

Schlussbericht

der Forschungsstelle(n)

Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e.V. (FS 1)

Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf, Institut für Textil- und
Verfahrenstechnik (FS 2)

Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung e.V. (FS 3)

zu dem über die



im Rahmen des Programms zur
Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF)

vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

geförderten Vorhaben IGF-Nr. 15925 BG

***Untersuchung des visko-elastischen Verhaltens technischer Garne bei
Kurzzeitbeanspruchungen mit hoher Dehnungsgeschwindigkeit***

(Bewilligungszeitraum: 01.12.2008 bis 29.02.2011)

der AiF-Forschungsvereinigung

Textil

Krefeld, 31.05.2011

Ort, Datum

Dr. Thomas Bahners

Name und Unterschrift des/der Projektleiter(s)
an der/den Forschungsstelle(n)

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'T. Bahners', is written over a horizontal line.

Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e.V.
Institut an der Universität Duisburg-Essen
Adlerstraße 1 • 47798 Krefeld

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Zusammenfassung	2
1 Einleitung	3
2 Forschungsziel	10
3 Fallgewichtsprüfstand (DTNW)	12
3.1 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens	12
3.1.1 Annahme eines stoßfreien Prozesses	12
3.1.2 Annahme eines initialen Stoßes	16
3.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise	20
3.3 Beispielhafte Messergebnisse.....	30
4 ITV Rotationszugprüfmaschine (ITV Denkendorf)	40
4.1 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens	40
4.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise	42
4.2.1 Entwicklung und Aufbau des ITV-Rotationszugprüfstandes.....	43
4.2.2 Konzeptionierung, Entwicklung und Analyse der Fadenzugprüfmethode	47
4.2.3 Entwicklung der Dehnungsmessung	57
4.2.4 Entwicklung des Messsystems und des Messprogramms	59
4.2.5 Entwicklung der Fadeneinbringung	61
4.2.6 Entwicklung von Mitnahmenasen für Fadenschlaufen	63
4.2.7 Entwicklung leichter Garnklemmen	67
4.2.8 Einsatz der High-Speed-Kamera (HSK).....	68
4.2.9 Entwicklung eines „kleinen“ Rotationsprüfstand.....	69
4.3 Durchführung und Auswertung von Serienprüfungen	71
4.3.1 Probleme und Phänomene der Prüfung	73
4.3.2 Aktuelle Auswertung der High-Speed-Rotationszugprüfungen	76
4.3.3 Durchführung von Serienprüfungen an PA und PET-Garnen	82
5 Hochgeschwindigkeit-Zugprüfmaschine	104
5.1 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens	104
5.1.1 Servohydraulische Hochgeschwindigkeits- Zugprüfmaschinen	104
5.1.2 Dehngeschwindigkeit / Dehnrage	106
5.1.3 Funktionsprinzip der Hochgeschwindigkeits- Zugprüfmaschine.....	107
5.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise	110
5.2.1 Versuchsmaterial.....	110
5.2.2 Versuchsdurchführung – Zugversuche	111
5.3 Beispielhafte Messergebnisse.....	120
5.3.1 Beispielhafte Kraft- Dehnungs-Kurven bei Normalklima	120
5.3.2 Beispielhafte Kraft- Dehnungs-Kurven bei ausgewählten Temperaturen	139
5.3.3 Versagensmechanismen.....	143

6	Ergebnisvergleich.....	147
7	Wertende Zusammenfassung	155
7.1	Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des ursprünglichen Forschungsantrags	155
7.2	Auswirkungen auf den wissenschaftlich-technischen Fortschritt	156
7.3	Nutzen der Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen.....	157
7.4	Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse	158
8	Erläuterung zur Verwendung von Zuwendungen	160
8.1	Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten	160
8.2	Verwendung der Zuwendung	160
9	Veröffentlichungen	160
10	Angaben über Schutzrechte.....	160
11	Danksagung	161
12	Durchführende Forschungsstellen	162
13	Literaturverzeichnis	163

