

Diplomarbeit

Bruchmechanische Untersuchungen an PE-UHMW

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie - E 308

Arbeitsgruppe Nichtmetallische Werkstoffe

Eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswirtschaftslehre

von

Christian Böck

Matr.Nr. 0325184

Kohlstatt 19

4893 Zell am Moos

Wien, am.....

Danksagung:

Ich möchte diese Zeilen nutzen, um mich bei allen Personen zu bedanken, die es mir ermöglicht haben, mein Studium, sowie meine Diplomarbeit durchzuführen.

Mein besonderer Dank gilt:

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Vasiliki-Maria Archodoulaki

Für das Angebot dieser Diplomarbeit, und Ihre Unterstützung und Geduld, während dieser Arbeit, sowie vielen vorangegangenen Vorlesungen und Laborübungen.

Dr.techn. Ruth Markut-Kohl

Für Ihre Unterstützung während der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Versuche, und dass sie mir mit Ihrem umfassenden Wissen zu PE-UHMW viele Male weiterhelfen konnte.

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Koch

Für Tipps und Tricks zur Bruchmechanik und Probenfertigung

Roman Stoiber & Helmut Oswald

Für Rat und Tat in allen Belangen der Probenfertigung und praktischen Durchführung der Versuche.

Meine Eltern

Dafür, dass sie mich zu diesem Studium ermutigt haben, und mir jederzeit moralisch und finanziell zur Seite standen.

Christian Böck

Kurzfassung:

PE-UHMW gehört zu den heute meistverwendeten Kunststoffen in der Prothetik.

Ziel dieser Arbeit ist es, PE-UHMW in Hinblick auf das Zähigkeitsverhalten unter quasistatischer Belastung zu charakterisieren. Dies geschah unter besonderer Berücksichtigung der in Implantaten vorkommenden Bauteildicken.

Hierzu wurden mehrere Probengeometrien mit Querschnittsgrößen von 5*5 mm*mm bis 20*20 mm*mm, sowie bogenförmige Prüfkörper, auf Basis der Linear-Elastischen und Fließ-Bruchmechanik untersucht.

Zusätzlich wurden in einem Langzeitversuch 2 Lastfälle auf ihre Verträglichkeit für vorgeschädigte Implantate untersucht.

Bei dem untersuchten Material handelt es sich um GUR 1050, das in Form einer Ram-Extruded Rod für diese Arbeit zur Verfügung stand.

Inhalt

Danksagung:	i
Kurzfassung:	ii
1 Einleitung:	1
2 Werkstoff:	2
2.1 PE-UHMW:.....	2
2.1.1 Eigenschaften:	2
2.1.2 Anwendungen:	3
2.1.3 Rohstoff:	5
2.1.4 Halbzeug:.....	6
2.1.5 Bauteil:	10
3 Werkstofftechnische Untersuchungen:.....	11
3.1 Biegeversuch:.....	11
3.2 Bruchmechanik:.....	11
3.2.1 Spannungsintensitätsfaktor K:	12
3.2.2 J-Integral:.....	13
3.2.3 Geometrieunabhängigkeit:	14
3.3 Dauerversuch:.....	15
4 Experimentelles:	17
4.1 Prüfkörper:.....	17
4.1.1 Geometrie:	17
4.1.2 Fertigung:	23
4.2 Biegeversuch:.....	32
4.2.1 E-Modul:	32
4.2.2 Spannungen:.....	33
4.3 Spannungsintensitätsfaktor K:.....	33
4.4 J-Integral:	36

4.5	Korrektur:.....	42
4.6	Langzeitversuch:	43
5	Ergebnisse:.....	48
5.1	Biegeversuch:.....	48
5.2	Spannungsintensitätsfaktor K:.....	51
5.3	J-Integral:	60
5.3.1	Risswachstum:.....	60
5.3.2	Übersicht der Messwerte:.....	61
5.3.3	Gegenüberstellung unterschiedlicher Serien:.....	64
5.3.4	Kritische J-Integral-Werte:	66
5.3.5	Geometrieabhängigkeit:	70
5.3.6	Vergleich Einproben- mit Mehrproben-Technik:	71
5.3.7	Rissfläche:.....	71
5.4	Langzeitversuch:	73
5.4.1	Auswertung:	73
5.4.2	Verbesserung:	77
5.5	Fehlstelle:.....	79
6	Schlusswort:.....	80
6.1	Biegeversuch:.....	80
6.2	Spannungsintensitätsfaktor K:.....	80
6.3	J-Integral:	80
6.4	Langzeitversuch:	81
6.5	Zusammenfassend:.....	81
7	Literaturverzeichnis:	83
8	Anhang:	I

1 Einleitung:

PE-UHMW stellt heute aufgrund seiner hervorragenden Verschleiß- und Gleiteigenschaften, einen der wichtigsten Werkstoffe in der Prothetik dar. Gleichzeitig geht die Entwicklung zu immer filigraneren Implantate hin. Bruchmechanisch stellt dies ein besonders Problem dar, da sich Werkstoffe in Bauteilen, mit den notwendigen kleinen Abmessungen, anders verhalten, wie sie es in großen Bauteilen tun. Dies macht unter anderem speziell für diese Dimensionen ermittelte Vergleichswerte notwendig.

Im Zuge dieser Diplomarbeit sollten deshalb Vergleichswerte nach den Methoden der Linear-Elastischen Bruchmechanik, sowie der Fließbruchmechanik ermittelt werden.

Zusätzlich wurde im Zuge eines Langzeitversuches untersucht, ob bereits geschädigte Bauteile (Repräsentiert durch vorgekerbte Prüfkörper) für Implantate typische Lasten ertragen können.

2 Werkstoff:

2.1 PE-UHMW: (1)

PE-UHMW (kurz für Ultra-High Molecular Weight Polyethylene) gehört zur Gruppe der Thermoplaste. Innerhalb der Polyethylene unterscheidet man mehrere Gruppen anhand ihrer molaren Masse. Die kommerziell wichtigsten sind PE-LLD (Linear Low Density Polyethylene), PE-LD (Low Density Polyethylene), PE-HD (High Density Polyethylene) und PE-UHMW.

2.1.1 **Eigenschaften:** (1)

PE-UHMW zeichnet sich insbesondere durch folgende chemische und mechanische Eigenschaften aus:

- Chemisch Inert
- Gute Gleitfähigkeit
- Verschleißfest
- Hohe Schlagzähigkeit

Diese Eigenschaften machen PE-UHMW zu einer guten Wahl für Lager und andere stark verschleißbeanspruchte Bauteile.

Wird PE-UHMW mittels Gelspinnen zu Fasern verarbeitet erhält es zusätzlich eine außerordentliche Reißlänge von 400 km (2).

Ein Überblick über die wichtigsten mechanischen Eigenschaften von PE-HD und PE-UHMW ist in Tabelle 2-1 zusammengestellt.

Tabelle 2-1: Mechanische Eigenschaften von PE-HD und PE-UHMW; Übersetzt aus (1)

	PE-HD	PE-UHMW
Molmasse [10^6 g/Mol]	0,05 - 0,25	3,5 - 7,5
Schmelztemperatur [°C]	130 - 137	132 - 138
Querdehnungszahl [1]	0,40	0,46
Dichte [g/cm^3]	0,952 - 0,965	0,925 - 0,945
Zugmodul [GPa]	0,4 - 4,0	0,5 - 0,8
Fließgrenze [MPa]	22 – 31	21 – 28
Zugfestigkeit [MPa]	26 – 33	39 - 48
Bruchdehnung [%]	10 – 1200	350 – 525
Kerbschlagzähigkeit [J/m]	21 – 214	>1070
Kristallinitätsgrad [%]	60 - 80	39 - 75

2.1.2 Anwendungen: (1)

Der Großteil (mehr als 90%) des produzierten PE-UHMW wird heutzutage industriell verwendet. Hier wird es vorrangig für mechanisch stark belastete Bauteile verwendet. Unter anderem für:

- Auskleidung von Müllwagen
- Kohlerinnen
- Führungen in der Flaschenabfüllung
- Puffer für Schiffe und Hafenanlagen
- Seile in der Schifffahrt und Forstarbeit
- Gleitlager

Für künstliche Gelenke wurde PE-UHMW erstmals 1962 von Sir John Charnley verwendet, nachdem erste Versuche mit Hüftpfannen aus PTFE aufgrund starken Verschleißes fehlschlugen. Erschwerend kam noch hinzu, dass es durch die PTFE-Partikel zu starken Entzündungen rund um das Implantat kam.

Im Mai 1962 erhielt Charnley von einem Vertreter für Zahnräder und Lagerbuchsen aus PE-UHMW eine Probe dieses neuartigen Werkstoffes. Charnley lehnte ihn aber aufgrund seiner Weichheit ab.

Sein Kollege, Harry Craven, konnte ihn aber mit Ergebnissen vorläufiger Verschleißversuche von der überragenden Verschleißbeständigkeit des Materials überzeugen.

Um die Körperverträglichkeit von PE-UHMW zu untersuchen implantierte sich Charnley sowohl PE-UHMW Stücke wie auch Pulver in seinen Oberschenkel. Nachdem sich keine Nebenwirkungen einstellten befand er PE-UHMW Abrieb für Biokompatibel.

Das erste Hüftimplantat aus PE-UHMW verpflanzte Charnley kurze Zeit später im November 1962.

Heute, fast 50 Jahre später, stellt PE-UHMW den meistverwendeten Werkstoff für künstliche Gelenke dar. Doch nicht nur in der Menge der Implantate, sondern auch in ihrer Vielfalt zeigt sich der Stellenwert von PE-UHMW in der Medizin.

So wird PE-UHMW heute z.B. in folgenden Gelenken verwendet:

- Ellbogen
- Hüfte
- Knie
- Schulter
- Sprunggelenk
- Wirbelsäule

Seit damals wurden mehrere Versuche unternommen PE-UHMW zu verbessern. Ein Erfolg konnte allerdings erst in den 90er Jahren mit der Einführung von hochvernetztem PE-UHMW verbucht werden. Dieses zeichnet sich gegenüber nicht vernetztem PE-UHMW durch eine nochmals gesteigerte Verschleißbeständigkeit aus. Hochvernetztes PE-UHMW ist allerdings auch spröder als nicht vernetztes PE-UHMW, was besondere Sorgfalt beim Entwurf der Komponenten notwendig macht.

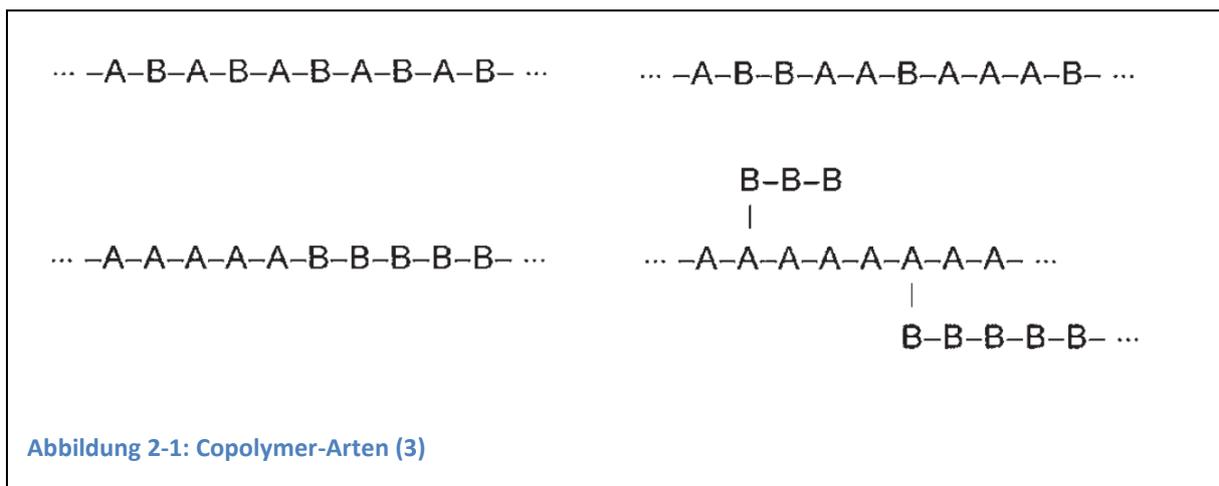
Um die Alterungsbeständigkeit zu erhöhen ist heute auch mit Vitamin E stabilisiertes PE-UHMW verfügbar.

Da die künstlichen Gelenke heute zunehmend filigraner gebaut werden, ist eine bruchmechanische Beurteilung der PE-UHMW Komponenten unter Berücksichtigung der tatsächlichen Abmessungen unerlässlich.

2.1.3 Rohstoff: (1)(3)

Kunststoffe sind generell aus „Bausteinen“, den Monomeren, aufgebaut. Sie lassen sich grob danach einteilen wie viele Monomere am Aufbau des Polymers beteiligt sind, und wie sie sich im Polymer anordnen.

Anhand der Anzahl der Monomer-Typen unterscheidet man Homopolymere und Copolymere. Homopolymere bestehen nur aus einem Monomer-Typ, Copolymere aus mehreren Monomer-Typen.



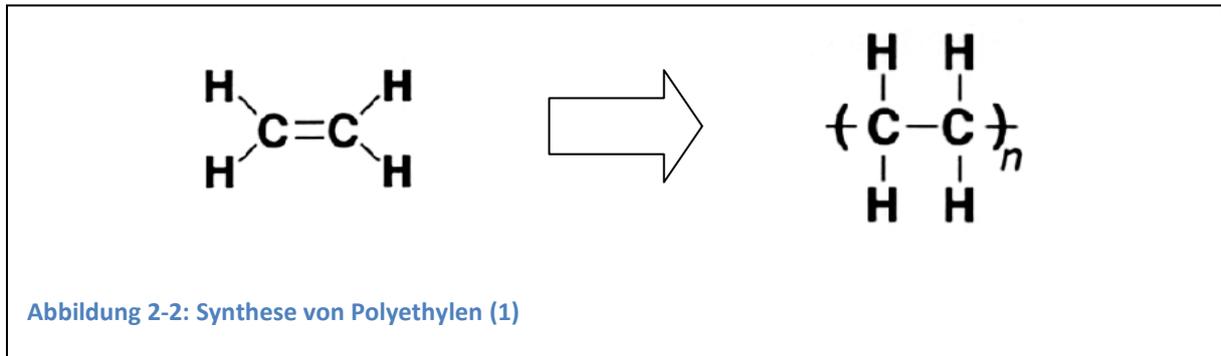
Die in Abbildung 2-1 gezeigten Copolymere sind:

- Alternierende Copolymere (links oben)
- Statistische Copolymere (rechts oben)
- Block-Copolymere (links unten)
- Pfropf-Copolymere (rechts unten)

Besteht ein Polymer nur aus einer einzigen Monomer-Kette ohne Abzweigungen spricht man von einem Linearen Polymer. Abzweigungen wie bei den Pfropf-Copolymeren sind auch bei Homopolymeren möglich.

Generell kann PE-UHMW aus mehreren Monomer-Typen bestehen (laut ISO 11542 sind mindestens 50% Ethylen notwendig). Auch kann es sowohl lineare wie auch verzweigt aufgebaut sein. Das für Implantate verwendete PE-UHMW ist allerdings ein lineares Homopolymer.

PE-UHMW wird, wie heute alle Polyethylene, aus Ethylen-Gas synthetisiert. Dabei verbinden sich die Kohlenstoff-Atome im Ethylen-Gas zu einer langen Kette, die das Rückgrat des PE-Moleküls bildet (siehe Abbildung 2-2).



Für PE-UHMW verbinden sich bei der Polymerisation bis zu 200.000 Ethylen-Atome.

Für die Synthese werden vorwiegende Ziegler-Natter Katalysatoren verwendet.

Das Endprodukt der Synthese ist ein feines PE-UHMW Pulver mit einer Partikelgröße von ca. 140 µm und einer Schüttdichte von ca. 0,45 g/cm³.

Als erstes wurde PE-UHMW im Jahre 1953 von Forschern eines Max Planck Instituts in einem neuartigen Niederdruck-Verfahren synthetisiert. Diese wandten sich infolgedessen an die Ruhrchemie AG (heute Ticona), welche 2 Jahre später mit der kommerziellen Produktion von PE-UHMW begann.

2.1.4 Halbzeug: (1)

Da sich PE-UHMW aufgrund seiner hohen Molmasse und der starken Verfilzung der Moleküle nicht im klassischen Sinn aufschmelzen lässt, können Fertigungsverfahren wie z.B. Spritzgießen oder Schneckenextrusion nicht angewendet werden.

Für die Erzeugung von Halbzeug und Rohlingen werden daher unter anderem die folgenden Verfahren angewendet:

- Ram Extrusion
- Compression Molding
- Direct Compression Molding
- Hot Isostatic Pressing

Ram Extrusion:(4) (5)

Bei der Ram Extrusion handelt es sich um einen kontinuierlichen Sinterprozess. Die Maschine (Abbildung 2-3) besteht aus einem üblicherweise hydraulisch angetriebenen Stempel (Ram), einer Matrize (Die), die abschnittsweise gekühlt oder beheizt wird, sowie einer Pulverzuführung (Feeding).

Während der Extrusion bewegt sich der Stempel permanent vor und zurück. Während der Rückbewegung des Stempels fällt über den Trichter Pulver in die Kammer vor dem Stempel. Bei der Vorwärtsbewegung des Stempels wird dieses in die Matrize gepresst. Dabei wird das Pulver verdichtet, und der restliche Inhalt der Matrize ein kleines Stück weitergeschoben. Während dem Durchlauf durch die Matrize wird das Pulver im beheizten Teil langsam aufgeschmolzen. Aufgrund der hohen Reibung zwischen der Schmelze und der Matrize, und der Kraft mit der der Stempel frisches Pulver nachpresst wird das Aufgeschmolzene Pulver verdichtet. Die aus dem Pulver entweichende Luft verlässt über einen kleinen Spalt zwischen Matrize und Stempel (ca. 0,1 mm) die Maschine. Zum Ende der Matrize hin wird die Schmelze abgekühlt und verlässt schließlich die Matrize.

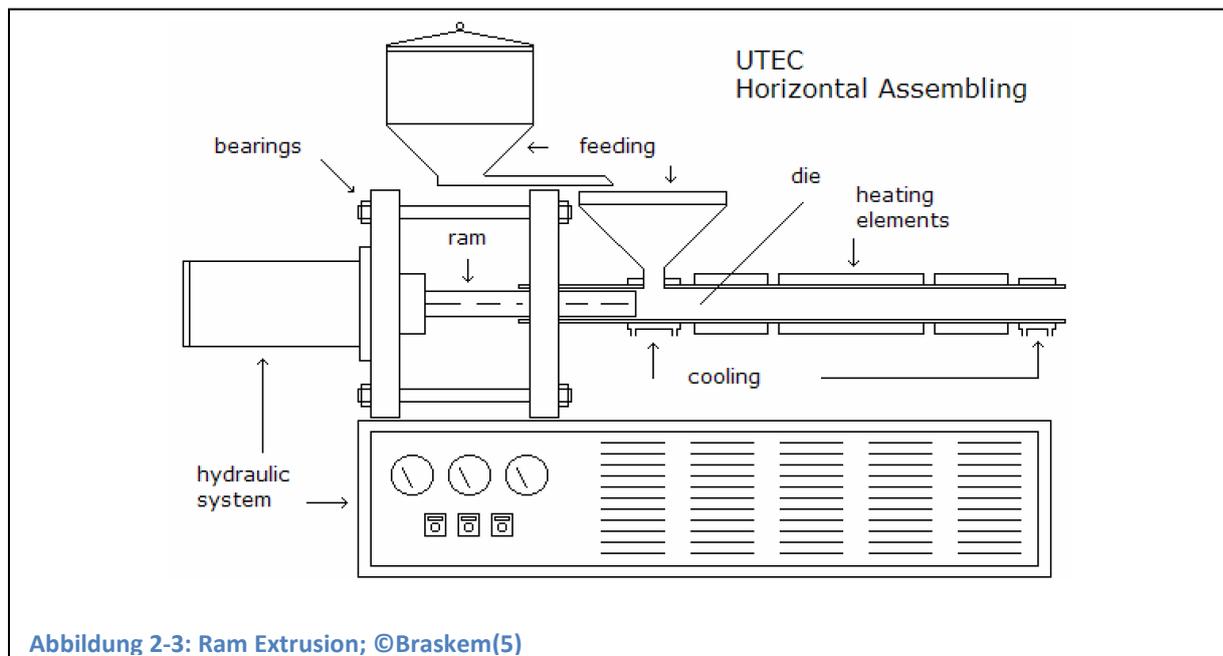


Abbildung 2-3: Ram Extrusion; ©Braskem(5)

Die für Gelenksimplantate üblichen Stangen bewegen sich in einem Bereich von 20 mm bis 80 mm Durchmesser. Aufgrund der geringen Kühlraten beträgt die Produktionsgeschwindigkeit nur wenige mm/min.

Compression Molding: (1) (6)

Bei diesem Verfahren wird das PE-UHMW Pulver zu Platten mit einer Dicke von üblicherweise 30 mm bis 80 mm gepresst. Die Platten können dabei Abmessungen bis zu 2x4 m*m erreichen.

Der Aufbau einer Presse ist in Abbildung 2-4 dargestellt.

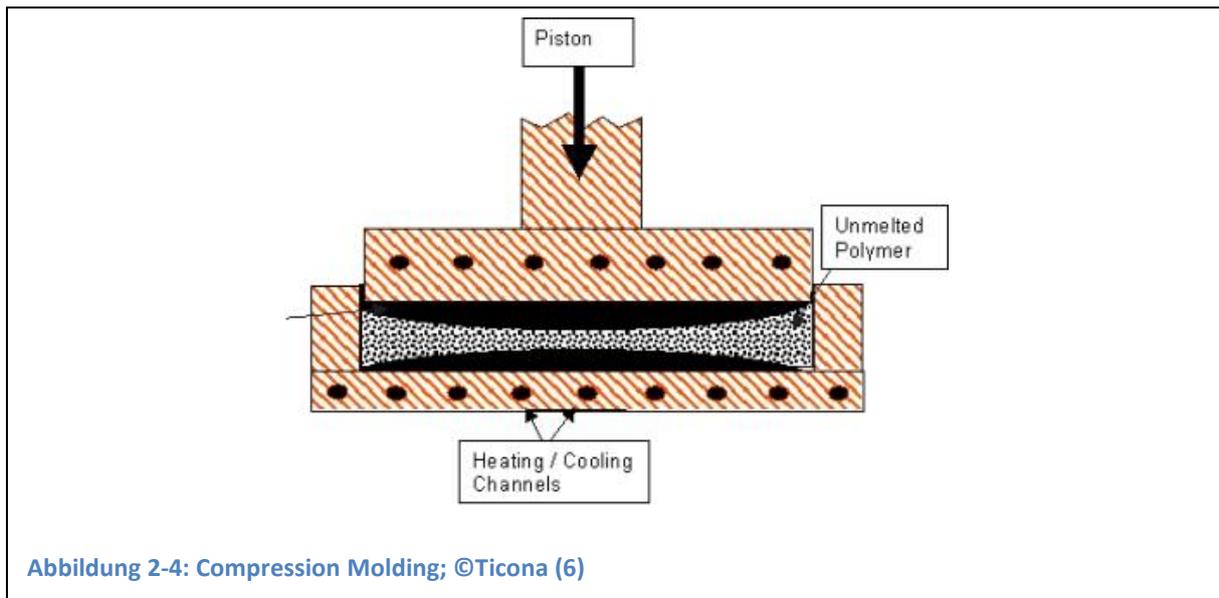
Zu Beginn des Pressvorganges wird die Form mit Pulver gefüllt und glatt gestrichen. Die Schütthöhe beträgt dabei ca. das 2-2,2 fache der gewünschten Plattendicke.

Um ein Aufwirbeln des Pulvers beim Schließen der Presse zu verhindern sollte der Spalt zwischen Stempel und Form nicht größer als 0,05 mm sein.

Anschließend wird die Luft aus dem Pulver ausgetrieben. Dies geschieht bei Raumtemperatur und einem Druck von 100 bar.

Nun wird der Druck auf 50 bar reduziert und der Heizvorgang gestartet. Während diesem werden die Kerntemperatur langsam auf 190 – 200 °C und der Druck auf 70 – 100 bar erhöht. Die Sinterdauer beträgt hierbei ca. 1 h/cm Plattendicke.

Im Anschluss daran wird der Druck auf 100 bar erhöht und der Kühlvorgang gestartet. Dieser dauert ca. halb solange wie der Sintervorgang.



Die so gewonnenen Platten werden im Anschluss meistens zu Stangen weiterverarbeitet.

Direct Compression Molding: (1)

Anstelle von Platten wird beim Direct Compression Molding das Bauteil (bzw. Rohlinge) direkt aus dem PE-UHMW Pulver gepresst. Die Bauteile weisen nach dem Pressen eine äußerst glatte Oberfläche auf, wodurch z.B. eine Nachbearbeitung der Gleitflächen von Gelenksimplantaten entfällt. Zusätzlich kann aufgrund der kompakten Teilegröße mit höherem Druck als beim Compression Molding gearbeitet werden.

Da bei diesem Verfahren nur wenige Bauteile je Durchgang gefertigt werden können, und jedes Bauteil seine eigene Form benötigt, übersteigt der Fertigungs-, Regel- und Kontrollaufwand den des Compression Molding Prozesses. Dies hat dazu geführt das heute kaum noch Implantate auf diese Art gefertigt werden.

Hot Isostatic Pressing: (1)

Bei diesem Verfahren wird das PE-UHMW Pulver anfangs in einen elastischen Behälter abgefüllt. Dieser wird in einer isostatischen Presse (Druckkammer ähnlich einem Autoklaven) ohne Temperaturerhöhung zu einem Grünling verpresst. Der Grünling gibt während diesem ersten Pressvorgang bereits den Großteil der im Pulver enthaltenen Luft ab. Anschließend wird er mit einer Schutzatmosphäre aus Argon in Folie eingeschweißt. Dieses Paket wird nun heiß ein zweites Mal isostatisch verpresst.

Die so erzeugte Rundstange hat isotropes Materialverhalten.

2.1.5 Bauteil: (1)

Die eigentlichen Implantats-Teile werden üblicherweise vom Implantats-Hersteller gefertigt. Allerdings ist auch eine Rohbearbeitung durch den Zulieferer nicht unüblich.

Als Verfahren zum Schruppen und Schlichten werden Dreh- und Fräsmaschinen mit CNC-Steuerung verwendet. Die tatsächlichen Schnittbedingungen wie Schnittwinkel, Zustellung und Vorschub werden von den Herstellern allerdings nicht preisgegeben. Sie müssen allerdings sorgfältig gewählt und überwacht werden, da PE-UHMW bei zu starker Wärmeeinwirkung geschädigt wird.

Die durch die spanende Bearbeitung entstehenden Riefen auf der Gleitfläche werden durch den Gleitpartner (dieser besteht aus Metall oder Keramik) innerhalb kurzer Zeit eingeebnet. Nach dieser Einlaufphase, in der relativ viel Abrieb anfällt, ist der Verschleiß nur noch durch die Oberflächenrauheit des Gleitpartners, sowie an der Gleitfläche vorhandene Verunreinigungen (z.B. Reste von Knochenzement) bestimmt.

3 Werkstofftechnische Untersuchungen:

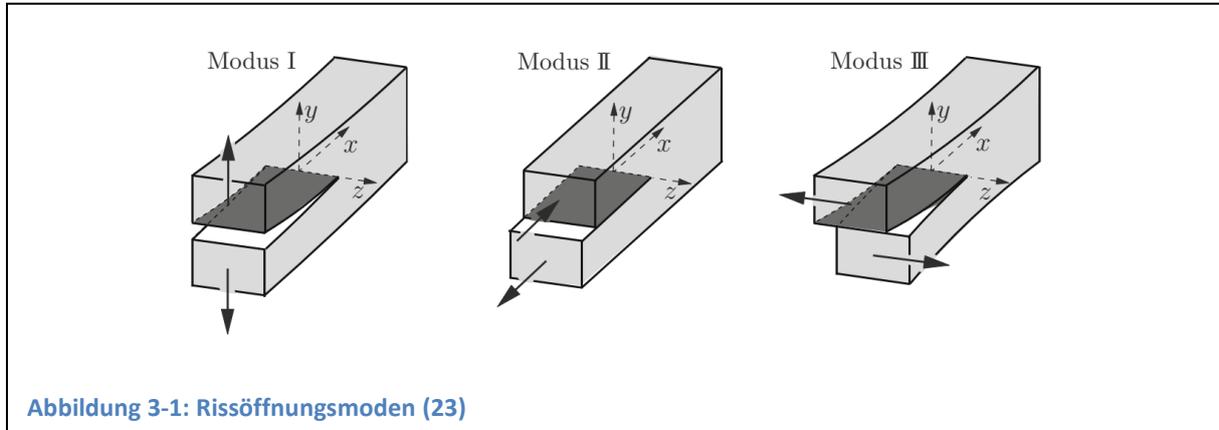
3.1 Biegeversuch: (7)

Er dient zur Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften an Proben oder Bauteilen unter inhomogener einachsiger Biegebeanspruchung.

Bei duktilen Werkstoffen wird er zur Bestimmung des Biege-Moduls, der Biege-Fließgrenze und des größtmöglichen Biegewinkels, bei spröden Werkstoffen zur Bestimmung der Biegefestigkeit angewendet.

3.2 Bruchmechanik: (7) (8)

Sie dient der Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte die bei quasistatischer Beanspruchung die Rissinitiierung, Bruch und stabile Rissenerweiterung und bei zyklischer Beanspruchung die Nichtausbreitungsfähigkeit und den stabilen Rissfortschritt von Makrorissen beschreibt. Die Kennwertermittlung in dieser Arbeit erfolgt lediglich für den Rissöffnungsmodus I (siehe Abbildung 3-1).



Die Bruchmechanischen Methoden lassen sich nach (8) in folgende Konzepte einteilen:

- Linear-Elastische Bruchmechanik
- Fließ Bruchmechanik
- Konzepte für Stabiles Risswachstum
- Konzepte der dynamischen Bruchmechanik
- Probabilistische Bruchmechanik

Von besonderem Interesse sind für diese Arbeit die ersten beiden.

Bei der Linear-Elastischen Bruchmechanik (LEBM) wird eine weitgehend linear-elastische Verformung bis zum Bruch vorausgesetzt. In der Nähe der Risspitze tritt allerdings durch die auftretende Spannungskonzentration immer auch eine plastische Verformung auf. Um das LEBM-Konzept trotzdem anwenden zu können muss diese plastische Zone klein gegenüber der Bauteil- und Probenabmessungen sein.

In dieser Arbeit wird aus der LEBM das Konzept der Spannungsintensität verwendet.

Ist die plastische Zone nicht klein gegenüber der Bauteil- oder Probenabmessungen muss statt der LEBM auf die Fließ Bruchmechanik (FBM) zurückgegriffen werden.

Die wichtigsten Konzepte der FBM sind das CTOD- und J-Integral-Konzept, wobei letzteres in dieser Arbeit zur Anwendung kommt.

3.2.1 Spannungsintensitätsfaktor K_I : (7) (8)

Ist die plastische Zone vor der Risspitze klein gegenüber der Bauteil- und Rissabmessungen, dann wird die Beanspruchung in dieser Zone durch das elastische Spannungsfeld rund um die plastisch verformte Zone bestimmt.

Bei linear elastischem Materialverhalten kann der Spannungszustand in der Umgebung der Risspitze eines Risses mit $2 \cdot a$ Länge, unter Voraussetzung einer unendlich ausgedehnten Scheibe unter Zugbelastung, nach (3-1) näherungsweise berechnet werden.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{\sigma_1 * \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} \begin{pmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 - \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3}{2} \varphi \right) \\ \cos \frac{\varphi}{2} \left(1 + \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3}{2} \varphi \right) \\ \cos \frac{\varphi}{2} \sin \frac{\varphi}{2} \sin \frac{3}{2} \varphi \end{pmatrix} \quad (3-1)$$

σ_1 durch äußere Last hervorgerufene Spannung im ungerissenen Bauteil
 r, φ Polarkoordinaten mit Ursprung in der Risspitze

Vereinfacht angeschrieben ergibt sich für (3-1):

$$\sigma_{ij} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\varphi) \quad (3-2)$$

$$K_I = \sigma_1 * \sqrt{\pi a} * Y \quad (3-3)$$

Y Geometriefunktion die Rissform, -Art und Bauteilgeometrie berücksichtigt

K_I Spannungsintensitätsfaktor für Rissöffnungsmode I

Mit diesen Satz Gleichungen kann nun einerseits bei bekannter Last und Geometrie ein K-Wert errechnet, und mit einem kritischen geometrieunabhängigen K-Wert K_{IC} verglichen werden, andererseits bei gegebenem K_{IC} und bekannter Geometrie, die maximal zulässige Last errechnet werden.

In dieser Arbeit wird der kritische K-Wert wie in Kapitel 4.3 beschrieben experimentell ermittelt, und auf seine Geometrieunabhängigkeit hin überprüft.

3.2.2 J-Integral: (8) (9)

Das J-Integral stellt eine energetische Betrachtung des Bruchvorgangs dar, und hat für Kunststoffe die größte Bedeutung erlangt.

Ihm zugrunde liegt das wegunabhängige Integral (3-4), das bei Vorhandensein einer Singularität (Rissspitze) im Integrationsbereich einen konstanten Wert $J \neq 0$, und bei Fehlen einer Singularität den Wert $J=0$ annimmt.

$$J = \int_{\Gamma} \left(W_e * dy - \sigma \frac{du}{dx} ds \right) \quad (3-4)$$

- σ Spannungsvektor
- u Verschiebungsvektor
- ds Wegelement
- Γ geschlossener Integrationsweg der beide Rissufer miteinander verbindet.
- W_e Dehnungsenergiedichte

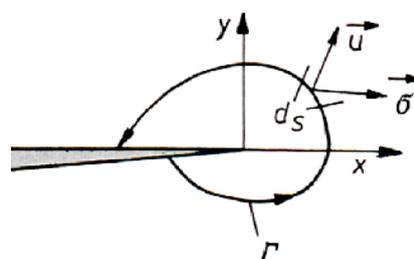


Abbildung 3-2: Zur Definition des J-Integrals(8)

Diese Wegunabhängigkeit erlaubt es den Integrationsweg ausreichend weit von der Rissspitze entfernt zu wählen.

Energetisch betrachtet stellt das J-Integral die Änderung der potentiellen Energie dU vor der Rissspitze, bezogen auf die sich bildende Rissfläche dA dar.

$$J = -\frac{dU}{dA} = -\frac{1}{b} \frac{dU}{da} \quad (3-5)$$

Die Gleichung (3-5) erlaubt es J experimentell nach Näherungsformeln aus Kraft-Kraftangriffspunkt-Verschiebungs-Kurven zu bestimmen.

In einem weiteren vereinfachenden Schritt wird in der Berechnung des J-Integrals nicht die Ableitung nach dem Risswachstum verwendet, sondern die für das Risswachstum notwendige Energie bezogen auf das ursprüngliche Ligament.

Diese Vereinfachung führt zur Gleichung (4-17), limitiert deren Anwendung allerdings auf geringes Risswachstum.

$$J = \frac{\eta * U}{B_N * (w - a_0)} \quad (3-6)$$

- a_0 Ursprüngliche Risslänge
- B_N Prüfkörperdicke nach Abzug der Seitenkerben
- η Geometriefaktor
- U Energie
- w Prüfkörperhöhe

3.2.3 Geometrieunabhängigkeit: (10)

Der Geometrieinfluss auf die bruchmechanischen Kennwerte, sowohl als Widerstand gegen stabile als auch instabile Rissausbreitung, lässt sich experimentell durch Variation der Prüfkörperform (CT-, SENB-, SENT-Prüfkörper usw.) und der Prüfkörpergeometrie, insbesondere der Prüfkörperdicke b , Prüfkörperhöhe w , und der Risslänge a charakterisieren.

Die Geometrieabhängigkeit bruchmechanischer Werkstoffkennwerte, d. h. des funktionalen Zusammenhanges zwischen Kennwerten und b , a bzw. $(w-a)$, folgen unabhängig vom

Bruchmechanik-Konzept dem in Abbildung 3-3 dargestelltem allgemeingültigen Zusammenhang.

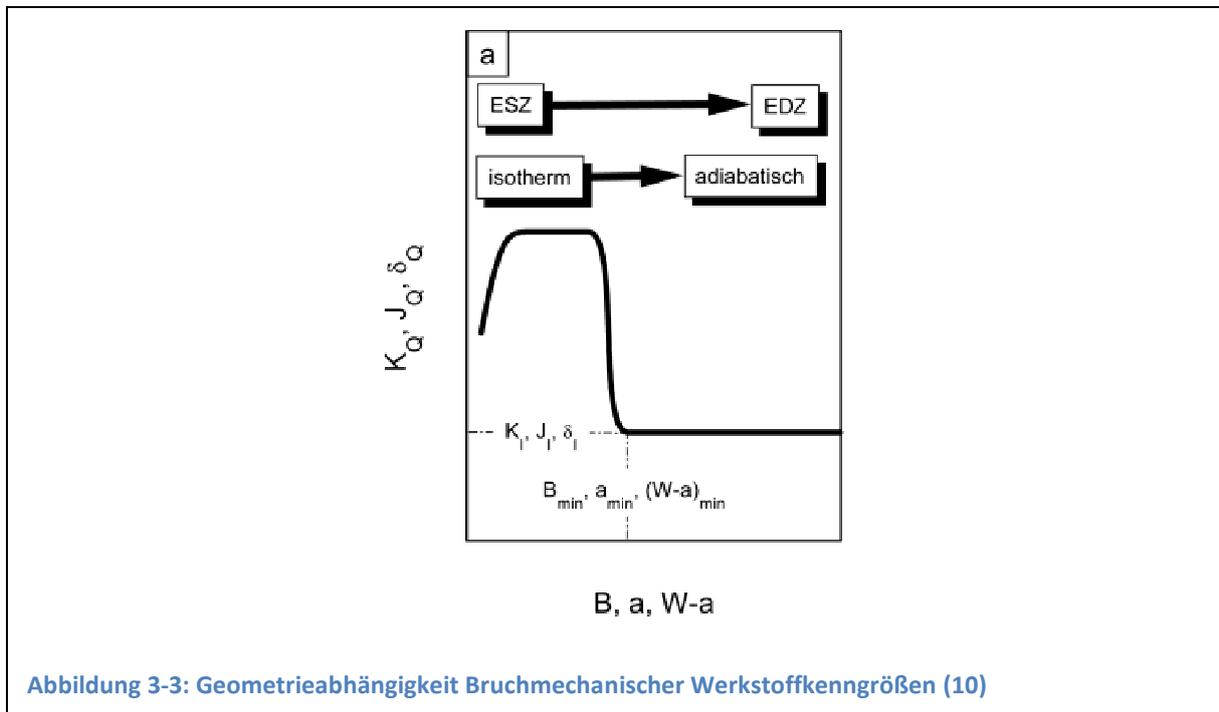


Abbildung 3-3: Geometrieabhängigkeit Bruchmechanischer Werkstoffkenngrößen (10)

Der Übergang von geometrieabhängigen K_Q , J_Q bzw. δ_Q -Kennwerten kann im Sinne eines verallgemeinerten Spröd-Zäh-Übergangs, durch den Übergang von einem dominierend ebenen Spannungszustand (ESZ) zu einem überwiegend ebenen Dehnungszustand (EDZ) charakterisiert werden.

Die b -, a - und $(w-a)$ -Werte, ab denen die K_Q , J_Q bzw. δ_Q -Werte konstant sind, werden als minimale Prüfkörperdicke, Kerbtiefe bzw. Ligamentbreite bezeichnet.

Sie liegen für Kunststoffe typischerweise in der Größenordnung von wenigen Millimetern.

3.3 Dauerversuch: (7)

Dauerversuche werden alle Langzeitversuche unter mechanischen, mechanisch-thermischen und mechanisch-chemischen Beanspruchungen genannt, bei denen der Beanspruchungszeit oder der Spannungs- oder Dehnungsschwingspielzahl für die Werkstoff- oder Bauteileigenschaften eine maßgebende Bedeutung zukommt.

Dauerversuche sind immer dann erforderlich, wenn in Kurzzeitversuchen eine Veränderung im Schädigungsmechanismus eintritt und keine Korrelation zwischen Kurzzeit- und

Langzeitbeanspruchung möglich ist. Dies gilt insbesondere für zeit-, temperatur- oder beanspruchungsabhängige Veränderungen der Werkstoffeigenschaften.

