

UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER STRUKTURSTEIFIGKEIT AUF EISLASTEN

Institut für Konstruktion und Festigkeit von Schiffen
der Technischen Universität Hamburg-Harburg

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Bachelor of Science

vorgelegt von

Maximilian Miotke

im März 2018

Matrikelnummer: 21492130
Studiengang: Maschinenbau
Erstprüfer: Prof. DSc. (Tech.) S. Ehlers
Zweitprüfer: M.Sc. Jan M. Kubiczek
Betreuer: M.Sc. Hauke Herrnring

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass die vorliegende Bachelorarbeit 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 Quelle kenntlich gemacht.

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

Datum: _____ Unterschrift: _____

Danksagungen

An dieser Stelle möchte ich mich bei M.Sc. Jan M. Kubiczek und M.Sc. Hauke Herrnring für die aufgewendete Zeit und Betreuung bedanken.

Ebenfalls bedanke ich mich bei den Technischen Mitarbeitern um Herrn Koch, Herrn Ringlewski sowie Herrn Harms, die mich tatkräftig bei der Strukturprobenvorbereitung unterstützt haben.

Des Weiteren möchte ich mich bei Robin Härer für die Eisprobenvorbereitung, sowie das Erstellen der Schnittbilder der Eisproben bedanken.

Zuletzt möchte ich mich bei Prof. DSc. (Tech.) Sören Ehlers bedanken, welcher diese Arbeit erst ermöglicht und die technischen Mittel und das Material zur Verfügung gestellt hat.

Abstract

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Eis-Struktur-Interaktionsversuchen mit Hilfe derer der Einfluss der Struktursteifigkeit auf Eislasten experimentell untersucht wird. Hierbei werden sowohl physikalische (Dicke, Temperatur) als auch mechanische (Druckfestigkeit, Biegesteifigkeit, relative/ absolute Durchbiegung, Reibungsverluste, Reaktionskräfte, Kontaktflächenentwicklung) Aspekte betrachtet. Es werden bisherige Erkenntnisse und Wissen aufgegriffen und zusammen mit den neuen Erkenntnissen Rückschlüsse auf das Eis-Stahl-Verhalten geschlossen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	II
Abbildungsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
2 Stand des Wissens	3
3 Versuch	17
3.1 Versuchsaufbau	17
3.2 Versuchsergebnisse	25
3.3 Versuchsauswertung und Diskussion	32
4 Zusammenfassung und Ausblick	51
5 Digitaler Anhang	55

Tabellenverzeichnis

1	Vergleich der Kontaktflächenentwicklung von spröden und duktilen Versuchen mittels der aus den TekScan TM - Druckmessfolien gewonnenen Daten bei einer starren Struktur	26
2	Tabellarische Auflistung der Frequenzen	37
3	Tabellarische Auflistung der Maximal- und mittleren Kräfte	39
4	Tabellarische Auflistung der Kollisionsenergien und Energiedissipationen in die Struktur	42
5	Tabellarische Auflistung des mittleren Flächenverhältnisses, des mittleren Drucks und des mittleren nominellen Drucks	49
6	Tabellarische Auflistung der Verhältnisse von maximaler plastischer Durchbiegung zu maximaler Gesamtdurchbiegung	50

Abbildungsverzeichnis

1	Eiswachstum in Stufen [1, S. 2]	4
2	Dünne Eisschicht mit Einlagerungen [2, S. 109]	6
3	„Multi-year ice“ mikro- und makroskopisch	7
4	Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Eis bei unterschiedlichen Versagensverhalten [3, S. 16]	8
5	Kontaktfläche- und druck bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $30 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (links) und $0,3 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (rechts) [4, S. 173]	11
6	Deformationsverhalten von polykristallinem Eis bei einer Korngröße von 1 mm [5, S. 4067]	12
7	Kristallstruktur von Eis [6, S. 20]	13
8	Schematische Darstellung des Versagensverhaltens von Eis [7, S. 1925] . . .	13
9	Schematische Darstellung des Versagensverhaltens von Eis (2) [7, S. 1933] .	14
10	Aufzeichnungen des Belastungsverlaufs aufs Eis und der Strukturdurchbiegung bei verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten bei einer Eigenfrequenz der Struktur von 2,89 Hz [8, S. 633]	16
11	Eisprobenherstellung	17
12	Vorbereitung und Geometrie der Eisproben	18
13	Grober Versuchsaufbau	20
14	Versuchsaufbau im Kühlcontainer für die starre Struktur	21
15	Schematischer Aufbau und Spezifikation der Tekscan TM -Druckmessfolien [9]	22
16	Versuchsaufbau im Kühlcontainer für die deformierbare Struktur	23
17	Vorbereitung der Strukturen	24
18	Starre Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil	25
19	Vergleich von duktilem (oben) und sprödem (unten) Eisverhalten gegen eine starre Struktur	27
20	Dünnschnitt einer duktilen Eisprobe	27
21	Starre Struktur, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde	28
22	Starre Struktur, $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil und spröde	29
23	Kontaktfläche auf der Struktur bei 60 mm Zylinderweg, $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	29
24	Vergleich von duktilem (oben) und sprödem (unten) Eisverhalten bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ gegen eine starre Struktur	30

25	Vergleich der Durchbiegung der Strukturen verschiedener Struktursteifigkeiten bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit	31
26	Starre Struktur, verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten, spröde und duktil	32
27	Frequenzgang, starre Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil	33
28	Frequenzgang, starre Struktur, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde	34
29	Frequenzgang, starre Struktur, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde	34
30	Vergleich des Kraftverlaufs und der resultierenden Durchbiegung der 3 mm Struktur bei $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (linke Spalte) und $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (rechte Spalte) Kollisionsgeschwindigkeit	35
31	Frequenzgang, 3 mm Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil	36
32	Vergleich des Kraftverlaufs und der resultierenden Durchbiegung der 3 mm (links) und 12 mm (rechts) Struktur bei $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit . .	36
33	Vergleich der Maximalkraft und mittleren Kraft bei verschiedenen Struktursteifigkeiten	38
34	Kollisionsenergie, verschiedene Struktursteifigkeiten, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil	40
35	Kollisionsenergie, verschiedene Struktursteifigkeiten, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde	41
36	Kollisionsenergie, starre Struktur, $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde	42
37	Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 3 mm Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	44
38	Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 12 mm Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	45
39	Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 3 mm Struktur, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	47
40	Vergleich der mittleren Flächenverhältnisse	48

1 Einleitung

Die Schifffahrt in teil- oder ganz eisbedeckten Gewässern war lange Zeit eine saisonabhängige Aktivität. Mit Segelschiffen war es lediglich möglich Eis zu umsegeln, nicht zu durchbrechen. Dies änderte sich Mitte des 19. Jahrhunderts. Das Aufkommen von Schiffen mit Stahlrümpfen, welche von Dampfmaschinen und später von Dieselmotoren über Propeller angetrieben wurden bildeten die nötige Grundlage. Das Potential Eis zu brechen statt es zu umfahren ermöglichte die Perspektive auf einen ganzjährigen Schiffsverkehr. Der erste Eisbrecher mit einem Stahlrumpf welcher den Weg für andere Schiffe freibrach war das russische Schiff Pilot, gebaut im Jahr 1864. Besonders machte dieses Schiff der flache Bug, welcher ein Auflaufen des Schiffes auf das Eis ermöglichte, wodurch das Eis aufgrund des Gewichtes des Schiffes zerbrach. Diese Neuerung verhalf dazu die Sommersaison zu verlängern, jedoch dauerte es noch Jahrzehnte bevor das Verkehren in der Wintersaison einen größeren ökonomischen Einfluss bekam. Als die Wintersaison wirtschaftlich gesehen immer mehr an Bedeutung zunahm, wurde es notwendig Vorschriften und Regeln für Schiffe in eisbedeckten Gewässern zu entwickeln. Die ersten Normen und Regeln wurden 1890 in Finnland, damals noch ein Teil von Russland, in Kraft gesetzt. Von da an wurden diese stets ergänzt, verbessert und durch neue Erkenntnisse aktualisiert. [10]

Seither sind die Normen und Zulassungsvorraussetzungen angestiegen und das Verkehren in eisbedeckten Gewässern benötigt ein hohes Maß an materialwissenschaftlichem Ingenieurwissen, um einen sicheren Schiffsbetrieb zu gewährleisten. Sowohl zur Sicherheit der Menschen an Bord und Land, als auch zum Schutz der empfindlichen Umwelt. Besonders Letzteres nimmt gegenwärtig enorm an Wichtigkeit zu und verändert den Blickwinkel beim Entwurf und der Konstruktion eisgehender Schiffe. Einen der größten Einflussfaktoren und Gefahrenquellen bildet hierbei das vor allem in polaren Gewässern vorkommende und umhertreibende Meer- bzw. Packeis. Dieses stört oder verhindert teilweise ganz den Schifffahrtsbetrieb, was zu enormen finanziellen Einbußen durch entfallene Wirtschaftseinnahmen sowie durch kostenintensive Reparaturen mit langen Reparaturstandzeiten führt. Um einen sicheren Betrieb gewährleisten zu können ist es notwendig zu wissen, welche Auswirkungen das Eis auf die Schiffsstruktur ausübt. [2]

Die zweite große Sparte bildet der Bereich der Offshorebauvorhaben. Hier ist die Aktivität in den letzten Jahrzehnten bedeutend angestiegen. Vorherrschende Beweggründe

dafür sind die Expansion im Bereich der Erkundung von Öl und Gas in der offenen See in diversen Regionen in denen umhertreibende Eisschollen ein gewöhnliches Vorkommen sind. Diese Regionen sind für Ihr reichhaltiges Vorkommen von Erdöl und Erdgas, jedoch ebenso für die schwierigen Nebenbedingungen bekannt, welche bisher das Arbeiten in diesem Gebiet stark eingeschränkt haben [2]. Ein dokumentiertes Unglück aus dem Jahr 2011 an der russischen Pazifikostküste, zeigt was ein Unterschätzen dieses Naturphänomens bewirkt und welche verheerenden Folgen entstehen können. Bei diesem Unglück ist eine Bohrinselfür hohe See durch Eis und Wellen stark beschädigt worden und untergegangen. Mehrere Menschen kamen bei dem Unglück ums Leben [11].

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Eis-Struktur-Interaktionsversuchen mit Hilfe derer der Einfluss der Struktursteifigkeit auf Eislasten experimentell untersucht wird. Hierzu werden geometrisch fest definierte Eisproben gegen Strukturen unterschiedlicher Steifigkeit gedrückt. Eine hydraulische Presse mit variabel einstellbarer Vorschubgeschwindigkeit des Hubzylinders und einer maximalen Hubkraft von 160 kN dient in den Versuchen als Belastungserzeuger. Es werden TekscanTM-Druckmessfolien, zur Erfassung der Vorgänge in der Kontaktfläche zwischen den Strukturen und Eisproben, verwendet. Mit Hilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera wird der Kollisionsvorgang aufgezeichnet um hochschnelle Vorgänge festhalten und die Versuche nachträglich besser auswerten zu können. Ein auf einer Schiene linearverfahrender Laserdistanzmesser sowie ein linearer Wegaufnehmer werden zur Messung der Durchbiegung der Strukturen verwendet. Aus den gewonnenen Daten werden Frequenzgänge, Belastungsverläufe, Kollisionsenergieverläufe sowie Kontaktflächenentwicklungen ermittelt, untersucht und in Zusammenhang mit der Struktursteifigkeit und Kollisionsgeschwindigkeit ausgewertet. Hierbei werden verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten untersucht, um ein breites Spektrum an Kollisionsszenarien zu erfassen und um einen Einblick in die variierenden Eigenschaften der Eisproben in Bezug auf die Kollisionsgeschwindigkeiten zu erhalten.

2 Stand des Wissens

Es wurden viele Untersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften von Eis zu erfassen. Besonders in den 70ern, 80ern, und frühen 90ern als die Aktivität in der Kanada und Alaska verbindenden Beaufort See rapide anstieg [2]. Seither dauern die Forschungen an dem Verhalten von Eis an. Verbesserte und neue Techniken ermöglichten eine genauere Betrachtung der Kollisionsvorgänge, und das Ziehen neuer Rückschlüsse.

Die makroskopischen Eiseigenschaften variieren sehr stark, abhängig von diversen Faktoren wie Alter, genaue Herkunft, Zusammensetzung oder auch der Verteilung, Morphologie und Größe der Eiskristalle. Zur Verdeutlichung dessen kann beispielsweise Eis, welches in den nördlichen Küstengewässern Russlands nahe großer Flussmündungen, mit Eis welches im offenen Meer, wie der Tschuktschensee, umhertreibt, verglichen werden. Hier kann es u. A. aufgrund des Kontaktes des Eises mit Süßwasser zu großen Unterschieden im Salzgehalt kommen, was sich stark auf die physikalischen und chemischen Eigenschaften auswirkt. Zudem spielt die Eisschollengröße eine bedeutende Rolle. Packeis, wie es eher in der Tschuktschensee aufzufinden ist, stellt eine viel größere Gefahr dar als beispielsweise Treibeis nahe Küstenregionen. Daher sind die Forschungen an Eiseigenschaften zum Teil sehr verstreut. [2]

Süßwasser (Frischwasser), wie es in kleinen Seen vorkommt, gefriert unter gleichen atmosphärischen Bedingungen früher als Salzwasser in Küstenregionen. Der Hauptgrund hierfür ist, dass Salzwasser seine höchste Dichte im Gegensatz zu Süßwasser nicht oberhalb des Gefrierpunktes hat. Wenn Frischwasser von der Wasseroberfläche aus Kälte erfährt, wird das Wasser senkrecht zur Oberfläche durchmischt, da das Abkühlen des Wassers an der Oberfläche zu einer Dichteerhöhung führt, worauf das erkaltete Wasser absinkt und wärmeres Wasser aufsteigt. Dann beginnt der Abkühlungskreislauf von neuem bis im gesamten Gewässer eine Temperatur von ca. 4 °C erreicht ist. Ab dieser Temperatur bleibt die kalte Wasseroberflächenschicht oben, da kein Wechsel mit warmen Wasser mehr stattfinden kann. Die oberste Wasserschicht beginnt von nun an schnell zu gefrieren. Daher bildet sich relativ schnell bereits eine Eisschicht, jedoch nimmt das Zunehmen der Eisschicht viel Zeit in Anspruch, da zum einen das Wasser unter der Eisschicht immernoch über dem Gefrierpunkt ist und zudem die Eisschicht auch eine Art Isolation darstellt. Anders ist es, wenn starke Winde das Eis durchmischen oder es sich um Salzwasser handelt. In diesem

Fall muss das ganze Gewässer zunächst auf die Gefriertemperatur gekühlt werden bevor sich Eis bilden kann. Ist dies aber erstmalig geschehen, so friert das Wasser sehr zügig. [1]

Die Literatur unterscheidet grundsätzlich verschiedene Eisarten bzw. -größen, siehe Abbildung 1. Es beginnt mit „Grease ice“, hiervon wird bei ersten Anhäufungen von Frazil-Eis (lose Eiskristalle im Wasser) gesprochen. Die nächste Stufe lautet „Pancake ice“, hierbei handelt es sich um größere Ansammlungen von Frazil-Eis, welche viele größere Einheiten auf dem Eis bilden, aber noch keine zusammenhängende Eisfläche darstellen. Als nächstes folgt „Nilas“, hierbei handelt es sich bereits um eine durchgehende Eisschicht von bis zu 10 cm Dicke. Der „Nilas“ wird in zwei Unterkategorien eingestuft. Bei einer Eisdicke von < 5 cm wird vom „Dark Nilas“ und bei einer Dicke von 5 - 10 cm vom „Light Nilas“ gesprochen. Die nächste Oberstufe bildet das „Young ice“, von welchem bis zu einer Eisdicke von 0,3 m gesprochen wird.

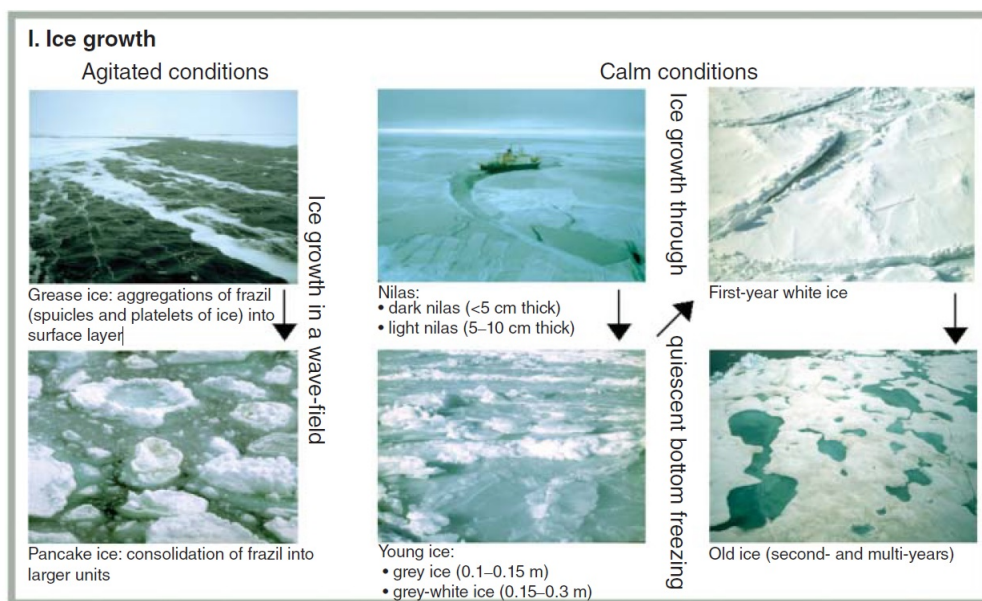


Abbildung 1: Eiswachstum in Stufen [1, S. 2]

Das „Young ice“ wird auch in zwei Unterkategorien aufgeteilt. Bis zu einer Eisdicke von 0,1 - 0,15 m wird von „Grey ice“ und ab 0,15 bis 0,3 m von „Grey-White ice“ gesprochen. Die darauffolgende Überkategorie heißt „First-year ice“. Dieses Eis unterscheidet sich zum „Young ice“ vor allem im Alter. „First-year ice“ hat alle bisherigen Stadien durchlaufen, ist aber nicht älter als ein Jahr alt. Das heißt, dass das Eis in den Sommermonaten komplett

schmilzt und in den Wintermonaten wieder neu entsteht. Die letzte Kategorie bildet das „Old ice“. Dieses unterscheidet sich zum „First-year ice“ insofern, dass es älter als ein Jahr ist und somit mindestens einen Sommer überstanden hat. Das „Old ice“ kann wiederum in zwei Unterkategorien aufgeteilt werden. Zum einen das „Second-year ice“, welches nur einen Sommer überstanden hat und zum anderen das „Multi-year ice“, welches mindestens zwei Sommer bzw. Jahre überstanden hat. [1]

Die meisten Eisforschungen beziehen sich aber auf „Young ice“, „First-year ice“ und „Old ice“. Diese Eiserscheinungen stellen für die Schifffahrt das größte Hindernis dar und werden deshalb vorrangig betrachtet.

