

TUHH
Technische Universität Hamburg



Kalibrierung und Equilibrierung eines TekScan-Sensors
März 2019

Phil Ruckert

Matrikelnummer 21156127

Erstprüfer: Prof. DSc. (Tech.) Sören Ehlers
Betreuer: Hauke Herrring, M.Sc., Jan Kubiczek, M.Sc.

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst wurde und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt worden sind.

Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde bisher keinem anderem Prüfungsamt in gleicher oder vergleichbarer Form vorgelegt oder veröffentlicht.

Phil Ruckert

Hamburg, der 28. März 2019.

Abstract

In dieser Arbeit wird das Verhalten eines TekScan-Druckmesssystems unter Einfluss unterschiedlicher Temperaturen und Druckbelastungen analysiert. Dazu wurde in Versuchsreihen eine I-Scan-Druckmessfolie des Typs 5101 (3000 psi) bei 20°C und bei -10°C mit bestimmten hydrostatischen Drücken belastet. Ebenso wird der Einfluss der Anzahl von Belastungszyklen auf die Messergebnisse untersucht, sowie der Einfluss von zeitlichen Abständen zwischen Versuchsdurchführung.

Ziel dieser Analyse ist die Kalibrierung des Sensors entsprechend unterschiedlicher, äußerer Einflüsse auf das Messsystem, sowie die Equilibrierung der Sensordaten. Die Kalibrierung und Equilibrierung des Sensors erlauben dessen präzisen Einsatz unter unterschiedlichen Einsatzbedingungen. Die Ergebnisse besitzen eine schiffbauliche Relevanz in der Analyse von Mechanismen die bei Stahl-Eis-Interaktionen auftreten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
3	Versuchsaufbau und -ablauf	9
3.1	Versuchsaufbau	10
3.2	Pausendauer zwischen Versuchsdurchführungen	13
3.3	Mehrfache Sensornutzung	14
3.4	Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckvariation	15
4	Versuchsergebnisse	17
4.1	Pausenzeiten zwischen Versuchen	19
4.2	Einfluss mehrfacher Sensornutzung	20
4.3	Temperatureinfluss	21
4.4	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit	23
4.5	Einfluss von Druck und Sensitivität	24
5	Auswertung und Diskussion	26
5.1	Pausenzeiten zwischen Versuchen	26
5.2	Einfluss mehrfacher Sensornutzung	27
5.3	Temperatureinfluss	30
5.4	Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit	35
5.5	Einfluss von Druck und Sensitivität	39
5.6	Kalibrierung	44
5.7	Equilibrierung	55
6	Fazit	61
7	Ausblick	63
8	Anhang	67

1 Einleitung

Schiffe und andere maritime Bauwerke, die im Meereis eingesetzt werden, sind starken mechanischen Belastungen durch Eis ausgesetzt. Um detaillierte Einblicke in die mechanischen Wechselwirkungen zwischen Stahl und Eis zu erhalten, vor allem um Wissen über Lastspitzen und die genaue Druckverteilung in der Kontaktfläche zu erlangen, beschäftigt sich die Forschung mit diesen Themen.

Die Druckbelastung zwischen den Kontaktflächen ist ungleichmäßig verteilt [Jor01] und die Belastungsfrequenz variiert auf Grund unterschiedlicher Eischarakteristika [Mio18]. Besonders die für Eis typischen lokalen Druckspitzen stellen für Stahlstrukturen eine erhebliche Belastung dar [ETEL14].

Zur Analyse des Eisverhaltens ist die Anwendung verschiedener Messverfahren möglich.

Ein Ansatz ist die Nutzung kleiner flächiger Lastzellen oder Indentern [MNN99]. Diese liefern aber nur punktuelle Messwerte oder eine sehr grobe Auflösung der Druckverteilung.

Auch optische Messverfahren kommen zum Einsatz. Bei dem sogenannten photoelastischen Effekt wird die Beugung eines Laserstrahls hinter einem durchsichtigen Medium, das mit Eisdruck belastet ist, bestimmt. So können Rückschlüsse auf das Eisverhalten gezogen werden [DN85]. Jedoch ist diese Methode auf durchsichtige Medien beschränkt.

Der Einsatz von Druckmessfilmen, die durch eine druckinduzierte, chemische Reaktion im Inneren des Films Druckverteilungen präzise abbilden können hat sich ebenso bewährt [KDUK12]. Ein Druckmessfilm ist jedoch nur einmalig nutzbar. Beim Einsatz dieses Messverfahrens werden nur die Druckspitzen erfasst. Ein zeitlicher Verlauf der Druckeinwirkung kann nicht dargestellt werden.

Ein Verfahren, das vergleichsweise hohe Auflösungen erzielt, zwischen vielen Werkstoffpaarungen anwendbar ist und die dynamische Abbildung von Druckveränderungen in Echtzeit gestattet, liefert die Firma *Tekscan, Inc.* mit ihrem sogenannten *I-Scan System*. Auch eine Anwendung der Messfolie auf deformierbaren Testkörpern ist möglich. Das System kann bei Temperaturen zwischen -10°C und 55°C genutzt werden, woraus ein breites Einsatzspektrum resultiert [Tek16]. Die Folien sind mehrfach nutzbar und werden bereits von Forschungseinrichtungen für Messungen mit Eislasten genutzt [Sod01][Mä11].

Jedoch ist die Messwertanzeige des TekScan-Systems durch äußere Faktoren beeinflussbar, die bei der Anwendung in der Eisforschung auftauchen. Bei hohen Druckbelastungen der Messfolien kommt es zu Nichtlinearitäten der Messanzeige [Tek16]. Ebenfalls beeinflusst die Temperatur der Messfolie die Messergebnisse, sowie die Belastungsgeschwindigkeit. Eine weitere Rolle spielen die Nutzungsanzahl einer Messfolie und die zeitliche Länge von Pausen zwischen Belastungen.

Entsprechend dieser Einflüsse wurden für die Anfertigung der vorliegenden Arbeit Versuchsreihen durchgeführt. Eine Sensorfolie wird mit einem hydrostatischen Druck in einer eigens konstruierten Druckkammer belastet. Innerhalb der Versuchsreihen werden die Versuchstemperatur, die Belastungsgeschwindigkeiten, also die Geschwindigkeit des Druckanstiegs, und der Betrag der Druckbelastung variiert. Parallel zu der Aufzeichnung des TekScan-Systems wird der auf der Sensorfolie lastende Druck gemessen.

Schlussendlich lassen sich aus dem Vergleich der gewonnenen TekScan-Daten und der Druckwerte Rückschlüsse auf das Sensorverhalten ziehen.

Ziel der Arbeit ist die Kalibrierung und Equilibrierung des Messsystems. Aus dem Vergleich der Messergebnisse lässt sich der jeweilige Einfluss einer Randbedingung auf das Sensorverhalten qualitativ und quantitativ beschreiben. Weiter wird festgestellt, inwiefern das TekScan-System für die Analyse von mechanischen Stahl-Eis-Wechselwirkungen geeignet ist. Durch die Kalibrierungen und Equilibrierungen des Systems wird die Erfassung präziser Messergebnisse in der späteren Praxisanwendung in der Stahl-Eis-Interaktion optimiert. Die Auswertungen werden, auf Basis der zuvor gewonnenen Messdaten, mit Hilfe der Softwareumgebung MATLAB durchgeführt.

2 Stand der Technik

Das I-Scan-System zeichnet sich durch seine vielfältigen Einsatzmöglichkeiten aus. Es handelt sich um ein indirektes, digitales Messverfahren. Die Produktvielfalt im Hinblick auf die Größe und geometrische Form der Druckmessfolien ermöglicht den Einsatz dieser Messmethode in verschiedenen Forschungs- und Entwicklungsbereichen, sowie in Gebieten der Medizin.

Auf dem Gebiet der Biomechanik, beispielsweise in der Dentaltechnik, werden Druckbelastungen des menschlichen Gebisschlusses abgebildet [TRC09].

Der Einsatz des Messverfahrens in der Kontaktfläche zwischen Straßenasphalt und Reifen ist ebenso erprobt. Ergebnisse dieser Forschungen sind in den Bereichen Straßenbau und Reifenentwicklung gleichermaßen bedeutsam [And06].

Der schematische Aufbau einer Druckmessfolie ist in Abbildung 1 zu sehen. Die zentralen Elemente des Druckmesssystems sind die zwei orthogonal zueinander angeordneten Leiterbahnen, die auf Polyesterfolien gedruckt sind. Sie bilden beim Übereinanderlegen der beiden Folien eine Matrix aus sich kreuzenden Punkten. Die Kontaktfläche zwischen den Kreuzungspunkten ist mit einem patentierten, halbleitenden und piezoresistiven Coating benetzt. Ein einzelner Kreuzungspunkt fungiert als eine Sensorzelle. Durch diesen Aufbau der Sensorzellen wird das charakteristische Messprinzip des TekScan-Systems ermöglicht. Wächst die Druckbelastung auf einer Sensorzelle, verringert sich der elektrische Widerstand der Zelle. Je geringer der elektrische Widerstand einer Sensorzelle, desto größer ist der von der Messsoftware ausgegebene 8-Bit-Wert, im Folgenden *Digital Output* genannt. Der Digital Output wird mittels Analog-Digital-Wandler aus der Messspannung erzeugt. Der Anzeigebereich des Digital Outputs liegt im dimensionslosen Bereich zwischen 0 und 255. Der elektrische Widerstand einer Sensorzelle ist also invers proportional zu der aufgetragenen Druckbelastung [Tek16].

Die in den Versuchsreihen der vorliegenden Arbeit eingesetzten Druckmessfolien sind die des Typs *Pressure Mapping Sensor 5101*, in der Ausführung *3000 psi*. Das heißt, dass der Druckbereich des Sensors lediglich bis 3000 psi, also circa 207 bar, reicht. Der Bereich

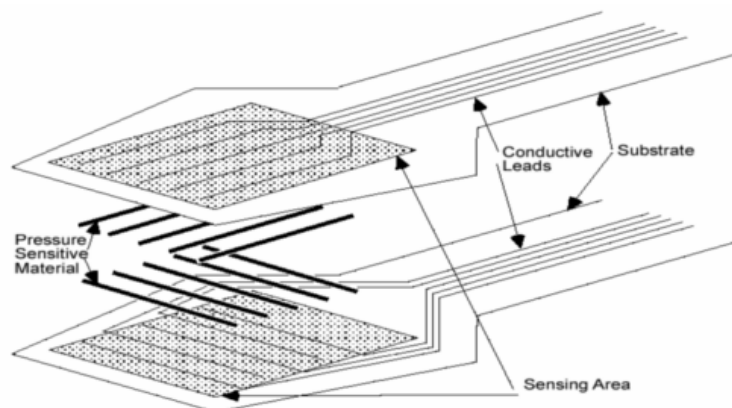


Abbildung 1: Aufbau einer TekScan-Druckmessfolie [Gmb]

der Sensorfolie in dem die Druckmessung stattfindet besteht aus einer Leiterbahnmatrix mit 44 Zeilen und 44 Spalten. Auf einer quadratischen Grundfläche mit der Seitenlänge 111.8 mm entstehen 1936 Sensorzellen. Somit ergeben sich 15.5 1/cm^2 Zellen.

Vor dem tatsächlichen Einsatz des I-Scan-Systems gilt es die herstellerseitig erteilten Empfehlungen zur Prekonditionierung, Equilibrierung und Kalibrierung zu befolgen. Diese Arbeitsschritte dienen der Erzeugung präziser Messergebnisse [Tek16].

Zunächst erfolgt die Prekonditionierung. Dabei wird die gesamte Fläche des Sensorbereichs mit einem gleichmäßigen hydrostatischen Druck belastet, der deutlich über dem Druckbetrag der durchzuführenden Versuchsreihen liegt. Für die Versuchsreihen dieser Arbeit wurden die Folien mit 400 bar hydrostatischem Druck prekonditioniert. Der Zweck der Prekonditionierung ist die Minimierung von Drift- und Hystereseeffekten des Sensors. Es wird die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse verbessert [Tek16].

Abbildung 2 (a) zeigt, dass der farbliche Anzeigebereich keine gleichmäßige Farbausgabe liefert. Die Farbgebung basiert auf den Werten des Digital Outputs. Lokale Unterschiede sind erkennbar. Eine genäherte Normalverteilung der Werte des Digital Outputs der Abbildung 2 (a) wird in Abbildung 2 (b) gezeigt.

Die Abweichungen beruhen auf geringen, fertigungsbedingten Anomalien des Sensorzellenaufbaus, sowie auf internen Setzeffekten, die aus gegebenenfalls häufiger Nutzung einer Druckmessfolie resultiert. Derartige Einflüsse werden als innere Störeinflüsse bezeichnet.

Leitfähige Verunreinigungen, zum Beispiel Kondenswasser auf der Folienoberfläche, aber auch Luft einschüsse zwischen Druckmedium und Folie zählen zu den äußeren Störeinflüssen [PP97]. Praktisch sollten, auf Grund der uniformen hydrostatischen Druckbelastung der Folie, keine farblichen Abweichungen im grafischen Anzeigebereich erkennbar sein. Allerdings können Störungen, die durch den Aufbau der Druckkammer bedingt sind nicht ausgeschlossen werden. Als Beispiel dafür sei eine ungleichmäßige Ausdehnung der Kapton-Folien im Belastungsfall innerhalb der Druckkammer genannt. Um diese Abweichungen der digitalen Messwerte auszugleichen bedarf es der Equilibrierung der Messwerte, beziehungsweise des Sensors. Wie in Abbildung 2 zu erkennen, ist die grafische Messanzeige nicht gleichförmig. Ein Mittelwert des Digital Outputs ist von abweichenden Messwerten umgeben.

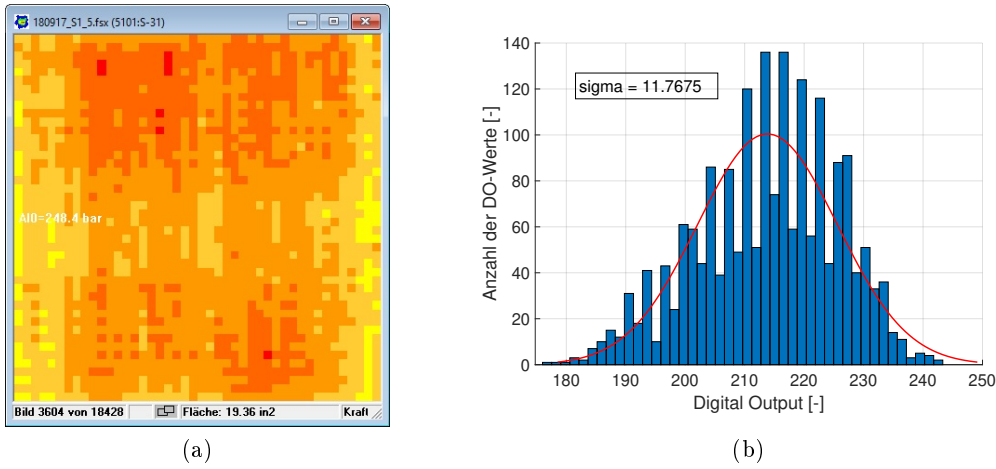


Abbildung 2: *Beispielhafte Ausgabe der I-Scan-Software bei 248.4 bar Druckbelastung (a). Histogramm desselben Messframes mit Normalverteilungsfitt und Standardabweichung sigma (b). Mittlerer DO = 213.83.*

Bei der Equilibrierung, werden die einzelnen, angezeigten Digital Outputs jeder Sensorzelle dem durchschnittlichen Digital Output angepasst. Je nach Abweichung vom Mittelwert des Digital Output der gesamten Messanzeige wird für jeden Matrixeintrag ein Faktor ermittelt. Es ergibt sich eine Equilibriermatrix ($C_{m,n}$), die sich aus elementweiser Division der Digital-Output-Matrix ($DO_{m,n}$) ergibt, von der jeder Matrixeintrag gleich dem Betrag des mittleren Digital Outputs ist.

$$C_{m,n} = DO_{mean} \cdot DO_{m,n}^{-1} \quad (1)$$

Ziel ist die Minimierung der Abweichung des Digital Outputs vom Durchschnitts-Output. In der genäherten Normalverteilung liefe die Standardabweichung dann gegen 0. Die Ermittlung einer Faktormatrix erfolgt für jeden Messframe.

Die TekScan-Software liefert ein Equilibrierungstool, welches innerhalb des gemessenen Druckintervalls auf bis zu 10 äquidistanten Punkten eine Equilibrierung durchführt. Die Equilibrierung anhand einer Einzellast, also nur anhand eines Druckwertes der für spätere Analysen bedeutend ist, wird als Einzellastequilibrierung (*Single-Load Equilibration*) bezeichnet. Sobald mehr Druckwerte genutzt werden handelt es sich um eine Multilastequilibrierung (*Multi-Load Equilibration*) [Tek16].

Zuletzt erfolgt die Kalibrierung des I-Scan-Systems. Verschiedene äußere Einflüsse besitzen ungleich starke Auswirkungen auf die Messdatenausgabe des Systems, beziehungsweise auf das Sensorverhalten. Das Verhältnis von Druck und dem resultierenden, elektrischen Widerstand einer Sensorzelle ist nichtlinear. Damit ist auch das Verhältnis von Druck in Digital Output nichtlinear. Auch die im Versuch eingesetzten Materialien (vgl. Abbildung 3), der umgebende Versuchsaufbau und die Temperatur der Sensorfolie beeinflussen die Messergebnisse. Ebenso beeinflusst die Anzahl der erfolgten Nutzungen einer Sensorfolie und der Druckbelastungsgradient die Messung. Um aus der grafischen, farblich skalierten Messanzeige der I-Scan-Software, der pro Sensorzelle ein bestimmter

8-Bit-Wert zugrunde liegt, Rückschlüsse auf den vorliegenden Druck zu ziehen, wird pro Messframe der gesamte Digital Output mit dem simultan gemessenen Druck verglichen. Bei grafischen Aufbereitung der Relation von Druck und Digital Output werden die sich ergebenden Graphen approximiert, sodass die Kurvenverläufe mit mathematischen Ansätzen beschreibbar sind (vgl. Abbildung 4).

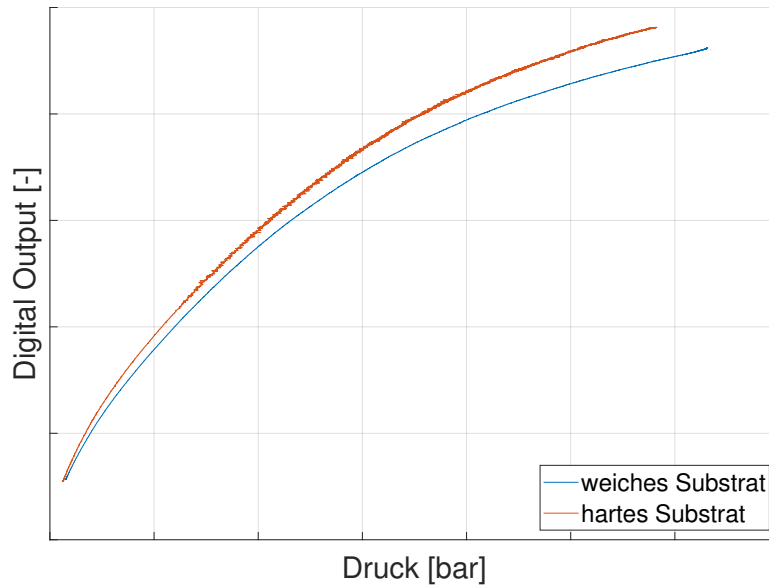


Abbildung 3: *Schema des Einflusses des Materials unter der Sensorfolie.*

Durch die Anzahl der Einflüsse auf das Messsystem ergibt sich eine Vielzahl von Versuchsszenarien. Das komplexe Sensorverhalten bedingt somit die Notwendigkeit einer spezifischen Kalibrierfunktion für jedes einzelne Versuchsszenario.

TekScan empfiehlt zur Näherung des durch Messungen ermittelten Druck-Digital-Output-Graphens, der das Sensorverhalten abbildet, zwei Ansätze: einen linearen Ansatz (Gleichung 2), sowie einen Potenz-Ansatz (Gleichung 3). Der lineare Ansatz erfordert mindestens einen Druckwert, anhand dessen eine Kalibrierung durchgeführt wird. Der Potenz-Ansatz erfordert mindestens 2 Kalibrierpunkte, um den Faktor a , sowie die Potenz b zu bestimmen [Tek16]. Neben diesen beiden Ansätzen wurden auch polynomische Ansätze untersucht. Die Näherungsfunktionen wurden anhand von bis zu 10 Messpunkten ermittelt und zeigten ähnlich gute Näherungen zu den tatsächlichen Messwerten wie der Potenz-Ansatz [BWH⁺09]. Im Gegensatz zum ein- und mehrstufigen Kalibrieren wird in der vorliegenden Arbeit zu jeder Messaufnahme des TekScan-Systems der Druck auf der Sensorfolie gemessen und zur Kalibrierung verwendet.

$$p(DO) = a \cdot DO_{mean} \quad (2)$$

$$p(DO) = a \cdot DO_{mean}^b \quad (3)$$

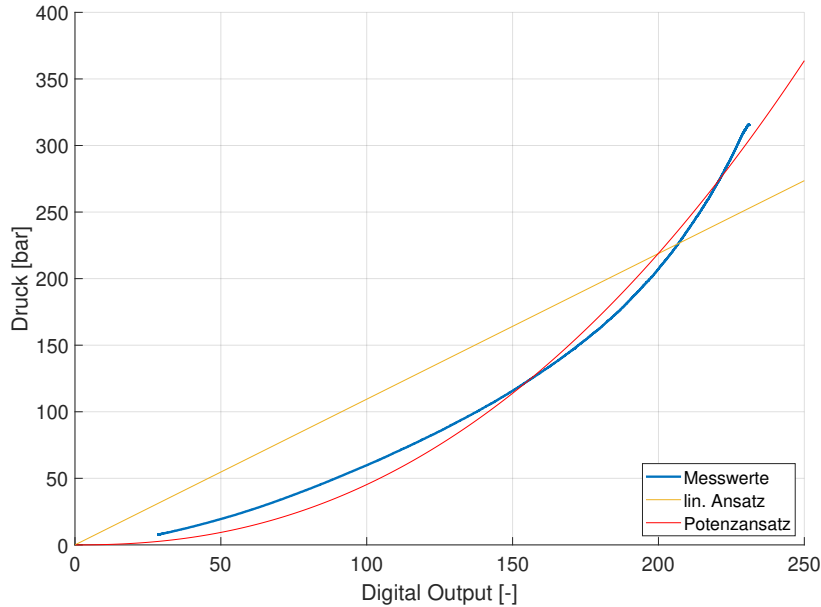


Abbildung 4: Schematische Darstellung verschiedener Ansätze zur Näherung der Messdaten.

Unter Berücksichtigung der Equilibrierungsgleichung 1 ergibt sich folgende Gleichung für Kalibrierung und Equilibrierung:

$$p(DO) = a(C_{m,n} \cdot DO_{m,n})^b \quad (4)$$

Für die Ermittlung der Näherungsfunktionen der Messdaten bietet MATLAB zwei Verfahren an. Neben dem standardmäßig eingestellten Trust-Region-Verfahren, kann auch das Levenberg-Marquardt-Verfahren zur Erstellung der Näherungsfunktionen genutzt werden, basierend auf den Messdaten. Die Verfahren zählen zu den numerischen nichtlinearen Optimierungsverfahren. Die endlich dimensionale kontinuierliche Optimierung dient der Minimierung von Abweichungen bestimmter stetiger Zielfunktionen von bestehenden Daten mittels Ermittlung optimaler Zielfunktionsparameter [Ste18].

Das Levenberg-Marquardt-Verfahren ist ein iteratives Standardverfahren der Optimierung. Es basiert auf der Methode der kleinsten Quadrate (*engl. least squares, kurz LS*) und nutzt die Gauss-Newton-Methode zur Konvergenz des Minimums der Zielfunktion [Lou05].

Das Trust-Region-Verfahren ist ebenfalls ein iteratives Verfahren, das dem Levenberg-Marquardt-Verfahren ähnelt. Es minimiert ein nichtlineares Optimierungsproblem, wo-

bei die Zielfunktion innerhalb eines bestimmten Gebietes um einen Iterationspunkt durch eine einfacher zu minimierende Modellfunktion genähert wird [Kai08].

Charakteristisch für die Methoden der kleinsten Quadrate ist die iterative Anpassung von Kurvenparametern, sodass Summe der quadratischen Abweichungen, auch Residuen genannt, der Kurve von den zu nähernden Daten minimiert wird.

Die Residuen werden mittels euklidischer Norm ermittelt und x als Lösung des Minimierungsproblems bestimmt. Der in diesem Fall physikalische Vorgang liefert die Eingangsgröße u , auf die eine Systemantwort y , das Messergebnis, folgt. $g(u, x)$ ist ein parameterabhängiger Ansatz, beziehungsweise die Zielfunktion:

$$\min \sum_{i=1}^n ||y_i - g(u_i, x)||^2 \quad (5)$$

Im vorliegenden Fall ist der Potenzansatz samt seiner Parameter a und b so zu optimieren, dass die Residuen resultierende Zielfunktion möglichst wenig von den untersuchten Messdaten abweichen.