4 Experimentelles:

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Ermittlung bruchmechanischer Kennwerte. Als solche wurden sowohl der Spannungsintensitätsfaktor aus der linear elastischen Bruchmechanik, als auch J-Integral-Kurven aus der Fließ-Bruchmechanik an Verschiedenen Prüfkörpergeometrien ermittelt.

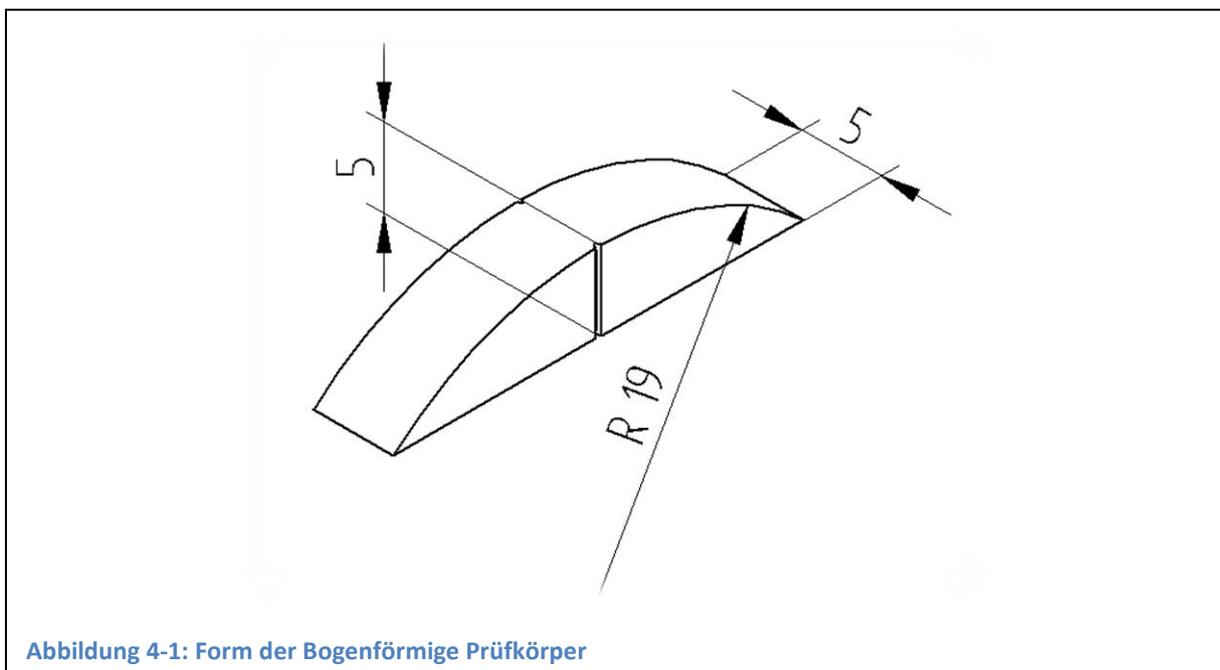
Zusätzlich wurden noch der E-Modul, Biegefestigkeit und die Fließspannung nach ISO 178 (11) ermittelt. Diese Messwerte dienten als Koeffiziente in den Berechnungen der bruchmechanischen Untersuchungen.

4.1 Prüfkörper:

4.1.1 Geometrie:

4.1.1.1 Bogenförmige Prüfkörper:

Eines der wichtigsten Ziele war es, die in dieser Arbeit diskutiert Versuche auch an tatsächlichen Implantaten beziehungsweise Explantaten durchzuführen. Dazu war es notwendig eine Probengeometrie zu definieren, die sich aus diesen fertigen lässt.



Erschwerend wirkte sich zusätzlich aus, dass zum Beispiel die Hüftpfannen in modernen Implantaten deutlich kleinere Abmessungen haben als ältere Exemplare. So gab es bei der Einführung der PE-UHMW Hüftpfannen variable Innendurchmesser von 22 mm bis 36 mm. Heutzutage sind 28 mm üblich (12). Aufgrund der geringen Wanddicken wurde die Breite **b**

der Proben mit 5 mm gewählt. Die Dicke w wurde ebenfalls mit 5 mm gewählt. Der Außenradius wurde auf 19 mm festgelegt. Der Auflagerabstand L wurde mit 20 mm, also $4 \cdot w$, festgelegt. Bei einem größeren Auflagerabstand wäre das Risiko zu groß, dass die Probenenden während des Versuches zwischen den Auflagern durchgezogen werden. Im Folgenden werden Proben mit dieser Geometrie auch als ARC-Proben bzw. ARC-Prüfkörper bezeichnet. Die Hauptkerbtiefe a wurde mit 0,5 mm gewählt, um den Probenquerschnitt unter dem Riss nicht zu sehr zu schwächen und dadurch ein „spröderes“ Bruchverhalten zu erreichen. Die Seitenkerbtiefe a_s wurde mit 0,25 mm gewählt, der Kerbradius mit 0,1 mm. Sie dienen dazu um den während des Versuches wachsenden Riss zu führen, und die Rissfront möglichst gerade zu halten.

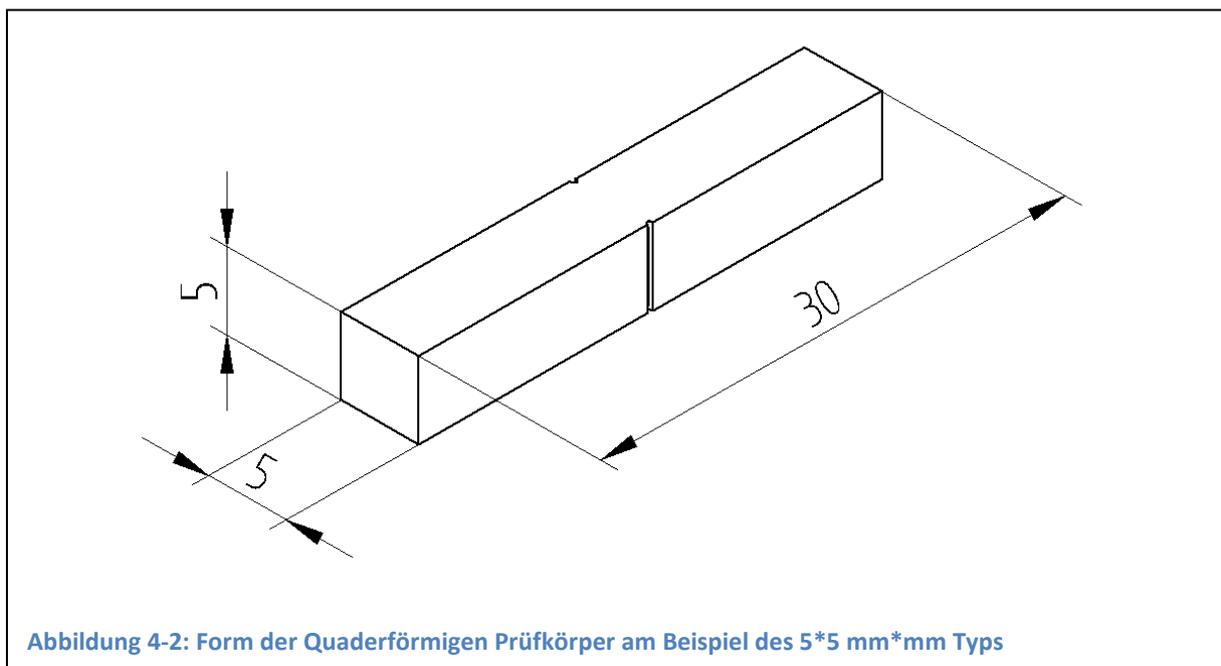
Entsprechend dieser Vorgaben ergibt sich die Probengeometrie wie in Abbildung 4-1 dargestellt.

Es soll in diesem Zusammenhang erwähnt werden, dass mit diesen Prüfkörpern die Geometrieforderungen laut ISO 13586 für 3-Punkt-Biegeproben nicht erfüllt werden.

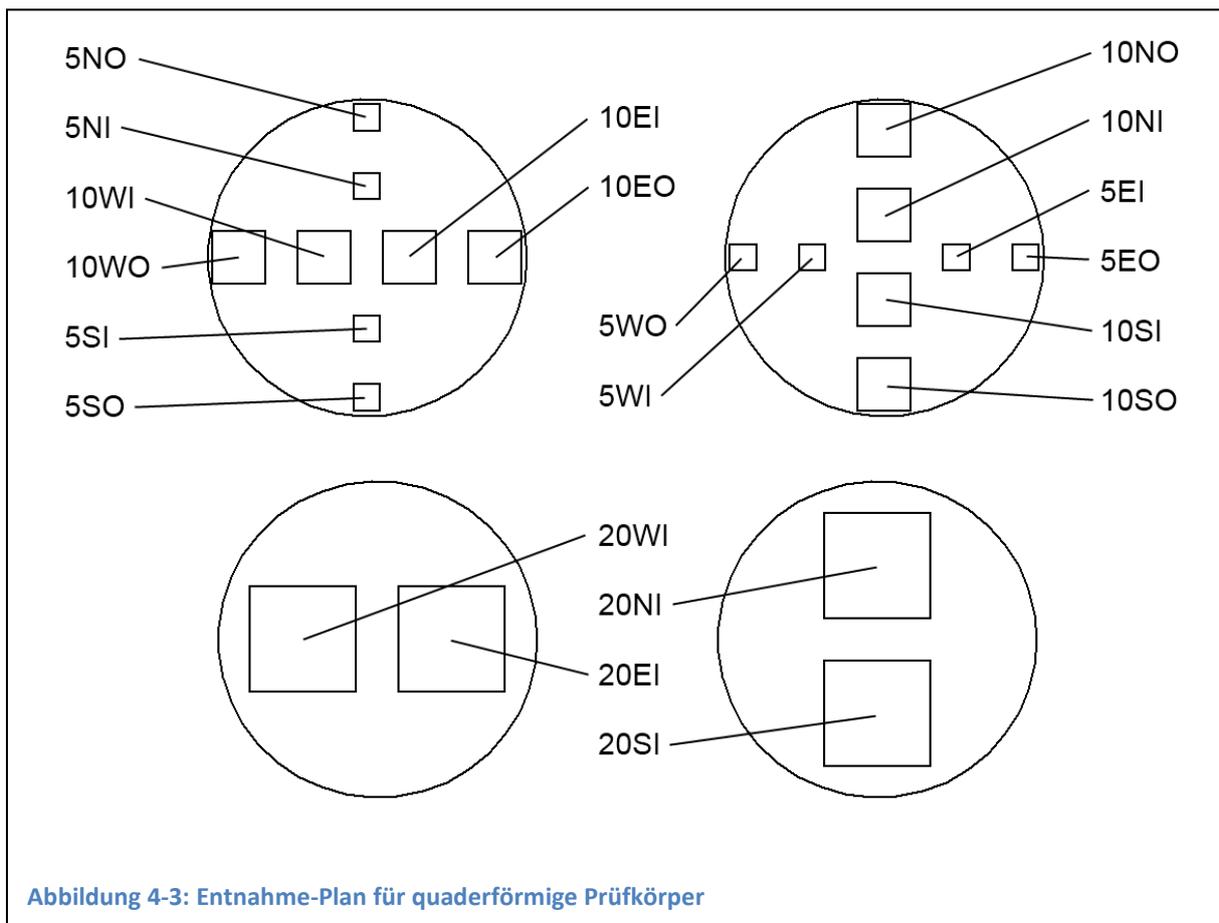
Eine Übersicht über die Probenabmessungen gibt Tabelle 4-1.

Eine Detaillierte Zeichnung des Prüfkörpers befindet sich im Anhang in Abbildung 8-6.

4.1.1.2 Quaderförmige Prüfkörper:



Ausgehend von den ARC-Prüfkörpern wurden quaderförmige Prüfkörper entworfen. Bei Ihnen wurden der quadratische Querschnitt, sowie die Geometrie der Kerben beibehalten. Die Länge l wurde allerdings mit $6 \cdot w$ gewählt. Zusätzlich wurden die Proben in 3 verschiedenen Größen, bei gleichbleibenden geometrischen Verhältnissen, gefertigt um auch eine Aussage über den Einfluss der Probengröße tätigen zu können. Ausgehend von dem Querschnitt der ARC-Prüfkörper mit einem Querschnitt von $5 \cdot 5 \text{ mm} \cdot \text{mm}$ wurden Größen $5 \cdot 5 \text{ mm} \cdot \text{mm}$, $10 \cdot 10 \text{ mm} \cdot \text{mm}$ und $20 \cdot 20 \text{ mm} \cdot \text{mm}$ gewählt. Für eine exakte Skalierung der Prüfkörper wären an den Seitenkerben jeweils unterschiedliche Kerbradien notwendig gewesen. Um das Spannungsfeld im Ligament konstant zu halten (dieses hätte sich abhängig vom Kerbradius geändert), wurden stattdessen sämtliche Seitenkerben mit einem Kerbradius von $0,1 \text{ mm}$ gefertigt. Die Tiefe der Seitenkerben wurde allerdings der Probengröße entsprechend gewählt.



Bei den quaderförmigen Prüfkörpern wurde zusätzlich die Position und Ausrichtung der Probe im Halbzeug vorgegeben. Dadurch sollte untersucht werden ob die Position im Halbzeug einen Einfluss auf die Messwerte hat.

Von den Proben mit 5*5 mm*mm und 10*10 mm*mm Querschnitt wurden sowohl Proben vom äußeren Rand der Stange entnommen, wie auch vom Kernbereich. Aufgrund der großen Kerbtiefe der Proben mit 20*20 mm*mm Querschnitt (2mm) wurden nur Proben aus dem Kernbereich entnommen. Bei Proben die vom äußeren Rand entnommen worden wären hätte der Kerbgrund in den Ecken einen Abstand von ca. 2 mm zum Rand, in der Probenmitte sogar ca. 4 mm.

Die Zusammensetzung der Bezeichnung für quaderförmige Proben ist in Abbildung 4-4 aufgeschlüsselt. Norden in der Ortsangabe wurde willkürlich festgelegt, und über sämtliche Proben beibehalten, sodass spätere Vergleiche zwischen den Proben möglich sind. Die Richtungsangabe bezieht sich nicht nur auf die Position der Probe im Halbzeug, sondern auch auf die Lage des Kerbes. Proben die aus dem Inneren entnommen wurden (mit I gekennzeichnet) wurden auch auf der nach innen gerichteten Seite gekerbt. Proben vom äußeren Randbereich (mit O gekennzeichnet) entsprechend auf der außenliegenden Seite.

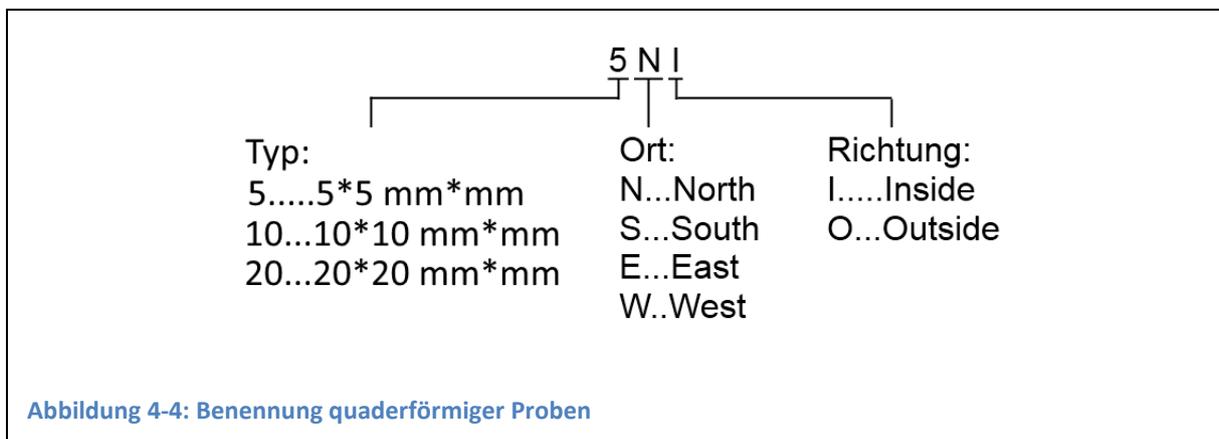
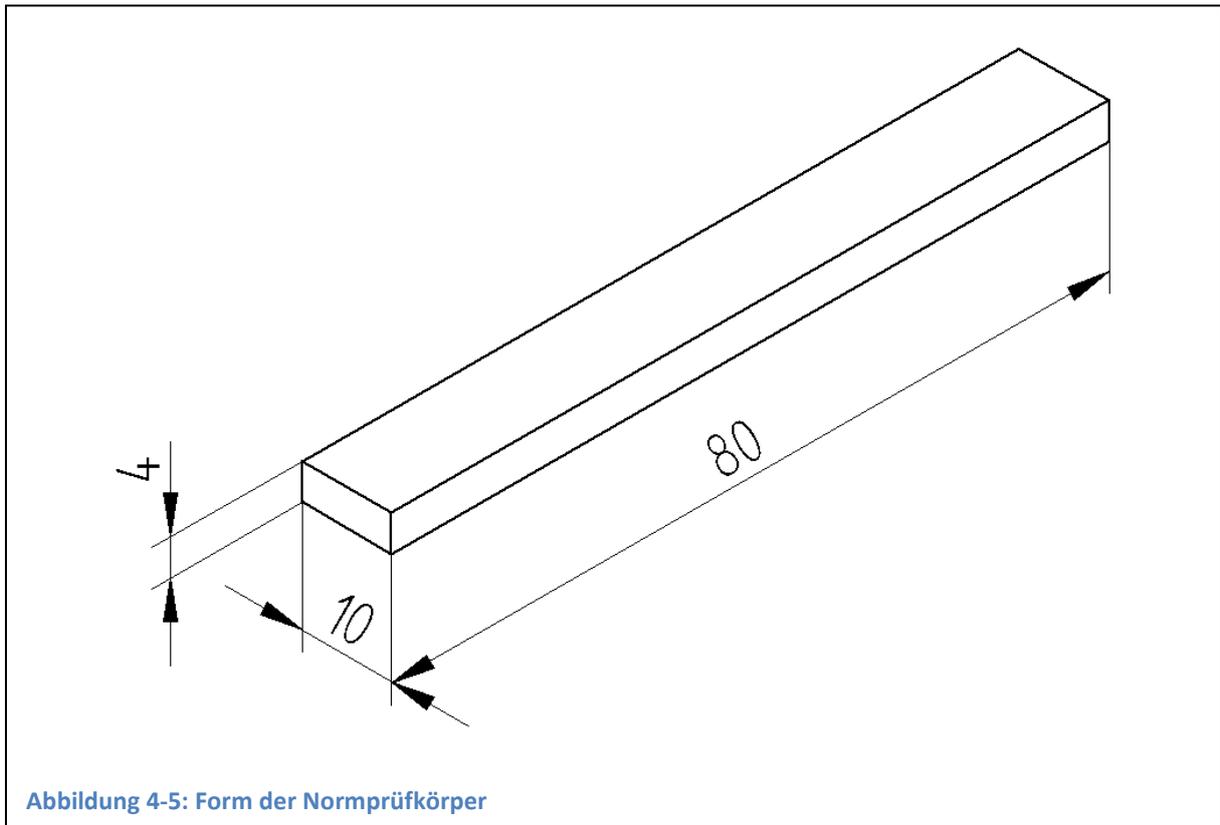


Abbildung 4-4: Benennung quaderförmiger Proben

Eine Detaillierte Zeichnung des Prüfkörpers befindet sich im Anhang in Abbildung 8-7.

4.1.1.3 Normprüfkörper:

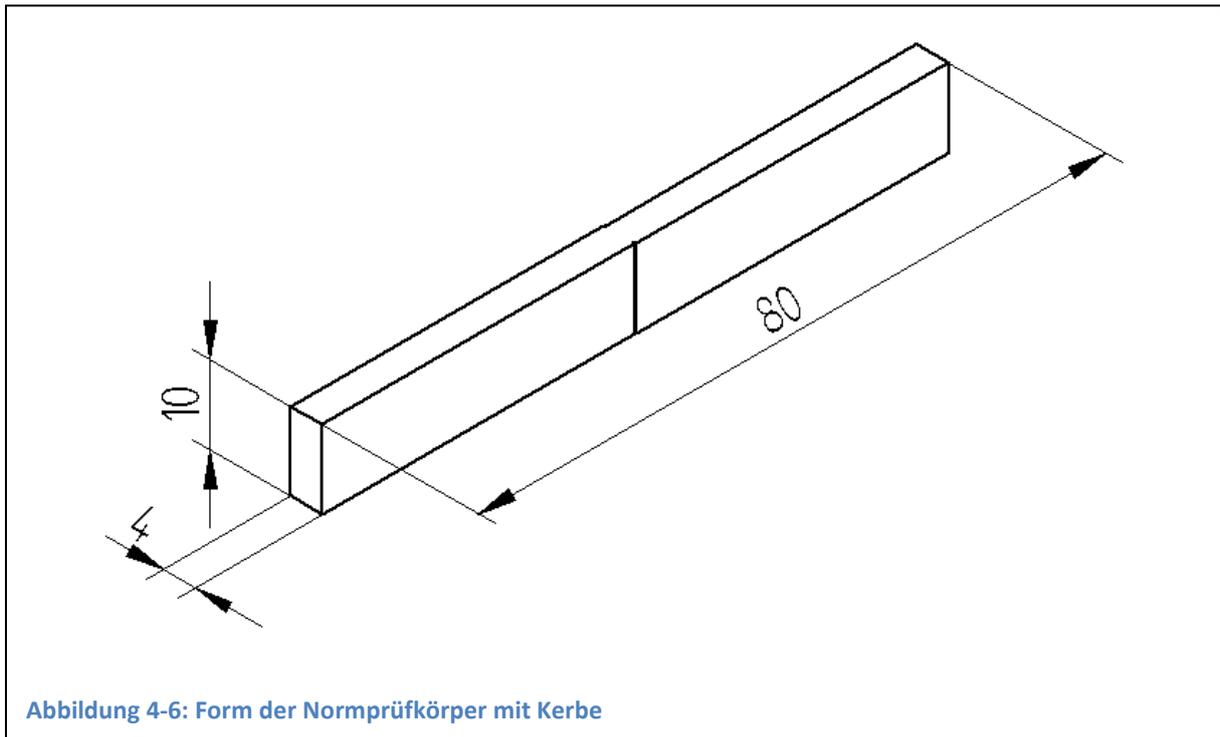


Hierbei handelt es sich um Prüfkörper wie sie in ISO 178 (11) zur Bestimmung der Biegeeigenschaften von Kunststoffen vorgeschlagen werden. Es handelt sich dabei um quaderförmige Proben mit den Abmessungen $4 \times 10 \times 80 \text{ mm}^3$. Der Auflagerabstand beträgt 64 mm.

Eine Übersicht über die Probenabmessungen gibt Tabelle 4-1.

Eine Detaillierte Zeichnung des Prüfkörpers befindet sich im Anhang in Abbildung 8-8.

4.1.1.4 Normprüfkörper mit Kerbe:



Für diese Prüfkörper wurden die Geometrieangaben des Normprüfkörpers aus ISO 178 (11) übernommen. Sie wurden allerdings mit entsprechenden Kerben versehen um den Einfluss der Probenbreite auf das Risswachstum zu untersuchen. Entsprechend ergeben sich eine Kerbtiefe a mit 1 mm (gleich den quaderförmigen Proben mit 10*10 mm) und ein Seitenkerbtiefe von 0,2 mm.

Eine Übersicht über die Probenabmessungen gibt Tabelle 4-1.

Eine Detaillierte Zeichnung des Prüfkörpers befindet sich im Anhang in Abbildung 8-9.

Tabelle 4-1: Abmessungen der Probekörper

	Dicke w	Breite b	Länge l	Auflagerabstand L	Kerbtiefe a	Seitenkerbtiefe a _s
ARC	5	5	25,7	20	0,5	0,25
5mm Quader	5	5	30	20	0,5	0,25
10mm Quader	10	10	60	40	1	0,5
20mm Quader	20	20	120	80	2	1
Normprüfkörper	4	10	80	64	-	-
Normprüfkörper mit Kerbe	10	4	80	40	1	0,2

Alle Maße in mm.

4.1.2 Fertigung:

4.1.2.1 Bogenförmige Prüfkörper aus PE-UHMW:

Die Untersuchungen sind an Proben aus RAM-extrudiertem GUR 1050 PE-UHMW (Stange mit \varnothing 60 mm) durchgeführt worden.

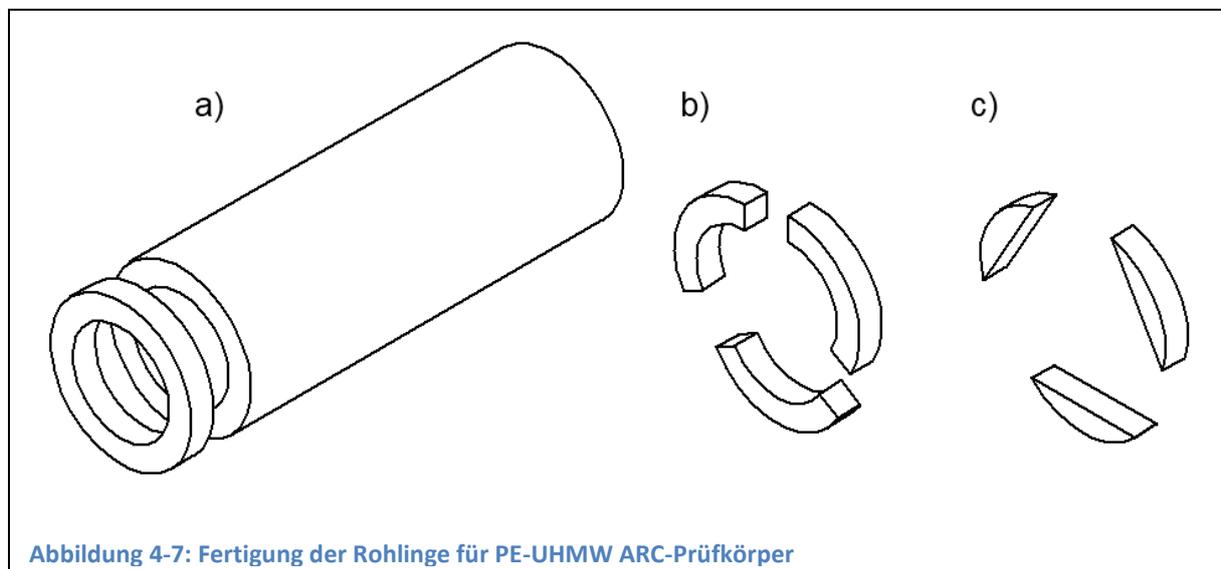


Abbildung 4-7: Fertigung der Rohlinge für PE-UHMW ARC-Prüfkörper

Um aus dem Stangenmaterial ARC-Prüfkörper fertigen zu können wurden, wie es in Abbildung 4-7 dargestellt wird, folgende Schritte unternommen:

- Als erstes wurde aus dem Halbzeug ein Rohr mit einem Außendurchmesser von 38 mm und 6 mm Wandstärke gefertigt

- Aus dem Rohrstück wurden 6 mm starke Ringe abgestochen (Abbildung 4-7-a)
- Anschließend wurden die Ringe mittels einer Puksäge mit Holzsägeblatt in 3 Teile geteilt (Abbildung 4-7-b)
- Diese wurden mittels einer manuellen Fräsmaschine zu Rohlingen mit einer Dicke von 5,5 mm gefräst (Abbildung 4-7-c).
- Geschliffen wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.5 Schleifen:“ beschrieben wird.
- Gekerbt wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.6 Kerben:“ beschrieben wird.

4.1.2.2 Bogenförmige Prüfkörper aus PE-HD:

Um Vergleichswerte zu PE-HD zu erhalten wurden auch ARC-Prüfkörper aus Hostalen GM5010 T2 gefertigt. Da kein Stangenförmiges Halbzeug vorlag wurden aus Granulat quadratische platten gepresst (Abbildung 4-8-a). Temperatur- und Druckverlauf des Pressvorganges sind in Abbildung 4-9 dargestellt.

- Aus diesen wurden auf einer CNC-Fräse Scheiben mit einem Außendurchmesser von 38 mm gefertigt (Abbildung 4-8-b)
- Von diesen wurden anschließend mit einer Puksäge ARC-Rohlinge abgesägt (Abbildung 4-8-c)
- Geschliffen wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.5 Schleifen:“ beschrieben wird
- Gekerbt wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.6 Kerben:“ beschrieben wird

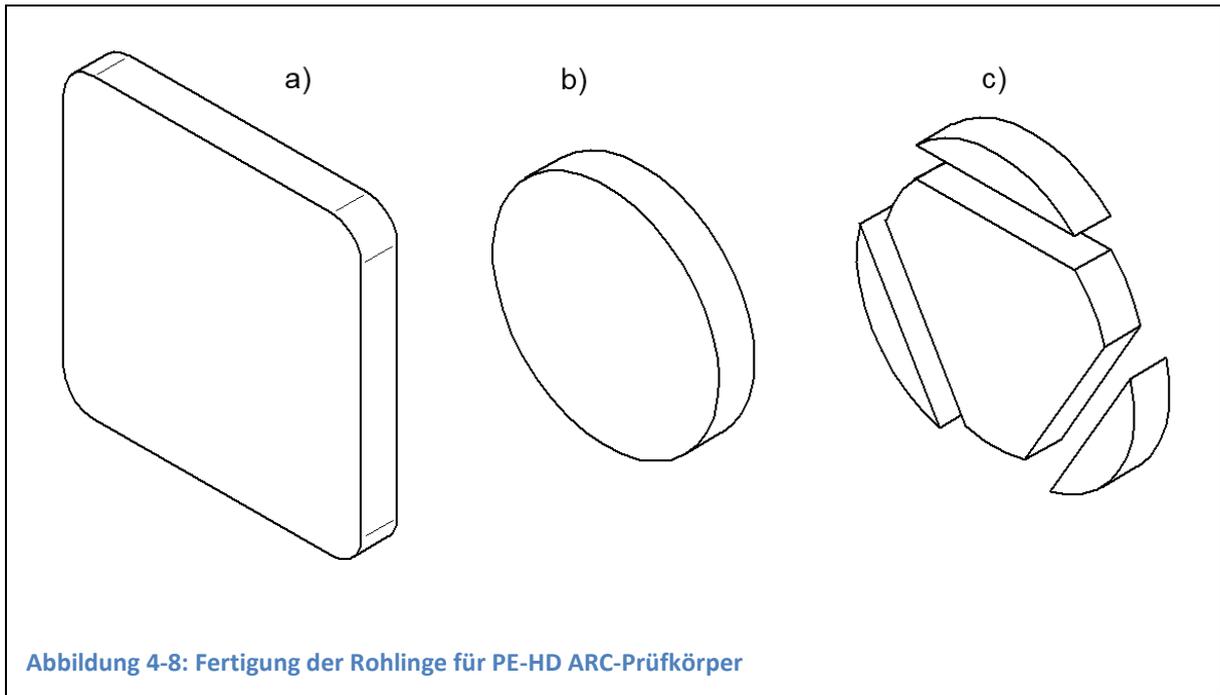


Abbildung 4-8: Fertigung der Rohlinge für PE-HD ARC-Prüfkörper

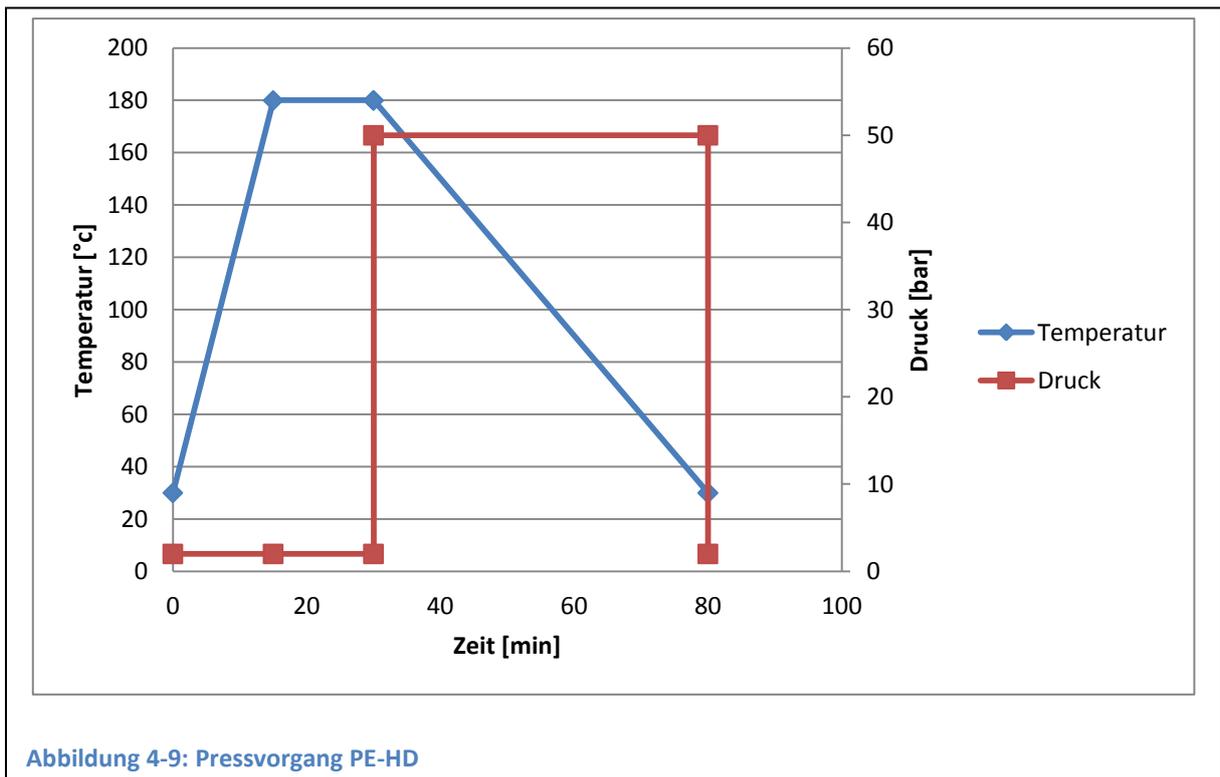


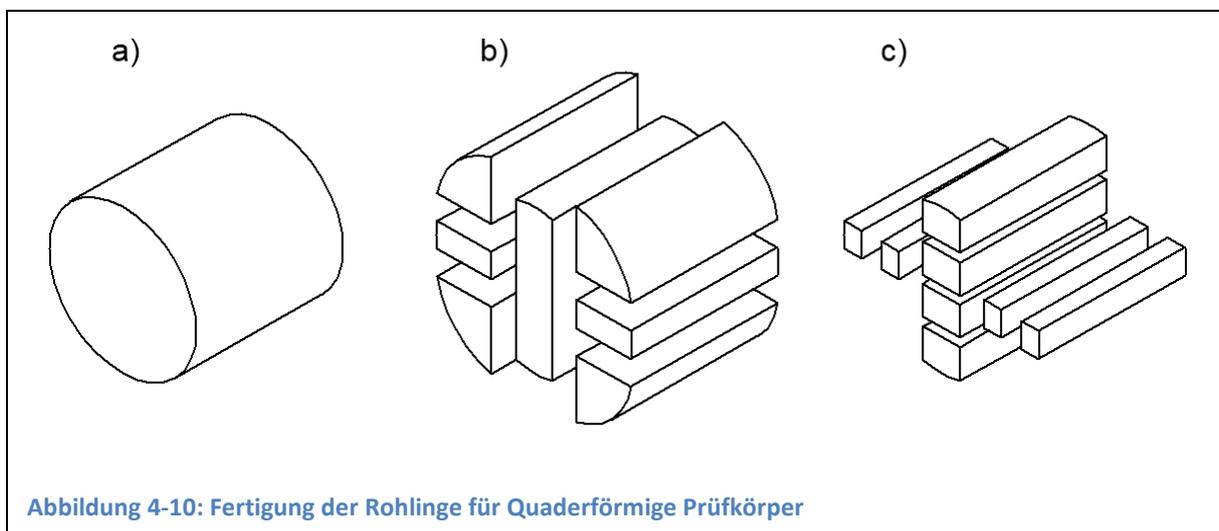
Abbildung 4-9: Pressvorgang PE-HD

4.1.2.3 Quaderförmige Prüfkörper:

Die Proben wurden entsprechend dem Entnahme-Plan in Abbildung 4-3 aus der RAM-Extrudierten PE-UHMW Stange entnommen. Abbildung 4-10 zeigt dies beispielhaft für

Proben mit 5*5 mm*mm und 10*10 mm*mm Querschnitt (im Entnahmeplan Abbildung 4-3 rechts oben).

- Der Rohling (Abbildung 4-10-a) wurde dabei mit einem Fuchsschwanz grob in die Segmente (laut Abbildung 4-10-b) geteilt
- Die Segmente wurden dann mittels Bandsäge (Proxxon MBS 240/E) in Rohlinge unterteilt (Abbildung 4-10-c)
- Aus den Rohlingen wurden mittels CNC-Fräse die Proben gefertigt
- Geschliffen wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.5 Schleifen:“ beschrieben wird
- Gekerbt wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.6 Kerben:“ beschrieben wird

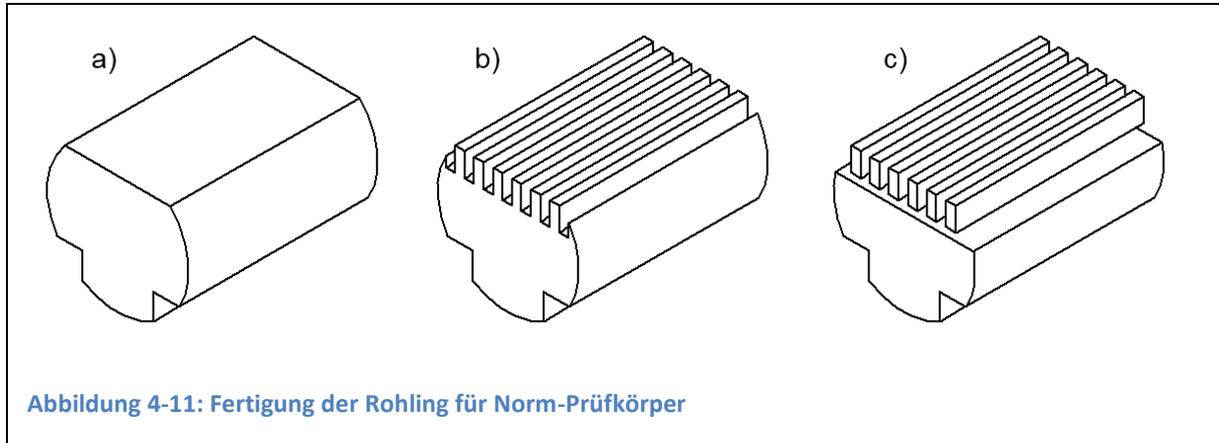


4.1.2.4 Norm-Prüfkörper:

Die Prüfkörper wurden nahezu vollständig auf der CNC-Fräse gefertigt.

- Da der Arbeits- und Spannbereich der CNC-Fräse sehr begrenzt war, wurde zuerst ein ca. 90 mm langes Stück der RAM-Extrudierten PE-UHMW-Stange auf der manuellen Fräse vorbereitet (Abbildung 4-11-a)
- Anschließend wurden mehrere Nuten im Abstand von 5 mm gefräst (Abbildung 4-11-b)
- Die zwischen den Nuten stehen gebliebenen Stege wurden anschließend abgetrennt und bilden die Rohlinge der Norm-Prüfkörper (Abbildung 4-11-c)

- Geschliffen wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.5 Schleifen:“ beschrieben wird
- Gekerbt wurden die Prüfkörper wie in Abschnitt „4.1.2.6 Kerben:“ beschrieben wird



4.1.2.5 Schleifen:

Geschliffen wurden die Proben anschließend auf einer wassergekühlten Schleifmaschine vom Typ Buehler Ecomet V. Es wurden Schleifpapiere in den Körnungen 220, 800 und 2000 verwendet. Vor allem die Körnung 220 erwies sich als besonders vorteilhaft zum schleifen von unvernetztem PE-UHMW, da es sich im Gegensatz zur Körnung 320 nicht mit Schleifstaub zusetzte, und im Gegensatz zur Körnung 120 keine nennenswerten Kratzer im Prüfkörper hinterließ.