Meereis besteht aus reinem Eis, Sole, diversen Gasen und abhängig von der Temperatur aus verschiedenen Arten von Salzen. Viele Variationen in der Entstehung von Meereis, welche durch variierende Umwelteinflüsse hervorgerufen werden, führen auf mikroskopischer Ebene zu verschiedenen Kornstrukturen des Meereises. Die am häufigsten anzutreffenden Strukturen bzw. Formen sind granulare, säulenartige sowie diskontinuierliche Körner. Granulare Kornstrukturen können auf vielen verschiedenen Wegen entstehen, jedoch ist die häufigste Entstehungsweise durch einen Verwirbelungsvorgang, welcher durch Wellen, die auf mit Frazil-Eis bedeckte Eisflächen treffen, entsteht. Granulare Kornstrukturen sind normalerweise isotrop, auch wenn Sole und Salzeinschlüsse vorhanden sind, da diese in der Regel zwischen den einzelnen Kristallen und nicht innerhalb dieser auftreten. [2]

Säulenartige Kornstrukturen entstehen bei sehr ruhiger See ohne Wellen beginnend auf der Wasseroberfläche oder aber unter einer Schicht mit granularer Kornstruktur sobald die vertikalen Schwingungen abgeklungen sind und ein beinahe Ruhezustand erreicht ist. In Abbildung 2 ist solch eine Kornstruktur zu sehen. Solche säulenartigen Körner bzw. Kristalle können sich über die gesamte Dicke einer Eisschicht ziehen und sind hierbei parallel zum Wärmefluss ausgerichtet, d.h. in der Regel senkrecht zur Wasseroberfläche. In säulenartigen Kristallen sind die Sole- und Salzeinschlüsse in einer Reihe von senkrecht orientierten Ebenen innerhalb der Kristalle angeordnet. Die Abstände zwischen den Ebenen sind hierbei etwas weniger als 1 mm. Aufgrund dessen, dass solche Einschlüsse den direkten „Eis-zu-Eis“-Kontakt stören, bilden sie Schwachstellen in der Eisstruktur. [2]

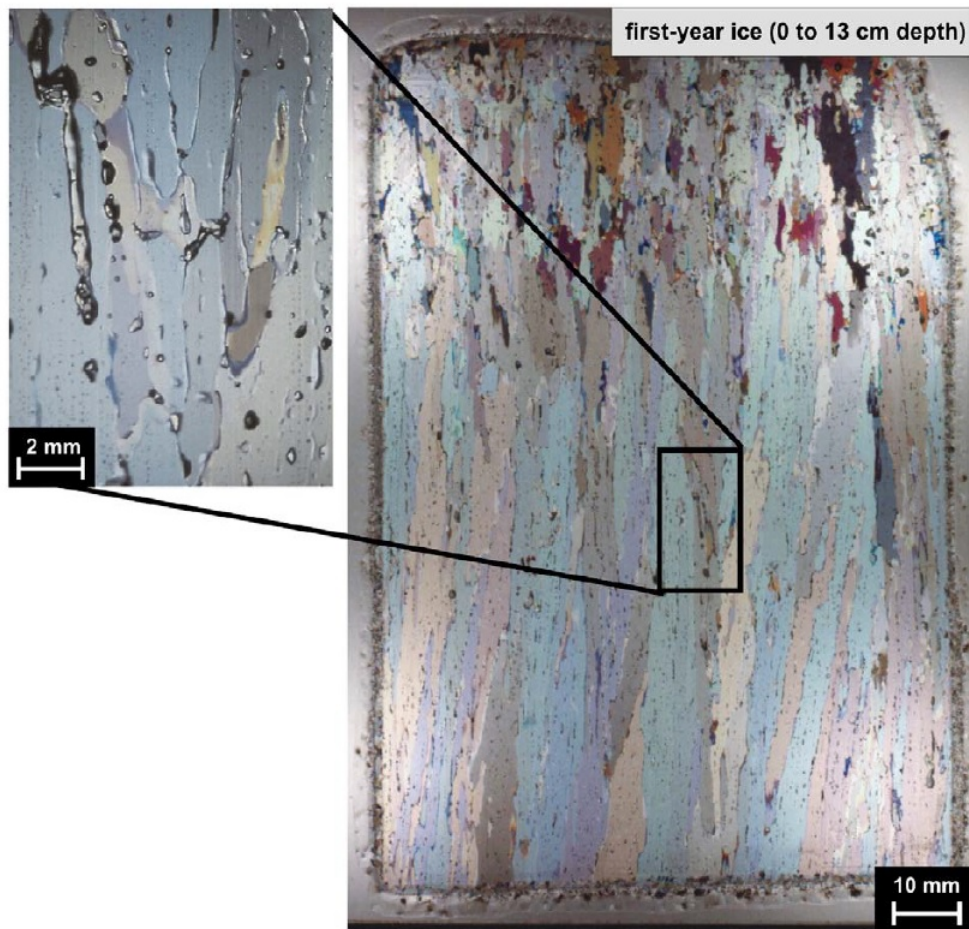
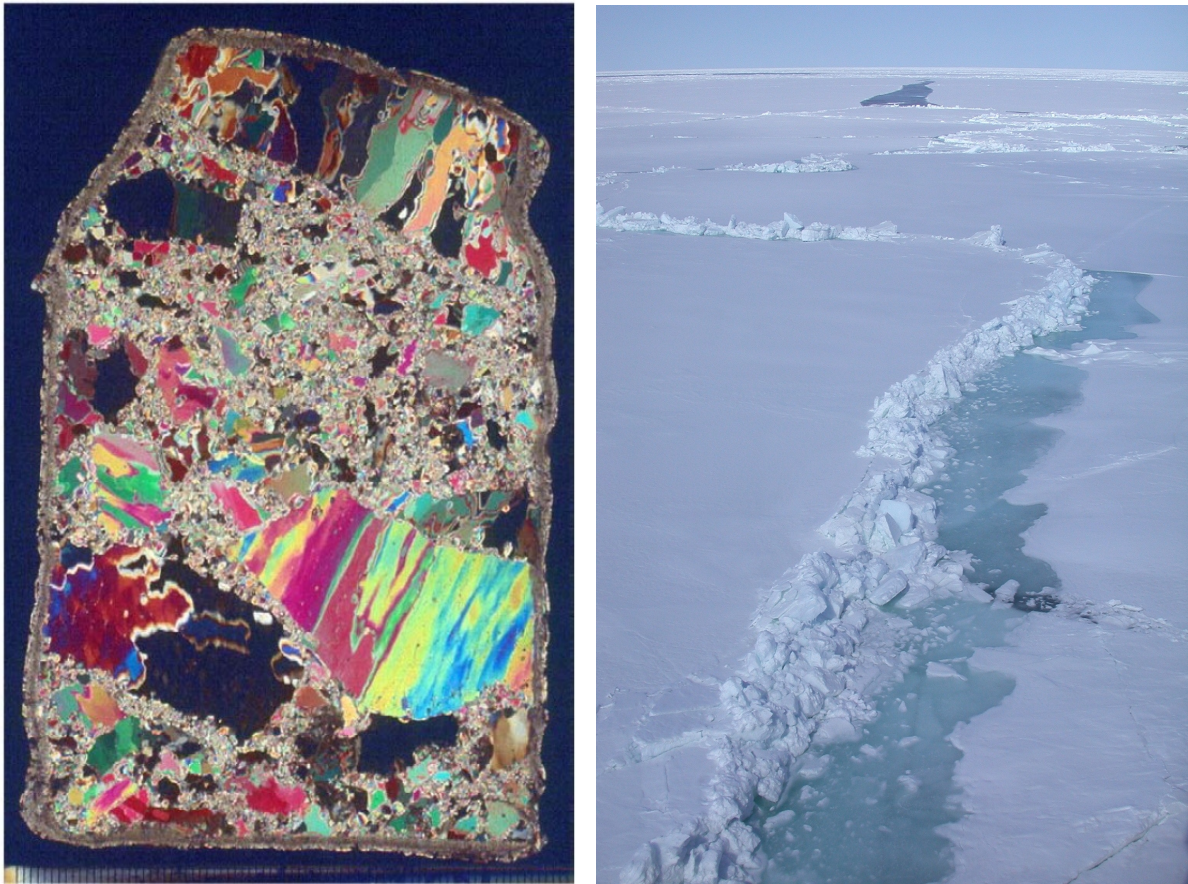


Abbildung 2: Dünne Eisschicht mit Einlagerungen [2, S. 109]

Großen Einfluss auf die Kornstruktur von Meereis haben auch mechanische Einflüsse und daraus resultierende Deformationen. So ist auf Dünnschnitten von „Multi-year ice“ eine Kornstruktur zu erkennen, die eine Mischung bilden aus granularen-, granular-säulenartigen Körnern sowie eckigen Eisfragmenten, die von feingranularer Struktur umhüllt sind (brekziiert), siehe Abbildung 3 (a). Dies entsteht durch die enormen Kräfte, wenn riesige Eisplatten aneinander stoßen und reiben, wobei es zur Entstehung von Presseisrücken kommt. Eine weitere Ursache ist die Meeresbewegung, welche zu Biegebelastungen und in Folge dessen zum Versagen der Eisplatten führt. Hierbei kommt es kurzzeitig zu hohen inneren Spannungen/ Drücken die zu Kornstrukturänderungen führen. Diese dabei entstehende gemischte Kornstruktur vom „Multi-year ice“ führt zu isotropen Eigenschaften, wo hingegen „Young-ice“ oder „First-year ice“ aufgrund der geordneteren Kornstrukturen eher anisotropische Eigenschaften aufweisen. [2]



(a) „Multi-year ice“ im Schnitt (polarisiert) [2]

(b) Presseisrücken im „Multi-year ice“ [12]

Abbildung 3: „Multi-year ice“ mikro- und makroskopisch

Zusammenfassend kann Meereis sowohl isotrope als auch stark anisotrope Eigenschaften aufweisen und dies bei Versuchen stets berücksichtigt werden muss, weil die mechanischen Eigenschaften stark davon abhängig sind und ansonsten leicht falsche Ergebnisse entstehen.

Wenn Meerwasser gefriert, versucht das daraus entstehende Meereis stets den Zustand der geringsten freien Energie anzunehmen und bemüht sich die Salze und Verunreinigungen, welche im Meerwasser gegenwärtig sind, hinauszutragen. Dies schafft es jedoch nicht komplett, sodass einige Salze in Solelaken eingebettet an Korngrenzen oder innerhalb eines Kornes stecken bleiben, siehe Abbildung 2. Wieviel Salz und Verunreinigungen im Eis bleiben hängt von vielen Faktoren ab. Unter anderem vom Salzgehalt des Meerwassers und der Eiswachstumsrate. Trotzdem ist der Unterschied immens. So hat Meerwasser im Durchschnitt einen Salzgehalt zwischen 3,2 - 3,5 % und Meereis nur noch 0,4 - 0,6 %. [2]

Abgesehen von der mikroskopischen Eiseigenschaften, gibt es auch makroskopische Eigenschaften, welche starken Einfluss auf das Verhalten von Eis haben. Die Eisdicke ist einer der wichtigsten Parameter, wenn es um das Eisverhalten geht. So hat die Eisdicke einen direkten Einfluss auf das Versagensverhalten von Eis. Mit steigender Dicke nimmt die Festigkeit zu, woraus sich auch schlussfolgern lässt, dass Strukturbelastungen bei Eis-Struktur-Interaktionen mit zunehmender Eisdicke ansteigen. [2]

Viele Forscher haben mit Hilfe von Druckversuchen an kleinen bis mittelgroßen Eisproben versucht den Eiszerstörungsprozess zu verstehen, um daraus ein theoretisches Modell zu entwickeln, welches den genauen Vorgang beschreibt. Hierbei wurden unter anderem auch Zusammenhänge zwischen der Kollisionsgeschwindigkeit des Druckversuchs und der Art des Bruchverhaltens entdeckt. So wurde herausgefunden, dass Eis bei Versuchen mit langsamer Kollisionsgeschwindigkeit starkes Kriechverhalten aufweist. Mit zunehmender Geschwindigkeit wandelte sich das Bruchverhalten von ursprünglich nahezu komplett duktilem, über eine Mischphase zu hauptsächlich sprödem Verhalten [4].

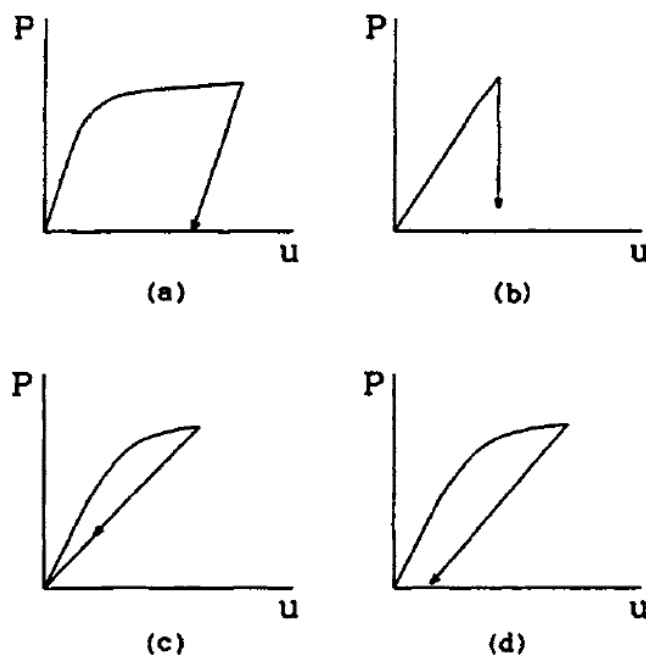


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramme von Eis bei unterschiedlichen Versagensverhalten [3, S. 16]

In Abbildung 4 sind Spannungs-Dehnungs-Diagramme von verschiedenen Eisversagensverhalten dargestellt, die den Unterschied zwischen duktilem und sprödem Verhalten aufzeigen. Charakteristisch für duktilen Verhalten ist eine irreversible Dehnung über den linear-elastischen Bereich hinaus, siehe Abbildung 4 (a). Außerdem versagt das Eis erst bei höheren Dehnungen. Sprödes Verhalten hingegen zeichnet sich durch ein Versagen des Eises bei Erreichen der Elastizitätsgrenze aus, siehe Abbildung 4 (b). Hierbei kommt es zu keiner plastischen Verformung des Eises. Zwischen diesen beiden Versagensmustern gibt es einen Mischbereich bei dem sowohl duktilen als auch sprödes Verhalten beobachtet wird, siehe Abbildung 4 (c) und (d).

Unterscheidungen zwischen sprödem und duktilem Verhalten wurden von anderen Forschern aus den Dehnungsraten (Dehnung abgeleitet nach der Zeit) von Eisproben geschlossen. Grundlage dafür ist der Gedanke, dass duktilen und sprödes Verhalten aus den Grundeigenschaften von Eis resultiert, welches auf Belastungen gleichzeitig mit Kriechen und elastischer Deformation reagiert. Bei Dehnungsraten von 10^{-4} s^{-1} oder weniger bei Druck- und 10^{-5} s^{-1} oder weniger bei Zugversuchen, tendiert Eis eher dazu Kriechverhalten aufzuzeigen [4]. Bei duktiler Deformation (Kriechverhalten) ist ein Teil der Deformation auch elastisch, welche beim Entfernen der Belastung reversibel ist [13]. Es wurde von Glenn [14] beobachtet, dass die Dehnungsrate proportional zur dritten Potenz der Belastung ist. So ist beispielsweise bei einer Dehnungsrate von 10^{-5} s^{-1} bei einer Belastung von 2 MPa, einer Dehnungsrate von $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ bei einer Belastung von 8 MPa ($2^3 = 8$), dann bei einer Belastung von 512 MPa ($8^3 = 512$) eine Dehnungsrate von $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ zu erwarten. Bei höheren Dehnungsraten zeigt Eis eher elastisches Verhalten auf, da es für duktile Verformung mehr Zeit benötigt, wodurch es darauffolgend nach dem Überschreiten der Elastizitätsgrenze zu sprödem Eisversagen kommt [4].

Neben den ursprünglichen Messungen an klein- bis mittelskaligen Proben wurden zum Abgleich auch Messungen an realitätsnahen Großproben durchgeführt. Vor allem von Sanderson [15] sind solche Versuche bekannt, jedoch aufgrund der erhöhten Kosten und Komplexität der Versuchsausführung nur in geringer Anzahl.

In der Literatur zu Eisversuchen wird der Effektivdruck auf die Struktur definiert als die absolute aufgebrachte Kraft dividiert durch die nominelle Kontaktfläche. Darstellungen, welche die Effektivdrücke über unterschiedlichen nominellen Kontaktflächen aufzeigen,

zeigen für kleinskalige Proben ein breites Druckspektrum (1-20 MPa) und bei großskaligen Proben ein geringes Druckspektrum (0,5-3 MPa) auf. Das liegt daran, dass Kraftschwankungen auf größeren nominellen Kontaktflächen aufgrund des relativen Verhältnisses von der Kraft zur Fläche eine geringere Auswirkung auf den resultierenden Druck haben. Sanderson [15] nahm daraufhin an, dass ein sinkender Effektivdruck mit einer Vergrößerung der nominellen Kontaktfläche einhergeht. Sodhi [4] hingegen fand heraus, dass die Spektren der Effektivdrücke von großskaligen und kleinskaligen Proben nahezu dieselben sind, sofern sie bei selber Kollisionsgeschwindigkeit durchgeführt worden sind. Sodhi [4] zeigte damit ein zu Sandersons Aussagen [15] konträres Verhalten, wonach der Effektivdruck stark von der Skalierung der Probe und damit von der nominellen Kontaktfläche abhängt. Die Effektivdrücke seien trotz des hohen nominellen Kontaktflächenunterschieds nahezu gleich. Als Haupterkenntnis stellte Sodhi [4] fest, dass die Effektivdrücke stark variieren können, diese aber durch die Art des Bruchverhaltens, also von duktilem oder sprödem Verhalten geprägt sind. Dies wiederum hängt von der Kollisionsgeschwindigkeit ab.

Später wurden erstmals mit neuen Techniken und Möglichkeiten weitere Tests mit mittelgroßen Proben durchgeführt. So wurden von Seaki u. A. und Takeuchi u. A. , entnommen aus Sodhi [4], Tests durchgeführt, in welchen die Eisproben in 10 cm breite Segmente unterteilt wurden und erstmals Kräfte in allen drei Richtungen in jedem Segment und ein Moment, um eine Achse die parallel zur Eisprobenoberfläche verlief, gemessen werden konnten.

Sodhi [4] verwendete Druckmessfolien, welche er zwischen die Probe und die Struktur legte. Das ermöglichte ihm die Messung der aktuellen und nicht wie vorher der nominellen Kontaktfläche und zudem das Erfassen der genauen Drücke innerhalb der Kontaktfläche. Er fand bei diesen Tests heraus, dass die reale Kontaktfläche stark von der Kollisionsgeschwindigkeit abhängt. So ergaben sich bei hohen Kollisionsgeschwindigkeiten ($3 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $30 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$) eher linienartige Kontaktflächen und bei niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten ($0,3 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$) eine sich allmählich vergrößernde Kontaktfläche, was auf das Kriechverhalten vom Eis zurückzuführen ist, siehe Abbildung 5.

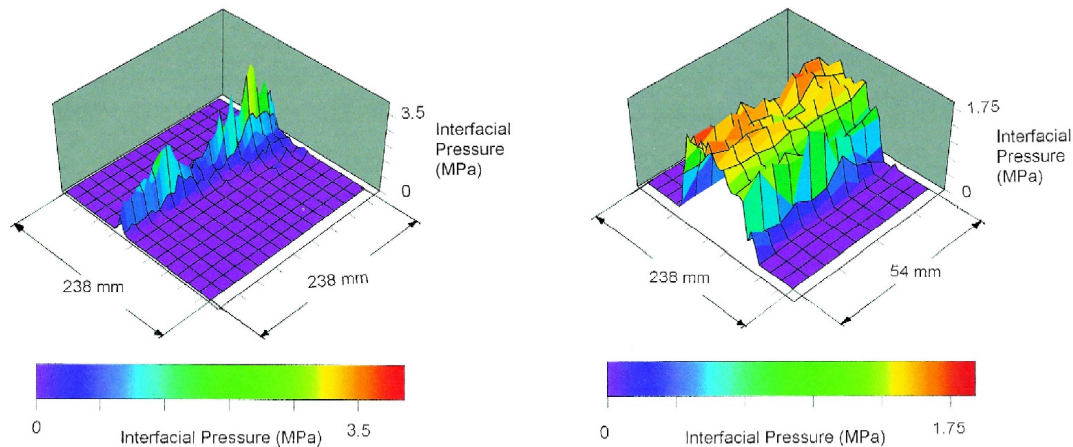


Abbildung 5: Kontaktfläche- und druck bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $30 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (links) und $0,3 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (rechts) [4, S. 173]

Masterson u. A., entnommen aus Jordaan [7], konnten in mittelskaligen Tests ebenfalls stark variierende Effektivdrücke in ihren Tests feststellen. Sie haben eine Reihe von Tests durchgeführt mit Kollisionsgeschwindigkeiten von $0,1 - 100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und festgestellt, dass bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $3,2 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ der höchste Druck erreicht wurde.

Jordaan [7] hat die Vorgänge bei Eis-Struktur-Interaktionen genauer untersucht. Allerdings konzentrierte er sich hierbei auf Kollisionsvorgänge mit „First-year ice“ und „Multi-year ice“ verbunden mit hohen Kollisionsgeschwindigkeiten, da diese ihm nach die Bedingungen im Schiffsverkehr am besten widerspiegeln. Er hat bei Tests an mittelskaligen Eisproben beobachtet, dass es extrem regelmäßige zyklische Lastvariationen innerhalb einer Hochdruckzone (Zone in der die hauptsächliche Kraftübertragung in der Kontaktfläche stattfindet) über mehrere Zyklen gibt, welche von weniger regelmäßigen Schwankungen überlagert sind. Die regelmäßige zyklische Aktivität ist hierbei der dynamischen Interaktion einer zerstörten Eisschicht mit der Struktur und die Schwankungen dem Absplittern von Eisstückchen zuzuschreiben. Jordaan [7] stellte zudem fest, dass es zu Rekristallisationsvorgängen in der Grenzeisschicht in den Hochdruckzonen kommt, welche von Mikrobrüchen am Rande der Hochdruckzonen und Druckreduzierung bei großen Umlagerungen begleitet werden.

Aus den Erkenntnissen von Duval u. A. [5] lassen sich selbige Ergebnisse ableiten. In einem von Ihnen erstellten Diagramm, siehe Abbildung 6, lässt sich mithilfe der normierten

Temperatur vom Eis (Abszisse) und der normierten Belastung auf das Eis (Ordinate) das Deformationsverhalten vom Eis bestimmen. Es ist zu sehen, dass es bei Eis, welches hohen Belastungen ausgesetzt ist und eine Temperatur nahe dem Gefrierpunkt besitzt, zu dynamischer Rekristallisation kommt.

Creep of Polycrystalline Ice

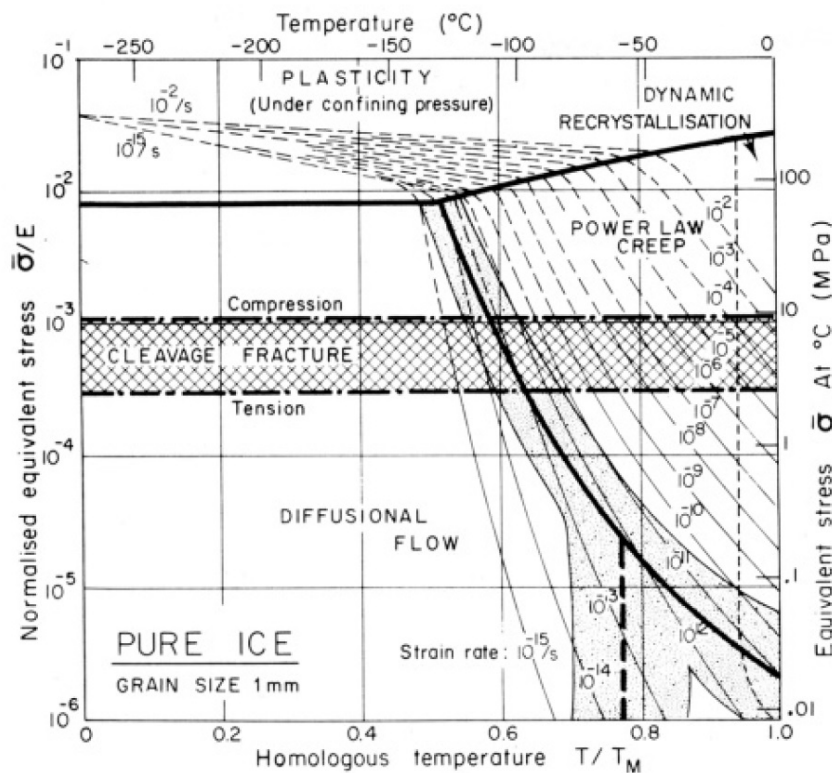


Figure 1. A deformation mechanism diagram for ice with a grain size of 1 mm. It shows the regimes of power-law (or Glen-law) creep and of diffusional flow, and the onset of cleavage fracture.