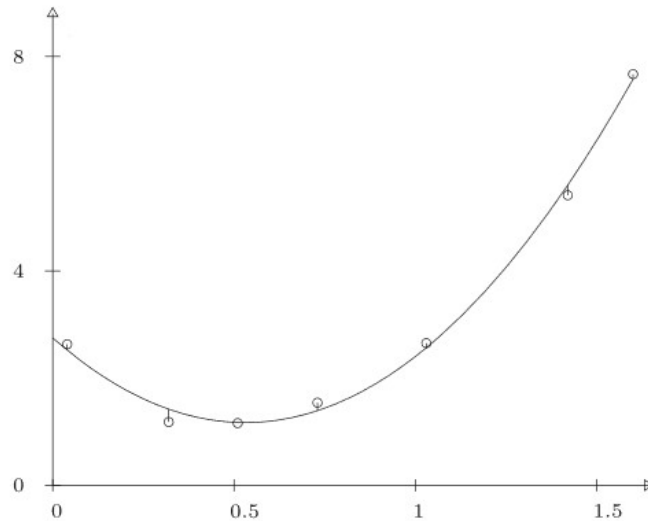


Abbildung 5: Schematische Darstellung einer Datenreihe (Kreise), dessen Kurven-Fittings und entsprechenden Residuen [UU12, S.7]

Für Versuche in denen hohe Druckbeträge (>50 bar) auf der Sensorfolie lasten, wird auf Grund auftretender Nichtlinearitäten der Potenz-Ansatz empfohlen [Tek16].

Bisherige Untersuchungen in der Geotechnik analysierten des Verhalten des I-Scan-Systems mit granularem Material [PH97] oder Sand als Druckmedium [GW13], um möglichst gleichförmig verteilte Druckbelastungen zu erzeugen. Charakteristisch sind bei diesen Versuchsreihen allerdings vergleichsweise niedrige Druckbelastungen und eine geringe Sensordrift, sodass die kalibrierten Ergebnisse wenig Aussagekraft für Anwendungen mit höheren Belastungen besitzen. Um das Sensorverhalten bei größeren Druckbelastungen, die im Bereich der Gelenkprothetik auftreten, zu untersuchen, wurden Versuche mit hydrostatischen Belastungen (bis 200 bar) durchgeführt [OBC99].

3 Versuchsaufbau und -ablauf

In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau, sowie die Abläufe und eingestellten Parameter aller durchgeführten Versuche erläutert.

Um das charakteristische Verhalten der Sensorfolie zu untersuchen, bedarf es in allen Versuchsdurchführungen einer gleichmäßig über die Sensorfläche verteilten, reproduzierbaren Belastung der Folie. Speziell über das Verhalten des Messsystems bei hohen Druckbelastungen von bis zu 300 bar, dem Einfluss der Temperatur sowie bei verschiedenen Belastungsgeschwindigkeiten, sollen Erkenntnisse erlangt werden. Auch der Einfluss der Nutzungsanzahl einer Sensorfolie wird untersucht. Aus diesen Umständen resultieren verschiedene Versuchsabläufe, die zur quantitativen und qualitativen Ermittlung des Sensorverhaltens als Antwort auf die erwähnten Einflüsse dienen.

Betragsmäßig große und gleichförmige Druckbelastungen werden erzeugt, indem die Sensorfolie mit einem hydrostatischen Druck belastet wird. Die Sensorfolie befindet sich in einer eigens konzipierten Stahlkammer. Alle der zum Einsatz kommenden Druckbelastungsfunktionen sind trapezförmig. Maßgeblich hierfür ist ein kraftgesteuerter Zylinder, der auf einen druckkammerseitig angeschlossenen, einfach wirkenden Zylinder die Kraftfunktionen überträgt. Es resultiert also eine von der Kraftfunktion abhängige Druckbelastung im Messsystem. Die erreichte Kraft bleibt stets 10 Sekunden konstant bis der Zylinder mit der gleichen, nun aber negativen Kraftrate den Betrag der wirkenden Kraft verringert. Somit entstehen die trapezförmigen Kraftfunktionen (siehe Abbildung 6).

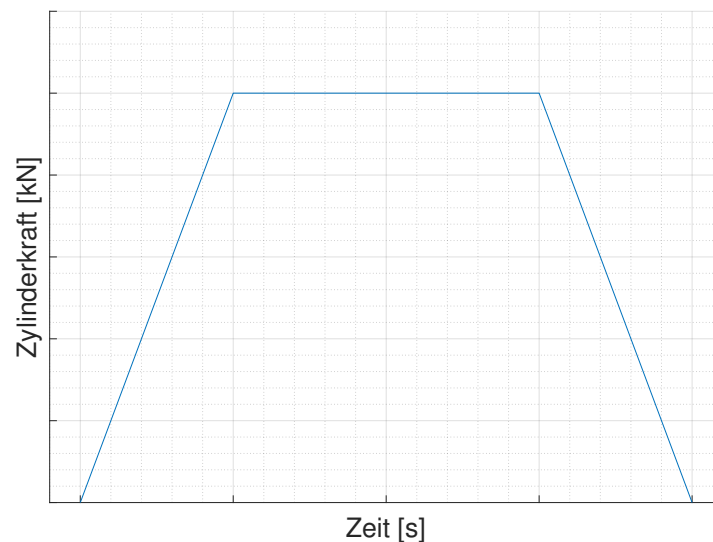


Abbildung 6: *Schema der in allen Versuchen genutzten, trapezförmigen Kraftfunktion des kraftgesteuerten Hydraulikzylinders.*

3.1 Versuchsaufbau

Das zentrale Element der Versuche ist, neben der Druckmessfolie, die der kraftgesteuerte Hydraulikzylinder (Pos. 1 in Abbildung 7). Er verursacht die Druckbelastung innerhalb des hydraulischen Systems und befindet sich außerhalb des Kühlcontainers. In der Zylindersteuerung lassen sich die maximal aufzubringende Kraft des Zylinders, sowie der genaue zeitliche Verlauf der Kraftfunktion festlegen.

Die Kraft dieses Zylinders wird auf einen einfach wirkenden Zylinder übertragen (siehe Abbildung 9 (a), Pos. 2 in Abbildung 7). Durch die Krafteinwirkung auf den einfach wirkenden Zylinder steht das Hydraulikfluid unter Druck. Die Druckfunktion innerhalb des Druckkammersystems hängt somit unmittelbar von der Kraftfunktion des kraftgesteuerten Hydraulikzylinders ab. Die Kompressibilität und die Strömungsverluste des Hydraulikfluids, geringe Leckagen, die Reibung innerhalb der Zylinder und die Elastizität von eingesetzten Bauteilen sind dabei innere Störeinflüsse auf eine präzise Signal-, beziehungsweise Kraftübertragung. Der Kammerdruck wird mittels Drucksensor (Pos. 4, Typ: Hydac HDA 4800 400 bar) aufgezeichnet.

Desweiteren ist dem System eine Handpumpe (Pos. 3) zuschaltbar. Mit der Pumpe kann dem System aus dem dazugehörigen Reservoir Hydraulikfluid zugeführt werden, sodass der einfach wirkende Zylinder im unbelasteten Zustand ausgefahren werden kann. Durch hydraulische Leitungen, die den Druck übertragen, sind die eingesetzten Komponenten verbunden. Ein einfaches Umstecken der Schlauchverbindungen ermöglicht

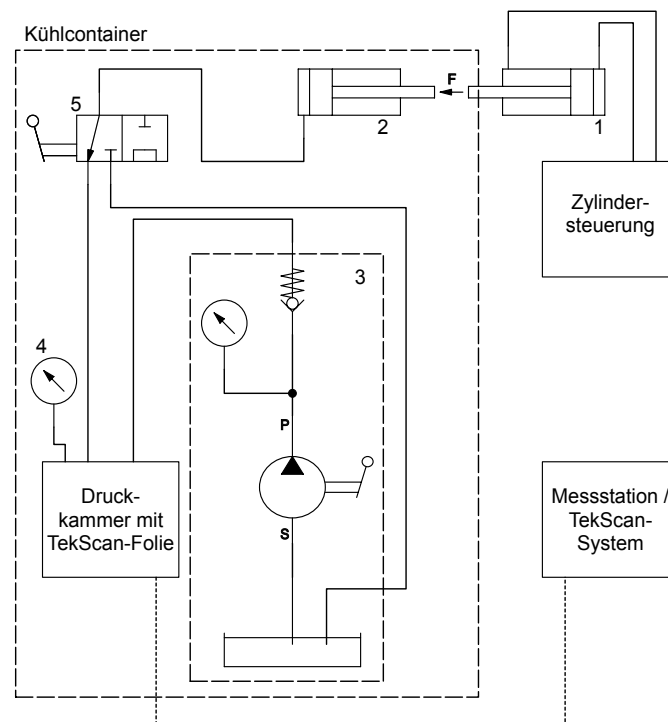


Abbildung 7: Schematisches Hydraulikschaltbild des Versuchsaufbaus.

die Bildung eines Kreislaufs, durch den die Druckkammer entlüftet werden kann. Die Schaltung des Kreislaufes wird durch Position 5 in Abbildung 7, einem 3/2-Wegeventil, verdeutlicht.

Der detaillierte Aufbau der Druckkammer wird in Abbildung 8 (a) und (b) dargestellt. Den oberen und unteren Deckel des Druckgehäuses bildet jeweils eine Stahlplatte. Die untere Stahlplatte verfügt über eine kreisrunde Einfräsung, die später als Druckkammer fungiert. Die Einfräsung hat eine konvexe Form, um die Kammer entlüften zu können sobald die Anordnung nach oben gedreht wird. Es gibt auf der konvexen Fläche drei in Reihe angeordnete Bohrungen. Davon dient eine dem Zugang eines Druckmessensors. Die anderen beiden Bohrungen dienen dem Zu- und Abfluss des Hydraulikfluids, beziehungsweise der Entlüftung der Druckkammer.

Auf der unteren Stahlplatte wird eine Polyimidfolie des Typs *DuPont Kapton 500HN* platziert. Radial um die Einfräsung befindet sich ein O-Ring, der den Spalt zwischen Stahlplatte und dieser Polyimidfolie gegen austretendes Hydraulikfluid abdichtet. Wächst der Druck in der Kammer an, kann sich die Polyimidfolie ausdehnen, sodass der hydrostatische Druck die Sensorfolie belastet.

Es folgt ein Kreisring aus Stahl, auf dem eine weitere Polyimidfolie festgeklebt ist. Um die Beschädigung der sich ausdehnenden Folie zu vermeiden ist die untere Kante des Innenrings gefast. Im Bereich zwischen der oberen Kante des Innenringes und der darauf geklebten Folie befindet sich, ebenfalls zum Schutz der sich ausdehnenden Folie, eine große Klebenaht (*Sikaflex-296*, Polyurethanbasis), siehe dreieckige Schnittfläche in Abbildung 8 (b). Sie bildet quasi eine Fase zwischen dem Innenring des stählernen Kreisrings und der Folie. Diese Folie ist an 2 Stellen gelocht. Die Löcher ermöglichen das Entweichen von Luft, die von durch die sich ausdehnende Folie verdrängt wird und verhindert so die Bildung von Luftpneumatischen Einschlüssen. Ein Detail des Stahlringes ist eine radial verlaufende Einfräsung im Bereich des Kreisringes, der sich mit dem nach außen gerichteten Teil der Sensorfolie überdeckt. Die Fräsung verhindert die Beschädigung des Teils der TekScan-Folie, die aus der Kammer hinausragt, durch den O-Ring, der ansonsten diesen Folienteil abschneiden würde.

Die TekScan-Folie liegt auf der geklebten Polyimidfolie. Sie wird so platziert, dass der für die Messung verantwortliche Bereich der quadratisch angeordneten Messzellen sich im Zentrum der kreisrunden Druckkammer befindet. Damit elektrische Wechselwirkungen im direkten Kontakt zwischen der oberen Stahlplatte und der Sensorfolie ausgeschlossen werden können, wird zwischen beiden eine weitere Polyimidfolie platziert.

Die obere Stahlplatte besitzt an 2 gegenüberliegenden, außenliegenden Seiten jeweils eine horizontale Bohrung. Sie bilden eine Drehachse, um 180 Grad Schwenkung zu ermöglichen. Durch die Möglichkeit des Schwenkens wird die Entlüftung der Druckkammer über die Bohrung im Zentrum der elliptischen Druckkammer ermöglicht.

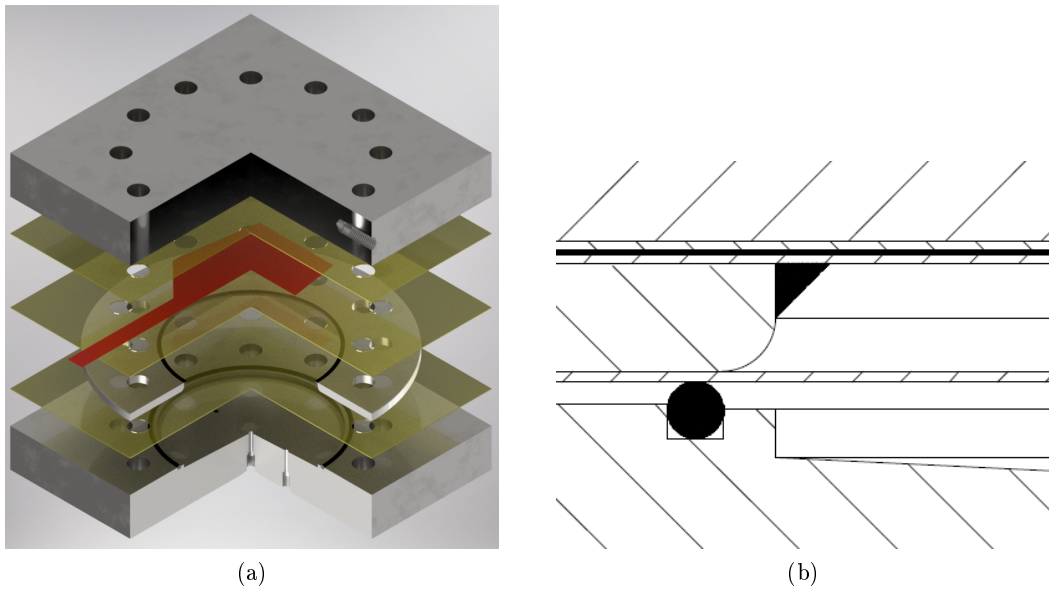


Abbildung 8: Schematischer Aufbau des Druckgehäuses (a). Detailansicht des Dichtungsbereichs (b).

Der gesamte Zusammenbau wird mit 12 radial angeordneten Durchsteckschraubverbindungen verspannt.

Die Konstruktion des Druckgehäuses ermöglicht die gleichmäßige, einseitige, hydrostatische Druckbelastung der Sensorfolie ohne direkten Kontakt zum Hydraulikfluid und ohne Leckage. Ebenso erlaubt die Konstruktion eine störungsfreie Datenübertragung der Sensorfolie ohne diese zu beschädigen.

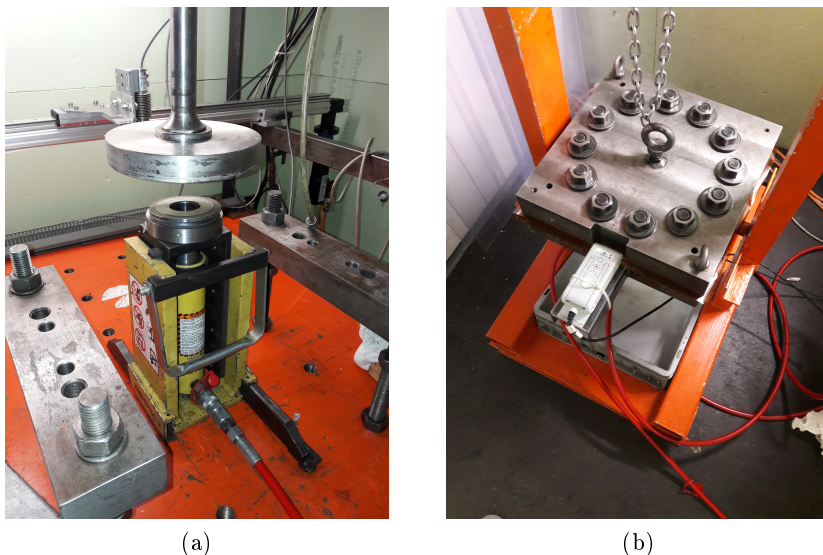


Abbildung 9: Fotos des Versuchsaufbaus: einfach wirkender Druckzylinder, darüber die Kolbenstange des kraftgesteuerten Zylinders (a) und Druckkammer (b).

Abbildung 10 zeigt den hydrostatischen Druckverlauf und den simultanen Kraftverlauf des gesteuerten Zylinders anhand der Daten der Versuchsdurchführung 1.4. Die Deckungsgleichheit beider Graphen deutet darauf hin, dass das keine offensichtlichen Verluste im System vorhanden sind, wie zum Beispiel größere Leckagen von Hydraulikflüssigkeit. Zu erwähnen ist die geringe Vorlast auf dem Hydrauliksystem, sodass der Druckbetrag im Ruhezustand der Versuchsdurchführung circa 7 bar beträgt. Ebenfalls erkennbar ist die geringe Übersteuerung der Kraftfunktion über die gewünschten 44 kN hinweg. Daraus resultiert ein Druckbetrag, der geringfügig höher ist, als die gewünschten 300 bar. Erst nach circa 7 Sekunden beträgt die Kraft 44 kN. Für die Auswertung hat der Bereich des Übersteuerns keinerlei Relevanz.

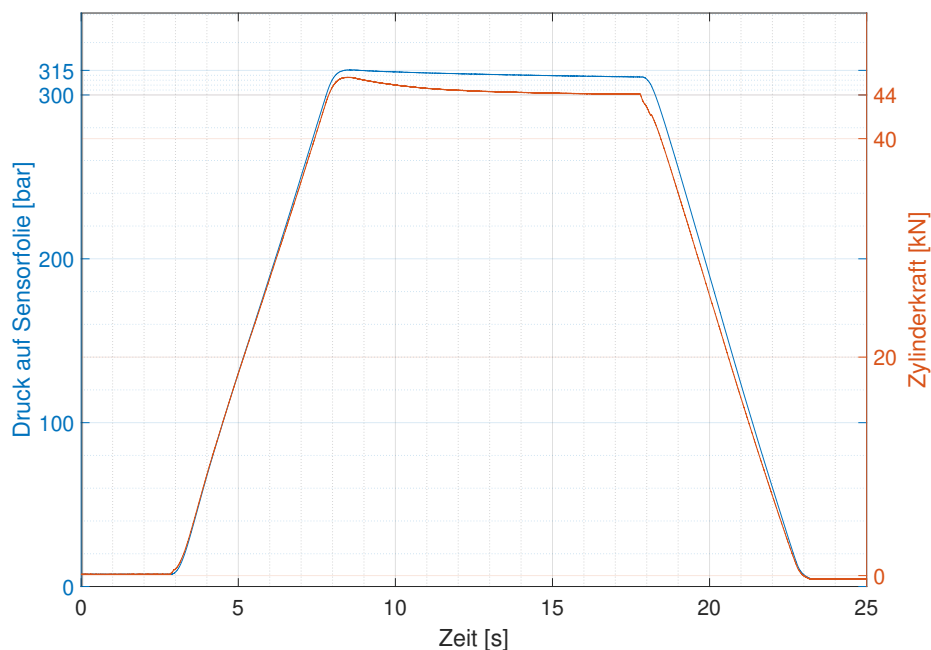


Abbildung 10: Verlauf des hydrostatischen Drucks und der Zylinderkraft. Diagramm zur Überprüfung des Versuchsstandes auf Verluste im hydraulischen System.

3.2 Pausendauer zwischen Versuchsdurchführungen

Aus zuvor testweise durchgeführten Versuchsreihen wurde deutlich, dass Versuche, die unter denselben Bedingungen in kurzen Intervallen hintereinander durchgeführt wurden, divergente Messergebnisse liefern.

Es sollen Erkenntnisse darüber erlangt werden, wie viel Zeit zwischen zwei identischen Versuchsdurchführungen liegen muss, um nacheinander zwei identische Messergebnisse zu produzieren. Dafür wird die in der Druckkammer platzierte Sensorfolie neun mal mit derselben Druckfunktion belastet. Jedoch werden die Druckbelastungen

in immer länger werdenden Zeitabständen wiederholt (siehe Tabelle 1), um zu ermitteln, ab welcher zeitlichen Dauer die Ergebnisse gleich sind. So lässt sich eine optimale Pausendauer abschätzen.

In dieser Versuchsreihe kommt eine TekScan-Druckmessfolie zum Einsatz, die bereits mehrfach mit Druck bis circa 300 bar belastet wurde. Diese Information ist für spätere die Auswertung der Ergebnisse interessant. Es sollen lediglich kurzfristige Kompressionseffekte (<1 Stunde) der Sensorfolie untersucht werden und keine Effekte, die bei wenig benutzten, neuen Sensorfolien auftauchen.

Zur Belastung in dieser Versuchsreihe wird eine Druckfunktion gewählt, wobei der Maximaldruck von circa 300 bar innerhalb von 2 Sekunden erreicht wird. Ein Kammerdruck von circa 300 bar wird erreicht, wenn der kraftgesteuerte Hydraulikzylinder mit 44 kN auf den druckkammerseitigen, einfach wirkenden Zylinder wirkt.

Tabelle 1: *Ablauf der Versuchsdurchführungen mit anschließender Pausendauer. Ende der Versuchsreihe nach Versuch Nr. 9.*

Versuchsnr.	Zylinderkraft [kN]	Pausendauer [s]
1	44	20
2	44	40
3	44	60
4	44	90
5	44	120
6	44	180
7	44	300
8	44	600
9	44	-

3.3 Mehrfache Sensornutzung

Um das Verhalten einer neuen, lediglich preconditionierten Sensorfolie zu analysieren, wird eine solche Folie für diese Versuchsreihe installiert. Es sollen Erkenntnisse über den Einfluss der Nutzungshistorie einer Sensorfolie gewonnen werden.

Es werden drei Versuchsreihen geplant, zwischen deren Durchführung jeweils mindestens 24 Stunden Zeit vergehen. Der Versuchsablauf sieht vor, dass pro Versuchsreihe jeweils 40 einzelne Druckfunktionen wiederholt werden. Zwischen den Versuchsdurchführungen liegen jeweils 30 Sekunden. Damit soll der Lebenszyklus von neuer Folie bishin zur mehrfach genutzten Sensorfolie nachempfunden werden.

Durch die vergleichsweise lange Zeit zwischen den drei Versuchsreihen kann angenommen werden, dass kurzzeitig anhaltende, innere Setzeffekte der Sensorfolie vernachlässigbar sind. Es sollen langfristige Effekte sichtbar werden.

Die Versuchsreihen 1 und 2 werden bei 20 °C durchgeführt. Für Versuchsreihe 3 wird eine verringerte Versuchstemperatur von -10 °C eingestellt, um einen Einblick auf den Temperatureinfluss auf die Messungen zu erhalten.

Um die trapezförmigen Druckbelastung zu erzeugen wird der kraftgesteuerte Hydraulikzylinder einen Kraftbetrag 44 kN, was einem Kammerdruck von 300 bar ent-

spricht, innerhalb von 2 Sekunden erreichen, hält diesen konstant für 10 Sekunden und wird binnen 2 Sekunden entlastet.

Tabelle 2: Durchgeführte Versuchsreihen zur Konditionierung des Sensors

Versuchsreihe	Temperatur [°C]	Anzahl Versuchsdurchführungen
1	20	40
2	20	40
3	-10	40

3.4 Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckvariation

Durch den Einsatz des I-Scan-Systems in der Erforschung der Stahl-Eis-Interaktion, sind die dafür typischen Einflüsse auf das Sensorverhalten zu untersuchen. Die wichtigsten zu untersuchenden Einflussfaktoren sind die Versuchstemperatur, die Kraft-, beziehungsweise Druckanstiegszeit, sowie der Druckbetrag auf der Sensorfolie.

Durch den Einsatz von Eisproben kommt es zu Temperaturveränderungen der Sensorfolie. Es werden Versuchsreihen bei 20 °C Versuchstemperatur und bei -10 °C durchgeführt.

Durch die spezifischen Stoffeigenschaften des Eises kommt es zu einem breiten Spektrum an auftretenden Drucklasten und -frequenzen auf der belasteten Struktur.

Unter Belastung zeigt Eis abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit ein duktiles oder sprödes Verhalten. Aus dieser stofflichen Eigenschaft resultieren verschiedene Belastungsfrequenzen auf die Sensorfolie und sich dahinter befindliche Struktur. Dementsprechend wurden 7 Geschwindigkeiten des Kraftanstiegs des Druckzylinders gewählt, sodass der Einfluss verschiedener Geschwindigkeiten des Druckanstiegs auf die Sensorfolie untersucht werden können.