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklung von Garnen für den Einsatz in Hochleistungstextilien war es das Ziel des abgeschlossenen Forschungsvorhabens, das viskoelastische Verhalten technischer Garne bei einer Kurzzeitbeanspruchung mit extremen Dehnraten zu untersuchen. Wesentlich hierbei war die Simulation der dynamischen Abläufe in realen Vorgängen, wobei hier speziell an das Entfalten eines Airbags und die hochfrequente Beanspruchung eines Reifencords gedacht war. Als Parameterfeld wurden vor diesem Hintergrund Dehnungsgeschwindigkeiten bis über 250 s^{-1} bei Zimmertemperatur sowie in Extrembereichen von -40°C und $+80^\circ\text{C}$ avisiert.

In den drei Forschungsstellen wurden für diese Untersuchungen ein Fallgewichtsprüfstand, ein Rotationsprüfstand sowie eine (kommerzielle) Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine eingesetzt. Zur Standardisierung wurden die Messungen an 9 technischen Garnen aus PA 6.6, PA 4.6 und PET durchgeführt. Für einen unmittelbaren Vergleich der drei Prüfverfahren wurden hieraus ein PA 6.6 940 dtex f140, ein PA 4.6 940 dtex f140 und ein PET 550 dtex f105 ausgewählt.

Zusammenfassend kann zunächst gesagt werden, dass alle eingesetzten Prüfeinrichtungen Messungen mit den angestrebten Dehnraten realisieren konnten und sinnvolle Kraft-Dehnungsmessungen erlauben. Eine Variation der Messtemperatur ist beim derzeitigen Stand nur an der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine möglich.

Aus diesen Messungen konnte hinsichtlich der Garneigenschaften abgeleitet werden, dass

- Die Höchstzugkraft der Garne von der Dehnrate unabhängig ist,
- die Höchstzugkraftdehnung (Reißdehnung) bei Steigerung der Dehnrate dagegen abnimmt,
- mit der Steigerung der Dehnrate bei allen Garnen eine dynamische Entwicklung des Elastizitätsmoduls beobachtet wird,
- der E-Modul speziell im Anfangsbereich der KD-Kurve zunimmt und schließlich
- die Module bei dynamischer Belastung zum Teil 50 % über den quasi-statischen Werten (gemäß der Messung nach DIN EN ISO 2062) liegen.

Der Einfluss der Messtemperatur auf das mechanische Verhalten der Garne konnte mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine an FS3 nachgewiesen werden. Bei niedriger Prüftemperatur (-35°C) zeigt sich bei allen 3 Fadentypen bei gleichzeitig zunehmender Dehnrate eine Zunahme der Höchstzugkraftwerte und Abnahme der Dehnungswerte. Eine Erhöhung der Prüftemperatur führt zu umgekehrten Kraft-Dehnungs-Trends.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

1 Einleitung

Technische Textilien werden zunehmend als hoch beanspruchte Strukturelemente eingesetzt, die kurzzeitigen, oftmals schnell wechselnden mechanischen (Zug)Kräften ausgesetzt sind. Beispiele hierfür sind Airbaggewebe und Reifencord im Automobil- und Flugzeugbau sowie Ballistikmaterialien oder Breitgewebemembranen. Kennzeichnend für den Beanspruchungsfall sind Dehngeschwindigkeiten bis zu 250 s^{-1} bei Dehnungen teilweise bis über 25 %.

Die entsprechenden Anforderungsprofile an die Gewebe müssen durch die eingesetzten Materialien, durch die Textilgutkonstruktion und zum Teil durch nachgelagerte Prozessstufen erfüllt werden. Airbag-Gewebe besteht aus multifilen Polyamidgarnen, die in der Kette ungedreht oder verwirbelt und im Schuss ungedreht eingesetzt werden. Die Verwendung von PA 6.6 oder sogar PA 4.6 als Rohstoff für die Garnherstellung sichert auch bei leichten Geweben eine ausreichende Widerstandskraft gegen Generatorgase. Ausgehend von der Dynamik des Entfaltens eines Airbags werden heute bevorzugt Gewebe aus Garnen der Feinheit 235 dtex und 470 dtex eingesetzt.