Abbildung 6: Deformationsverhalten von polykristallinem Eis bei einer Korngröße von 1 mm [5, S. 4067]

Um jedoch die normierte Belastung bestimmen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie das Elastizitätsmodul von Eis ist. Bei Einzelkristallen variiert das Elastizitätsmodul von 12 GPa, bei Belastungen entlang der am wenigsten nachgiebigen Ausrichtung (parallel zur c-Achse), bis hin zu 8,6 GPa, bei der nachgiebigsten Ausrichtung des Eiskristalls (geneigt zur c- und a-Achse) [16]. Eis hat in der Regel eine hexagonale Kristallstruktur,

wobei die a-, b- oder c-Achse die Einheitszellenkantenlängen widerspiegeln [6]. Speziell in der hexagonalen Kristallstruktur entspricht die a-Achse von der Länge her der b-Achse, weshalb auch nur von der a- und c-Achse gesprochen wird, siehe Abbildung 7. Bei zufällig ausgerichtetem polykristallinem Eis, für welches das Diagramm von Duval u. A. [5] gilt, ist ein Elastizitätsmodul von 9 MPa eine gute Annäherung [16].

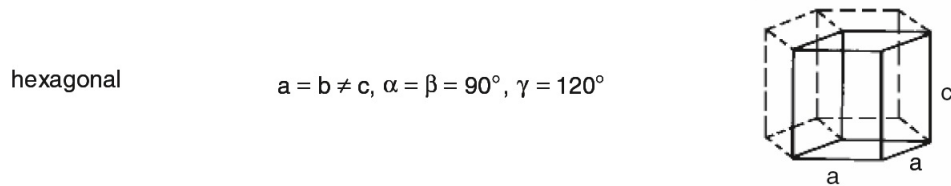


Abbildung 7: Kristallstruktur von Eis [6, S. 20]

Jordaan [7] legte außerdem Wert darauf zu achten, dass Meereis ein geophysikalisches Material ist, welches unter natürlichen Konditionen, mit vielen Poren, Fehlern, Brüchen und Schwächen entstanden ist. Dieses Meereis wird bei höheren Kollisionsgeschwindigkeiten aufgrund der Defekte und Fehler niedrigeren Kräften standhalten können, als Eis welches unter Laborbedingungen entstanden ist. Dies liegt daran, dass Risse im Eis dazu tendieren dort zu entstehen, wo Defekte im Eis sind und zugleich hohe Drücke herrschen.

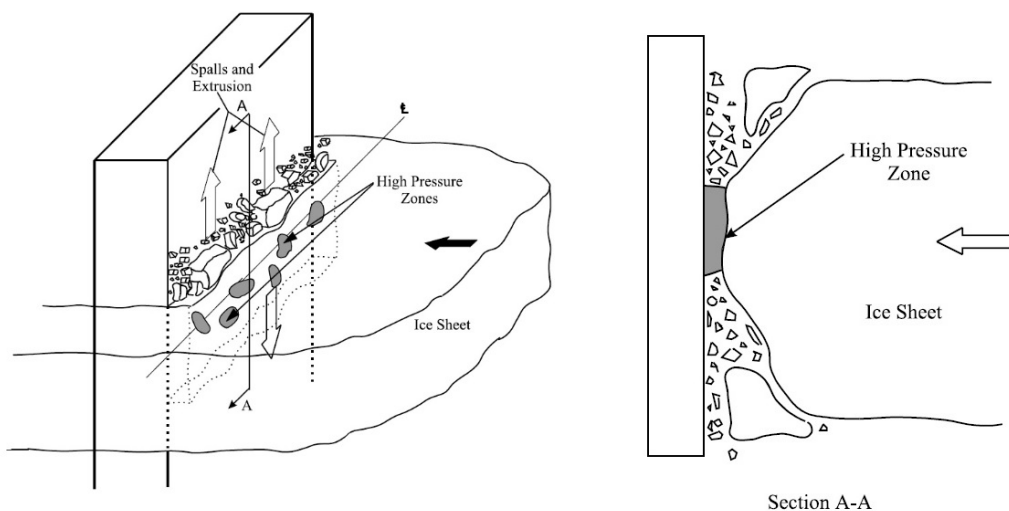


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Versagensverhaltens von Eis [7, S. 1925]

Nach Jordaan [7] variieren bei Eis-Struktur-Interaktionen, hervorgerufen durch Druckkräfte, die Drücke in der Kontaktfläche ständig, sowohl zeitlich als auch örtlich betrachtet. Hierbei werden die größten Kräfte über sogenannte „High-Pressure Zones“ übertragen, siehe Abbildung 8. Diese Kräfte sind triaxial, d.h. dass die Kraft nicht unbedingt senkrecht auf die Kollisionsstruktur trifft. Fehler im Eis an denen sich Risse ausbreiten, verursachen abbröckelnde Splitter welche dazu neigen möglichst schnell den Weg zur freien Oberfläche zu nehmen. Dementsprechend bilden sich die meisten Splitter an den Außenkanten, da diese die nächste Anlaufstellen sind. Dadurch wird die Kraft effektiv nur noch über eine geringe Fläche übertragen, da die abgebrochenen Splitter nicht mehr im Kraftfluss liegen. Daraus resultiert, dass die „High-Pressure Zones“ weniger an den Rändern vorkommen, sondern vielmehr in der Mitte der Eisproben. Allerdings kann es bei großen „Multi-year ice“-Eisschollen auch dazu kommen, dass es unebene Kollisionsoberflächen gibt und abgebrochene Außensplitter umschlossen werden, in der Kontaktfläche „eingefangen“ sind und wieder mit der Struktur interagieren, siehe Abbildung 9 links. Hierbei wird dann von sogenannten „internen Splittern“ gesprochen. [7]

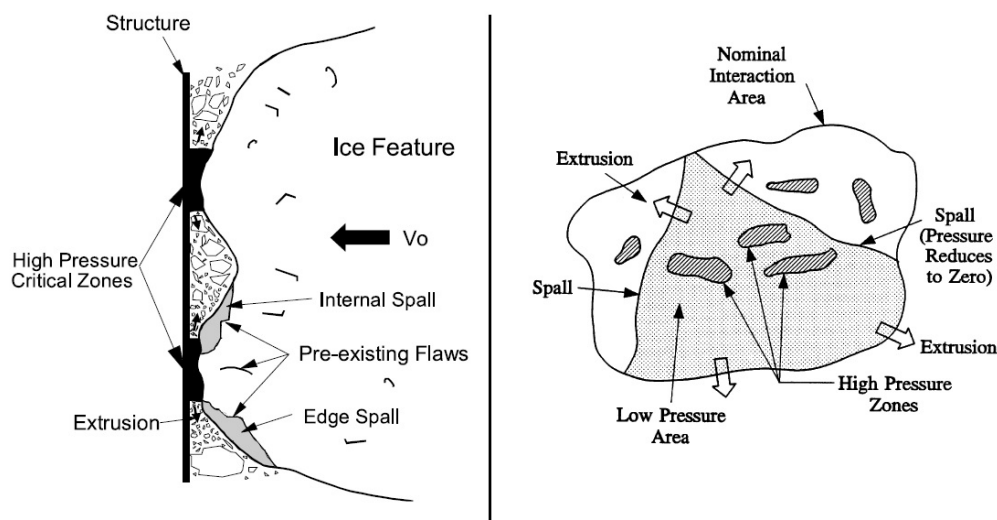


Abbildung 9: Schematische Darstellung des Versagensverhaltens von Eis (2) [7, S. 1933]

Jordaan [7] teilt die Kontaktfläche allgemein in drei Zonen auf. Zuerst einen Splitterbereich, wo kein Druck herrscht und die abgesplitterten Eisfragmente liegen, desweiteren nennt er einen Bereich, in welchem sich duktileres Eis ausbreitet und wo mittlere Drücke herrschen. Zuletzt nennt er die bereits oben genannten „High-Pressure Zones“, wo die größten Kräfte übertragen werden, siehe Abbildung 9 rechts.

Ein bisher kaum angesprochenes Thema sind eisinduzierte Schwingungen. Shih [8] befasste sich mit eisinduzierten Schwingungen an deformierbaren Strukturen. Als Beispiel nahm er Offshore-Bauwerke, genauer die säulenartigen Gründungsstrukturen derer im Meeresboden. Wenn sich bewegende Eisschollen mit den Strukturen kollidieren, können schwankende Eislasten ein Oszillieren der Struktur bewirken. Selbst gleichmäßig wirkende Eisstrukturinteraktionen sind in Wahrheit ein unstetiger Prozess mit großen Kraftvariationen. Hierbei werden für gewöhnlich auch periodische Komponenten erkannt. Besonders bei sprödem Bruchverhalten ist dieses Phänomen anzutreffen. Hierbei versagt das Eis plötzlich und baut nach kurzer Zeit wieder einen Druck gegen die Struktur auf. Der Aufbauvorgang dauert aber wesentlich länger als der schnelle Druckverlust, von daher handelt es sich um einen asymmetrisch periodischen Vorgang. Mit steigender Dehnungsrate vom Eis verstärken sich die Schwankungen in der Belastung, was sich wiederum auf das Schwingen der Struktur auswirkt. Seitdem auch Strukturschäden durch eisinduzierte Schwingungen bekannt sind, ist das Interesse am dynamischen Verhalten von Strukturen gestiegen und zu einem essenziellen Punkt in der Entwicklung von neuen Offshore-Strukturen geworden. Besonders dieser Bereich ist bisher aber nur wenig erforscht.

Toyama u. A., entnommen aus Shih [8], haben eine Reihe von Tests mit geometrisch fest definierten Eisproben mit säulenartiger Kornstruktur durchgeführt. Bei Versuchen mit relativ starrer Struktur und niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten ($6 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$) haben Sie sägezahnähnliche Oszillationen der Struktur über der Zeit festgestellt. Für weniger starre, eher deformierbare Strukturen und hohe Kollisionsgeschwindigkeiten ($48 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$) stellten Sie dagegen eine nahezu harmonische Schwingung fest. In beiden Fällen aber waren die Oszillationen, bis auf die Anfangsphase, periodisch und stetig. Sie teilten die Schwingungen in zwei Phasen auf. Zuerst fand eine elastische Deformation vom Eis statt, bis dann in der zweiten Phase das Eis versagte und der Prozess wieder von neuem begann.

Tsuchiya u. A., entnommen aus Shih [8], haben ebenfalls Tests durchgeführt, mit dem Ziel herauszufinden, welchen Einfluss die Eigenfrequenz der Struktur und die Dehnungsraten vom Eis auf die Eis-Struktur-Interaktion haben. Ihre Ergebnisse waren, dass bei kleinen Dehnungsraten, wie schon oben erwähnt, sägezahnähnliche Oszillationen sowohl im Kraftverlauf als auch in der Durchbiegung der Struktur beobachtet wurden, siehe Abbildung 10 (a). Bei hohen Dehnungsraten konnte kein Zusammenhang zwischen der Kraft auf das Eis und der Durchbiegung der Struktur gefunden werden, siehe Abbildung 10 (b). Während

der Kraftverlauf auf das Eis hier einen stochastischen Charakter aufweist, konnte bei der Durchbiegung der Struktur eine harmonisch-ähnliche Oszillation festgestellt werden. Zuletzt stellten sie bezüglich Ihren anfänglichen Interessen fest, dass die Eigenfrequenz einer Struktur nur geringen Einfluss auf die Kraft, welche auf das Eis wirkt, und die Durchbiegung der Struktur hat.

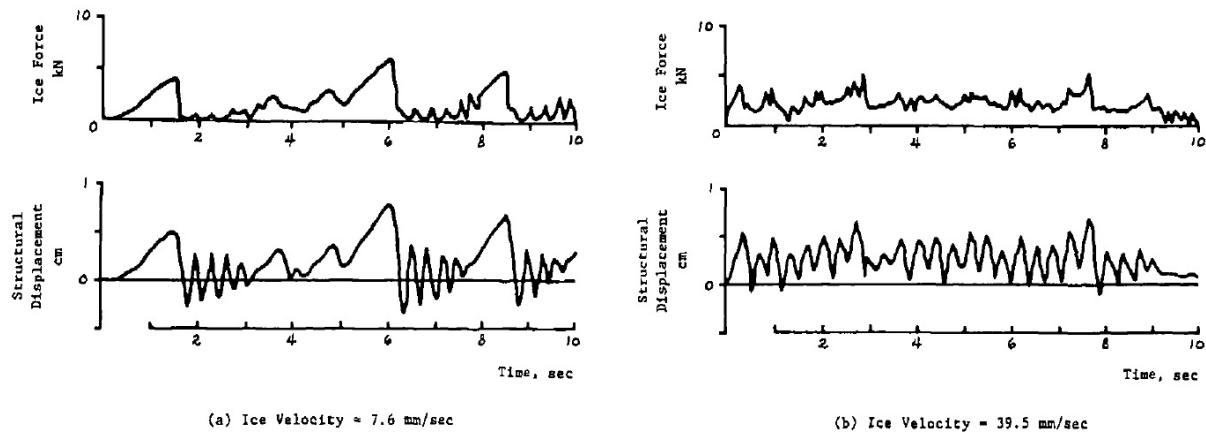


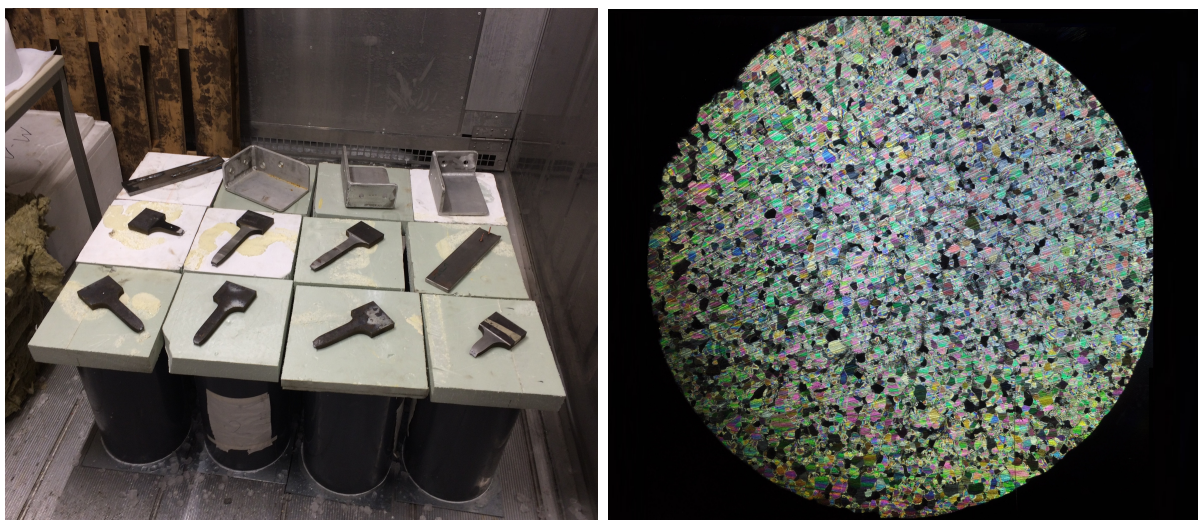
Abbildung 10: Aufzeichnungen des Belastungsverlaufs aufs Eis und der Strukturdurchbiegung bei verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten bei einer Eigenfrequenz der Struktur von 2,89 Hz [8, S. 633]

Weiterhin haben Toyama u. A. , entnommen aus Shih [8], einen Trend erkannt, dass die dominante Frequenz der Schwingung der Struktur mit der Kollisionsgeschwindigkeit ansteigt. Allerdings nur für geringe Kollisionsgeschwindigkeiten. Die Frequenz steigt solange bis Sie die Eigenfrequenz der Struktur erreicht und verbleibt dann auf diesem Level. Dieses Phänomen wird auch als das „locking in“ in der Eigenfrequenz bezeichnet.

3 Versuch

3.1 Versuchsaufbau

Zur Versuchsdurchführung werden Eisproben aus Frischwasser hergestellt. Die Eisprobenherstellung erfolgt serienweise. Bei einer Serie ist im weiteren Verlauf eine Anzahl von zwölf nummerierten Eisproben zu verstehen. Hierzu werden zunächst unter Verwendung von Silikon zwölf PVC-Rohre mit einer Höhe von 400 mm, einer Wandstärke von 12 mm und einem Kerndurchmesser von 204 mm auf eine Stahlplatte geklebt. Nach dem Trocknen des Silikons werden alle Rohre nummeriert und in einem großen Kühlcontainer gelagert, welcher auf eine nahezu konstante Temperatur von -10 °C kühl gehalten wird. Diese Temperatur wird im Folgenden als Referenztemperatur für die Proben und die Versuchsdurchführung gewählt.



(a) Erste Serie von Eisproben, Nr.1-12

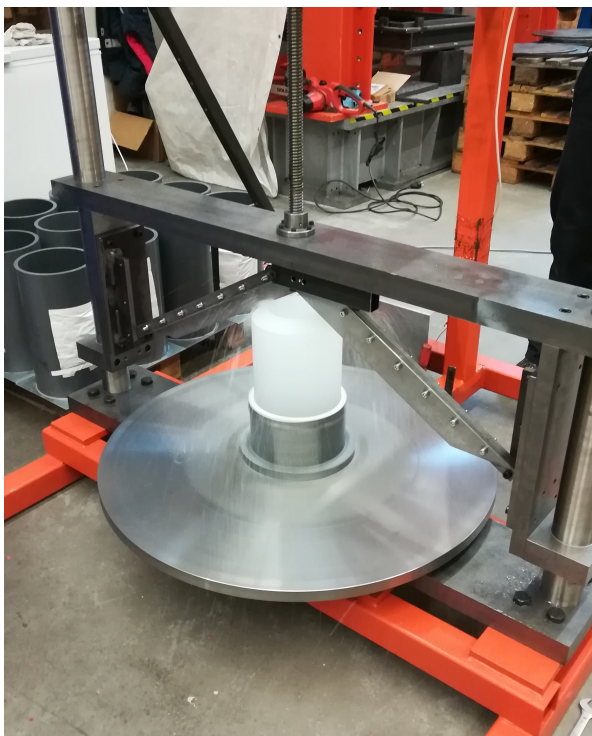
(b) Dünnschnitt einer Eisprobe zur Darstellung der Kornstruktur

Abbildung 11: Eisprobenherstellung

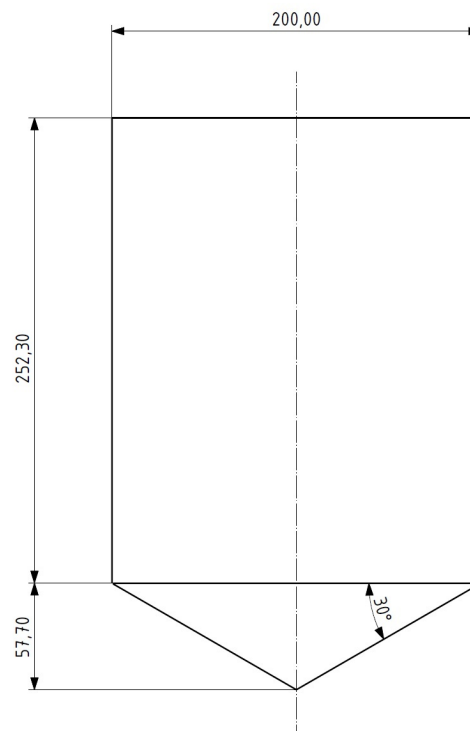
Darauffolgend werden die Rohre 130 mm hoch mit destilliertem Wasser befüllt (entspricht $0,0042\text{ m}^3$), welches zuvor bei Zimmertemperatur (22 °C) lagert. Danach werden die Rohre bis auf eine Höhe von 380 mm mit industriellem Crushed Ice aufgefüllt, welches vorher zum Zerkleinern und Auflockern durch einen Eiszerkleinerer geschoben wird. Während des Befüllens der Rohre wird mithilfe eines Stabes ständig umgerührt, um eine gleichmäßige

Verteilung von destilliertem Wasser und dem Crushed-Ice zu erreichen. Damit soll eine granulare Kornstruktur geschaffen werden, um möglichst isotrope und reproduzierbare Eigenschaften vom Eis zu erzielen, siehe Abbildung 11 (b). Zuletzt werden die befüllten Rohre mit Styroporplatten abgedeckt und beschwert, um bei kurzzeitigen Temperaturabfällen, z.B. durch das Betreten des Kühlcontainers, die Temperatur konstant zu halten, siehe Abbildung 11 (a), und ein Frieren der Eisproben von unten nach oben zu erreichen.

Nach 48 Stunden Frieren werden alle Proben zum Austauen aus dem Kühlcontainer geholt, um die Eisrohlinge aus den PVC-Rohren entnehmen zu können. Daraufhin werden alle Eisrohlinge mithilfe einer Bandsäge auf 310mm gekürzt und mit einer „Anspitzmaschine“ konisch angespitzt. Hiermit wird gewährleistet, dass bei allen Proben zu Beginn der Versuche diesselbe Ausgangskontaktfläche besteht. Danach werden die Eisproben versuchsfertig wieder im Kühlcontainer bei Prüftemperatur gelagert.



(a) Konisches Anspitzen der Eisproben



(b) Geometrie der Eisprobe

Abbildung 12: Vorbereitung und Geometrie der Eisproben

Der Versuchsaufbau sieht vor mithilfe eines Hydraulikzylinders Eisproben gegen eine Struktur zu drücken. Hierbei findet der gesamte Versuchsvorgang in einer Kühlkammer bei -10 °C statt, um über die gesamte Zeit konstante Bedingungen zu gewährleisten.

Die Versuche werden in zwei große Phasen aufgeteilt, bei denen der Versuchsaufbau etwas variiert. In der ersten Phase werden Eisproben mit unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten gegen eine quasi-starre Struktur gedrückt, um zum einen das Verhalten der Eisproben bei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten ohne Einfluss der Struktursteifigkeit zu untersuchen. Zum anderen werden so potentiell interessante Kollisionsgeschwindigkeitsbereiche für die Versuche mit deformierbarer Struktur insbesondere hinsichtlich des Übergangs von duktilem zu sprödem Eisverhalten identifiziert. In der zweiten großen Phase folgen dann, zusammenhängend mit einem Umbau der Versuchskonstruktion, die Versuchsreihen gegen deformierbare Strukturen. Es wird über den gesamten Versuchszeitraum stets darauf Wert gelegt genau definierte Randbedingungen und Eisproben zu haben, um die Ergebnisse untereinander besser auswerten zu können und eine hohe Reproduzierbarkeit zu erreichen.

