabelle dargestellt. Bis auf kleinere Zeitintervalle, in denen der Durchsatz stark schwankt oder ganz verschwindet, wird ein homogener Materialstrom gemessen, der weit über dem Schwellenwert $DS = 0.9 \text{ t/h}$ liegt. Trotz dieser günstigen Bedingungen ist die relative Differenz der herkömmlichen Bandwaage von 5.3% mit einer faseroptischen Bandwaage vergleichbar.

sich bei einem von der Bandwaage gemessenen Gesamtgewicht von $(26.67 \pm 0.53) \text{ t}$. Die absolute Differenz zum tatsächlichen Gewicht beträgt -149 kg , was eine relative Differenz von 5.3% ergibt. Die Genauigkeit der herkömmlichen Bandwaage ist also vergleichbar mit der Genauigkeit der faseroptischen Bandwaage, obwohl der Materialstrom optimale Bedingungen aufweist. Die Montage derselben Bandwaage in anderen Bereichen der Anlage für Leichtverpackungsmaterial, die einen geringeren und inhomogeneren Materialstrom aufweisen, würde die Genauigkeit weiter verringern. Die Schüttgutmessung zeigt, dass faseroptische Bandwaagen in der Lage sind, die gleiche Genauigkeit zu erreichen wie herkömmliche Bandwaagen und bei leichten und inhomogenen Materialströmen sogar einen deutlichen Genauigkeitsvorteil aufweisen.

Anwendung in der Recyclingindustrie

Im vorangegangenen Kapitel wird gezeigt, dass faseroptische Bandwaagen für den Einsatz in der Recyclingindustrie genauer sind als herkömmliche Bandwaagen. Die Entscheidung des Recyclers, ob sich die Anschaffung einer faseroptischen Bandwaage lohnt, hängt aber neben der Genauigkeit auch von anderen Faktoren ab. Nur wenn der nachhaltige Nutzen größer ist als die Kosten, wird eine Technologie in Recyclinganlagen eingesetzt werden und damit kreislaufwirtschaftliche Ergebnisse erzielen können.

Je einfacher und schneller die Montage und Bedienung, desto breiter ist der Anwendungsbereich einer Bandwaage. Deshalb wird in Abschnitt 6.1 beschrieben, wie faseroptische Bandwaagen flexibel und vielseitig in Recyclinganlagen eingesetzt werden können.

Niedrige Anfangsinvestitionen führen dazu, dass Recycler eher geneigt sind, Bandwaagen in ihren Anlage einzusetzen. Die Anschaffungskosten einer faseroptischen Bandwaage werden daher in Abschnitt 6.2 mit denen einer herkömmlichen Bandwaage verglichen. Neben den Materialkosten wird auch auf die Produktions- und Montagekosten eingegangen.

Der in dieser Arbeit entwickelte neuartige Bandwaagentyp eröffnet dem Recycler neue Verwendungsmöglichkeiten, die in Abschnitt 6.3 vorgestellt werden. Die faseroptische Bandwaage kann die Digitalisierung und Automatisierung der Recyclingindustrie erheblich voranbringen.

6.1 Flexibilität

Für die großtechnische Umsetzung der faseroptischen Bandwaage sollte diese möglichst flexibel einsetzbar sein. Je schneller die Montage, desto weniger muss die Recyclinganlage abgeschaltet werden und desto geringer sind die Stillstandskosten für den Recycler. Ein einfacher Einbau ermöglicht es, eine Bandwaage auch in Förderbänder einzubauen, die wenig Platz zwischen Ober- und Untertrum bieten, kompliziert aufgebaut oder nur schwer zugänglich sind. Darüber hinaus sollte das Personal der Recyclinganlage in der Lage sein, den Betrieb einer Bandwaage auch ohne Fachpersonal vor Ort sicherzustellen. Dies gilt zwar nicht für die Inbetriebnahme und Instandhaltung der Waage, aber auch diese sollten schnell und einfach durchgeführt werden können. Letztlich ist es auch erforderlich, dass eine Bandwaage in möglichst viele Förderbandtypen eingebaut werden kann. Je vielseitiger eine Bandwaage ist, desto weniger ist ihr Einsatzbereich eingeschränkt.

6.1.1 Montage

In dieser Arbeit werden zwei verschiedene Bandwaagen-Konstruktionen untersucht. Messaufbau 1 wird in Abschnitt 3.2.2 beschrieben und basiert auf der Konstruktion einer herkömmlichen Bandwaage [56]. Der Aufbau aus Wägerahmen, Drahtseil und Rollenstuhl misst die gesamte Breite des Förderbandes und überträgt das Gewicht des Förderguts indirekt auf die Wägezelle. Durch die Trägheit der Konstruktion und die Verwendung eines Drahtseils werden Querkräfte und Vibrationen des Förderbandes unterdrückt. Allerdings verringert sich dadurch auch die Empfindlichkeit der Bandwaage, so dass es schwieriger wird, geringe Gewichte zu erkennen. Recyclingmaterial hat teilweise eine sehr geringe Schüttdichte. In diesen Fällen ist die Empfindlichkeit der Bandwaage wichtig, um den Durchsatz trotzdem genau messen zu können. Das ist einer der Gründe, warum für Messaufbau 2, der im Abschnitt 3.2.3 beschrieben wird, eine andere Konstruktion der Bandwaage verwendet wird. Diese verzichtet auf Wägerahmen, Drahtseil und Rollenstuhl und verwendet stattdessen eine einfache Konstruktion aus zwei Querträgern und zwei einzelnen Bockrollen. Das Gewicht des Förderguts wird direkt auf die Wägezelle übertragen, was zu einer höheren Empfindlichkeit führt, wie die Ergebnisse der Kalibriermessungen in Abschnitt 5.3 bestätigen.

Die vereinfachte Konstruktion im Messaufbau 2 bietet zudem den Vorteil, dass keine wesentlichen Änderungen am Förderband vorgenommen werden müssen und weniger und kleinere Einzelteile benötigt werden. Im Vergleich zu herkömmlichen Bandwaagen ist kein zusätzlicher Geschwindigkeitssensor aus Abschnitt 2.4.3 erforderlich, da die

Geschwindigkeit direkt aus dem Signal der faseroptischen Bandwaage mit Hilfe der Messalgorithmen aus Abschnitt 5.2 ermittelt werden kann. Dadurch ist es möglich, die Montage in wenigen Stunden durchzuführen, was Personal- und Materialkosten spart. In den meisten Recyclinganlagen werden in unregelmäßigen Abständen Wartungsschichten durchgeführt. Während dieser Zeit steht die Anlage still. Die Konstruktion kann innerhalb einer Wartungsschicht montiert werden, wodurch für den Recycler keine Stillstandskosten entstehen. Da die Konstruktion schnell und mit geringem Aufwand durchgeführt werden kann, ist die Montage einer Bandwaage in bereits bestehende Förderbänder möglich. Die Bandwaagen-Konstruktion im Messaufbau 1, die der einer konventionellen Bandwaage ähnelt, ist dafür oft zu umständlich und die Montage zu aufwendig. Viele herkömmliche Bandwaagen werden daher schon vor der Inbetriebnahme des Förderbandes montiert, was ihre Flexibilität stark beeinträchtigt.

6.1.2 Bedienung

Nachdem eine faseroptische Bandwaage in ein Förderband eingebaut ist, muss sie in Betrieb genommen werden. Dazu wird eine Glasfaserverbindung zwischen der Bandwaage und dem Interrogator hergestellt, der wiederum mit einem Computer verbunden ist. Der Aufbau zur Ermittlung der Messdaten ist im Abschnitt 3.3.1 beschrieben. Aufgrund der geringen Dämpfung von Glasfasern ist die Entfernung zwischen Bandwaage und Interrogator unbedeutend und kann sogar mehrere Kilometer betragen [39]. Allerdings muss auf eine geeignete Distanzkomensation geachtet werden, die im Abschnitt 4.1.3 beschrieben wird. Damit ist es möglich, den Interrogator an einem zentralen Ort zu platzieren, der Schutz vor dem Betrieb der Recyclinganlage bietet. Schalt- und Serverräume sind dafür ideal geeignet, da sie eine gekühlte und staubfreie Umgebung bieten. Darüber hinaus werden Glasfasern nicht durch elektromagnetische Interferenzen gestört (siehe Abschnitt 2.1.2) und können mit einer geeigneten Ummantelung auch starken mechanischen Einflüssen standhalten. Dadurch wird die Verlegung der Glasfasern innerhalb der Recyclinganlage vereinfacht. Außerdem wird aufgrund der Multiplexing-Eigenschaften der Glasfasertechnik, die im Abschnitt 2.2.4 erläutert werden, in der Regel nur ein Interrogator pro Recyclinganlage benötigt. In einer Anlage mit vielen Bandwaagen erhöht dies die Übersichtlichkeit und erleichtert den Zugriff und die Nutzung der Messdaten. Im Gegensatz dazu muss für die Inbetriebnahme einer herkömmlichen Bandwaage eine Kupferverbindung zum Integrator hergestellt werden. Diese ist anfällig für elektromagnetische Störungen, was ihre maximale Länge einschränkt und in den meisten Fällen die Installation des Integrators in einem Schalt- oder Serverraum verhindert [80]. Darüber hinaus wird die Verlegung der Kupferverbindung erschwert, da diese einen ausreichenden Abstand zu elektrischen Geräten und Stromversorgungskabeln haben muss. Für jede herkömmliche Bandwaage wird ein

Integrator benötigt, was das Verwiegen vieler Materialströme in einer Recyclinganlage unübersichtlich und aufwändig macht. Um die Messdaten jeder Bandwaage nutzen zu können, müssen diese dem entsprechenden Integrator zugeordnet und für jedes Gerät eine Schnittstelle zur Datenabfrage eingerichtet werden.