Klassisch werden textilmechanische Kenngrößen von Garnkonstruktionen, Flächengebilden und Nähten unter quasi-statischen Bedingungen, die mit niedrigen Dehngeschwindigkeiten aufgenommen werden, ermittelt. Es ist allgemein bekannt, dass sich die mechanischen und visko-elastischen Eigenschaften von polymeren Werkstoffen mit zunehmenden Dehngeschwindigkeiten deutlich verändern. Daher werden in der Praxis an fertigen Produkten meist aufwändige Funktionstests unter anwendungsnahen, dynamischen Bedingungen (z.B. Deployment Tests von Airbags) durchgeführt. Die Festlegung von Spezifikationen und die Auslegung der verwendeten Materialien erfolgt aber dennoch nach den bisher nur quasi statisch ermittelten Kenngrößen. Damit ergibt sich eine Lücke zwischen den realen Einsatzbedingungen und den verfügbaren Garnprüfverfahren, die sich als begrenzender Faktor für die Neu- und Weiterentwicklung von entsprechenden Produkten darstellt.

Bereits in den frühen 60er Jahren wurden vor dem Hintergrund steigender Geschwindigkeiten in textilerzeugenden Prozessen – Weben, Hochleistungsnähen etc. – eingehende Untersuchungen zum visko-elastischen Verhalten von Synthesefasern bei hohen Dehngeschwindigkeiten (bis zu 25 s^{-1}) durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen ist bekannt, dass das elastische Verhalten von Synthesefasern unter diesen Bedingungen nicht mehr dem quasi-statischen Verhalten entspricht, wie es z.B. bei der Prüfung der Zugelastizität nach DIN 53835 mit einer Dehnrage von 0.01 s^{-1} vorliegt [1]. Grundsätzliche Ursache hierfür ist,

dass das Material bei hohen Dehngeschwindigkeiten keine Möglichkeit hat zu relaxieren, da in derartig kurzen Zeiträumen keine kooperativen Platzwechsel der Makromoleküle möglich sind.

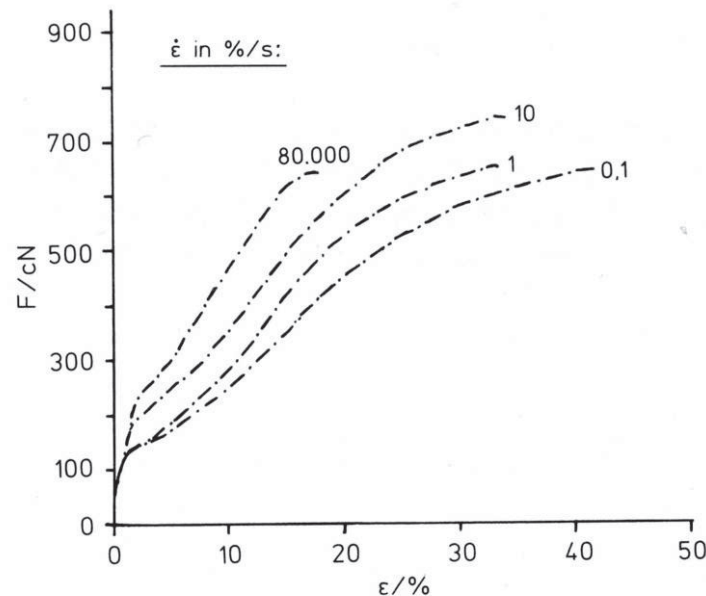


Abbildung 1: Kraft-Dehn-Kurven eines thermofixierten PET-Multifilamentgarns bei verschiedenen Dehngeschwindigkeiten nach Beier und Schollmeyer [3]

Es folgt, dass sich die Anteile der elastischen und plastischen Deformation in Abhängigkeit von der Verformungsgeschwindigkeit deutlich voneinander unterscheiden. Untersuchungen von Stein et al. [2] haben gezeigt, dass sich die plastische Deformation mit steigender Dehnrage verringert. Hieraus resultiert eine Verminderung der Dehnfähigkeit, der E-Modul steigt signifikant an. Beispielhaft ist dieses Verhalten in Abbildung 1 für ein Polyestergerne gezeigt [3]. Die Höhe der Eigenschaftsänderung ist dabei stark materialabhängig [4,5].