Um das Sensorverhalten bei unterschiedlichen Druckbelastungen zu untersuchen, werden zwei maximale Druckbelastungen innerhalb der Versuche getestet. Die Kräfte des gesteuerten Zylinders werden dafür so ausgewählt, dass in der Druckkammer circa 300 bar (entspricht 44 kN) und circa 150 bar (entspricht 22 kN) erreicht werden. Für die Versuchsreihe mit 44 kN Zylinderkraft wird eine Sensitivitätseinstellung der Stärke 31 gewählt. Die Versuchsreihen mit 22 kN Zylinderkraft werden mit einer Sensitivität von 33 durchgeführt. Die Sensitivität, oder auch Messempfindlichkeit, ist dabei die Anzahl der Ziffernschritte pro Einheit der späteren Messgröße.

Aus der Variation der beschriebenen Parameter resultiert eine Anzahl von 28 verschiedenen Versuchsdurchführungen. Innerhalb der Versuchsreihen 1 bis 4 werden alle einzelnen Versuche in zufälliger Reihenfolge durchgeführt, um Einflüsse auf den Sensor zu vermeiden, die aus der chronologischen Versuchsabfolge, sortiert nach sinkender Belastungsgeschwindigkeit, entstehen könnten. Eine tabellarische Übersicht aller Versuche und den entsprechenden Parametern zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3: Übersicht der Versuchsdurchführungen zur Temperatur-, Geschwindigkeits- und Druckvariation und entsprechende Randbedingungen. Es erfolgt keine chronologische Abfolge der Versuchsdurchführungen.

Versuchsnr.	Zylinderkraft [kN]	Sens. [-]	Temp. [°C]	Zeit bis max. Kraft [s]
1.1	44	31	20	0.5
1.2	44	31	20	1
1.3	44	31	20	2
1.4	44	31	20	5
1.5	44	31	20	10
1.6	44	31	20	30
1.7	44	31	20	60
2.1	44	31	-10	0.5
2.2	44	31	-10	1
2.3	44	31	-10	2
2.4	44	31	-10	5
2.5	44	31	-10	10
2.6	44	31	-10	30
2.7	44	31	-10	60
3.1	22	33	20	0.5
3.2	22	33	20	1
3.3	22	33	20	2
3.4	22	33	20	5
3.5	22	33	20	10
3.6	22	33	20	30
3.7	22	33	20	60
4.1	22	33	-10	0.5
4.2	22	33	-10	1
4.3	22	33	-10	2
4.4	22	33	-10	5
4.5	22	33	-10	10
4.6	22	33	-10	30
4.7	22	33	-10	60

4 Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aller Versuche in Diagramm- und Tabellenform präsentiert.

Die Druckmesswerte werden unmittelbar mittels Drucksensor erfasst, während die mittleren Digital-Output-Werte Durchschnittswerte sind, die durch Bearbeitung der Rohdaten des I-Scan-Systems erzeugt werden. Bei der Datenauswahl wird lediglich die steigende Seite der trapezförmigen Druckfunktion betrachtet. Dieser Umstand bewirkt die Vernachlässigbarkeit von Hystereseeffekten. Zu jedem Zeitpunkt der Messframeaufnahme existiert ein entsprechender Druckmesswert. Ein Messframe ist die Momentaufnahme der Messanzeige des I-Scan-Systems.

Digital-Output-Frames, bei denen über 0,5% aller Sensels eine Messanzeige des maximalen 8-Bit-Wertes 255 haben, werden zur Auswertung deselektiert. Eine hohe Anzahl von maximalen Digital-Output-Werten spricht für eine Übersteuerung des Sensors. Dies macht die Messdaten unbrauchbar.

Der eingesetzte Sensortyp 5101 verfügt über 44x44 Sensels. Bei dieser Gesamtzahl an Sensorzellen müssen also mehr als 9 Sensorzellen den Wert 255 anzeigen. Ein Beispiel dafür zeigt Abbildung 11(a). Es ist keine sinnvolle Verwendung der Messwerte für eine Kalibrierung möglich [Tek16]. Es werden die Näherungsfunktionen demnach zum Teil auf Basis von Messdaten erstellt, die nicht den vollen Umfang der durchfahrenen Druckwerte umfassen.

Aus den grafischen Anzeigen in Abbildung 11 wird deutlich, dass die Sensorzellen der äußeren Ränder eine gewisse Abweichung zu zentraleren Sensorzellen aufweisen. Um einen auf die Messergebnisse negativen Einfluss der äußeren Sensorzellen zu vermeiden, werden auf allen Seiten 2 Sensorzeilen und -spalten der Datenauswertung vorenthalten.

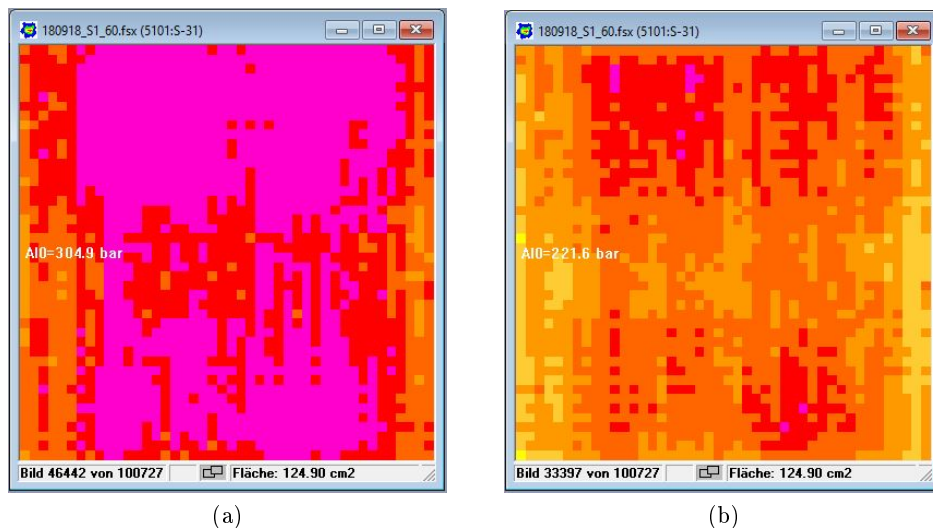


Abbildung 11: Beispielhafte Ausgabe der I-Scan-Software. Die Anzahl der Messzellen, deren Digital Output gleich 255 ist, ist für eine sinnvolle Kalibrierung zu hoch (a) und akzeptabel (b).

Desweiteren werden der Auswertung Daten vorenthalten, zu deren Zeitpunkt der Messaufnahme die Druckbelastung kleiner 20 bar ist. In den Versuchsreihen 1 und 2 werden Messdaten genutzt, die bis zu einer Druckbelastung von 29 MPa (290 bar) erfasst werden. In den Versuchsreihen 3 und 4, bei denen die Druckbelastung geringer ist, werden Daten bis zur Druckbelastung 14 MPa (140 bar) genutzt. Diese Einschränkungen der Messdatenauswahl ermöglicht eine bessere Vergleichbarkeit zwischen den Versuchsdurchführungen und sorgt zudem dafür, dass Unregelmäßigkeiten zu Beginn und Ende des Druckanstiegs im Drucksystem durch den kraftgesteuerten Zylinder keinen negativen Einfluss, zum Beispiel durch kurzzeitiges Übersteuern, auf die Auswertung haben.

In Abbildung 12 wird der selektierte Messdatenbereich grafisch dargestellt. Zunächst wird nur die steigende Seite der trapezförmigen Belastung betrachtet. Weiter werden nur Daten betrachtet, bei denen die Druckbelastung über 2 MPa (20 bar) beträgt und bei denen die Anzahl der Sensels, die einen DO von 255 anzeigen, unter 0.5% der Gesamtsenselzahl liegt. Da das 0.5%-Kriterium in zeitlicher Hinsicht vor dem 29-MPa-Kriterium eintritt, wird letzteres vernachlässigt.

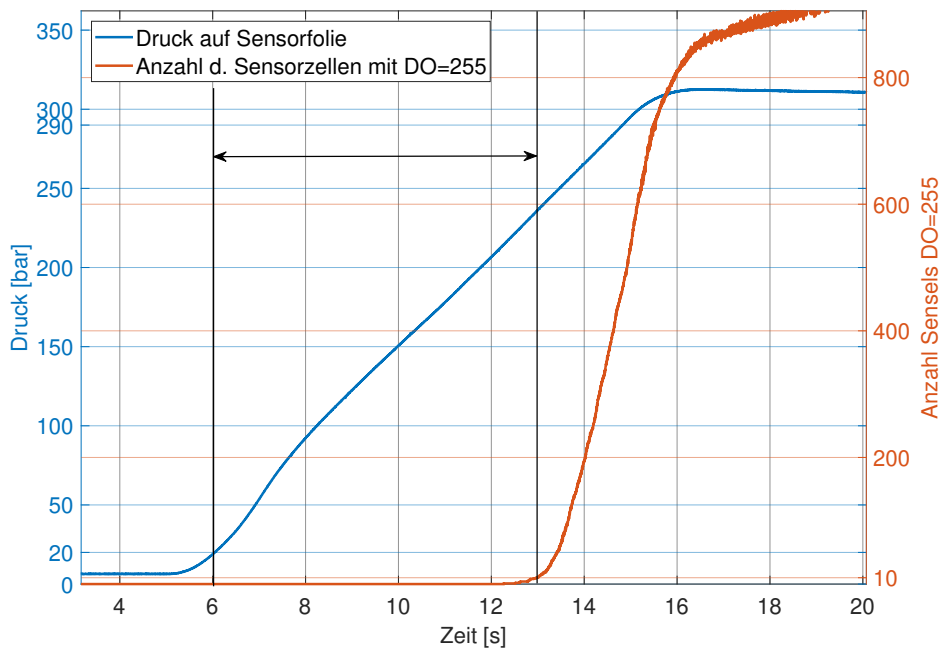


Abbildung 12: Diagramm zur Messdatenselektion (Beispiel: Versuch Nr. 2.5). Schwarz eingegrenzter Bereich: auszuwertender Datenbereich (blauer Graph). Linke Grenze: Kammerdruck >2 MPa (20 bar). Rechte Grenze: Anzahl von Sensels mit DO=255 $>0.5\%$ der Sensel-Gesamtanzahl (siehe orangenen Graphen). 29-MPa-Kriterium daher nicht relevant.

4.1 Pausenzeiten zwischen Versuchen

Abbildung 13 zeigt gemessenen Druckbetrag, wenn der mittlere Digital Output 200 beträgt. Jedem Punkt auf dem Graphen kann über die x-Achse die vorgehende Pausendauer zugeordnet werden.

Es wurden für diese Versuchsreihe 9 Versuchsdurchführungen getätigt. Es wird jeweils binnen 2 Sekunden eine Druckbelastung von circa 300 bar erreicht. Die Frequenz, in der die Versuche wiederholt wurden, wird nach jedem Versuchsdurchgang verringert, was anhand der Darstellung der Abszisse deutlich wird.

Aus Abbildung 13 geht hervor, dass das globale Minimum der Messdaten bei 180 Sekunden liegt. Tabelle 4 fasst die Messergebnisse nochmals zusammen.

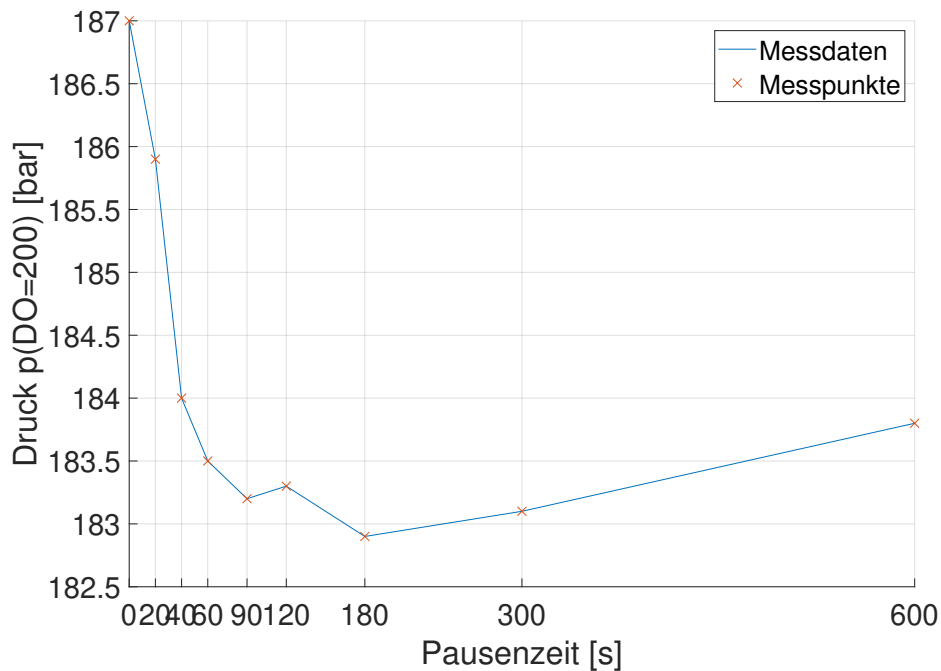


Abbildung 13: Verlauf der jeweiligen Druckausgabe beim DO200 nach jeweiliger, vorhergehender Pausenzeit

Tabelle 4: Messwerte des Drucks bei DO=200 entsprechend der vorhergehenden Pausendauer

Versuchsnr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Pausenzeit [s]	-	20	40	60	90	120	180	300	600
p(DO=200) [bar]	187	185.9	184	183.5	183.2	183.3	182.9	181.1	193.8

4.2 Einfluss mehrfacher Sensornutzung

Die drei durchgeführten Versuchsreihen liefern jeweils einen Graphen (siehe Abbildung 14). Sie stellen die Veränderung des gemessenen Druckwertes in der Druckkammer bei einem mittleren Digital-Output von 200 über der Anzahl der jeweils durchgeführten Versuche dar. Zwischen den drei Versuchsreihen lagen jeweils mehr als 24 Stunden Abstand. Zwischen den einzelnen Versuchsdurchführungen lagen jeweils circa 30-60 Sekunden, bedingt durch die Speicherung von Zwischenergebnissen.

Die zuerst durchgeführte Versuchsreihe bei 20°C Versuchstemperatur wird durch den blauen Graphen in Abbildung 14 dargestellt. Es ergibt sich ein Graph, dessen negative Steigung bei steigender Versuchsanzahl abnimmt und nach circa 15 Versuchsdurchführungen linear sinkend verläuft. Es ergibt sich kein stabiler Wert innerhalb der 40 Versuchsdurchführungen.

Die zweite, bei selber Temperatur durchgeführte Versuchsreihe wurde 3 Tage später durchgeführt. Der Verlauf des grünen Graphen ähnelt der ersten Versuchsreihe. Jedoch wird ersichtlich, dass beide Graphen eine Standardabweichung von circa 8.06 bar trennt (Verschiebung in y-Richtung).

Der türkise Graph der dritten Versuchsreihe liefert einen deutlichen Unterschied. Die Standardabweichung beträgt 29.92 bar. Es wurde für diese Versuchsreihe eine Systemtemperatur von -10°C in einem Kühlcontainer erzeugt.

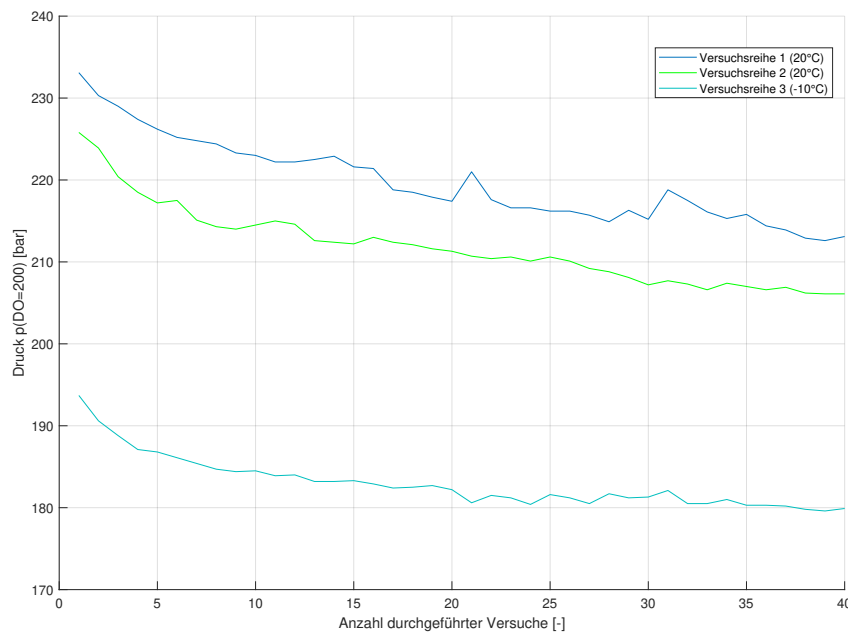


Abbildung 14: Messergebnisse der mehrfachen Belastungszyklen. Verlauf der Druckbeträge je Versuchsreihe (bei $\text{DO}=200$).

4.3 Temperatureinfluss

Um den Temperatureinfluss darzustellen, werden exemplarisch die Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4 miteinander verglichen. Abbildung 15 zeigt den gemessenen Druckverlauf über die Zeit und den Druckverlauf abhängig vom mittleren Digital Output. Das Druck-Zeit-Diagramm erlaubt einen qualitativen Vergleich der auf der Sensorfolie lastenden Druckbelastungen. Der zeitliche Verlauf der Druckbelastung auf der Sensorfolie sollte bei beiden Versuchsreihen, also bei 20 °C und bei –10 °C, idealerweise gleich sein. Je deckungsgleicher die Graphen, die quasi als Eingangssignal fungieren, desto besser sind die Ergebnisse reproduzierbar. Die Differenzen zwischen den Messergebnissen können im Idealfall lediglich auf den Temperatureinfluss zurückgeführt werden.

Abbildung 15 zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4. Aufgrund der Filterkriterien für brauchbare Messdaten werden nur Messergebnisse der –10 °C-Versuchsreihe bis circa 24 MPa ausgewertet.

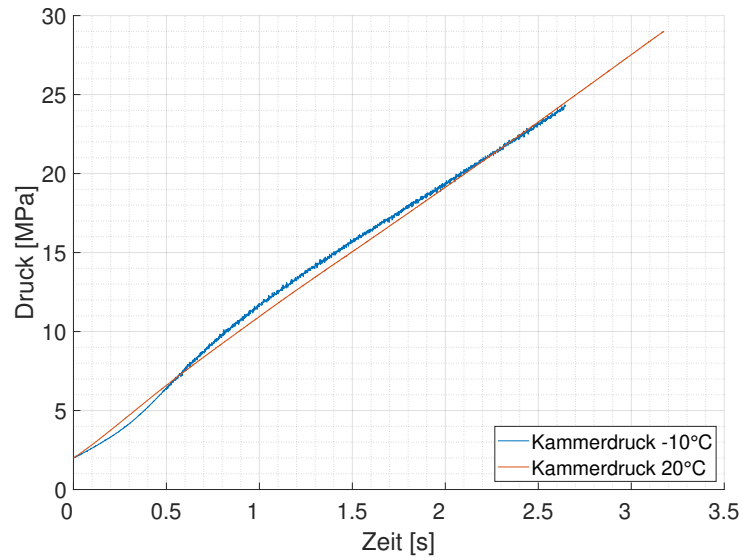
Aus dem Zeit-Druck-Diagramm, Abbildung 15 (a), wird ersichtlich, dass eine gleichartig verlaufende Druckfunktion beider Versuchsreihen nicht gänzlich gegeben ist. Der Verlauf des –10 °C-Graphen ist entgegen des Eingangssignals des kraftgesteuerten Zylinders nicht-linear. Diese Beobachtung ist bei allen Versuchsdurchführungen bei –10 °C Versuchstemperatur zu machen. Sie hat jedoch keine bemerkenswerte Auswirkung auf die Betrachtung des Verhältnisses von Digital Output und Druck.

Aus dem DO-Druck-Diagramm (b) geht hervor, dass die Graphen beider Versuchsdurchführungen nicht-linear verlaufen. Die Verläufe ähneln einer Potenzfunktion. Weiter ist erkennbar, dass bei steigendem Digital Output die Differenz beider Druckgraphen wächst. Im Diagramm verläuft die 20 °C-Druckfunktion stets über der –10 °C-Druckfunktion.

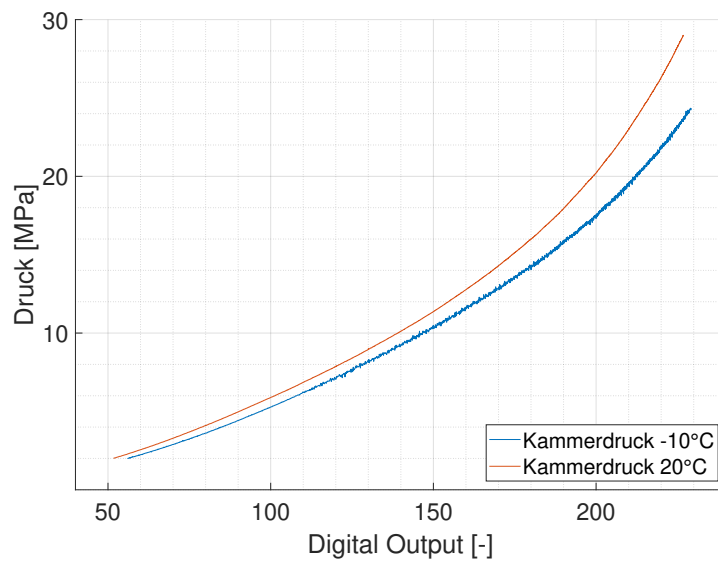
Um den Einfluss der Temperatur zu zeigen, werden im Folgenden die Druckwerte aller Versuchsdurchführungen in Tabelle 5 gegenübergestellt, bei denen das System einen Digital-Output-Betrag von 200 anzeigt. Die prozentualen Druckabnahmen bei der in den Versuchsreihen vorliegenden Temperaturabnahme liegen zwischen 13.57% und 15.37%. Die Diagramme der weiteren Versuchsergebnisse befinden sich im Anhang.

Tabelle 5: *Druckmesswerte bei DO=200 abhängig von der Versuchstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit*

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
p(DO=200) 20 °C [bar]	226.1	218.9	214.3	207.3	202.5	195.2	192.6
p(DO=200) –10 °C [bar]	193.6	189.2	185.1	178.1	174.1	167.8	163
Abname bei verr. Temp.[%]	14.37	13.57	13.63	14.09	14.02	14.04	15.37



(a)



(b)

Abbildung 15: Beispielhafte Messdiagramme der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4 (5 Sekunden Drucksteigerung, 30 MPa (300 bar) Druck) Zeit-Druck-Diagramm (a). DO-Druck-Diagramm (b).

4.4 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Um den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit abzubilden, werden exemplarisch die Versuchsdurchführungen 1.1 (0,5 Sekunden Drucksteigerung), 1.4 (5 Sekunden Drucksteigerung) und 1.7 (60 Sekunden Drucksteigerung) verglichen. Aus dem DO-Druck-Diagramm (Abbildung 16) wird deutlich, dass bei höherer Belastungsgeschwindigkeit der gemessene Druck steigt bei derselben Digital-Output-Anzeige. Dieser Effekt wird besonders mit steigendem Druck deutlich, da die Graphen hier deutlicher divergieren.

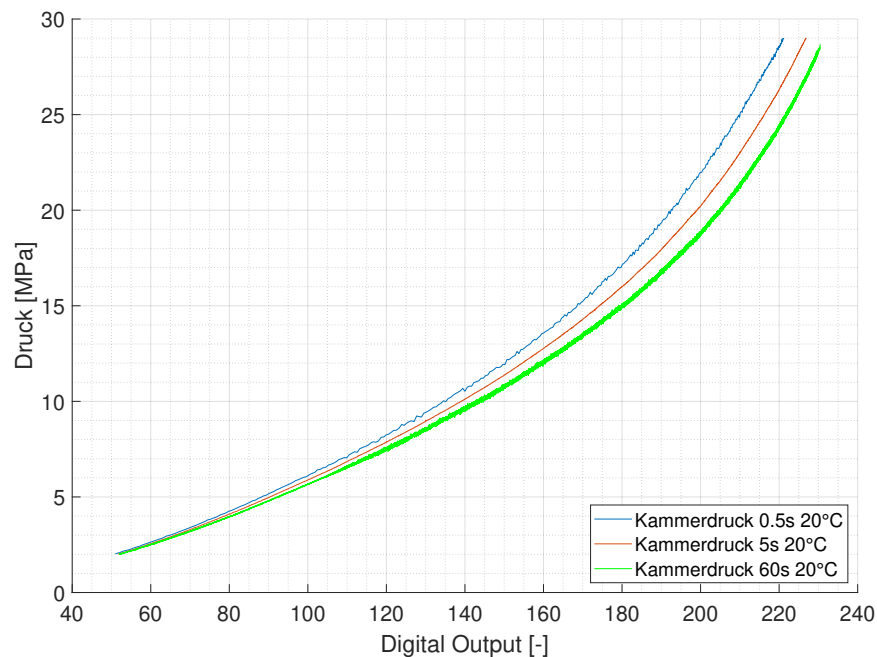


Abbildung 16: Vergleich der Druckwerte bei $DO=200$ entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit. Maximaler Kammerdruck: 300 bar.