Nachdem der Messaufbau eingerichtet ist, wird eine Kalibrierung wie in Abschnitt 5.3 durchgeführt. Dadurch wird ein Zusammenhang zwischen den Rohdaten der Bandwaage und dem Durchsatz des Förderguts hergestellt. Da jede Wägezelle, Konstruktion und jedes Förderband in der Regel unterschiedlich sind, muss für jede neue Bandwaage eine Kalibrierung durchgeführt werden. Änderungen der Gurtspannung oder der Fördergeschwindigkeit beeinflussen die Kalibrierparameter. Im Laufe der Zeit können sich diese Werte des Förderbandes verändern, so dass in regelmäßigen Abständen eine Nachkalibrierung der Bandwaage durchgeführt werden sollte [23]. Kalibrierungen können nicht automatisch erfolgen, so dass ein optimales Verhältnis zwischen Aufwand und den Genauigkeitsanforderungen der Bandwaage individuell gefunden werden muss. Das Tarieren, also das Einstellen der Nulllinie, kann dagegen automatisch erfolgen. Dazu wird während des Betriebs der Anlage eine Zeitspanne gewählt, in der kein Fördergut über die Bandwaage transportiert wird. Das gemessene Signal dient dann als neue Nulllinie. Die Tarierung sollte bestenfalls mehrmals täglich durchgeführt werden, da es durch die Wärmeausdehnung des Gurtes oder äußere mechanische Einflüsse zu langsamen Veränderungen der Nulllinie kommen kann. Die Notwendigkeit des Kalibrierens, Nachkalibrierens und Trierens ist bei faseroptischen und herkömmlichen Bandwaagen gleichermaßen gegeben.

Die Handhabung einer Bandwaage sollte so einfach gestaltet sein, dass kein Fachpersonal vor Ort sein muss, um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten. Die Geschwindigkeitsmessung und der Messalgorithmus (siehe Abschnitt 5.2) sowie die Temperaturkompensation (siehe Kapitel 4) sollten automatisch durchgeführt werden. Ferner soll die Erfassung und Verarbeitung der Messdaten selbstständig erfolgen, so dass nur die fertigen Werte des Durchsatzes bzw. der Bandbelegung beim Nutzer ankommen. Eine einfache und schnelle Handhabung kann sowohl für die faseroptische Bandwaage als auch für herkömmliche Bandwaagen realisiert werden [83].

6.1.3 Anwendbarkeit

Die Vielseitigkeit des Recyclingmaterials führt zu einer großen Anzahl unterschiedlicher Recyclinganlagen. Die in einer Anlage verwendeten Förderbänder sind an den Recyclingstrom und die Bedingungen der Anlage angepasst. Daher unterscheiden sich die

Förderbänder in der Regel stark zwischen einzelnen Recyclinganlagen und auch innerhalb einer Anlage können große Unterschiede auftreten.

In Abschnitt 2.4.1 werden Mulden- und Flachgurte als die beiden gängigsten Förderbandtypen vorgestellt. Muldengurte sind in der Regel besser für eine Bandwaage geeignet, da sich das Material in der Mitte des Gurtes sammelt, was zu einem wesentlich kleineren räumlichen Messbereich führt. Der vertikale Abstand zwischen Ober- und Untertrum ist durch die Unterkonstruktion eines Muldengurtes aus Rollenstühlen größer, so dass mehr Platz für die Montage einer Bandwaage vorhanden ist. Außerdem befindet sich bei einem Flachgurt ein Gleitblech unter dem Gurt, was die Übertragung des Gewichts des Förderguts auf die Wägezelle erschwert und somit zu einem Genauigkeitsverlust bei geringer Bandbelegung führen kann. Die Konstruktion einer herkömmlichen Bandwaage ist in Abbildung 2.15 dargestellt. Diese benötigt aufgrund des Wägerahmens und des Drahtseils viel vertikalen Platz, der bei den meisten Flachgurten und einigen Muldengurten nicht vorhanden ist. Um die Blockierung durch ein Gleitblech zu vermeiden, muss ein Teil des Blechs entfernt und die Bandwaagen-Konstruktion an einen flachen Rollenstuhl angepasst werden. Dies wird durch die Verwendung eines Drahtseils und eines Wägerahmens erschwert. Die Konstruktion der Bandwaage aus dem Messaufbau 2 ist flacher und kommt daher mit weniger vertikalem Platz aus. Außerdem erleichtert die einfache Konstruktion die Anpassung an einen Gleitgurt.

Förderbänder unterscheiden sich auch in Bezug auf die Steigung, die Geschwindigkeit und das Vorhandensein von Mitnehmern auf dem Gurt. Mitnehmer erhöhen die Grundschrägungen des Gurtes, die dann auf das Signal der Bandwaage übertragen werden. Ist die Steigung zu groß, kann das Material trotz Mitnehmern nach unten rollen, so dass es mehrfach gemessen wird. Der tatsächliche Durchsatz ist dann geringer als der von der Bandwaage gemessene Durchsatz. Eine zu hohe Geschwindigkeit führt zu niedrigeren Durchsatzwerten und mehr Vibrationen. Leichtes Material kann im Rauschen untergehen und nicht mehr erkannt werden. Herkömmliche Bandwaagen werden daher vorzugsweise in Förderbänder mit geringer Steigung, ohne Mitnehmer und mit niedriger Fördergeschwindigkeit eingebaut, da sonst eine Minderung der Genauigkeit eintreten kann [23]. Eine wiederholte Messung beim Zurückrollen des Materials kann auch bei faseroptischen Bandwaagen erfolgen, die den vereinfachten Aufbau aus Abbildung 3.7 verwenden. Die Grundschrägungen des Förderbandes werden jedoch durch die Messalgorithmen aus Abschnitt 5.2 fast vollständig kompensiert, so dass Mitnehmer keinen nennenswerten Einfluss und eine hohe Fördergeschwindigkeit nur einen geringen Einfluss auf die Genauigkeit haben.

Darüber hinaus können Industrieaggregate in der Nähe und der Schutz vor Witterungseinflüssen ebenfalls von Bedeutung sein. Die Auswirkungen dieser Einflüsse sind in den langsamen Veränderungen der Nulllinie in Abbildung 5.9(a) zu erkennen. Diese werden

durch die Wärmeausdehnung des Gurtes und die mechanische Übertragung von Spannungsschwankungen verursacht. Beides sind Faktoren, die die Genauigkeit der Bandwaage beeinträchtigen können und durch häufiges Tarieren verringert, aber nicht vollständig beseitigt werden können. Daher sollte vor der Montage einer Bandwaage darauf geachtet werden, dass das Förderband, insbesondere der Standort der Bandwaage, nicht direkt der Sonneneinstrahlung ausgesetzt und ausreichend vor Wind geschützt ist. Darüber hinaus ist es vorteilhaft, das Förderband an festen Strukturen zu befestigen, um die Übertragung von Vibrationen und Spannungsschwankungen auf die Bandwaage zu verringern. Da es sich um externe Faktoren handelt, sind die Auswirkungen unabhängig vom Typ der Bandwaage und betreffen konventionelle und faseroptische Bandwaagen gleichermaßen.

Wie in Abschnitt 5.5.1 beschrieben, sind herkömmliche Bandwaagen nicht in der Lage, leichtes und inhomogenes Material genau zu messen und die häufig zur Geschwindigkeitsmessung verwendeten Messräder können abrutschen. Ihre geringe Genauigkeit in diesen Fällen schränkt die Anwendbarkeit herkömmlicher Bandwaagen in der Recyclingindustrie erheblich ein. Faseroptische Bandwaagen hingegen können auch unter diesen besonderen Bedingungen das Fördergut genau wiegen. Das bedeutet, dass faseroptische Bandwaagen auch in Recyclinganlagen eingesetzt werden können, in denen leichtes und inhomogenes Material verarbeitet wird. Die Ergebnisse der Bandwaage sind genau genug, um sie anschließend gewinnbringend und effizienzsteigernd zu nutzen.