Mit dem 220er Schleifpapier wurde der Rohling bis auf ein Übermaß von 0,1-0,2 mm abgeschliffen. Dabei wurden sämtliche Unebenheiten und Winkelfehler korrigiert. Mit dem 800er Schleifpapier wurden die Proben anschließend auf ein Übermaß von 0,05 mm abgeschliffen. Im letzten Schleifgang mit dem 2000er Schleifpapier wurden der Prüfkörper endgültig auf Maß gebracht, und sichtbare Kratzer entfernt. Zum Abschluss wurden noch die Kanten durch einmaliges Überstreifen mit einem trockenen Blatt 2000er Schleifpapier entgratet.

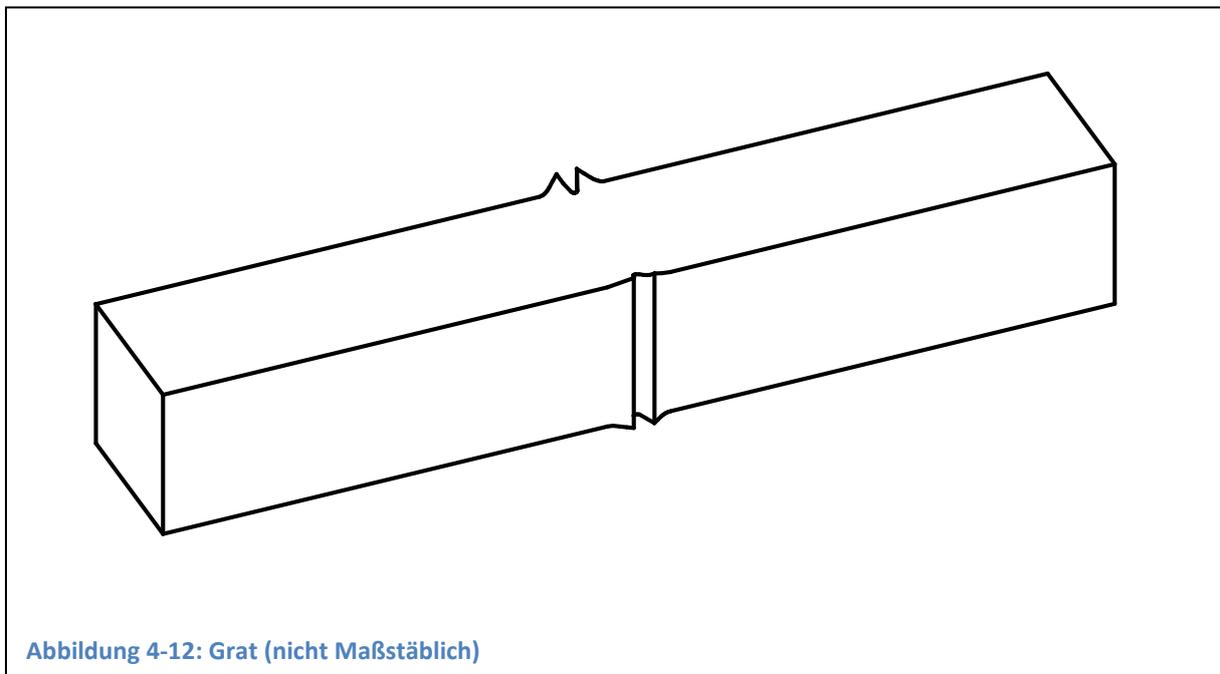
Generell wurde versucht eine Toleranz von 0,5 % der entsprechenden Abmessung einzuhalten. Die Toleranz von $\pm 0,2$ mm, wie sie in ISO 178 (11) vorgeschrieben sind wurde von allen Proben eingehalten. Die Toleranz der Dicke w mit $\pm 0,005 \cdot w$ laut ASTM E 1820 für SENB-Prüfkörper wurde ebenfalls von allen Proben eingehalten.

Beim Schleifen längerer Proben (z.B. 20*20*100 mm*mm*mm) stellte sich eine leichte Bombierung der geschliffenen Flächen ein. Als Ursache konnte die Wärmedehnung der mit den Fingern gehaltenen Oberseite der Probe identifiziert werden. Zusätzliche Kühlung der Oberseite mit Wasser beseitigte das Problem.

4.1.2.6 Kerben:

Proben mit 5*5 mm*mm Querschnitt:

Bei Proben mit einem Querschnitt von 5*5 mm*mm (Quaderförmig und ARC) wurden als erstes die Seitenkerben gefertigt. Hierzu wurde die Mitte der Proben ausgemessen und mit einem Fineliner markiert, um die beiden Seitenkerben ohne Versatz zu fertigen. Dies war notwendig, da die Verwendung eines Anschlages bei der geringen Probengröße nicht möglich war. Anschließend wurden die Proben auf einer Kerbmaschine mit manueller Tiefeneinstellung vom Typ CEAST NOTCHVIS auf einer Seite gekerbt. Der verwendete Klingentyp war 6530/055. Die Kerbrichtung verlief dabei von der Seite des Hauptkerbes zur Rückseite (bei den ARC-Prüfkörpern entsprechend von der ebenen zur zylinderförmigen Seite). Dies war notwendig da sich auf der Austrittsseite des Kerbmessers ein deutlicher Grat bildete (Abbildung 4-12), und der Kerb an dieser Stelle nur unzureichend ausgebildet war.



Nach dem Kerben der ersten Seite wurde der Grat mit 2000er Schleifpapier entfernt. Im Anschluss daran wurde die 2. Seite gekerbt und wieder entgratet.

Die Hauptkerbe wurde mittels Eindrücken einer frischen Rasierklinge gefertigt. Hierzu wurde die Probe in ein Lehre eingelegt, die nur 0,5 mm der Probe überstehen lies (Abbildung 4-13). Anschließend wurde unter dem Stereomikroskop (Zeiss Stemi 2000c) die Rasierklinge so in die Probe gedrückt, dass der Kerb den Kerbgrund der beiden Seitenkerben verband. Die Rasierklinge wurde dabei soweit in die Probe gedrückt, bis sie an der Lehre anstand.

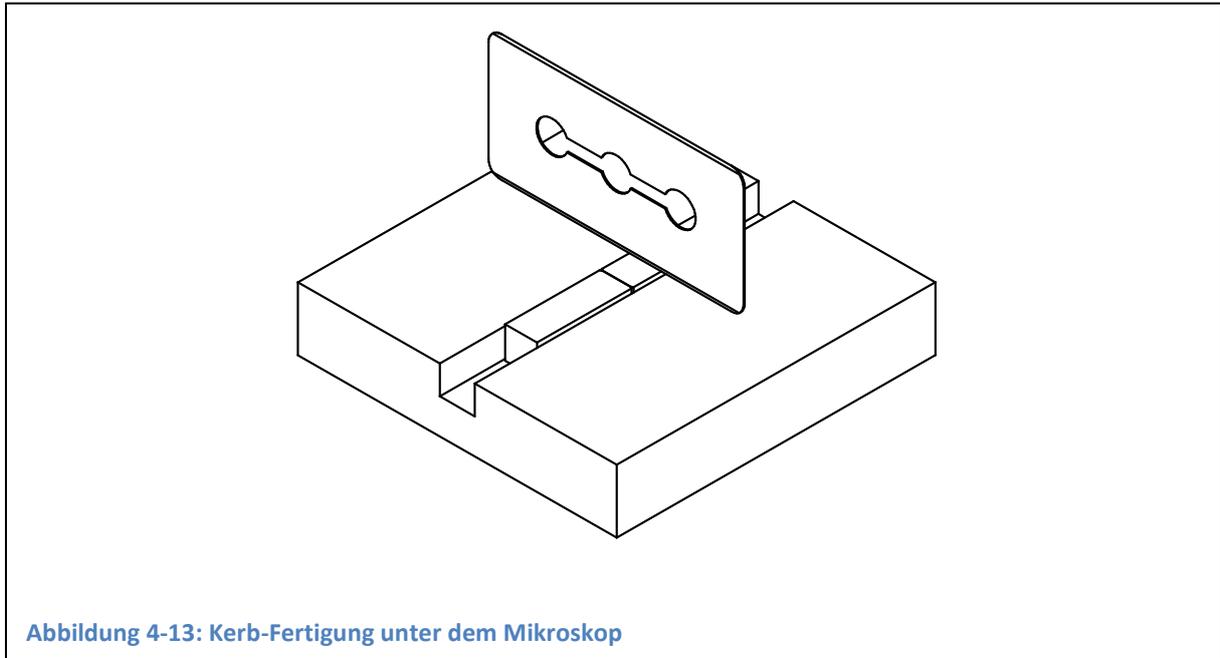


Abbildung 4-13: Kerb-Fertigung unter dem Mikroskop

Das Entgraten der Rückseite musste besonders gründlich durchgeführt werden, da an dieser Stelle bei späteren Versuchen die Biegefinne aufliegt. Wurde der Grat nicht gänzlich abgetragen zeigt sich dies am Beginn der Messwerte durch einen progressiven Kraftanstieg im Kraft-Verschiebungs-Diagramm. Dieser wird durch die nachträgliche Korrektur des Eindringweges (siehe „4.5 Korrektur“) nicht ausgeglichen.

Proben mit 4x10 mm, 10*10 mm*mm und 20*20 mm*mm Querschnitt:

Der Hauptkerb wurde bei diesen Proben maschinell gefertigt. Hierzu wurde eine neue Rasierklinge in der Prüfmaschine eingespannt. Als Auflage für die Proben diente eine Druckplatte. Auf den Proben wurde die Mitte markiert. Anschließend wurden diese mittig und rechtwinkelig zur Rasierklinge auf der Druckplatte positioniert. Die Proben mit 4x10 mm*mm Querschnitt wurden in Blöcken mit je 5 Stück gekerbt. Die Klinge wurde mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min in die Probe eingedrückt.

Anschließend wurden die Seitenkerben, wie für die Proben mit 5*5 mm*mm Querschnitt beschrieben, gefertigt.

Die entsprechenden Kerbtiefen sind in Tabelle 4-1 angeführt.

4.1.2.7 Bogenförmige Prüfkörper aus Hüftpfanne:

Zusätzlich zu den Proben für die Versuche wurde auch überprüft ob sich die bogenförmigen Prüfkörper tatsächlich aus einer Hüftpfanne gewinnen lassen.

Da für diese Arbeit keine Hüftpfanne zur Verfügung stand, wurde eine Hüftpfanne, die am Institut für ein anderes Projekt vorhanden war, vermessen und als CAD-Modell (Abbildung 4-14) nachgebildet.

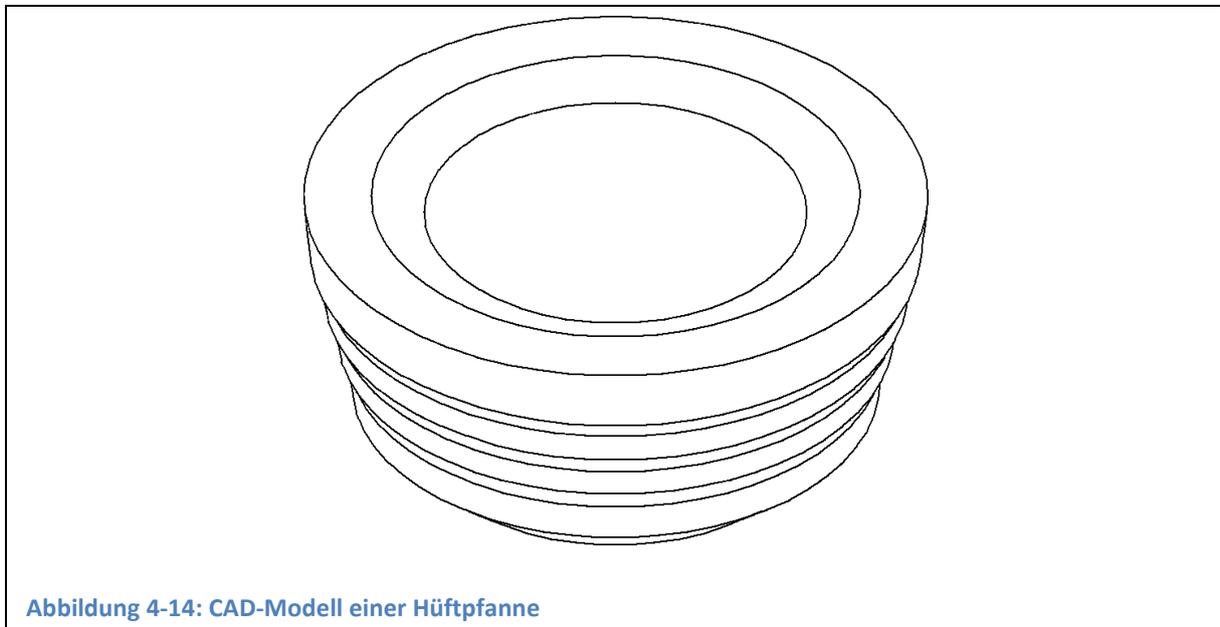
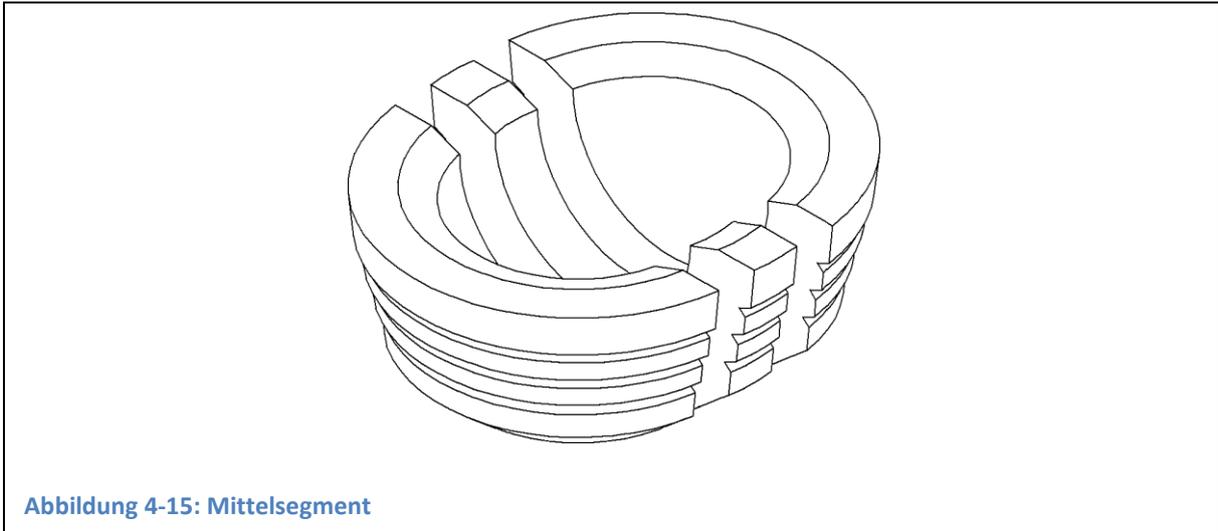
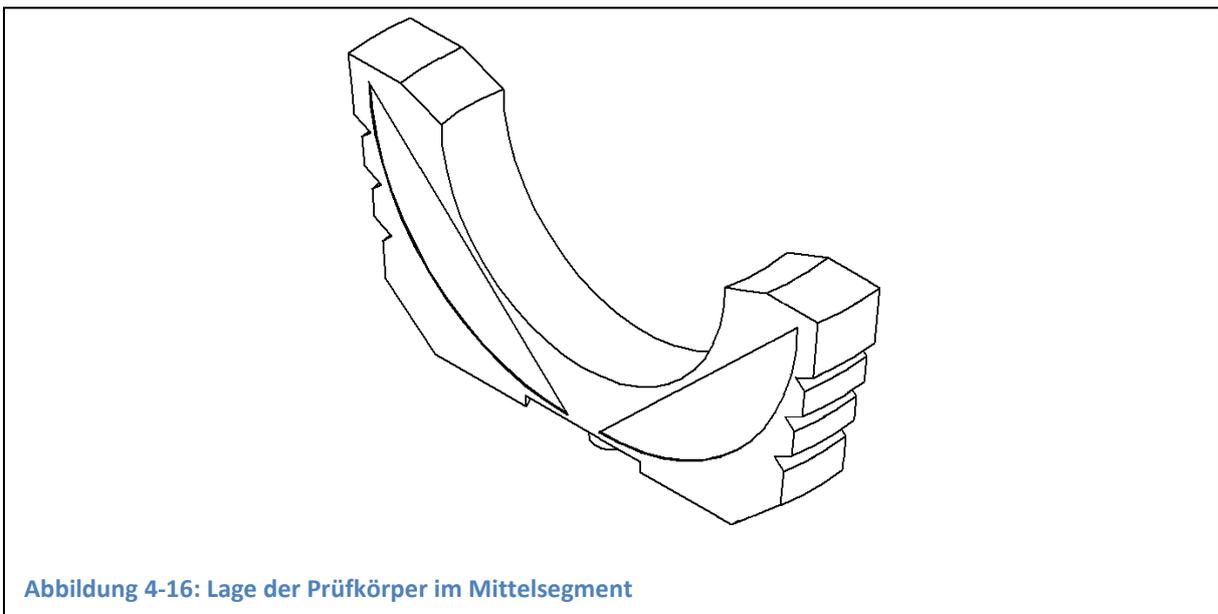


Abbildung 4-14: CAD-Modell einer Hüftpfanne

Aus der Pfanne sollte ein bogenförmiges Segment aus der Mitte entnommen werden. (Abbildung 4-15)



Aus diesem Segment sollten per CNC-Fräse die Rohlinge für die bogenförmigen Prüfkörper entstehen. (Abbildung 4-16)



Dazu wurde das Modell des Mittelsegmentes mittels 3D-Drucker gefertigt (Abbildung 4-17 links) und anschließend die notwendigen Fräsarbeiten auf der institutseigenen CNC-Fräse durchgeführt. (Abbildung 4-17 rechts)



Abbildung 4-17: Mittelsegment aus dem 3D-Drucker

Die so gewonnenen Rohlinge können anschließend wie in Kapitel 4.1.2.5 und 4.1.2.6 zu fertigen Prüfkörpern weiterverarbeitet werden.

4.2 Biegeversuch:

4.2.1 E-Modul:

Der E-Modul wurde nach ISO 178 (11) ermittelt. Als Prüfmaschine diente eine Zwick Z050 Universalprüfmaschine. Zur Wegaufnahme wurde die interne Messung der Traversenposition verwendet. Um die Genauigkeit der Kraftmessung zu erhöhen wurde ein Kraftaufnehmer vom Typ KAP-Z mit maximal 1 kN verwendet. Die Radien der Auflager und der Biegefinne betragen 5 mm. Der Auflagerabstand betrug 64 mm. Als Prüfkörper dienten die ungekerbten Prüfkörper laut Abschnitt 4.1.1.3. Die Prüfgeschwindigkeit wurde für die E-Modul-Bestimmung mit 2 mm/min festgelegt.

Zusätzlich zu den Prüfkörpern nach ISO 178 (11) wurde auch jeweils ein ungekerbter Prüfkörper der jeweils verwendeten Geometrie (siehe Kapitel 4.1.1.3) untersucht. Diese dienten dazu, den E-Modul am tatsächlichen Prüfkörper, bei den tatsächlichen Prüfbedingungen der bruchmechanischen Verfahren zu ermitteln, und eventuell vorhandene Abweichungen von den laut Norm ermittelten Werten festzustellen. Es wurden die Prüfgeschwindigkeiten laut Tabelle 4-2 und die Auflagerabstände laut Tabelle 4-1 verwendet.

Der Versuch wurde bis zu einer Dehnung von 0,4 % durchgeführt. Nach Erreichen der 0,4 % Dehnung wurde ohne Unterbrechung in die Messung der Spannungen (siehe Kapitel 4.2.2) gewechselt. Dieser Übergang erfolgte nicht wie in ISO 178 (11) beschrieben direkt bei 0,25 % Dehnung, da sich durch die Korrektur der Eindringwege der Auflager die tatsächlichen Dehnungen noch ändern konnten.

Die aus dem Versuch gewonnenen Kraft-Verschiebungs-Kurven wurden anschließend um den Eindringweg der Auflager korrigiert (siehe Kapitel 4.5).

Aus diesen Werten wurden neue Spannungs-Dehnungs-Kurven nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\sigma = \frac{3 * F * L}{2 * b * w^2} \quad (4-1)$$

$$\varepsilon = \frac{6 * f * w}{L^2} \quad (4-2)$$

Hierbei sind F die Kraft und f die Durchbiegung. L, b, w können Tabelle 4-1 entnommen werden.

Zur Berechnung des Sekanten E-Moduls wurden die Spannungswerte bei den Dehnungen von 0,05% und 0,25% verwendet.

$$E = \frac{\sigma_{0,25} - \sigma_{0,05}}{0,0025 - 0,0005} \quad (4-3)$$

4.2.2 Spannungen:

Als charakteristische Spannungen wurden sowohl die Fließspannung bei 3,5% Dehnung wie auch die Biegefestigkeit ermittelt.

Der Versuch wurde direkt im Anschluss an die Bestimmung des E-Moduls durchgeführt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug hierbei für die Prüfkörper nach ISO 178 (11) allerdings 10mm/min. Mit Hilfe der Steuerungssoftware der Prüfmaschine konnte dieser Geschwindigkeitswechsel ohne Überschwingen des Regelkreises vollzogen werden.

Wie auch bei der E-Modul-Ermittlung wurden auch hier zusätzlich ungekerbte Prüfkörper der anderen Geometrien geprüft. Bei diesen wurde Prüfgeschwindigkeit der E-Modul-Ermittlung beibehalten.

4.3 Spannungsintensitätsfaktor K:

Die Bruchzähigkeit wurde nach ISO 13586 bestimmt. Allerdings wurden anstelle der vorgeschriebenen Prüfkörper jene nach Kapitel 4.1.1 verwendet.

Da sich die Messung mit der für das J-Integral kombinieren lässt wird für den Versuchsaufbau auf Kapitel 4.4 verwiesen.

Als Prüfgeschwindigkeit für die Prüfkörper mit 5*5 mm*mm Querschnitt wurden 2 mm/min gewählt.

Daraus ergab sich die Dehnrade laut Gleichung (4-4) von $\dot{\varepsilon} = 0,15 \text{ s}^{-1}$.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{6 * w * v}{L^2} \quad (4-4)$$

Die Dehnrade, und damit auch die Bedingungen an der Risspitze, wurden für alle Probengeometrien konstant gehalten. Dadurch sollten eventuell vorhandene Abweichungen der Ergebnisse zwischen den Geometrien nur aufgrund einer Geometrieabhängigkeit, nicht aber aufgrund einer Lastabhängigkeit, zustande kommen.

Die nach Gleichung (4-5) errechneten Prüfgeschwindigkeiten sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst.

$$v = v_5 * \frac{L^2}{L_5^2} * \frac{w_5}{w} \quad (4-5)$$

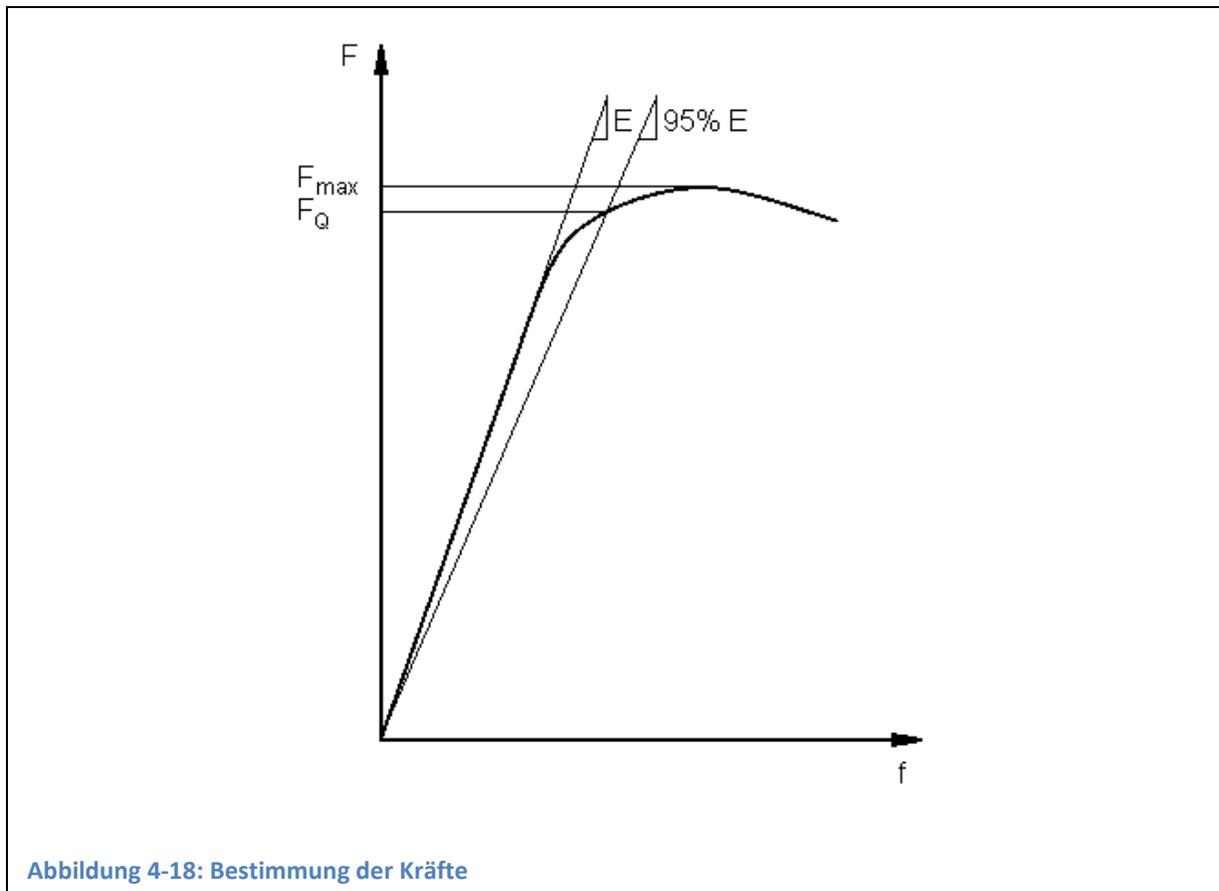
Tabelle 4-2: Prüfgeschwindigkeiten

	Prüfgeschwindigkeit v [mm/min]
ARC	2
5mm Quaderförmig	2
10mm Quaderförmig	4
20mm Quaderförmig	8

Aus den korrigierten Kraft-Verschiebungs-Kurven wurden die Kraft bei der Rissinitiierung F_Q sowie die Maximalkraft F_{\max} ermittelt.

Zur Bestimmung von F_Q wird als erstes die Tangente an die Kraft-Verschiebungs-Kurve gelegt. Anschließend wird eine gerade mit 5% verringerter Steigung gezeichnet. Der

Schnittpunkt dieser Gerade mit der Kraft-Verschiebungs-Kurve ergibt F_Q (siehe Abbildung 4-18).



Damit die Annahme der LEBM zutrifft muss das Verhältnis aus F_{max}/F_Q kleiner als 1,1 sein.

$$\frac{F_{max}}{F_Q} \leq 1,1 \quad (4-6)$$

Trifft dies zu kann aus den bisher ermittelten Werten ein vorläufiger Spannungsintensitätsfaktor K_Q nach (4-7) ermittelt werden.

$$K_Q = f\left(\frac{a}{w}\right) * \frac{F_Q}{b * \sqrt{w}} \quad (4-7)$$

Der Kalibrierungsfaktor $f(a/w)$ ist rein von der Geometrie des gekerbten Prüfkörpers abhängig, und wird nach (4-9) berechnet:

$$\alpha = \frac{a}{w} \quad (4-8)$$

$$f = 6 * \sqrt{\alpha} \frac{1,99 - \alpha * (1 - \alpha) * (2,15 - 3,93 * \alpha + 2,7 * \alpha^2)}{(1 + 2 * \alpha) * (1 - \alpha)^{3/2}} \quad (4-9)$$

Da alle Prüfkörper das selbe $\alpha = 0,1$ aufweisen ergibt sich $f(a/w) = 3,39$.

Anschließend musste noch die Geometrieunabhängigkeit von K_Q überprüft werden.

Die notwendigen Bedingungen hierzu lauten:

$$w > 2,5 * \bar{r} \quad (4-10)$$

$$a > 2,5 * \bar{r} \quad (4-11)$$

$$(w - a) > 2,5 * \bar{r} \quad (4-12)$$

Bei \bar{r} handelt es sich um den Radius der plastischen Zone rund um die Risspitze.

$$\bar{r} = \frac{K_Q^2}{\sigma_y^2} \quad (4-13)$$

Für σ_y wird die Fließspannung eingesetzt die nach Kapitel 4.2.2 ermittelt wurde.

Werden die Bedingungen (4-6) und (4-10)-(4-12) erfüllt, handelt es sich bei K_Q um den geometrieunabhängigen Kritischen Spannungsintensitätsfaktor K_{IC} .

4.4 J-Integral:

Im Gegensatz zu dem im Kapitel 4.3 beschriebenen verfahren, handelt es sich beim J-Integral um eine Methode der Fließbruchmechanik. Diese ermöglicht es den Widerstand eines zähen Werkstoffes gegen Risswachstum zu charakterisieren.

Die Bestimmung des J-Integrals erfolgte (mit denselben Einschränkungen bezüglich der abweichenden Probengeometrien) nach ASTM E1820.

Beim J-Integral wird der J-Wert (dieser charakterisiert den Spannungszustand an der Risspitze) in Relation zur Rissverlängerung Δa betrachtet.

Laut ASTM E1820 (13) ist es dazu notwendig für jeden Messpunkt eine Probe zu prüfen, und das Risswachstum nach kryogenem Brechen an der Bruchfläche zu bestimmen. (Mehrprobentechnik). In (8) werden darüber hinaus noch Methoden beschrieben, die es ermöglichen eine volle $J-\Delta a$ -Kurve je Probe zu erhalten (Einprobentechnik). Die Verfahren der Teilentlastung und die Elektropotentialmethode ließen sich allerdings nicht auf die hier verwendeten Prüfkörper anwenden. Stattdessen wurde für diese Arbeit eine optische Messung des Risswachstums gewählt.

Bei dieser Technik wird der Rissfortschritt während des gesamten Versuches fotografiert. Dies macht es notwendig, dass sich der Riss möglichst wenig bewegt, um nicht aus dem Beobachtungsbereich zu wandern. Dazu wurde die Biegefinne feststehend am unteren Support der Prüfmaschine befestigt, und die Auflager an der Traverse.

Auflager und Biegefinne hatten für Proben mit 5×5 mm*mm Querschnitt einen Radius von 2,5 mm, und für alle anderen Proben 5 mm. Der Auflagerabstand ist Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Fotografiert wurde der Rissfortschritt mit einem Sigma 150 mm Makro-Objektiv, das mit einem Sigma 2x Telekonverter an einer Nikon D80 betrieben wurde. Diese Kombination ermöglicht eine minimale Pixelgröße von 3 μm . Die Kamera wurde mit aktiver Spiegelvorauslösung von 0,4 s im Serienbild-Modus mit fest eingestellter Belichtungszeit und Blende betrieben. In Summe konnte damit ein Bild je Sekunde aufgenommen werden.

Um ein möglichst gutes Bild des Risses zu erhalten musste die Aufstellung der Kamera folgende Kriterien erfüllen:

- Kamera möglichst nahe an der Naheinstellgrenze
- Auf gleicher Höhe mit dem Kerb
- Bildebene parallel zum Prüfkörper
- Kerbe möglichst mittig im Bild

Zur Beleuchtung kamen sowohl eine Kaltlichtquelle von Zeiss sowie Kompaktleuchtstofflampen zum Einsatz.

Als Referenzmaß wurden die Proben mit einem 3 mm Langen Maßstab nahe der Kerbe ausgestattet.

Die Probe wurde zu Beginn des Versuchs mit einer Vorlast von 0,1 N belastet. Anschließend wurden die Aufnahmen synchron mit dem Versuch gestartet.

Der Versuch wurde bei konstanter Prüfgeschwindigkeit (siehe Tabelle 4-2) durchgeführt. Als Abbruchbedingung wurde eine maximale Durchbiegung des Prüfkörpers von $1,2 \cdot w$ festgelegt (siehe Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3: Maximale Durchbiegung

	Maximale Durchbiegung [mm]
ARC	6
5mm Quaderförmig	6
10mm Quaderförmig	12
20mm Quaderförmig	24

Nach Beendigung des Versuches wurden die Proben mit flüssigem Stickstoff kryogen gebrochen.

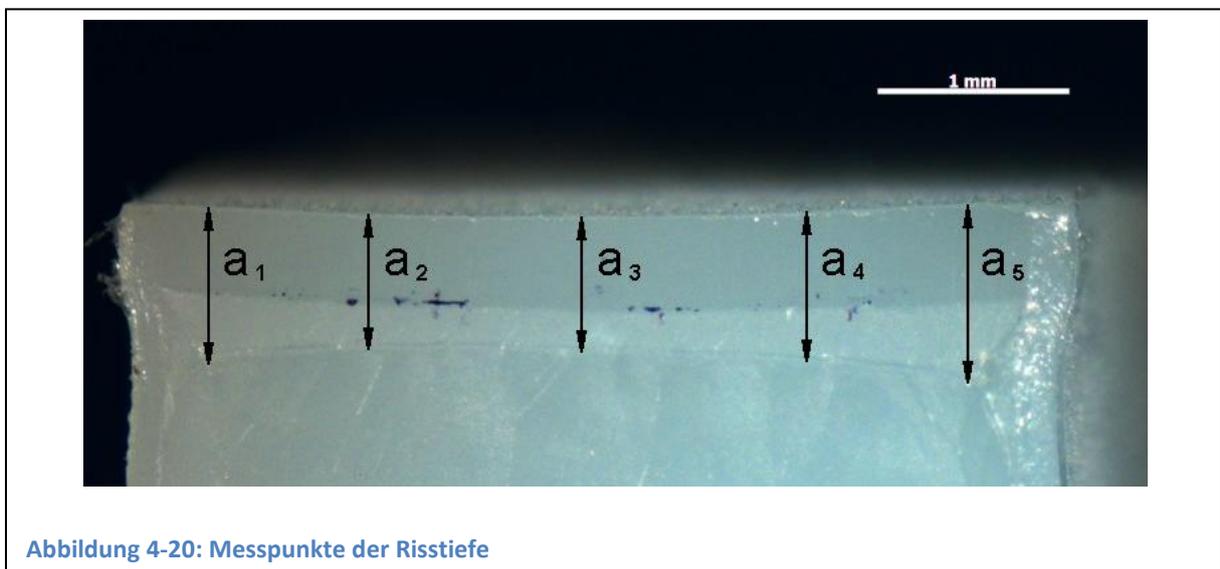
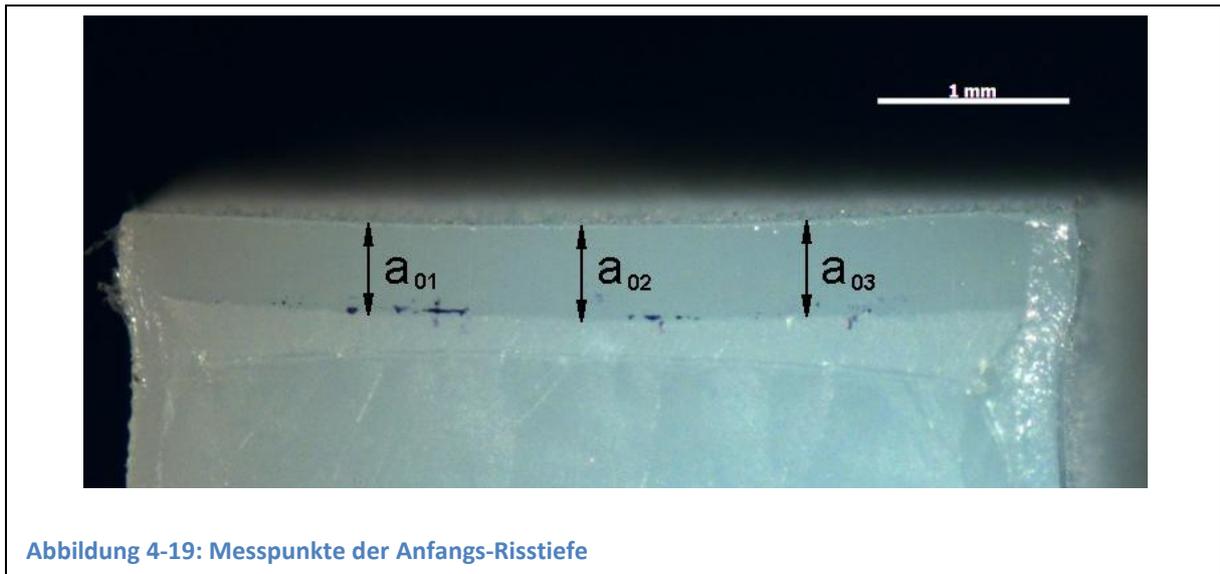
Durch das Brechen der Proben bei Temperaturen (flüssiger Stickstoff weist eine Siedetemperatur von -196°C auf) unterhalb der Glasübergangstemperatur (für PE-UHMW liegt diese bei ca. -120°C (1)) tritt an den Bruchflächen keine weitere plastische Verformung auf.

Die Bruchflächen wurden mit Hilfe eines Stereomikroskops (Zeiss STEMI 2000c) samt Kamera (Zeiss AxioCam) fotografiert. Mit dem Softwarepaket Zeiss AxioVision wurden die Bilder anschließend vermessen. Entlang des Risses wurde die ursprüngliche Risstiefe a_0 an 3 Stellen (siehe Abbildung 4-19), sowie die endgültige Risstiefe a_e an 5 Stellen (siehe Abbildung 4-20) bestimmt.

Die Mittelung der Messwerte erfolgt nach den Gleichungen (4-14) und (4-15).

$$a_0 = \frac{a_{01} + a_{02} + a_{03}}{3} \quad (4-14)$$

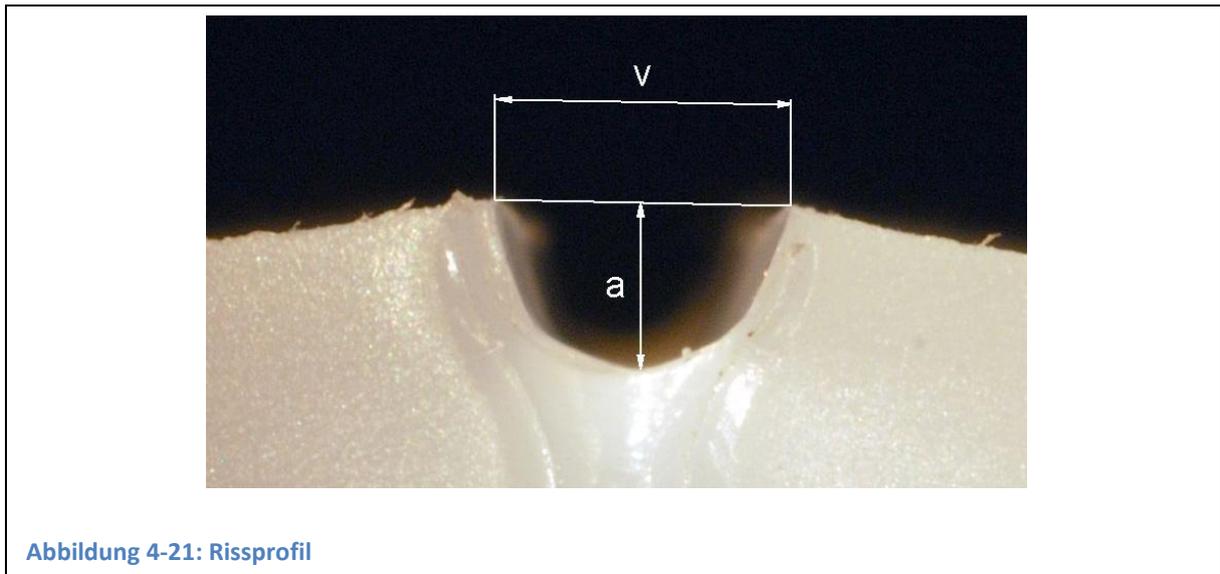
$$a_e = \frac{\frac{a_1 + a_5}{2} + a_2 + a_3 + a_4}{4} \quad (4-15)$$



Aus den Bildern des Kerbprofils wurden anschließend sowohl Risstiefe a als auch Kerbaufweitung v bestimmt, wie in Abbildung 4-21 dargestellt ist.

Das Risswachstum wurden nach (4-16) als Differenz aus der momentanen und der Anfangs-Risstiefe errechnet.

$$\Delta a = a - a_0 \quad (4-16)$$



Die so gewonnenen Werte wurden über die relative Zeit seit Versuchsbeginn mit den Messwerten der Prüfmaschine in Einklang gebracht.