Tabelle 6 zeigt den Vergleich der Ergebnisse bei 20°C und -10°C abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit bei einem angezeigten Digital-Output-Betrag von 200. Es wird erkennbar, dass mit geringerer Belastungsgeschwindigkeit weniger Druck benötigt wird um einen Digital Output von 200 anzuzeigen.

Tabelle 6: Druckmesswerte bei $DO=200$ abhängig von der Versuchstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
p(DO=200) 20°C [bar]	226.1	218.9	214.3	207.3	202.5	195.2	192.6
p(DO=200) -10°C [bar]	193.6	189.2	185.1	178.1	174.1	167.8	163

4.5 Einfluss von Druck und Sensitivität

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Versuchsreihen mit 22 kN Zylinderkraft (Versuchsreihe 3 und 4) präsentiert. Dies entspricht einer Druckbelastung von circa 150 bar auf der Sensorfolie. Die Sensitivitätseinstellung in der TekScan-Software wurde zuvor von 31 auf den Wert 33 erhöht. Um den Einfluss der verringerten Druckbelastung, einhergehend mit der Erhöhung der Sensitivität, auf das System zu zeigen werden die Messergebnisse mit den zuvor erlangten Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 bei 44 kN Zylinderkraft, beziehungsweise circa 300 bar Druck auf der Sensorfolie, verglichen.

Bedingt durch die Messdatenselektion werden auch bei geringerem Druck die Daten der -10°C -Versuche nur bis zu einem geringeren Druckbetrag ausgewertet, bis zu circa 12,5 MPa, als die Daten der 20°C -Versuche, die einstellungsbedingt bis 14 MPa stattfinden. Exemplarisch werden für den Vergleich die Messdaten der 5-sekündigen Drucksteigerung betrachtet.

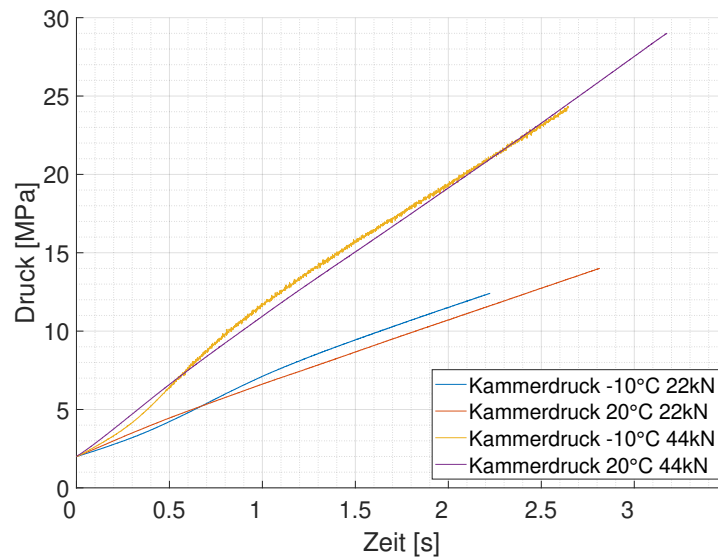
Aus dem Zeit-Druck-Diagramm in Abbildung 17 (a) geht hervor, dass der Druckanstieg bei -10°C auch bei einem geringeren Druck nicht linear über der Zeit verläuft. Der Druckanstieg bei Raumtemperatur verläuft hingegen linear, entsprechend der Einstellung des kraftgesteuerten Zylinders.

Das DO-Druck-Diagramm (b) zeigt, dass die Graphen der Versuchsdurchführung mit 22 kN Zylinderkraft weniger divergieren bei steigendem Druck. Der Temperatureinfluss ebenso deutlich, da der Graph der kalten Versuchsdurchführung unterhalb des 20°C -Graphen verläuft. Das bedeutet, dass bei geringerer Temperatur und demselben Druck ein höherer Digital-Output vom System angezeigt wird.

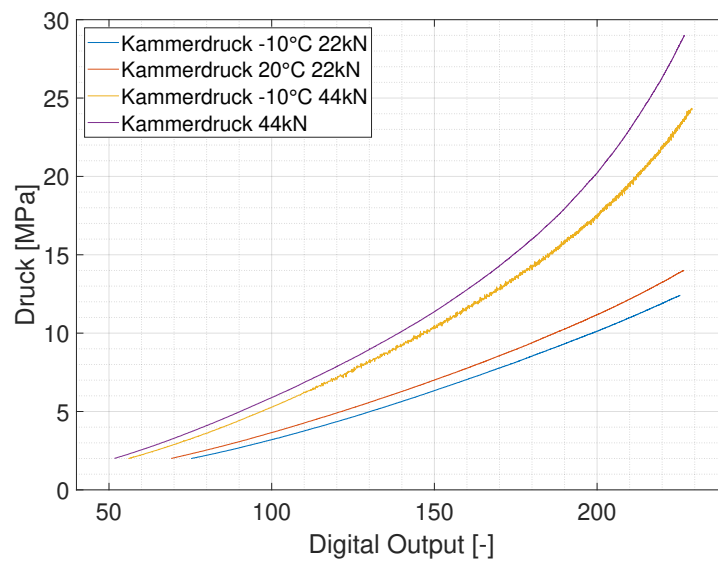
Tabelle 7 zeigt den Vergleich der Druckwerte, die pro Druckanstiegszeit bei einem angezeigten Digital-Output-Betrag von 200 gemessen wurden. Die prozentualen Abnahmen bei geringerer Versuchstemperatur liegen zwischen 8.06% und 11.34%.

Tabelle 7: *Druckmesswerte bei DO=200 abhängig von der Versuchstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit*

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
p(DO=200) 20°C [bar]	120.6	117.9	116.6	113.7	111.7	108.9	108.1
p(DO=200) -10°C [bar]	110.2	108.4	106.7	102.9	100.6	97.25	95.84
Abnahme bei verr. T. 22kN [%]	8.62	8.06	8.49	9.50	9.94	10.70	11.34
Abnahme bei verr. T. 44kN [%]	14.37	13.57	13.63	14.09	14.02	14.04	15.37



(a)



(b)

Abbildung 17: Beispielhafte Messdiagramme der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4 (5 Sekunden Drucksteigerung) Zeit-Druck-Diagramm (a). DO-Druck-Diagramm (b).

5 Auswertung und Diskussion

Um die Einflüsse auf das TekScan-System zu bestimmen, werden im Folgenden die mittleren Digital-Output-Werte, die entsprechenden gemessenen Druckwerte, sowie deren Näherungsfunktionen miteinander verglichen. Die Erkenntnisse fließen ein in die Bestimmung der Kalibrierkurven.

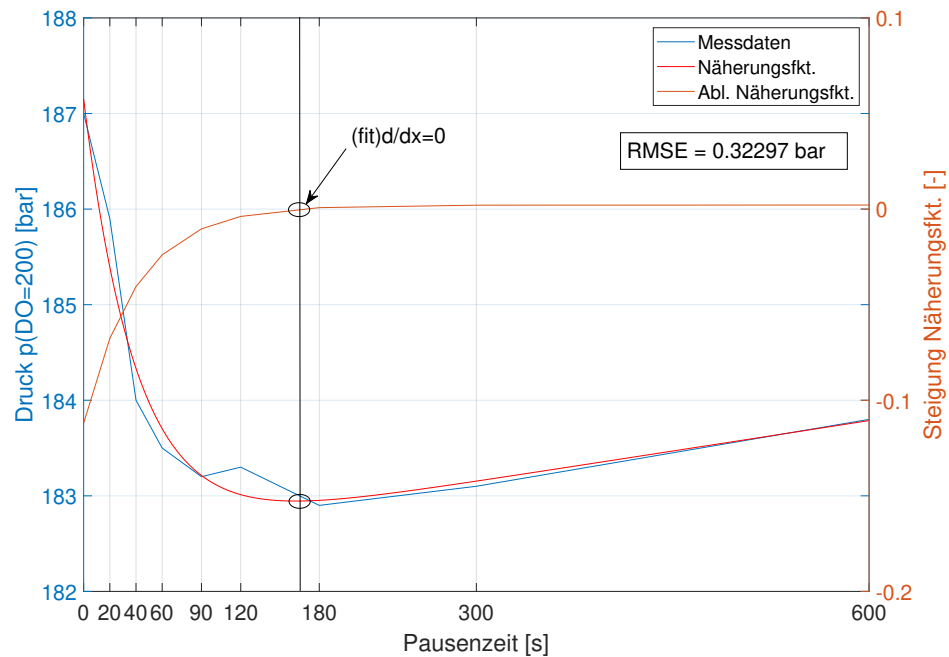
Ein Teil der Ergebnisse, der in Form von Graphen dargestellt wird, wird durch Näherungsfunktionen beschrieben. Je exakter die Übereinstimmung von Näherung und Messdaten, desto präziser lassen sich die Daten interpretieren. Um die Abweichung zwischen Näherung und Rohdaten, aber auch um die Abweichungen von zwei Näherungsfunktionen voneinander zu quantifizieren, wird in den Messergebnissen die sogenannte *Root Mean Square Error* (dt. *Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung, auch Standardabweichung*), kurz *RMSE* verwendet. Je kleiner der Betrag dieses Fehlers ist, desto exakter entspricht die Näherungsfunktion den Messergebnissen. Der RMSE-Wert beschreibt die Wurzel des arithmetische Mittel der quadrierten Abstände zwischen Näherungsfunktion und des Graphen der tatsächlichen Messwerten [BBK12]. Formel 6 zeigt die Berechnung des RMSE-Betrags s , abhängig von der Länge des genäherten Vektors n der die Messwerte enthält, sowie dem jeweiligen tatsächlichen Messwert x_m und genähertem Wert x_f :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_m - x_f)^2} \quad (6)$$

5.1 Pausenzeiten zwischen Versuchen

Die Messdaten zeigen ein globales Minimum bei 180 Sekunden. Der kurzzeitig steigende Druckwert bei 120 Sekunden ist nicht erwartbar oder erklärbar und wird als Ausreißer interpretiert. Das Minimum der genäherten Funktion liegt im Intervall 120 Sekunden bis 180 Sekunden, wie aus Abbildung 18 hervorgeht. Hieraus wird der Schluss gezogen, dass bei einer Zeitspanne von 180 Sekunden zwischen 2 Versuchsdurchführungen mit denselben Randbedingungen jeweils derselbe gemessene Druckbetrag zu erwarten ist. Aus den Ergebnissen der Versuchsdurchführungen, zwischen denen kürzere Zeitspannen liegen, wird deutlich, dass der angezeigte Druckmesswert der folgenden Versuchsdurchführung sinkt. Bei Zeitspannen deren Betrag größer als 300 Sekunden ist, wächst der Druckmesswert hingegen. Eine mögliche Erklärung für den Wiederanstieg könnte im physikalischen Vorgang des Kriechens liegen. Denn durch die geringe, aber konstante Vorlast von circa 7 bar Druck können geringe Signalveränderungen auftreten.

Sobald die Druckbelastung auf einer Sensorzelle steigt, sinkt der elektrische Widerstand der Zelle, wodurch der angezeigte Digital-Output-Wert steigt. Aufgrund dieser Eigenschaft des TekScan-Messverfahrens bestätigen die Ergebnisse in Abbildung 18 die Annahme, dass eine zeitabhängige Dekompression der Sensorzelle stattfindet. Das heißt, dass im Fall von zwei kurz aufeinanderfolgenden Druckbelastungen folgendes passiert: Während der ersten Druckbelastung findet eine Kompression der Sensorzelle statt. Durch diese Kompression sinkt der elektrische Widerstand, sodass der Digital-Output wächst. Sobald die erste Belastung endet, beginnt die Dekompression der Sensorzel-



e

Abbildung 18: Verlauf der jeweiligen Druckausgabe beim $DO=200$ nach jeweiliger Pausenzeit und Verlauf der Ableitung, Schnittpunkt mit 0 als globales Minimum verdeutlicht.

le. Doch bevor die Dekompression ausreichend stattgefunden hat, findet erneut eine Druckbelastung statt, sodass zur schlussendlichen Anzeige des Digital-Output-Wertes 200 weniger Drucklast benötigt wird, aufgrund der noch anhaltenden Kompressions-effekte der ersten Belastung. Es wird geschlussfolgert, dass sich die Sensorzellen innerhalb der Druckmessfolie binnen 180 Sekunden soweit dekomprimiert haben, dass bei zwei aufeinander folgenden Versuchsdurchführungen derselben Druckbelastung derselbe Digital-Output-Betrag vom TekScan-System angezeigt wird.

Es wird für Versuchsdurchführungen eine Zeitspanne von 180 Sekunden, beziehungsweise 3 Minuten, als Pausenzeit zwischen den Versuchsdurchführungen empfohlen.

5.2 Einfluss mehrfacher Sensornutzung

Um den Einfluss der Nutzungsanzahl der Sensorfolie auf die Messergebnisse darzustellen, wird der Druckverlauf pro Versuchsreihe sowie dessen Gradient untersucht. Die hier eingesetzte Sensorfolie ist vor Beginn der Versuchsreihe lediglich preconditioniert worden.

Versuchsreihe 1 wurde bei einer Temperatur von 20°C durchgeführt und entspricht dem blauen Graphen in Abbildung 14. Der initiale Druck beim ersten Versuch der Reihe beträgt $233,1$ bar. Nach 40 durchgeführten Versuchen beträgt der ausgegebene Druck

213.1 bar. Vergleicht man diesen Wert mit dem initialen Druck entspricht das einer Abnahme von 8.58% innerhalb der Versuchsreihe.

Der erste Druckmesswert der zweiten Versuchsreihe (grüner Graph) beträgt 225.8 bar. Damit hat sich der gemessene Druckwert unter denselben Umständen um 3.13% im Vergleich zum initialen Druck der unbenutzten Messfolie verringert. Im Verlauf der zweiten Versuchsreihe verringert sich der gemessene Druck auf 206.1 bar. Im Vergleich zum ersten gemessenen Druckwert derselben Versuchsreihe beträgt die Abnahme 8.72%. Der prinzipielle Graphenverlauf beider Versuchsreihen ist ähnlich.

Die dritte Versuchsreihe liefert einen deutlichen Unterschied. Für diese Versuchsreihe wurde eine Temperatur von -10°C in einem Kühlcontainer erzeugt. Der erste Messwert der dritten Versuchsreihe beträgt 193.7 bar. Der Wert liegt damit unter dem zuletzt gemessenen Wert der zweiten Versuchsreihe. Der letzte Druckwert der dritten Versuchsreihe beträgt 179.9 bar. Somit ist hier der gemessene Druckwert bei denselben Versuchsparametern um 7.12% gesunken.

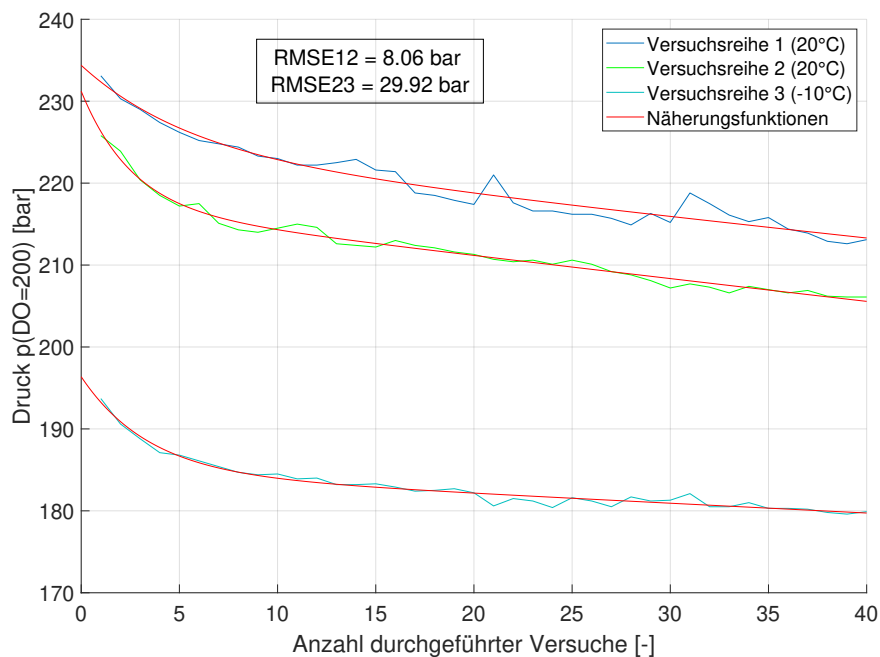


Abbildung 19: Messergebnisse der multiplen Belastungszyklen. Verlauf der Druckbeträge je Versuchsreihe (bei $DO=200$).

Tabelle 8 fasst die Veränderungen nochmals zusammen. Obwohl zwischen Versuchsreihe 1 und 2 circa 24 Stunden Unterschied lagen, werden für einen Digital-Output-Betrag von 200 des TekScan-Systems im Mittel 8.06 bar weniger Druckbelastung gebraucht. Es wird deutlich, dass neben kurzfristigen Effekten der Kompression, beziehungsweise kurzfristigen Setzeffekten der Sensorzellen auch langfristige Effekte sichtbar

werden, trotz anfänglicher Konditionierung nach Herstellervorgabe. Die betragsmäßig größere Differenz zwischen den Ergebnissen der Versuchsreihen 2 und 3 sind allerdings nicht singulär durch diese Effekte erklärbar. Auch die Versuchstemperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ beeinflusst den Messvorgang insofern, dass für einen Digital-Output-Wert von 200 ein geringerer Druck aufzubringen ist, als im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchsreihen.

Tabelle 8: *Vergleich der Versuchsdurchführungen. Prozentuale Abnahme der Druckmesswerte (versuchsreihenintern) & Abweichung der Ergebnisse zur jeweils vorherigen Versuchsreihe.*

Versuchsnr.	Druckabnahme p(DO=200)	mittl. Abw. Funktionsgraphen [bar]
1	8.58%	-
2	8.72%	8.06
3	7.12%	29.92

Die Graphen, die sich aus den 3 Messreihen ergeben, werden jeweils mit einer exponentiellen Funktion zweiten Grades approximiert. Bei der Betrachtung der drei sich ergebenden Näherungsfunktionen wird deutlich, dass die negative Steigung des Druckgraphens geringer wird jeweils bis zur zehnten Versuchsdurchführung. Zwischen dem zehnten und 40. Versuch verläuft das Gefälle dann quasi linear. In Abbildung 20 werden die Ableitungen der Näherungsfunktionen gezeigt. Mit ihnen lässt sich die Druckabnahme, beziehungsweise die Drift des Sensors präzise quantifizieren. Für Versuchsreihe 1 und 2 ergibt sich langfristig eine Abnahme von 0.3 bar Druck, der benötigt wird um den DO-Wert 200 zu erreichen pro Versuchsdurchführung. Bei der $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -Versuchsreihe 3 ist die Abnahme geringer. Sie beträgt 0.1 bar pro weiterer Versuchsdurchführung.

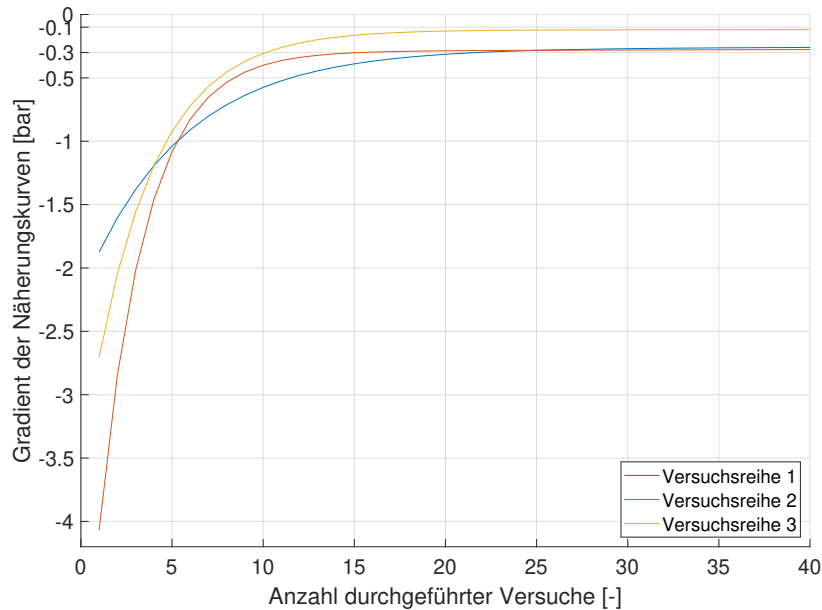


Abbildung 20: Verlauf der Druckgradienten je Versuchsreihe auf Basis der Messergebnisse der multiplen Belastungszyklen.

Neben dem geringeren Druckgradienten in Versuchsreihe 3, spricht auch die prozentuale Druckabnahme nach 40 Versuchsdurchführungen (vgl. Tabelle 8) für ein stabileres Sensorverhalten bei einer Versuchstemperatur von -10 °C . Es lässt sich schlussfolgern, dass die geringere Temperatur den Einfluss von Kompressionseffekten bei mehrfachen Belastungszyklen geringfügig verringert. Dabei wird für dieselben Digital-Output-Werte allgemein weniger Druck benötigt als bei den Versuchsreihen bei Raumtemperatur. Das spricht schlussendlich dafür, dass der elektrische Widerstand mit abnehmender Temperatur sinkt.

Für die Praxisanwendung der Messmethode bedeuten die Beobachtungen, dass trotz Prekonditionierung vor einer Messung mindestens 10 Versuchsdurchführungen gemacht werden sollten, um in einen Bereich zu kommen, in dem die Sensordrift gering ist (siehe Abbildung 20). Weiterhin ist zu beachten, dass die Anzahl der Versuchsreihen, die mit der Sensorfolie durchgeführt wurden, die Messungen insofern beeinflussen, dass weniger Druck benötigt wird, um denselben Digital Output zu erhalten. In dieser Versuchsreihe beträgt diese Differenz circa 8 bar. Auch der Einfluss der Temperaturverringerung wird erneut sichtbar. Die mittlere Abweichung beträgt hier 28.92 bar.

5.3 Temperatureinfluss

Um den Temperatureinfluss zu verdeutlichen, werden im Folgenden die genäherten Kalibrierkurven in Abbildung 21 miteinander verglichen. Die Sensitivität der Versuchsreihen hat einen dimensionslosen Betrag von 31.

Es wird deutlich, dass für die Kurven der wärmeren Versuchstemperatur bei denselben Druckanstiegszeiten stets eine höhere Druckbelastung erzeugt werden muss, um denselben Digital-Output zu erreichen. Diese Beobachtung schließt sich der Annahme an, dass bei geringeren Temperaturen und denselben Druckbelastungen größere DO-Werte erzielt werden, bedingt durch den geringeren elektrischen Widerstand der Sensorzellen. Ein geringerer elektrischer Zellenwiderstand sorgt schlussendlich für einen höheren Digital-Output-Betrag bei derselben Druckbelastung.

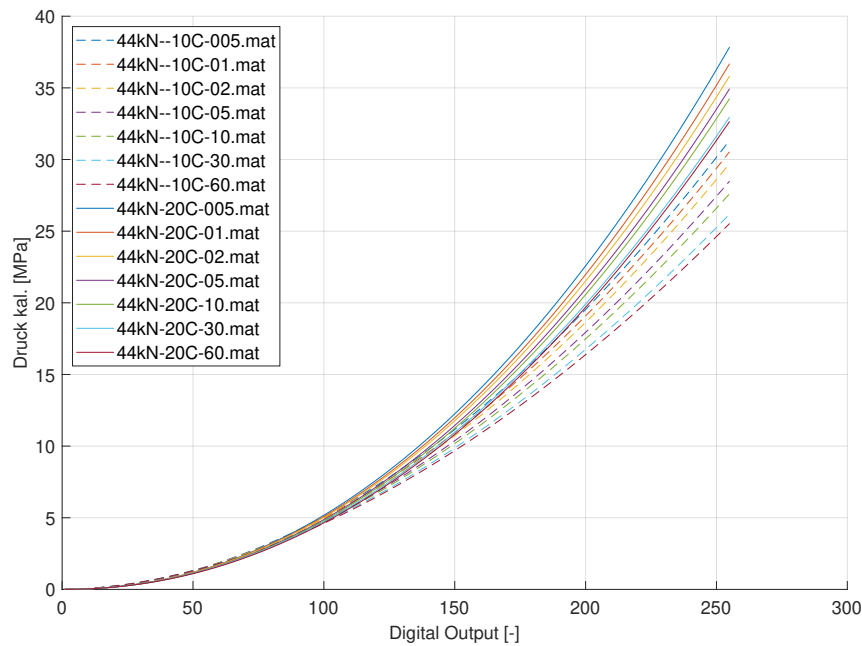


Abbildung 21: Vergleich der genäherten Kalibrierfunktionen. Versuchsreihen 1 und 2. Maximaler Kammerdruck: 300 bar.

Abbildung 22 zeigt die prozentualen Abnahmen der Druckwerte, die bei einem durchschnittlichen Digital-Output von 200 erfasst wurden. Unabhängig von der Druckanstiegszeit beträgt die prozentuale Abnahme der Messwerte bei 20 °C zu den Messwerten bei -10 °C zwischen 13.57% bei einer Druckanstiegszeit von einer Sekunde und 15.37% bei einer Druckanstiegszeit von 60 Sekunden. Die Temperaturminderung beeinflusst im vorliegenden Fall die Messdaten insofern, dass, um einen mittleren Digital-Output von 200 zu erreichen, circa 14% weniger Druck benötigt wird. Dieser Wert ist unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit.