Zusätzlich ist bei kurzzeitigen Zugdehnungen zu beobachten, dass die resultierende Deformation anders als bei langsamen Dehnungen nicht gleichmäßig über die Fadenlänge verteilt ist, sondern sich Belastungsspitzen wellenartig ausbreiten (siehe z.B. [6,7]). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit und Ausprägung der Belastungsspitzen ist dabei abhängig von (a) Materialparametern wie Dichte und E-Modul, (b) Parametern der Textilgutkonstruktion wie Fadendrehung, Bindung etc. und (c) der Dehnrage. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch in anderen Untersuchungen an Spinnfasern und Filamentgerne aus Polyamid 6.6, Polyester und meta-Aramid (Nomex®) gefunden [8,9].

Die zuvor resümierten Untersuchungen wurden vor dem Hintergrund der fortschreitenden Produktionstechnik durchgeführt, in denen mit der Maschinenentwicklung Dehnraten von einigen 10 s^{-1} auftraten. Der heutige Einsatz moderner Hochleistungstextilien ist mit Dehnraten verbunden, die diese um 1 bis 2 Größenordnungen übersteigen. Grundlegende Untersuchungen zum Verhalten von Poly(ethylenterephthalat) (PET) bei sehr hohen Dehnraten wurden bereits Ende der 1980er Jahre vom DTNW (FS 1 im beantragten Forschungsvorhaben) durchgeführt (siehe Beier und Schollmeyer [10]). Zur Charakterisierung des Verhaltens von Multifilamentgarnen wurde eine Fallgewichtsanordnung verwendet, bei der Masse des Fallkörpers, Fallhöhe und Länge des Prüflings (Fadenschlaufe) die resultierende Dehnraten definieren. Angestrebt waren Dehnraten von 1.000 s^{-1} . Aufgrund der grundsätzlichen Konzeption derartiger Versuche sind gegenseitige Einflüsse zu berücksichtigen. So verringert die zunehmende Zugkraft des gedehnten Fadens die effektive Geschwindigkeit des Fallkörpers signifikant. Beier und Schollmeyer konnten durch eine (optische) Messung der wahren Dehngeschwindigkeit nachweisen, dass im Bereich hoher Dehnraten tatsächlich nur etwa 80 % der rechnerischen Dehngeschwindigkeit erzielt wurden. Es sei darauf hingewiesen, dass der systematische Messfehler der Fallgewichtsmessung bei sehr hohen Dehnungen (> 100) zunehmend größer wird, da hierbei die Länge der Fadenschlaufe typischerweise gering gehalten wird.

In neuerer Zeit wurden analoge Untersuchungen vor allem vor dem Hintergrund der Entwicklung im Bereich Ballistikwerkstoffe und durch Schlag oder Stoß hoch beanspruchter Kompositbauteile durchgeführt [11,12,13,14,15]. Wang und Mitarbeiter haben in mehreren Arbeiten das Verhalten von p-Aramid und Polyvinylalkohol (PVA) bei Dehnraten zwischen 140 und 1.500 s^{-1} und Temperaturen zwischen -60 und 90 °C untersucht [11,12,13]. Bei beiden Materialien hat sich gezeigt, dass der (initiale) elastische Modul nicht von der Dehnraten abhängt, sich Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung mit den Zugbedingungen ändern (vgl. auch die Abbildung 1). Im Falle von PVA erhöhten sich mit der Dehnraten sowohl Höchstzugkraft als auch Höchstzugkraftdehnung. Xiong, Gu und Wang [14], die ebenfalls PVA bei unterschiedlichen Dehnraten (bis zu 1000 s^{-1}) beanspruchten und insbesondere das Auftreten von Mikrorissen untersuchten, geben allerdings an, dass der Initialmodul in einem Bereich bis 180 s^{-1} dehnratenabhängig ist und erst bei sehr hohen Dehnraten konstant sei. Godfrey [16] konnte durch seine Untersuchungen nachweisen, dass sich bei hohen Dehnraten der Effekt einer thermo-mechanischen Kopplung, d.h. Umsetzung von Dehnspitzen in thermische Erweichung, in einer nicht gleichförmigen Temperaturverteilung über die Faser- bzw. Garnlänge auswirkt. In diesem Zusammenhang sei noch einmal auf die bereits angesprochene wellenartige Ausbreitung von Belastungsspitzen bei Kurzzeitdehnungen hingewiesen (vgl. Szosland und Scolzynski [6] bzw. Roylance [7]).