Die J-Integralwerte wurden aus den korrigierten Messwerten der Arbeit U nach Gleichung (4-17) bestimmt.

$$J = \frac{\eta * U}{B_N * (w - a_0)} \quad (4-17)$$

$$B_N = b - 2 * a_s \quad (4-18)$$

$$\eta = 2 \quad (4-19)$$

Ein $\eta = 2$ wird in ASTM D6080 (14) für SENB-Prüfkörper vorgeschlagen. Laut (15) ist dieser Wert auch für bogenförmige Prüfkörper mit Seitenkerben zulässig.

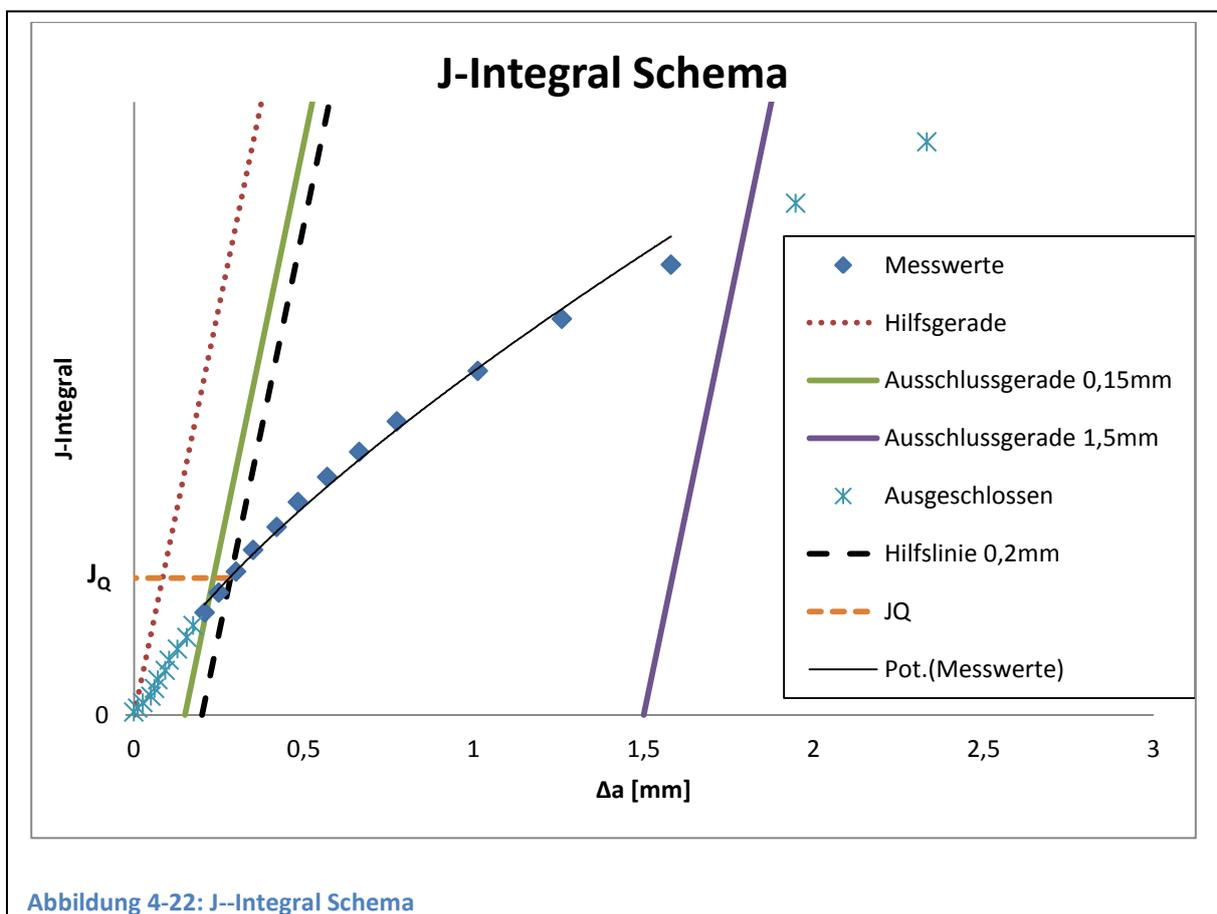
Die so erhaltenen $J-\Delta a$ Wertepaare wurden anschließend als J-R-Diagramm dargestellt.

Zusätzlich zu den aus den Fotos ermittelten Werten wurden auch der aus den Bruchflächen ermittelte Endpunkt, sowie bei ausgewählten Proben mit 5*5 mm*mm Querschnitt, je 2 Punkte im Inneren des Verlaufes, eingetragen. Diese wurden in Anlehnung an die Mehrprobentechnik durch nur teilweise Belastung auf eine Durchbiegung von 2,5 mm und 4 mm ermittelt.

Anhand dieser 3 zusätzlichen Messwerte konnte ein qualitativer Vergleich der Einprobentechnik mit der laut Norm vorgesehenen Mehrprobentechnik vorgenommen werden.

Zur Ermittlung eines Kritischen J-Integral-Wertes sieht die Norm folgende Schritte vor: (siehe Abbildung 4-22)

- Ermittlung der J- Δa Wertepaaren
- Ermittlung einer Hilfsgeraden auf Basis des Zugfestigkeit
- Verwerfen aller Wertepaare die links von einer Parallelen zur Hilfsgeraden liegt, die durch $\Delta a=0,15\text{mm}$ läuft
- Verwerfen aller Wertepaare die rechts von einer Parallelen zur Hilfsgeraden liegt, die durch $\Delta a=1,5\text{mm}$ läuft
- Bilden einer Regressionskurve der Form $J = K_1 * \Delta a^{K_2}$ mit den verbleibenden Messpunkten
- J_Q wird am Schnittpunkt der Regressionskurve mit der Parallelen zur Hilfsgerade, die durch $\Delta a=0,2\text{mm}$ läuft, ermittelt



4.5 Korrektur:

Die Korrektur der Eindringenergie und des Eindringweges wurde laut ASTM D6068 durchgeführt. Es wurde die Variante gewählt bei der eines der Auflager in einen ungekerbter Prüfkörper, der von einer Druckplatte unterstützt wird, eingedrückt wird. Die Kraftrate wurde so gewählt, dass die Maximalkraft nach derselben Zeit wie bei der eigentlichen Prüfung erreicht wird (siehe Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Kraftraten

Kraftraten [N/s]	
Quader 5*5 mm*mm	1,481
Quader 10*10 mm*mm	4,278
Quader 20*20 mm*mm	14,11
Normprüfkörper	1,89
ARC PE80	1,822

Da die Quaderförmigen 5*5 mm*mm Prüfkörper und die ARC-Prüfkörper aus PE-UHMW sowohl denselben Werkstoff wie auch denselben Querschnitt an der Eindrückstelle aufweisen, wurde die selbe Korrekturmessung für beide verwendet.

Als Ausgleichsfunktion für die Eindringenergie wurde ein Polynom 3. Grades als Funktion der Kraft bestimmt. Diese beschreibt allerdings nur die Eindringarbeit eines Auflagers. Für den Ausgleich aller 3 Auflager müssen zur Eindringenergie er Biegefinne, die die volle Last trägt, die Eindringenergien der äußeren Auflager, die jeweils nur die halbe Last tragen, addiert werden. Die gesamte Eindringenergie ergibt sich demnach zu

$$U_I = U_{(F)} + 2 * U_{(F/2)} \quad (4-20)$$

Da für eine Ausgleichsfunktion des Eindringweges ein Polynom 6. Grades notwendig gewesen wäre, dessen Koeffizienten sich um Größenordnungen unterschieden, wurde stattdessen eine stückweise Polynome Funktion 2. Grades verwendet. Insgesamt bestand die Ausgleichsfunktion aus 3 Parabelbögen. Jeder Bogen wurde in Form eines Lagrangeschen Interpolationspolynoms realisiert (16). Da diese Funktion nur den Eindringweg eines der Auflager repräsentiert muss für die gesamte Ausgleichsfunktion zum Eindringweg der

Biegefinne, die die volle Last trägt, noch der Eindringweg eines äußeren Auflagers, das die halbe Last trägt, addiert werden. Der gesamte Eindringweg ergibt sich demnach zu

$$f_I = f_{(F)} + f_{(F/2)} \quad (4-21)$$

Die Diagramme zu den Korrekturfunktionen finden sich im Anhang unter Abbildung 8-1 bis Abbildung 8-5.

4.6 Langzeitversuch:

Die Versuche wurden auf einem Langzeitprüfstand mit Temperierung vom Typ FNCT-Prüfstand der Firma Mechatronik Moharitsch (Abbildung 4-23) durchgeführt.



Abbildung 4-23: Langzeitprüfstand

Diese Maschine war allerdings für die Prüfung großer Proben unter hohen Lasten ausgelegt. Sie zeigte zusätzlich, bei den notwendigen kleinen Lasten, einen ausgeprägten Stick-Slip-Effekt.

Folgende Umbauten wurden vorgenommen:

- Entfernen der Kraftübersetzung
- Überarbeiten der Lagerung der Umlenkrolle
- Tausch der Tragseile durch Biegeweichere Stahlseile
- Anbringen neuer Klemmen für die ARC-Proben (Abbildung 4-24)
- Anbringen von Messuhren

Ursprünglich war der Prüfstand dazu ausgelegt die Zeit bis zum Bruch zu messen. Da die zu prüfenden Proben allerdings einen kleinen Auflagerabstand (20 mm) und große Auflagerdurchmesser (6 mm, um übermäßiges einsinken der Auflager zu verhindern) notwendig machten musste diese Funktion des Prüfstandes aufgegeben werden.

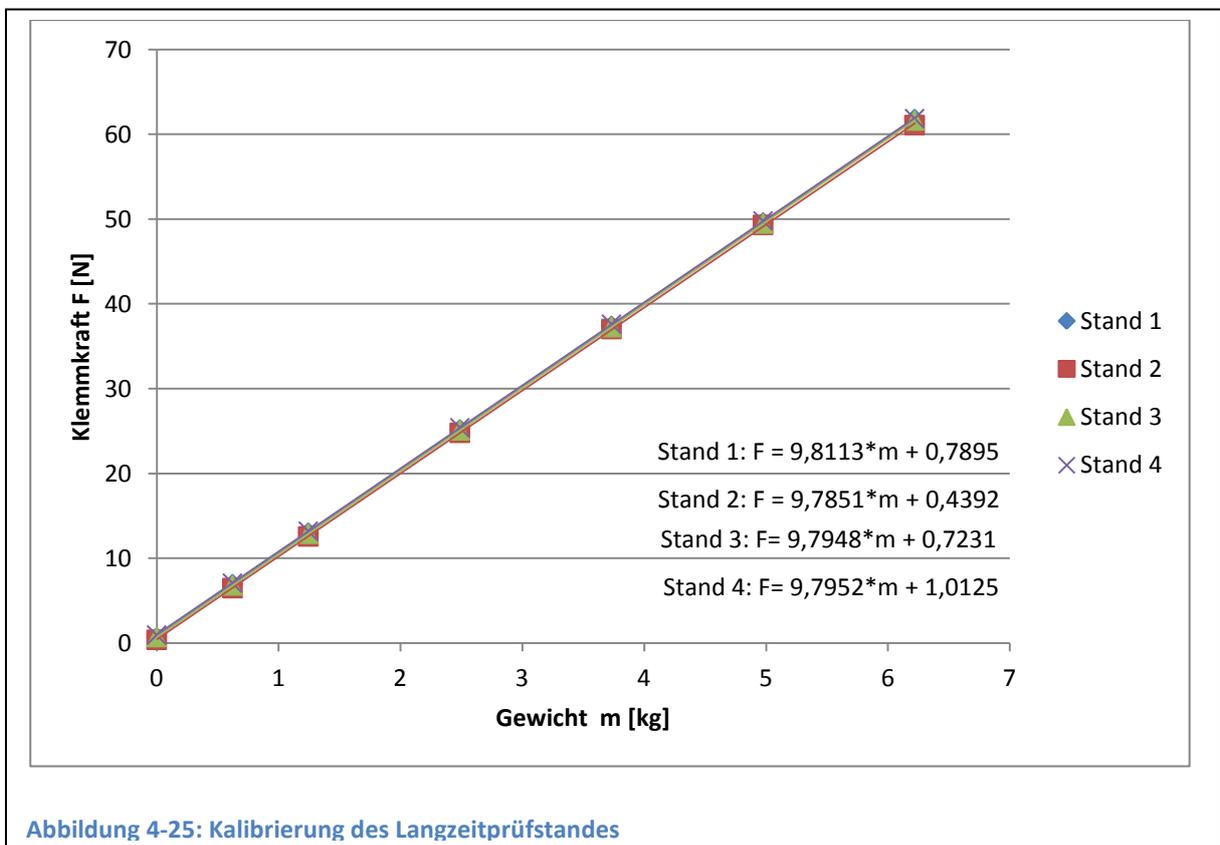
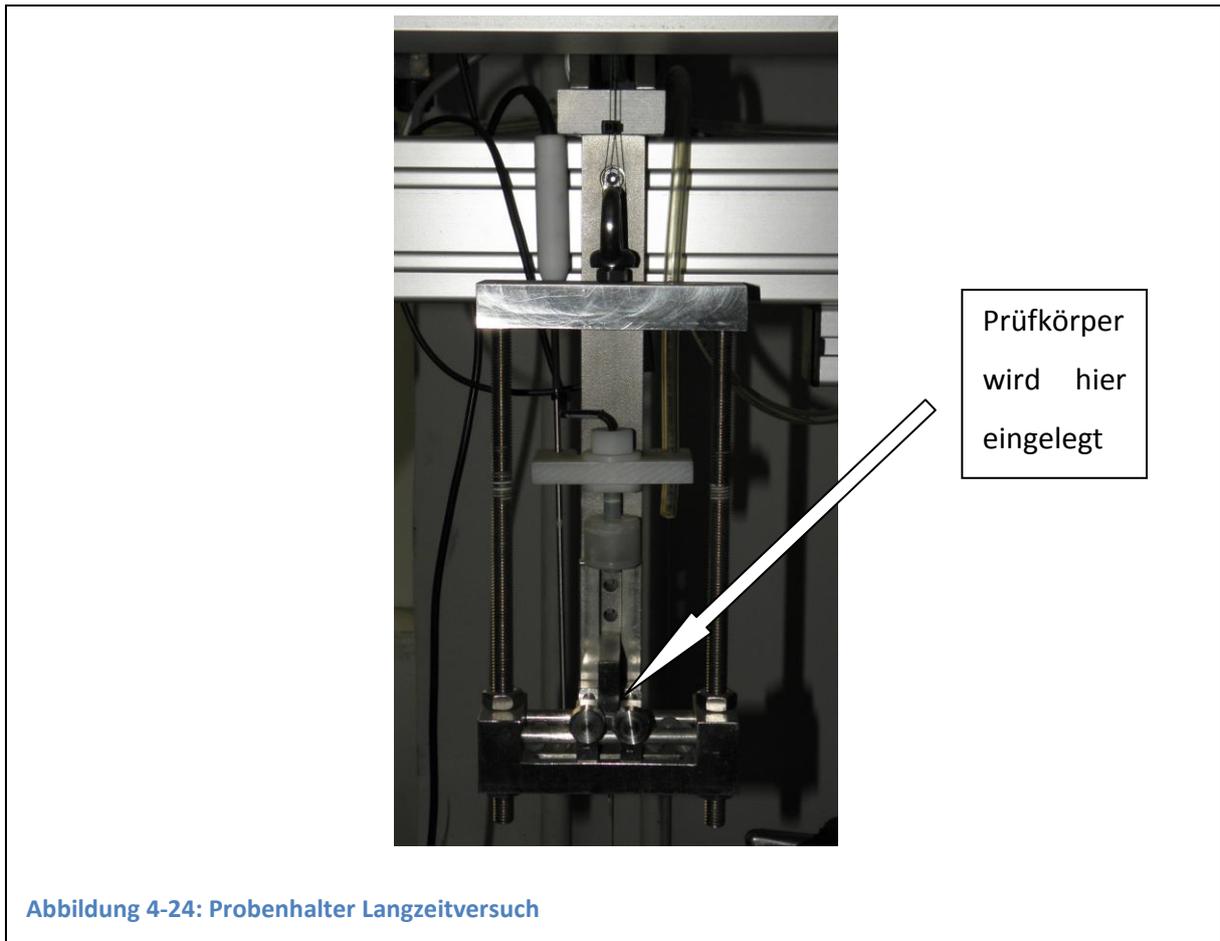
Der Umbau ermöglichte stattdessen die Aufnahme von Zeit-Verschiebungs-Kurven.

Um den Anfang der Belastung möglichst gut wiedergeben zu können wurden die Messuhren während der ersten 5 Minuten gefilmt und mehrere Fotos der Probe gemacht.

Über die konstante Kraft und die nun bekannte Verschiebung stand auch die vom Prüfkörper aufgenommene Energie für weitere Auswertungen zur Verfügung.

Die Funktion des Prüfstandes wurde mittels Kraftmessdose und Prüfungsgewichten kontrolliert.

Dazu wurde die Kraftmessdose in der Klemme angebracht und mittels abgewogener Gewichte belastet.



Da die Probenhalter während des Versuches in Wasser eingetaucht sind, wurde die Verdrängung mit 172ml bestimmt. Dies ergibt eine zusätzliche Prüflast von 1,69N.

In Absprache mit Frau Dr. Ruth Markut-Kohl wurden 2 Fälle untersucht:

- Eine Normalbelastung mit 41N (dies entspricht einer Dauerlast wie sie für Hüftpfannen üblich ist) und 0,5 mm Kerbtiefe
- Ein Worst-Case-Szenario mit 107N (dies entspricht der in Hüftpfannen auftretenden Spitzenlasten) und 1 mm Kerbtiefe

Die Prüflasten (passend zu den Prüfkräften) und Kerbtiefen sind in Tabelle 4-5 für die ersten 4 Prüfstände zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Prüflasten Langzeitversuch

	Prüfgewicht [g]			
	Prüfstand 1	Prüfstand 2	Prüfstand 3	Prüfstand 4
Kerbtiefe [mm]	0,5	0,5	1,0	1,0
Prüflasten 41N	3573	3609		
Prüflasten 107N			10002	9972

Die Proben wurden die gesamte Versuchsdauer hindurch konstant auf 41°C gehalten.

Als Immersionsmedium diente mittels Ionentauscher demineralisiertes Wasser, welches permanent mittels Magnetprüfer durchmischt wurde.

Aus Platzgründen war es nicht möglich den gleichen Kamera-Aufbau, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, zu verwenden. Stattdessen wurde ein höhenverstellbares, und justierbares Mikroskop aufgebaut. (siehe Abbildung 4-26)

Als Grundgerüst und gleichzeitig Höhenverstellung diente ein Scherenhubtisch (Lab-Boy), wie er auch unter den Gläsern für das Immersionsmedium verwendet wird. Auf dieses wurde ein Kreuztisch der Firma Proxxon montiert. Dieser übernahm die Funktion der seitlichen Ausrichtung, und groben Fokussierung. Darauf wurde ein Mikroskop vom Typ MA130GW-Z1 montiert.

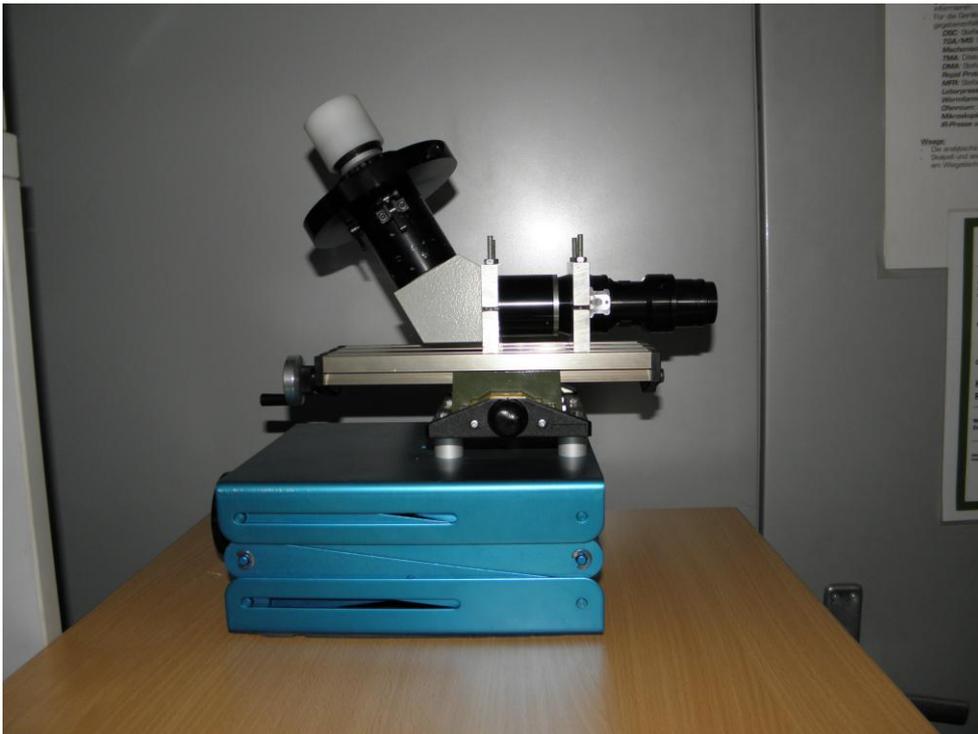


Abbildung 4-26: Mikroskop

Als Kamera wurde eine Kompaktkamera direkt an das Okular des Mikroskops Adaptiert.

Dies ermöglichte die Dokumentation des Risses ohne PC vor Ort.

5 Ergebnisse:

5.1 Biegeversuch:

Für die Bestimmung von E-Modul Fließspannung und Maximalspannung wurden insgesamt 5 Proben nach DIN 178 (11) getestet.

Die daraus resultierenden σ - ϵ -Verläufe wurden um die Eindringtiefe der Auflager korrigiert und sind in Abbildung 5-1 zusammengefasst.

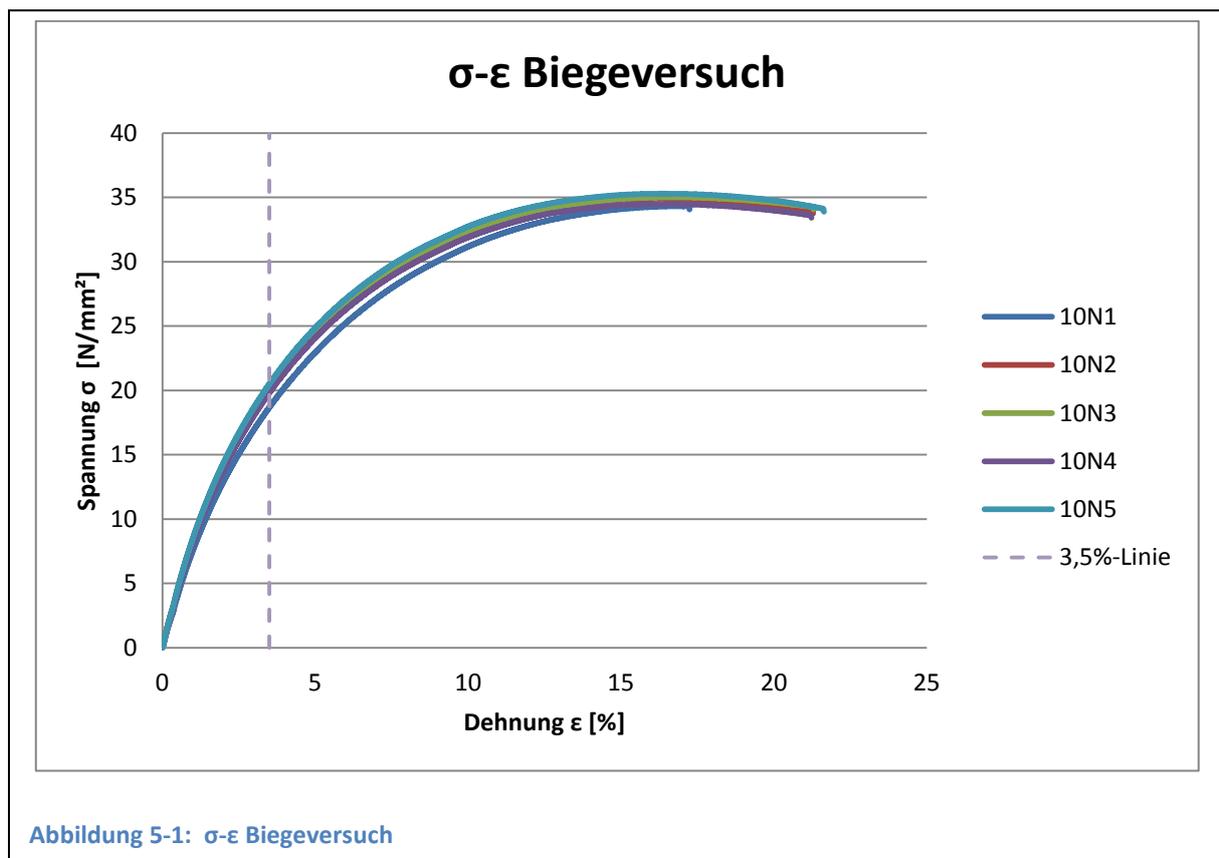


Abbildung 5-1: σ - ϵ Biegeversuch

Aus diesen σ - ϵ -Verläufen wurden E-Modul, Fließspannung bei 3,5% Dehnung und Maximalspannung bestimmt.

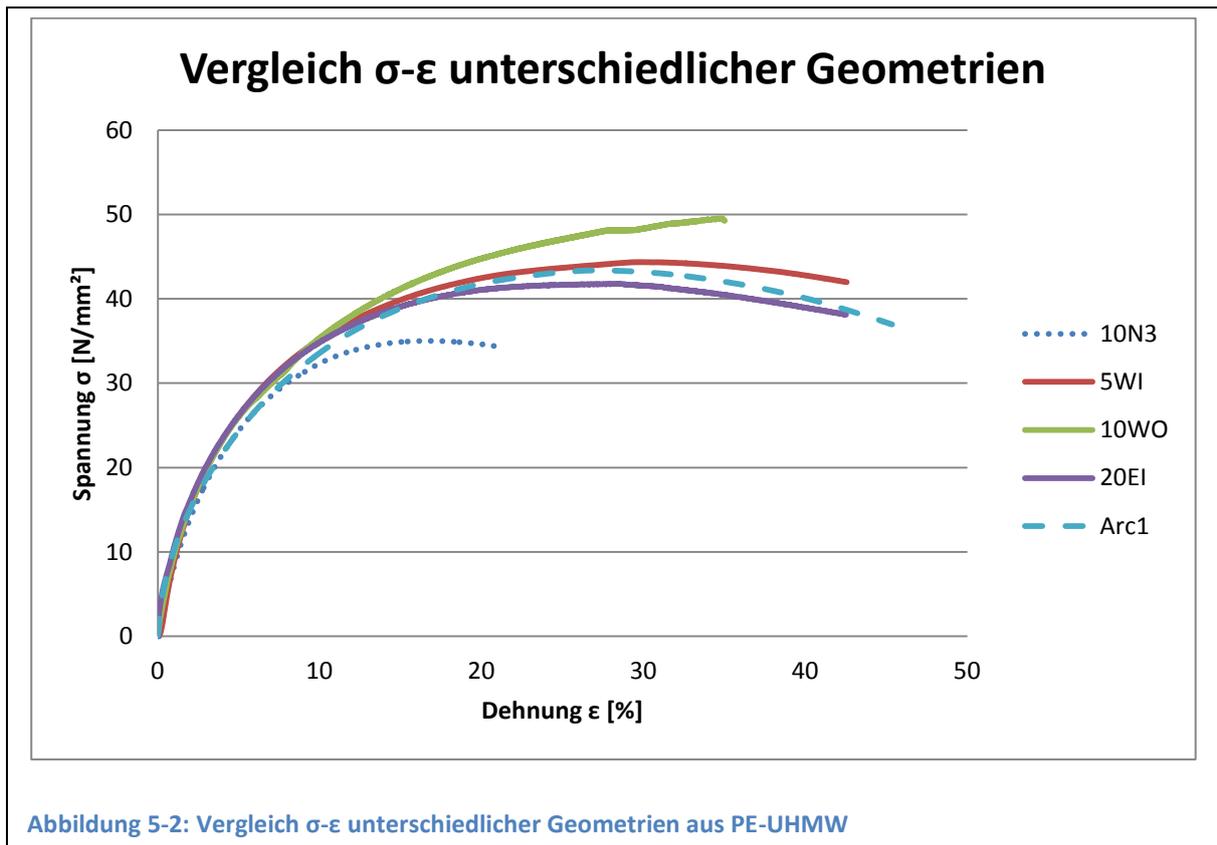
Mittelwert und Standardabweichung wurden berechnet und die Ergebnisse in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: E-Modul, Fließspannung und Maximalspannung aus dem Biegeversuch

	E-Modul [N/mm ²]	Fließspannung [N/mm ²]	Maximalspannung [N/mm ²]
10N1	838	18,7	34,3
10N2	949	20,4	34,9
10N3	925	20,1	35,0
10N4	881	19,8	34,5
10N5	975	20,5	35,3
Mittelwert	913,6	19,9	34,8
Standardabweichung	54,6	0,72	0,4

Vergleicht man die ermittelten Werte mit denen aus Tabelle 2-1, so zeigt sich, dass der ermittelte E-Modul innerhalb der angegebenen Bereiche liegt. Die ermittelte Fließspannung sowie Maximalspannung liegen allerdings niedriger als erwartet (siehe Tabelle 2-1). Weitere Recherchen zeigten allerdings, dass es innerhalb der PE-UHMW-Gruppe sehr wohl auch Fließspannungen in der ermittelten Größe gibt. So weist (17) für ein nicht näher spezifiziertes PE-UHMW eine Fließspannung von 20-23 N/mm² aus (Größenabhängig).

Da nur für die Standard-Prüfkörper eine Serie mit ausreichendem Umfang zur Verfügung stand, werden diese ermittelten Mittelwerte für E-Modul, Fließspannung, und Maximalspannung, den anschließenden Berechnungen zugrunde gelegt.



Vergleicht man die σ - ϵ -Verläufe der unterschiedlichen Geometrien (Abbildung 5-2 zeigt eine Probe je Geometrie), so zeigt sich eine deutliche Abweichung voneinander.

Dies zeigt bereits die Probleme bei der Ermittlung von Kennwerten für PE-UHMW auf.

Da diese Kennwerte allerdings in die Ermittlung von anderen Kennwerten (Wie die ebenfalls in dieser Arbeit ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren und J-Integrale) eingehen, führt dies zu deutlichen Unsicherheiten in den ermittelten Werten.

In (1) wird ebenfalls auf die Problematik der "richtigen" Wahl der notwendigen Kennwerte eingegangen. So wird erwähnt, dass zur Ermittlung der kritischen J-Integral-Werte, je nach Publikation, sowohl die Fließspannung, die Maximalspannung, wie auch der Mittelwert aus beiden Anwendung finden.

5.2 Spannungsintensitätsfaktor K:

Zur Bestimmung des Spannungsintensitätsfaktors wurden zunächst alle Messungen wie in Kapitel 4.4 beschrieben um den Eindringweg der Auflager korrigiert.

Die resultierenden Kraft-Durchbiegungs-Verläufe sind in Abbildung 5-3 bis Abbildung 5-7 für jede Geometrie der PE-UHMW-Proben abgebildet. Abbildung 5-8 zeigt den Kraft-Durchbiegungs-Verlauf für die ARC-Proben aus PE80.

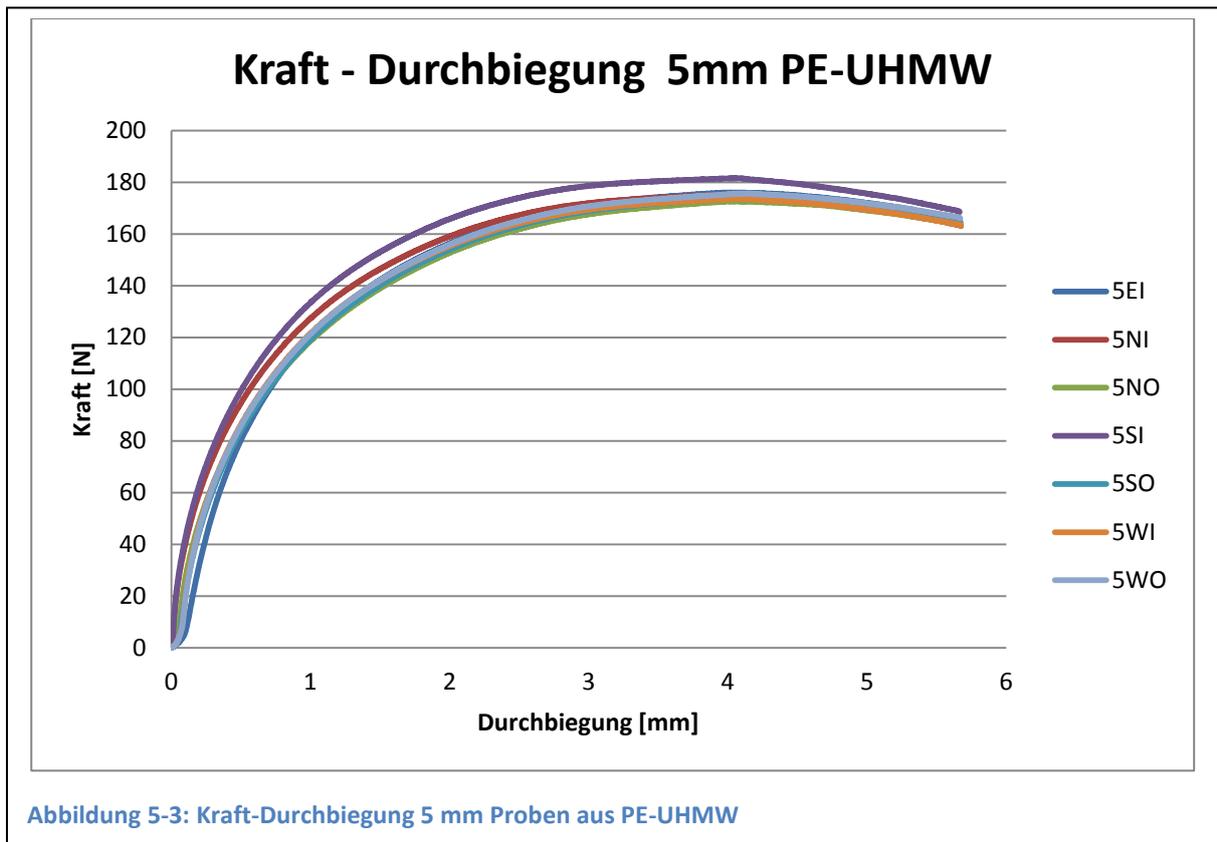
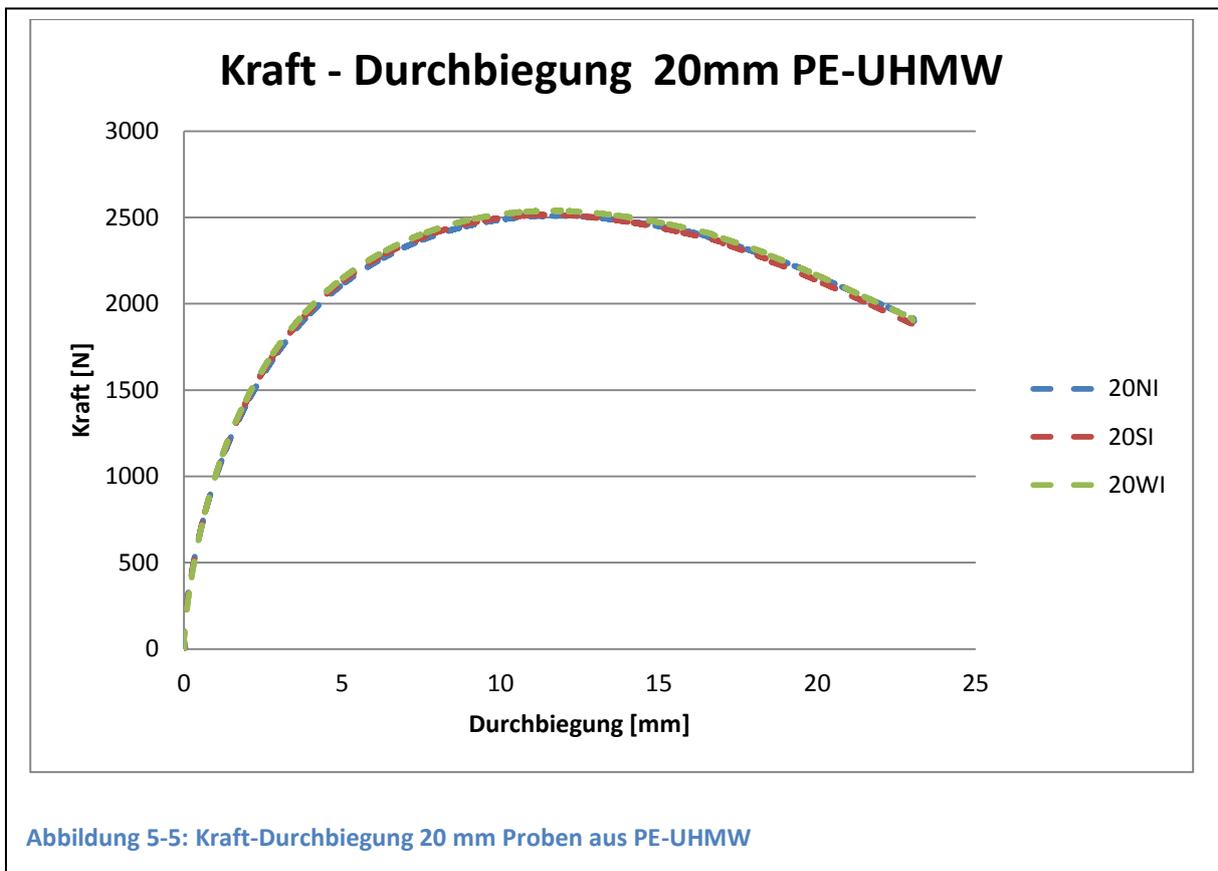
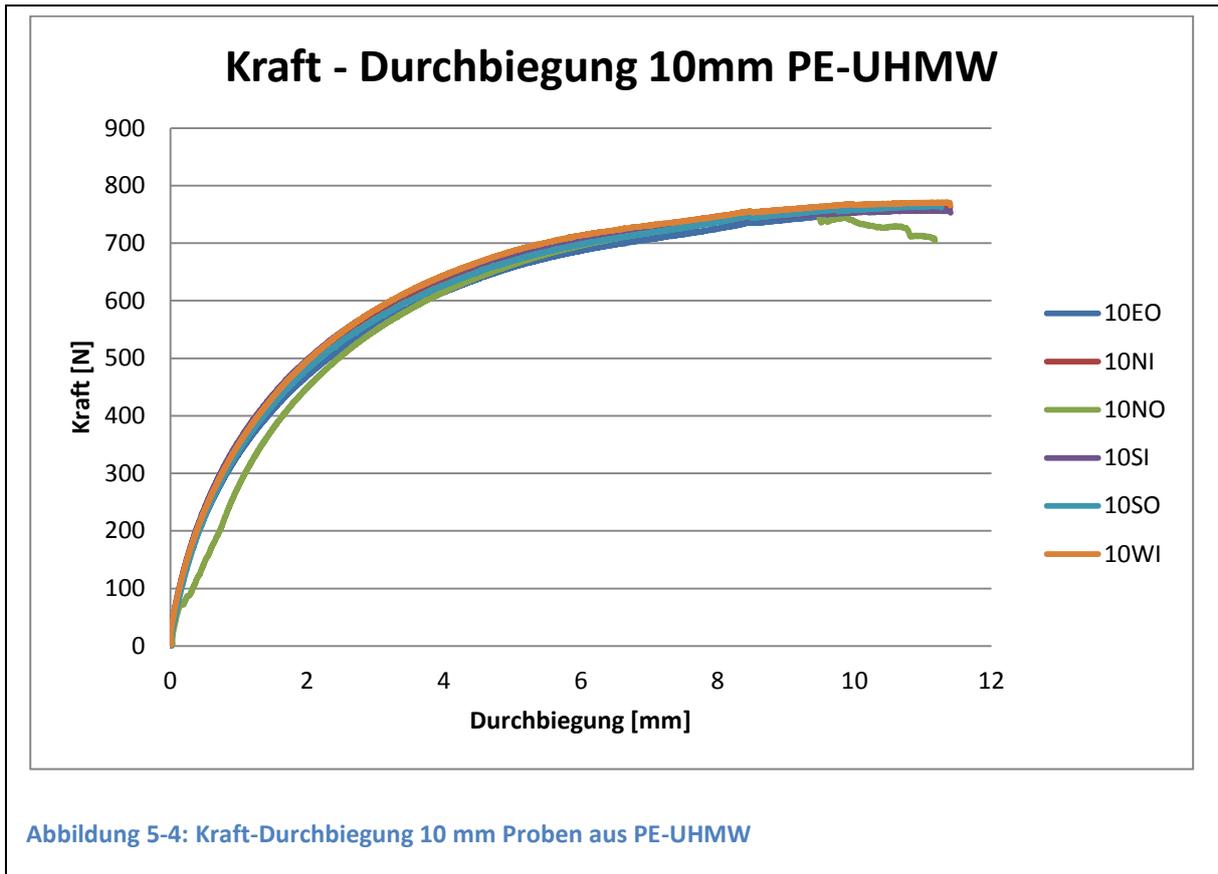