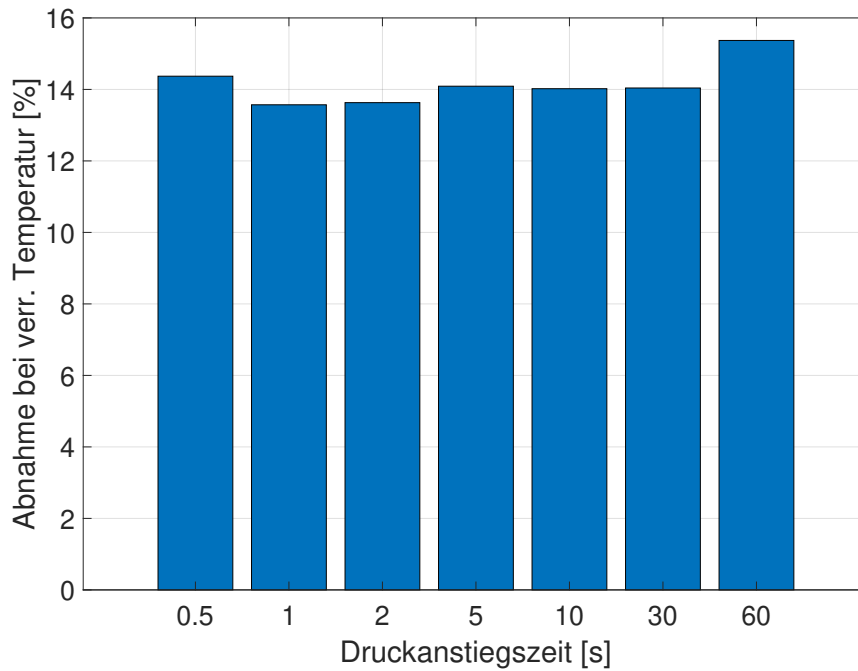


Abbildung 22: *Prozentuale Abnahme des Drucks um $DO=200$ zu erreichen, zwischen 2 Versuchen unterschiedlicher Temperatur und gleicher Druckanstiegszeit. 300 bar Kammerdruck.*

Abbildung 23 zeigt die logarithmische Darstellung der Ergebnisse aus Versuch 1.4 und 2.4. Es wird deutlich, dass unabhängig von der Versuchstemperatur der lineare Verlauf beider Druckgraphen in hohen Druckbereichen schwindet. Das bedeutet, dass die Messdaten ab einem gewissen Druckbetrag, hier circa 140 bar, nicht mehr der bisherigen Potenzfunktion folgen. Es ändert sich also das Sensorverhalten in diesem Bereich temperaturunabhängig.

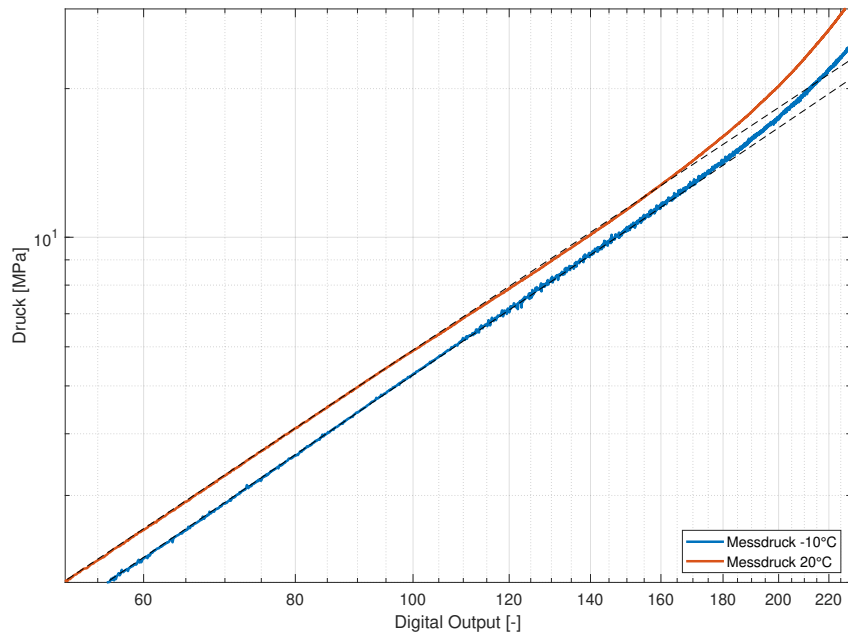


Abbildung 23: *Beispielhaftes DO-Druck-Diagramm der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4. Logarithmische Darstellung.*

Durch die kältebedingte Veränderung des elektrischen Widerstands der Sensorfolie wird bei gleichstark steigender Druckbelastung eine höhere Anzahl von Messzellen, die den maximal möglichen DO-Betrag von 255 liefern, festgestellt. Abbildung 24 zeigt die Anzahl der Messzellen, die den maximalen DO-Betrag anzeigen, abhängig vom Versuchsdruck. Als Beispiel dienen hier die Messdaten aus den Versuchsreihen 1.4 und 2.4 mit 5 Sekunden Druckanstiegszeit bis zu 300 bar Kammerdruck. Bei 300 bar Kammerdruck beträgt in der 20 °C-Versuchsdurchführung die Messzellenanzahl lediglich 10, während die Anzahl der Messzellen mit einem Digital Output von 255 in der –10 °C-Versuchsdurchführung bei rund 490 liegt.

Sobald mehr als 0,5% aller Messzellen den Maximalwert von 255 anzeigen, werden die Messergebnisse nicht zur weiteren Analyse verwendet, auf Grund der Übersteuerung des Sensors.

Demnach sind die –10 °C-Messdaten in Abbildung 24 bereits ab einem Kammerdruck von circa 240 bar nicht verwertbar. Der zu untersuchende Druckbereich soll, wie bei den Versuchsdurchführungen bei 20 °C, bei einem Kammerdruck von 290 bar enden. Somit resultieren für die –10 °C-Messdaten kürzere Kalibrier-, beziehungsweise Auswertungsbereiche, als bei 20 °C Versuchstemperatur (siehe auch Abbildung 25). Dies führt zu einer gewissen Ungenauigkeit der Kalibrierung der kalten Versuchsdaten ab dem Druckbetrag, bei dem das 0,5%-Kriterium zur Anwendung kommt (Tabelle 9).

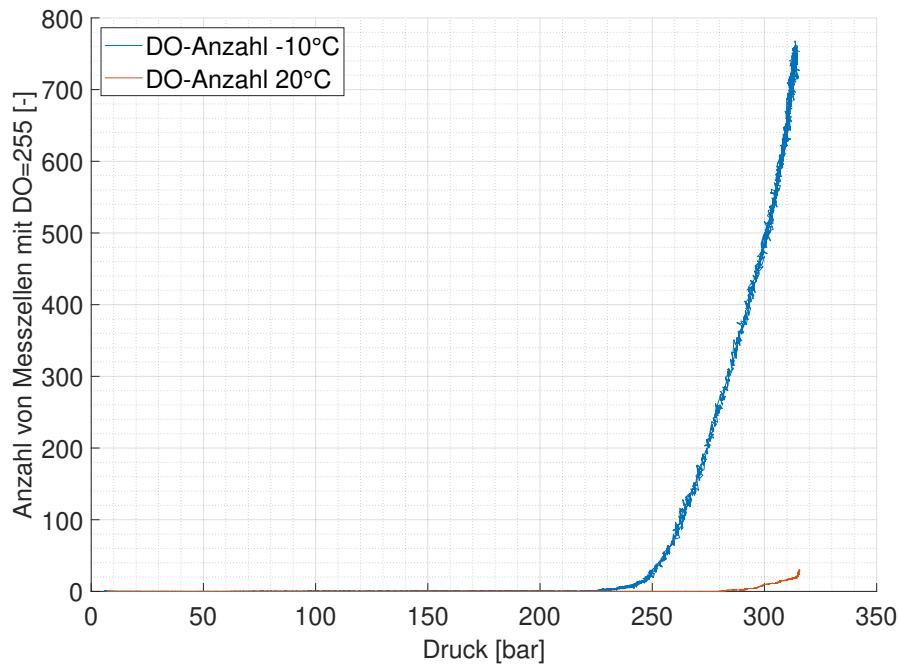


Abbildung 24: Prozentuale Abnahme des Drucks um $DO=200$ zu erreichen, entsprechend der Druckerhöhungszeit. Beispiele: Versuch 1.4 und 2.4.

Abbildung 25 zeigt die Druckbeträge, bei denen mehr als 0,5% der Messzellen ihren Maximalbetrag erreicht haben. Tabelle 9 zeigt die prozentuale Veränderungen dieser Beträge innerhalb der Versuche mit gleicher Druckerhöhungszeit. Es wird deutlich, dass bei kalter Versuchstemperatur zwischen 18.4% und 22.44% weniger Druck benötigt werden, um den Sensor übersteuern zu lassen.

Da eine Analyse der Messdaten über den gesamten Druckbereich bis 290 bar gewünscht ist, wird für zukünftig durchgeführte Messungen empfohlen, die Sensitivität zu verringern, sodass auch bei -10°C Versuchstemperatur keine Übersteuerung des Sensors in hohen Druckbereichen (>250 bar) zu beobachten ist.

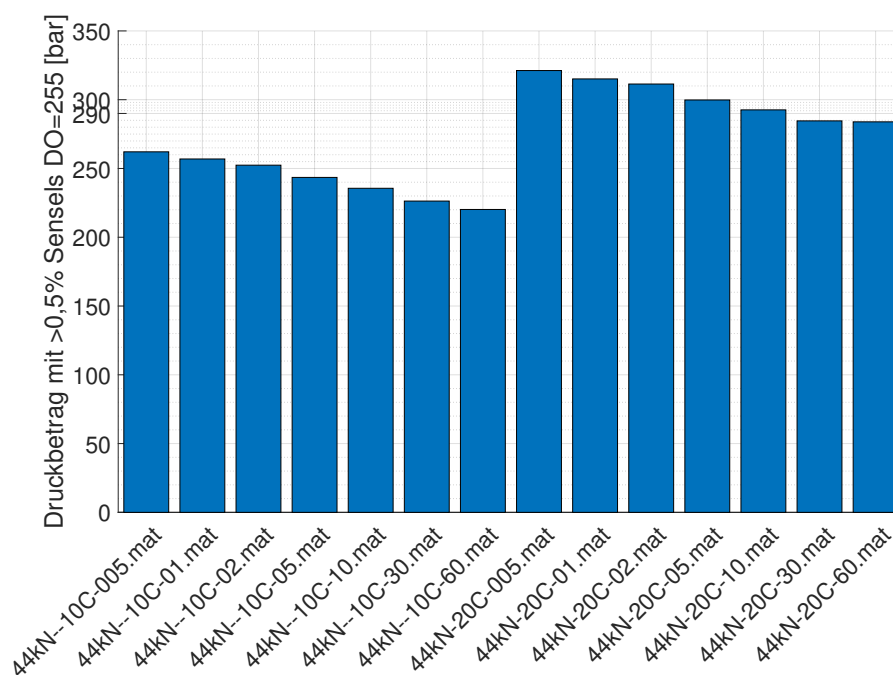


Abbildung 25: Kammerdruckbeträge, bei denen mehr als 0,5% der Messzellen den maximalen Digital Output erreichen.

Tabelle 9: Kammerdruckbeträge, bei denen mehr als 0,5% der Messzellen den maximalen Digital Output erreichen.

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
$p(n(\text{DO}=255) > 0,5\%)$ 20 °C [bar]	321.2	315.1	311.4	299.8	292.6	284.6	283.9
$p(n(\text{DO}=255) > 0,5\%)$ -10 °C [bar]	262.1	256.9	252.4	243.5	235.6	226.3	220.2
Abnahme bei verr. Temp. [%]	18.4	18.47	18.95	18.78	19.48	20.48	22.44

5.4 Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit

Die Graphen in Abbildung 26 zeigen den Verlauf der Druckwerte, die notwendig sind die Digital Outputs (50, 100, 150, 200) zu erzeugen, abhängig von der Druckanstiegszeit auf der Abszisse. Je geringer der Betrag der Druckanstiegszeit, desto höher ist die Belastungsgeschwindigkeit, beziehungsweise der Druckgradient. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit zeigt sich besonders deutlich bei hohen Druck- und DO-Werten. Je weniger linear der Verlauf eines Graphen ist, desto stärker ist dessen Einfluss. Im unteren Druckbereich, der einem DO von ungefähr 50 entspricht, verläuft der Graph nahezu konstant linear. Für einen DO von 50 werden unabhängig vom Druckgradienten circa 20 bar Kammerdruck benötigt. Im Vergleich dazu steigt der benötigte Druck, um

einen durchschnittlichen DO von 200 hervorzurufen, deutlich mit sinkendem Zeitbetrag, beziehungsweise steigender Belastungsgeschwindigkeit.

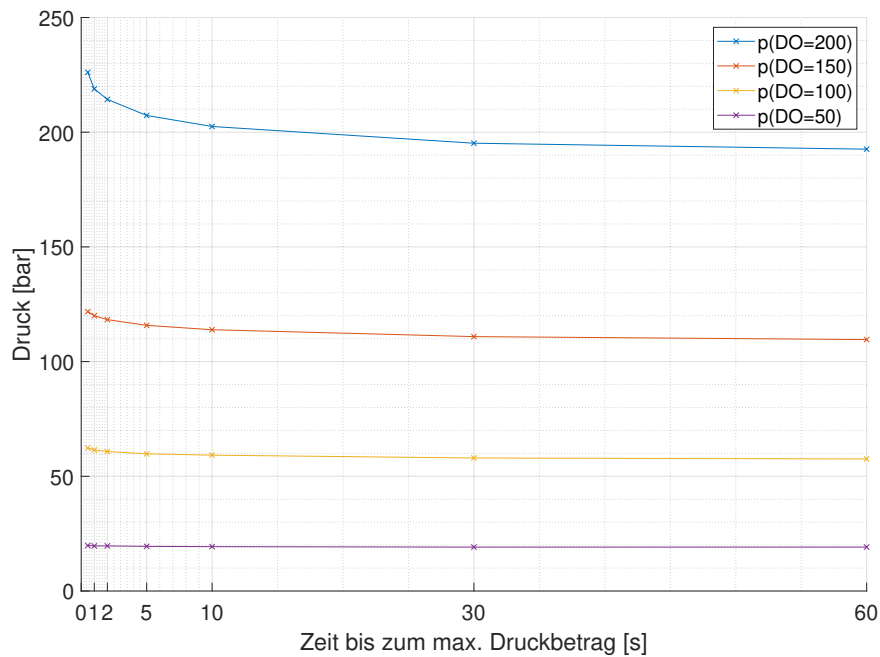


Abbildung 26: Einfluss der Druckanstiegsgeschwindigkeit (300 bar max. Kammerdruck).

Abbildung 27 zeigt die doppelt logarithmische Darstellung des Drucks über dem Digital Output. Es wird deutlich, dass sich ab einem gewissen Druckbetrag das System nicht mehr entsprechend der Potenzfunktion verhält, da die Graphen hier nicht mehr linear verlaufen. Dies geschieht unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit bei circa 140 bar.

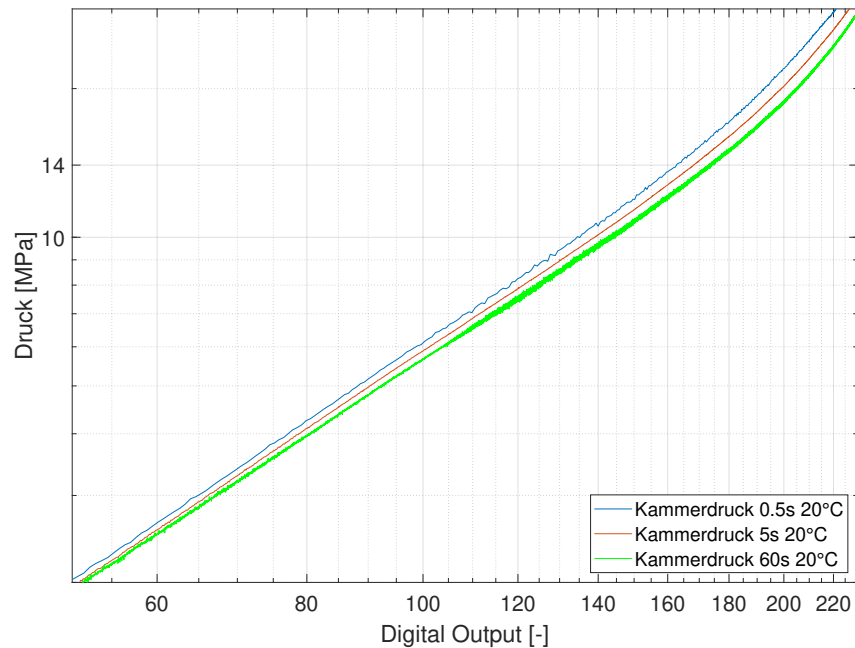


Abbildung 27: Vergleich der Druckwerte bei $DO=200$ entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit

Je schneller das Belastungsmaximum erreicht wird, desto mehr Druck muss für denselben DO-Wert aufgewandt werden. Es liegt also bei höherer Belastungsgeschwindigkeit ein höherer elektrischer Widerstand der Sensorzellen vor. Eine mögliche Erklärung dieser Beobachtung ist das Kriechverhalten des piezoresistiven Coatings innerhalb der Sensorzellen. Es mangelt an Zeit eine molekulare Anordnung des piezoresistiven Coatings zu schaffen, die demselben Druckbetrag entspricht, der bei geringerer Belastungsgeschwindigkeit erzeugt wurde. Daraus resultiert ein höherer elektrischer Widerstand.

Prinzipiell kann das TekScan-System auch bei schlagartigen Belastungen eingesetzt werden, es wird jedoch explizit auf eine Kalibrierung nach der Aufzeichnung der Messdaten hingewiesen [Tek16].

Abbildung 28 zeigt den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Druckwerte beim DO-Wert 200 für 20°C und -10°C Versuchstemperatur. Es wird nochmals deutlich, dass unabhängig von der Versuchstemperatur mit geringerer Belastungsgeschwindigkeit weniger Druck benötigt wird um einen Digital Output von 200 anzuzeigen.

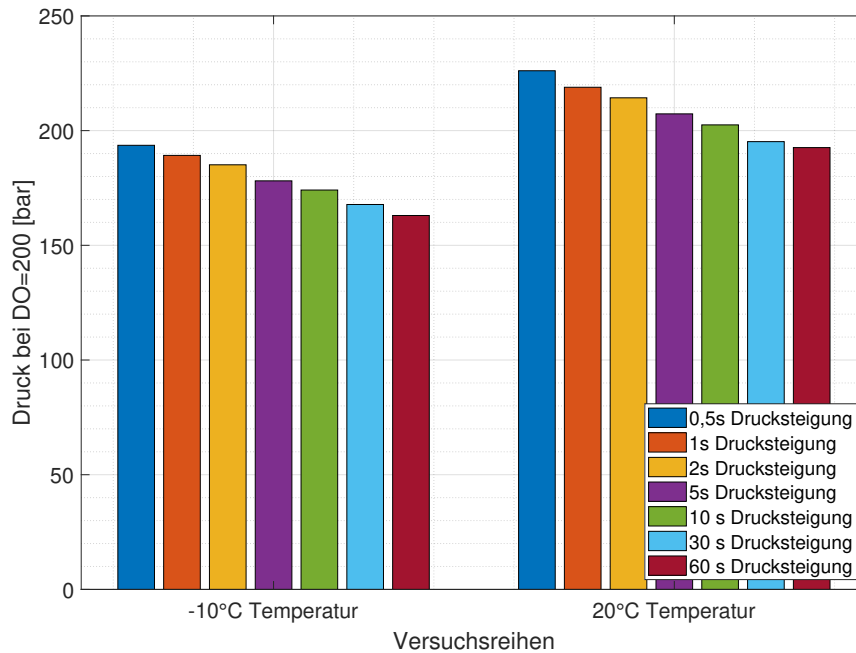


Abbildung 28: Vergleich der Druckwerte bei $DO=200$ entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit (44 kN Zylinderkraft)

Tabelle 10 zeigt die prozentuale Veränderung der DO_{200} -Werte abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit und Temperatur. Aus dem Vergleich der prozentualen Abnahmen der Druckmesswerte zum Druckwert bei 0,5 Sekunden Druckanstiegszeit geht hervor, dass deren Unterschiede marginal sind. Ebenso ist ein Trend, dass die prozentualen Abnahmen bei -10°C Versuchstemperatur geringer ausfallen, nur bedingt feststellbar.

Tabelle 10: Druckmesswerte bei $DO=200$ abhängig von der Versuchstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit, sowie die prozentuale Abnahme zum vorhergehenden Versuch der höheren Belastungsgeschwindigkeit (300 bar max. Kammerdruck).

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
p($DO=200$) 20°C [bar]	226.1	218.9	214.3	207.3	202.5	195.2	192.6
Abnahme zu 226.1 bar	-	3.18%	5.22%	8.31%	10.44%	13.67%	14.82%
p($DO=200$) -10°C [bar]	193.6	189.2	185.1	178.1	174.1	167.8	163
Abnahme zu 193.6 bar	-	2.27%	4.39%	8.01%	10.07%	13.33%	15.81%

5.5 Einfluss von Druck und Sensitivität

Um den Einfluss der geringeren Druckbelastung und der veränderten Sensitivität abzubilden, werden im Folgenden Messergebnisse der 300 bar und 150 bar Versuchsreihen verglichen und kurz der Temperatur- und Belastungsgeschwindigkeitseinfluss bei geringerer Druckbelastung gezeigt.

Das logarithmische DO-Druck-Diagramm in Abbildung 29 zeigt den direkten Vergleich der Versuchsreihen 1.4 und 3.4. Die jeweiligen maximalen Druckbeträge werden innerhalb derselben Zeit erreicht. Bedingt durch die Erhöhung der Sensitivität des TekScan-Systems auf den Wert von 31 auf 33 verläuft der Graph der 150 bar-Versuchsdurchführung unterhalb des Graphen der 300 bar-Versuchsdurchführung. Für die Messanzeige eines bestimmten DO-Wertes wird demnach wesentlich weniger Druck benötigt.

Beide Graphen verlaufen bis zu einem Druckbetrag von circa 140 bar linear, wobei der Graph der 150bar-Versuchsdurchführung gänzlich linear verläuft. Mit weiter steigendem Druck verhält sich der Sensor jedoch nicht mehr entsprechend eines Potenzansatzes, was sich durch einen nicht-linearen Graphenverlauf im logarithmischen Plot ausdrückt.

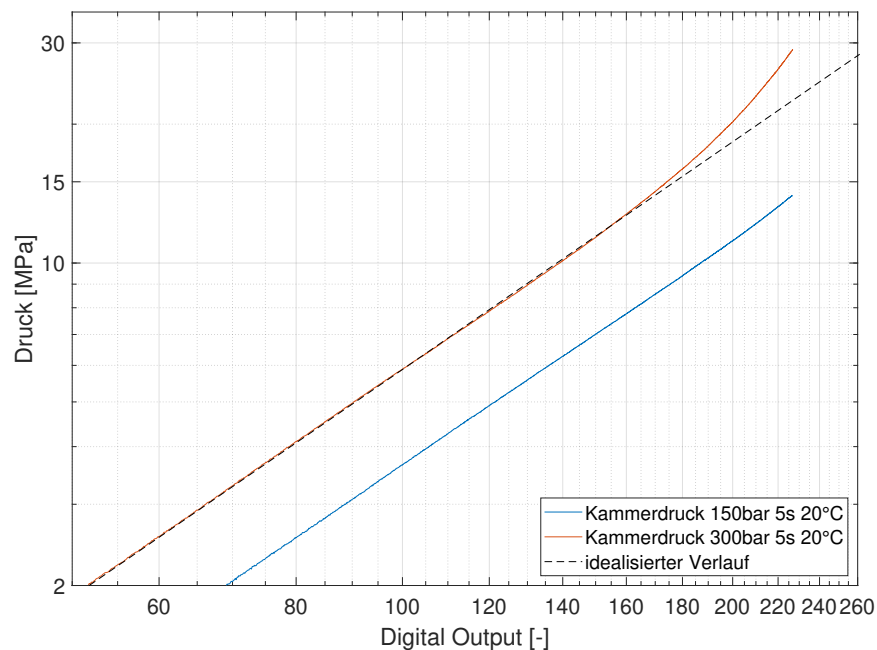


Abbildung 29: Vergleich der Messdaten der Versuche 1.4 und 3.4.