6.2 Kostenbeeinflussende Faktoren

Um die faseroptische Bandwaage großtechnisch einsetzen zu können, sollten die Anschaffungskosten so gering wie möglich sein. Diese setzen sich aus den Kosten für Material, Produktion und Montage zusammen. Die faseroptische Bandwaage wird vom Recycler nur dann eingesetzt, wenn ihr Nutzen die Kosten übersteigt. Wie in Abschnitt 5.5.1 und Abschnitt 6.1 beschrieben, ist die faseroptische Bandwaage in der Recyclingindustrie genauer und flexibler als eine herkömmliche Bandwaage, so dass ihr Nutzen im Allgemeinen höher ist. Das für die Herstellung einer faseroptischen Bandwaage erforderliche Material unterscheidet sich stark von dem einer herkömmlichen Bandwaage. Anstelle von konduktiven Dehnungsmessstreifen (siehe Abschnitt 2.1) werden Faser-Bragg-Gitter (siehe Abschnitt 2.2) verwendet, und als Auswerteeinheit dient ein Interrogator (siehe Abschnitt 2.2.4) anstelle eines Integrators (siehe Abschnitt 2.1.3). Produktionskosten entstehen durch die Herstellung der faseroptischen Wägezellen (siehe Abschnitt 3.1), deren Temperaturkalibrierungen (siehe Abschnitt 4.3) und die Anbringung eines Housings (siehe Abschnitt 4.1.4). Durch die Automatisierung der einzelnen Fertigungsschritte können die Produktionskosten pro faseroptischer Wägezelle gesenkt werden. Die Montagekosten sind hauptsächlich auf das eingesetzte Fachpersonal und die Stillstandszeiten der Recyclinganlage zurückzuführen. Je schneller und einfacher die Montage, desto geringer sind die Kosten.

6.2.1 Material

Konduktive Wägezellen basieren auf Dehnungsmessstreifen, die auf ein Federelement aus Metall geklebt sind. In Abschnitt 2.1 und Abschnitt 2.3 wird beschrieben, wie die Genauigkeit von konduktiven Wägezellen durch Forschung und Entwicklung kontinuierlich verbessert wird. Dazu gehört die Minimierung von Temperatur- und Relaxationseinflüssen sowie von Störungen durch elektromagnetische Interferenzen. Die Kosten für diese technischen Fortschritte werden jedoch durch automatisierte Herstellungsverfahren und niedrige Konstruktions- und Rohstoffkosten ausgeglichen, so dass konduktive Wägezellen bereits für einige hundert Euro erhältlich sind [61]. Bei faseroptischen Wägezellen wird das gleiche Federelement aus Metall verwendet, an dem jedoch Sensoren aus Faser-Bragg-Gittern angebracht sind. Die Genauigkeitsanforderungen bei der Herstellung von Faser-Bragg-Gittern sind sehr hoch, so dass spezielle und kostenintensive Maschinen und Verfahren eingesetzt werden müssen. Infolgedessen sind faseroptische Wägezellen um ein Vielfaches kostspieliger als konduktive Wägezellen [62, 64, 65].

Integratoren sind die Auswerteeinheiten von konduktiven Wägezellen und werden im Abschnitt 2.1.3 beschrieben. Für den Einsatz der Wägezelle in einer Bandwaage wird der Integrator an die Gegebenheiten angepasst. Dazu gehören die Einstellung eines Schwellenwertes, der in Abschnitt 5.5.1 beschrieben wird, die automatische Tarierung und die Berechnung des Durchsatzes sowie der Bandbelegung durch Kalibrierparameter und Fördergeschwindigkeit [80]. Aufgrund der präzisen Auswertungstechnik und vieler fein abgestimmter Einzelkomponenten ist der Produktionsaufwand hoch, was sich in Stückkosten von rund zehntausend Euro niederschlägt [84].

Zur Erfassung der Daten von faseroptischen Bandwaagen wird ein Interrogator eingesetzt, der in Abschnitt 2.2.4 beschrieben wird. Aufgrund des Zusammenspiels von hochpräziser Laser- und Elektrotechnik und einer hohen Abtastrate sind Interrogatoren sehr aufwändig in der Herstellung und in der Regel mehr als doppelt so teuer wie die Integratoren einer herkömmlichen Bandwaage. Daher sind die gesamten Stückkosten einer einzelnen faseroptischen Bandwaage in der Regel höher. Die Multiplexing-Eigenschaften der Glasfasertechnik und die Verwendung mehrerer paralleler Kanäle ermöglichen jedoch das Erfassen mehrerer Bandwaagen mit nur einem Interrogator. Der Prozess des Wellenlängenmultiplexings und der Aufteilung auf mehrere Kanäle wird in Abschnitt 2.2.4 beschrieben. Jedes Faser-Bragg-Gitter belegt nur einen kleinen Teil der verfügbaren Bandbreite, so dass mit einem Wellenlängenbereich von 80 nm bis zu 15 Faser-Bragg-Gitter in einer Glasfaser untergebracht werden können [42]. Der in dieser Arbeit verwendete Interrogator hat vier parallele Kanäle mit einer Bandbreite von 100 nm. Jede Faser kann daher bis zu 19 Sensoren enthalten und an einen der vier Kanäle angeschlossen werden, so dass bis zu 76 Sensoren gleichzeitig mit dem Interrogator erfasst werden können. Da eine faseroptische Bandwaage aus einem Dehnungssensor und einem Thermometer besteht, ergibt sich daraus eine Anzahl von 38 faseroptischen Bandwaagen. Interrogatormodelle mit mehr parallelen Kanälen sowie einer größeren Bandbreite können diese Anzahl auf bis zu 248 Bandwaagen erhöhen [85]. Zusätzlich können optische Multiplexer (MUX) eingesetzt werden, die die Anzahl der Kanäle um den Faktor 4 erhöhen, aber die maximale Abtastrate von 1000 Hz auf 250 Hz reduzieren [86]. Für faseroptische Bandwaagen ist dies immer noch ausreichend, so dass es theoretisch möglich ist, bis zu 992 Bandwaagen mit einem einzigen Interrogator zu erfassen. Die durchschnittlichen Materialkosten einer faseroptischen Bandwaage sinken aufgrund eines positiven Skaleneffekts. Je mehr Bandwaagen in einer Recyclinganlage eingesetzt werden, desto geringer sind die Stückkosten pro Bandwaage. Herkömmliche Bandwaagen haben keinen positiven Skaleneffekt, da für jede Bandwaage ein Integrator benötigt wird [84]. Bereits nach wenigen montierten Bandwaagen können die Materialkosten durch den Einsatz faseroptischer Systeme gesenkt werden. Die Gesamtkosten für eine vollständige Verwiegung aller Stoffströme in einer Recyclinganlage können durch den Einsatz faseroptischer Bandwaagen erheblich reduziert werden.

6.2.2 Produktion und Montage

Herkömmliche Bandwaagen können kommerziell erworben werden, während die drei Prototypen der faseroptischen Bandwaage manuell hergestellt sind. Zur weiteren Senkung der Kosten für faseroptische Wägesysteme müssen die Fertigungsschritte vereinfacht und automatisiert werden, um so in eine Serienfertigung überzugehen. Das Wägezellenmodell WZ3 aus Abschnitt 3.1.3 eignet sich am besten für die Herstellung von faseroptischen Wägezellen. Der Träger des Faser-Bragg-Gitters aus Edelstahl wird an vier Stellen durchbohrt und vier passende Gewinde werden in das Federelement einer Wägezelle geschnitten. Dann wird der Träger mit dem Federelement verschraubt und das Thermometer wird mit Wärmeleitpaste bestrichen, basierend auf den Ergebnissen in Abschnitt 4.2. Durch den Einsatz von Schablonen und geeigneten Arbeitsgeräten können diese Schritte vereinfacht und auf größere Stückzahlen übertragen werden. Die Herstellung eines Housings wie in Abschnitt 4.1.4 kann durch 3D-Druck oder maschinelle Formgebung erfolgen. Es ist möglich, reflektierende Folie in großen Mengen und in geeigneten Form zu beschaffen, so dass diese dann nur noch auf das Housing aufgebracht werden muss.

Der aufwändigste Fertigungsschritt bei einer faseroptischen Wägezelle ist die in Abschnitt 4.3 beschriebene Temperaturkalibrierung, ohne die kein temperaturkompensiertes Dehnungssignal berechnet werden kann. In dieser Arbeit werden die drei untersuchten Wägezellen in einer Klimakammer von -10 °C bis $+30\text{ °C}$ kalibriert, wobei die Temperaturschritte manuell eingestellt werden. Kleinere Klimakammern mit programmierbarem Temperaturverlauf sind zwar erhältlich, sind aber mit hohen Anschaffungskosten verbunden und werden daher nur für die Herstellung großer Mengen von faseroptischen Wägezellen verwendet. Bei der alternativen Methode der Temperaturkompensation, die im Abschnitt 4.1.1 beschrieben wird, ist die Kenntnis der Innentemperatur der Klimakammer nicht erforderlich. Außerdem muss nur eine homogene Temperaturverteilung innerhalb der Wägezelle und nicht in der gesamten Klimakammer vorliegen. Die Genauigkeit der Klimakammer ist daher unerheblich, was die Anschaffungskosten reduziert. Nichtsdestoweniger ist die Temperaturkalibrierung ein Fertigungsschritt, der bei konduktiven Wägezellen nicht durchgeführt werden muss. Die Verwendung der Wheatstone'schen Brückenschaltung in Abschnitt 2.1.1 und die Optimierung des Materials auf das Temperaturverhalten in Abschnitt 2.1.2 sind für die Temperaturkompensation ausreichend.