Abbildung 5-3: Kraft-Durchbiegung 5 mm Proben aus PE-UHMW



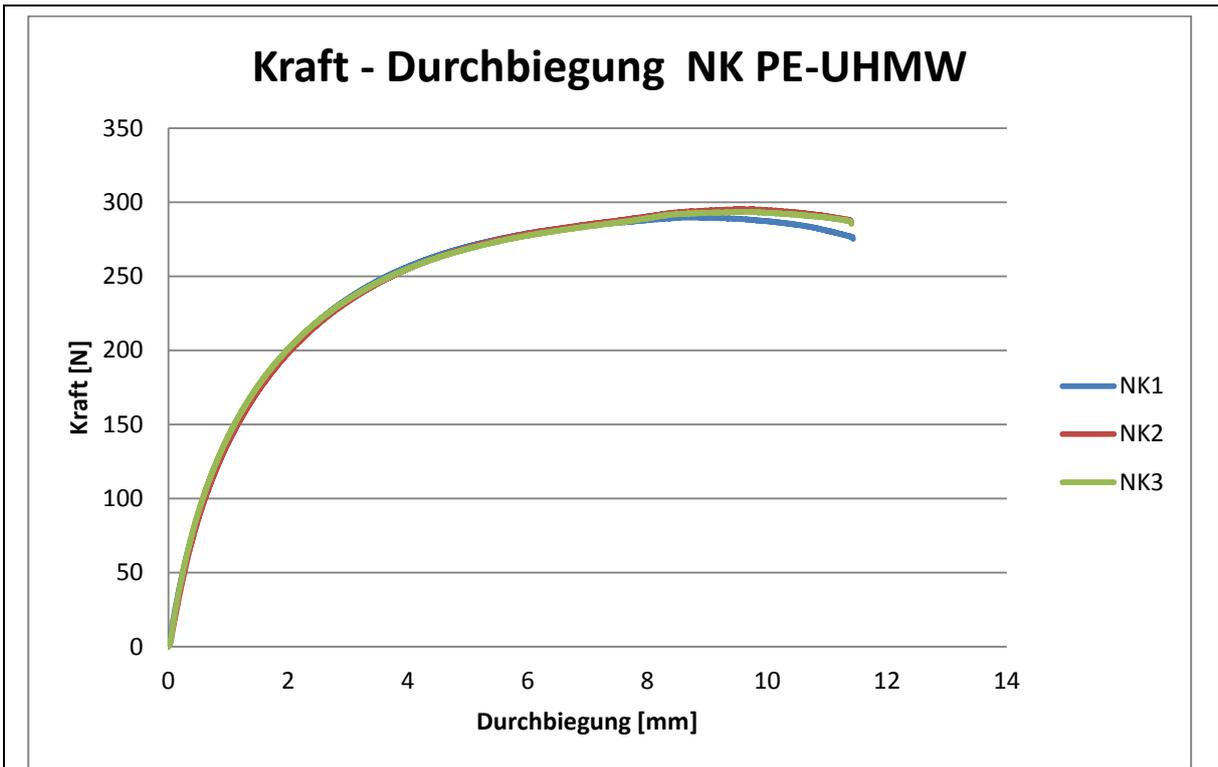


Abbildung 5-6: Kraft-Durchbiegung Normprüfkörper mit Kerbe aus PE-UHMW

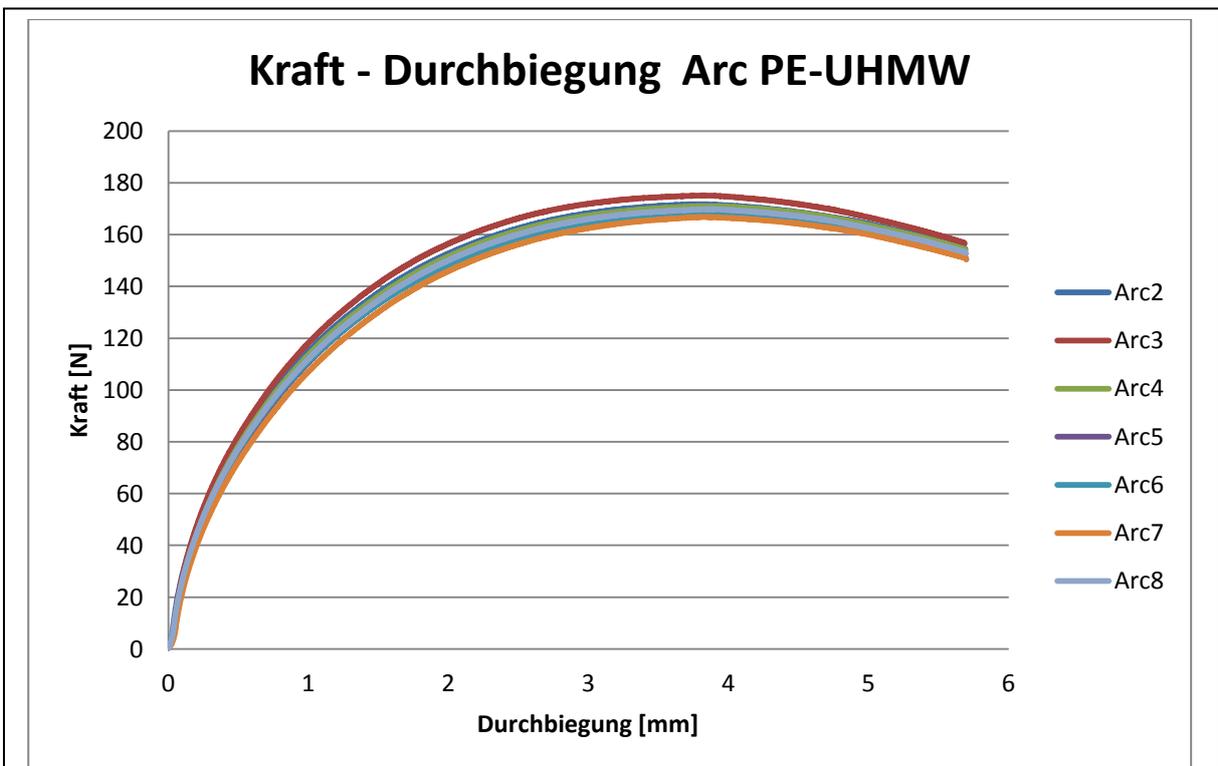
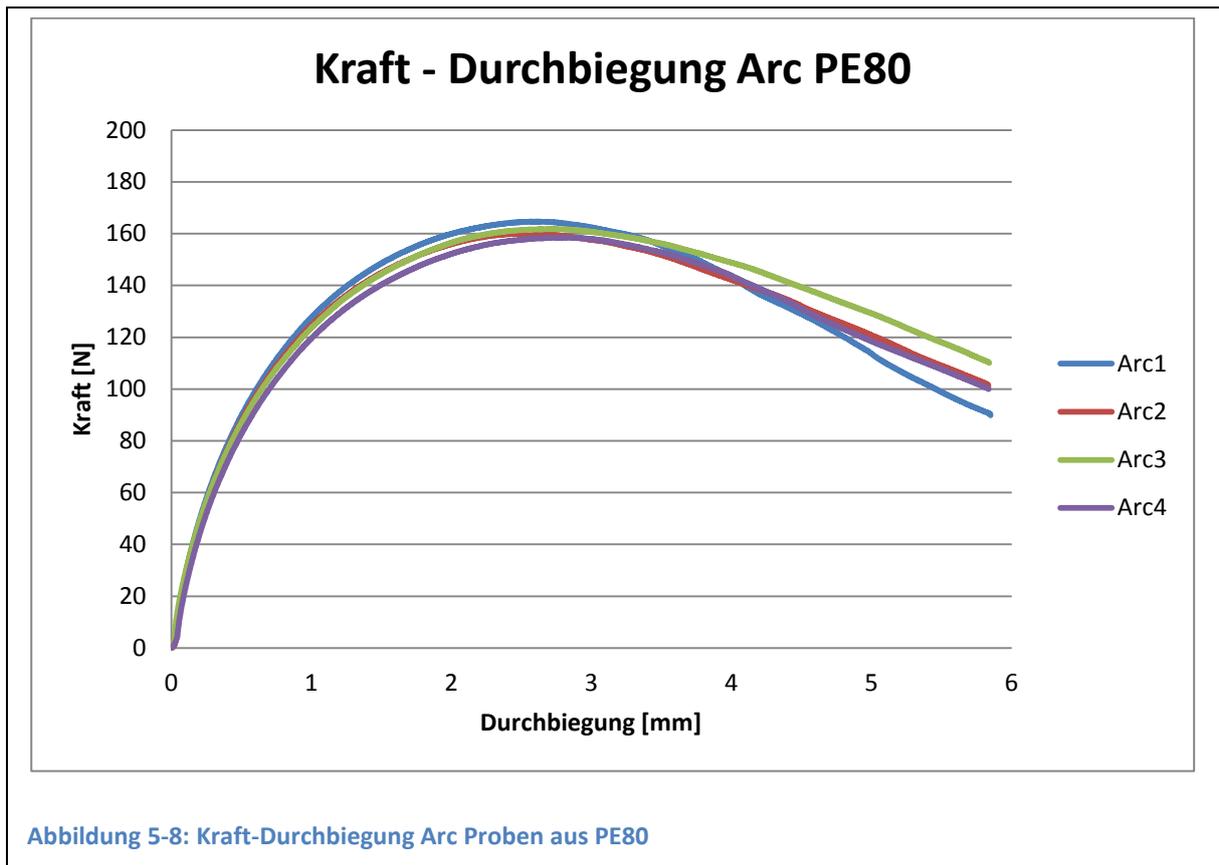
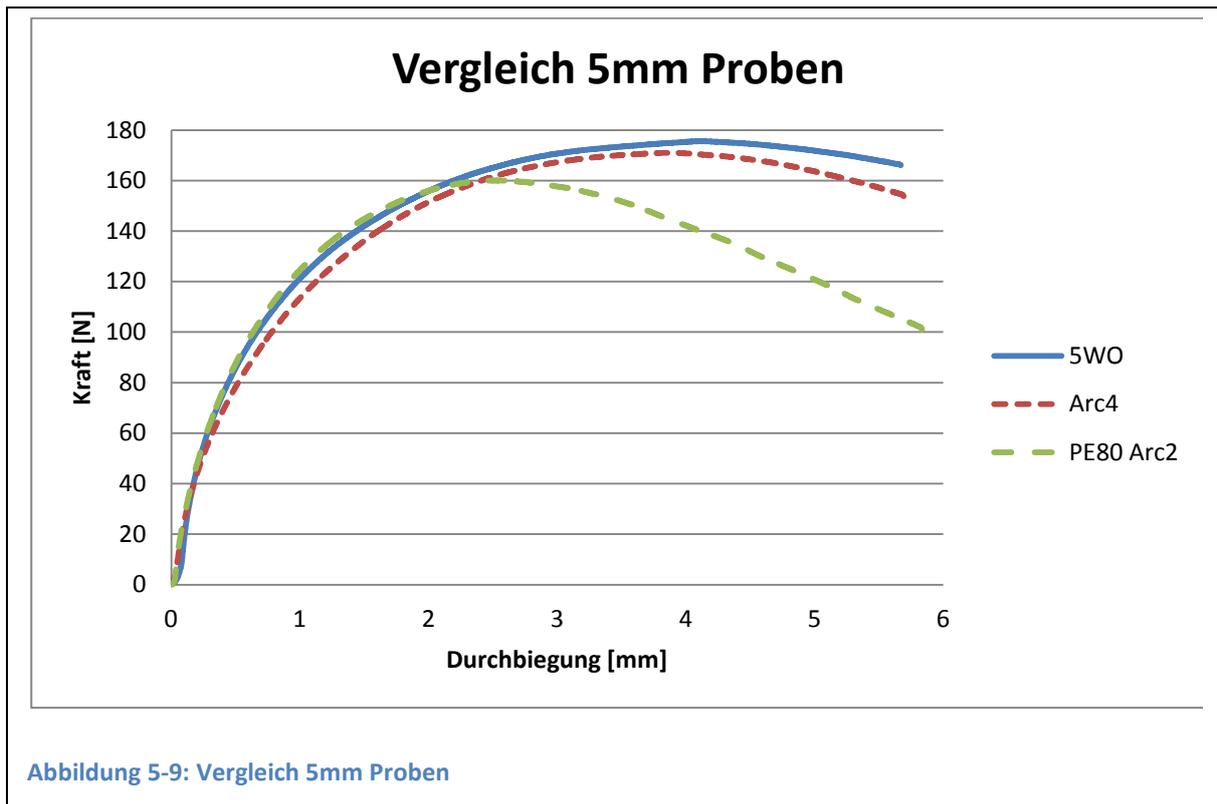


Abbildung 5-7: Kraft-Durchbiegung Arc Proben aus PE-UHMW



Vergleicht man die Kraft-Durchbiegungs-Kurven der Proben mit 5mm Querschnitt (in Abbildung 5-9 sind je eine Probe der entsprechenden Versuchsserien eingetragen), so sieht man, dass es im späteren Verlauf des Versuches (bei dem bereits deutliches Risswachstum aufgetreten ist) ein deutlicher Unterschied zwischen den PE-UHMW und PE80 Proben besteht.

Zwischen den beiden Probengeometrien tritt nur ein geringer Unterschied auf. Dieser lässt sich dadurch erklären, dass die bogenförmigen Proben zu den äußeren Auflagern hin biegeweicher sind, als die quaderförmigen. Entsprechend treten bei gleicher Durchbiegung geringere Kräfte auf.



Bei der Berechnung der Spannungsintensitätswerte zeigte sich erwartungsgemäß, dass bei den gewählten Geometrien die Randbedingungen zur Gültigkeit der LEBM verletzt sind.

Fast alle Proben erfüllten zwar das Größen-Kriterium, das Verhältnis $\frac{F_{max}}{F_5}$ lieferte aber je nach Geometrie einen mittleren Wert von 4,9-8,2.

Aufgrund dieser gravierenden Abweichung von der maximal zulässigen 10% Nichtlinearität können die ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren nicht als geometrieunabhängig angesehen werden.

Die ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren sind in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Tabelle 5-2: Spannungsintensitätsfaktoren PE-UHMW und PE80

	Arc		5*5mm		10*10mm		20*20mm		PE80 Arc	
	Arc2	6,5	5EI*	13,5*	10EO	12,0	20NI	15,94	Arc1	4,6
	Arc3	6,1	5EO	7,9	10NI	14,6	20SI	19,8	Arc2	4,0
	Arc4	6,4	5NI	6,6	10NO*	38,85*	20WI	25,4	Arc3	4,2
	Arc5	6,6	5NO*	11,7*	10SI	14,4			Arc4	5,4
	Arc6	5,9	5SI	7,5	10SO	14,0				
	Arc7	6,7	5SO	7,3	10WI	13,0				
	Arc8	6,1	5WI	7,4						
			5WO	7,5						
Mittelwert		6,3		7,4		13,6		20,4		4,5
Standard- Abweichung		0,29		0,41		1,1		4,81		0,61

Alle Werte in MPa*√mm

* Ausreißer, die nicht in die Berechnung von Mittelwert und Standardabweichung einfließen

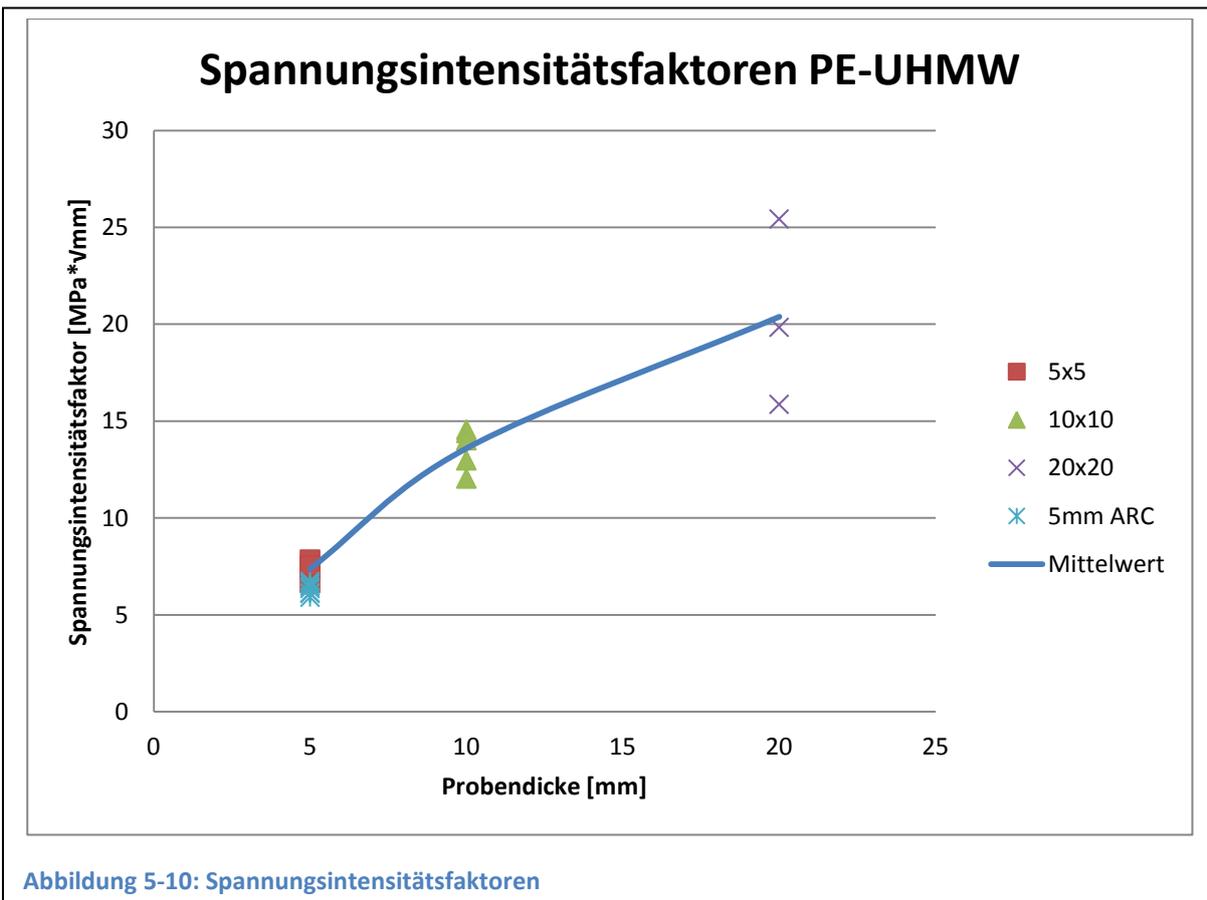


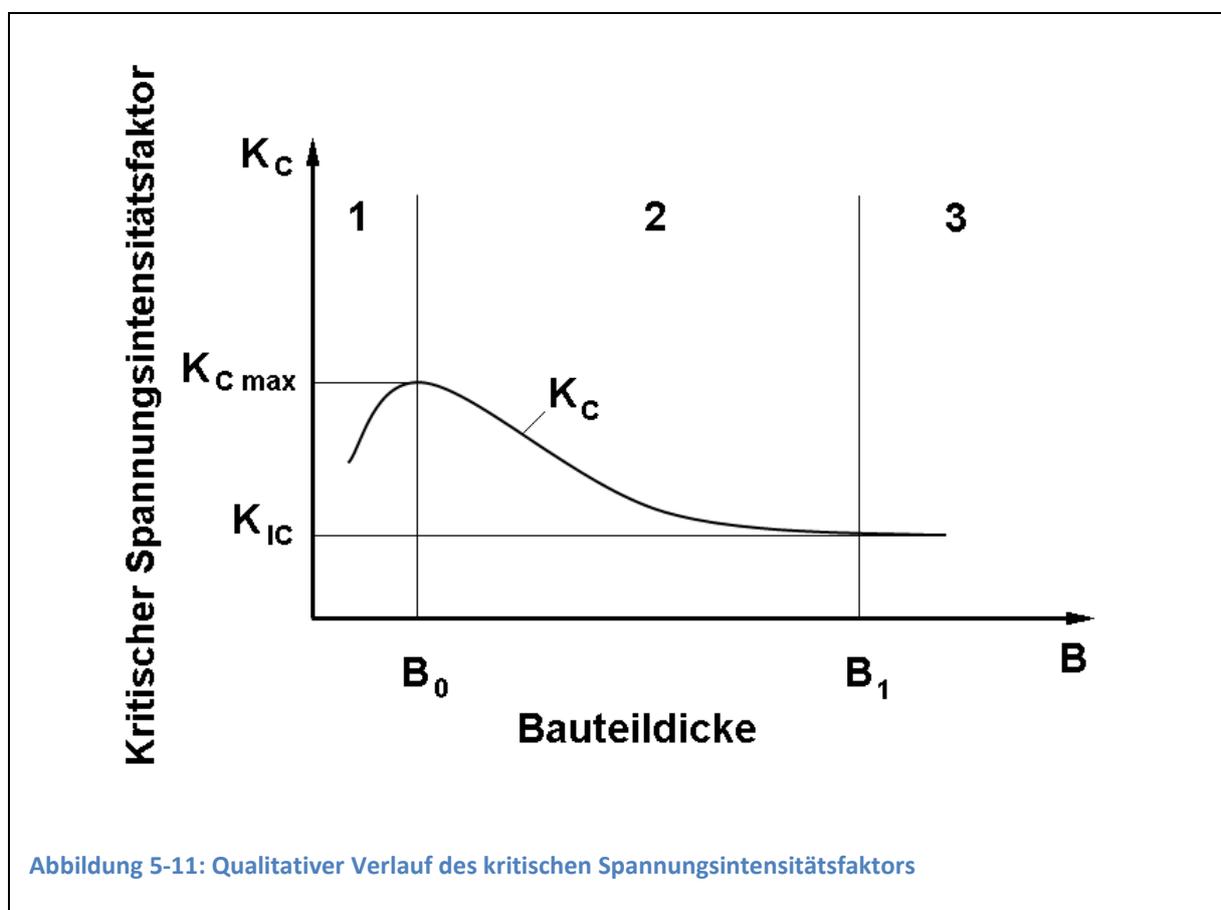
Abbildung 5-10: Spannungsintensitätsfaktoren

Betrachtet man in Abbildung 5-10 die Mittelwerte der Proben 5*5mm, 10*10mm und 20*20mm so zeigt sich ein mit der Probendicke zunehmender kritischer Spannungsintensitätsfaktor. Vergleicht man dieses Ergebnis mit Abbildung 5-11

(nachempfunden der Abb. 3.4 in (8)) wird klar, dass sich die erhaltenen Messwerte im Bereich 1, dem Bereich des ebenen Spannungszustandes befinden.

Die Geometrieunabhängigkeit wird allerdings erst im Bereich 3 (ebener Dehnungszustand) erreicht.

Wie problematisch es ist bei duktilen Werkstoffen den geometrieunabhängigen Spannungsintensitätsfaktor zu bestimmen zeigt sich auch in (18). Dort wurde PE 4710 (ein PE-HD) nach ASTM D5045 getestet. Um die Kriterien für die LEBM einzuhalten, mussten Proben mit $8*15*80$ cm*cm*cm verwendet werden.



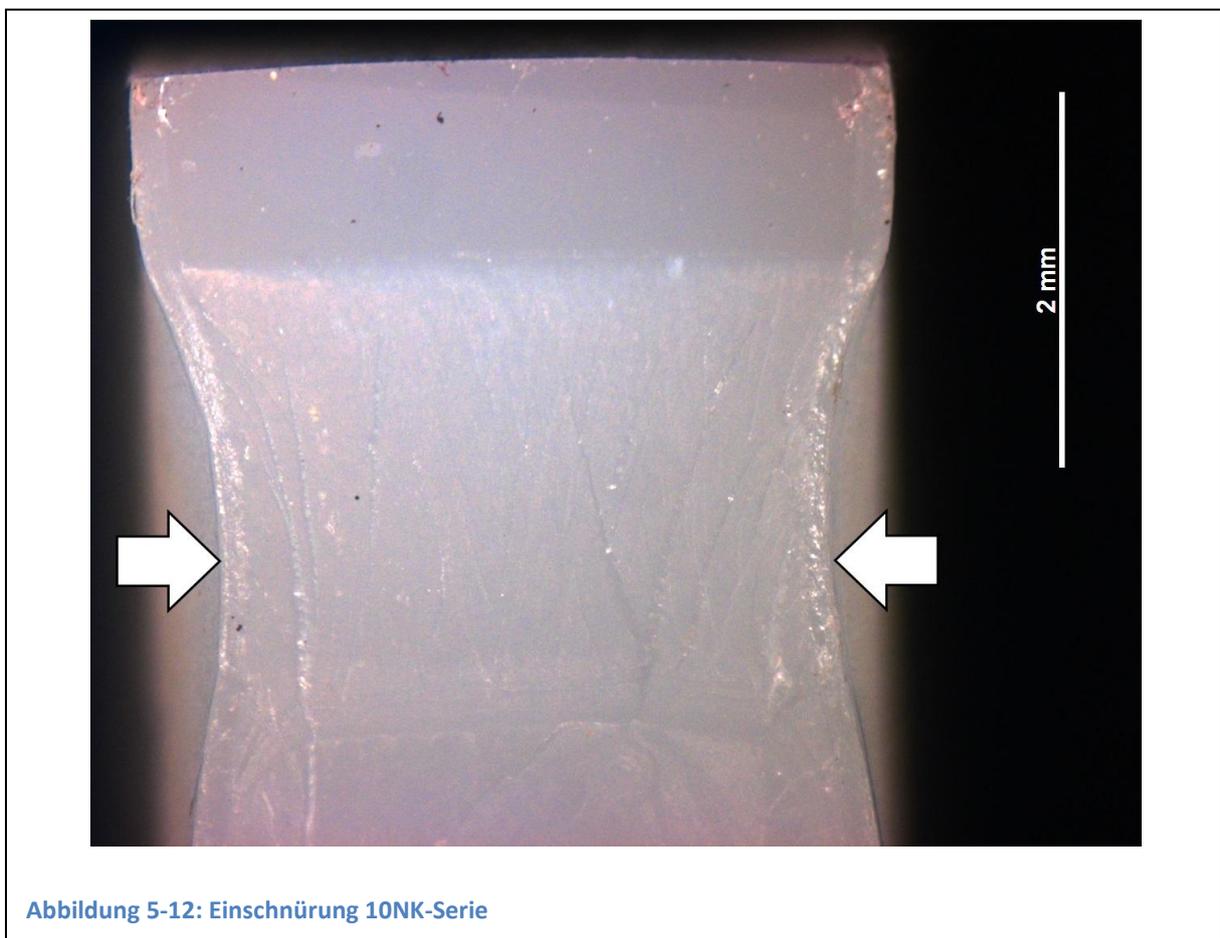
Es zeigt sich auch, dass die Form der Probe (quaderförmig oder Arc) kaum Einfluss auf die ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren hat (Abweichung ca. 15%), wohingegen der Schritt von $5*5$ mm zu $10*10$ mm Querschnitt mit einer nahezu Verdopplung des Spannungsintensitätsfaktors einhergeht.

Kurtz gibt in (1) für den kritischen Spannungsintensitätsfaktor einen Bereich von 54-152 MPa* $\sqrt{\text{mm}}$ an, welche sich auch mit den von L.A. Pruitt (19) ermittelten Werten decken.

Ein Vergleich mit den in dieser Arbeit ermittelten Werten zeigt, dass zwischen dem kritischen (und damit geometrieunabhängigen) Spannungsintensitätsfaktor, und den in dieser Arbeit ermittelten (geometrieabhängigen), ein Unterschied um einen Faktor 9 besteht. Womit die deutliche Geometrieabhängigkeit der in dieser Arbeit ermittelten Spannungsintensitätsfaktoren ebenfalls bewiesen ist.

Die Proben der NK10-Serie waren eigentlich dazu gedacht den reinen Einfluss der Probendicke auf das Bruchverhalten zu untersuchen. Es zeigte sich allerdings, dass es bei dieser Geometrie zu starker plastischer Verformung unter der Biegefinne kommt. (siehe Abbildung 5-12)

Aufgrund dieser Verformung wurde davon abgesehen, Spannungsintensitätsfaktoren für die Serie anzugeben.



Vergleicht man die ermittelten Werte für Proben, die vom Rand des Halbzeugs entnommen wurde, mit denen der Proben aus der Mitte, so zeigt sich kein signifikanter Unterschied. (siehe Tabelle 5-3)

Tabelle 5-3: Vergleich Spannungsintensitätsfaktor nach Lage der Probe

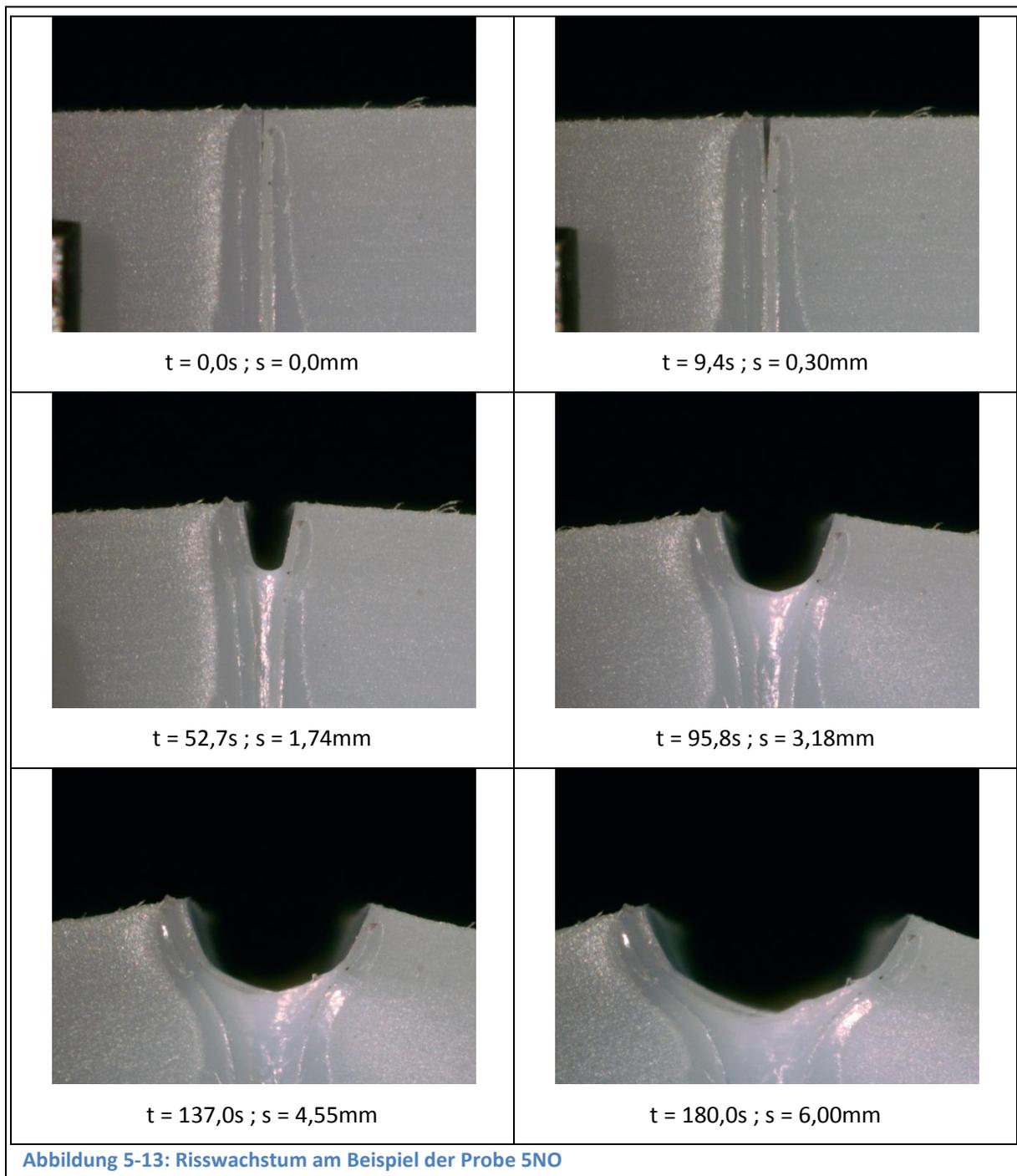
Mittelwert	5*5 mm	10*10 mm
Innen	7,2	14,0
Außen	7,6	13,0
Abweichung [%]	5	7

5.3 J-Integral:

Die Versuche wurden entsprechend Abschnitt 4.4 durchgeführt.

5.3.1 Risswachstum:

Das Risswachstum wird in Abbildung 5-13 exemplarisch an einer quaderförmigen Probe mit 5*5 mm*mm Querschnitt dargestellt.

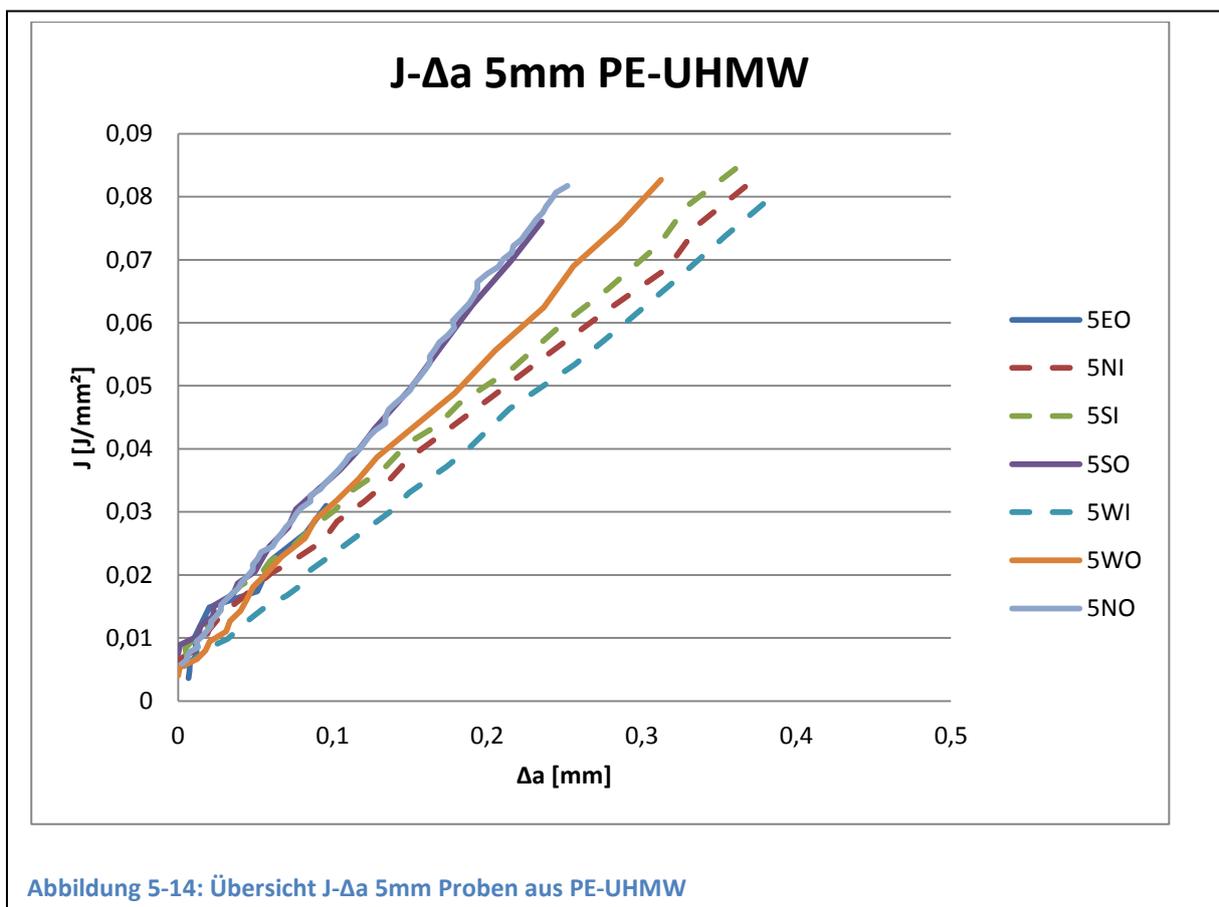


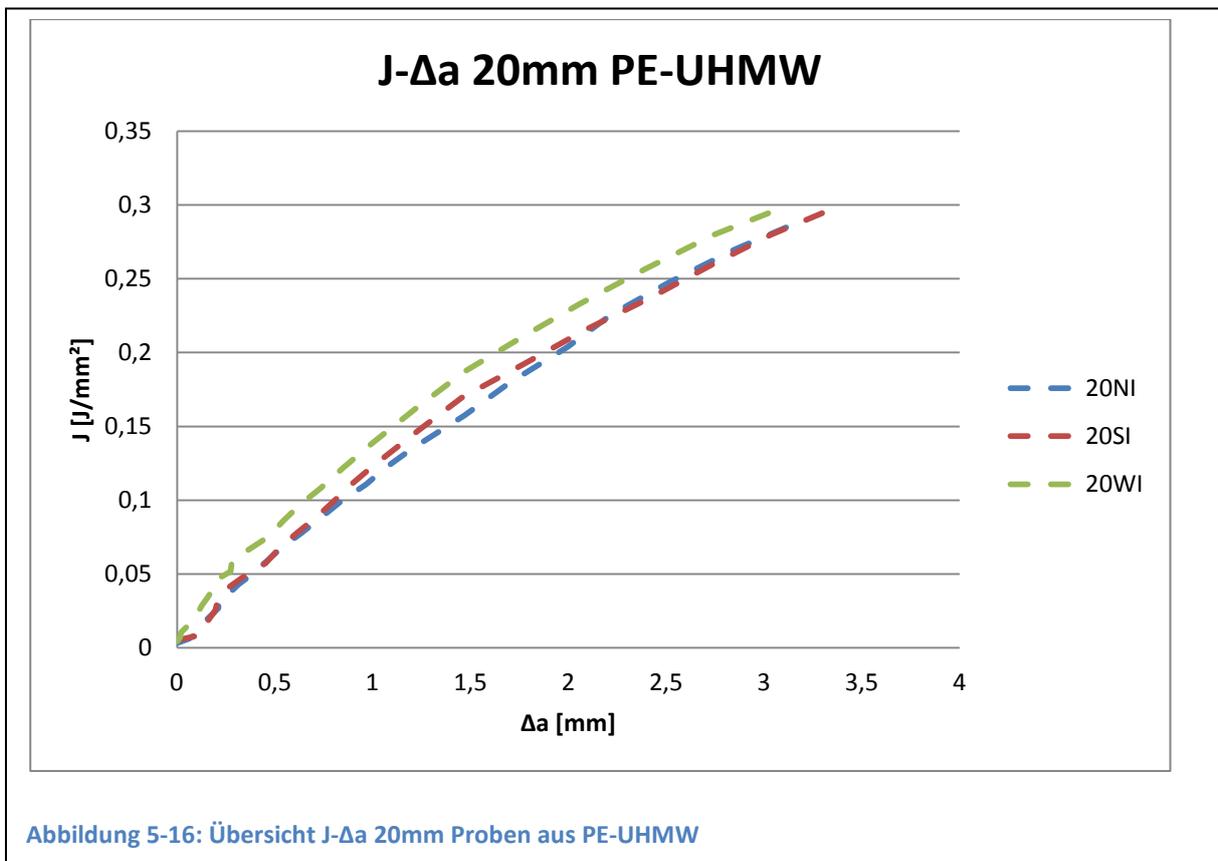
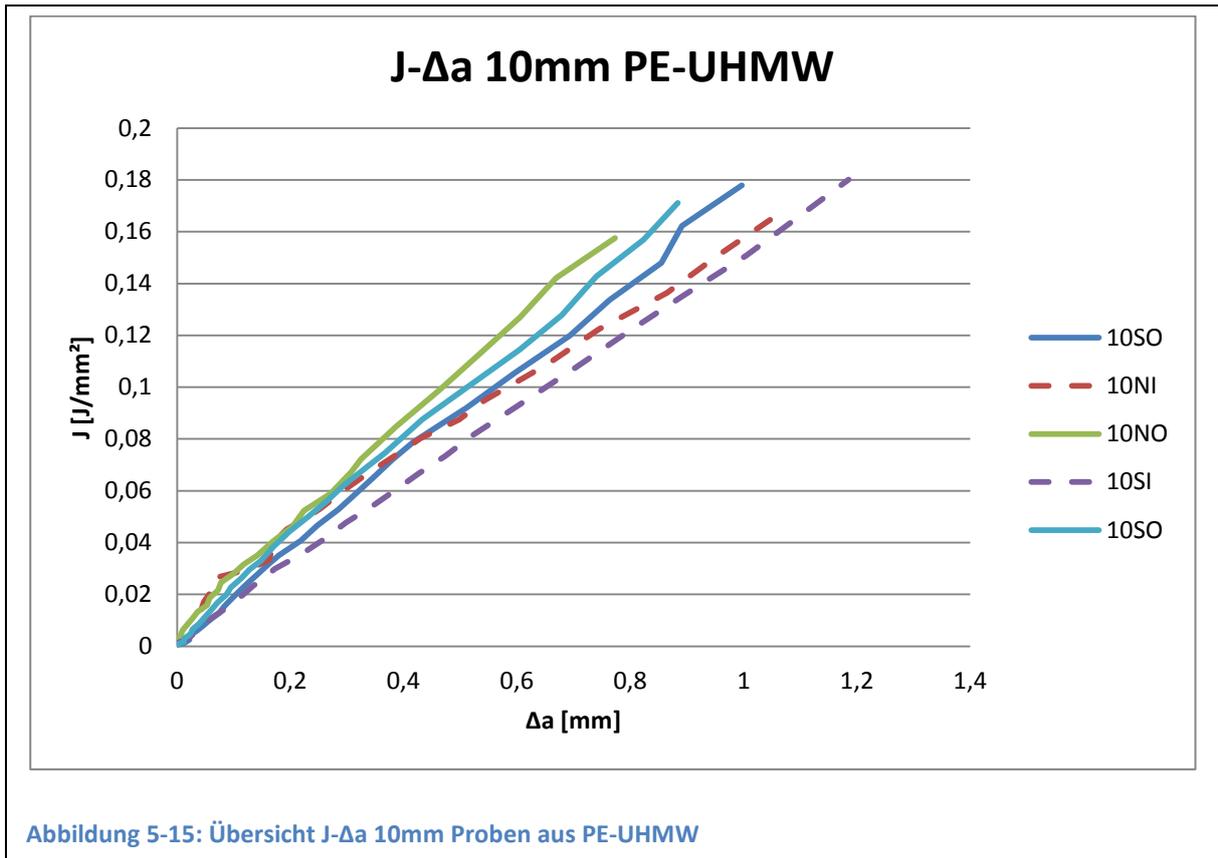
Es zeigte sich bei der Auswertung der Fotos, dass die Probe anfangs ohne Risswachstum gebogen wird. Ab dem Zeitpunkt an dem der Riss bis zum Kerbgrund geöffnet ist setzt ohne Verzögerung das Risswachstum ein. Eine gesonderte Stretch-Zone konnte weder in dieser Arbeit noch in (20) beobachtet werden. Dies lässt offen, ob es keine Stretch-Zone gibt, oder ob sich der gesamte Riss in einer großen Stretch-Zone befindet.