Abbildung 30 zeigt die Graphen der beiden Versuche, die die größte Differenz der Versuchsergebnisse aufweisen, um den Bereich zu untersuchen, in dem die Daten vom Potenzansatz abweichen. Anhand der eingezeichneten, schwarzen Linien, die den linearen Bereich beider Graphen verlängern, lässt sich veranschaulichen, ab welchem expo-

nentiellen Druckbetrag die Messdaten vom Potenzansatz abweichen. Unabhängig von den Randbedingungen beginnt der nicht-lineare, exponentielle Verlauf der Graphen jeweils bei circa 14 MPa (140 bar). Dass dies unabhängig von den Randbedingungen der Versuchsdurchführungen geschieht spricht dafür, dass dieses spezielle Sensorverhalten allein von der Drucklast auf der Sensorfolie abhängig ist. Für Versuchsdurchführungen, bei denen Druckbelastungen von über 140 bar auftreten, sollte dieses Sensorverhalten berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieses Sensorverhalten, liegt in der Auswahl einer TekScan-Sensorfolie, dessen Druckbereich über 3000 psi hinausgeht. In diesem Fall wäre das der *Pressure Mapping Sensor 5101* in der Variante *5000 psi*.

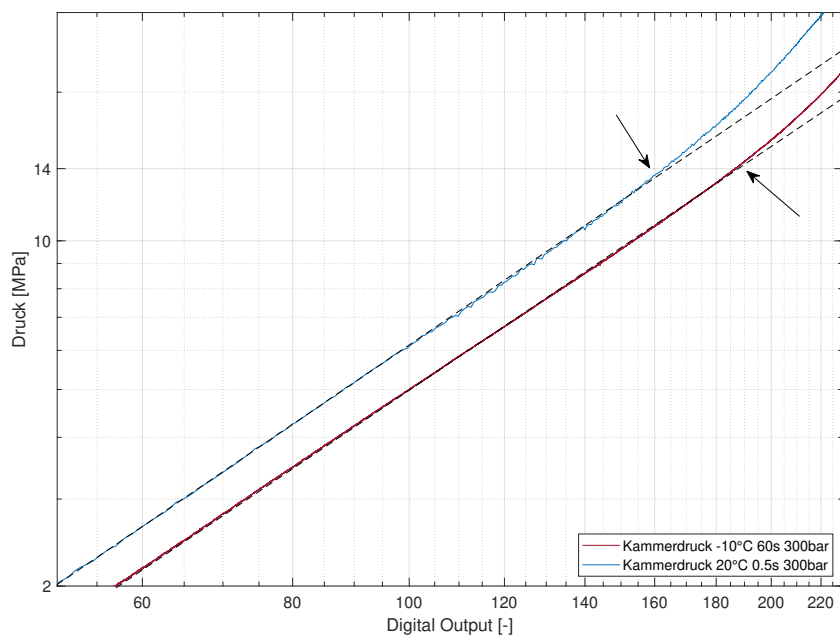


Abbildung 30: *Druckgraphen der Versuche 1.1 und 2.7. Abweichung vom linearen Verlauf mit Pfeilen gekennzeichnet.*

In Abbildung 31 werden die genäherten Kalibrierkurven aller Versuchsdurchführungen der Reihe 3 und 4 gezeigt. Jeder Graph der -10°C -Messdaten liegt stets unter dem Graphen, der über dieselbe Belastungsgeschwindigkeit verfügt und aus den 20°C -Messdaten resultiert. Ebenfalls wird der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit deutlich. Je geringer die Belastungsgeschwindigkeit ist, desto größer der DO-Wert, der bei derselben Druckbelastung angezeigt wird. Diese Beobachtung bestätigt die Annahme, dass sich das Sensorverhalten ab einer gewissen Drucklast ändert.

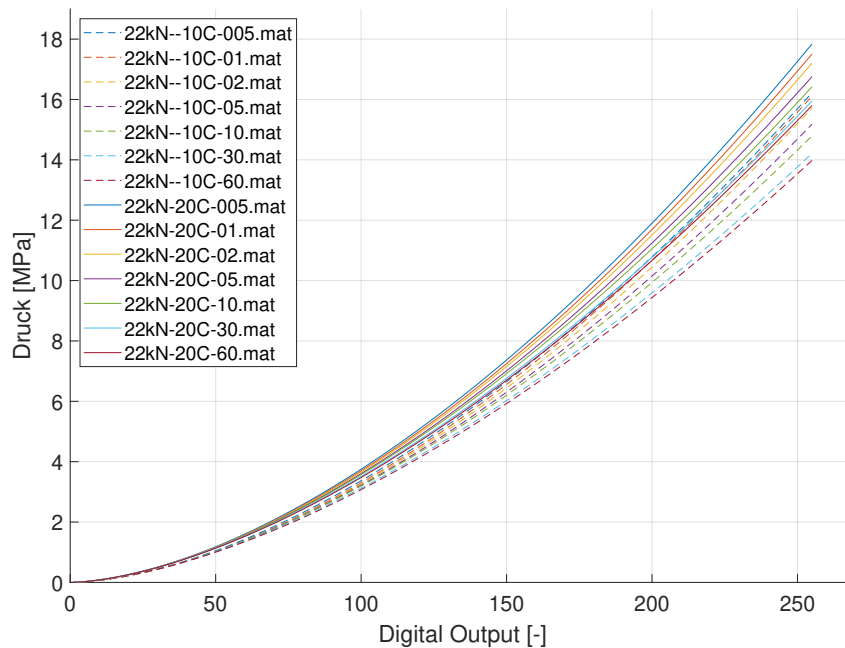


Abbildung 31: Vergleich der genäherten Kalibrierfunktionen. 150 bar max. Kammerdruck.

Inwiefern sich der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei geringerer Druckbelastung ändert zeigen Abbildung 32 und Tabelle 11. Weiter geht aus Abbildung 32 qualitativ hervor, dass der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit bei steigender Druckbelastung zunimmt. Je weniger linear ein Graph verläuft, desto größer der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Messung. Tabelle 11 zeigt den Vergleich der belastungsgeschwindigkeitsabhängigen Veränderung der Druckwerte beim DO200-Wert. Prozentual betrachtet ist der Druckveränderung bei steigender Belastungsgeschwindigkeit größer in der 300bar-Versuchsdurchführung. Diese Beobachtung war zu erwarten, auf Grund der geringeren Drucklast.

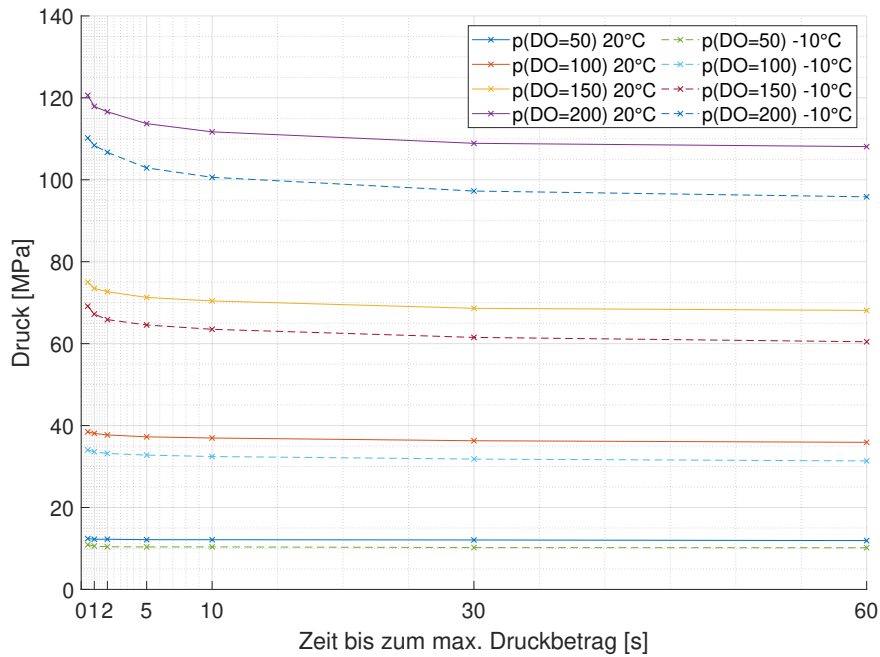


Abbildung 32: Einfluss der Druckanstiegsgeschwindigkeit (150 bar max. Kammerdruck).

Tabelle 11: Druckmesswerte bei DO=200 abhängig von der Versuchstemperatur und Belastungsgeschwindigkeit, sowie die prozentuale Abnahme zum vorhergehenden Versuch der höheren Belastungsgeschwindigkeit (150 bar max. Kammerdruck).

Belastungsgeschw. [s]	0.5	1	2	5	10	30	60
150 bar max. Kammerdruck							
p(DO=200) 20 °C [bar]	110.2	108.4	106.7	102.9	100.6	97.25	95.84
Abnahme zu 110.2 bar	-	1.63%	3.18%	6.62%	8.71%	11.75%	13.03%
300 bar max. Kammerdruck							
p(DO=200) 20 °C [bar]	226.1	218.9	214.3	207.3	202.5	195.2	192.6
Abnahme zu 226.1 bar	-	3.18%	5.22%	8.31%	10.44%	13.67%	14.82%

Das Balkendiagramm in Abbildung 33 zeigt die prozentuale Veränderung der Druckwerte bei einem Digital Output von 200 innerhalb der Versuchsdurchführungen gleicher Belastungsgeschwindigkeiten aber unterschiedlicher Versuchstemperaturen. Die blauen Balken entsprechen den Messergebnissen bei 300 bar Kammerdruck. Die roten Balken entsprechen den Ergebnissen bei 150 bar Druck. Trotz der selben Temperaturverringernung zwischen Versuchsreihe 1 und 2, sowie Versuchsreihe 3 und 4, ist der prozentuale Unterschied der Druckwerte bei DO=200 geringer. Der Betrag liegt zwischen 8% und

11.3%, während die Messdaten des höheren Drucks Werte zwischen 13.57% und 15.37% liefern. Diese Minderung ist ebenfalls auf die geringere Druckbelastung in den Versuchsreihen 3 und 4 zurückzuführen. Zwar ist der Temperatureinfluss in der Auswertung der Ergebnisse deutlich erkennbar, jedoch vergleichsweise schwächer, da die Drucklast auf der Sensorfolie geringer ist. Der Einfluss der Temperatur nimmt demnach bei steigender Druckbelastung zu.

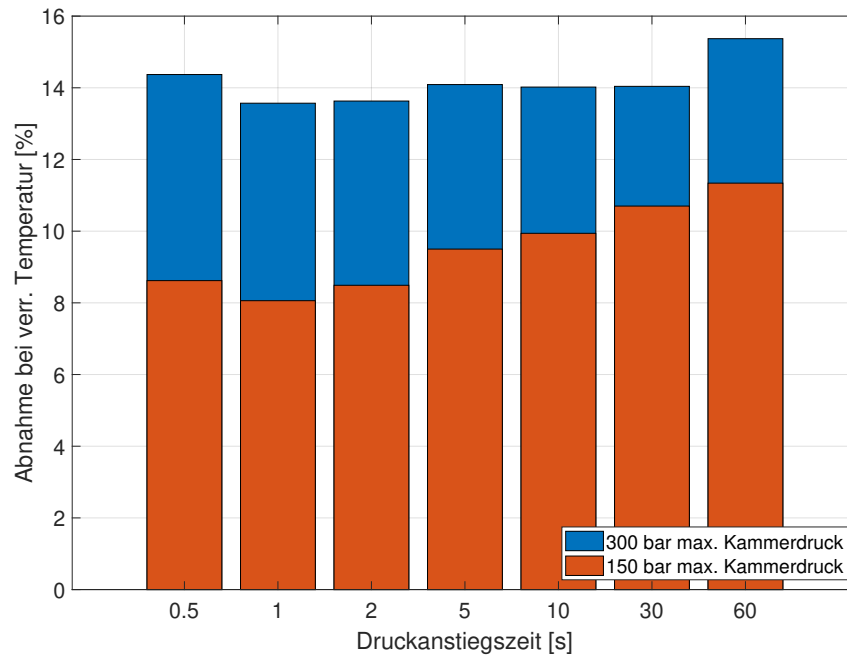


Abbildung 33: Prozentuale Abnahme des Drucks um $DO=200$ zu erreichen, zwischen 2 Versuchen unterschiedlicher Temperatur und gleicher Druckanstiegszeit. 300 bar Kammerdruck und 150 bar Kammerdruck.

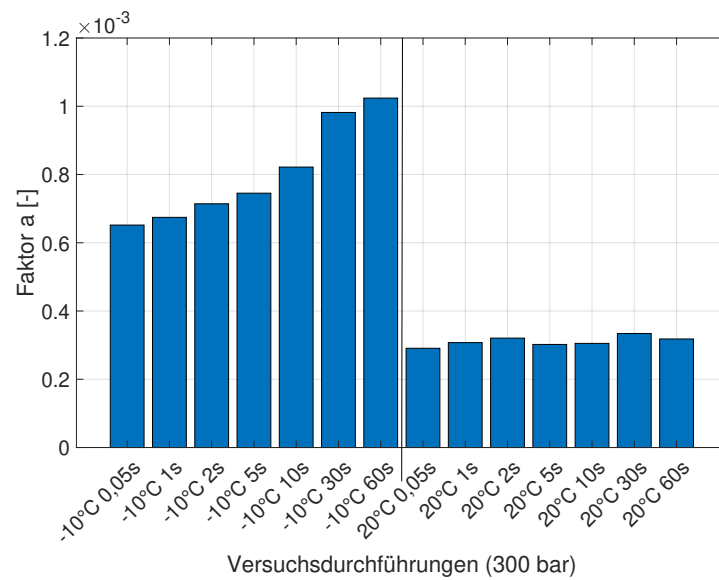
5.6 Kalibrierung

Aus der Analyse der Messdaten wurden mittels Näherungsverfahren die Kalibrierkurven bestimmt. Aus einem gemittelten Betrag des Digital Outputs lässt sich anhand der mathematischen Funktionen der Kalibrierkurven ein Druckwert ermitteln. Auf Grund des Wissens über das für den Sensor typische Verhältnis von Druck und Digital Output wird für die genäherten Kalibrierkurven folgender Potenzansatz gewählt:

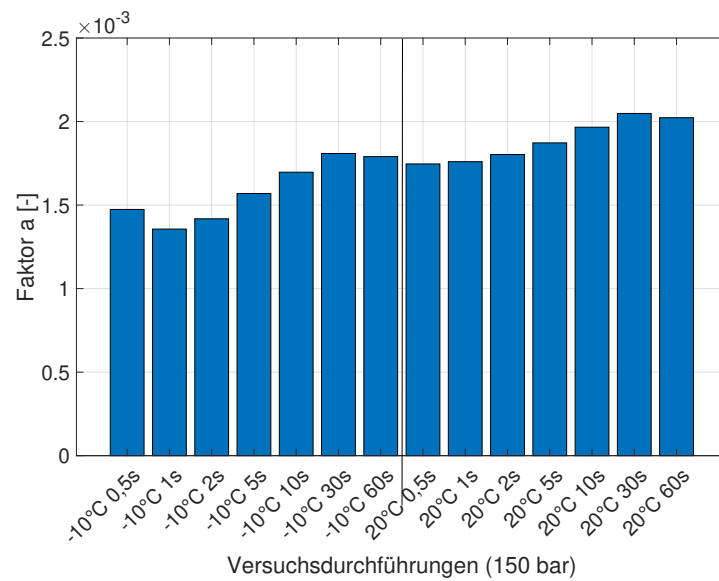
$$p(DO) = a \cdot DO_{mean}^b \quad (7)$$

Der mittlere Digital Output wird mit b potenziert und mit dem Faktor a multipliziert. Abbildung 34(a) zeigt die ermittelten Beträge des Faktors a entsprechend der Versuchsdurchführungen bei einem maximalen Kammerdruck von 300 bar. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg des Faktorbetrags mit steigender Druckanstiegszeit der -10°C -Versuchsreihen. Während bei einer Druckanstiegszeit von 0,5 Sekunden der Betrag bei $0.65 \cdot 10^{-3}$ liegt, ist bei einer Druckanstiegszeit von 60 Sekunden der Faktor auf den Betrag $1 \cdot 10^{-3}$ gestiegen. Im Vergleich dazu liegen alle Faktoren der 20°C -Versuchsreihen im Bereich von $0.3 \cdot 10^{-3}$.

Abbildung 34(b) zeigt die Beträge der Faktoren für die Versuchsreihen mit einem maximalen Kammerdruck von 150 bar. Beim Vergleich der warmen und kalten Versuchsreihen lässt sich nur ein geringer Unterschied feststellen. Die Faktoren, die sich aus den -10°C -Versuchsreihen ergeben, liegen jeweils geringfügig unter denen der warmen Versuchsreihen. Bei beiden ist ein Trend des wachsenden Faktors festzustellen, sobald die Druckanstiegszeit steigt.



(a)



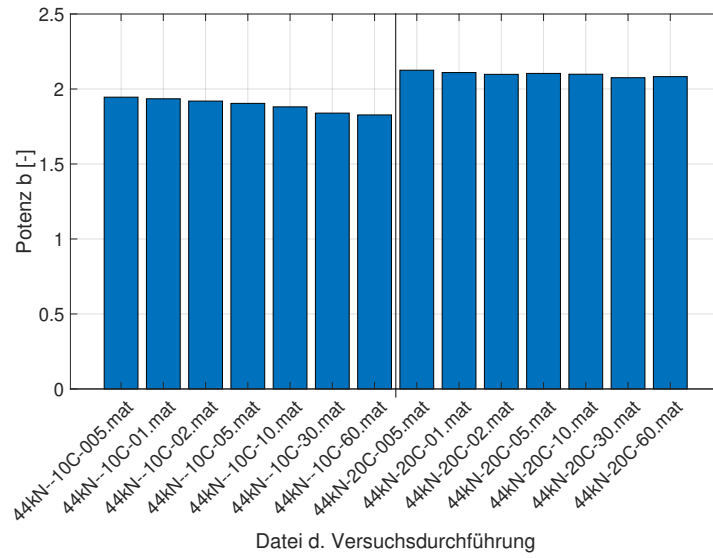
(b)

Abbildung 34: Vergleich der Faktoren a entsprechend der Versuchsdurchführungen.

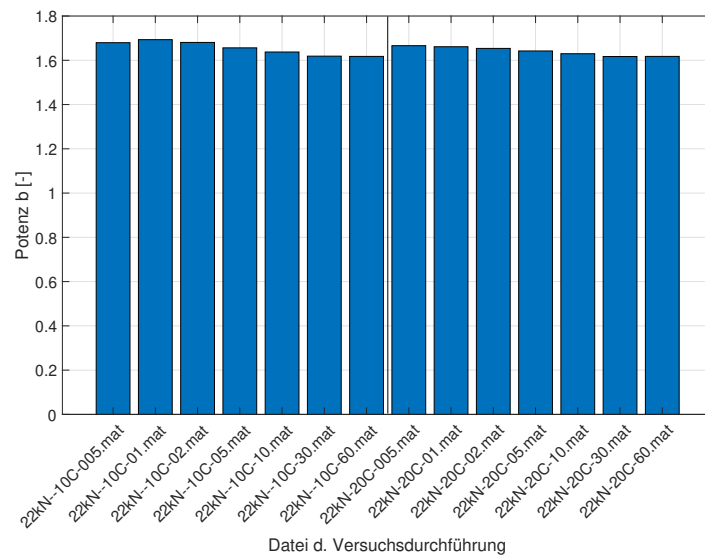
Abbildung 35(a) zeigt die Beträge der Potenz b entsprechend der jeweiligen Versuchsdurchführung mit einem maximalen Kammerdruck von 300 bar. Betrachtet man die Unterschiede die auf der Versuchstemperatur beruhen, lassen sich lediglich marginale Unterschiede der Druckbeträge feststellen. Die Potenzen der -10°C -Versuchsreihen liegen bei circa 1.9, die Potenzen der warmen Versuchsreihen bei circa 2.1. Ebenso las-

sen die Ergebnisse beider Versuchsreihen erkennen, dass eine geringfügige Abnahme der Potenzen bei größerer Druckanstiegszeit stattfindet.

Aus Abbildung 35(b) geht hervor, dass zwischen den Versuchsdurchführung bei warmer und kalter Temperatur kaum Unterschiede feststellbar sind. Lediglich bei steigender Druckanstiegszeit ist eine geringe Abnahme des Potenzbetrags b erkennbar.



(a)



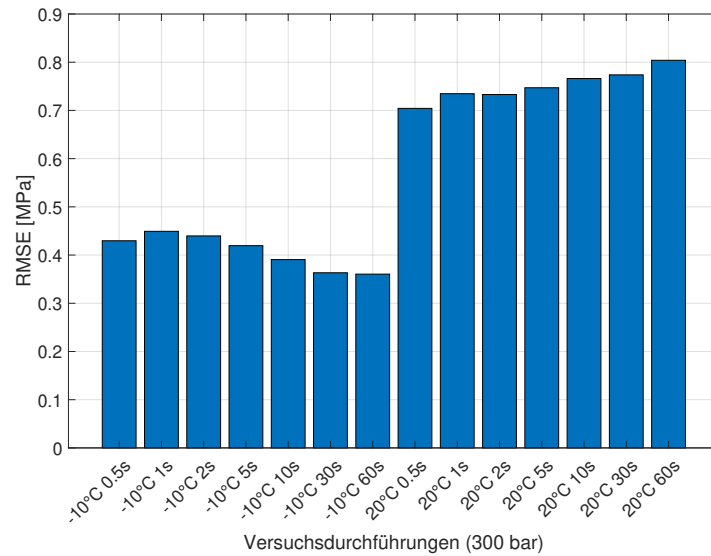
(b)

Abbildung 35: Vergleich der Potenzen b entsprechend der Versuchsdurchführungen

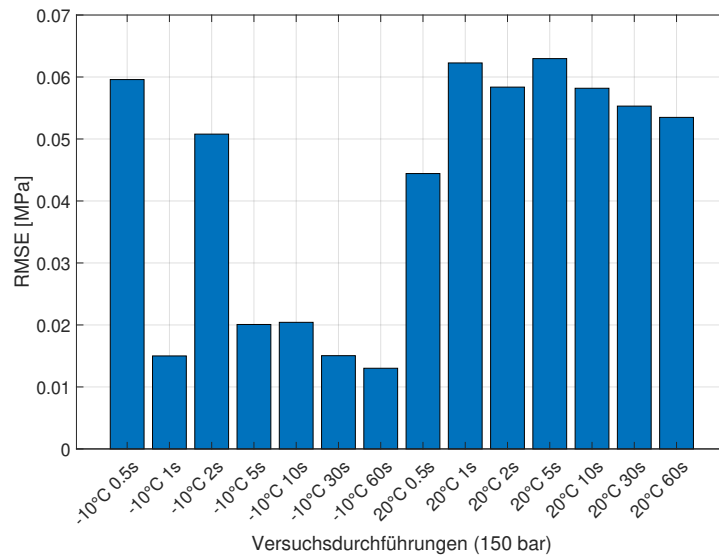
Zur Bestimmung der Qualität der Näherungsfunktionen wird der *Root Mean Square Error* genutzt. Abbildung 35 zeigt die Balkendiagramme der entsprechenden Versuchsdurchführungen.

Die Ergebnisse der Versuchsreihen mit einem Kammerdruck von 300 bar zeigt Abbildung 35(a). Dass die RMSE-Beträge der -10°C -Versuchsreihen kleiner sind, liegt in erster Linie daran, dass durch die Messdatenselektion nicht die gesamten Druckbereiche von 20 bar bis 290 bar abbildet. Der RMSE-Werte liegen hier zwischen 0.36 MPa (3.6 bar) und 0.45 MPa (4.5 bar). In den Auswertungen auf Basis der -10°C -Versuchsergebnisse werden höhere Druckbereiche oft nicht berücksichtigt. Speziell in den hohen Druckbereichen (>200 bar) ist zu beobachten, dass der Verlauf der Messdaten vom mathematischen Potenzverhalten abweicht. Dadurch weichen in diesen Bereichen die Näherungsfunktionen, die auf einem Potenzansatz basieren, stärker von den Messdaten ab. Es resultiert ein höherer RMSE-Betrag für die 20°C -Versuchsreihen. Der RMSE-Werte liegen hier zwischen 0.7 MPa (7 bar) und 0.8 MPa (8 bar), dem höchsten Wert der Versuchsreihen bei 300 bar Kammerdruck. Bezogen auf die betrachteten Druckbereiche von bis zu 300 bar, befinden sich die Abweichungen in einem akzeptablen Bereich, sodass die Näherungen als sinnvoll zu betrachten sind. Ein präziser Trend, der zeigt wie der RMSE von der Belastungsgeschwindigkeiten abhängt, geht aus Abbildung 35(a) nicht hervor.

Abbildung 35(b) zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihen mit einem Kammerdruck von 150 bar. Die Ergebnisse des RMSE der 20°C -Versuchsreihen reichen von 0.04 MPa (0.4 bar) bis 0.06 MPa (0.6 bar). Die Ergebnisse der -10°C -Versuchsreihen divergieren hier in Relation zu einander stark und reichen von 0.01 MPa (0.1 bar) bis 0.06 MPa (0.6 bar). Bezogen auf den höchsten Kammerdruck dieser Versuchsreihen von 150 bar, sind die Näherungsfunktionen nochmals präziser als die der Versuchsreihen bei 300 bar Kammerdruck.