Eine Montage umfasst das Ausmessen der Unterkonstruktion des Förderbandes, die Planung der Bandwaagen-Konstruktion, die Herstellung aller Einzelteile und das Verschrauben oder Verschweißen der Komponenten mit der Unterkonstruktion. Anschließend wird die Bandwaage mit der Auswerteeinheit verbunden und in Betrieb genommen. Um die Montagekosten einer Bandwaage zu reduzieren, müssen alle Schritte möglichst schnell und

einfach durchgeführt werden. Dies reduziert zum einen die Kosten für das Fachpersonal und zum anderen die Stillstandszeiten der Recyclinganlage. Herkömmliche Bandwaagen verwenden eine aufwendige Konstruktion, die in Abbildung 3.6 dargestellt ist. Bei sehr engen Förderbändern müssen die vielen Einzelteile millimetergenau gefertigt werden, damit beim Einbau keine Komplikationen entstehen. Um ein bestehendes Förderband nachzurüsten, müssen Teile der Unterkonstruktion und Rollenstühle des Förderbandes entfernt werden, um Material und Platz für die Montage zu haben. Dies ist zeitaufwendig und führt zu Stillstandszeiten in der Recyclinganlage, in denen kein Betrieb stattfinden kann. Dies erhöht die Montagekosten einer herkömmlichen Bandwaage zusätzlich. Die Konstruktion einer faseroptischen Bandwaage ist in Abbildung 3.7 dargestellt und besteht aus weniger Einzelteilen, was die Planung vereinfacht und zu weniger Komplikationen beim Einbau führt. Außerdem müssen in der Regel keine Teile des Förderbandes entfernt werden, so dass die Montage viel schneller und einfacher erfolgen kann. Beim Einbau der Bandwaage in bestehende Förderbänder können in der Regel Stillstandszeiten vermieden werden und es wird weniger Fachpersonal für den Einbau benötigt. Die Montagekosten einer faseroptischen Bandwaage sind daher geringer als die einer herkömmlichen Bandwaage.

6.3 Verwendungsmöglichkeiten

Recyclinganlagen sind kaskadenförmig aufgebaut. Es gibt einen Eingangsstrom, der ein Gemisch aus allen Recyclingrohstoffen enthält, die von der Anlage aussortiert werden sollen. Sortieraggregate teilen den Eingangsstrom in verschiedene vorsortierte Fraktionen auf, die dann von der nächsten Aggregatstufe weiterverarbeitet werden. Außerdem gibt es Rückläufe von Material, das von den Aggregaten nicht sofort erkannt wird. So entsteht ein komplexes Fließbild, das je nach Anlage mehrere Dutzend verschiedene Materialströme enthalten kann. Wie in Abschnitt 6.1 und Abschnitt 6.2 beschrieben, sind faseroptische Bandwaagen flexibler und weisen einen positiven Skaleneffekt auf, so dass sie einfacher, schneller und kostengünstiger an vielen verschiedenen Stellen im Fließbild eingebaut werden können, um den Materialstrom dort zu verwiegen. Darüber hinaus können faseroptische Bandwaagen Recyclingmaterial mit höherer Genauigkeit messen, was im Abschnitt 5.5 beschrieben wird. Diese Tatsachen eröffnen den Recyclern neue Möglichkeiten, Bandwaagen gewinnbringend und effizienzsteigernd einzusetzen.

6.3.1 Echtzeit-Überwachung der Prozesskette

Im Gegensatz zu den meisten Industrieanlagen haben Recyclinganlagen einen schwankenden und unbekanntem Eingangsstrom. Aufgrund des kaskadischen und rekursiven Aufbaus der Recyclinganlage wird der Eingangsstrom in viele Materialströme aufgeteilt, deren Durchsatz in der Regel nicht vorhersehbar ist. In späteren Aggregatsstufen kann es daher zu starken Schwankungen im Materialstrom kommen. Da die Sortierqualität vieler Aggregate vom Volumenstrom und der Materialzusammensetzung abhängt, können diese Schwankungen zu einer verminderten Qualität der gewonnenen Recyclingrohstoffe führen. Um dem entgegenzuwirken, kann der Materialstrom durch Dosiereinheiten oder durch Reduzierung von Fördergeschwindigkeiten angepasst werden. Die dafür notwendigen Informationen über den Materialstrom und die Sortiergenauigkeit der Aggregate können durch Bandwaagen ermittelt werden. Je nach Komplexität und Umfang des Fließbildes kann der Materialstrom an vielen Stellen in der Recyclinganlage gesteuert werden. Dies erfordert jedoch die Montage vieler Bandwaagen an unterschiedlichen Stellen der Prozesskette. Faseroptische Bandwaagen sind flexibler, genauer und bei großen Stückzahlen auch günstiger als herkömmliche Bandwaagen und lassen sich daher einfacher, schneller und kostengünstiger an den gewünschten Stellen montieren. Durchsatz und Sortierqualität der Anlage werden erhöht, während die Investitionskosten für den Recycler niedrig gehalten werden.

Die vielen Aggregate und Förderbänder in einer Recyclinganlage können Betriebsstörungen aufweisen oder vom Anlagenpersonal nicht optimal bedient werden, was die Anlagenleistung verringern kann. Je schneller diese Störungen erkannt, lokalisiert und behoben werden, desto weniger wird die Anlagenleistung beeinträchtigt. So können beispielsweise Bandwaagen an den Ein- und Ausgängen der Anlage angebracht werden, um einen Überblick über die gesamte Sortierqualität der Anlage zu erhalten. Ein starker Anstieg einer Ausgangsfraction bei gleichbleibendem Eingangsstrom deutet beispielsweise auf eine Betriebsstörung in der Prozesskette hin, da der Fraction zu viel Restmaterial zugeführt wird. Um die Recyclingqualität der Fraction wieder zu erhöhen, wird die Betriebsstörung in der Prozesskette lokalisiert und behoben. Je mehr Informationen über die Materialströme in der Anlage vorliegen, desto einfacher und schneller kann dies geschehen. Insbesondere in komplexen Recyclingprozessen mit einer großen Anzahl von Ausgangsfractionen können faseroptische Bandwaagen aufgrund ihrer höheren Flexibilität und Genauigkeit bei geringeren Kosten die Anlagenleistung stärker steigern als herkömmliche Bandwaagen.

Das ausgehende Material einer Recyclinganlage wird häufig für die Lagerung und den Transport in Ballen gepresst. Da es mehrere Ausgangsfractionen, aber nur eine Ballenpresse gibt, werden die einzelnen Fraction in einem Bunker zwischengelagert. Wenn genügend Material im Bunker vorhanden ist, wird dieser geöffnet und das Material der Presse zugeführt. Da für jeden Ballen einer Materialsorte in etwa die gleiche Materialmenge benötigt wird, ist es möglich, dass eine nicht ganzzahlige Ballenanzahl verarbeitet wird. Das verbleibende Material muss zurück in den Bunker oder in die Prozesskette transportiert werden, was auf Dauer den Durchsatz der Anlage verringert. Durch die Überwachung des Gewichts im Bunker kann der Öffnungsvorgang für die Ballenpresse automatisiert werden, so dass nur Material für eine ganzzahlige Anzahl von Ballen zugeführt wird. Dies kann durch den Einsatz von faseroptischen Bandwaagen vor jedem Fractionsausgang geschehen, die die Materialzufuhr in die jeweiligen Bunker messen.

6.3.2 Materialbilanzierung

Vertriebskunden, Industriegesellschaften oder der Gesetzgeber legen Recyclingquoten für verschiedene Recyclingprozesse fest [87–89]. Werden diese Quoten vom Recycler erfüllt, erhält er Privilegien wie Zertifikate, Steuervorteile oder bessere Preise für die erzeugten Recyclingrohstoffe. Diese Vergünstigungen bieten einen Anreiz, im Interesse des Ressourcenschutzes mehr Material werkstofflich zu verwerten. Die Recyclingquoten werden regelmäßig von unabhängigen Prüfern kontrolliert. Erfüllt die Sortierqualität des Recyclers die Quoten nicht, werden ihm Privilegien entzogen. Daher besteht nicht nur ein

kreislaufwirtschaftliches, sondern auch ein finanzielles Interesse an der genauen Kenntnis der Materialbilanzen einer Recyclinganlage.