Die Versuche gegen die starre Struktur werden auf einem Stahl Tisch ausgeführt, welcher im Folgenden als ortsfest und starr angenommen wird, siehe Abbildung 13. Auf diesem Tisch werden mittels doppelseitigem Klebeband vier Kraftmessdosen in quadratischer Anordnung mit einer Kantenlänge von 200 mm platziert. Hierauf wird eine 40 mm dicke, 380 mm breite und 500 mm lange Stahlplatte, auf welcher die Gegenstücke der Kraftmessdosen angebracht werden, platziert. Diese Stahlplatte wird als starre Struktur angenommen und dient als Kollisionsstruktur für die Eisproben. Um die starre Struktur herum sind in den Stahl Tisch pro Kante jeweils zwei kurze kunststoffummantelte Gewindestangen hineingedreht, welche ein verrutschen der starren Struktur während der Versuche verhindern (in Abbildung 13 nicht dargestellt).

Um die starre Platte herum sind weitere vier große Gewindestangen angebracht, auf denen die Eisprobe in einer Führungsvorrichtung platziert wird. Die Führungsvorrichtung besteht aus einem Stahlgestell in dem mittig ein PVC-Rohr als Führung für die Eisprobe befestigt ist. Der Abstand zwischen der Führung und dem Kollisionsgegner beträgt für alle Versuche initial 57,7 mm. Dieses entspricht genau der Länge des konischen Teils der Eisprobe.

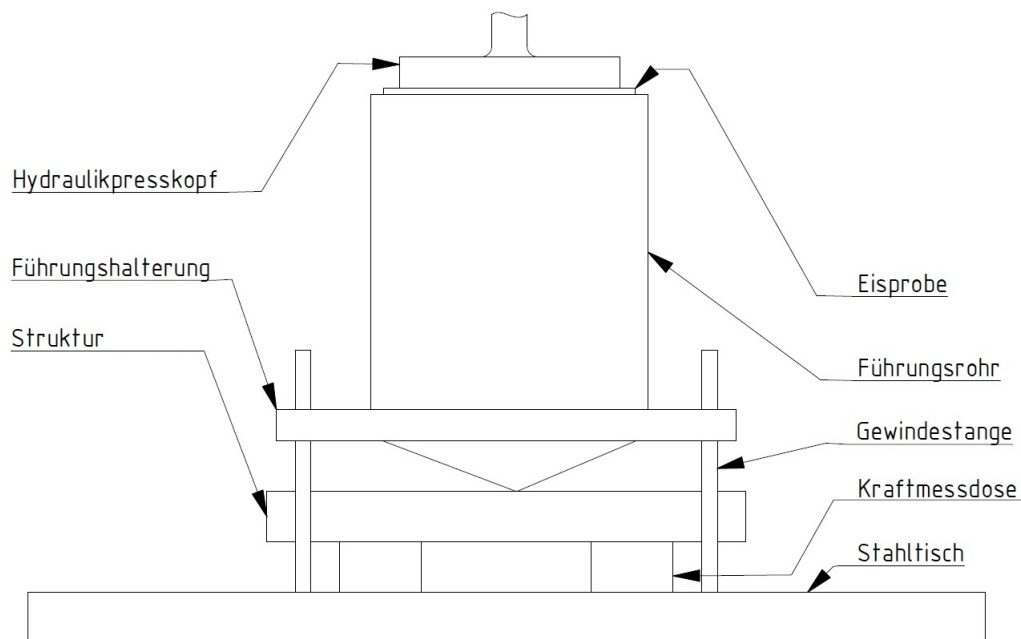


Abbildung 13: Grober Versuchsaufbau

In dem Kühlcontainer werden zwei Platinwiderstandsthermometer (Pt100) platziert. Einer von beiden hängt frei schwebend im Container, der andere ist an eine der vier großen Gewindestangen angebunden. Sie dienen zur Überprüfung und Sicherstellung der erforderlichen Temperatur von -10 °C für die Versuchsdurchführung.

Über dem Hydraulikpresskopf ist eine Kraftmessvorrichtung verbaut. Sie dient zum einen zum Abgleich der Kräfte mit den vier Kraftmessdosen auf dem Stahl Tisch (Größenordnung muss annähernd identisch sein), zum anderen zum Messen der Reibkraft. Durch die Differenz zwischen der im Zylinder wirkenden Kraft und der unten auf die vier Kraftmessdosen wirkenden Kraft, kann ermittelt werden wieviel Kraft in Form von Reibung innerhalb des Rohres und der ganzen Versuchskonstruktion verloren geht. Allerdings sei hier angemerkt, dass anhand einer Testmessung festgestellt wurde, dass die Kraftmessdosen stets eine um $2,2\%$ größere Kraft anzeigen, als die Messvorrichtung am Hydraulikpresskopf.

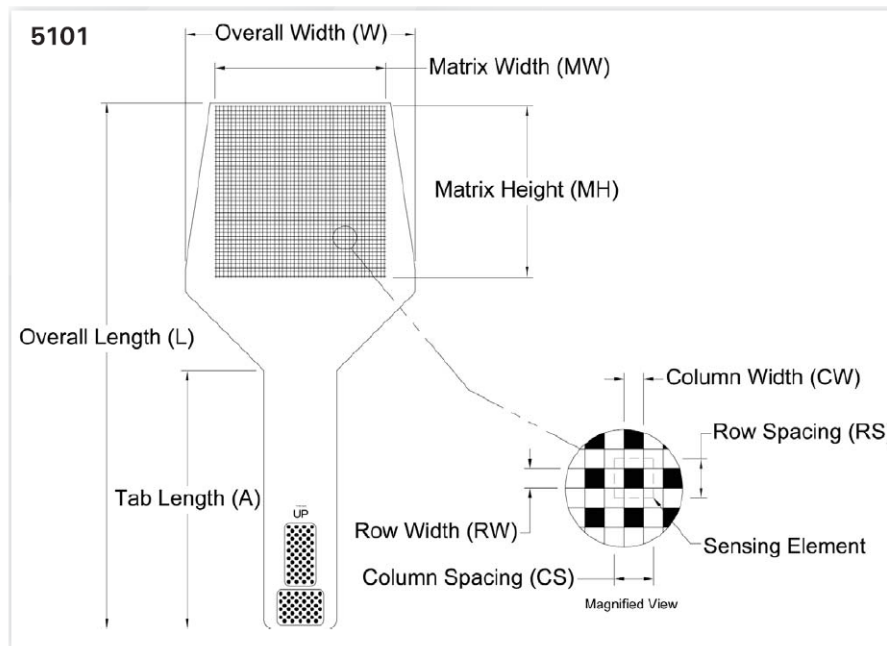
In die Kontaktfläche wird eine Anordnung von vier TekscanTM-Druckmessfolien platziert, welche genaue Informationen bezüglich der Kontaktfläche und des Kontaktdruckes während der Versuche liefert. Pro TekscanTM-Druckmessfolie wird je ein Lesegerät verwendet, für welche zusätzliche Stütz- und Schutzstrukturen gebaut bzw. angebracht werden,



Abbildung 14: Versuchsaufbau im Kühlcontainer für die starre Struktur

siehe Abbildung 14. Auf den Versuch hat dies aber keinen Einfluss. Die Spezifikationen und der schematische Aufbau der TekscanTM-Druckmessfolien sind in Abbildung 15 dargestellt.

Neben dem Stahltisch wird auf einem Stativ eine Hochgeschwindigkeitskamera platziert, welche auf die Kontaktfläche zwischen der Struktur und der Eisprobe ausgerichtet ist. Sie dient dazu die Versuche aufzuzeichnen, um später genaue Aussagen über das Kollisionsverhalten sowie den Verlauf des Versagens der Eisproben treffen zu können. Die Kamera ist mit einem Frequenzerzeuger verbunden, um die Aufnahmefrequenz je nach Kollisionsgeschwindigkeit steuern zu können.



Overall Length L	Overall Width W	Tab Length A	Matrix Width MW	Matrix Height MH	Columns			Rows			Total No. of Sensing Elements	Resolution
					Pitch			Pitch				
					CW	CS	Qty.	RW	RS	Qty.		
13.39 (in.)	5.86 (in.)	6.59 (in.)	4.4 (in.)	4.4 (in.)	0.05 (in.)	0.1 (in.)	44	0.05 (in.)	0.1 (in.)	44	1936	100 (sensing elements per in ²)
340.1 (mm)	148.8 (mm)	167.4 (mm)	111.8 (mm)	111.8 (mm)	1.3 (mm)	2.5 (mm)	44	1.3 (mm)	2.5 (mm)	44	1936	15.5 (sensing elements per cm ²)

Pressure Ratings								
psi	6	10	50	150	350	500	3,000	5,000
kPa	41	69	345	1,034	2,413	3,448	20,685	34,475

Abbildung 15: Schematischer Aufbau und Spezifikation der TekscanTM-Druckmessfolien [9]

Die Versuche gegen die deformierbaren Strukturen werden ebenfalls auf dem Stahltisch durchgeführt. Wieder werden vier Kraftmessdosen mittels doppelseitigem Klebeband in quadratischer Anordnung auf dem Tisch platziert, jedoch diesmal um 45 ° gedreht und mit einer Kantenlänge von 444 mm. Zusätzlich wird diesmal zentral unter dem Zylinderkopf bzw. unter der späteren Lage des Mittelpunkts der deformierbaren Struktur über ein Loch im Stahltisch ein Wegaufnehmer platziert. Der Wegaufnehmer dient der Messung der absoluten Durchbiegung im Mittelpunkt der deformierbaren Struktur. Anstatt einer starren Platte wird ein starrer Ring (mit viereckiger Außenkontur und kreisförmiger Innenkontur), an welchem die Gegenstücke der Kraftmessdosen angebracht sind, auf den Kraftmessdosen platziert. Der Ring hat einen Innendurchmesser von 400 mm, was der

späteren Versuchsfläche der deformierbaren Strukturen entspricht, und eine Außenkantenlänge von 500 mm. Ringsherum im Abstand von je 24° um den Mittelpunkt ist der Ring mit 26 mm Bohrungen (insgesamt 15 Bohrungen) versehen. Die deformierbare Struktur wird daraufhin auf den eckigen Ring gelegt und mit einem zweiten Ring (ohne äußere Ecken), der ebenfalls mit baugleichen Bohrungen versehen ist, mit Hilfe von M24 Durchsteckschrauben und Schraubenmuttern mit einem Drehmoment von 700 Nm von einem Schlagschrauber eingespannt (insgesamt 15 Schrauben). Die aus der ersten Versuchsphase großen Gewindestangen dienen bei den Versuchen mit deformierbaren Strukturen als Führung für den unteren Ring, welcher auf den Kraftmessdosen aufliegt, siehe Abbildung 16. Auf den großen Gewindestangen, welche auch als Führung dienen, wird dann wie in der vorherigen Versuchsphase das Gestell platziert, welches zusammen mit dem PVC-Rohr als Führung für die Eisproben dient.



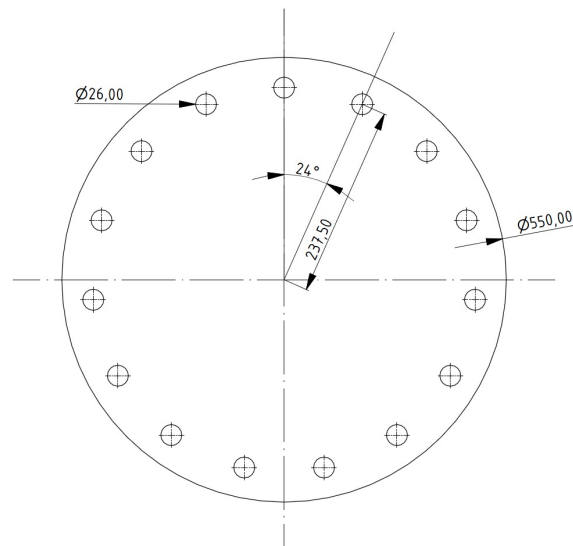
Abbildung 16: Versuchsaufbau im Kühlcontainer für die deformierbare Struktur

Weiterhin wird für die Versuche an den deformierbaren Strukturen ein Laser verwendet, um die Verformung der Platte über die gesamte Breite nach dem Versuch zu erfassen. Für den Laser wird eine Stützstruktur um den Versuchsstand gebaut, auf welchem eine Schiene platziert wird. Über diese Schiene wird der Laser linear verfahren, um die deformierbare Struktur abzufahren und währenddessen die Durchbiegung zu messen. Aufgrund eines zu geringen Sichtspaltes in die Kontaktfläche, wegen dem auf der Struktur aufliegendem Ring und den Schraubenmuttern, wird auf die Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera verzichtet.

Die Strukturen für die Versuche mit deformierbarem Kollisionsgegner werden aus Baustahl der Sorte S235JR in den Stärken 3 mm, 6 mm und 12 mm erstellt. Als Versuchsgeometrie für die Strukturen wird ein Kreis mit einem Durchmesser von 550 mm gewählt, passend zur Größe der Spannkonstruktion. Dieser ist rundherum mit 26 mm Bohrungen versehen, um die Strukturen mithilfe von Durchsteckschrauben einspannen zu können, siehe Abbildung 17. Hierbei dient für die 6 mm und 12 mm Stahlplatten ein Schweißbrenner zum Zurechtschneiden des großen 550 mm Kreises. Die 3 mm Stahlplatte wird hingegen mit einer Vertikalbandsäge zurechtgeschnitten, was für die späteren Versuche aber ohne weiteren Einfluss sein sollte.



(a) Struktur S235JR, 3mm



(b) Geometrie der Strukturen

Abbildung 17: Vorbereitung der Strukturen

3.2 Versuchsergebnisse

Es werden für die Versuche gegen die starre Struktur acht verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten $0,01 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $0,625 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ gewählt. Es wird hierbei bei den verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten unterschiedliches Verhalten der Eisproben und eine stark variierende Kraftentwicklung auf die Struktur festgestellt.

Bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,25 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (von der geringsten Kollisionsgeschwindigkeit aus gesehen) wird rein duktilen Verhalten beobachtet. Dies ist unter anderem aus den Kraftverläufen zu erkennen. Anhand der Messungen an den $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ -Versuchen ist zu sehen, dass die Kraft, dargestellt auf der Ordinate, nahezu konstant mit dem Zylinderweg, dargestellt auf der Abszisse, ohne nennenswerte Einbrüche steigt, siehe Abbildung 18.

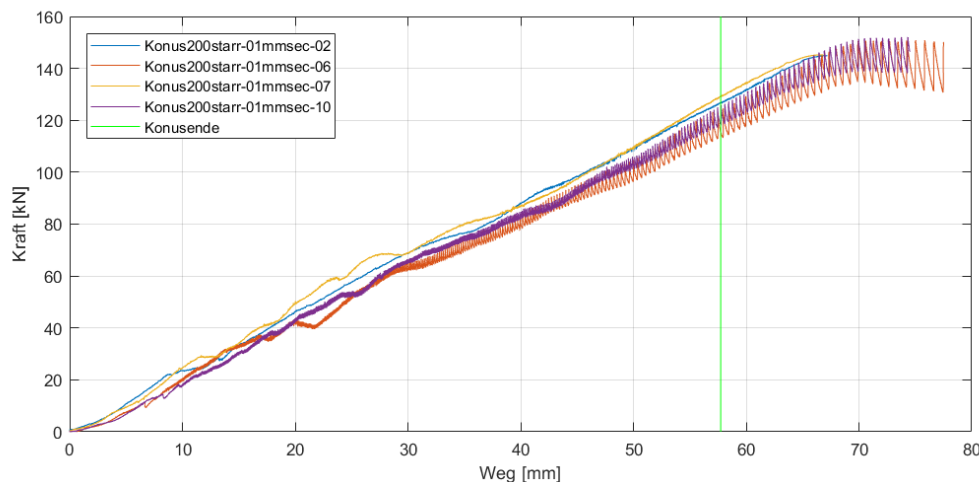
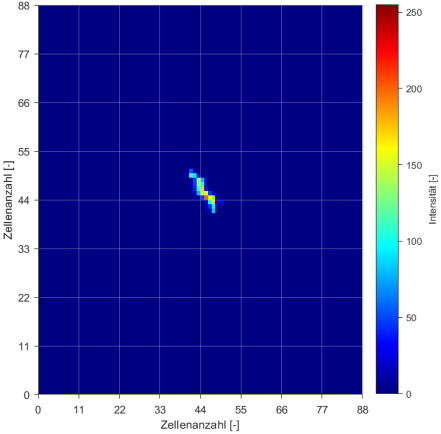
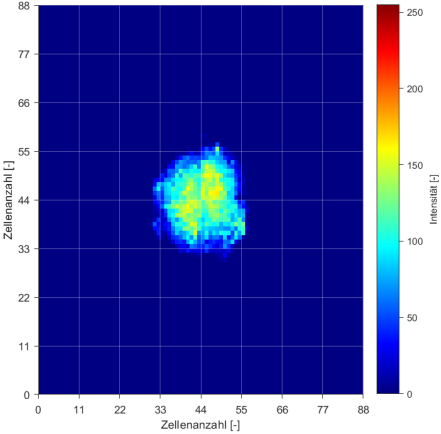
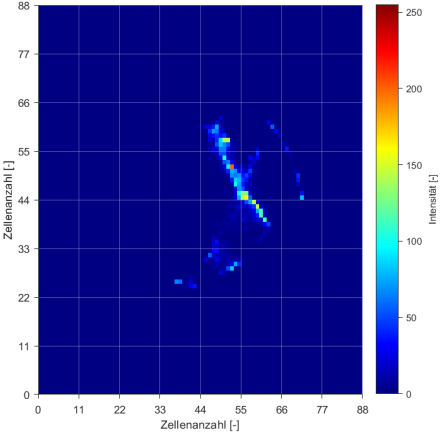
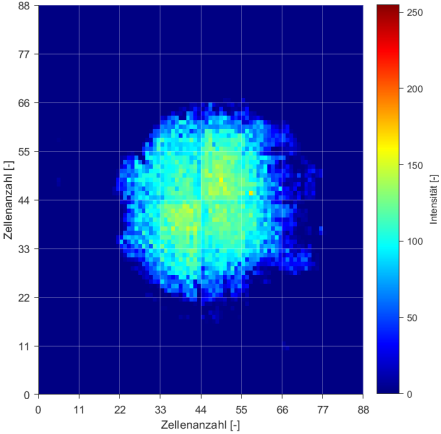
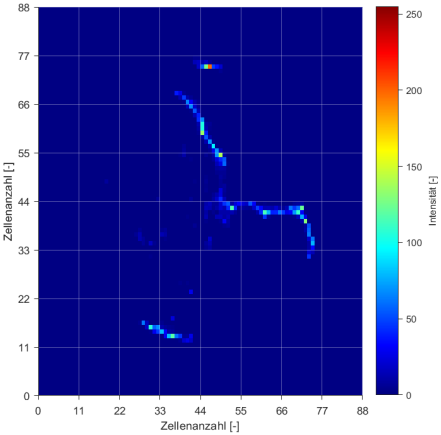
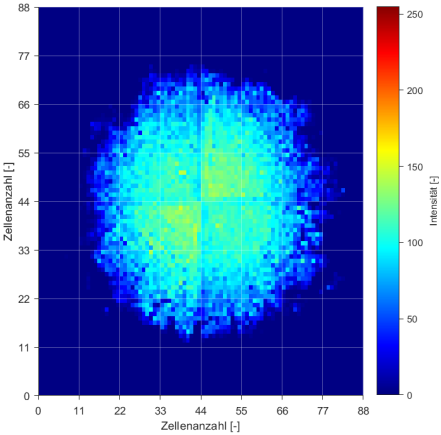


Abbildung 18: Starre Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil

Hierbei ist zu erwähnen, dass bei allen duktilen Versuchen die maximale Hubkraft der hydraulischen Presse erreicht wird, worauf die Versuche beim Erreichen der maximalen Hubkraft beendet werden. Die aus den TekScanTM- Druckmessfolien gewonnenen Daten zeigen, dass die Kontaktfläche mit dem Zylinderweg immer größer wird und eine relativ gleichmäßige Druckverteilung vorliegt, siehe Tabelle 1 rechte Spalte. Hierbei steht die Farbdarstellung für die Intensität, wie stark eine Sensorzelle belastet wird. Die Intensität erstreckt sich hierbei über eine Skala von 0 bis 255, wobei die 255 für eine Überlast der Sensorzelle steht. In Tabelle 1 ist die Kontaktflächenentwicklung über dem Zylinderweg vergleichsweise von einem spröden und einem duktilen Versuch aufgezeigt.

Tabelle 1: Vergleich der Kontaktflächenentwicklung von spröden und duktilen Versuchen mittels der aus den TekScanTM- Druckmessfolien gewonnenen Daten bei einer starren Struktur

Verhalten/ Weg	spröde ($1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$)	duktil ($0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$)
20 mm		
40 mm		
60 mm		

Es werden zwei Punkte im konischen Bereich des Zylinders, bei 20 mm und 40 mm Zylinderweg, und ein Punkt nach dem konischen Bereich, bei dem die Eisprobe zylindrisch ist, bei einem Zylinderweg von 60 mm, gewählt. Auf den Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera ist zu sehen, wie das Eis mit der Zeit unter der Belastung langsam zu den Seiten zu kriechen beginnt, siehe Abbildung 19 (oben). Außerdem ist zu sehen, dass die Eisprobe teilweise trüb ist. Diese trüben Bereiche zeigen den Vorgang der dynamischen Rekristallisation.

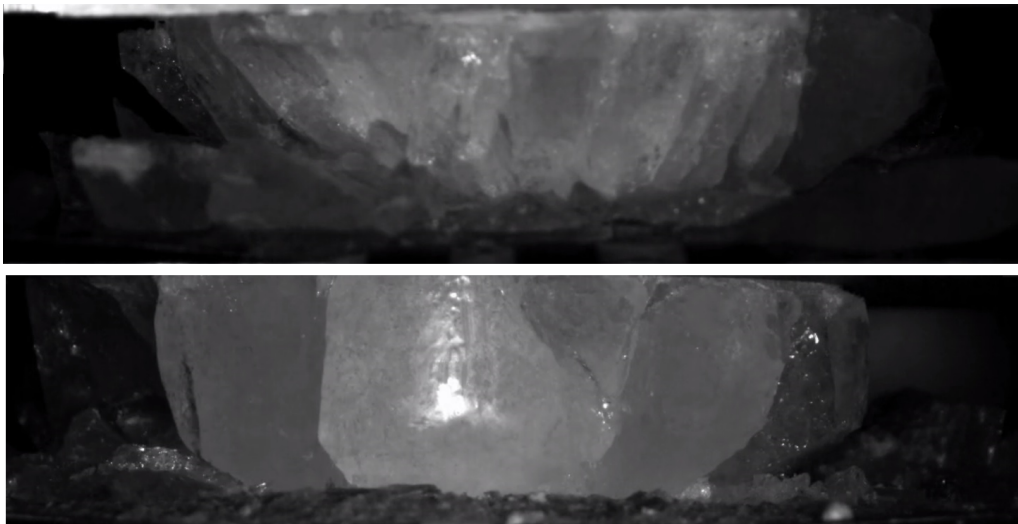


Abbildung 19: Vergleich von duktilem (oben) und sprödem (unten) Eisverhalten gegen eine starre Struktur

In Abbildung 20 ist ein Dünnschnitt einer duktilen Eisprobe gezeigt. Es ist zu sehen, dass die Kornstruktur zur Belastungsquelle hin (unten im Bild) immer feiner wird.