(a)

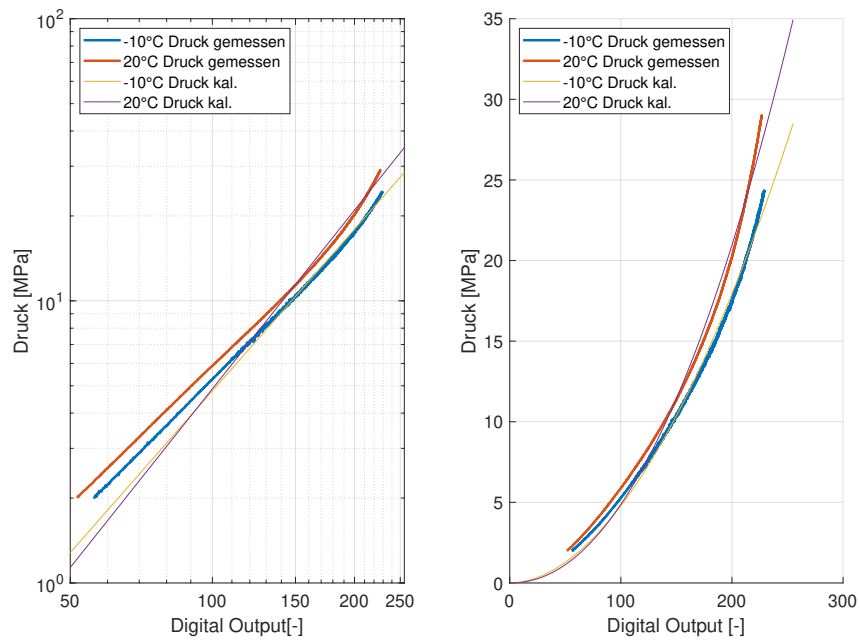


(b)

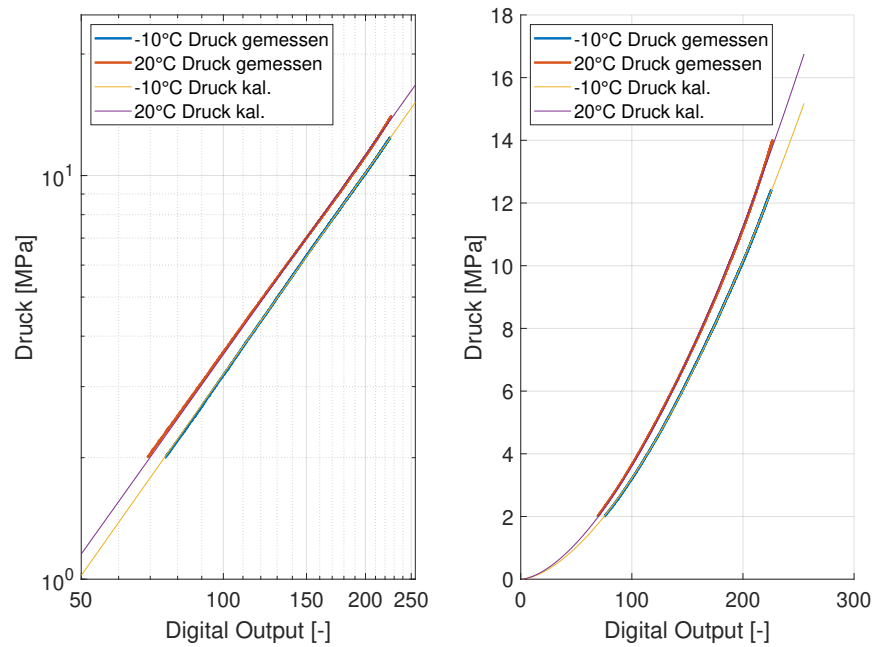
Abbildung 36: Vergleich der RMSE-Werte von Näherung und Messdaten.

Dass die Näherung der Kalibriergraphen in hohen Druckbereichen weniger präzise ist, als in Druckbereichen unter 200 bar, wird in Abbildung 37 deutlich. Aus dem logarithmischen Plot in (a) wird die Schwierigkeit erkennbar, das nicht einheitliche Potenzverhalten der Messdaten auf einen Potenzansatz abzubilden. Die Graphen zeigen deutliche Differenzen. Im Gegensatz dazu spiegeln sich die geringen RMSE-Werte der

Versuchsreihen mit 150 bar Kammerdruck in Abbildung 37(b) wider. Messdaten und Näherungsfunktionen sind nahezu deckungsgleich sowohl in der logarithmischen Darstellung, als auch in der Standarddarstellung.



(a)



(b)

Abbildung 37: Vergleich der kalibrierten und gemessenen Druckdaten. Beispiele: Versuch 1.4 und 2.4 (a), Versuch 3.4 und 4.4 (b).

Die Tabellen 12 und 13 vergleichen die zusammengefassten Kalibrierergebnisse. Dabei sind die Ergebnisse anhand ihrer Druckbelastungsgeschwindigkeit geordnet und aufsteigend sortiert.

Tabelle 12: *Zusammenfassung der Kalibrierungsergebnisse für 30 MPa (300 bar) Kammerdruck. RMSE1: Abweichung zwischen Messdaten und Näherungsfunktion. RMSE2: Abweichung der Näherungsfunktionen von einander.*

Versuchsnummer	Druckanstiegszeit [s]	Faktor a [$\cdot 10^{-4}$]	Potenz b [-]	max. Druck [MPa]	RMSE1 [MPa]	RMSE2 [MPa]
1.1	0.5	2.91	2.13	28.99	0.70	
2.1	0.5	6.52	1.95	26.21	0.43	2.42
1.2	1	3.07	2.11	28.99	0.73	
2.2	1	6.74	1.93	25.69	0.45	2.29
1.3	2	3.21	2.10	28.99	0.73	
2.3	2	7.14	1.92	25.24	0.44	2.28
1.4	5	3.02	2.10	29.00	0.75	
2.4	5	7.45	1.90	24.35	0.42	2.40
1.5	10	3.05	2.10	29.00	0.77	
2.5	10	8.22	1.88	23.56	0.39	2.46
1.6	30	3.34	2.08	28.46	0.77	
2.6	30	9.82	1.84	22.66	0.36	2.51
1.7	60	3.18	2.08	28.68	0.80	
2.7	60	10.24	1.83	22.02	0.36	2.64

Tabelle 13: Zusammenfassung der Kalibrierungsergebnisse für 15 MPa (150 bar) Kammerdruck. RMSE1: Abweichung von Messdaten und Näherungsfunktion. RMSE2: Abweichung der Näherungsfunktionen von einander.

Versuchsnummer	Druckanstiegszeit [s]	Faktor a [$\cdot 10^{-3}$]	Potenz b [-]	max. Druck [MPa]	RMSE1 [MPa]	RMSE2 [MPa]
3.1	0.5	1.75	1.67	14	0.04	
4.1	0.5	1.47	1.68	13.29	0.06	0.80
3.2	1	1.76	1.66	13.98	0.06	
4.2	1	1.36	1.69	13.13	0.02	0.73
3.3	2	1.80	1.65	13.99	0.06	
4.3	2	1.42	1.68	12.94	0.05	0.77
3.4	5	1.87	3.06	14	0.06	
4.4	5	1.57	3.56	12.41	0.02	0.79
3.5	10	1.97	1.63	13.82	0.06	
4.5	10	1.70	1.64	12.13	0.02	0.81
3.6	30	2.05	1.62	13.45	0.06	
4.6	30	1.81	1.62	11.73	0.02	0.85
3.7	60	2.02	1.62	13.32	0.05	
4.7	60	1.79	1.62	11.56	0.01	0.89

Um die Abweichung zwischen Näherung und Messdaten zu minimieren wird für Messdaten die in Druckbereiche reichen, die über 140 bar liegen eine weitere Methode zur Näherung der Kalibrierdaten vorgeschlagen: Die Messdaten werden ab dem Druckbereich geteilt, ab dem sich ein anderes mathematisches Verhalten zeigt. Dafür werden die Datenreihen ab einem Druck von 150 bar geteilt und für beide Teile neue Näherungsfunktionen erstellt. Das Hinzufügen der Konstanten c in der Formeldefinition 8 verringert die Unstetigkeit im Übergang beider Funktionen.

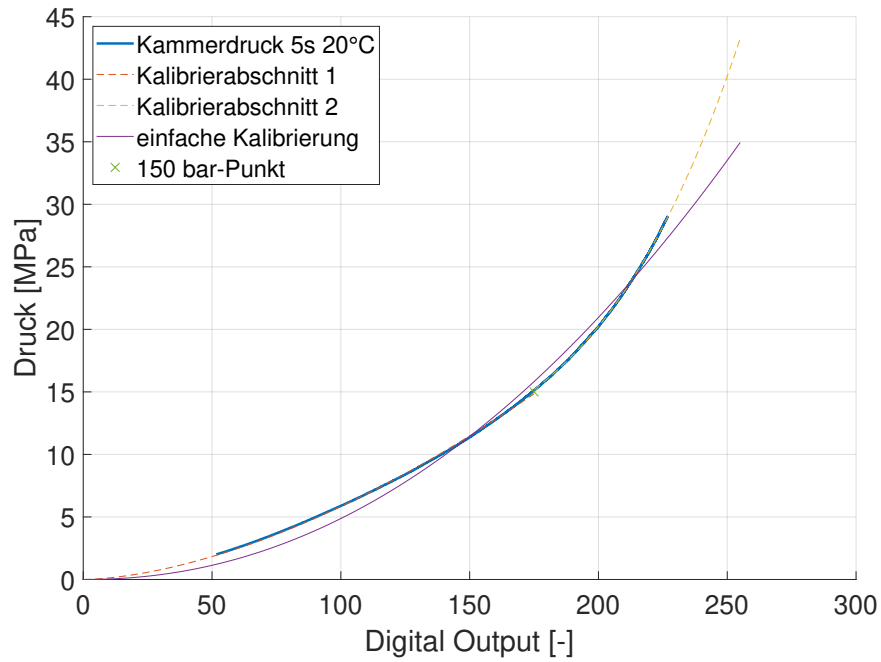
$$p(DO) = \begin{cases} a_1 \cdot DO_{mean}^{b_1} & p \leq 150 \text{ bar} \\ a_2 \cdot DO_{mean}^{b_2} + c & p > 150 \text{ bar} \end{cases} \quad (8)$$

Ein grafisches Beispiel für die abschnittsweise Kalibrierung des Messdaten wird in Abbildung 38 dargestellt. Aus dem Vergleich des ursprünglichen, nur mit einer Funktion genährten Kalibriergraphen mit den abschnittsweise genährten Graphen wird deutlich, dass die Abweichung zu den Messdaten wesentlich geringer ausfallen. Somit ermöglicht die abschnittsweise genährte Kalibrierfunktion eine höhere Genauigkeit.

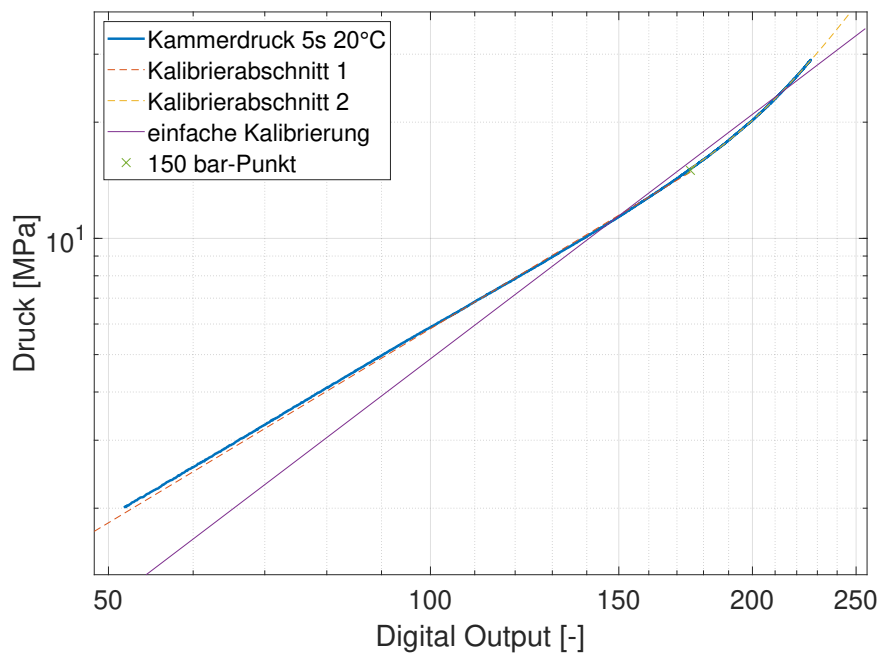
Tabelle 14 zeigt die neuen Funktionsvariablen (vgl. Gleichung 8) im Vergleich mit den Variablen, die aus der einfachen Näherung resultieren. Weiter werden die Abweichung der einfach genährten Funktionen mit den beiden Abweichungen der entsprechenden abschnittsweise genährten Daten verglichen. Wie bereits in der grafischen Darstellung zu erkennen, zeigen sich die bedeutend kleineren RMSE-Werte für die Abweichung der abschnittweisen Näherungsfunktionen gegenüber der Messdaten. Lediglich die Existenz einer Unstetigkeit im Übergangsbereich der beiden Näherungsfunktionen ist optimierbar.

Tabelle 14: Vergleich der neuen Variablen der abschnittsweisen Näherungsfunktionen und entsprechende RMSE-Werte.

Ver- such	a _{alt} [*10 ⁻⁴]	b _{alt}	a ₁ [*10 ⁻³]	b ₁	a ₂ [*10 ⁻¹⁰]	b ₂	c	RMSE alt [MPa]	RMSE 1 [MPa]	RMSE 2 [MPa]
1.1	2,91	2,13	2,58	1,69	51,58	4,10	8,17	0,70	0,09	0,06
1.2	3,07	2,11	2,55	1,69	9,64	4,40	8,84	0,73	0,08	0,02
1.3	3,21	2,10	2,61	1,68	3,66	4,57	9,18	0,73	0,09	0,03
1.4	3,02	2,10	2,67	1,67	1,75	4,69	9,40	0,75	0,09	0,03
1.5	3,05	2,10	2,73	1,66	0,81	4,82	9,65	0,77	0,09	0,04
1.6	3,34	2,08	2,84	1,65	0,94	4,79	9,29	0,77	0,09	0,06
1.7	3,18	2,08	2,89	1,64	2,02	4,65	8,73	0,80	0,11	0,10
2.1	6,52	1,95	2,01	1,72	212,41	3,78	8,19	0,43	0,03	0,02
2.2	6,74	1,93	2,00	1,72	83,89	3,95	8,35	0,45	0,03	0,02
2.3	7,14	1,92	2,07	1,71	23,45	4,17	8,77	0,44	0,04	0,02
2.4	7,45	1,90	2,18	1,69	21,90	4,18	8,61	0,42	0,07	0,07
2.5	8,22	1,88	2,27	1,68	16,84	4,22	8,64	0,39	0,05	0,02
2.6	9,82	1,84	2,38	1,66	13,42	4,24	8,55	0,36	0,08	0,06
2.7	10,24	1,83	2,41	1,66	6,82	4,36	8,63	0,36	0,07	0,02



(a)



(b)

Abbildung 38: Vergleich der abschnittweisen Näherung der Messdaten und der Näherung mittels einer einzigen mathematischen Funktion.

5.7 Equilibrierung

Durch die Annahme der uniformen Druckbelastung der Sensorfläche wird die Equilibrierung des Sensors ermöglicht. Für jede Messaufnahme existiert der gemittelte DO-Wert, der Betrag der Druckbelastung, sowie die von TekScan ermittelte DO-Matrix. Diese Matrix beinhaltet DO-Werte, die unterschiedlich stark abweichend um den Mittelwert verteilt sind.

Durch die elementweise Division der TekScan-Matrix mit dem mittleren DO-Wert kann für jede Messaufnahme eine Equilibriermatrix ermittelt werden. TekScan bietet eine Equilibrierung auf bis zu 10 Punkten des gesamten Messintervalls an. Mittels MATLAB wurde für diese Arbeit ein Script angefertigt, dessen Equilibrierschritte lediglich durch die Anzahl der Messaufnahmen begrenzt wird. So kann, mit steigender Anzahl der verfügbaren Equilibriermatrizen die Qualität der später angefertigten Auswertungen maximiert werden.

Im Folgenden werden die Einflüsse der in den Versuchen variierten Randbedingungen auf die Equilibrierung dargestellt.

Abbildung 39 (a) zeigt ein Beispiel für die sich ergebende Farbausgabe, die pro Sensorzelle einen Equilibrierfaktor darstellt. Auffällig sind hier die regionalen Unterschiede. In (b) wird die Verteilung der Faktoren in einem Histogramm dargestellt. Die Werte sind um den Faktor 1, also keine Abweichung vom mittleren DO-Wert, verteilt. Der Großteil der Werte reicht von 0.9 bis 1.1, die Standardabweichung beträgt hier 0.0616. Die Verteilung ist allerdings rechtsschief, also nicht-symmetrisch.

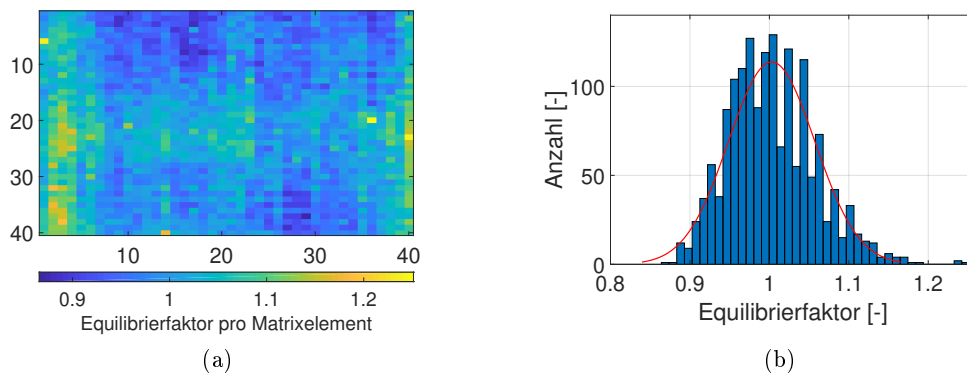


Abbildung 39: *Beispiel zur farblichen Darstellung der Faktoren einer Equilibriermatrix (a). Histogramm derselben Equilibrierfaktoren (b).*

Das Beispiel einer Equilibrierung in 6 Schritten über den untersuchten Druckbereich zeigt Abbildung 40. Es wird einerseits erkennbar, dass bei steigendem Druck auch die Bildung von farblich abweichenden Regionen steigt, vor allem im Bereich des rechten und linken Randes. Jedoch wird auch bei Betrachtung der Farbskalen deutlich, dass das Spektrum der Abweichungen geringer wird, da die Skalen der Leisten stetig kleinere Intervalle umfassen.

Ebenfalls ist erkennbar, dass punktuell stark abweichenden, vermutlich fehlerhaften Sensorzellen auftreten. Zwei Beispiele dafür sind in der oberen linken Ecke und im

rechten Randbereich zu sehen. Sie sind im Equilibrierschritt Nummer 1 rot eingekreist. Diese beiden Sensorzellen stechen in jeder Matrix durch den Differenz zu umliegenden Zellen hervor. Der Grund ist mutmaßlich ein Produktionsfehler.

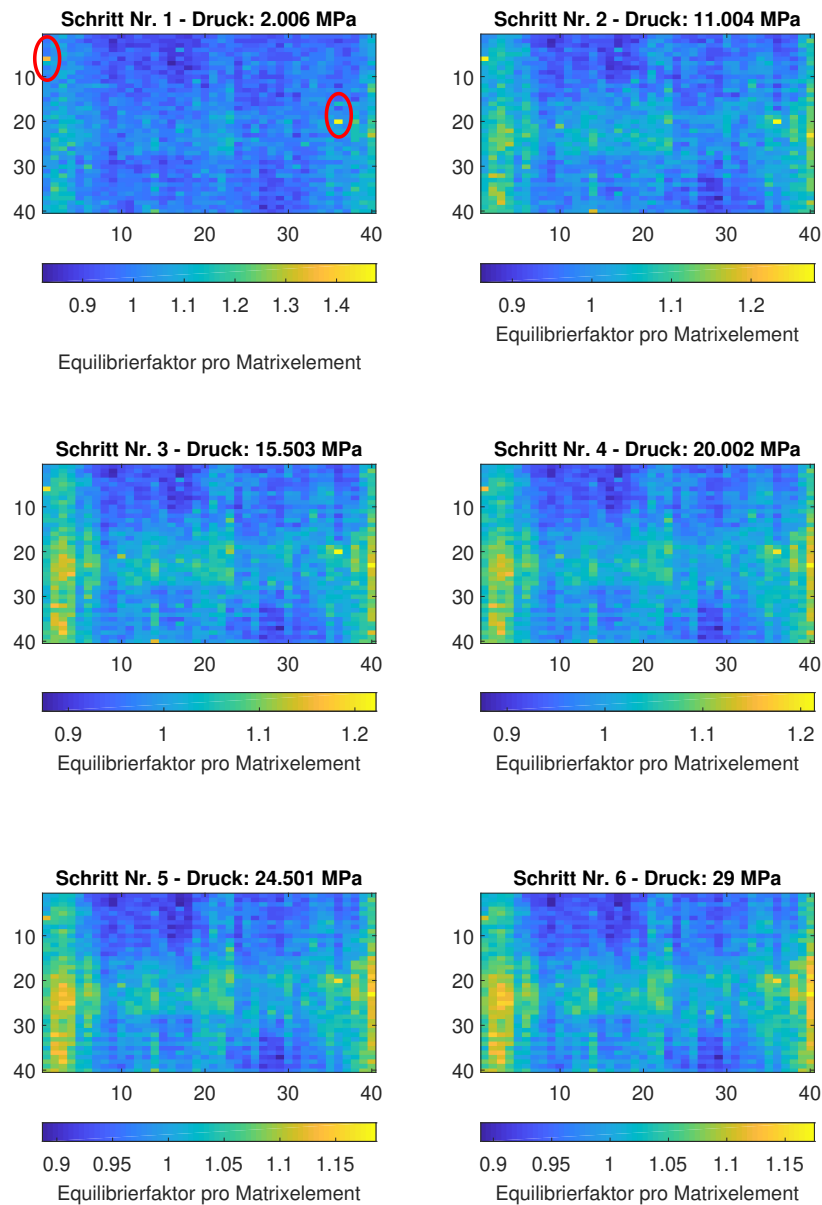


Abbildung 40: Farbliche Darstellung der Equilibriermatrizen in 6 Schritten. Ergebnisse der Versuchsdurchführung 1.4.

Zur Untersuchung aller genannter Einflüsse auf den Equilibriervorgang, werden im Folgenden vier der 40x40 Sensels großen Matrix exemplarisch betrachtet. Die Sensels befinden sich in Matrixnotation an folgenden Stellen: (16,16), (16,24), (24,16), und (24,24). Abbildung 41 verdeutlicht deren Position auf der Sensorfolie.

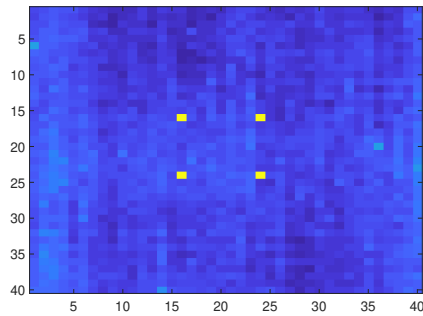


Abbildung 41: *Exemplarisch betrachtete Sensels (gelb hervorgehoben) während des Equilibriervorganges.*

Abbildung 42 zeigt den Verlauf der Equilibrierwerte der 4 gewählten Sensels abhängig vom Kammerdruck. Ein einzelner Graph entspricht dabei einer einzelnen Belastungsgeschwindigkeit. Gestrichelte Graphen zeigen die Daten bei -10°C Versuchstemperatur. Im Hinblick auf Druckanstiegszeit oder Temperatur sind keinerlei Trends im Graphenverlauf zu erkennen. Ebenso gibt es keinen generellen Verlauf der Equilibrierwerte. Die Werte für Sensel (16,16) und (24,16) steigen bei steigendem Druck. Währenddessen weisen die Werte für Sensel (16,24) keine Tendenz auf und die Werte für Sensel (24,24) sinken bei steigendem Druck.