Vor dem dargestellten Hintergrund ist festzuhalten, dass ein besseres Verständnis der dynamischen Vorgänge in Synthesefasergarnen, von Möglichkeiten zur Optimierung hinsichtlich der Materialauswahl sowie Eigenschaftseinstellungen die Basis für die funktionsgerechte Gestaltung und gezielte Weiterentwicklung textiler Werkstoffe bei hochdynamischen Anwendungen sind. Im Hinblick auf die Weiterverarbeitung von Hochleistungsgarnen bei den Herstellern und Veredlern technischer Textilien ist darüber hinaus anzumerken, dass – wie von Beier und Schollmeyer [10] gezeigt - auch Nachbehandlungen in der Textilherstellung bzw. –veredlung, wie z.B. Thermofixierprozesse, Einfluss auf das dynamische Verhalten dieser Materialien haben.

Grundlage entsprechender Werkstoffgestaltung und –einstellung ist die genaue Kenntnis des visko-elastischen Materialverhaltens bei Dehnraten über mehrere Größenordnungen in Abhängigkeit relevanter Werkstoffparameter. Diese Eigenschaftscharakterisierung stellt das dem beantragten Forschungsvorhaben zugrunde liegende Problem dar. Gelingt eine prüftechnische Charakterisierung der Eigenschaften von polymeren Werkstoffen bei hohen Dehngeschwindigkeiten, so erhält man neuartige Materialkenngrößen, die eine dynamische Anwendungssituation adäquater beschreiben.

Die Durchführung von Garnzugprüfungen mit sehr hohen Dehnraten ist eine messtechnisch sehr anspruchsvolle Aufgabe. Zwar ist es möglich mit Hilfe von sehr kurzen Einspannlängen sehr hohe Dehnraten zu erzielen, jedoch steigt der Fehler bei der Dehnungsmessung infolge Klemmenrutsch oder Messungenauigkeiten sehr stark an und das Ergebnis ist schnell unbrauchbar. Ganz problematisch wird es bei hochfesten Garnen mit geringer Bruchdehnung (z.B. Aramide mit ca. 3 % Bruchdehnung). Um das visko-elastische Verhalten von Garnen bei Kurzzeitbeanspruchungen bestmöglich untersuchen zu können, müssen auch unterschiedlichste Prüfverfahren angewandt werden. Das Ziel ist es, mit optimierten Prüfverfahren Serienprüfungen mit unterschiedlichsten Dehnraten an technischen Garnen durchführen zu können. Wichtige Kriterien sind hierbei die schnelle, personenunabhängige Probenvorbereitung und die Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse. Da die zur Prüfung erforderliche max. Zugkraft mit wenigen 100 N sehr gering ist, stehen mehrere verschiedene Prüfverfahren zur Verfügung:

- Klassische Zugprüfmaschine (Erarbeitung konventioneller Vergleichswerte)
- Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine
- Fallprüfstand
- Rotationsprüfstand

- Ballistischer Beschuss
- Spezialreißmaschinen wie der Uster TensorJet

Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über Prüfverfahren mit den erzielbaren Prüfgeschwindigkeiten und den Dehnraten für Garneinspannlängen $l_0=5, 150, 250$ und 500 mm.