Im einfachsten Fall erfolgt die Materialbilanzierung durch Wiegen aller ein- und ausgehenden Lieferungen mit einer Fahrzeugwaage. Die Sortierqualität einer Ausgangsfraktion wird dann aus dem Verhältnis von ausgeliefertem Gewicht zu angeliefertem Gewicht berechnet. In der Regel gibt es jedoch ein Eingangslager, in dem das angelieferte Material vor der Verarbeitung zwischengelagert wird. Darüber hinaus gibt es Ausgangslager für die verschiedenen Recyclingrohstoffe, in denen das Material zur Abholung bereitgehalten wird. Der Lagerinhalt wird in der Materialbilanz der Fahrzeugwaagen nicht erfasst, so dass diese Methode nur als grobe Schätzung über längere Zeiträume gesehen werden kann und keine schnelle Reaktion auf Veränderungen ermöglicht. Einige Anlagen verwenden daher Plattformwaagen, um das Gewicht der Ausgangsfraktionen zu bestimmen, bevor diese eingelagert werden. In Ballen gepresste Recyclingrohstoffe können direkt gewogen werden, während Schüttgüter in Behälter gefüllt werden müssen. Zusammen mit einer Bandwaage, die den Eingangsstrom misst, werden die Lager in die Materialbilanzierung einbezogen und die Reaktionszeit verkürzt. Schwankungen in der Recyclingqualität werden schneller erkannt und ihnen kann daher auch schneller entgegengewirkt werden. Diese Methode erfordert eine hohe Personalbindung, da die Beladung der Plattenwaage nur manuell erfolgen kann. Die verschiedenen Ausgangsfraktionen der Anlage müssen manuell erfasst und gewogen werden, was zu einem hohen Personaleinsatz führt und Bedienungsfehler zur Folge haben kann. Eine noch schnellere Methode zur automatischen Erfassung der Materialbilanzen einer Recyclinganlage erfordert den Einsatz von vielen Bandwaagen. Diese werden am Eingang und an jedem Ausgang der Anlage montiert und messen so das gesamte in der Anlage verarbeitete Material. Die Recyclingqualität jeder Fraktion kann so jederzeit ermittelt werden. Personaleinsatz und Bedienfehler werden minimiert, da jede Ausgangsfraktion einer Bandwaage zugeordnet werden kann und das Gewicht automatisch erfasst wird. Diese Methode der Materialbilanzierung wird derzeit nur in wenigen Fällen angewendet, da die Kosten und die Ungenauigkeit der Bandwaage zu hoch sind. Faser-optische Bandwaagen ermöglichen jedoch eine hohe Genauigkeit auch bei inhomogenem und leichtem Material und haben einen positiven Skaleneffekt, der beim Einsatz mehrerer Bandwaagen die Stückkosten reduziert. Gerade bei komplexen Recyclingprozessen, die viele Ausgangsfraktionen aufweisen, stellen faseroptische Bandwaagen eine Möglichkeit zur schnelleren, genaueren und kostengünstigeren Materialbilanzierung dar.

6.3.3 Langzeitanalysen

Das in die Anlagen ankommende Recyclingmaterial ist ein Produkt wirtschaftlicher, sozialer und gesellschaftlicher Bedingungen. Langfristige Veränderungen in diesen Bereichen spiegeln sich daher auch in den Abfällen wider, die vom Recycler verwertet werden. Stoffgrößen wie die Schüttdichte, die Materialzusammensetzung und die Gesamtmenge des eingehenden Recyclingstroms können sich auf langen Skalen ändern und haben somit Auswirkungen auf die Recyclingprozesse. Die Menge und Qualität der erzeugten Recyclingrohstoffe kann saisonalen Schwankungen unterliegen und durch langfristige Trends oder Großereignisse beeinflusst werden. Je mehr Informationen dem Recycler vorliegen, desto schneller und effektiver kann er auf Veränderungen reagieren und Einbußen bei Ressourcenschutz und Wirtschaftlichkeit verhindern.

Daten über Schüttdichte, Materialzusammensetzung und Gesamtvolumen des Recyclingstroms können durch den Einsatz von Bandwaagen und Volumenstrommessgeräten erfasst werden. Die Ausstattung vieler Anlagen über einen längeren Zeitraum ermöglicht es, die Daten zu analysieren und Informationen über langfristige Veränderungen zu erhalten. Teile der benötigten Datengrundlage können durch den Einsatz von faseroptischen Bandwaagen erfasst werden, die genauer, flexibler und kostengünstiger sind als herkömmliche Bandwaagen. Je nach Informationsgehalt der Daten können bestehende Anlagen nachjustiert, neue Anlagen anders konstruiert oder Anpassungen an die Unternehmensstrategie vorgenommen werden. Darüber hinaus können die Informationen zur Anpassung bestehender Recyclingquoten genutzt werden, so dass Langzeitanalysen auch für Vertriebskunden, Industriegesellschaften oder Gesetzgeber in der Recyclingindustrie von Interesse sind.

Bandwaagen werden zwischen dem Ober- und Untertrum eines Förderbandes montiert und können das Gewicht des darüber transportierten Förderguts bestimmen. In der Recyclingindustrie können Bandwaagen jedoch nur bedingt wirtschaftlich und ressourcenschonend verwendet werden, da sie für einen großtechnischen Einsatz zu ungenau, unflexibel und kostspielig sind. In dieser Arbeit wird daher eine neuartige Bandwaagentechnologie entwickelt, die eine Alternative zu den derzeit verwendeten herkömmlichen Bandwaagen darstellt. Anstelle eines elektrischen Messverfahrens werden faseroptische Methoden eingesetzt, weshalb sie auch als *faseroptische Bandwaage* bezeichnet wird. Die Eigenschaften der faseroptischen Bandwaage sind speziell an die besonderen Gegebenheiten der Recyclingindustrie angepasst, so dass ein höherer Umfang an zuverlässigen Informationen über die vielfältigen Materialströme von Recyclingverfahren und -prozessen gewonnen werden kann. Je mehr Informationen den Recyclern zur Verfügung stehen, desto schneller und effektiver können die ablaufenden Prozessschritte überwacht und gesteuert werden. Dies ist ein wichtiger Schritt, um die Automatisierung der Recyclingindustrie voranzutreiben und so die Quantität und Qualität von Recyclingrohstoffen zu steigern. Auf diese Weise wird der Grad der Zirkularität im bestehenden Wirtschaftssystem erhöht und der Weg in eine ressourcenschonende Zukunft bereitet.

7.1 Zusammenfassung und Bewertung

Für die Entwicklung der faseroptischen Bandwaage wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik zu herkömmlichen Bandwaagen und faseroptischer Wiegetechnik in Kapitel 2 zusammengefasst. Dies ermöglicht zum einen den Vergleich zwischen den beiden Messverfahren und zum anderen werden mögliche Schwierigkeiten, die bei der Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage auftreten können, frühzeitig erkannt. Je detaillierter der aktuelle Wissensstand herausgearbeitet wird, desto einfacher und schneller können die einzelnen Entwicklungsschritte erfolgen. Die Funktionsweise von konduktiven Dehnungsmessstreifen wird erläutert und es wird beschrieben, wie Störquellen kompensiert werden können. Darüber hinaus wird die optische Dehnungsmessung mit Faser-Bragg-Gittern dargestellt, indem der Herstellungsprozess, das Messverfahren und die Datenerfassung mit einem Interrogator erklärt werden. Sowohl konduktive als auch optische Dehnungssensoren können auf das metallene Federelement einer Wägezelle angebracht werden, um einen

Gewichtsaufnehmer zu erhalten. Dieser wird in Bandwaagen eingesetzt, um das Gewicht des Fördergutes auf dem Gurt zu ermitteln. Zu diesem Zweck wird das Gewicht über eine Bandwaagen-Konstruktion auf die Wägezelle übertragen. Da sowohl die Konstruktion als auch die Wägezelle durch die Art des Förderbandes und durch Umweltfaktoren beeinflusst werden können, werden geeignete Maßnahmen durchgeführt. Um Informationen über den Durchsatz und die Bandbelegung zu erhalten, wird auch die Fördergeschwindigkeit gemessen. Es werden verschiedene Methoden der Geschwindigkeitsmessung beschrieben und miteinander verglichen.

Um die Ergebnisse späterer Messungen beurteilen zu können, werden in Kapitel 3 die in dieser Arbeit untersuchten Wiegesysteme mit Faser-Bragg-Gittern vorgestellt. Der Herstellungsprozess und die Besonderheiten von den faseroptischen Wägezellen WZ1, WZ2 und WZ3 werden beschrieben und in Bezug auf die Genauigkeit und großtechnische Umsetzbarkeit hin bewertet. Darüber hinaus werden drei Messaufbau-Varianten aufgezeigt, in denen die späteren Messungen durchgeführt werden. Stör- und Umweltfaktoren sind in den Varianten unterschiedlich stark ausgeprägt, so dass sie isoliert von anderen Einflüssen untersucht werden können. Messaufbau 2 befindet sich im Realbetrieb einer Recyclinganlage, so dass die Ergebnisse direkt auf den Einsatz in der Recyclingindustrie übertragbar sind. Die Daten der faseroptischen Wiegemodule werden mit einem Messsystem erfasst und verarbeitet. Die Funktionsweise und die verwendete Software werden präsentiert.