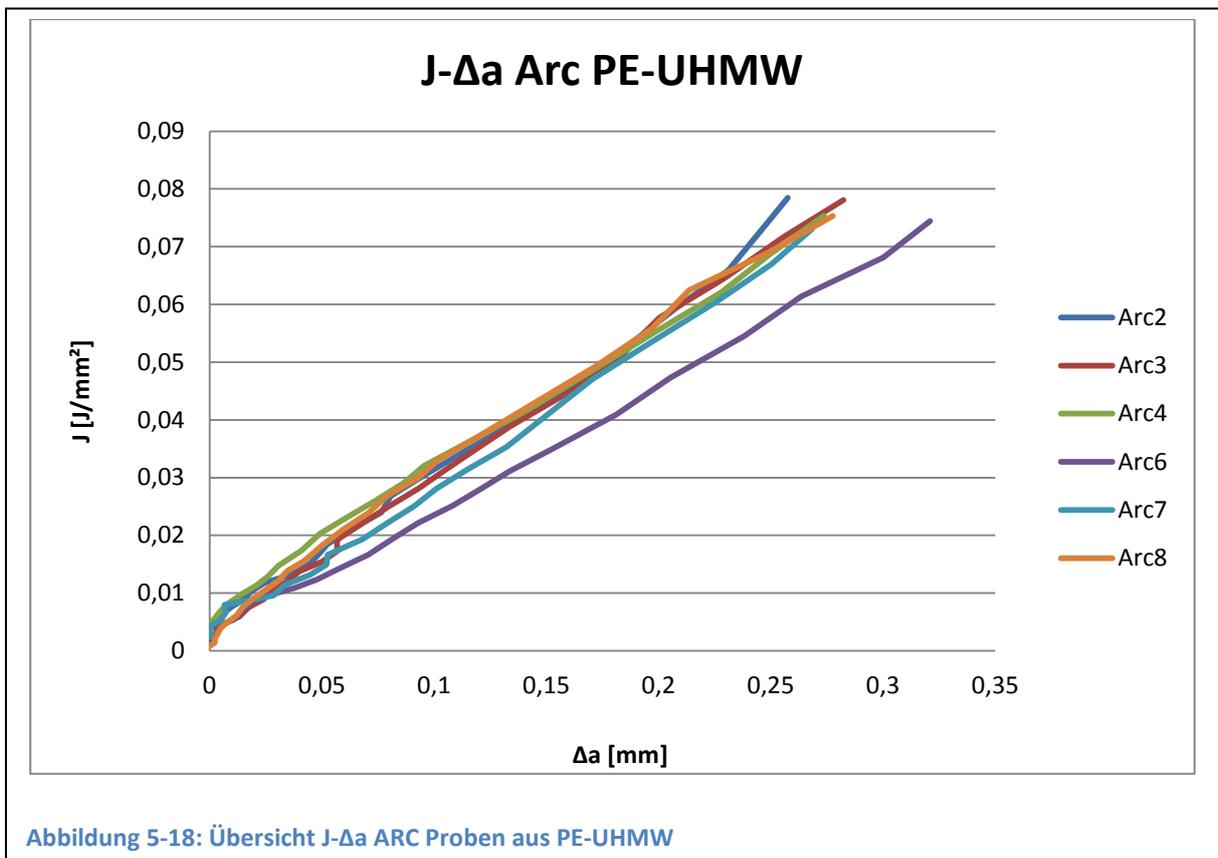
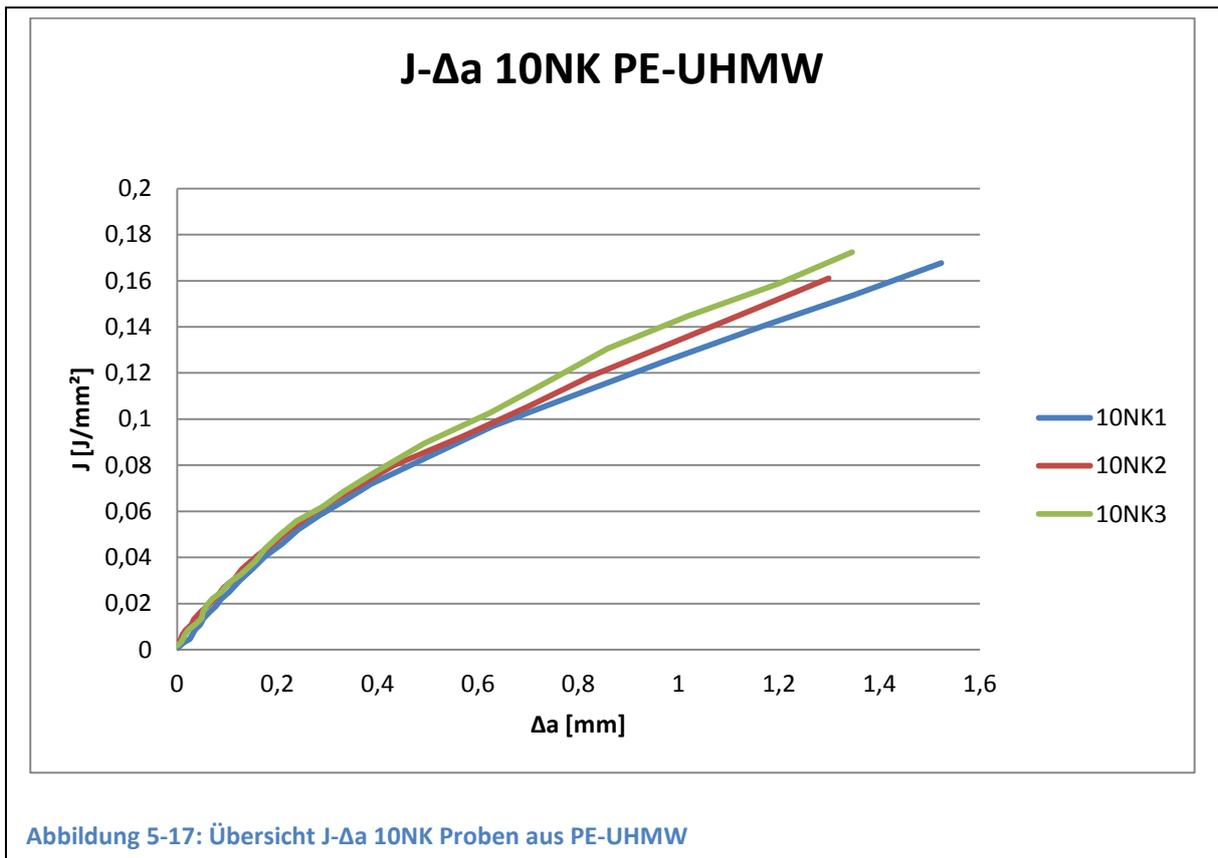
5.3.2 Übersicht der Messwerte:

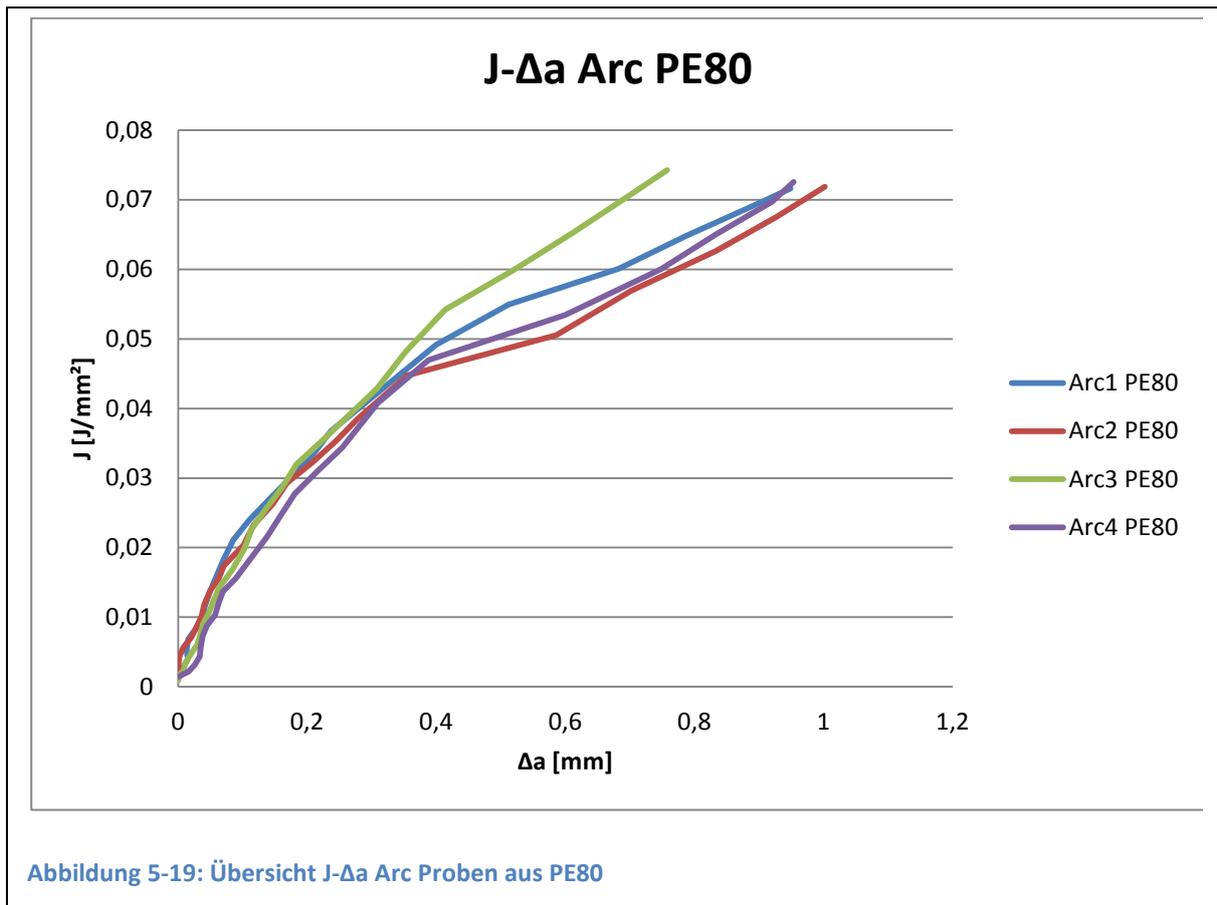
Zur Wahrung der Übersicht wird in Abbildung 5-14 bis Abbildung 5-17 jeweils nur immer eine Probengeometrie/Werkstoff-Kombination dargestellt.

Bei den quaderförmigen Proben mit 5*5 mm*mm und 10*10 mm*mm Querschnitt (Abbildung 5-14 und Abbildung 5-15) sind die Verläufe für Proben aus der Mitte des Rohlings strichliert dargestellt.









5.3.3 Gegenüberstellung unterschiedlicher Serien:

In Abbildung 5-20 werden die Bereiche der quaderförmigen- und ARC-Proben aus PE-UHMW gegenübergestellt.

Wie erwartet zeigt sich dabei ein deutlicher Einfluss der Probengröße. Der Unterschied zwischen den 5*5 mm*mm quaderförmigen Proben und den ARC-Proben fällt allerdings sehr gering aus. (siehe Abbildung 5-21)

Abbildung 5-22 zeigt die ARC-Proben aus PE-UHMW und PE80. Es zeigt sich, dass bei Proben aus PE-UHMW das Risswachstum deutlich energieaufwändiger ist, als bei PE80.

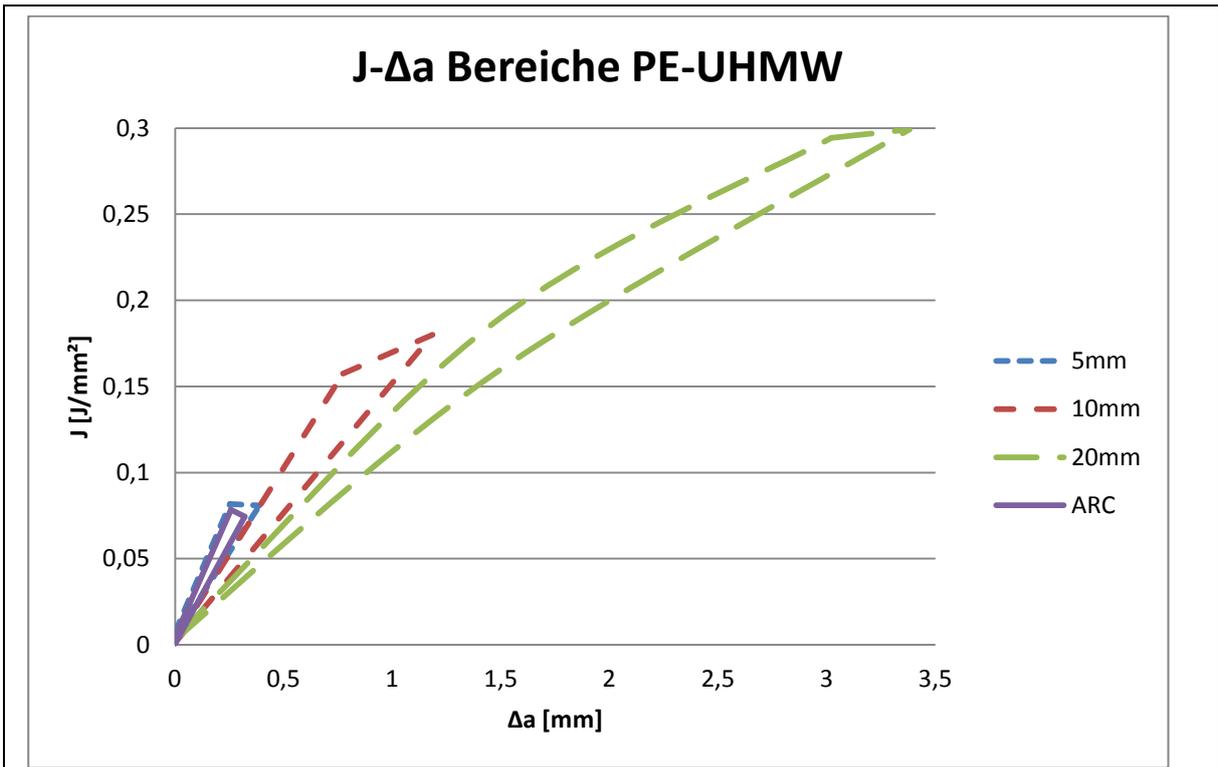


Abbildung 5-20: Übersicht der J-Δa Bereiche für Proben aus PE-UHMW

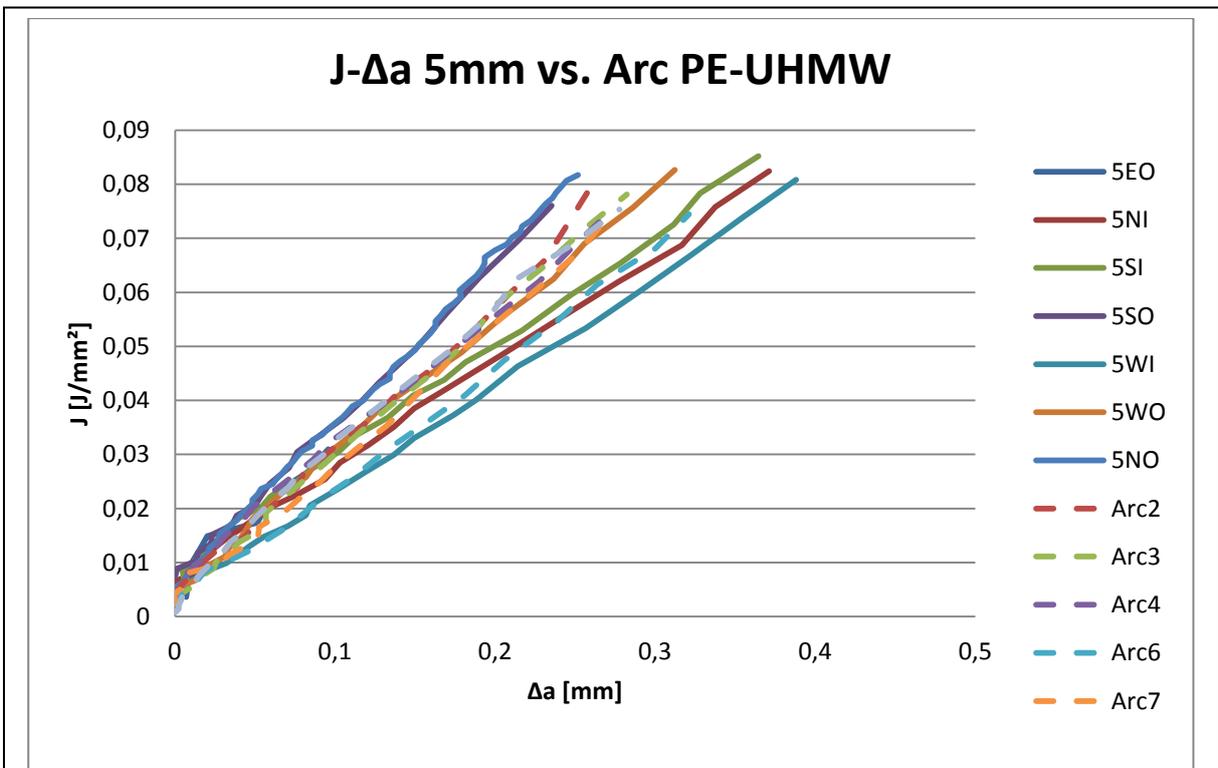
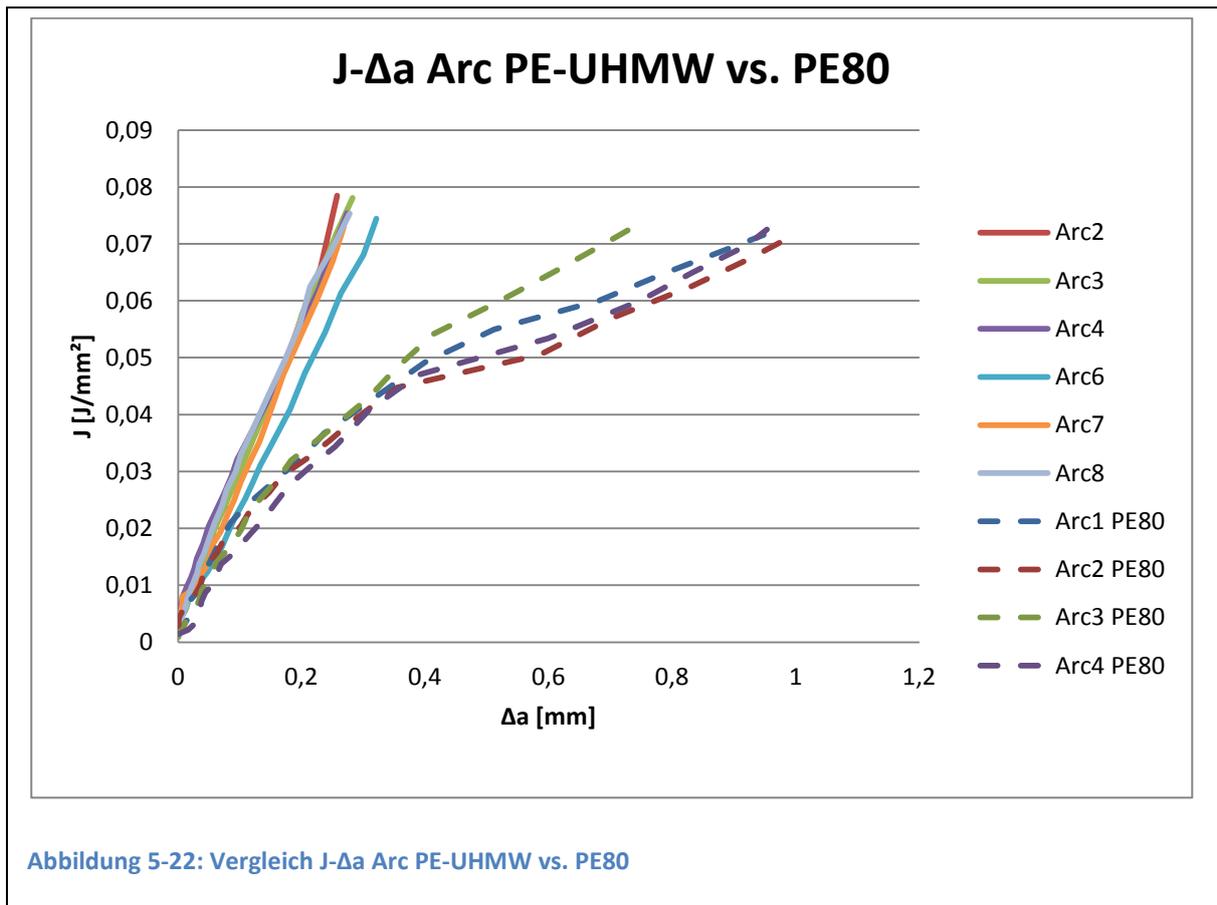


Abbildung 5-21: J-Δa 5mm vs. Arc aus PE-UHMW



5.3.4 Kritische J-Integral-Werte:

Eine Ermittlung der J_{IC} -Wert war entsprechend der Norm (13) nicht möglich, da bei vielen Proben das dafür notwendige Risswachstum nicht erreicht wurde, und sich die J- Δa -Verläufe nicht mit der Konstruktionslinie bei 0,2mm Risswachstum schnitten.

Abbildung 5-23 zeigt dieses am Beispiel einiger ausgewählter J- Δa -Verläufe.

Stattdessen wurden die J-Integral Werte bei einem Risswachstum von 0,2 mm verwendet (als J_Q zusammengefasst in Tabelle 5-4). Die 0,2 mm Risswachstum wurden gewählt, da sie dem kleinsten Risswachstum entsprechen, das in der normgerechten Auswertung überhaupt einfließen kann (angenommene senkrechte Ausschlussgerade).

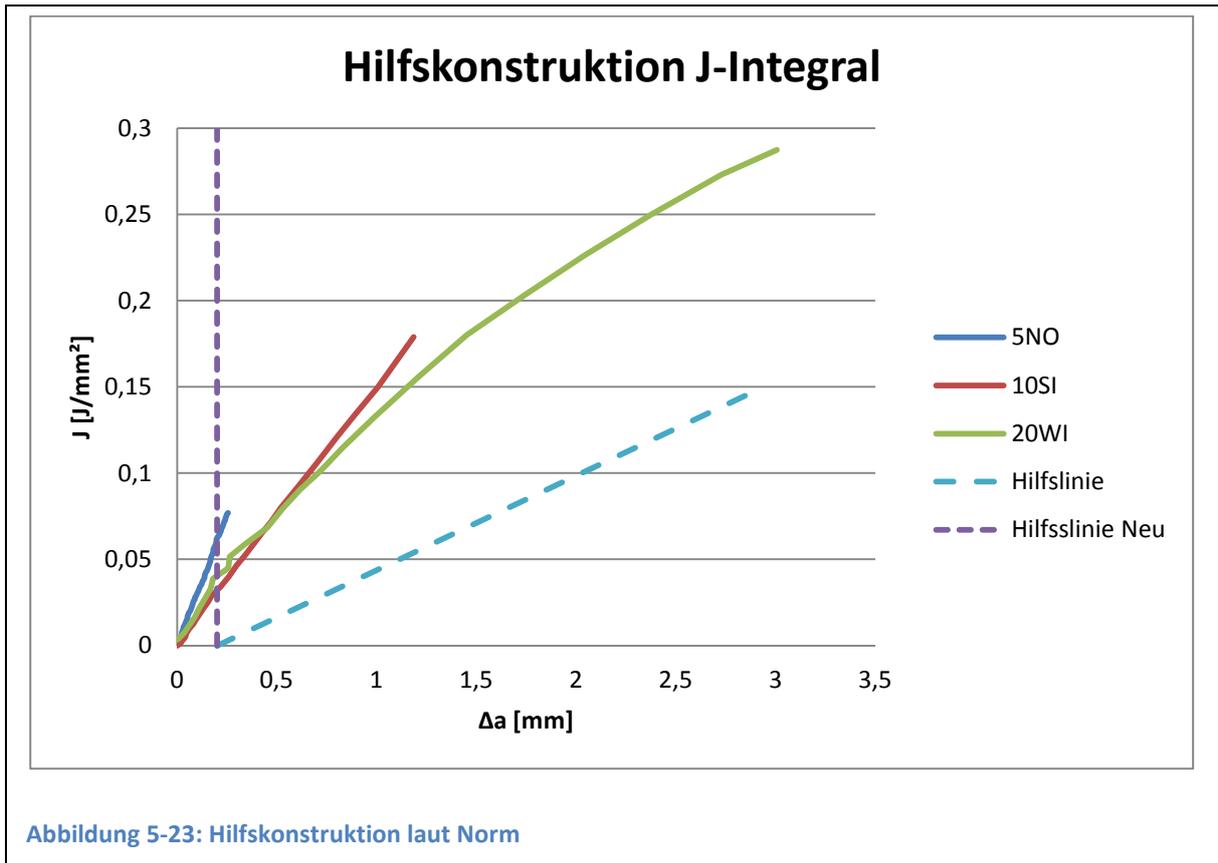


Tabelle 5-4: Übersicht J_Q-Werte

	5mm		10mm		20mm		ARC		PE80 ARC	
	5NI	0,048	10EO	0,038	20NI	0,028	ARC2	0,057	ARC1	0,033
	5NO	0,066	10SI	0,033	20SI	0,028	ARC3	0,056	ARC2	0,032
	5SI	0,050	10SO	0,044	20WI	0,043	ARC4	0,056	ARC3	0,033
	5SO	0,065	10NI	0,044			ARC6	0,046	ARC4	0,030
	5WI	0,043	10NO	0,046			ARC7	0,054		
	5WO	0,054					ARC8	0,057		
Mittelwert		0,054		0,041		0,033		0,054		0,032
Standard- Abweichung		0,010		0,005		0,009		0,004		0,002

Alle Werte in J/mm²

Ebenfalls wird (wie auch in Kapitel 5.2 beschrieben) aufgrund der starken plastischen Verformung unter der Biegefinne, auf eine Angabe von Vergleichswerten für die 10NK-Serie verzichtet.

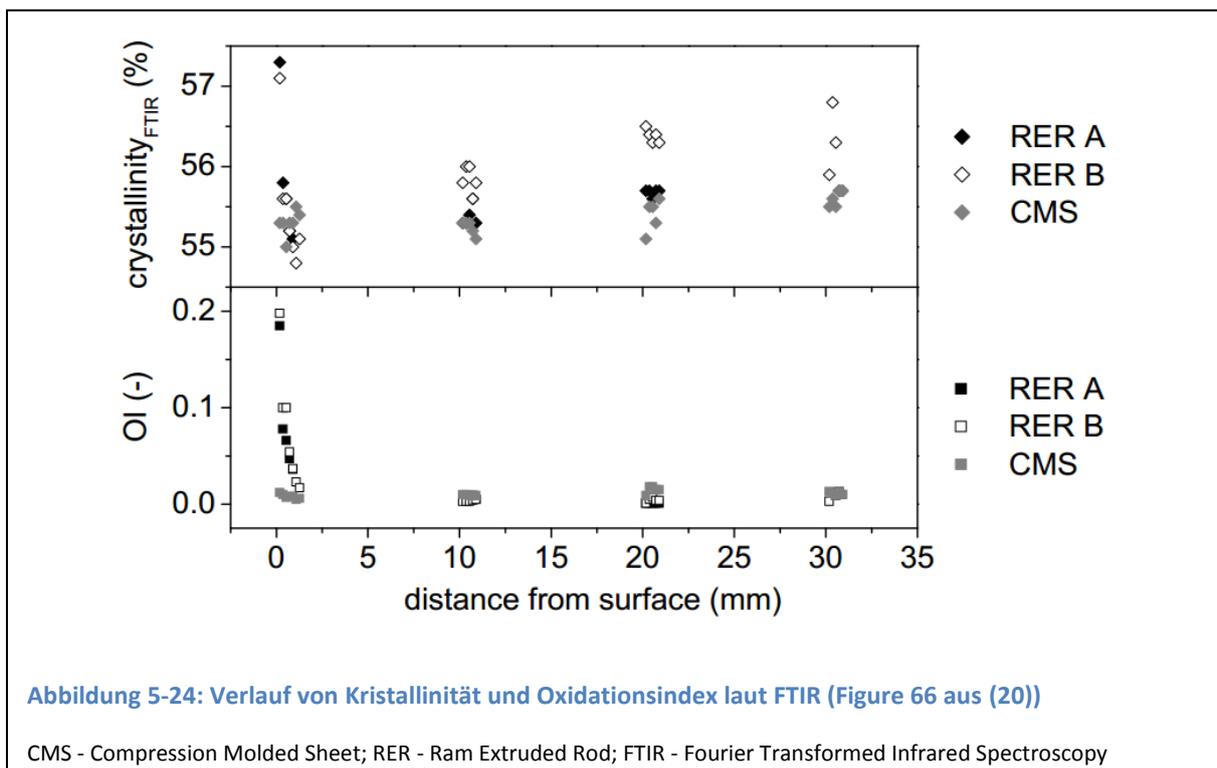
Vergleicht man, wie in Kapitel 5.2, die ermittelten Werte für Proben vom Rand des Halbzeugs, mit jenen aus der Mitte, so zeigt sich bei den Proben mit 5*5mm Querschnitt, ein signifikanter Unterschied. (siehe Tabelle 5-5)

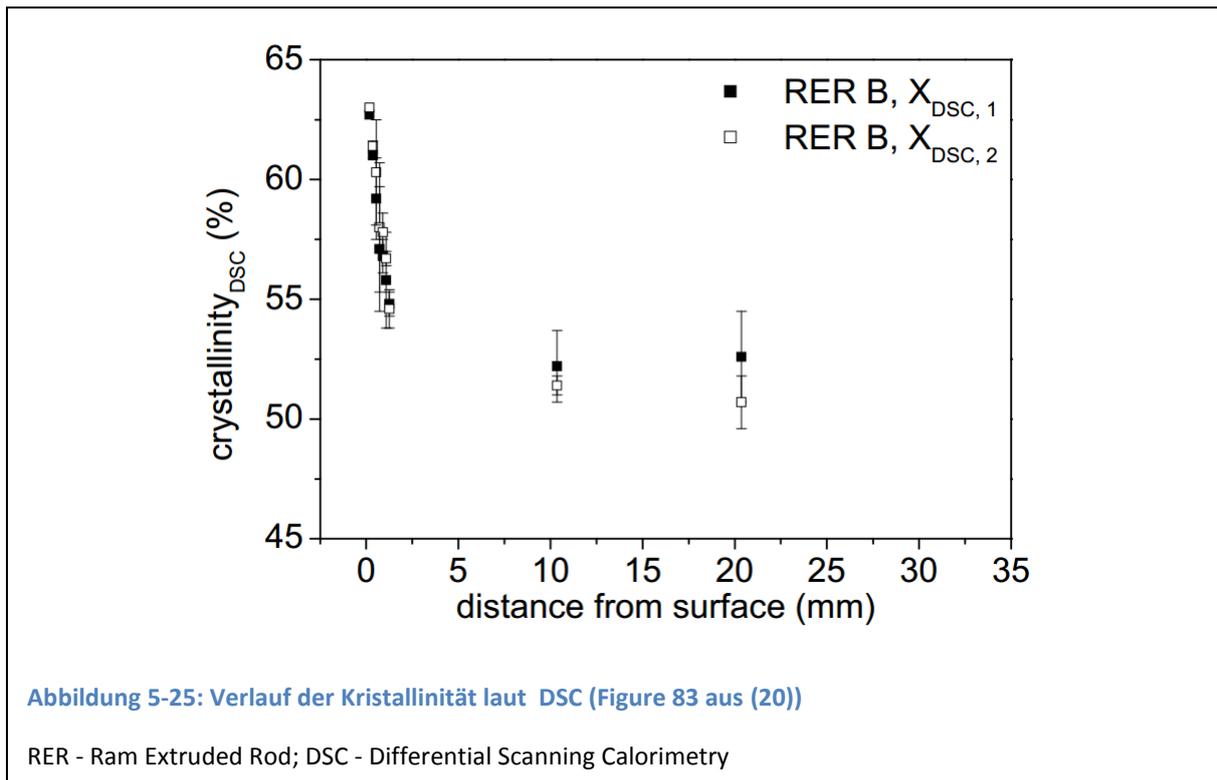
Tabelle 5-5: Vergleich J-Integral nach Lage der Probe

Mittelwert	5*5 mm	10*10 mm
Innen [J/mm ²]	0,047	0,038
Außen [J/mm ²]	0,062	0,043
Abweichung [%]	24	10

Wie sich allerdings im Vergleich mit den 10*10mm Proben zeigt, nimmt dieser Unterschied mit zunehmender Probengröße stark ab. Da mit zunehmender Probengröße auch die Spitze des ursprünglichen Risses weiter ins Innere des Halbzeugs rückt (von ca. 0,5mm bei den Proben mit 5*5 mm*mm Querschnitt, auf über 1,5mm bei jenen mit 10*10 mm*mm Querschnitt) legt dies nahe, dass nur der Bereich nahe der Oberfläche des Halbzeugs betroffen ist.

In (20) wurde allerdings, für die auch in dieser Arbeit verwendete Ram-Extruded-Rod, eine deutliche Abhängigkeit der Kristallinität und des Oxidationsindex vom Randabstand festgestellt. (siehe Abbildung 5-24 und Abbildung 5-25)





Als dominante Ursache wurde Oxidation aufgrund thermischer Schädigung der Polyethylenketten identifiziert.

Durch diese Schädigung kommt es zu einer Abnahme der molaren Masse, welche wiederum die Kristallisierung begünstigt, und so zu einem höheren Kristallinitätsgrad führt.

Der in (20) gemessene Unterschied zwischen Rand und Kern beträgt ca. 2%. Vergleicht man den Kristallinitätsgrad zwischen GUR 1020 und GUR 1050 zeigt sich ebenfalls ein Unterschied von 2% laut (21). Diese beiden PE-UHMW-Varianten unterscheiden sich vorrangig in Molmasse und damit einhergehend Kristallinitätsgrad. Ein in der Literatur gut dokumentierter Effekt ist, dass GUR 1050 trotz seiner höheren Molmasse, geringere J_{IC} -Werte aufweist als GUR 1020 (siehe (1), (20), (22)). In (20) wurde ein Unterschied in den J_{IC} -Werten zwischen GUR 1020 und GUR 1050 von bis zu 30% gemessen.

Dies legt nahe, dass das in dieser Arbeit untersuchte Halbzeug an der Oberfläche (aufgrund der durch Oxidation verringerten Molmasse) sich den Eigenschaften von GUR 1020 annähert.

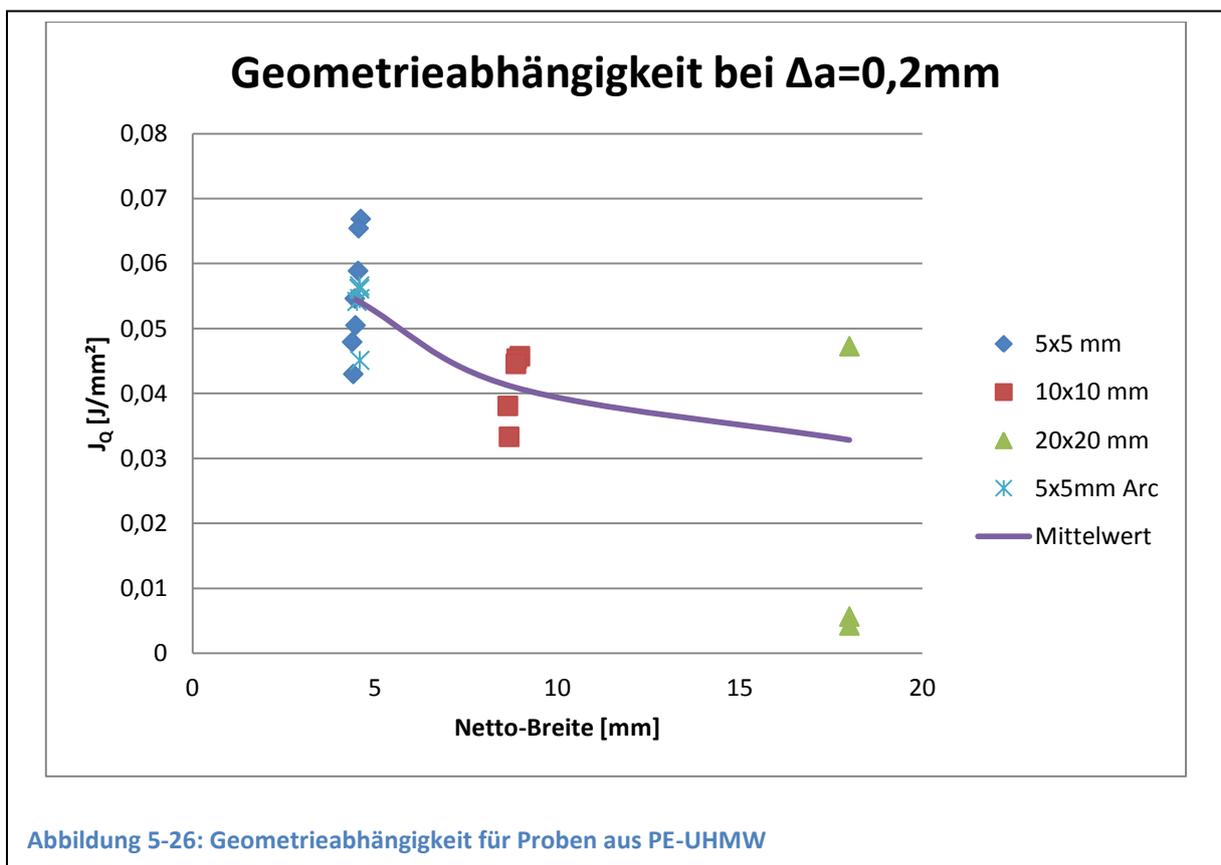
Für eine genauere Analyse dieses Effekts sind allerdings weitere Versuche notwendig. Ebenso ist zu klären, welche negativen Effekte dies auf andere Materialeigenschaften hat.