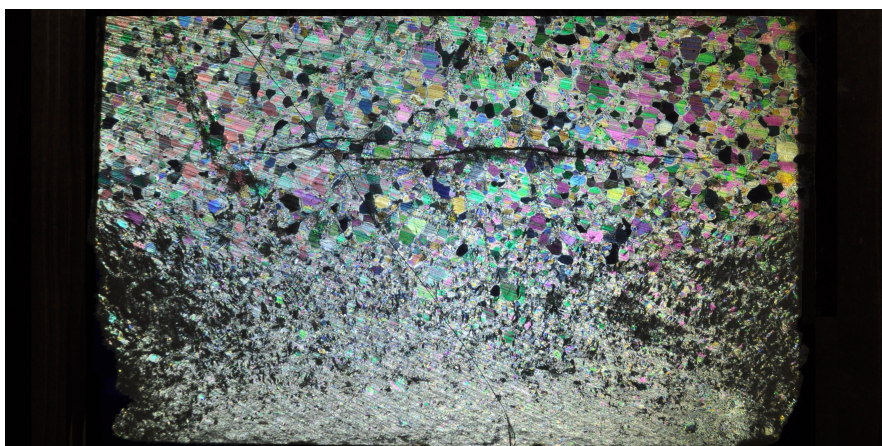


Abbildung 20: Dünnschnitt einer duktilen Eisprobe

Ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,625 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ wird überwiegend sprödes Verhalten beobachtet. Ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ verhält sich das Eis dann ausschließlich spröde. Hier ist im Kraftverlauf ein starkes Oszillieren der Kraft über dem Wegverlauf zu sehen. Auffällig ist hierbei, dass es in allen spröden Versuchen zunächst einen großen Kraftanstieg gibt, welcher (bis auf einen Versuch von der $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ -er-Serie) auch schon die Maximalkraft des Versuchs widerspiegelt. In Abbildung 21 ist zu erkennen, dass nach dem ersten Kraftanstieg immer ein Krafteinbruch folgt, gefolgt von einem oszillierenden Kraftverlauf auf niedrigem Kraftniveau.

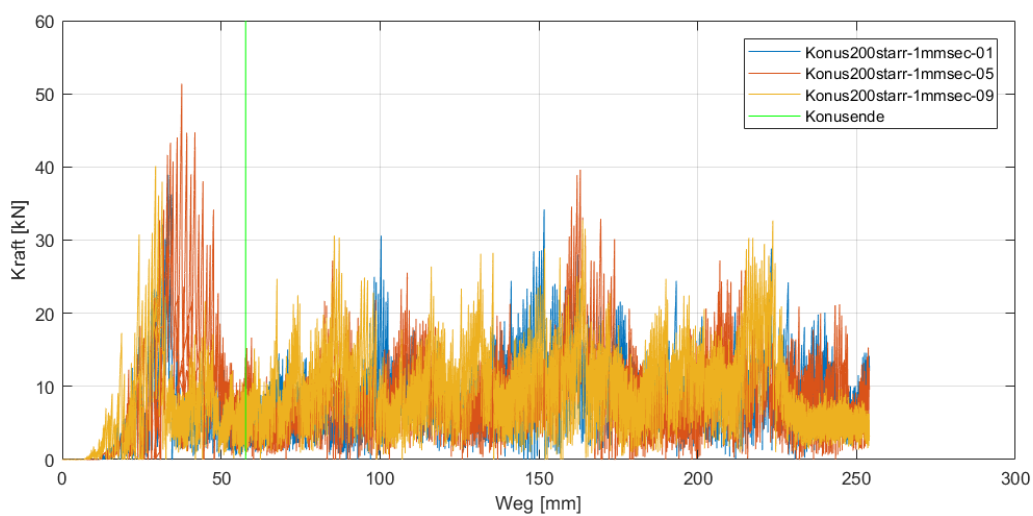


Abbildung 21: Starre Struktur, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde

Außerdem ist in der mit der TekScanTM-Druckmessfolie gemessenen Kontaktfläche zu sehen, dass es jetzt keine gleichmäßige Druckverteilung auf die Struktur mehr gibt, sondern eine linienartige Kontaktfläche, siehe Tabelle 1 mittlere Spalte. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen, dass es zum Abbröckeln von undeformierten Eisfragmenten und nicht wie beim duktilen Fall zum langsamen Kriechen der Eismasse verbunden mit dynamischer Rekristallisation kommt, siehe Abbildung 19 (unten).

Zwischen den beiden oben genannten Bereichen wird noch ein Bereich bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ beobachtet, bei dem weder rein duktiler noch rein spröder Verhalten festgestellt wird. Von drei durchgeführten Versuchen zeigen zwei Versuche im Kraft-Weg-Verlauf duktiler und ein Versuch spröder Verhalten auf, siehe Abbildung 22.

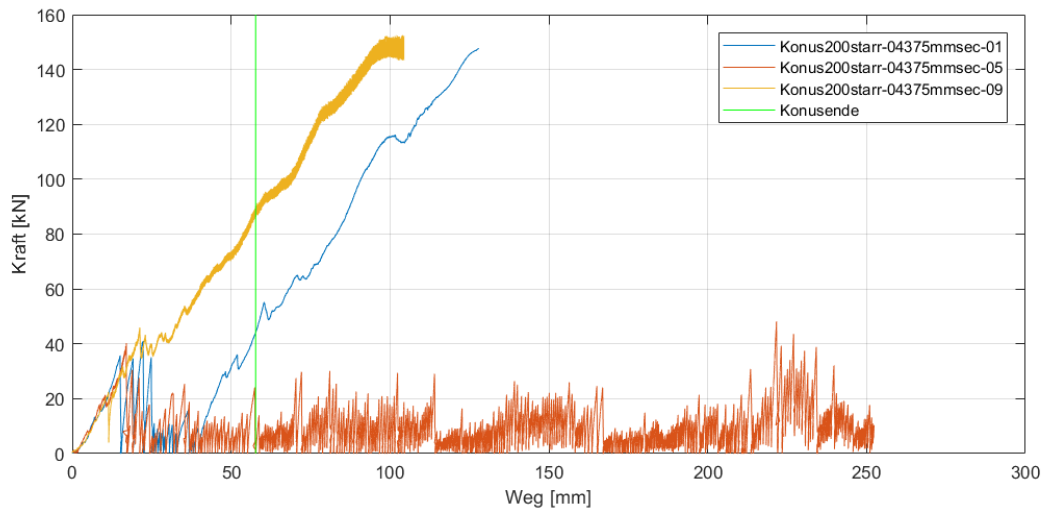
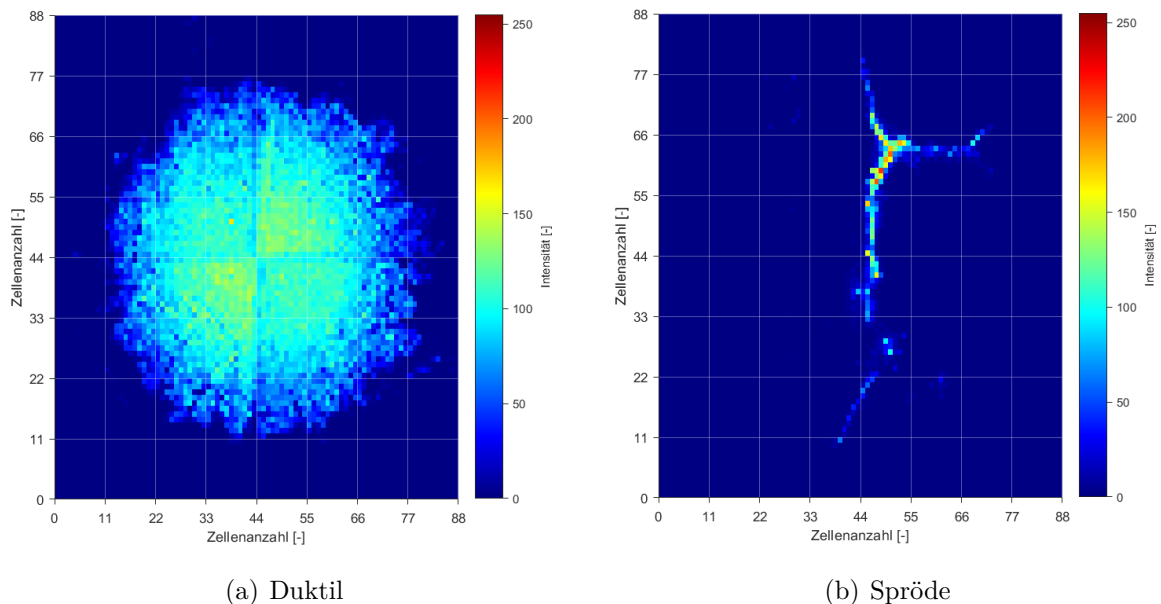


Abbildung 22: Starre Struktur, $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil und spröde

Dies spiegelt sich auch in den aus den TekScanTM- Druckmessfolien gewonnenen Daten wieder, siehe Abbildung 23. So ist die Kontaktfläche beim duktilen Fall flächiger und mit gleichmäßiger Druckverteilung, siehe Abbildung 23 (a), und bei dem spröden Fall linienartig und mit lokalen Druckspitzen, siehe Abbildung 23 (b).



(a) Duktil

(b) Spröde

Abbildung 23: Kontaktfläche auf der Struktur bei 60 mm Zylinderweg, $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$

Auch die Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera zeigen, dass es unterschiedliches Verhalten der Eisproben gibt, siehe Abbildung 24. Wie bereits oben erwähnt zeigt sich Kriechen beim duktilen Fall, siehe Abbildung 24 (oben), und Abbröckeln von undeformierten Eisfragmenten im spröden Fall, siehe Abbildung 24 (unten).

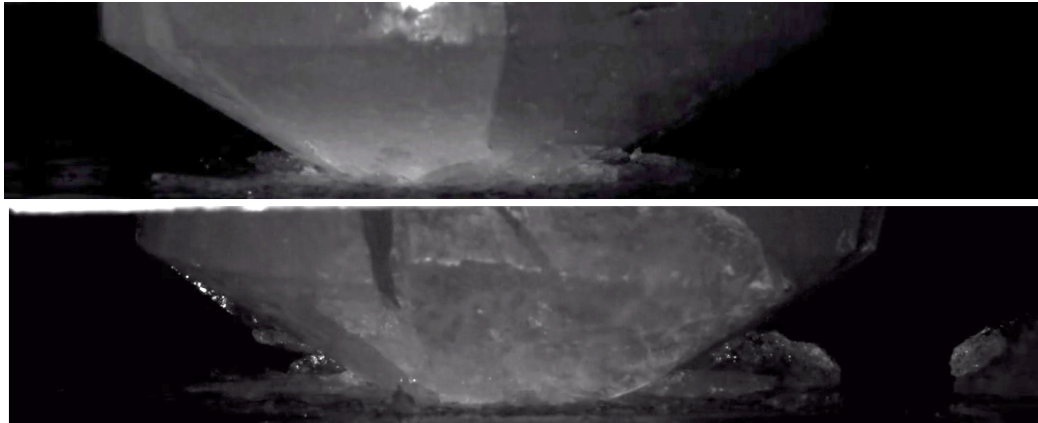


Abbildung 24: Vergleich von duktilem (oben) und sprödem (unten) Eisverhalten bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,4375 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ gegen eine starre Struktur

Für die Versuche gegen die deformierbaren Strukturen werden vier verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten gewählt. Eine Kollisionsgeschwindigkeit, bei der in den Versuchen gegen die starre Struktur duktiler Eisverhalten beobachtet wird, exemplarisch hierfür $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, und drei Kollisionsgeschwindigkeiten, bei denen in den Versuchen gegen die starre Struktur sprödes Verhalten beobachtet wird, exemplarisch hierfür $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit.

Genau wie auch bei den Versuchen gegen die starre Struktur wird bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ duktiler Eisverhalten und ab einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ nur noch sprödes Verhalten beobachtet. Ebenso zeigen die Daten der TekScanTM-Druckmessfolien diesselben Charakteristika. Ein Bereich der weder rein duktiler oder rein sprödem Verhalten entspricht wird nicht beobachtet.

Die Messungen mit dem Laserdistanzmesser zeigen, dass die maximale plastische Durchbiegung der Struktur mit abnehmender Struktursteifigkeit bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit zunimmt. Dies ist exemplarisch in Abbildung 25 anhand der Versuche bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ dargestellt. Für die starre Struktur wird keine Durchbiegung angenommen.

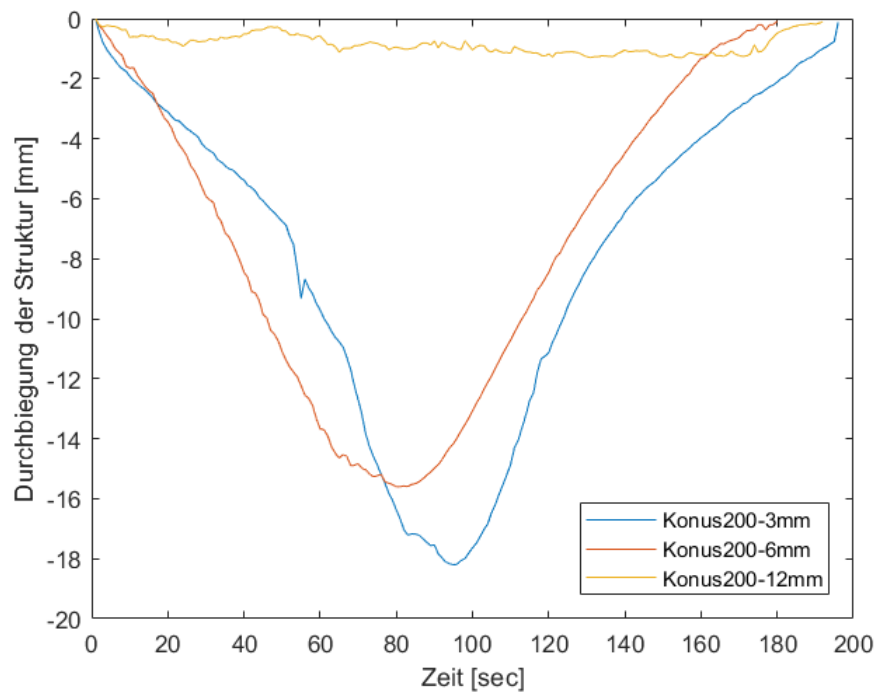


Abbildung 25: Vergleich der Durchbiegung der Strukturen verschiedener Struktursteifigkeiten bei gleicher Kollisionsgeschwindigkeit

3.3 Versuchsauswertung und Diskussion

Um den Einfluss der Struktursteifigkeit als auch der Kollisionsgeschwindigkeit auf Eislasten bestimmen zu können, werden Frequenzgänge, Belastungs- und Kollisionsenergieverläufe sowie Kontaktflächenentwicklungen erstellt und miteinander verglichen.

Ein Vergleich der Belastungsverläufe (Kraft-Weg-Verläufe) bei den Versuchen gegen die starre Struktur lässt bereits einen groben ersten Schluss zu. Die Frequenz der Belastung ist bei einer höheren Kollisionsgeschwindigkeit bei konstanter Struktursteifigkeit größer. Während die duktilen Versuche bei relativ langsamer Kollisionsgeschwindigkeit einen nahezu kontinuierlichen Verlauf aufweisen zeigt ein spröder Versuch mit relativ hoher Geschwindigkeit ein Frequenzmuster auf, siehe Abbildung 26.

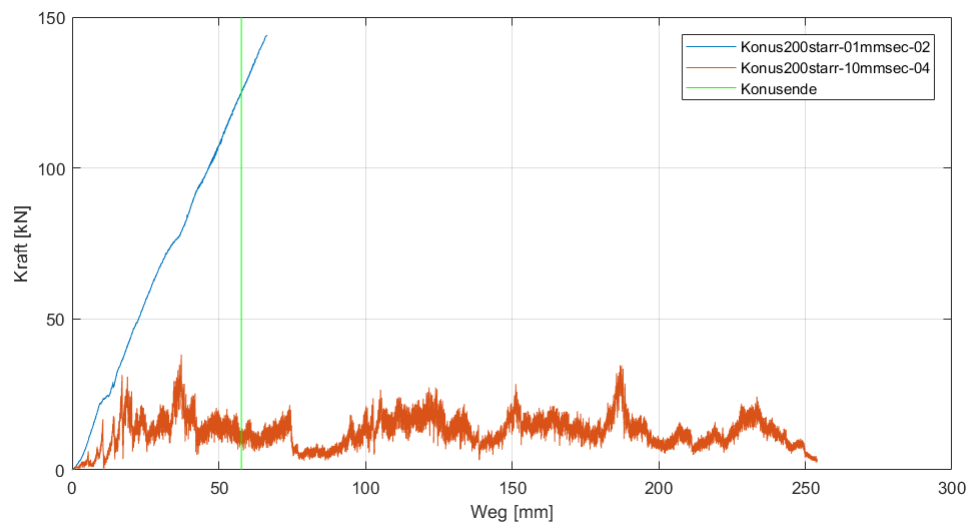


Abbildung 26: Starre Struktur, verschiedene Kollisionsgeschwindigkeiten, spröde und duktil

Mithilfe der Fast-Fourier-Transformation (FFT) lässt sich das Frequenzspektrum des Belastungsverlaufes eines Versuchs bestimmen, womit genauere Aussagen über die oben gewonnene sehr grobe Erkenntnis getroffen werden können. Hierbei wird eine Darstellung erzeugt, welche auf der Abszisse aufsteigend Frequenzen und auf der Ordinate die dazugehörigen Amplituden aufzeigt. Eine dominante Frequenz macht sich hierbei durch einen relativ zur Umgebung großen Ausschlag bemerkbar. Im Folgenden wird für die Frequenzanalyse bei Versuchen mit mehreren Durchläufen unter gleichen Bedingungen nur einer exemplarisch dargestellt. Die Frequenzanalyse der Versuche bestätigt die obere

Aussage. Die FFT des Belastungsverlaufs eines duktilen Versuchs gegen eine starre Struktur mit einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ zeigt, dass es keine dominierenden Frequenzen der Belastung gibt, siehe Abbildung 27, wie auch bereits durch das Betrachten des Belastungsverlaufes erkannt wurde.

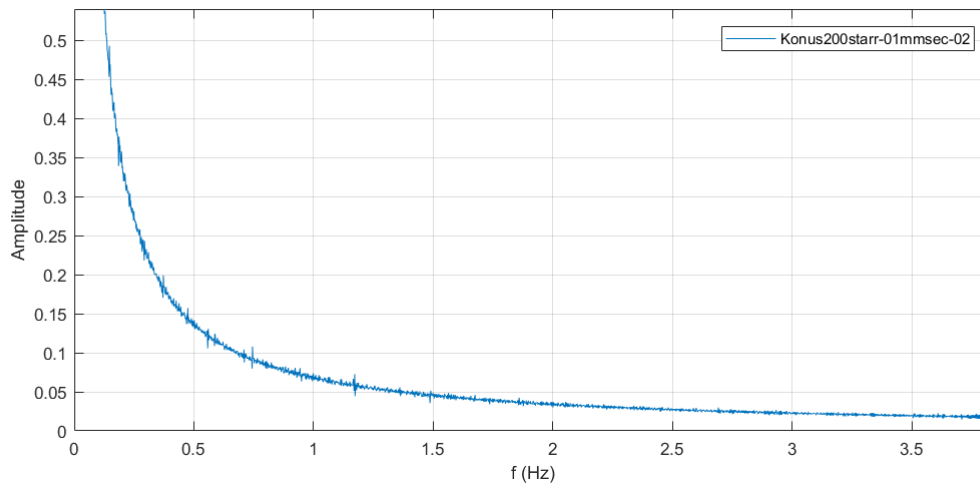


Abbildung 27: Frequenzgang, starre Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil

Der große Ausschlag beim Ursprung steht hierbei für den Mittelwert der Belastung über den gesamten Versuch, der einen Offset mit der Frequenz 0 Hz erzeugt. Dies ist bei allen Versuchen gleich. Es handelt sich somit um keine schwingungsbestimmende Frequenz.

Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ gegen eine starre Struktur (somit bei sprödem Verhalten) zeigen sich in der Frequenzanalyse bereits signifikante Ausschläge. Aus dem Frequenzgang lässt sich erkennen, dass bei 1 Hz die erste Mode bzw. dominante Frequenz vorliegt, siehe Abbildung 28. Angemerkt sei hier, dass der Fokus allgemein bei allen Versuchen auf die ersten Moden bzw. kleine Frequenzen ausgerichtet ist, da Ausschläge bei höheren Frequenzen der endlichen Anzahl an Messpunkten sowie Messrauschen zuzuschreiben sind. Außerdem können mit dem FFT-Verfahren nur Frequenzen bis ca. $\frac{1}{5}$ der Messfrequenz ausgewertet werden, weshalb größere Frequenzen in der Auswertung formell nicht betrachtet werden können.