Ohne eine funktionierende Temperaturkompensation sind mit Faser-Bragg-Gittern keine genauen Dehnungsmessungen möglich. In Kapitel 4 werden daher der Einfluss von Temperaturänderungen auf das Signal eines Faser-Bragg-Gitters und geeignete Kompensationsverfahren erläutert. Aufgrund nichtlinearer Reaktionen und einer Besonderheit des Messsystems muss eine Distanzkompensation durchgeführt werden, wofür der Abstand zwischen Sensor und Interrogator vor jeder Messung bestimmt wird. Außerdem wird ein Housing benötigt, um die faseroptische Wägezelle vor Witterungseinflüssen zu schützen, und die unterschiedlichen Wärmekopplungen der Sensoren müssen berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck werden theoretische und experimentelle Untersuchungen durchgeführt und Methoden entwickelt, um die Auswirkungen zu minimieren. Unter Berücksichtigung aller Faktoren wird für jede Wägezellen-Variante eine Temperaturkalibrierung in einer Klimakammer durchgeführt. Dabei zeigt sich, dass die Wägezelle WZ2 deutlich schlechtere Ergebnisse als die beiden anderen Varianten aufweist, was auf eine Fehlkonstruktion im Sensordesign zurückzuführen ist.

Die weiteren Entwicklungsschritte für eine faseroptische Bandwaage werden in Kapitel 5 beschrieben. Da neben Temperatureffekten auch mechanische Faktoren die Genauigkeit der Waage beeinflussen können, werden die drei Wägezellen-Varianten in den beschriebenen

Messaufbauten getestet und Kompensationsmethoden entwickelt. Die Relaxationsmessungen werden stationär durchgeführt und zeigen für die Wägezelle WZ2 starke Abweichungen unter anhaltender Belastung. Dagegen ist das Relaxationsverhalten der Wägezellen WZ1 und WZ2 minimal und kann vernachlässigt werden. Von besonderem Interesse sind die beiden Messalgorithmen, die die Dynamik eines Förderbandes im Signal der Bandwaage minimieren. Auch ohne einen Geschwindigkeitssensor wird die Förderbandgeschwindigkeit ermittelt und durch geeignete Integration werden die Grundschrwingungen des Förderbandes herausgefiltert. Besonders bei kleinen Gewichten erreichen die Algorithmen eine deutliche Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Anschließend werden Kalibrierungsmessungen durchgeführt, bei denen eine lineare Beziehung zwischen dem Rohsignal der Bandwaage und dem Durchsatz des Förderguts hergestellt wird. Bis auf kleine Abweichungen sind bei allen faseroptischen Wägezellen eine geringe systematische Abweichung und eine hohe Wiederholgenauigkeit zu beobachten. Da sich die Wägezelle WZ3 im Messaufbau 2 befindet und somit dem Realbetrieb einer Recyclinganlage ausgesetzt ist, sind langsame Veränderungen der Nulllinie zu beobachten. Diese werden durch die Wärmeausdehnung des Gurtes und durch Spannungsschwankungen verursacht, die durch nahe gelegene Industrieaggregate verursacht werden. Durch Schüttgutmessungen werden die Genauigkeiten der faseroptischen Bandwaagen überprüft. Ein kontinuierlicher Materialstrom wird über einen längeren Zeitraum über das Förderband transportiert. Am Ende der Messung wird das tatsächliche Gesamtgewicht des Materials mit dem gemessenen Gesamtgewicht der Bandwaage verglichen. Aufgrund der fehlerhaften Temperaturkompensation und des schlechten Relaxationsverhaltens zeigt die Wägezelle WZ2 eine Abweichung von 9.4 %. Die Ergebnisse der Wägezellen WZ1 und WZ3 zeigen eine bessere Genauigkeit von weniger als oder gleich 5 %, was in etwa der Genauigkeit einer herkömmlichen Bandwaage entspricht. Es ist jedoch zu beachten, dass die durchschnittliche Bandbelegung im Vergleich zu der Schüttgutmessung der herkömmlichen Bandwaage deutlich geringer ist. Eine Genauigkeitsanalyse zeigt, dass inhomogene und leichte Materialströme von herkömmlichen Bandwaagen nur mit großen Abweichungen ermittelt werden können. Dies liegt vor allem an den verwendeten Messalgorithmen, die die Dynamik eines Förderbandes nur unzureichend kompensieren. Da in der Recyclingindustrie häufig inhomogene und leichte Materialströme anzutreffen sind, zeigt die faseroptische Bandwaage einen deutlichen Genauigkeitsvorteil gegenüber herkömmlichen Bandwaagen in der Recyclingindustrie.

Kosten und Flexibilität der beiden Bandwaagentypen werden in Kapitel 6 verglichen. Darüber hinaus wird der wirtschaftliche und ressourcenschonende Nutzen der faseroptischen Bandwaage aufgezeigt. Diese Faktoren sind neben der Genauigkeit wichtige Entscheidungsgrundlagen für den Recycler bei der Anschaffung einer Bandwaage. Aufgrund der vereinfachten Bandwaagen-Konstruktion des Messaufbaus 2 ist der Montageaufwand einer faseroptischen Bandwaage deutlich geringer als bei herkömmlichen Bandwaagen. Damit

können Bandwaagen auch an Stellen in Recyclinganlagen montiert werden, die bisher nur schwer zu realisieren waren. Die Bedienung einer Bandwaage umfasst die Inbetriebnahme, die Instandhaltung und die Handhabung durch den Recycler. Glasfaserkabel lassen sich leichter und sicherer durch industrielle Anlagen verlegen, was die Inbetriebnahme der faseroptischen Bandwaage erleichtert. Ansonsten gibt es jedoch wenig Unterschiede, da für beide Arten von Bandwaagen eine einfache Bedienung eingerichtet werden kann. Ein Vergleich der Anwendbarkeit zeigt, dass die faseroptische Bandwaage vielseitiger eingesetzt werden kann. Dies liegt vor allem an der vereinfachten Konstruktion und der Möglichkeit, inhomogene, leichte Materialströme zu messen. Die Anschaffungskosten einer faseroptischen Bandwaage übersteigen die einer herkömmlichen Bandwaage aufgrund der Kosten für einen Interrogator. Durch die Multiplexing-Eigenschaften der Glasfasertechnologie können jedoch bis zu 992 Bandwaagen gleichzeitig mit einem einzigen Interrogator erfasst werden. Ein positiver Skaleneffekt reduziert die Stückkosten für zusätzliche faseroptische Bandwaagen, was bei den herkömmlichen nicht der Fall ist. Schon bei wenigen Waagen im Einsatz ergibt sich so ein Kostenvorteil für die faseroptische Variante. Dies kann durch die Automatisierung der Produktions- und Montageschritte weiter gesteigert werden. Die verbesserte Genauigkeit, Flexibilität und Kosten einer faseroptischen Bandwaage eröffnen dem Recycler weitere Verwendungsmöglichkeiten. So wird beispielsweise die Echtzeit-Überwachung einer Recyclinganlage vereinfacht, da Bandwaagen an mehr Stellen in der Anlage eingesetzt werden können. Mit der so erzeugten breiteren Datengrundlage lassen sich wichtige Informationen über die ablaufenden Prozessschritte gewinnen. Sortieranlagen und Ballenpressen können optimiert und gesteuert werden, was die Quantität und Qualität der Recyclingrohstoffe verbessert. Darüber hinaus wird durch den Einsatz faseroptischer Bandwaagen die Materialbilanzierung präziser, was für den Erhalt von Zertifikaten und für die Abstimmung wichtig ist. Es gibt zwar bereits Methoden, aber diese sind aufwendiger und langsamer als der Einsatz von Bandwaagen. Langfristig können faseroptische Bandwaagen auch für Langzeitanalysen eingesetzt werden. Änderungen des Eingangsmaterials in eine Recyclinganlage können sich auf die Anlagenleistung auswirken, so dass der Recycler bei ausreichender Information effizienzsteigernde und ressourcenschonende Anpassungen vornehmen kann.

Das Ziel eine genauere, flexiblere und kostengünstigere Alternative zur derzeit verwendeten Bandwaagentechnologie für den Einsatz in der Recyclingindustrie zu entwickeln, wird durch die faseroptische Bandwaage erfüllt. Die Genauigkeit wird durch den Einsatz geeigneter Messalgorithmen erhöht, die in der Lage sind, die Dynamik eines Förderbandes zu kompensieren. Insbesondere bei leichten und inhomogenen Materialströmen erzielt die faseroptische Bandwaage daher bessere Ergebnisse als herkömmliche, wie die Ergebnisse der Schüttgutmessungen zeigen. Durch die Entwicklung einer vereinfachten Bandwaagen-Konstruktion kann die Flexibilität erhöht werden, da der Aufwand und die Zeitkosten für

eine Montage reduziert werden. Zudem ist Glasfasertechnik einfacher zu handhaben als elektrische Technik und es besteht die Möglichkeit, vielfältigere Materialströme zu messen. Die Stückkosten für die Anschaffung mehrerer Bandwaagen werden durch einen positiven Skaleneffekt reduziert. Faseroptische Bandwaagen sind daher ein Werkzeug für Recycler zur Automatisierung von Recyclinganlagen.