5.3.5 Geometrieabhängigkeit:

Abbildung 5-26 zeigt die Geometrieabhängigkeit der ermittelten J_Q -Werte.

Der mit zunehmender Probenbreite fallende J_Q Wert (siehe Mittelwert in Abbildung 5-26) steht im Einklang mit dem qualitativen Verlauf laut Abbildung 3-3 und zeigt ebenfalls das Nicht-Erreichen des ebenen Dehnungszustandes an. Vergleicht man den Mittelwertverlauf in Abbildung 5-10 und Abbildung 5-26 mit dem generellen Verlauf aus Abbildung 3-3 so zeigt sich allerdings, dass die beiden Verläufe auf unterschiedlichen Seiten des "Höckers" liegen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass zwar beide den qualitativ selben Verlauf haben, diesen allerdings nicht synchron durchlaufen.

Gleichzeitig zeigt sich aber eine gute Übereinstimmung zwischen den quaderförmigen Proben mit 5*5 mm*mm Querschnitt, und den Arc-Prüfkörpern.



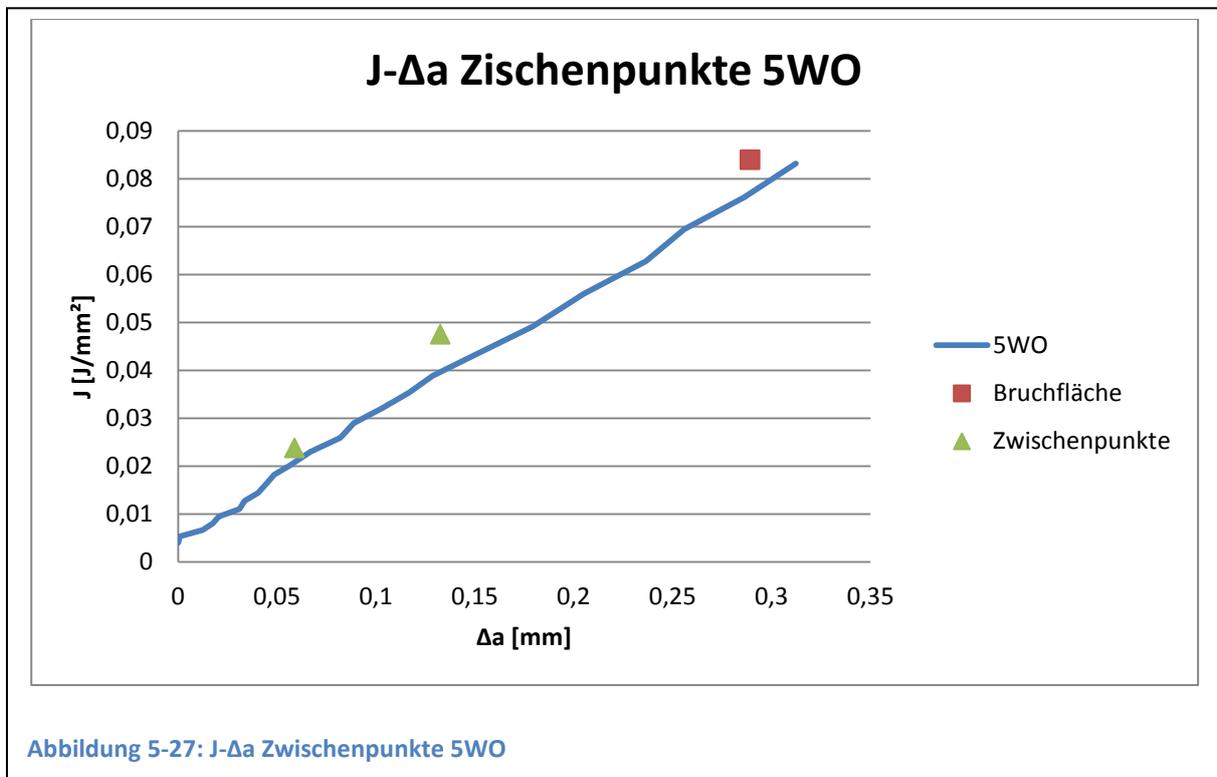
Auch der Vergleich mit den in (19) angegebenen J_{1C} -Werten von 0,067-0,099 J/mm² zeigt, dass keine Geometrieabhängigkeit vorliegt.

5.3.6 Vergleich Einproben- mit Mehrproben-Technik:

Bei den quaderförmigen 5mm Prüfkörpern ergab es sich während der Fertigung der Rohlinge, dass genug Material für zusätzliche Prüfkörper zur Verfügung stand. Diese wurden genutzt, um zusätzlich zum eigentlichen Versuch in Einprobentechnik, Zwischenpunkte nach der Mehrprobentechnik zu ermitteln.

In Abbildung 5-27 werden am Beispiel der Probe 5WO die Zwischenpunkte, sowie der entsprechend der Mehrprobentechnik ermittelte Endpunkt, den Messwerten der Einprobentechnik gegenübergestellt.

Es zeigt sich, dass die Einprobentechnik gut mit der Mehrprobentechnik übereinstimmt.



5.3.7 Rissfläche:

Bei den Bruchflächen zeigten sich bei den PE-UHMW-Proben die, von Kurtz in (1) beschriebenen (siehe Abbildung 5-28), "Diamant-Linien" an den Rissflächen. (siehe Abbildung 5-29 links)

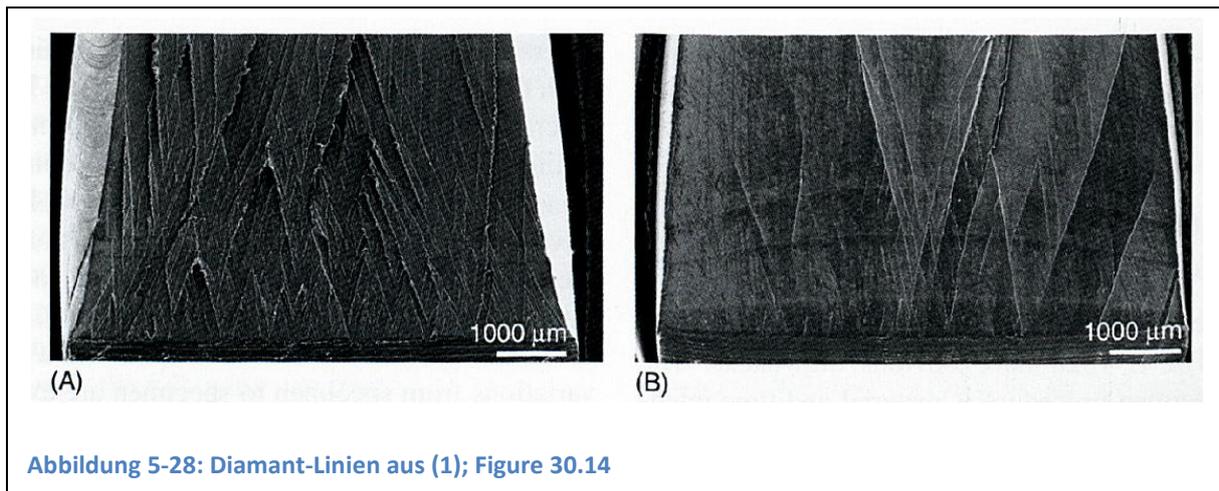


Abbildung 5-28: Diamant-Linien aus (1); Figure 30.14

Kurtz gibt als Ursache für die Diamant-Linien an:

"The "diamond" tearing lines appear as a consequence of fatigue pre-cracking and post-experiment rupture."

Diese Erklärung erscheint für die hier untersuchten Proben allerdings nicht zutreffend zu sein, da diese ebenfalls dieses Muster zeigen, obwohl der ursprüngliche Riss nicht als Ermüdungsriss eingebracht wurde. Zusätzlich sollte beim Brechen nach dem Versuch keine Veränderung an den Rissflächen hervorgerufen werden.

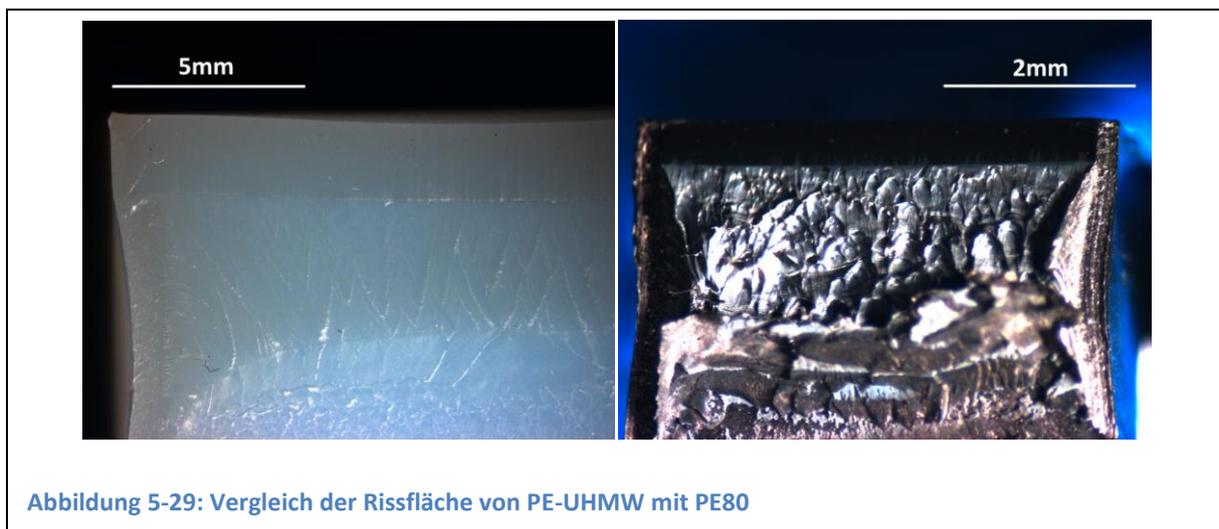


Abbildung 5-29: Vergleich der Rissfläche von PE-UHMW mit PE80

Bei den PE80-Proben zeigt sich eine Rissfläche die geschmolzen wirkt (siehe Abbildung 5-29 rechts). Diese Muster kommt zustande, da PE80, im Gegensatz zu PE-UHMW, in der plastisch verformten Zone vor der Risspitze, eine Hohlrumbildung erfährt (20).

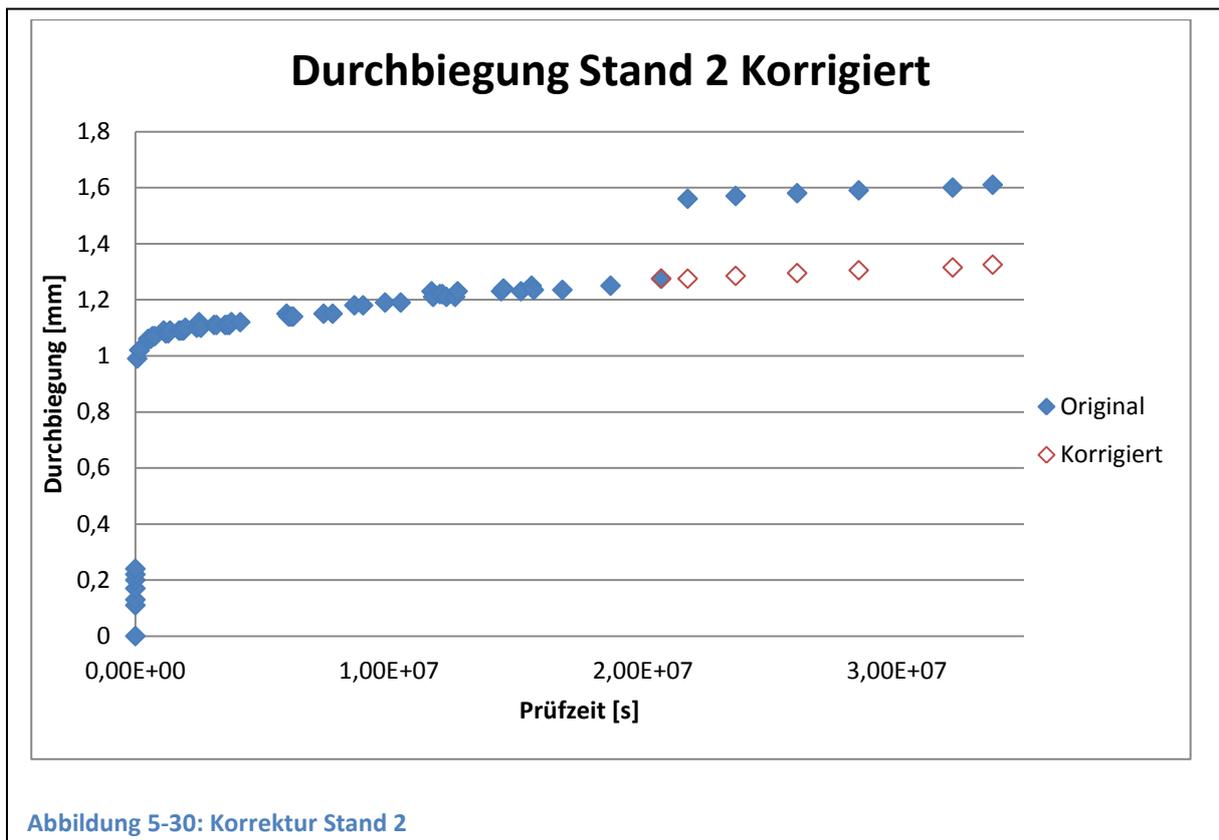
5.4 Langzeitversuch:

In diesem Versuch wurden 2 verschiedenen Szenarien untersucht. In Stand 1 und 2 wurden Proben mit 0,5 mm Kerbtiefe und 41 N Last untersucht (Normales Szenario), in Stand 3 und 4 waren es 1,0 mm Kerbtiefe und 107 N Last (Worst-Case-Szenario).

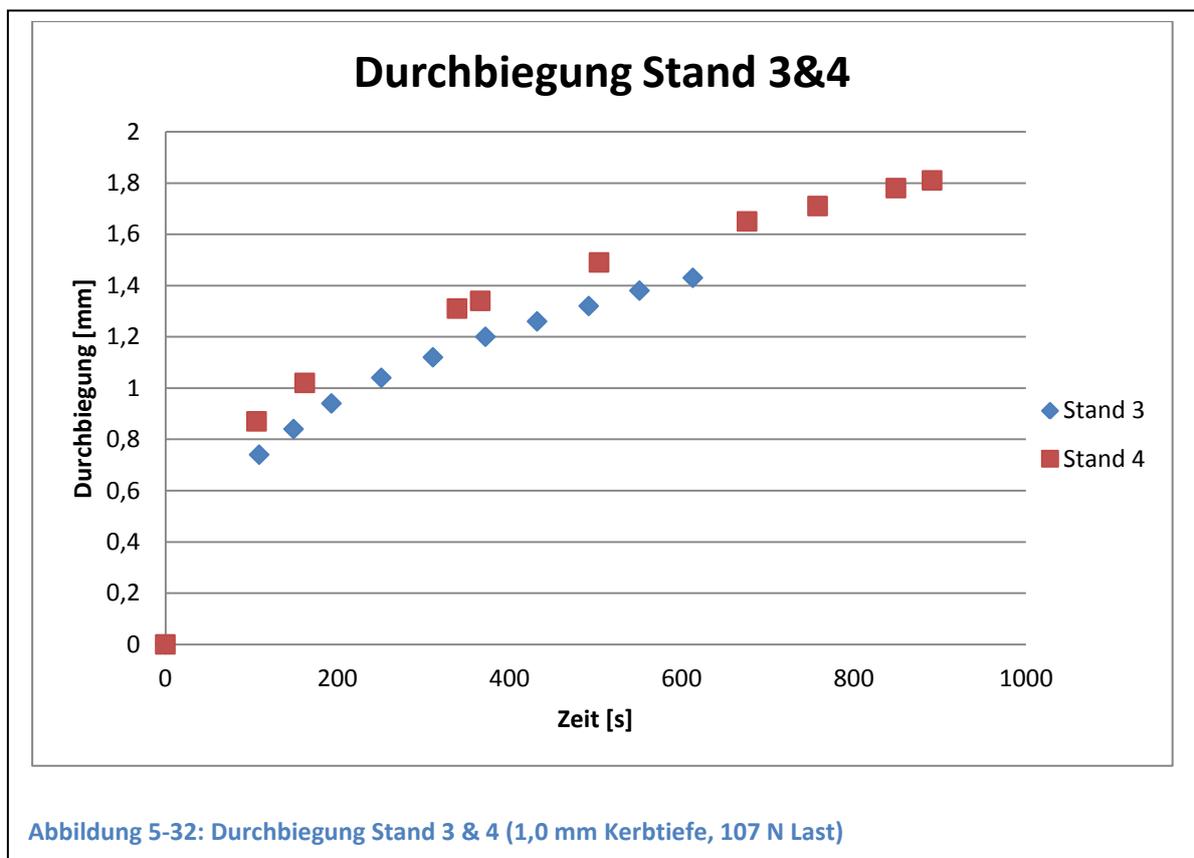
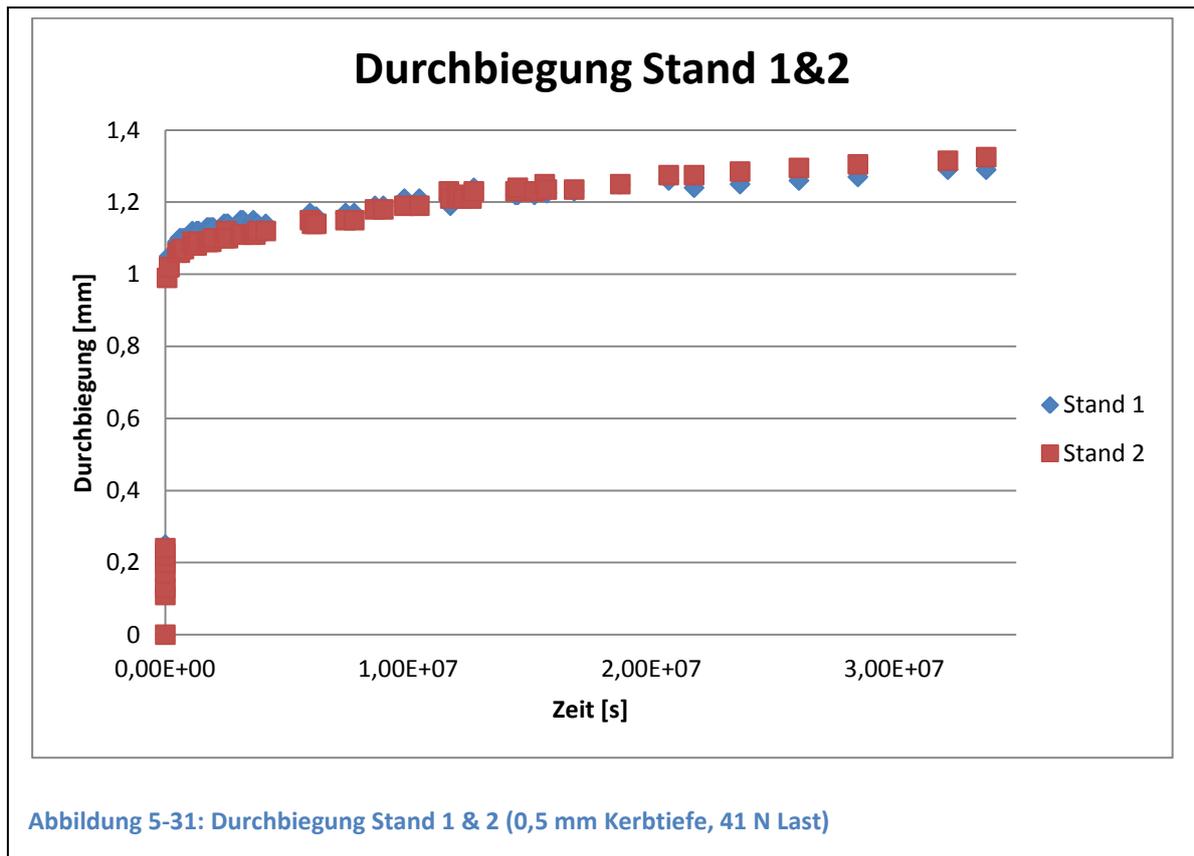
5.4.1 Auswertung:

Bei der Auswertung der Messwerte zeigt sich an Stand 2 ein Sprung in der gemessenen Durchbiegung (Abbildung 5-30). Da sich dieser Sprung nicht in den Messwerten für das Risswachstum wiederfand, muss es sich um einen Fehler bei der Wegmessung an den Seilen des Prüfstandes handeln.

Für die weitere Auswertung wurden , aufgrund der langsamen Wegänderung, die Messpunkte nach dem Sprung um die Wegdifferenz zwischen dem letzten Messpunkt davor, und erstem Messpunkt danach reduziert.



In Abbildung 5-31 und Abbildung 5-32 sind die für die weitere Auswertung verwendeten Zeit-Durchbiegungs-Verläufe dargestellt.



Bei der Probe in den Prüfständen 3 und 4 (Worst-Case-Szenario) kam es bereits nach ca. 20 Minuten zum Aufsitzen des Probenhalters.

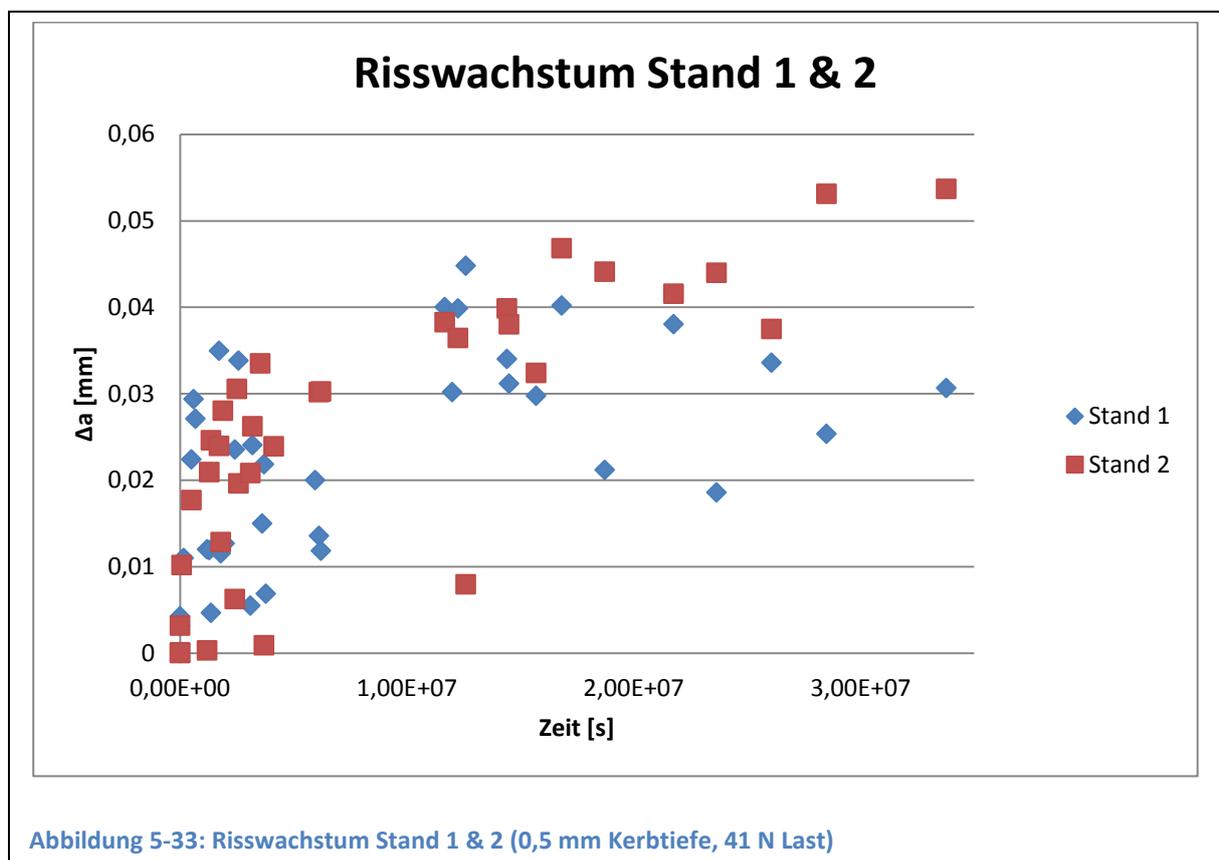
An diesem Punkt waren die Proben um 1,4mm beziehungsweise 1,8mm durchgebogen (siehe Abbildung 5-32), und wiesen ein Risswachstum von 0,14 mm und 0,1 mm auf (siehe Abbildung 5-34).

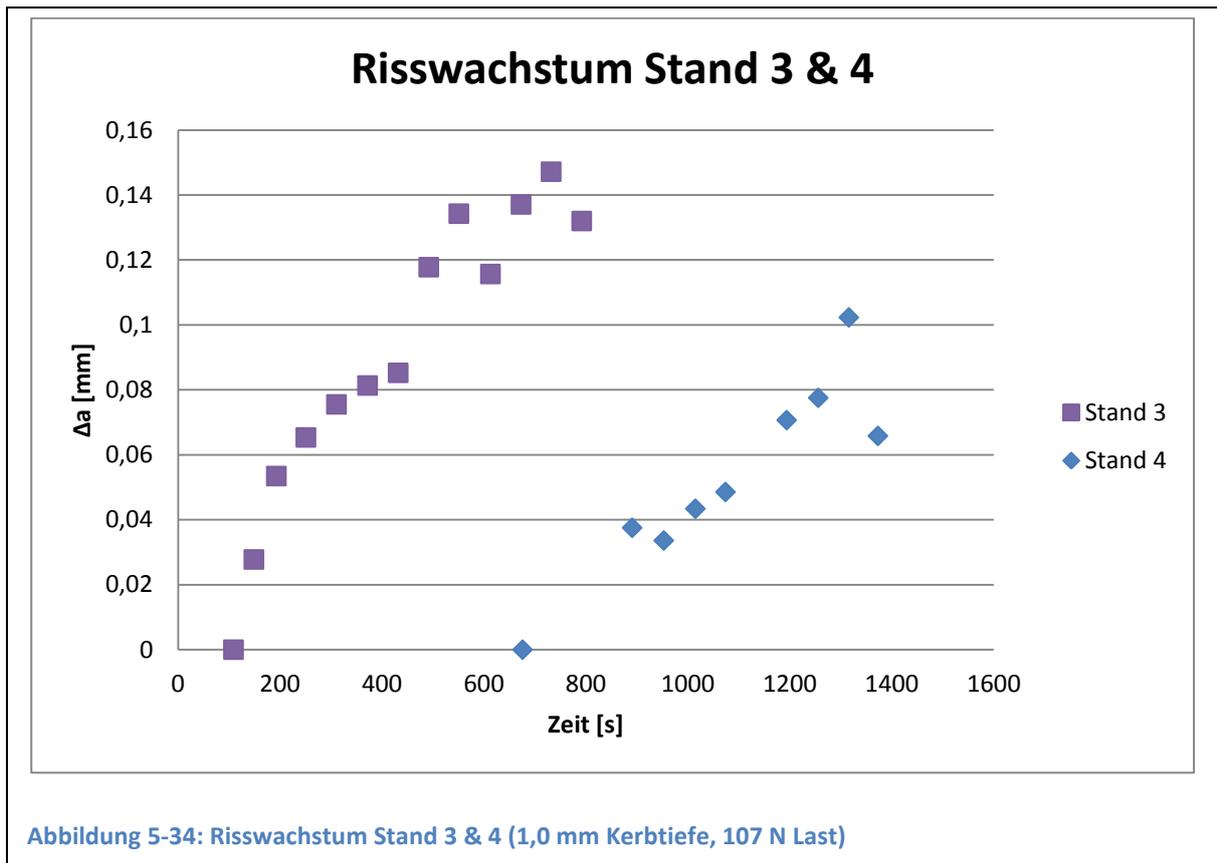
Vergleicht man dies mit den, für das J-Integral verwendeten, ARC-Proben, so stellt man fest, dass diese, bei gleicher Durchbiegung, ein deutlich geringeres Risswachstum aufweisen (z.B. 0,03 mm für die Probe ARC8 bei 1,4 mm Durchbiegung).

Der tiefere Kerb (1,0 mm statt 0,5 mm) bewirkt kein stärkeres Risswachstum, sondern verringert dieses sogar.

Gründe hierfür sind:

- zu starke Schwächung des verbleibenden Querschnittes durch den Tieferen Kerb
- plastische Verformung durch Kriechen der Probe



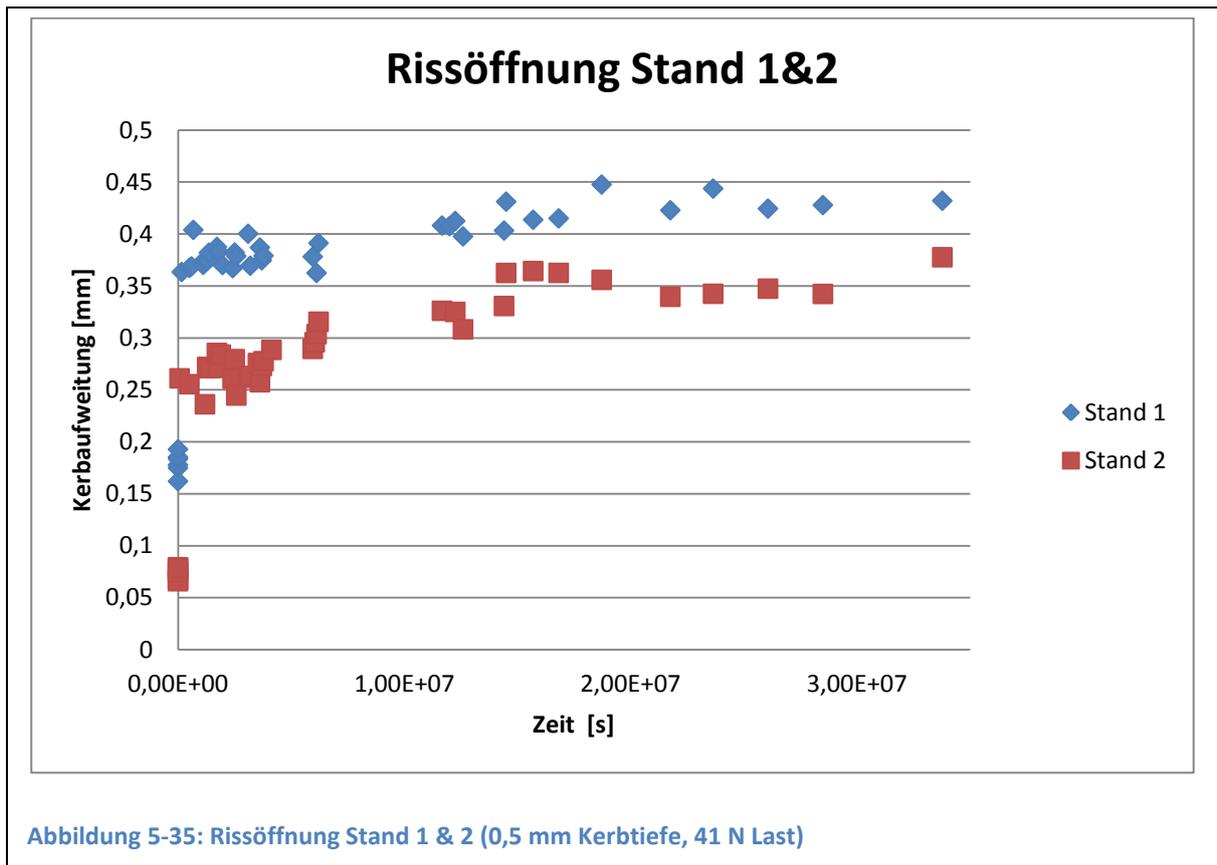


Bei den Proben in Prüfstand 1 & 2 (Normallast) kam erschwerend hinzu, dass diese zum Fotografieren des Risses aus dem Immersionsmedium entnommen werden mussten. Die dabei an der Probe und im Kerb verbliebenen Wassertropfen erschwerten das Messen der Risstiefe erheblich. Zusätzlich musste das Mikroskop zwischen 2 Messungen jeweils neu ausgerichtet und fokussiert werden. Diese beiden Umstände sind verantwortlich für die starke Streuung der Messwerte für die Risstiefe bei Stand 1 & 2. (siehe Abbildung 5-33)

Betrachtet man die Rissöffnung (deren Messung ist unempfindlicher gegen die eben beschriebenen Einflüsse) bei Stand 1&2, so zeigt sich, dass nach ca. $1,5 \cdot 10^7$ Sekunden (entspricht ca. 170 Tagen) ein Plateau erreicht wird. (siehe Abbildung 5-35)

Dieses Plateau lässt sich, aufgrund der starken Streuung, an der Risstiefe nicht klar erkennen. (siehe Abbildung 5-33) Ein weiteres Risswachstum lässt sich allerdings insoweit ausschließen, da ein Risswachstum mit einer Verkleinerung des verbleibenden Ligaments einhergehen würde. Dieses würde wiederum eine stärkere Durchbiegung der Probe, und damit eine Zunahme der Rissöffnung hervorrufen.

Die trotzdem steigende Absenkung der Biegefinne (siehe Abbildung 5-31) zeigt, dass trotzdem Energie von der Probe aufgenommen wird. Da diese Energie nicht zur Oberflächenbildung am Riss verbraucht wird muss sie in Form von Verformungen der Probe gespeichert werden (z.B. verbiegen der Probe sowie einsinken der Auflager in die Probe).



Zusammengefasst lässt sich für die beiden untersuchten Fälle folgendes sagen:

Das Worst-Case-Szenario (1,0 mm Kerbtiefe, 107 N Last) wird auch Kurzzeitig nicht unbeschadet überstanden. Dieses muss deswegen unbedingt vermieden werden, um ein Versagen des Implantates zu verhindern.

Für das Szenario mit Normallast (0,5 mm Kerbtiefe, 41 N Last) erwies sich der Riss auch auf lange Zeit gesehen als ungefährlich.

5.4.2 Verbesserung:

Die Probleme bei der Durchführung und Auswertung des Langzeitversuches sind ursächlich auf den verwendeten Prüfstand zurückzuführen. Dieser war nicht für die verwendete Probengröße und Dokumentationsart geeignet. Zusätzlich stand er in einem Raum, in dem weitere Experimente, wie auch Laborübungen der Studenten durchgeführt wurden.

Für zukünftige Versuchsserien wird deswegen empfohlen, einen Prüfstand speziell hierfür zu bauen.

Dieser sollte folgende Eigenschaften aufweisen:

- Kompakte und selbst zentrierende Probenhalter (siehe Abbildung 5-36)

- Elektronische Wegaufnehmer mit automatischer Messwerterfassung
- Kompakte Bauweise mit Abdeckung
- Becken für Immersionsmedium mit klarem Sichtfenster
- Führungsschiene für das Mikroskop
- Druckminderer und Durchflussbegrenzer vor dem Ionentauscher
- Magnetventil vor dem Druckminderer

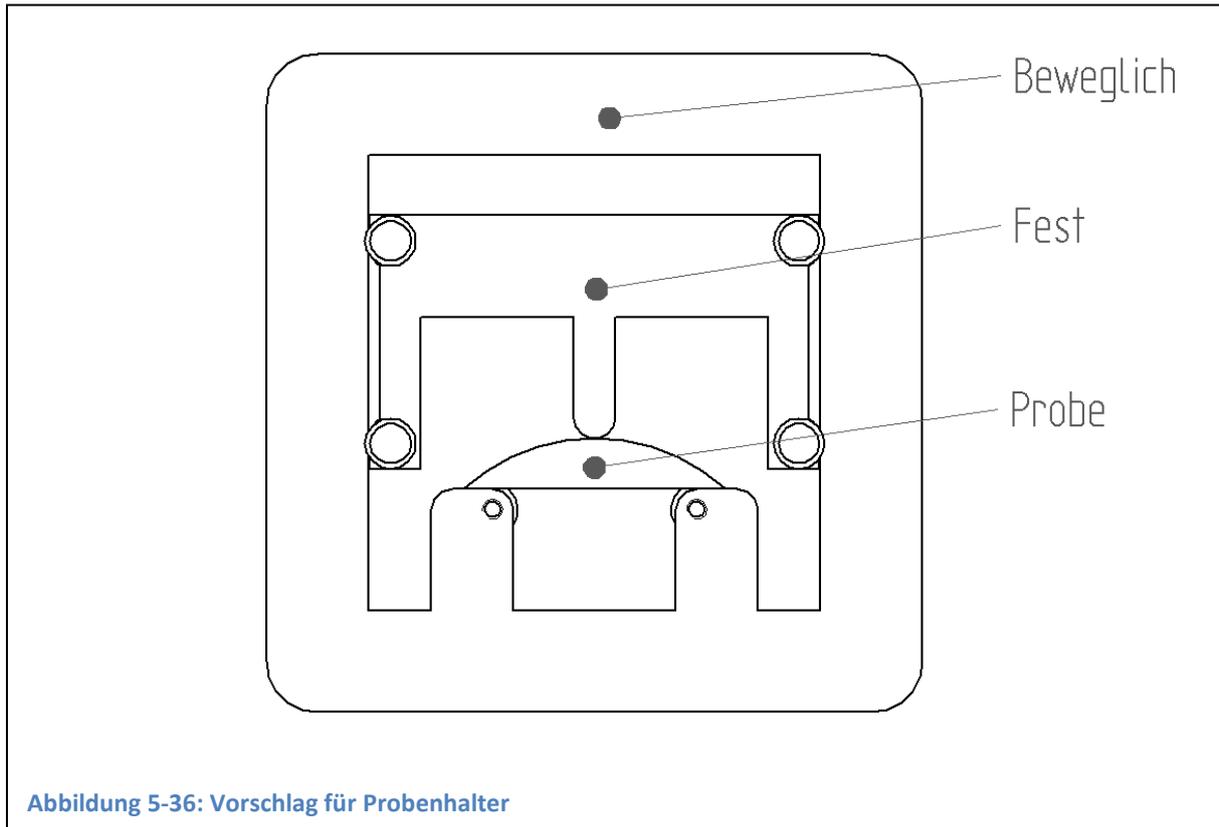


Abbildung 5-36: Vorschlag für Probenhalter

5.5 Fehlstelle:

Nach dem die Proben kryogen gebrochen wurden, zeigte sich auf der Bruchfläche der Probe 10NK1 eine kreisrunde Fehlstelle mit ca. 0,5mm Durchmesser. (siehe Abbildung 5-37)



Abbildung 5-37: Fehlstelle in 10NK1

Dieser Fund verdeutlicht, dass Fehlstellen in der Größenordnung der in dieser Arbeit verwendeten Kerbtiefe durchaus auftreten, und bei der Auslegung von Implantaten berücksichtigt werden müssen.

6 Schlusswort:

Ziel dieser Arbeit war es, Vergleichswerte für die bruchmechanische Analyse von PE-UHMW, im speziellen bei den bei Implantaten vorherrschenden Abmessungen zu ermitteln.