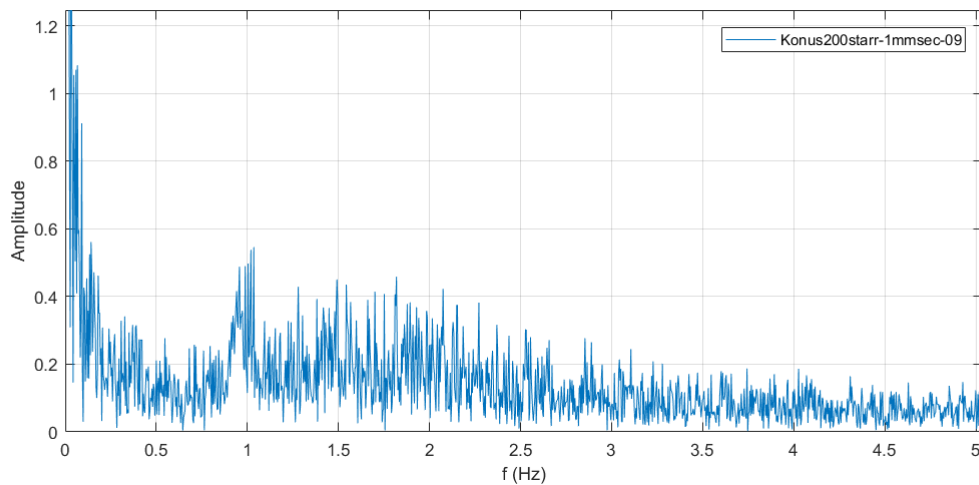


Abbildung 28: Frequenzgang, starre Struktur, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde

Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ gegen ein starre Struktur zeigt sich die erste Mode im Bereich von 22 Hz gefolgt von der zweiten Mode im Bereich von 40 Hz, siehe Abbildung 29. Es ist ersichtlich, dass die Frequenz der Belastung bei konstanter Struktursteifigkeit bei Erhöhung der Kollisionsgeschwindigkeit steigt.

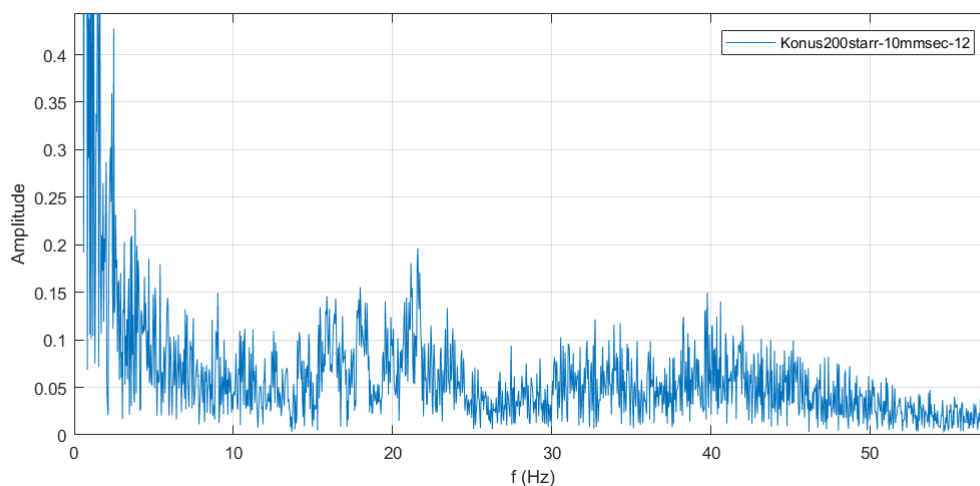


Abbildung 29: Frequenzgang, starre Struktur, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde

Die Abhängigkeit der Frequenz der Belastung von der Kollisionsgeschwindigkeit bei konstanter Struktursteifigkeit wird auch bei der Frequenz der Schwingung der deformierbaren Strukturen beobachtet. Die Frequenz der Schwingung der Struktur steigt mit der Kollisionsgeschwindigkeit an, wie auch schon von Toyama u. A., entnommen aus Sodhi [4],

beobachtet. In Abbildung 30 ist exemplarisch die Durchbiegung einer 3 mm Struktur und der Kraftverlauf auf dieser bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ dargestellt.

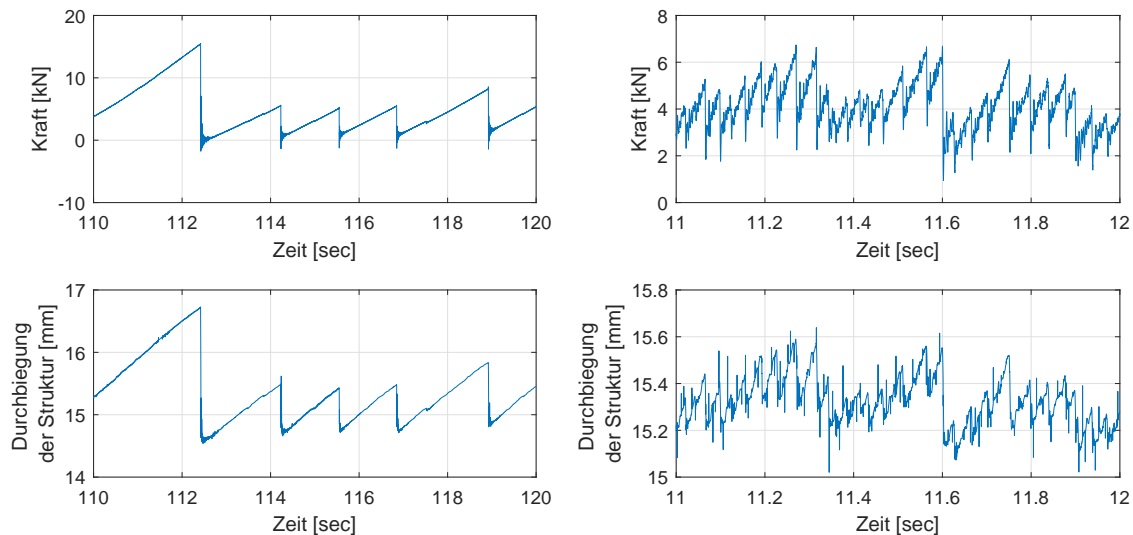


Abbildung 30: Vergleich des Kraftverlaufs und der resultierenden Durchbiegung der 3 mm Struktur bei $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (linke Spalte) und $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ (rechte Spalte) Kollisionsgeschwindigkeit

Hierbei wird bei beiden Kollisionsgeschwindigkeiten der Abschnitt von 110 mm bis 120 mm Zylinderweg gewählt. Dieser Bereich wird gewählt, da hier zuverlässig gesagt werden kann, dass beide Eisproben dieselbe nominelle Kontaktfläche mit der Struktur haben. Bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ entspricht das dem Zeitbereich von 110 bis 120 Sekunden und bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ dem Zeitbereich von 11 bis 12 Sekunden. Während die Periodendauer bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ ca. 1,8 Sekunden beträgt, sind es bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ nur 0,04 Sekunden. Das entspricht Frequenzen von 0,56 Hz bei $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und 25 Hz bei $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit.

Um speziell den Einfluss der Struktursteifigkeit auf das Frequenzverhalten der Struktur selbst zu ermitteln werden nun Versuche mit gleicher Kollisionsgeschwindigkeit und verschiedenen Struktursteifigkeiten miteinander verglichen. Der Vergleich zeigt, dass es bei duktilem Eisverhalten, also niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten, keinen Einfluss der Struktursteifigkeit, sowohl auf die Frequenz der Schwingung der deformierbaren Struktur, als auch der Belastung auf die Struktur gibt. Letzteres ist beispielhaft durch einen Ver-

gleich der Frequenzgänge der Belastung auf die starre und die 3 mm Struktur bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ zu sehen, siehe Abbildungen 27 und 31.

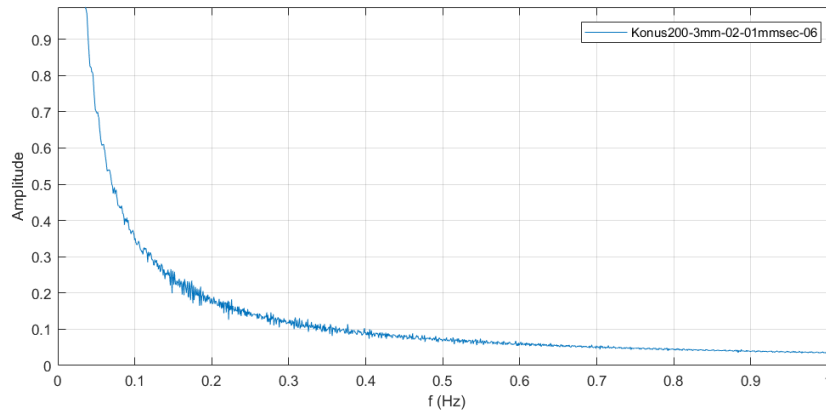


Abbildung 31: Frequenzgang, 3 mm Struktur, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil

Ein Vergleich der Frequenzen der Schwingungen der Struktur und der Belastung auf die Struktur bei sprödem Eisverhalten hingegen zeigt einen Anstieg der Frequenz an. Exemplarisch für den Anstieg der Frequenz der Schwingung der deformierbaren Struktur ist dies anhand der 3 und 12 mm Struktur bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ in Abbildung 32 dargestellt.

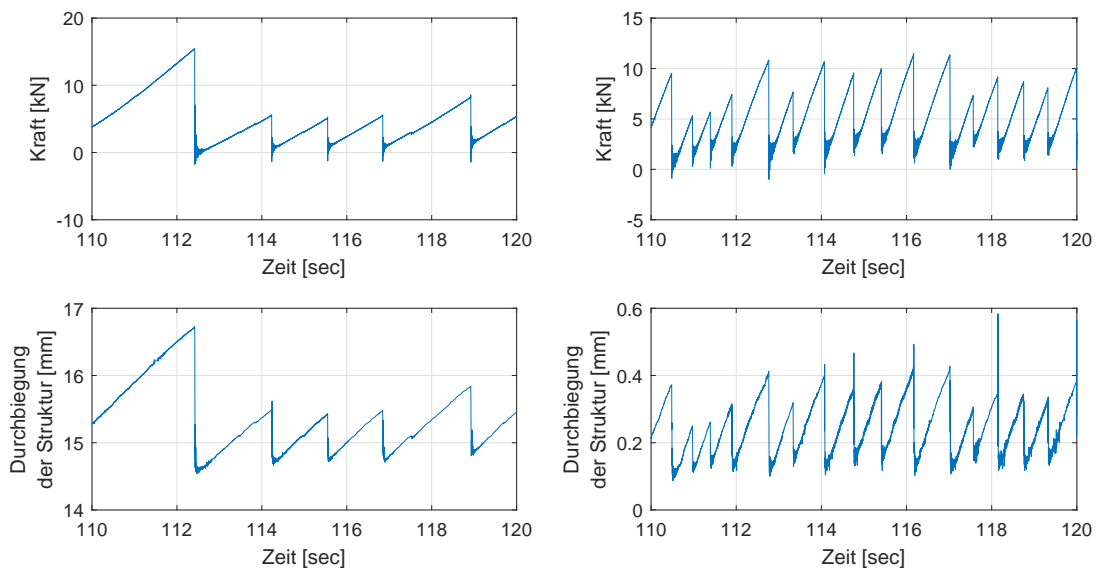


Abbildung 32: Vergleich des Kraftverlaufs und der resultierenden Durchbiegung der 3 mm (links) und 12 mm (rechts) Struktur bei $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit

Während die Periodendauer der Schwingung der Struktur bei der 3 mm Struktur ca. 1,8 Sekunden beträgt, sind es bei der 12 mm Struktur nur 0,67 Sekunden. Das entspricht Frequenzen von 0,56 Hz bei der 3 mm Struktur und 1,49 Hz bei der 12 mm Struktur. Gleiche Charakteristika sind bei den Belastungsverläufen zu sehen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass mit zunehmender Kollisionsgeschwindigkeit bei konstanter Struktursteifigkeit die dominante Frequenz der Belastung auf die Struktur und der Schwingung der Struktur zunimmt. Außerdem steigt die Frequenz der Belastung auf die Struktur und der Schwingung der Struktur mit zunehmender Struktursteifigkeit bei konstanter Kollisionsgeschwindigkeit.

In Tabelle 2 sind zur Übersicht die ersten Moden der Belastung auf die Struktur und der Schwingung der deformierbaren Struktur bei verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten aufgeführt. Ein „-“ bedeutet bei den duktilen Versuchen, dass durch den kontinuierlichen Lastanstieg keine Frequenzauswertung möglich ist, und bei den spröden Versuchen, dass nicht eindeutig eine dominante Frequenz abgelesen werden konnte.

Tabelle 2: Tabellarische Auflistung der Frequenzen

Struktursteifigkeit	Kollisionsgeschwindigkeit	Frequenz der Strukturdurchbiegung	Frequenz der Belastung
3 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	-
3 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	0,56 Hz	-
3 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	20 Hz	-
3 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	50 Hz
6 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	-
6 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	0,6 Hz	0,4 Hz
6 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	25 Hz	-
6 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	80 Hz
12 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	-
12 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	1,49 Hz	0,6 Hz
12 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	14 Hz
12 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	60 Hz	90 Hz
∞	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	-
∞	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	1 Hz
∞	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	22 Hz
∞	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	-	95 Hz

Mithilfe der gewonnenen Belastungsdaten lässt sich auch das generelle Kraftniveau vergleichen. Dazu wird eine Diagramm erstellt auf welchem auf der Abszisse die verschiedenen Struktursteifigkeiten 3 mm, 6 mm, 12 mm und ∞ (symbolisch für eine starre Struktur) stehen und auf der Ordinate die Kraft aufgetragen ist, siehe Abbildung 33. In dieses Diagramm sind jeweils die Maximalkräfte und die mittleren Kräfte von den Versuchen mit $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit symbolisch aufgetragen, da dies die Kollisionsgeschwindigkeiten sind, die sowohl bei den starren als auch deformierbaren Strukturen für die Versuche verwendet werden.

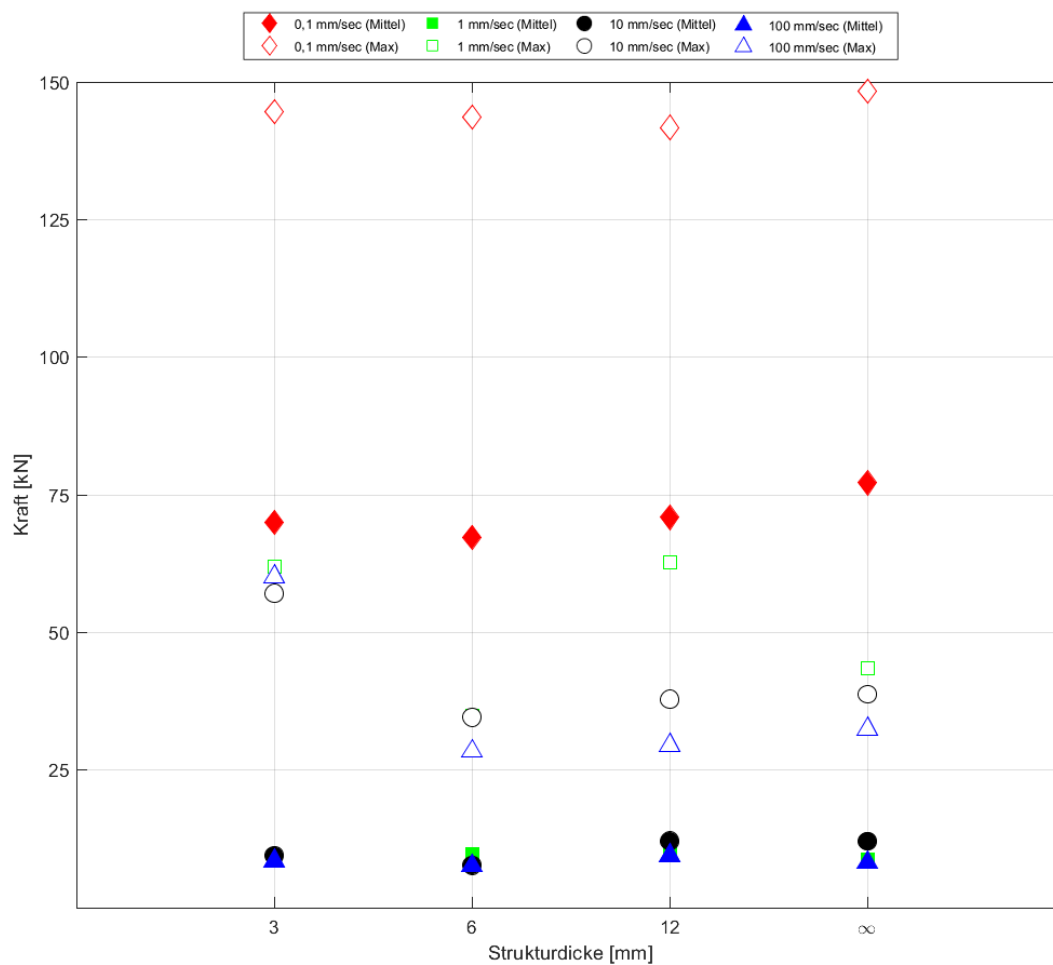


Abbildung 33: Vergleich der Maximalkraft und mittleren Kraft bei verschiedenen Struktursteifigkeiten

Hier ist eindeutig zu erkennen, dass im duktilen Fall bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ sowohl die höchste Maximalkraft als auch die größte mittlere Kraft von allen Versuchen unabhängig von der Struktursteifigkeit gemessen wird. Die Maximalkraft bewegt sich um den Bereich von 144 kN und die mittlere Kraft um den Bereich 71 kN. Kleine Abweichungen der Maximal- und mittleren Kräfte zwischen den verschiedenen Struktursteifigkeiten lassen aber keinen eindeutigen Schluss in Bezug auf die Struktursteifigkeit zu. Bei den spröden Versuchen befindet sich das mittlere Kraftniveau über alle Struktursteifigkeiten hinweg auf einem niedrigen Kraftniveau von ca. 9 kN. Kleine Schwankungen lassen auch hier keinen direkten Zusammenhang mit der Struktursteifigkeit erkennen. Bei den Maximalkräften hingegen ist zu erkennen, dass sich diese bei einer Struktursteifigkeit von 3 mm im Vergleich zu den anderen merklich abheben. So bewegt sich die Maximalkraft, bei einer Struktursteifigkeit von 3 mm, im Bereich um 60 kN und bei den übrigen Struktursteifigkeiten um 35 kN (abgesehen von einem Ausreißer). In Tabelle 3 sind zur Übersicht die Maximal- und mittleren Kräfte über der Struktursteifigkeit und Kollisionsgeschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 3: Tabellarische Auflistung der Maximal- und mittleren Kräfte

Struktursteifigkeit	Kollisionsgeschwindigkeit	mittlere Kraft	Maximalkraft
3 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	70,03 kN	144,61 kN
3 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	8,99 kN	61,98 kN
3 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	9,43 kN	57,08 kN
3 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	8,51 kN	60,13 kN
6 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	67,32 kN	143,67 kN
6 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	9,68 kN	34,92 kN
6 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	7,72 kN	34,58 kN
6 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	7,63 kN	28,38 kN
12 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	70,88 kN	141,75 kN
12 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	10,66 kN	62,66 kN
12 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	12,12 kN	37,84 kN
12 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	9,53 kN	29,5 kN
∞	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	77,16 kN	148,29 kN
∞	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	8,69 kN	43,47 kN
∞	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	12,08 kN	38,8 kN
∞	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	8,21 kN	32,41 kN

Darstellungen der Kollisionsenergie zeigen auf der Abszisse den Zylinderweg und auf der Ordinate die Kollisionsenergie. Die Kollisionsenergie ist hierbei das Integral der Reaktionskräfte über den Zylinderweg. Bei den Versuchen mit deformierbaren Strukturen mit duktilem Verhalten wird zudem die Energiedissipation in die Struktur dargestellt. Diese wird gebildet aus dem Integral der Reaktionskräfte über der absoluten Durchbiegung der Struktur, die mit dem Wegaufnehmer gemessen wird. Bei den spröden Versuchen gegen die deformierbaren Strukturen war aufgrund der Schwingung der Struktur keine Integration der Reaktionskräfte über der Durchbiegung der Struktur möglich.

Ein Vergleich der Kollisionsenergien bei verschiedenen Struktursteifigkeiten und gleicher Kollisionsgeschwindigkeit lässt bei duktilen Versuchen eine Tendenz erkennen, dass die Kollisionsenergie mit Zunahme der Struktursteifigkeit sinkt. In Abbildung 34 ist zu sehen, dass die Kollisionsenergie bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei einer Struktursteifigkeit von 3 mm ca. 9000 J beträgt. Bei einer Struktursteifigkeit von 6 mm beträgt die Kollisionsenergie ca. 7000 J und bei einer Struktursteifigkeit von 12 mm nur noch ca. 4200 J.

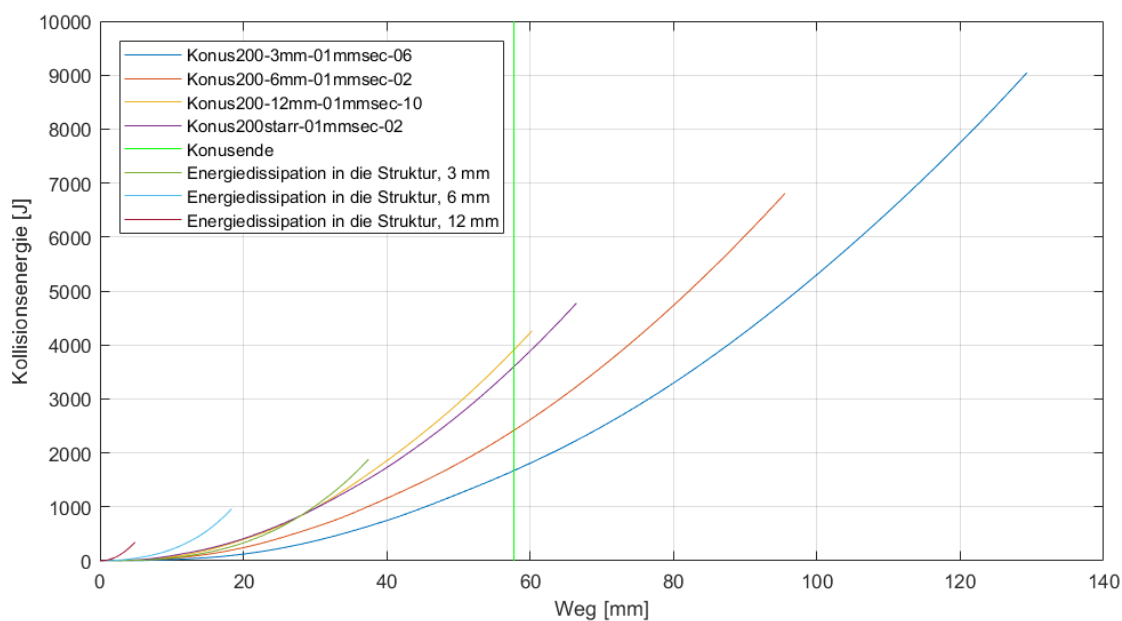


Abbildung 34: Kollisionsenergie, verschiedene Struktursteifigkeiten, $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, duktil

Ein Vergleich der spröden Versuche bei verschiedenen Struktursteifigkeiten und gleicher Kollisionsgeschwindigkeit lässt keinen eindeutigen Rückschluss auf den Einfluss der Struktursteifigkeit zu. Exemplarisch ist dies in Abbildung 35 anhand der Kollisionsgeschwindigkeit $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ dargestellt.