Dabei sind die einzelnen Prüfverfahren nicht gleich gut für eine kurze Einspannlänge geeignet. Je größer die Prüfgeschwindigkeit, desto größer die Einspann- und Messproblematik. Die kürzeste Einspannlänge ist mit klassischen Zugprüfmaschinen realisierbar, gefolgt von der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine (bis zu 250 mm) und dem Fallprüfstand (150 mm). Der Rotationsprüfstand erfordert in Abhängigkeit von Scheibendurchmesser und Zugänglichkeit mindestens eine Einspannlänge von 250 mm.

Vom ITV-Denkendorf (FS 2 im beantragten Forschungsvorhaben) wurden im Rahmen eines 2005 abgeschlossenen AIF-Projekts [17] Hochgeschwindigkeitsprüfungen an Garnen mittels der servohydraulischen Zugprüfmaschine der MPA-Stuttgart ($v_{\max}=20$ m/s) und eines externen Rotationsprüfstandes ($v_{\max}=260$ m/s) durchgeführt. Die hierzu entwickelten Garnklemmen ermöglichten die Prüfung von Garnen aus Aramid- und High-Performance-Polyethylen mit Dehnraten bis zu 60 s⁻¹. Aufgrund der geringen Bruchdehnung von $2-3$ % war es dabei erforderlich, Einspannlängen von mindestens 300 mm zu wählen.

Ein interessanter Aspekt – auch für die vorliegende Problemstellung – war dabei, dass die Prüfungen sowohl an Spulgarnen als auch an ausgelösten Schuss- und Kettgarnen durchgeführt wurden. Bei den Aramidgarnen lagen die bei 60 s⁻¹ ermittelten E-Module der Spulgarnen (Schussgarnen) max. $11-14$ % (max. $13-20$ %) über den quasi-statisch ermittelten E-Modulwerten. Die der Kettgarnen waren nur um $3-7$ % erhöht. Die Bruchkräfte der Spulgarnen waren höher als die der Schuss- und Kettgarnen und lagen bis ca. 3 % über denen von quasi-statischen Zugprüfungen. Beim Rotationsprüfstand wird anstatt eines Fadens eine Fadenschleife gerissen. Der Vergleich von Aramidzugprüfungen mit gleicher Dehnrates zeigte, dass auch die Fadenschleife zu sehr gut vergleichbaren Ergebnissen führt. Die entwickelte Garn-einbringung, die Fadenmitnahme, die Garnfixierung und die Messvorrichtung bewährten sich bis zur realisierten Prüfgeschwindigkeit von 260 m/s sehr gut. Der E-Modul des Aramidgarns mit 1100 dtex stieg von 106 (quasi-statisch) über ca. 156 (200 m/s) bis auf 165 GPa (260 m/s) an, jedoch schwankten die Versuchsergebnisse sehr stark. Die dargestellten Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Vielzahl von Prüfungen mit Variation verschiedener Prüfparameter (Geschwindigkeit, Einspannlänge, Vorspannung) und mit Einsatz von High-Speed Videoaufnahme erforderlich sind, um gesicherte Aussagen treffen zu können.

Tabelle 1: Vergleich der Prüfverfahren und deren erzielbare Dehnraten

	Klassische Zugprüfmaschine	Fallprüfstand (nach [10])	Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine	Rotationsprüfstand (vgl. [17])
Min. Prüfgeschwindigkeit [m/s]	nahe 0	abhängig vom Fallgewicht und der Traversenreibung, ca. 1	nahe 0	abhängig von der Scheibenmasse ca.-1-5
Max. Prüfgeschwindigkeit [m/s]	0,033	Je nach Fallhöhe, meistens jedoch 6	10	abhängig von der Drehzahl, dem Scheibendurchmesser und Sicherheitsfaktoren: ca. 100 bis max. 260 m/s
Dehnrate [1/s] bei $l_0=0,05\text{ m}$	0,66	(217)	(200)	(2000, max. 5200)
Dehnrate [1/s] bei $l_0=0,15\text{ m}$	0,22	72	(67)	(666, max. 1733)
Dehnrate [1/s] bei $l_0=0,25\text{ m}$	0,132	43	40	400 (max. 1040)
Dehnrate [1/s] bei $l_0=0,50\text{ m}$	0,066	22	20	200 (max. 520)