Im Zuge der Untersuchung der während dieser Arbeit erzeugten Bruchflächen, wurde eine Fehlstelle von ca. 0,5mm Durchmesser gefunden. (siehe Abbildung 5-37)

Dieser zufällige Fund zeigt bereits, wie wichtig die Berücksichtigung bruchmechanischer Versagensformen bei der Entwicklung, und die gewissenhafte Überprüfung, von Implantaten ist.

6.1 Biegeversuch:

Bei den vorgenommenen Biegeversuchen wurden die, in Tabelle 5-1 zusammengefassten, Werte für E-Modul, Fließspannung, und Maximalspannung ermittelt. Ein Vergleich mit in der Literatur angegebenen Werten ((1), (17), (20)) erwies sich als schwierig, da die ermittelten Werte zwar in den üblichen Wertebereichen liegen, PE-UHMW allerdings eine enorme Bandbreite ebendieser aufweist.

6.2 Spannungsintensitätsfaktor K_I :

Bei der Ermittlung der Spannungsintensitätsfaktoren zeigte sich, dass die Kriterien für die Geometrieabhängigkeit nicht erfüllt werden konnten. Dies zeigt sich sowohl bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Probengeometrien (siehe Tabelle 5-2 und Abbildung 5-10), sowie beim direkten Vergleich mit geometrieunabhängigen K_{IC} -Werten aus der Literatur ((1) und (19)).

6.3 J-Integral:

Auch bei den J-Integral-Werten zeigte sich, wie bereits bei den Spannungsintensitätsfaktoren, eine starke Geometrieabhängigkeit. (siehe Tabelle 5-4 und Abbildung 5-20). Vergleichswerte für geometrieunabhängige J_C -Werte finden sich in (1) und (19).

Erschwerend erwies sich auch die Tatsache, dass in der Forschungsgemeinde Uneinigkeit über die zu verwendeten Kennwerte, bei der Festlegung der Hilfsgerade (siehe Abbildung 4-22) herrscht.

So sind sowohl die Fließspannung, die Maximalspannung, wie auch der Mittelwert aus beiden gebräuchlich. (1)

In dieser Arbeit, wie auch in (20), musst die übliche Konstruktionsmethode für die Hilfsgerade allerdings komplett verworfen werden (siehe Abbildung 5-23).

Da die Wahl der Hilfsgeraden einen signifikanten Einfluss auf die ermittelten J_Q -Werte hat, und bei den untersuchten Proben eine deutliche Geometrieabhängigkeit bestand, sind diese nicht direkt mit denen aus der Literatur vergleichbar.

Es zeigte sich auch ein Unterschied zwischen vom Rand des Halbzeugs (höherer J_Q -Wert) , und aus dem Kern entnommenen Proben (niedriger J_Q -Wert). (siehe Tabelle 5-5)

Der Ursprung dieses Unterschiedes konnte nicht endgültig geklärt werden.

Die Theorie, dass sich aufgrund der durch thermische Oxidation verringerten Molmasse, eine Randschicht bildet, die unterschiedliche Eigenschaften zum Kern zeigt, muss in weiteren Versuchen Verifiziert werden.

6.4 Langzeitversuch:

Bei diesem Versuch ergaben sich mehrere Probleme, auf die im Kapitel 5.4 genauer eingegangen wird. Nichtsdestotrotz konnte gezeigt werden, dass das untersuchte Normal-Szenario (siehe Kapitel 4.6) über längere Zeit ertragen werden kann. Das Worst-Case-Szenario führte allerdings rasch zum Versagen und muss dringendst vermieden werden.

6.5 Zusammenfassend:

An dieser Stelle bleibt nur noch festzuhalten, das PE-UHMW seinen Ruf als idealer Werkstoff für hochbelastete Bauteile zurecht besitzt.

Es war mit den in dieser Arbeit durchgeführten Versuchen nicht möglich, auch nur eine einzige Probe zu Brechen. Dies muss immer im Nachhinein, nach Kühlung in flüssigem Stickstoff, geschehen.

Die vom Versuch eingerissenen und gebogenen Proben konnten sich außerdem über mehrere Stunden hinweg fast vollständig geraderichten. Dies wurde allerdings erst im Nachhinein bemerkt, weswegen es in dieser Arbeit keine bildliche Dokumentation dieses

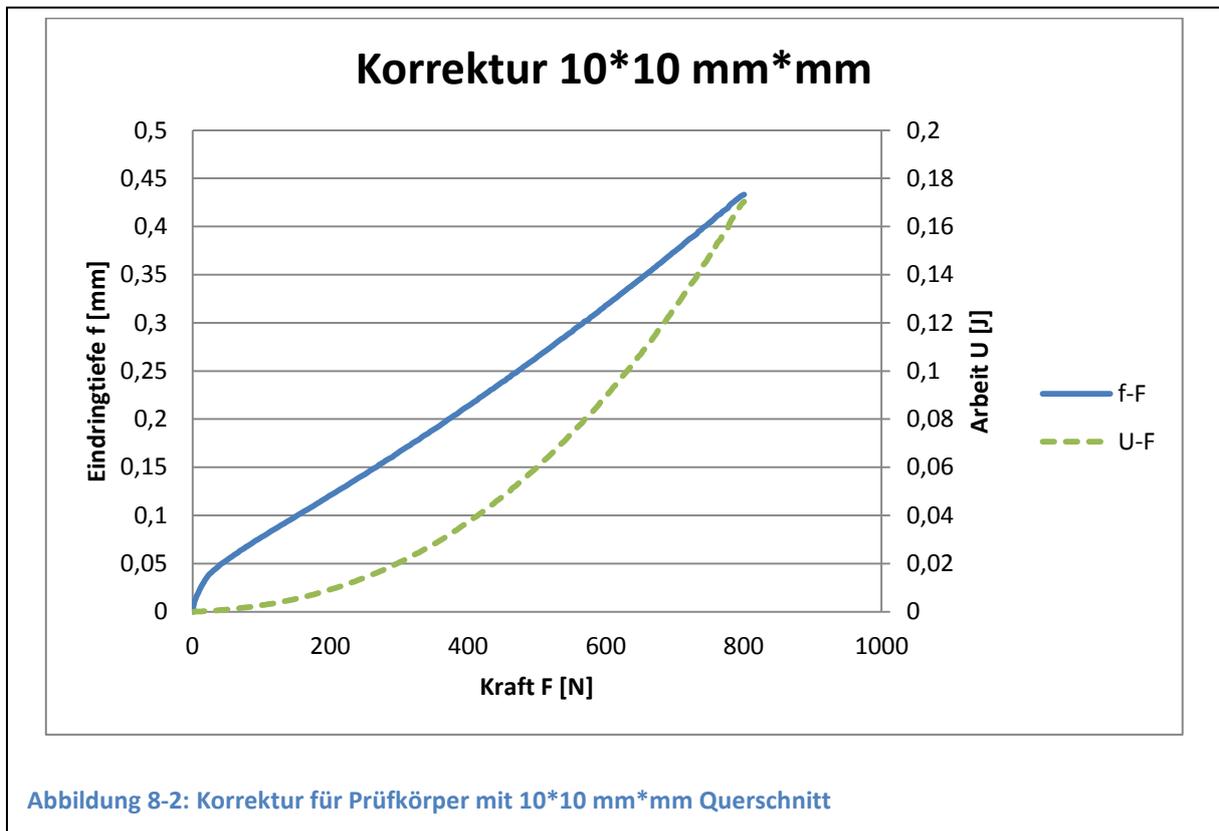
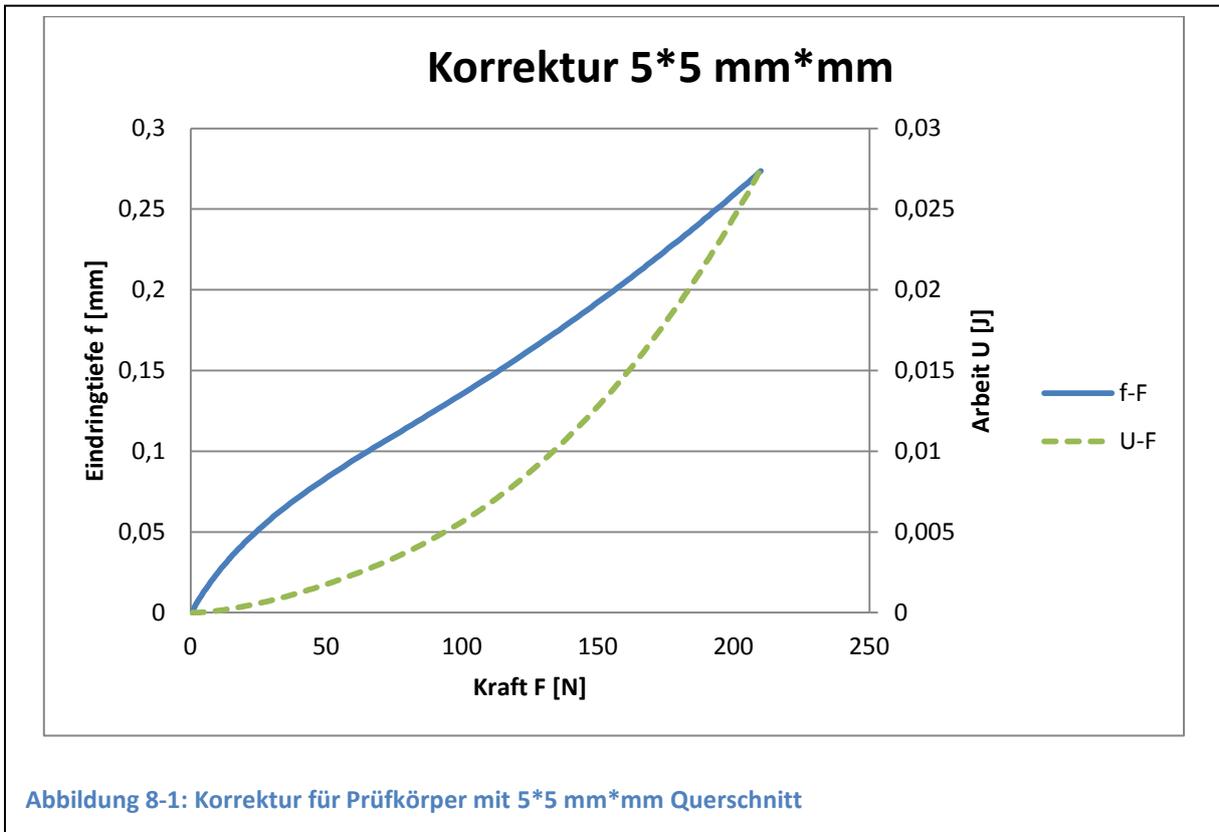
Effektes gibt. Es soll allerdings nicht unerwähnt bleiben, da dieses Verhalten im Fall eines Schadens an einem Implantat von Bedeutung sein kann.

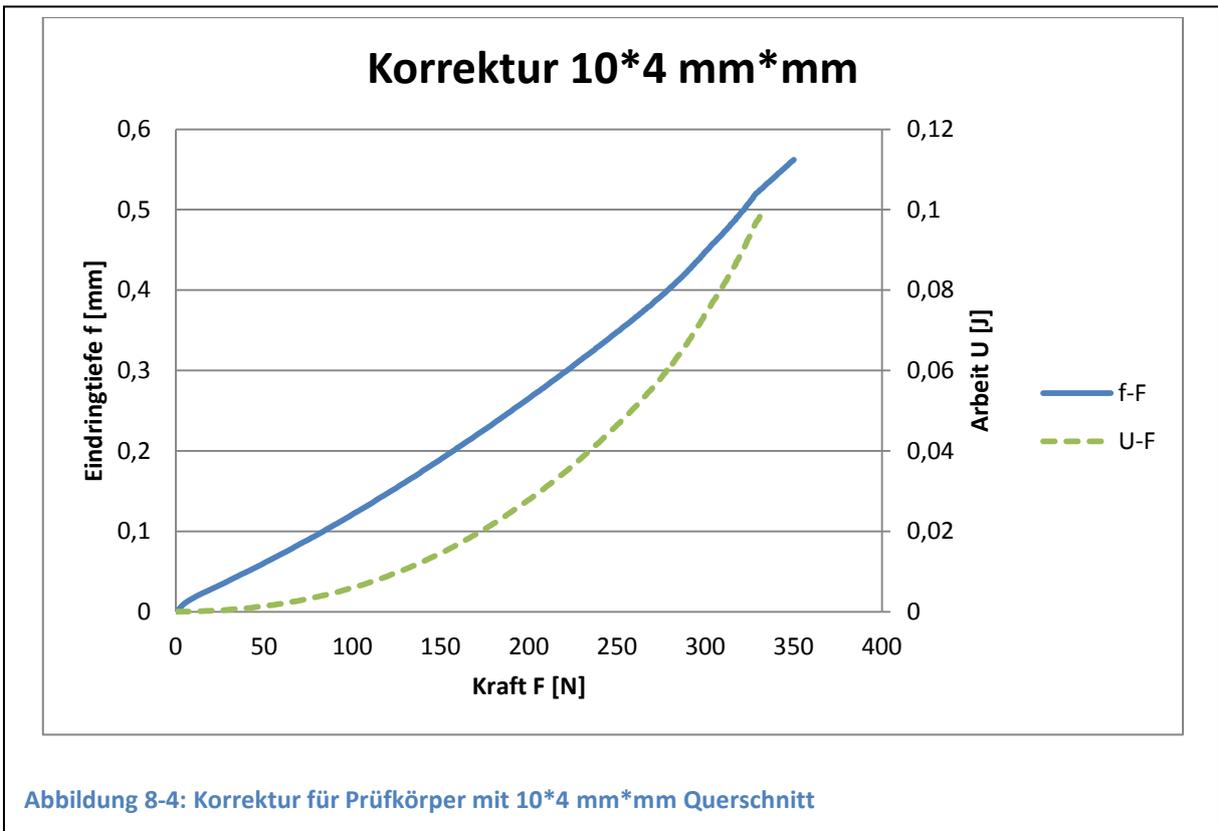
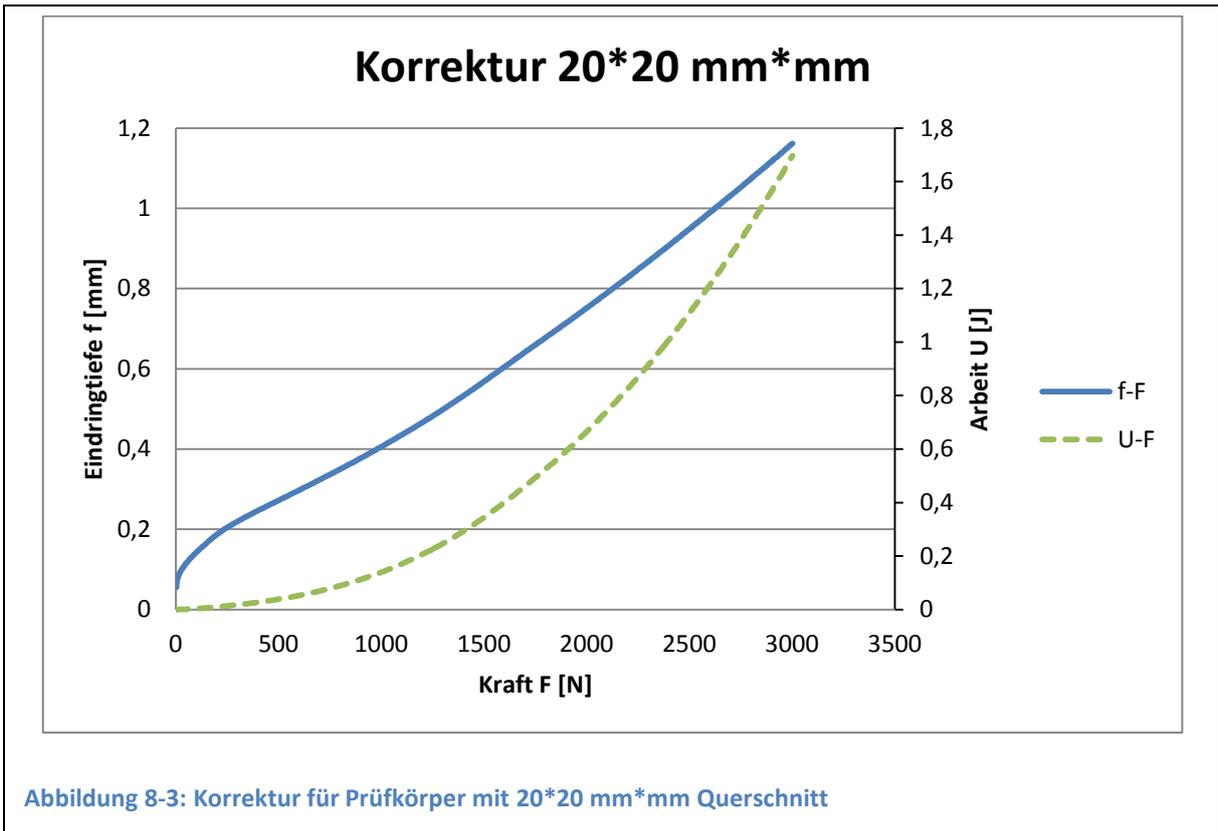
7 Literaturverzeichnis:

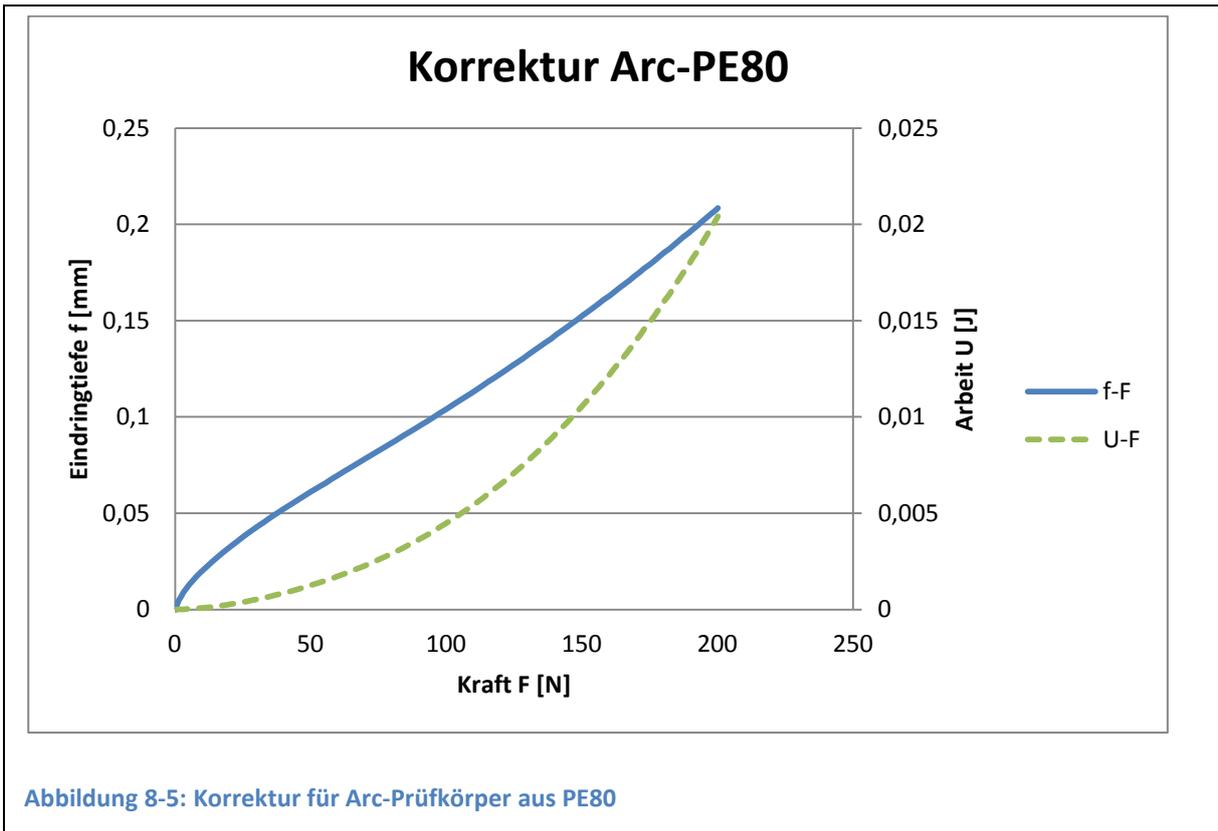
1. **Kurtz, S. M.** *UHMWPE Biomaterials Handbook*. Second Edition. s.l. : Elsevier Inc., 2009. ISBN: 978-0-12-374721-1.
2. **R&G.** *Handbuch Faserverbundwerkstoffe*. Edition 8. 2003.
3. **Domininghaus, H., et al.** *Kunststoffe - Eigenschaften und Anwendungen*. ISBN 978-3-540-72400-1.
4. **Ticona.** Ram Extrusion. [Online] [Zitat vom: 10. 2 2011.] http://www.ticona.com/home_page/tech/processing/extrusion/ram_extrusion.htm.
5. **Braskem.** Ram Extrusion. *Technical Bulletin*. 2006, 3.02.
6. **Ticona.** Compression Molding. [Online] [Zitat vom: 10. 2 2011.] http://www.ticona.com/de/home_page/tech/processing/compression_molding.htm.
7. **Springer.** *Dubbel - Taschenbuch für den Maschinenbau*. [Hrsg.] K. H. Grote und J. Feldhusen. 22. s.l. : Springer, 2007, E-2.
8. **Blumenauer, H. und Pusch, G.** *Technische Bruchmechanik*. s.l. : Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993. ISBN 3-342-00659-5.
9. **Grellmann, W. und Seidler, S.** *Kunststoffprüfung*. 2005. ISBN: 3-446-22086-0.
10. **Grellmann, W., Seidler, S. und Lach, R.** Geometrieunabhängige bruchmechanische Werkstoffkenngrößen - Voraussetzung für die Zähigkeitscharakterisierung von Kunststoffen. *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.* 2001, 32, S. 552-561.
11. **DIN EN ISO 178.** *Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*.
12. **Christen, B.** *Kontroversen in der Hüftprothetik*.
13. **ASTM E 1820 - 01.** *Standard Test Methode for Measurement of Fracture Toughness*. s.l. : ASTM. ASTM E 1820 - 01.
14. **ASTM D 6068-96.** *Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*.

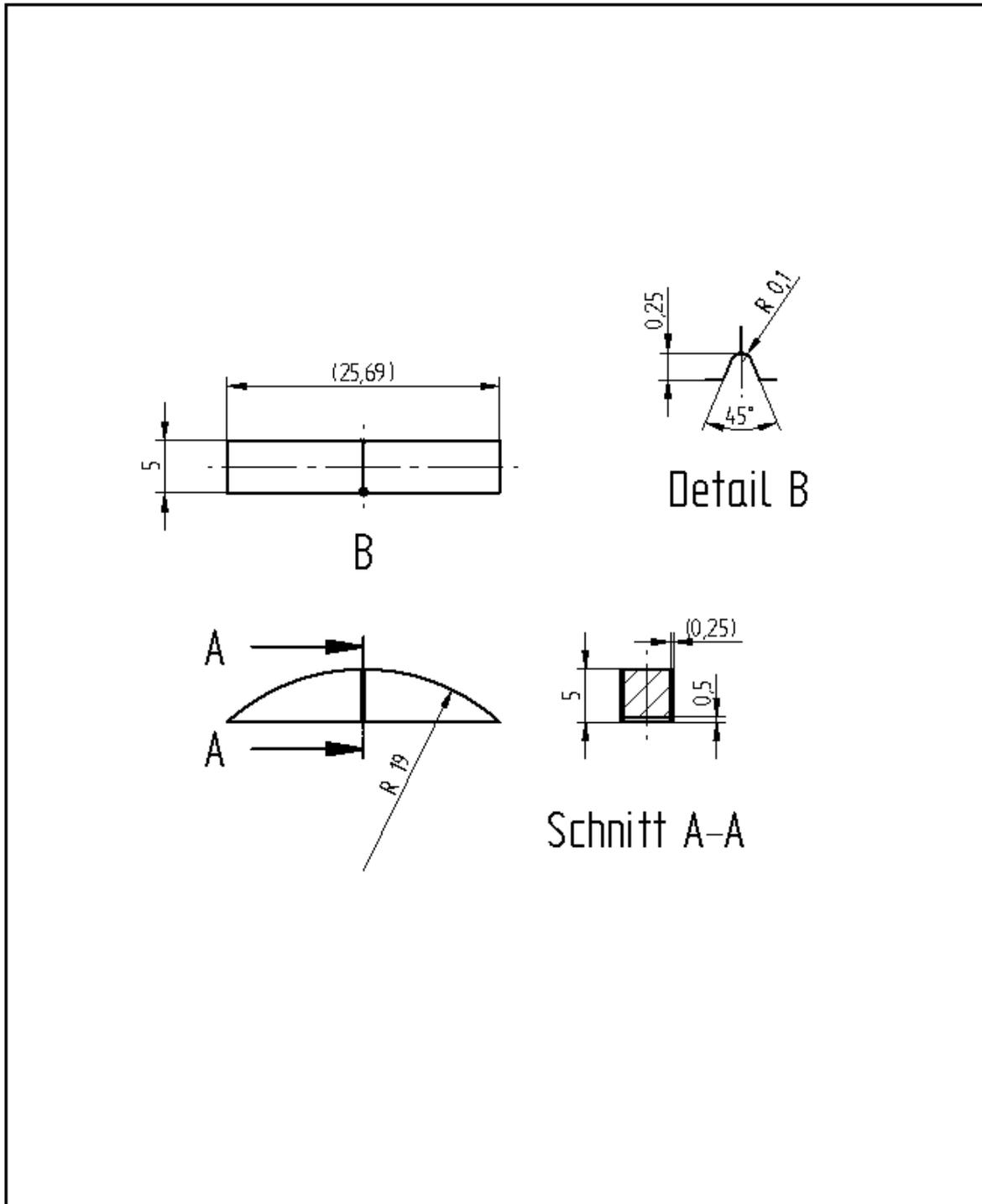
15. **García, V., Bernal, C. und Frontini, P.** Calibration of fracture mechanics parameters and J-R curve determination in polyethylene side-grooved arc-shaped specimens. *Engineering Fracture Mechanics*. s.l. : PERGAMON, 1999. Bd. 62, S. 231-248.
16. **Wolfram Research.** Wolfram.com. [Online] [Zitat vom: 27. 10 2015.] <http://mathworld.wolfram.com/LagrangeInterpolatingPolynomial.html>.
17. **Crown Plastics Co., Inc.** crownplastics.com. [Online] [Cited: 5 10 2015.] <http://www.crownplastics.com/wp-content/uploads/2010/08/UHMW-MechanProp.pdf>.
18. **Svetlik, H., Edwards, D. B. und Shabeer, A.** Fracture Toughness Testing (KIC) of PE 4710 Pipe Material. *SPE ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE AND EXHIBITION*. 2008.
19. **Pruitt, L. A.** Deformation, yielding, fracture and fatigue behavior of conventional and highly cross-linked ultra high molecular weight polyethylene. *Biomaterials* 26 (2005) 905 – 915. 2005, Bd. 26.
20. **Markut-Kohl, R.** *Structure-properties correlations in PE-UHMW : influence of consolidation, crosslinking, sterilization, and in vivo use on hip implants*. 2012. AC07813965.
21. **Rimnac, C.** On Mechanical Properties of UHMWPE. s.l. : CASE SCHOOL OF ENGINEERING.
22. **Duus, L. C., et al.** THE EFFECT OF RESIN GRADE, MANUFACTURING METHOD AND CROSS LINKING ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF COMMERCIALY AVAILABLE UHMWPE. Orlando, Florida : s.n., 2000.
23. **Gross, D. und Seelig, T.** *Bruchmechanik - Mit einer Einführung in die Mikromechanik*. ISBN 978-3-642-10195-3.

8 Anhang:









Stück	Benennung		Teil	Norm Nr. Zeichnungs Nr.	Werkstoff	Rohmaße od. Modell Nr.	Bemerkung
	Tag	Name	Christian Böck		TU-Wien		
Gez.							
Gepr.							
Norm gepr.			ARC-Prüfkörper		Zeichnungs-Nr. 2010-0001		
Maßstab	2:1				Ersatz für:		
Freimaß- toleranz					Ersetzt durch:		
f							

Abbildung 8-6: Werkstattzeichnung ARC-Prüfkörper

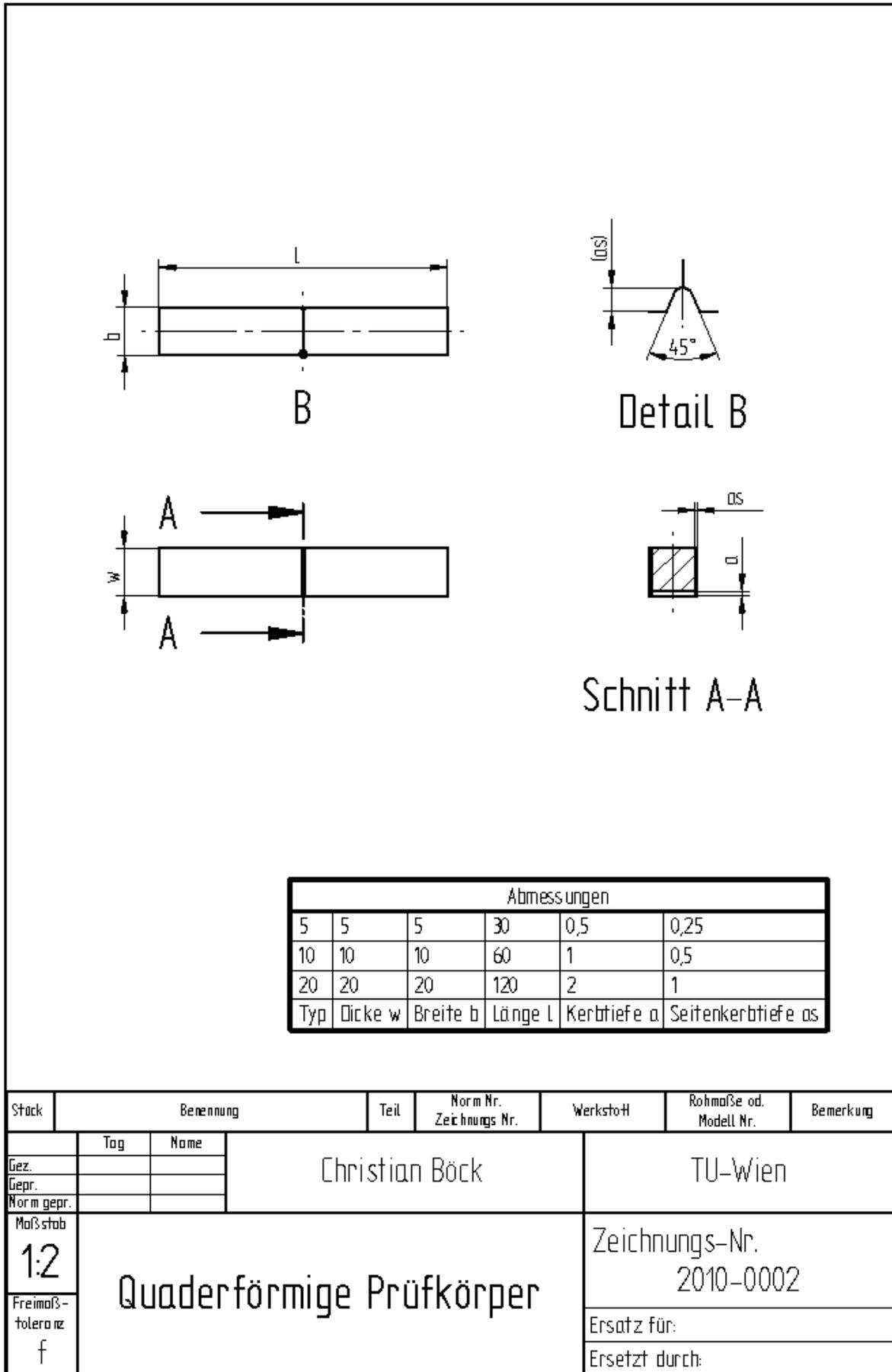
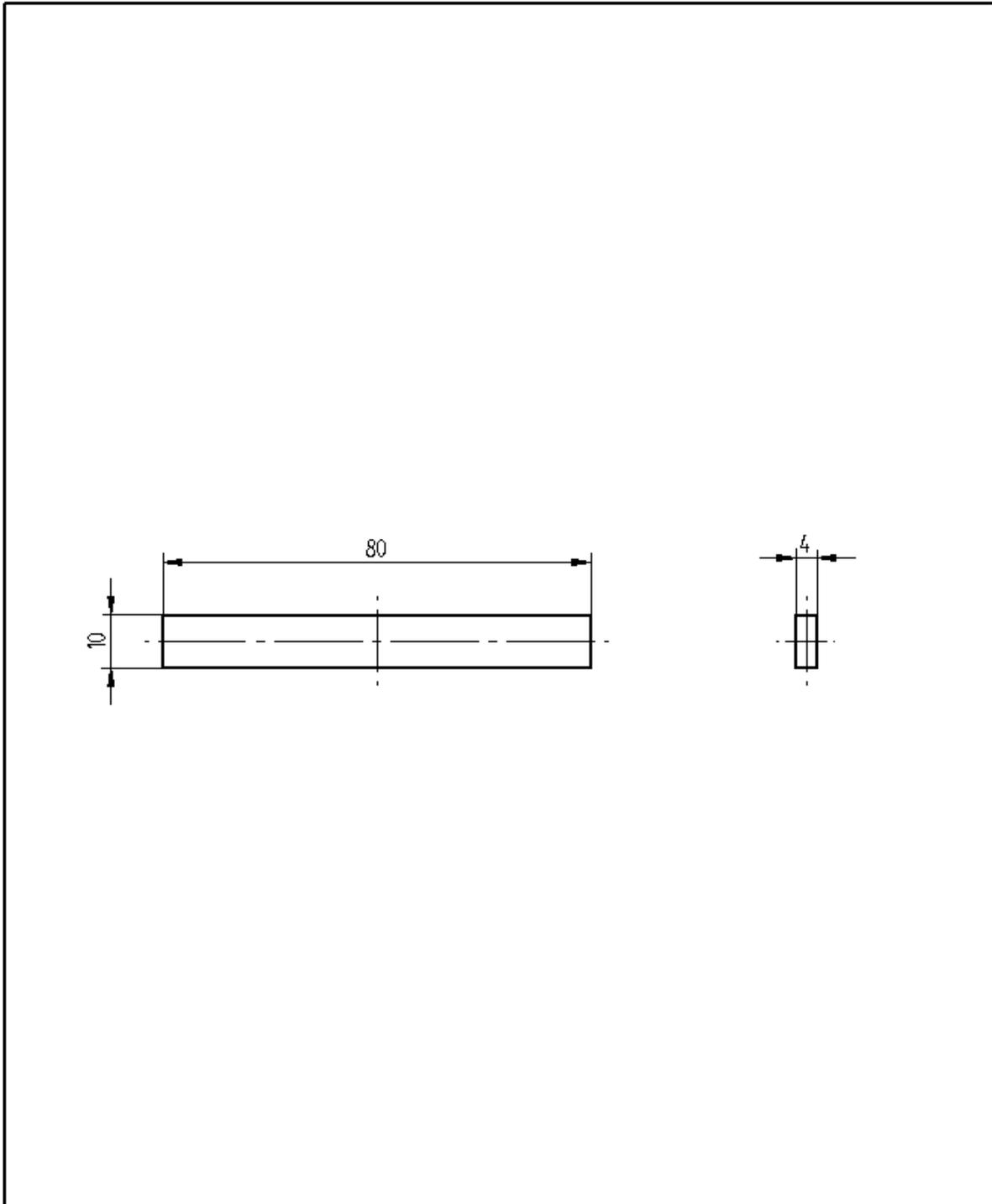
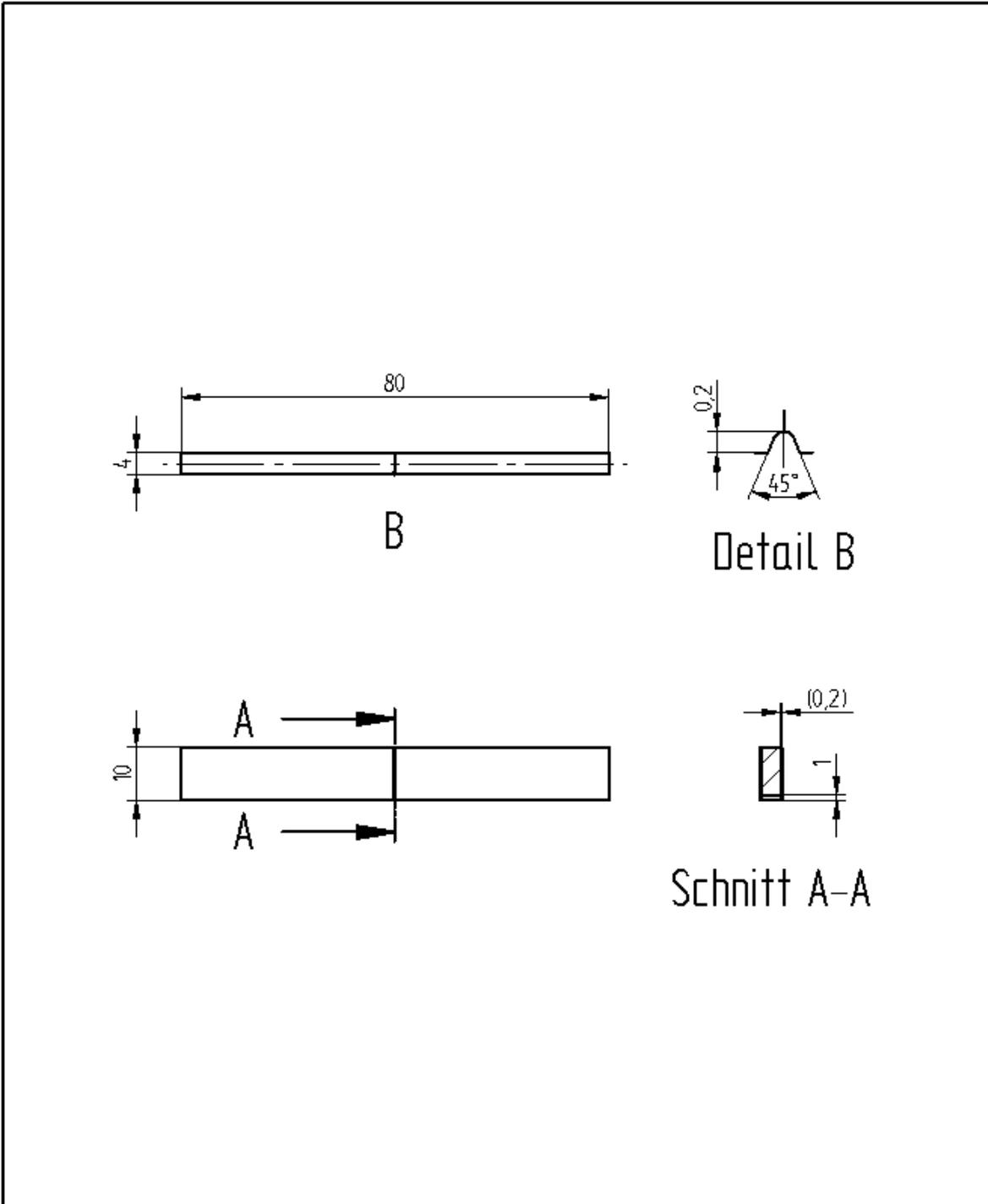


Abbildung 8-7: Werkstattzeichnung Quaderförmige Prüfkörper



Stück	Benennung		Teil	Norm Nr. Zeichnungs Nr.	Werkstoff	Rohmaße od. Modell Nr.	Bemerkung
	Tag	Name	Christian Böck		TU-Wien		
Gez.							
Gepr.							
Norm gepr.							
Maßstab	Normprüfkörper				Zeichnungs-Nr. 2010-0003		
1:1					Ersatz für:		
Freimaß- toleranz f					Ersetzt durch		

Abbildung 8-8: Werkstattzeichnung Normprüfkörper



Stück	Benennung		Teil	Norm Nr. Zeichnungs Nr.	Werkstoff	Rohmaße od. Modell Nr.	Bemerkung
	Tag	Name	Christian Böck		TU-Wien		
Gez.							
Gepr.							
Norm gepr.							
Maßstab	1:1				Zeichnungs-Nr. 2010-0004		
Freimaß- toleranz	f				Ersatz für:		
					Ersetzt durch:		
	Normprüfkörper mit Kerbe						

Abbildung 8-9: Werkstattzeichnung Normprüfkörper mit Kerbe