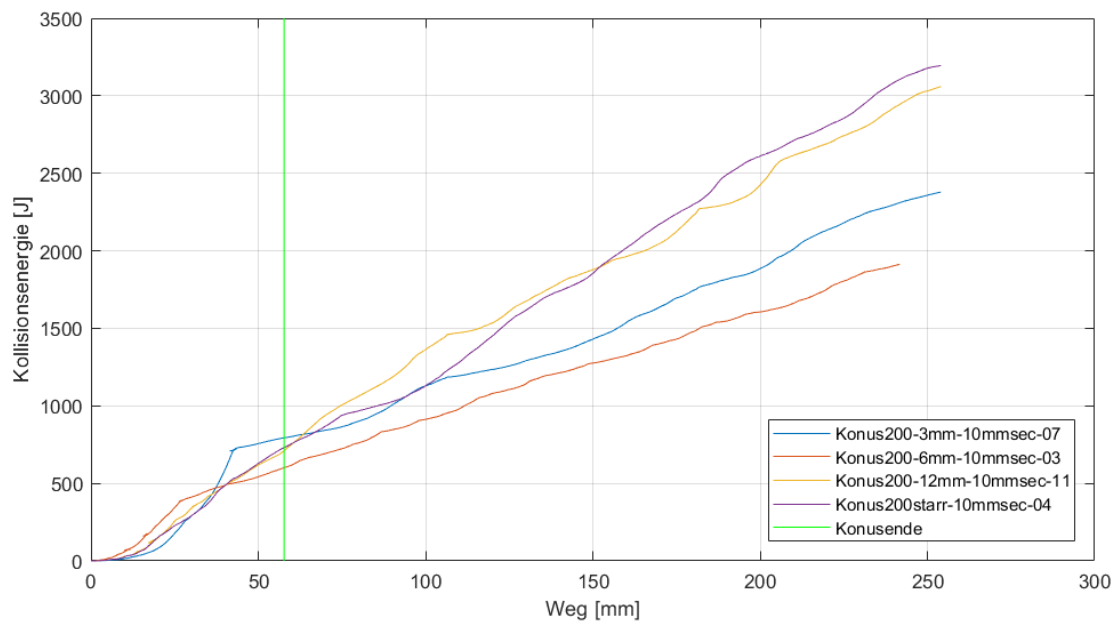


Abbildung 35: Kollisionsenergie, verschiedene Struktursteifigkeiten, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde

Eine generelle Erkenntnis ist, dass sich die Kollisionsenergieverläufe stark, je nach duktilem oder sprödem Versagen, unterscheiden. Allgemein zeigen die duktilen Versuche eine größere Kollisionsenergie als die spröden Versuche auf, vergleiche Abbildungen 34 und 35. Alle Versuche einer Kollisionsgeschwindigkeit bei gleicher Struktursteifigkeiten bewegen sich im gleichen Bereich mit geringen stochastischen Abweichungen. Dies gilt sowohl für duktile als auch spröde Versuche, exemplarisch dargestellt anhand eines spröden Versuches in Abbildung 36.

Weiterhin ist an den duktilen Versuchen mit deformierbaren Strukturen zu erkennen, dass die Energiedissipation in die Struktur mit abnehmender Struktursteifigkeit steigt, siehe Abbildung 34. So beträgt die Energiedissipation bei der 12 mm Struktur ca. 375 J, bei der 6 mm - Struktur ca. 1000 J und bei der 3 mm Struktur ca. 2000 J.

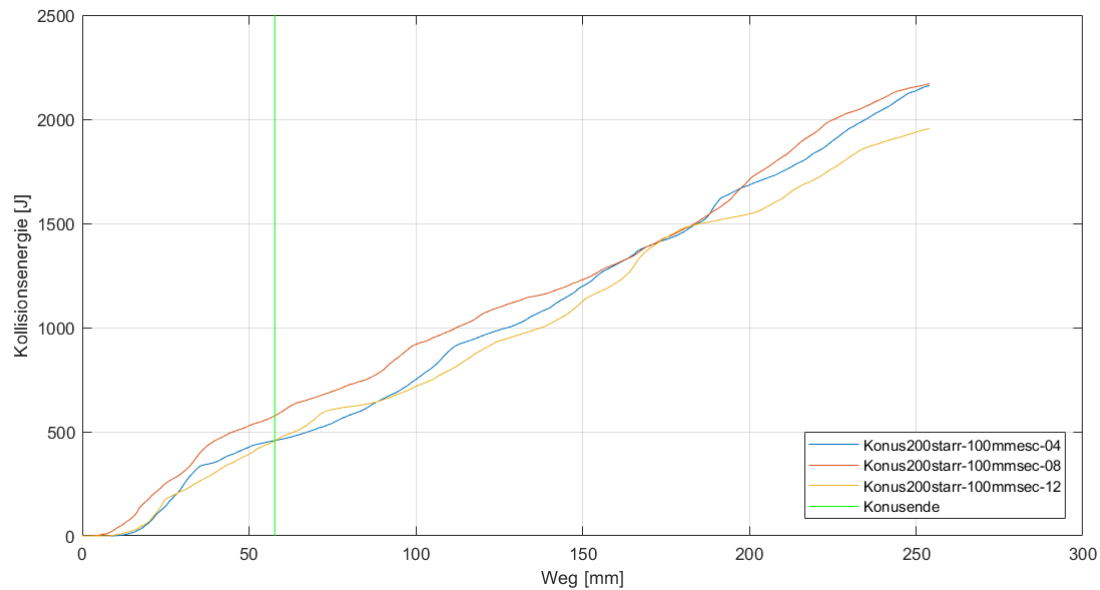


Abbildung 36: Kollisionsenergie, starre Struktur, $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, spröde

In Tabelle 4 sind zur Übersicht die Kollisionsenergien und Energiedissipationen in die Struktur über der Struktursteifigkeit und Kollisionsgeschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 4: Tabellarische Auflistung der Kollisionsenergien und Energiedissipationen in die Struktur

Struktursteifigkeit	Kollisionsgeschwindigkeit	Kollisionsenergie	Energiedissipation in die Struktur
3 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	9000 J	2000 J
3 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2400 J	-
3 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2400 J	-
3 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2200 J	-
6 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	6800 J	1000 J
6 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	1500 J	-
6 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2000 J	-
6 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2000 J	-
12 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	4250 J	375 J
12 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2750 J	-
12 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	3000 J	-
12 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2350 J	-
∞	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	5500 J	-
∞	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2375 J	-
∞	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	3000 J	-
∞	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	2000 J	-

Weiterhin interessant ist die Betrachtung der Kontaktfläche und der Drücke in der Kontaktfläche während der Versuche mittels der aus den TekScanTM- Druckmessfolien gewonnenen Daten. Hierzu wird eine Darstellung erstellt, die horizontal dreigeteilt ist und die Kraft-, Druck- und Flächenentwicklung aufzeigt. Sowohl die Flächenentwicklung als auch der Druck wird nominell und tatsächlich dargestellt. Der tatsächlich wirkende Druck berechnet sich aus der absoluten Kraft auf die TekScanTM- Druckmessfolien geteilt durch die gemessene Kontaktfläche wie folgt:

$$p = \frac{F}{A_{\text{TekScan}}}$$

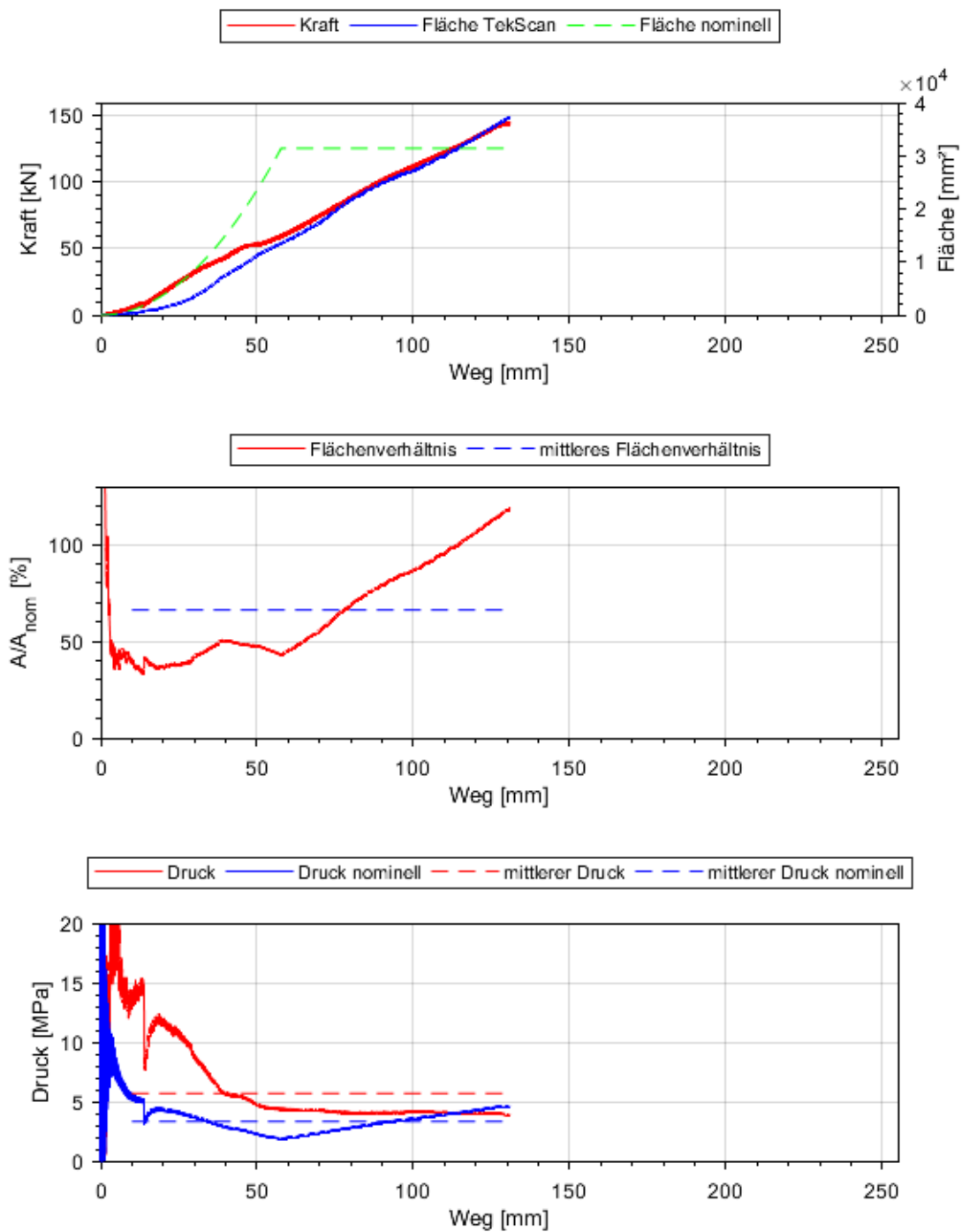
Der nominelle Druck hingegen berechnet sich aus dem Bezug zur nominellen Kontaktfläche wie folgt:

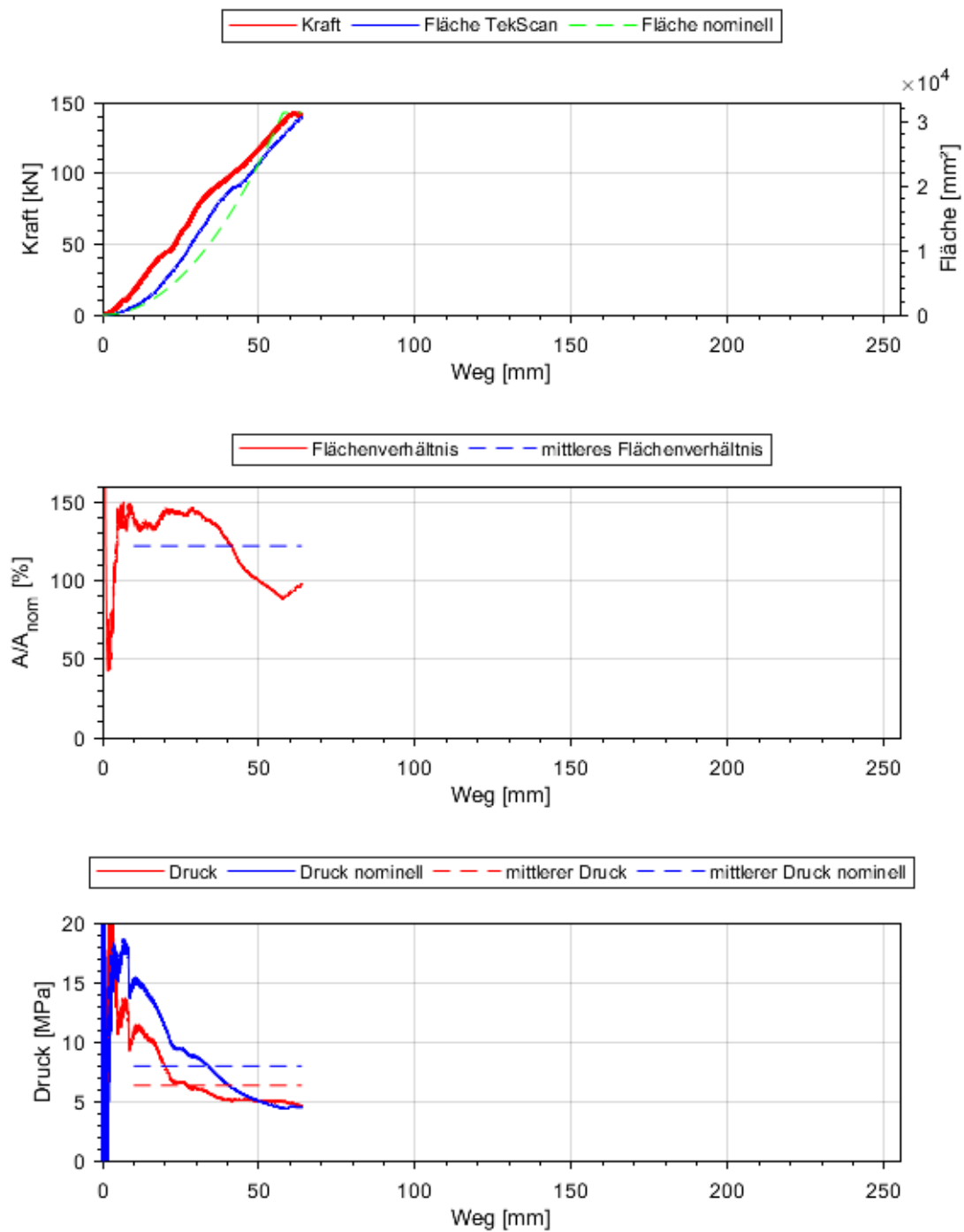
$$p_{\text{nom}} = \frac{F}{A_{\text{nom}}}$$

Zusätzlich werden die mittleren Drücke und das mittlere Flächenverhältnis dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass bei der Berechnung der mittleren Drücke und dem mittleren Flächenverhältnis erst Messungen ab einem Zylinderweg von 10 mm berücksichtigt werden, da bei sehr niedrigen Kontaktflächen durch sehr kleine Flächen geteilt wird, was zu unrealistisch hohen Drücken und Kontaktflächenverhältnissen führt.

Die Darstellung zeigt, dass bei den duktilen Versuchen das mittlere Kontaktflächenverhältnis, zwischen tatsächlich gemessener und nomineller Kontaktfläche, mit der Struktursteifigkeit steigt. Dies ist exemplarisch anhand der Kollisionsgeschwindigkeit $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ bei der 3 mm und 12 mm Struktur dargestellt, siehe Abbildungen 37 und 38 (im mittleren Diagramm). Zusätzlich ist exemplarisch bei der Betrachtung der Abbildungen 37 und 38 zu sehen, dass die Steigung der Kontaktfläche-Weg-Kurve und der Kraft-Weg-Kurve mit ansteigender Struktursteifigkeit größer wird, sodass die maximale Hubkraft bei kleineren Zylinderwegen erreicht wird. Letzteres wird durch Messungen der Kraft mittels der Kraftmessdosen am Hubzylinder bestätigt, siehe im digitalen Anhang die Kraft-Weg-Verläufe.

Weiterhin ist in den Abbildungen 37 und 38 zu erkennen, dass bei einer Struktursteifigkeit von 3 mm das aktuelle Flächenverhältnis mit dem Zylinderweg ansteigt, wohingegen bei einer Struktursteifigkeit von 12 mm eine fallende Tendenz des Flächenverhältnisses über dem Zylinderweg zu beobachten ist.

Abbildung 37: Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 3 mm Struktur, 0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$

Abbildung 38: Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 12 mm Struktur, 0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$

Eine Betrachtung des Verlaufes des Flächenverhältnisses der 6 mm Struktur, siehe digitalen Anhang, zeigt genau wie die 3 mm Struktur einen Anstieg des Flächenverhältnisses mit dem Zylinderweg. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass zwischen der 6 mm und 12 mm eine Struktursteifigkeit liegt, die einen Umschlagpunkt von steigender zu fallender Tendenz des Flächenverhältnisses mit dem Zylinderweg darstellt.

Der Grund für die unterschiedlichen Verläufe des Flächenverhältnisses über dem Zylinderweg bei verschiedenen Struktursteifigkeiten ist, dass bei einer dünnen Struktur anfangs die Energie, die zur Durchbiegung der Struktur benötigt wird, geringer ist als die, welche zum Versagen der Eisprobe benötigt wird. Von daher fährt der Hubzylinder zunächst einen bestimmten Abschnitt, ohne dass dabei die Eisprobe merklich versagt oder verformt, was mit einer geringen Kontaktfläche der Eisprobe mit der Struktur verbunden ist. Wird der Punkt erreicht, an dem die Durchbiegung der Struktur mehr Energie benötigt, als die Eisprobe standhalten kann, fängt die Eisprobe an zu versagen und vergrößert damit die Kontaktfläche zur Struktur. Da die Struktur zu diesem Zeitpunkt durchgebogen ist, hat sich die Auflagefläche auf der Struktur vergrößert. Dies führt neben dem Kriechen des Eises und der Zunahme des Eisprobenradius mit dem Zylinderweg dazu, dass die Kontaktfläche mit dem Zylinderweg steigt und die nominelle Kontaktfläche sogar übersteigt.

Interessant ist desweiteren, dass der mittlere Druck bei allen duktilen Versuchen, unabhängig von der Struktursteifigkeit, nahezu gleich ist und sich im Bereich von 6 MPa liegt. Der mittlere nominelle Druck steigt hingegen mit der Struktursteifigkeit an.

Bei den spröden Versuchen lässt sich kein Einfluss der Struktursteifigkeit auf das mittlere Flächenverhältnis oder den mittleren Druck erkennen. Die Flächenverhältnisse schwanken stochastisch um den 20 %-Bereich und die mittleren Drücke um 2,6 MPa, exemplarisch dargestellt in Abbildung 39 anhand eines Versuchs mit $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ Kollisionsgeschwindigkeit gegen eine 6 mm Struktur. Der Verlauf des Kontaktflächenverhältnisses über dem Zylinderweg zeigt über alle Struktursteifigkeiten hinweg eine fallende Tendenz und pendelt sich im Bereich des mittleren Flächenverhältnisses ein. Ebenso ist die bei dem Verlauf des Drucks über dem Zylinderweg. Erwähnenswert ist aber, dass es bei den spröden Versuchen bei Zylinderwegen über 60 mm immer wieder mal zu kurzzeitigen lokalen Druckmaxima kommt, welche den mittleren Druck um ein vielfaches übersteigen. Dieses Phänomen ist bei duktilen Versuchen nicht zu beobachten.