7.2 Weiterer Forschungsbedarf

Trotz der hier gezeigten zahlreichen Schritte ist die Entwicklung der faseroptischen Bandwaage noch nicht abgeschlossen. Es müssen noch weitere Messungen zu den langsamen Veränderungen der Nulllinie durchgeführt werden. Inwieweit diese einen Einfluss auf die Genauigkeit haben und ob und wie Kompensationsverfahren angewendet werden können, muss noch geklärt werden. Außerdem konnten bisher nur Prototypen der faseroptischen Bandwaage erstellt werden. Der Weg zu einem fertigen Produkt, das in der Recyclingindustrie großtechnisch eingesetzt werden kann, ist noch weit. Herstellungs- und Montageschritte müssen automatisiert und vereinfacht werden. Dazu gehören die Herstellung der faseroptischen Wägezellen und des Housings sowie die Durchführung einer Temperaturkalibrierung. Die Konstruktion der vereinfachten Bandwaagen-Konstruktion kommt zwar mit weniger Einzelteilen und einer unkomplizierten Montage aus, doch wurden diese Schritte bisher manuell durchgeführt und sollten in die Serienfertigung überführt werden. Ein automatisierter Datenabgriff und die Erstellung einer grafischen Benutzeroberfläche sind noch zu erledigen. Ziel ist es, die gemessenen Informationen der faseroptischen Bandwaage dem Recycler so schnell und einfach wie möglich zur Verfügung zu stellen. Außerdem ist der Einsatz der faseroptischen Bandwaage alles andere als selbstverständlich, da Fachpersonal vor Ort sein muss, um die Messungen durchzuführen. Um den Umgang mit der Bandwaage so einfach wie möglich zu gestalten, müssen Betriebsanweisungen geschrieben und automatisierte Abläufe implementiert werden. Von besonderem Interesse sind dabei die notwendigen Verfahren zur Trierung und Kalibrierung der Waage. Für das Langzeitverhalten der faseroptischen Bandwaage gibt es noch zu wenig Daten, so dass der optimale Zyklus für das Trieren und Kalibrieren noch ermittelt werden muss. Eine Möglichkeit wäre hier, ein automatisiertes Triersystem zu implementieren, wie es bei herkömmlichen Bandwaagen bereits eingesetzt wird [59]. Ziel ist ein selbstlaufendes System, das ohne großen Zeit- und Arbeitsaufwand relevante Informationen für den Recycler liefert.

Wie weitreichend die Ergebnisse dieser Arbeit genutzt werden können, muss noch ausgearbeitet werden. Neben den hier genannten Verwendungsmöglichkeiten sind weitere für die Optimierung von Logistik, Materialfluss, Vertrieb oder Unternehmensstrategie denkbar. So

kann die faseroptische Bandwaage dazu beitragen, Recyclinganlagen zu cyber-physischen Systemen zu entwickeln [90]. Das bedeutet, dass die Produktion und Logistik der Anlage durch kommunikationsfähige Sensorik erfasst, die Daten ausgewertet und zur Beeinflussung des physikalischen Systems genutzt werden. Über Mensch-Maschine-Schnittstellen werden die Informationen den zuständigen Akteuren zur Verfügung gestellt, die dann entsprechend reagieren können. Die Überwachung, Steuerung und Kontrolle erfolgt in Echtzeit und ermöglicht eine schnelle Reaktion auf Markt- und Betriebsveränderungen. Inwieweit diese ehrgeizigen Ziele mit Hilfe von faseroptischen Bandwaagen erreicht werden können, wird sich in Zukunft zeigen. Nicht zuletzt, weil es bereits Ansätze für eine Produktion ohne stationäre Fördertechnik gibt, bei der die Logistik von autonomen, miteinander kommunizierenden Fahrzeugen übernommen wird [91]. Bis die Logistik 4.0 in der Recyclingindustrie Einzug gehalten hat, stellen faseroptische Bandwaagen jedoch eine innovative Entwicklung zur Verbesserung der Produktion dar.

Literatur

1. Sachverständigenrat für Umweltfragen. *Umweltgutachten 2012: Verantwortung in einer begrenzten Welt* (Erich Schmidt Verlag, Berlin, 2012).
2. Seelig, J. H., Faulstich, M., Zeller, T. u. a. in *Recycling und Rohstoffe 8* (Hrsg. Thomé-Kozmiensky, K. J. & Goldmann, D.) Kap. Möglichkeiten und Grenzen des Recycling (TK Verlag, Neuruppin, 2015).
3. Baron, M., Faulstich, M., Seelig, J. H. u. a. in *Einführung in die Kreislaufwirtschaft* (Hrsg. Kranert, M.) 5. Aufl. Kap. Ressourcen- und Klimaschutz durch Kreislaufwirtschaft (Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017).
4. Geissdoerfer, M., Paulo, S., Nancy, B. M. u. a. The Circular Economy. *Journal of Cleaner Production* **143**, 757–768 (2017).
5. Stahel, W. R. *The Circular Economy: A User's Guide* (Routledge Taylor & Francis, London und New York, 2019).
6. Berg, H., Sebestyén, J., Bendix, P. u. a. *Digital waste management* (European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy, Mol, 2020).
7. Mavropoulos, A. *How Industry 4.0 transforms the waste sector* (International Solid Waste Association, 2019).
8. Norden, K. E. *Handbook of Electronic Weighing* (Wiley-VCH, Weinheim, 1998).
9. Gommola, G. *Anwendung und Einbau von Wägezellen* (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2002).
10. Keil, S. *Dehnungsmessstreifen 2*. Aufl. (Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017).
11. *Thayer Scale: Belt Scale Handbook* (Thayer Scale-Hyer Industries, Inc., Pembroke, USA, 2015).
12. Kashyap, R. *Fiber Bragg Gratings* 1. Aufl. (Academic Press, London, 1999).
13. Orthonos, A. & Kalli, K. *Fiber Bragg Gratings* 1. Aufl. (Artech House Inc, Boston, 1999).

14. Majumder, M., Gangopadhyay, T. K., Chakraborty, A. K. *u. a.* Fibre Bragg gratings in structural health monitoring: Present status and applications. *Sensors and Actuators A* **147**, 150–164 (2008).
15. Guo, H., Xiao, G., Mrad, N. *u. a.* Fiber Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Air Platforms. *Sensors (Basel, Switzerland)* **11**, 3687–3705 (2011).
16. Al-Fakih, E., Abu Osman, N. A. & Mahamd Adikan, F. R. The use of fiber Bragg grating sensors in biomechanics and rehabilitation applications: the state-of-the-art and ongoing research topics. *Sensors* **12**, 12890–12926 (2012).
17. Berghmans, F. & Gusarov, A. in *Fiber Bragg Grating Sensors: Research Advancements, Industrial Applications and Market Exploitation* (Hrsg. Cusano, A., Cutolo, A. & Albert, J.) Kap. Fiber Bragg Grating Sensors in Nuclear Environments (Bentham Science Publishers, 2011).
18. Barbosa, C. *Optical Fiber Sensors vs. Conventional Electrical Strain Gauges for Infrastructure Monitoring Applications* White Paper (HBM Inc., Marlboro).
19. Brackett, C. A. Dense Wavelength Division Multiplexing Networks: Principles and Applications. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* **8**, 948–963 (1990).
20. *All-optical belt conveyor scale based on a pair of FBG weighing units* in 26. *International Conference on Optical Fiber Sensors Switzerland* (2018).
21. *EBW 20 / 3* Datenblatt D00269d (Messtechnik Sauerland GmbH, Olsberg, 2020).
22. Van Steenkiste, R. J. & Springer, G. S. *Strain and Temperature Measurement with Fiber Optic Sensors* (Technomic Publishing Company Inc., Pennsylvania, 1997).
23. *Why does your perfect belt scale under-perform?* Digital Asset (Siemens AG, Karlsruhe, 2016).
24. Keil, S. *Technology and Practical Use of Strain Gages* 1. Aufl. (Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 2017).
25. Kammer, E. W. & Pardue, T. E. Electrical Resistance Changes of Fine Wires during Elastic and Plastic Strains. *Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis* **7**, 7–20 (1949).
26. Bridgman, P. W. The Effect of Tension on the Electrical Resistance of Certain Abnormal Metals. *Proceedings of the American Academy of Arts and Sciences* **57**, 41–66 (1922).
27. Hoffmann, K. *An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges* 2. Aufl. (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 1989).
28. Pelleg, J. *Mechanical Properties of Materials* (Springer Netherlands, Dordrecht, 2013).