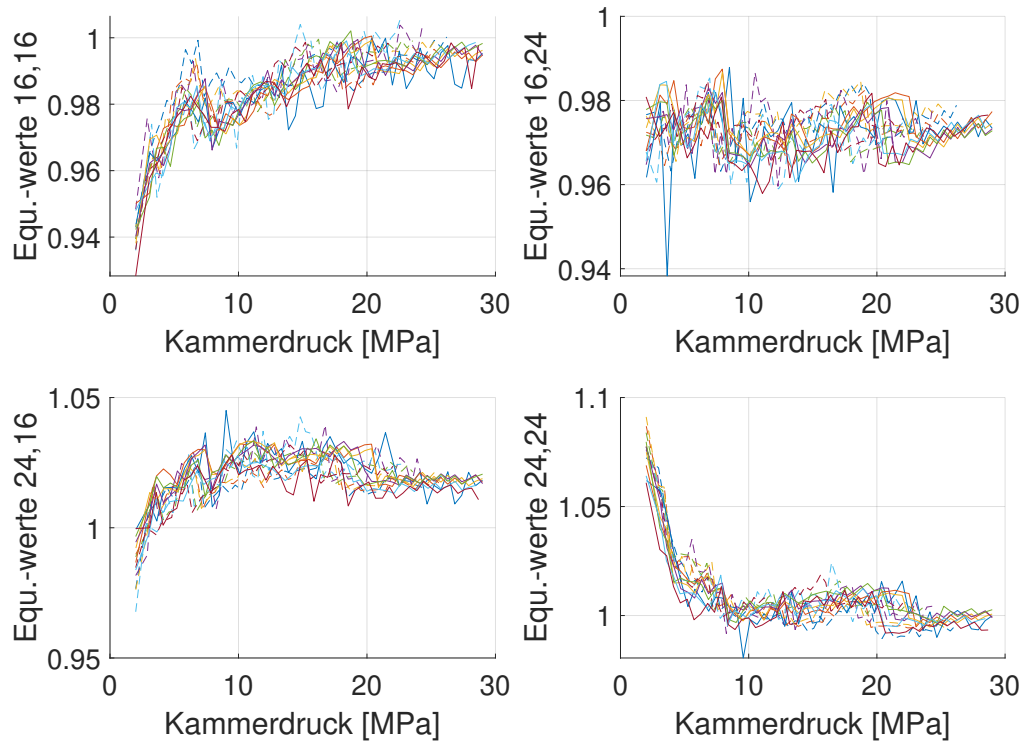


Abbildung 42: *Kammerdruck-Equilibrierwerte-Diagramm für 300 bar maximalen Kammerdruck.*

Die Equilibrierwerte für die Versuche mit 150 bar maximalem Kammerdruck zeigt Abbildung 43. Da die Verläufe der Graphen große Ähnlichkeit mit den in Abbildung 42 gezeigten Graphen besitzen, werden hier dieselben Schlüsse gezogen. Es sind keine generellen Aussagen zum Equilibrierverhalten der vier Sensels möglich. Es lässt sich schließen, dass das Equilibrierverhalten einer Sensorfolie auch unter verschiedenen äußeren Einflüssen reproduzierbar ist.

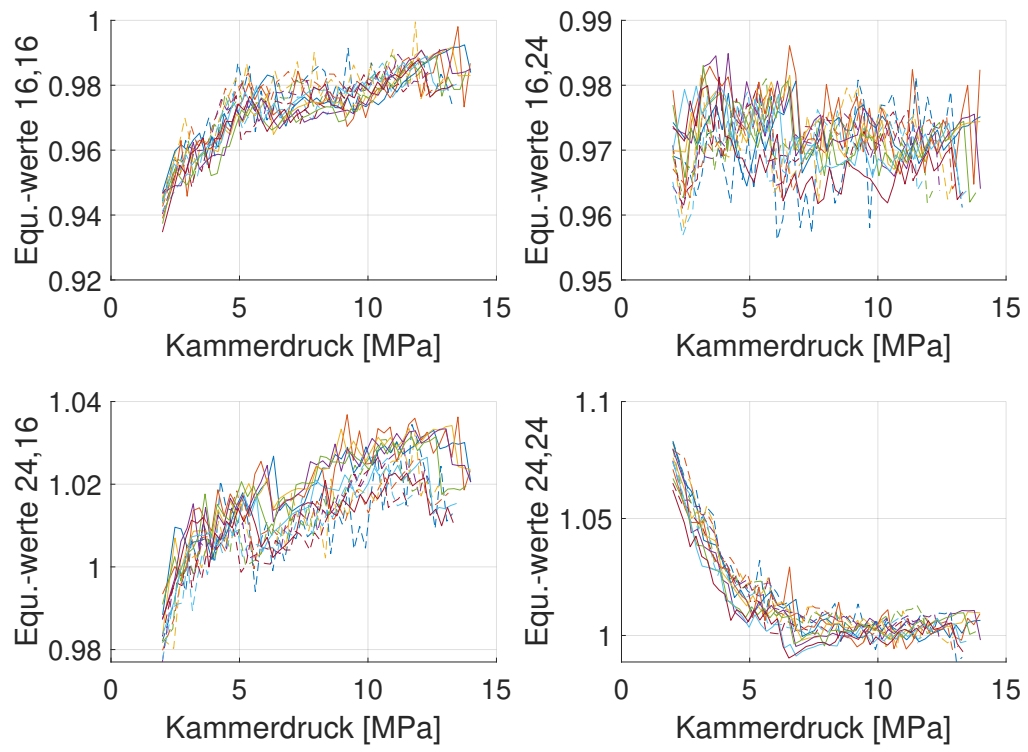


Abbildung 43: Kammerdruck-Equilibrierwerte-Diagramm für 150 bar maximalen Kammerdruck.

6 Fazit

Es wurden Versuche durchgeführt, bei denen eine Sensorfolie mit hydrostatischem Druck belastet wurde. Die Folie befindet dabei in einer speziellen Kammer, die Teil eines Hydrauliksystems ist. In diesem System können bestimmte Druckbelastungsfunktionen mit Hilfe eines steuerbaren Hydraulikzylinders umgesetzt werden, sodass sich die Geschwindigkeit mit der die Druckbelastung bis zu ihrem Maximum steigt, variiert werden kann. Durch die weitere Variation der maximalen Druckbelastung, der Sensitivität des Messsystems, sowie der Versuchstemperatur wurden verschiedene Versuchsabläufe entwickelt, um die Einfluss dieser Randbedingungen auf die Messergebnisse zu untersuchen.

Aus den Ergebnissen der Kalibrierung und Equilibrierung haben sich die Einflüsse der verschiedenen Randbedingungen innerhalb der Versuchsreihen ableiten lassen. Die Ergebnisse sind für den eingesetzten Sensortyp im vorliegenden Versuchsaufbau gültig.

Durch die Berechnung von Näherungsfunktionen der Kalibrierkurven haben sich vergleichbare Daten ermitteln lassen, deren quantitative Betrachtung Rückschlüsse auf den qualitativen Einfluss von Sensortemperatur, Belastungsgeschwindigkeit, sowie der Änderung der Maximallast und Messempfindlichkeit zulassen.

Am deutlichsten tritt der Einfluss hoher Druckbelastung auf das Verhalten des Sensors in Erscheinung. Das beobachtete Verhalten gilt für den zum Einsatz gekommenen Sensortyp (*Pressure Mapping Sensor 5101 (3000 psi)*) bei einer Sensitivität von 31. Vor allem in Druckbereichen größer 140 bar ist eine Veränderung des Sensorverhaltens feststellbar. Die mathematische Funktion, mit der das Sensorverhalten bis zu diesem Punkt beschrieben wird, ändert sich ab dann, sodass die Beschreibung des Sensorverhaltens mit nur einer mathematischen Funktion nur unter Hinnahme vergleichsweise großer Abweichungen sinnvoll ist. Dementsprechend wurde eine Näherung mittels abschnittsweise definierter Funktionen für Druckbelastungen größer 150 bar vorgestellt.

Der Einfluss der Verringerung der Versuchstemperatur auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ tritt ebenfalls deutlich in Erscheinung und tritt höchstwahrscheinlich unabhängig vom eingesetzten Sensormodell auf. Durch die wesentlich schnellere Sättigung des maximalen Digital Outputs, was die Unbrauchbarkeit von Daten bewirkt, können die erhaltenen Daten nicht im selben Umfang ausgewertet werden, wie bei $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Versuchstemperatur. Daraus resultiert eine höhere Unschärfe der genäherten Kalibrierfunktionen gegenüber der Messdaten in hohen Druckbereichen. Weiter wird bei einer Temperaturverringerung allgemein weniger Druckbelastung zum Erreichen derselben Digital-Output-Werte benötigt. So beträgt die prozentuale Abnahme der DO200-Druckmesswerte bei Absenkung der Temperatur auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der die Sensorfolie belastet wird, zwischen 13.57% und 15.37% in den Versuchsreihen mit 300 bar maximalem Kammerdruck und einer Sensitivität von 31. In den Versuchsreihen mit 150 bar maximalem Kammerdruck und einer Sensitivität von 33 beträgt dieselbe Abnahme zwischen 8% und 11.3%. Dies ist auf die Verringerung des elektrischen Widerstandes innerhalb der Sensorzellen zurückzuführen.

Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit wird vor allem in hohen Druckbereichen deutlich und findet unabhängig von der Versuchstemperatur statt. Der Einfluss ist in ähnlicher Ausprägung sowohl beim maximalen Kammerdruck von 300 bar, als auch bei

150 bar zu beobachten. Dementsprechend ist davon auszugehen, dass dieser Einfluss, möglicherweise in anderer Größenordnung, auch auftreten wird, wenn ein anderer Sensortyp eingesetzt wird. Betrachtet man die Abnahme des DO200-Druckmesswertes von 0.5 Sekunden bis 60 Sekunden Druckanstiegszeit, so verringert sich dieser Wert um circa 15% bei den Versuchen mit 300 bar Kammerdruck und um circa 13% bei den Versuchen mit 150 maximalem Kammerdruck. Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit ist auf stoffliche Eigenschaften des in der Sensorzelle befindlichen piezoresistiven Coatings zurückzuführen.

Anhand der gewonnenen Erkenntnisse über das Sensorverhalten lassen sich Durchführungsempfehlungen für zukünftige Versuchsreihen ableiten. Dabei kommen auch die Ergebnisse der vorhergehenden Versuche zur Bestimmung der Einflüsse von Versuchspausendauer und Nutzungsanzahl einer Folie zum Einsatz. Die Empfehlungen zielen darauf ab störende Einflüsse zu verringern, also die Genauigkeit der TekScan-Messung zu optimieren, um schlussendlich möglichst präzise Messergebnisse und einen realitätsnahen Einblick in physikalische Vorgänge zu erhalten.

Zunächst sollte unter Berücksichtigung des im Versuch auftretenden Maximaldrucks ein passender Sensortyp gewählt werden. Für zukünftige Versuche mit einer Druckbelastung von 300 bar wird der Einsatz des TekScan *Pressure Mapping Sensor 5101* in der Produktvariante *5000 psi* (circa 345 bar) auf Grund des geeigneteren Druckbereichs empfohlen. Durch eine entsprechende Erhöhung der Sensitivität können sowohl exakte Messergebnisse als auch ein lineares Sensorverhalten realisiert werden. Weiter sollten alle Herstellerhinweise beachtet werden und eine Prekonditionierung einer neu eingesetzten Sensorfolie stattfinden.

Die langfristigen Einflüsse (>24 Stunden) der Nutzungsanzahl einer Folie wurden in dieser Arbeit gezeigt. Daher wird empfohlen eine Sensorfolie mehrfach mit dem maximalen Versuchsdruck zu konditionieren. Die genaue Anzahl der notwendigen Konditionierungen ist nicht ermittelt worden. Allerdings kann die in den vorliegenden Versuchen genutzte Anzahl in Höhe von 40 Druckbelastungen als Maß genommen werden. Dabei ist eine Belastungsdauer von wenigen Sekunden, circa 10 Sekunden, ausreichend. Idealerweise geschieht die Konditionierung im hier genutzten Versuchsaufbau, also mit einer gleichförmig verteilten Druckbelastung auf der gesamten Sensorfläche.

Wegen der schnellen Übersättigung des Sensors bei -10°C Versuchstemperatur ist zu prüfen, ob die in der TekScan-Software gewählte Sensitivität ausreicht, um während der Versuche auch in hohen Druckbereichen keine Sensorübersättigung zu erzeugen. Daher ist der Versuchsaufbau auf die genannte Temperatur zu kühlen und die angezeigten Messergebnisse sind bei der gewünschten maximalen Druckbelastung auf ihre Sättigung zu prüfen.

Eine Sensorfolie sollte auf Grund ihres individuellen Verhaltens nun unter den Bedingungen equilibriert und kalibriert werden, unter denen sie später zum Einsatz kommt.

Bevor die Sensorfolie in Untersuchungen eingesetzt wird, sollte diese kurz vor dem Einsatz mindestens weitere zehn mal konditioniert werden, da gezeigt wurde, dass sich kurzfristige Einflüsse auf das Sensorverhalten nach zehn Druckbelastungen verringern.

Während der tatsächlichen Versuchsabläufe ist darauf zu achten, dass zwischen einzelnen Versuchsdurchführungen circa drei Minuten Zeit vergehen, da bei diesen Pausendauern die geringsten Messabweichungen festgestellt wurden.

7 Ausblick

Die vorliegenden Ergebnisse der Kalibrierung und Equilibrierung des TekScan-Sensors dienen der Datenanalyse aus Experimenten der mechanischen Stahl-Eis-Interaktion.

Durch die nicht-uniforme Druckbelastung der Sensorfolie beim Einsatz von kegel-förmigen Eisproben ergeben sich abweichende Versuchsbedingungen. Ebenso werden innerhalb einer Versuchsdurchführung variierende Belastungsgeschwindigkeiten auftreten, auf Grund des mechanischen Verhaltens von brechendem Eis. Diese Faktoren stellen eine Hürde in der präzisen Analyse und Druck-, beziehungsweise Krafterfassung innerhalb der Kontaktfläche von Eis und Stahl dar.

Durch die Beobachtung des Einflusses der verringerten Temperatur auf die verstärkte Sättigung des Sensors ist für zukünftige Versuche zu beachten, dass die Sensitivität des TekScan-Systems softwareseitig so gewählt wird, dass bei einer Versuchstemperatur von -10°C keine übermäßige Anzahl von gesättigten Sensorzellen auftritt.

In der vorliegenden Arbeit wird der Kalibrierung und Equilibrierung in zwei einzelnen Verfahrensschritten durchgeführt. Für die Kalibrierung werden pro Versuchsdurchführung globale Werte erzeugt, die die Näherungsfunktionen der Kalibrierkurven beschreiben.

Aus der Zusammenführung dieser beiden Verfahrensschritte ergibt sich eine weitere Methode der Kalibrierung und Equilibrierung des TekScan-Sensors. Dabei wird für alle Sensorzellen jeweils eine Kalibrierung durchgeführt, sodass sich das Gesamtverhalten des Sensors aus der Summe des Zellenverhaltens ergibt und eine Equilibrierung anhand von Durchschnittswerten obsolet wird.

Auch der Einsatz von Machine Learning kann in der Analyse von TekScan-Sensoren in Zukunft eine Rolle spielen. Durch die Sammlung von Messdaten und dazugehörigen Informationen über die Randbedingungen der Versuchsdurchführungen kann eine Grundlage geschaffen werden, mit Hilfe eines Machine-Learning-Algorithmus bestimmte Muster im Sensorverhalten zu erkennen, zu quantifizieren und die Erkenntnisse für folgende Versuche nutzen.

Die Anwendbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Kalibrierfunktionen muss in zukünftig durchgeführten Versuchen, deren Versuchsaufbauten vom hier vorliegenden Aufbau abweichen, überprüft werden.

Eine mittels TekScan durchgeführte Druckmessung, die tatsächlich stattfindende physikalische Vorgänge vollumfänglich abbildet, wird jedoch nicht möglich sein, bedingt durch das charakteristische Sensorverhalten, sowie die Vielzahl von Einflüssen auf die Messung.

Abbildungsverzeichnis

1 Aufbau einer TekScan-Druckmessfolie [Gmb] 3

2 Beispielhafte Ausgabe der I-Scan-Software bei 248.4 bar Druckbelastung
(a). Histogramm desselben Messframes mit Normalverteilungsfitt und Standardabweichung sigma (b). Mittlerer DO = 213.83. 5

3 Schema des Einflusses des Materials unter der Sensorfolie. 6

4 Schematische Darstellung verschiedener Ansätze zur Näherung der Messdaten. 7

5 Schematische Darstellung einer Datenreihe (Kreise), dessen Kurven-Fittings und entsprechenden Residuen [UU12, S.7] 8

6 Schema der in allen Versuchen genutzten, trapezförmigen Kraftfunktion des kraftgesteuerten Hydraulikzylinders. 9

7 Schematisches Hydraulikschaltbild des Versuchsaufbaus. 10

8 Schematischer Aufbau des Druckgehäuses (a). Detailansicht des Dichtungsbereichs (b). 12

9 Fotos des Versuchsaufbaus: einfach wirkender Druckzylinder, darüber die Kolbenstange des kraftgesteuerten Zylinders (a) und Druckkammer (b). 12

10 Verlauf des hydrostatischen Drucks und der Zylinderkraft. Diagramm zur Überprüfung des Versuchsstandes auf Verluste im hydraulischen System. 13

11 Beispielhafte Ausgabe der I-Scan-Software. Die Anzahl der Messzellen, deren Digital Output gleich 255 ist, ist für eine sinnvolle Kalibrierung zu hoch (a) und akzeptabel(b). 17

12 Diagramm zur Messdatenselektion (Beispiel: Versuch Nr. 2.5). Schwarz eingegrenzter Bereich: auszuwertender Datenbereich (blauer Graph). Linke Grenze: Kammerdruck >2 MPa (20 bar). Rechte Grenze: Anzahl von Sensels mit DO=255 >0.5% der Sensel-Gesamtanzahl (siehe orangenen Graphen). 29-MPa-Kriterium daher nicht relevant. 18

13 Verlauf der jeweiligen Druckausgabe beim DO200 nach jeweiliger, vorhergehender Pausenzeit 19

14 Messergebnisse der mehrfachen Belastungszyklen. Verlauf der Druckbeiträge je Versuchsreihe (bei DO=200). 20

15 Beispielhafte Messdiagramme der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4 (5 Sekunden Drucksteigerung, 30 MPa (300 bar) Druck) Zeit-Druck-Diagramm (a). DO-Druck-Diagramm (b). 22

16 Vergleich der Druckwerte bei DO=200 entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit. Maximaler Kammerdruck: 300 bar. 23

17 Beispielhafte Messdiagramme der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4 (5 Sekunden Drucksteigerung) Zeit-Druck-Diagramm (a). DO-Druck-Diagramm (b). 25

18 Verlauf der jeweiligen Druckausgabe beim DO=200 nach jeweiliger Pausenzeit und Verlauf der Ableitung, Schnittpunkt mit 0 als globales Minimum verdeutlicht. 27

19 Messergebnisse der multiplen Belastungszyklen. Verlauf der Druckbeiträge je Versuchsreihe (bei DO=200). 28

20	Verlauf der Druckgradienten je Versuchsreihe auf Basis der Messergebnisse der multiplen Belastungszyklen.	30
21	Vergleich der genäherten Kalibrierfunktionen. Versuchsreihen 1 und 2. Maximaler Kammerdruck: 300 bar.	31
22	Prozentuale Abnahme des Drucks um DO=200 zu erreichen, zwischen 2 Versuchen unterschiedlicher Temperatur und gleicher Druckanstiegszeit. 300 bar Kammerdruck.	32
23	Beispielhaftes DO-Druck-Diagramm der Versuchsdurchführungen 1.4 und 2.4. Logarithmische Darstellung.	33
24	Prozentuale Abnahme des Drucks um DO=200 zu erreichen, entsprechend der Druckanstiegszeit. Beispiele: Versuch 1.4 und 2.4.	34
25	Kammerdruckbeträge, bei denen mehr als 0,5% der Messzellen den maximalen Digital Output erreichen.	35
26	Einfluss der Druckanstiegsgeschwindigkeit (300 bar max. Kammerdruck).	36
27	Vergleich der Druckwerte bei DO=200 entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit	37
28	Vergleich der Druckwerte bei DO=200 entsprechend der Druckanstiegsgeschwindigkeit (44 kN Zylinderkraft)	38
29	Vergleich der Messdaten der Versuche 1.4 und 3.4.	39
30	Druckgraphen der Versuche 1.1 und 2.7. Abweichung vom linearen Verlauf mit Pfeilen gekennzeichnet.	40
31	Vergleich der genäherten Kalibrierfunktionen. 150 bar max. Kammerdruck.	41
32	Einfluss der Druckanstiegsgeschwindigkeit (150 bar max. Kammerdruck).	42
33	Prozentuale Abnahme des Drucks um DO=200 zu erreichen, zwischen 2 Versuchen unterschiedlicher Temperatur und gleicher Druckanstiegszeit. 300 bar Kammerdruck und 150 bar Kammerdruck.	43
34	Vergleich der Faktoren a entsprechend der Versuchsdurchführungen.	45
35	Vergleich der Potenzen b entsprechend der Versuchsdurchführungen	46
36	Vergleich der RMSE-Werte von Näherung und Messdaten.	48
37	Vergleich der kalibrierten und gemessenen Druckdaten. Beispiele: Versuch 1.4 und 2.4 (a), Versuch 3.4 und 4.4 (b).	50
38	Vergleich der abschnittswisen Näherung der Messdaten und der Näherung mittels einer einzigen mathematischen Funktion.	54
39	Beispiel zur farblichen Darstellung der Faktoren einer Equilibriermatrix (a). Histogramm derselben Equilibrierfaktoren (b).	55
40	Farbliche Darstellung der Equilibriermatrizen in 6 Schritten. Ergebnisse der Versuchsdurchführung 1.4.	57
41	Exemplarisch betrachtete Sensels (gelb hervorgehoben) während des Equilibriervorganges.	58
42	Kammerdruck-Equilibrierwerte-Diagramm für 300 bar maximalen Kammerdruck.	59
43	Kammerdruck-Equilibrierwerte-Diagramm für 150 bar maximalen Kammerdruck.	60

Literatur

- [And06] Justin Anderson. Asphalt Pavement Pressure Distributions Using TekScan Measurement System. Master's thesis, University of Kentucky, 2006.
- [BBK12] Günter Bamberg, Franz Baur, and Michael Krapp. *Statistik*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München, 17., überarbeitete auflage edition, 2012.
- [BWH⁺09] J. Brimacombe, D. Wilson, A. Hodgson, K. Ho, and C. Anglin. Effect of Calibration Method on TekScan Sensor Accuracy. *Journal of Biomechanical Engineering*, 131, March 2009.
- [DN85] G.P. Davidson and J.F. Nye. A Photoelastic Study of Ice Pressure in Rock Cracks. *Cold Regions Science and Technology*, pages 141–153, 1985.
- [ETEL14] Boris Erceg, Rocky Taylor, Sören Ehlers, and Bernt Leira. A Response Comparison of a Stiffened Panel Subjected to Rule-Based and Measured Ice Loads. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*, 2014.
- [Gmb] CMV Hoven GmbH. Funktionsweise der tekscan-systeme.
- [GW13] Y. Gao and Y.H. Wang. Calibration of Tactile Pressure Sensors for Measuring Stress in Soils. *Geotechnical Testing Journal*, 36(4), 2013.
- [Jor01] Ian Jordaan. Mechanics of Ice-Structure Interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 68:1923–1960, 2001.
- [Kai08] Markus Kaiser. Ein Filter-Trust-Region-Verfahren für nichtlineare Gleichungssysteme. Master's thesis, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg Institut für Angewandte Mathematik, 2008.
- [KDUK12] Hyunwook Kim, Claude Daley, and Chris Ulan-Kvitberg. Reappraisal of Pressure Distribution induced by ice-structure Interaction using high-precision Pressure Measurement Film. *IceTech*, pages 191–199, 2012.
- [Lou05] Manolis I. A. Lourakis. A brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm implemented by Levmar. Institute of Computer Science Foundation for Research and Technology - Hellas (FORTH), February 2005.
- [Mä11] Mauri Määtänen. Ice Crushing Tests With Variable Structural Flexibility. *Cold Regions Science and Technology*, pages 120–128, 2011.
- [Mio18] Maximilian Miotke. Untersuchung des Einflusses der Struktursteifigkeit auf Eislasten. Master's thesis, Technische Universität Hamburg, 2018.
- [MNN99] D. Masterson, D. Nevel, and R. Nordgren. Velocity Effects From Multi-year Ice Tests. *OMEA*, 1999.

- [OBC99] J. K. Otto, T. D. Brown, and J. J. Callaghan. Static and Dynamic Response Of a Multiplexed-Array Piezoresistive Contact Sensor. *Experimental Mechanics*, 39:317–323, 1999.
- [PH97] S. Paikowsky and E. Hajduk. Calibration and Use of Grid-Based Tactile Pressure Sensors in Granular Material. *Geotechnical Testing Journal*, 20,(2):218–241, 1997.
- [PP97] Paul Profos and Tilo Pfeifer. *Grundlagen der Meßtechnik*. De Gruyter Oldenbourg, München, 5. überarbeitete aufl. reprint 2014 edition, 1997.
- [Sod01] Devinder Sodhi. Crushing Failure During Ice-Structure Interaction. *Engineering Fracture Mechanics*, 2001.
- [Ste18] Oliver Stein. *Grundzüge der Nichtlinearen Optimierung*. Springer Verlag GmbH Deutschland, 2018.
- [Tek16] Inc. Tekscan. I-scan Equilibration and Calibration Practical Suggestions Rev. B. 307 West First Street South Boston, MA 02127-1309 USA, March 2016.
- [TRC09] G.S. Throckmorton, J. Rasmussen, and R. Caloss. Calibration of t-scan sensors for recording bite forces in denture patients. *Journal of Oral Rehabilitation*, pages 636–643, 2009.
- [UU12] Michael Ulbrich and Stefan Ulbrich. *Nichtlineare Optimierung*. Springer Basel AG, 2012.

8 Anhang

8 Anhang

Die Messdaten werden auf Anfrage zur Verfügung gestellt.