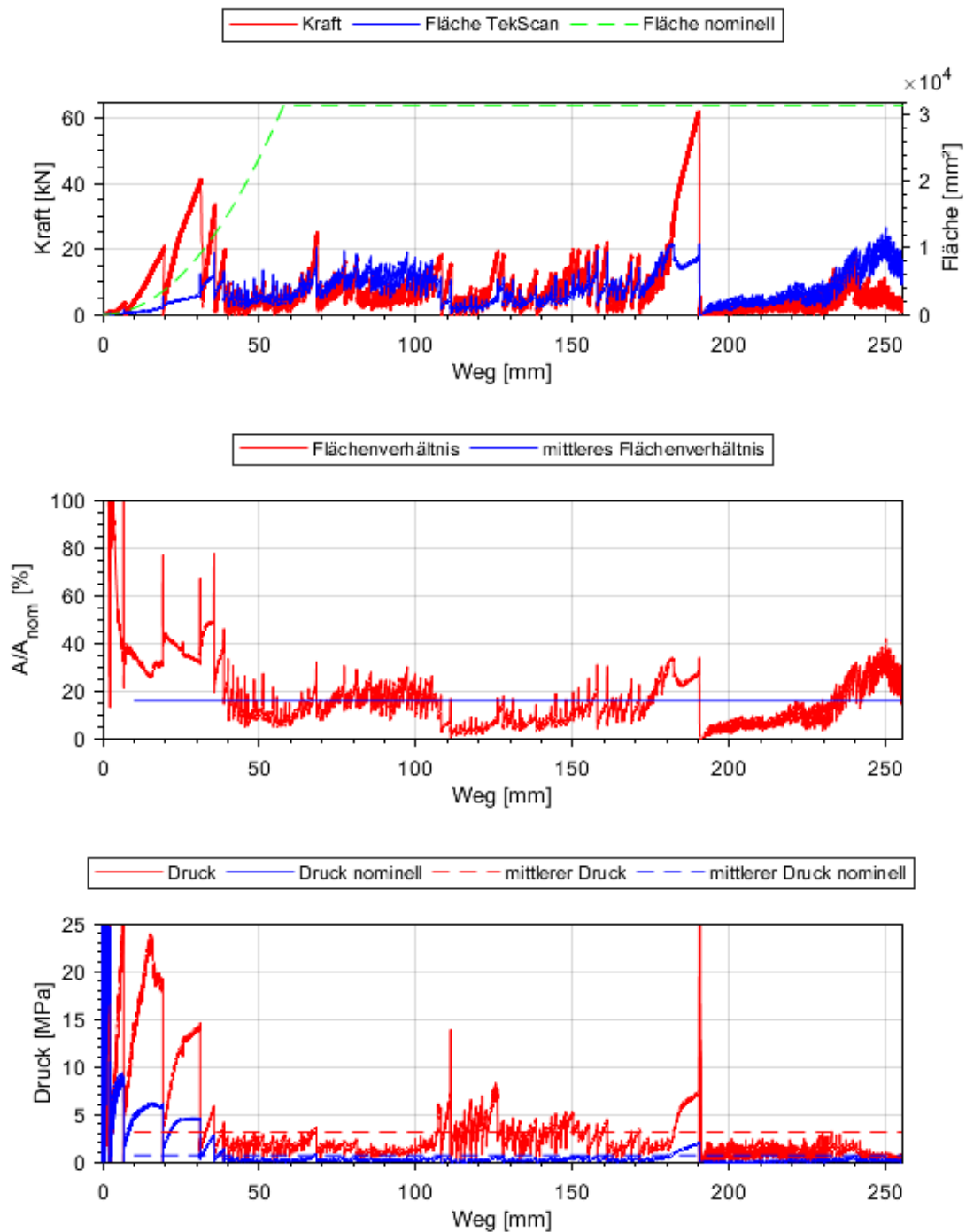
Abbildung 39: Druck- und Kontaktflächenentwicklung, 3 mm Struktur, 1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$

Abbildung 40 zeigt das mittlere Flächenverhältnis auf der Ordinate über den verschiedenen Struktursteifigkeiten auf der Abszisse an. Hierbei sind die verschiedenen Kollisionsgeschwindigkeiten $0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$, $10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ und $100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ symbolisch aufgetragen, siehe Abbildung 40. Diese Darstellung dient dazu die Versuche untereinander besser vergleichen zu können und speziell den Einfluss der Struktursteifigkeit auf das mittlere Flächenverhältnis aufzuzeigen.

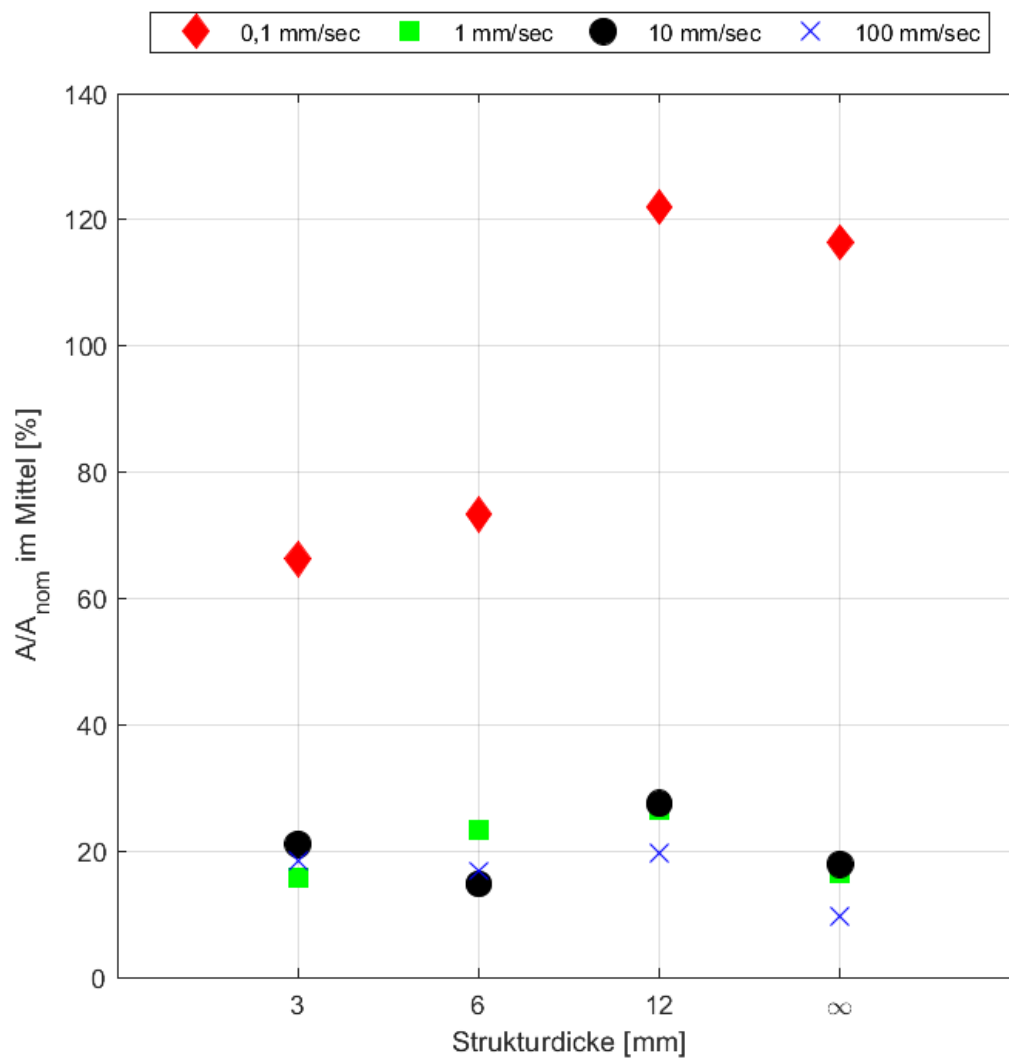


Abbildung 40: Vergleich der mittleren Flächenverhältnisse

In Tabelle 5 sind zur Übersicht die mittleren Flächenverhältnisse, Drücke und nominellen Drücke über der Struktursteifigkeit und Kollisionsgeschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 5: Tabellarische Auflistung des mittleren Flächenverhältnisses, des mittleren Drucks und des mittleren nominellen Drucks

Struktursteifigkeit	Kollisionsgeschwindigkeit	mittleres Flächenverhältnis A/A_{nom}	mittlerer Druck	mittlerer nom. Druck
3 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	66,23 %	5,67 MPa	3,3 MPa
3 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	15,81 %	3,12 MPa	0,68 MPa
3 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	21,09 %	2,39 MPa	0,64 MPa
3 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	18,49 %	2,38 MPa	0,58 MPa
6 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	73,3 %	5,71 MPa	4,01 MPa
6 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	23,36 %	3,36 MPa	1,13 MPa
6 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	14,8 %	3,11 MPa	0,68 MPa
6 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	16,85 %	2,61 MPa	0,57 MPa
12 mm	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	121,98 %	6,33 MPa	7,94 MPa
12 mm	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	26,51 %	1,92 MPa	0,73 MPa
12 mm	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	27,54 %	2,2 MPa	0,75 MPa
12 mm	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	19,64 %	2,35 MPa	0,46 MPa
∞	0,1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	116,45 %	6,15 MPa	7,56 MPa
∞	1 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	16,6 %	2,77 MPa	0,66 MPa
∞	10 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	17,87 %	3,06 MPa	0,57 MPa
∞	100 $\frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	9,61 %	2,77 MPa	0,25 MPa

Bei der Auswertung der Daten aus den TekScanTM- Druckmessfolien ist zu erwähnen, dass die Beobachtungen aus den bildlichen Darstellungen der Kontaktflächen von duktilen und spröden Versuchen die im Kapitel „Versuchsergebnisse“ gemacht wurden, siehe Tabelle 1, die Aussagen von Sodhi [4] bestätigen. Sodhi [4] stellte bei spröden Versuchen auch eine linienartige und bei den duktilen eine sich allmählich vergrößernde Kontaktfläche fest.

Ebenso ist zu erwähnen, dass auch die Erkenntnisse von Sodhi [4] bezüglich der Abhängigkeit des Effektivdrucks von der Art des Versagensverhaltens bestätigt werden konnten. Demnach ist das Druckspektrum bei duktilen Versuchen bei fortgeschrittenem Zylinderweg gering und kann bei spröden Versuchen, aufgrund kurzzeitiger lokaler Druckmaxima, größer sein, siehe Abbildungen 37 und 39.

Die Auswertung der Daten aus den Messungen mit dem Laserdistanzmesser zeigt bei genauerer Betrachtung der Gesamtdurchbiegungen, welche sich aus plastischer und elastischer Durchbiegung zusammensetzen, und der plastischen Durchbiegungen bei verschiedenen Struktursteifigkeiten einen Einfluss der Struktursteifigkeit. Das Verhältnis von maximaler Gesamtdurchbiegung zu plastischer Durchbiegung zeigt, dass die Differenz zwischen der maximalen Gesamtdurchbiegung und bleibender plastischer Durchbiegung mit der Struktursteifigkeit steigt. So beträgt das prozentuale Verhältnis zwischen der plastischen und der Gesamtdurchbiegung bei der 3 mm Struktur bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von $1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$ noch 85 %. Bei der 6 mm Struktur sind es 76,87 % und bei der 12 mm Struktur nur noch 22,01 %.

Allerdings wird dieses Verhalten nur bei sprödem Eisverhalten beobachtet. Bei duktilem Eisverhalten sind maximale Gesamtdurchbiegungen und plastische Durchbiegung nahezu identisch.

In Tabelle 6 sind zur Übersicht die Verhältnisse von maximaler plastischer Durchbiegung zu maximaler Gesamtdurchbiegung über der Struktursteifigkeit und Kollisionsgeschwindigkeit aufgeführt.

Tabelle 6: Tabellarische Auflistung der Verhältnisse von maximaler plastischer Durchbiegung zu maximaler Gesamtdurchbiegung

Struktursteifigkeit	Kollisionsgeschwindigkeit	max. plastische/ max. Gesamtdurchbiegung
3 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	99,97 %
3 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	85 %
3 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	79,9 %
3 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	76,43 %
6 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	99,99 %
6 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	76,87 %
6 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	50,96 %
6 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	42,89 %
12 mm	$0,1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	99,99 %
12 mm	$1 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	22,01 %
12 mm	$10 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	15,22 %
12 mm	$100 \frac{\text{mm}}{\text{sec}}$	23,54 %

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchung hat ergeben, dass die Struktursteifigkeit nicht auf alle untersuchten Aspekte einen eindeutig erkennbaren Einfluss hat. Dennoch ist sie eine wichtige Einflussgröße bei der Betrachtung von Eis-Struktur-Interaktionen.

Es hat sich gezeigt, dass die Struktursteifigkeit sowohl einen Einfluss auf die Frequenz der Belastung auf die Struktur, als auch auf die Frequenz der Schwingung der deformierbaren Struktur, hat. Mit zunehmender Struktursteifigkeit erhöht sich die Frequenz beider. Gleiches ist bei einem Anstieg der Kollisionsgeschwindigkeit zu beobachten. Außerdem ist bei den duktilen Versuchen erkannt worden, dass die Steigung des Belastungsverlaufes auf die Struktur mit zunehmender Struktursteifigkeit größer wird. Die Auswertung der Kraftniveaus hat ergeben, dass es weder bei duktilem noch sprödem Verhalten einen signifikanten Einfluss der Struktursteifigkeit gibt. Die gemessenen Größen weisen ein stochastisches Verhalten auf. Die Untersuchung der Kollisionsenergie hat gezeigt, dass es im duktilen Fall einen signifikanten Einfluss der Struktursteifigkeit gibt. Die Kollisionsenergie sinkt mit Zunahme der Struktursteifigkeit. Bei sprödem Versagen ist kein eindeutiger Einfluss der Struktursteifigkeit auf die Kollisionsenergie erkennbar. Weiterhin ist erkannt worden, dass die Energiedissipation in die deformierbaren Strukturen mit abnehmender Struktursteifigkeit steigt. Die Auswertung der aus den TekscanTM-Druckmessfolien gewonnenen Daten lies einen Einfluss der Struktursteifigkeit bei den duktilen Versuchen erkennen. Es ist festgestellt worden, dass das mittlere Flächenverhältnis von tatsächlicher zu nomineller Kontaktfläche mit der Struktursteifigkeit ansteigt. Außerdem ist beobachtet worden, dass sich der Verlauf des Kontaktflächenverhältnisses über dem Zylinderweg von geringen zu höheren Struktursteifigkeiten von steigend zu fallend ändert. Eine Betrachtung der mittleren Drücke zeigte keinen Einfluss der Struktursteifigkeit. Die nominellen Drücke hingegen sind mit steigender Struktursteifigkeit angestiegen. Die Betrachtung der spröden Versuche haben keinen Einfluss der Struktursteifigkeit gezeigt. Ein Vergleich der Gesamtdurchbiegungen, welche sich aus plastischer und elastischer Durchbiegung zusammensetzt, hat gezeigt, dass mit zunehmender Struktursteifigkeit die Differenz zwischen plastischer und der Gesamtdurchbiegung mit der Struktursteifigkeit ansteigt. Allerdings ist dieses Verhalten nur bei spröden Versuchen beobachtet worden. Allgemein differenziert sich das Verhalten sowohl von den Eisproben, als auch von der Struktur, stark je nach Versagensverhalten der Eisproben.

Es gibt weiterhin offene Fragen bezüglich Eis-Struktur-Interaktionen. Die Betrachtung des Übergangsbereichs zwischen sprödem und duktilem Versagensverhalten von Eis bilden einen weiteren interessanten und komplexen Themenbereich. Weiterhin interessant wäre eine genauere Betrachtung der Struktursteifigkeit in Bezug auf die Frequenz der Schwingung der Strukturen. Hier wäre es sinnvoll durch viele Messungen unter gleichen Bedingungen standfeste Ergebnisse herauszufiltern. Generell ist es empfehlenswert Aussagen bezüglich gemachter Messungen durch Wiederholung der Messungen unter gleichen Bedingungen mehr Aussagekraft zu verleihen. Das Verhalten von Strukturen und Eisproben bei Anregungen im Resonanzbereich zu untersuchen, wäre ein weiterer Forschungspunkt.

Für zukünftige Arbeiten wird empfohlen vor allen Versuchen stets auf eine Tarierung und Kalibrierung der Messsysteme zu achten. In dieser Arbeit wurden die TekscanTM-Druckmessfolien weder kalibriert noch äquilibriert, weshalb es unter den TekscanTM-Druckmessfolien Unterschiede in der Darstellung der Intensität einer Sensorzelle geben kann.

Literatur

- [1] THOMAS, David N. (Hrsg.): *Sea ice*. Third edition. Chichester, UK and Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2017 <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&AN=1445359>. – ISBN 1118778383
- [2] TIMCO, G. W. ; WEEKS, W. F.: A review of the engineering properties of sea ice. In: *Cold Regions Science and Technology* 60 (2010), Nr. 2, S. 107–129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2009.10.003>. – DOI 10.1016/j.coldregions.2009.10.003
- [3] KRAJČINOVIC, Dusan: *North-Holland series in applied mathematic and mechanics*. Bd. v. 41: *Damage mechanics*. Amsterdam and New York : Elsevier, 2010 <http://www.sciencedirect.com/science/bookseries/01675931/41>. – ISBN 9780444823496
- [4] SODHI, Devinder S. ; TAKEUCHI, Takahiro ; NAKAZAWA, Naoki ; AKAGAWA, Satoshi ; SAEKI, Hiroshi: Medium-scale indentation tests on sea ice at various speeds. In: *Cold Regions Science and Technology* 28 (1998), Nr. 3, S. 161–182. [http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X\(98\)00017-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0165-232X(98)00017-2). – DOI 10.1016/S0165-232X(98)00017-2
- [5] DUVAL, P. ; ASHBY, M. F. ; ANDERMAN, I.: Rate-controlling processes in the creep of polycrystalline ice. In: *The Journal of Physical Chemistry* 87 (1983), Nr. 21, S. 4066–4074. <http://dx.doi.org/10.1021/j100244a014>. – DOI 10.1021/j100244a014. – ISSN 0022-3654
- [6] GOTTSTEIN, Günter: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (Springer-Lehrbuch). <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71105-6>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-71105-6>. – ISBN 978-3-540-71104-9
- [7] JORDAAN, Ian J.: Mechanics of ice–structure interaction. In: *Engineering Fracture Mechanics* 68 (2001), Nr. 17-18, S. 1923–1960. [http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944\(01\)00032-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0013-7944(01)00032-7). – DOI 10.1016/S0013-7944(01)00032-7. – ISSN 00137944
- [8] SHIH, L. Y.: Analysis of ice-induced vibrations on a flexible structure. In: *Applied Mathematical Modelling* 15 (1991), Nr. 11-12, S. 632–638. [http://dx.doi.org/10.1016/S0307-904X\(09\)81009-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0307-904X(09)81009-3). – DOI 10.1016/S0307-904X(09)81009-3
- [9] TEKSCAN, Inc.: I-Scan: Product Selection Guide. (2018)

- [10] RISKÅ, Kaj (Hrsg.) ; KÄMÄRÄINEN, Jorma (Hrsg.): *A review of ice loading and the evolution of the Finnish-Swedish Ice Class Rules*. 2011
- [11] ZEIT ONLINE ; DPA: *Nordpazifik: Russische Bohrinself mit 67 Arbeitern gesunken*. <http://www.zeit.de/gesellschaft/2011-12/russland-bohrinsel-tote>. Version: 18.12.2011
- [12] *Pressure Ridge of Multi-year ice*. https://www.pmel.noaa.gov/arctic-zone/images/ice_PressRidge3.jpg. Version: 23.07.2009
- [13] SINHA, N. K.: Creep model of ice for monotonically increasing stress. In: *Cold Regions Science and Technology* 8 (1983), Nr. 1, S. 25–33. [http://dx.doi.org/10.1016/0165-232X\(83\)90014-9](http://dx.doi.org/10.1016/0165-232X(83)90014-9). – DOI 10.1016/0165-232X(83)90014-9
- [14] GLEN, J. W.: The Creep of Polycrystalline Ice. In: *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 228 (1955), Nr. 1175, S. 519–538. <http://dx.doi.org/10.1098/rspa.1955.0066>. – DOI 10.1098/rspa.1955.0066. – ISSN 1364-5021
- [15] SANDERSON, Timothy J.: *Ice mechanics: Risks to offshore structures*. London : Graham & Trotman, 1988. – ISBN 086010785X
- [16] SCHULSON, Erland M.: The structure and mechanical behavior of ice. In: *JOM* 51 (1999), Nr. 2, S. 21–27. <http://dx.doi.org/10.1007/s11837-999-0206-4>. – DOI 10.1007/s11837-999-0206-4. – ISSN 1047-4838

5 Digitaler Anhang

- Bachelorarbeit im PDF-Format
- Matlab-Skripte
 - FrequenzStrukturschwingung: Darstellung der Frequenz der Strukturschwingung und der Belastung
 - Kuerzung: Automatisches Kürzen von Messdaten (Abschneiden von Vor- und Nachlaufzeit bei den Messversuchen)
 - KuerzungLasermessdaten: Manuelle Kürzung der Lasermessdaten (Abschneiden von Vor- und Nachlaufzeit der Lasermessung)
 - Lasermessdaten: Darstellung der Durchbiegung der deformierbaren Strukturen über den gesamten Strukturdurchmesser
 - ManuelleKuerzung: Manuelles Kürzen von Messdaten
 - Messdatenverarbeitung: Erstellen der Kraft-Weg-, Kollisionsenergie- sowie Frequenzverläufe bei automatisch gekürzten Datensätzen
 - MessdatenverarbeitungRohdaten: Datenverarbeitung von ungekürzten Messdaten (meistens für duktile Versuche genutzt)
 - MessdatenverarbeitungWegaufnehmer: Datenverarbeitung von ungekürzten Messdaten die zusätzlich die Durchbiegung der Struktur gemessen haben (nur bei Versuchen mit deformierbarer Struktur benutzt)
 - MittlereWerteVergleichDruck: Darstellung des mittleren Drucks über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
 - MittlereWerteVergleichFlaeche: Darstellung des mittleren Flächenverhältnisses über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
 - MittlereWerteNominellerDruck: Darstellung des mittleren nominellen Drucks über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
 - TekScanAuswertung: Auswertung der TekScanTM-Messdaten durch Darstellung der Kraftmessung, der tatsächlichen und nominellen Kontaktfläche sowie dem tatsächlichen und nominellen Druck.
 - TekScanBilder: Bildliche Darstellung der Kontaktfläche und Intensität der Zellenbelastung zwischen Struktur und Eisprobe

- VergleichDurchschnittskraft: Darstellung der mittleren Durchschnittskraft über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
- VergleichKraefteDimensionslos: Darstellung des Verhältnisses von Maximalkraft zur Durchschnittskraft über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
- VergleichMaximalkraft: Darstellung der Maximalkraft über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
- VergleichMaximalkraftDurchschnittskraft: Darstellung der Maximalkraft und Durchschnittskraft über verschiedenen Struktursteifigkeiten und Kollisionsgeschwindigkeiten
- Ergebnisse: Plots
 - Starre Strukturen (PDF): Darstellungen der Kraft-Weg-Verläufe, Frequenzgänge, Kollisionsenergieverläufe, Kontaktflächenverläufe, Druckverläufe, Vergleichsdiagramm
 - Deformierbare Strukturen (PDF): Darstellungen der Kraft-Weg-Verläufe, Frequenzgänge, Kollisionsenergieverläufe, Kontaktflächenverläufe, Druckverläufe, Vergleichsdiagramme über Struktursteifigkeiten, Durchbiegungsdarstellung
- Ergebnisse: Tabellen
 - Starre Strukturen: Auflistung der Maximalkraft, Durchschnittskraft, dem mittleren Flächenverhältnis, mittleren Druck und mittleren nominellen Druck für alle Versuche
 - Deformierbare Strukturen: Auflistung der Maximalkraft, Durchschnittskraft, maximalen elastischen und platischen Durchbiegung, dem mittleren Flächenverhältnis, mittleren Druck und mittleren nominellen Druck für alle Versuche
- Messdaten