29. Elbert, B. R. *Radio Frequency Interference in Communications Systems* 1. Aufl. (Artech House, Boston, London, 2016).
30. Sino, H. Electromagnetic Interference (EMI) Filtering Reduces Errors in Precision Analog Applications. *Analog Dialogue* **45**, 1–3 (2011).
31. Kreuzer, M. *High-Precision Measuring Technique for Strain Gage Transducers* (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2001).
32. Schäck, M. M. *High-Precision Measurement Of Strain Gauge Transducers At The Physical Limit Without Any Calibration Interruption* in 22. *IMEKO TC3* Cape Town (2014).
33. Schäck, M. M. *Long Term Proven and Optimized High-Precision 225 Hz Carrier Frequency Technology in a Modern and Universal Data Acquisition System* in 23. *IMEKO TC3* Helsinki (2017).
34. *Principles of lock-in detection and the state of the art* White Paper (Zurich Instruments, Zurich, 2006).
35. Roths, J. & Kratzer, P. Vergleich zwischen optischen Faser-Bragg-Gitter-Dehnungssensoren und elektrischen Dehnungsmessstreifen. *Technisches Messen* **75** (2008).
36. Kleckers, T. *Fibre Bragg Sensors compared with electrical strain gauges for use in force measurement: Prospects and Potentials* in *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology* Lisbon (2009).
37. Meltz, G., Morey, W. W. & Glenn, W. H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method. *Optics Letters* **14**, 823–825 (1989).
38. Kersey, A. D., Berkoff, T. A. & Morey, W. W. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter. *Optics Letters* **18**, 1370–1372 (1993).
39. Senior, J. M. & Jamro, M. Y. *Optical Fiber Communications: Principles and Practice* 3. Aufl. (Pearson Education Limited, Harlow, 2009).
40. Born, M. & Wolf, E. *Principles of optics: electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light* 7. Aufl. (Cambridge University Press, Cambridge, 1999).
41. Hill, K. O. & Meltz, G. Fiber Bragg Grating Technology: Fundamentals and Overview. *Journal of Lightwave Technology* **15**, 1263–1276 (1997).
42. Maul, J. & Kipp, T. *Sensing of Surface Strain with Flexible Fiber Bragg Strain Gages* Tech Notes (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2011).
43. Chen, C.-L. *Foundations for Guided-Wave Optics* 1. Aufl. (John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2006).

44. *QuantumX MX440B* Data Sheet B03890_07_E00_01 (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2021).
45. *FS22SI* Data Sheet B04203_04_E00 (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Maia, Portugal, 2004).
46. Flockhart, G. M. H., Maier, R. R. J., Barton, J. S. *u. a.* Quadratic behavior of fiber Bragg grating temperature coefficients. *Applied Optics*, 2744–2751 (2004).
47. *Five Steps to Meaningful Strain Data* Technical Notes 1025 (Micron Optics Inc., Atlanta, 2014).
48. Dutton, H. *Understanding Optical Communications* (IBM Redbooks, Research Triangle, 1998).
49. Davis, M. A., Bellemore, D. G., Putnam, M. A. *u. a.* Interrogation of 60 fibre Bragg grating sensors with microstrain resolution capability. *Electronics Letters* **32**, 1393–1394 (1996).
50. Bao, Y., Daugherty, D., Hsu, K. *u. a.* US Patent 6449047 (2002).
51. *Load Cell and Weigh Module Handbook* (Rice Lake Weighing Systems, Rice Lake, USA, 2017).
52. *How does a bending beam load cell work?* %5Cur1%7Bhttps://www.hbm.com/en/2973/how-does-a-bending-beam-load-cell-work/%7D (20. Aug. 2020).
53. Beer, F. P., Johnston, R. E., DeWolf, J. T. *u. a.* *Mechanics of Materials* 6. Aufl. (McGraw-Hill, New York, 2012).
54. Davis, J. R. *Aluminium and Aluminium Alloys* (ASM International, 1993).
55. *Precipitation Hardened (+P1450) 1.4568 Stainless Steel* %5Cur1%7Bhttps://www.makeitfrom.com/material-properties/Precipitation-Hardened-P1450-1.4568-Stainless-Steel%7D (20. Aug. 2020).
56. *Thermo Scientific Belt Conveyor Scale Handbook* Bulk Weighing and Monitoring PI.8087.0312 (Thermo Fisher Scientific Inc., 2012).
57. Subba Rao, D. V. *The Belt Conveyor* (CRC Press, London, 2021).
58. McGuire, P. M. *Conveyors: Application, Selection, and Integration* (CRC Press, Boca Raton, 2010).
59. *WTS2 Series II Belt Scale: Operation and Installation Guide* (Web Tech Australia Pty Ltd, Brisbane, Australia, 2014).
60. Reineke, B., Muller, J., Grodde, S. *u. a.* Alternative engine speed sensing using the electric signals of the alternator. *SAE International Journal of Engines* **9**, 2469–2476 (2016).

61. *Plattform-Wägezelle H20A* (BOSCHE GmbH & Co. KG, Damme).
62. LUNA Innovations. *os3200* Data Sheet FFP-TF Rev.1 (Roanoke, USA, 2019).
63. *LOCTITE 4090* Technical Data Sheet Reference 0.3 (Henkel Corporation, 2015).
64. LUNA Innovations. *os4300* Data Sheet FFP-TF Rev.1 (Roanoke, USA, 2019).
65. LUNA Innovations. *os3100* Data Sheet Rev.04 (Roanoke, USA, 2022).
66. LUNA Innovations. *si155: HYPERION Optical Sensing Instrument* Data Sheet si1255 REV.2 (LUNA Inc., Roanoke, USA, 2019).
67. Woodward, B. *Cabling Part 2: Fiber-Optic Cabling and Components* 5. Aufl. (Sybex, Indianapolis, 2014).
68. *Optical Sensing Instrumentation and Software User Guide* Revision 2017.09.30 (Micron Optics Inc., Atlanta, 2017).
69. *ENLIGHT: Sensing Instrumentation & Software User Guide* Revision 1.139 (Micron Optics Inc., Atlanta, 2013).
70. Kreuzer, M. *Strain Measurement with Fiber Bragg Grating Sensors* S2338-1.0 e (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2006).
71. Wang, W., Yu, Y., Geng, Y. *u. a. Measurements of thermo-optic coefficient of standard single mode fiber in large temperature range* in *SPIE International Conference on Optical Instruments and Technology* Beijing (2015).
72. *HYPERION Distance Compensation* Technical Notes 775-000002 rev.A (Micron Optics Inc.).
73. Gönner, A., Kempkes, P., Fendel, A. *u. a.* Influence of thermal coupling on the temperature compensation of fiber optic strain sensors. *Technisches Messen [Online]* (2023).
74. Hannoschöck, N. *Wärmeleitung und Transport* 1. Aufl. (Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018).
75. Baron Fourier, J. B. J. *The analytical theory of heat* (The University Press, London, 1878).
76. Lunze, J. *Regelungstechnik 1* 10. Aufl. (Springer Vieweg, Berlin, 1996).
77. Bronstein, I. N. & Semendjajew, K. A. *Taschenbuch der Mathematik* 19. Aufl. (BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Nauka-Verlag, Leipzig, Moskau, 1979).
78. Young, H. D. & Freedman, R. A. *University Physics with Modern Physics* 14. Aufl. (Pearson Education Limited, Harlow, 2016).
79. *Material bulk densities* Summary Report ROT039 (WRAP, Bunbury, 2010).

80. Chen, A. & Robinson, B. *WTS1 Series II Belt Scale Operation and Installation Guide Revision A* (Web Tech Australia Pty Ltd, Brisbane, Australia, 2016).
81. *RAMSEY Förderbandwaage Serie IDEA 10-101 Bedienungsanleitung 10101R-D.002* (Thermo Fisher Scientific, Minneapolis, 2011).
82. Thermo Fisher Scientific. *Micro-Tech 9101/9201 Integrator Reference Manual REC 4281 Rev J* (Thermo Fisher Scientific, Minneapolis, 2012).
83. *Belt Scale Reference Guide PN 180546* (Rice Lake Weighing Systems, Rice Lake, USA, 2018).
84. *Integrators: BW500 and BW500/L Operating instructions 10/2021* (Siemens AG, Karlsruhe, 2021).
85. LUNA Innovations. *si255: HYPERION Optical Sensing Instrument Data Sheet si255 REV.4* (LUNA Inc., Roanoke, USA, 2021).
86. *M408, M416: Multiplexer for optical strain gages Data Sheet B2535-1.1 en* (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt, 2001).
87. Burger, A., Cayé, N. & Schüler, K. *Aufkommen und Verwertung von Verpackungsabfällen in Deutschland im Jahr 2020* TEXTE 109 (Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2022).
88. *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG)* (2012).
89. Löhle, S., Schmiedel, U. & Bartnik, S. *Analyse der Datenerhebungen nach ElektroG und UStatG über das Berichtsjahr 2017 zur Vorbereitung der EU-Berichtspflichten 2019* TEXTE 82 (Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2019).
90. Vogel-Heuser, B., Bauernhansl, T. & ten Hompel, M. *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1 Produktion* 2. Aufl. (Springer Vieweg, 2017).
91. Bauernhansl, T., ten Hompel, M. & Vogel-Heuser, B. *Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik* 1. Aufl. (Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014).

Plagiatserklärung des Promovierenden

Hiermit versichere ich eidesstattlich, dass die vorliegende Dissertation über *Entwicklung einer faseroptischen Bandwaage für den Einsatz in Recyclinganlagen* selbstständig verfasst worden ist, dass keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt worden sind und dass die Stellen der Arbeit, die anderen Werken – auch elektronischen Medien – dem Wortlaut oder Sinn nach entnommen wurden, auf jeden Fall unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht worden sind.

(Datum, Unterschrift)

Diese Dissertation wurde in der gegenwärtigen oder einer anderen Fassung oder in Teilen noch nicht bei der Technischen Universität Dortmund oder einer anderen Hochschuleinrichtung im Zusammenhang mit einer staatlichen oder akademischen Prüfung eingereicht.

(Datum, Unterschrift)