Der ballistische Beschuss von Garnen erfordert extrem hohe Schutzanforderungen und kann nur von Personen mit spezieller Ausbildung/Genehmigung durchgeführt werden. Hierbei treten solch extrem hohe Dehnraten auf, dass Kraft-Dehnungs-Verläufe nicht mehr mit Hilfe von Kraftsensoren bestimmt werden können. Hier kann nur ein „dynamischer“ E-Modul mittels aufwändiger High-Speed-Videoauswertung und der Beziehung von Schallgeschwindigkeit und Dichte ermittelt werden. Da im Projekt neben dem dehnratenabhängigen E-Modul insbesondere das nichtlineare Materialverhalten interessiert, wird dieses Verfahren zunächst nicht berücksichtigt.

Ferner gibt es Spezialreißgeräte wie den Uster Tensor-Jet, der mit bis zu 6,7 m/s und einer festen „Einspannlänge“ von 0,5 m eine Dehnrates von 13,4 1/s ermöglicht. Als Ergebnis erhält man die Bruchkraft und die Bruchdehnung. Es können hiermit allerdings keine Filamentgarne geprüft werden. Am ITV ist ein solches Gerät verfügbar und kann bei Bedarf eingesetzt werden.

Neben der produktorientierten Bewertung von Materialeigenschaften ist vor diesem Hintergrund eine wesentliche Fragestellung des beantragten Forschungsvorhabens im Vergleich sowie in der Optimierung der Prüfmethoden zu sehen.

2 Forschungsziel

Vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklung von Garnen für den Einsatz in Hochleistungstextilien war es das Ziel des abgeschlossenen Forschungsvorhabens, das visko-elastische Verhalten technischer Garne - vornehmlich aus PA 4.6, PA 6.6 und PET - bei einer Kurzzeitbeanspruchung mit extremen Dehnraten zu untersuchen. Zur Standardisierung der experimentellen Untersuchungen stellte die Fa. Polyamide High Performance GmbH allen Forschungsstellen neun Multifilamentgarne aus Polyamid 6.6, Polyamid 4.6 und Polyethylenterephthalat zur Verfügung (Tabelle 2). Wesentlich hierbei war die Simulation der dynamischen Abläufe in realen Vorgängen, wobei hier speziell an das Entfalten eines Airbags und die hochfrequente Beanspruchung eines Reifencords gedacht war.

Tabelle 2: Versuchsmaterial

Garn	Material	Feinheit ¹	Anzahl Fasern
A	PA 6.6	235 dtex	72
B	PA 6.6	470 dtex	140
C	PA 6.6	470 dtex	140
D	PA 6.6	580 dtex	140
E	PA 6.6	940 dtex	140
F	PA 6.6	940 dtex	140
G	PA 4.6	940 dtex	140
H	PET	550 dtex	105
J	PET	1100 dtex	210

Die Untersuchung des visko-elastischen Verhaltens sollte mit Dehnungsgeschwindigkeiten bis über 250 s^{-1} bei Zimmertemperatur sowie in Extrembereichen von -40 °C und $+80 \text{ °C}$ untersucht werden. Das für die vorliegende Fragestellung relevante Parameterfeld Dehnungsgeschwindigkeit, Dehnung und Temperatur kann nur durch die kombinierte Anwendung von

¹ Die Feinheit des Garns ist beschrieben durch die lineare Dichte, d.h. das Gewicht pro Längeneinheit. Das Maß 1 dtex entspricht hierbei einem Gewicht von 1 g auf 10.000 m.

unterschiedlichen Prüfanordnungen realisiert werden, wie sie in den drei teilnehmenden Instituten spezifisch vorhanden sind. Hierzu zählen eine servohydraulische Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine, ein Rotationsprüfstand [17] sowie ein Fallgewichtsprüfstand (vgl. [10]). Zur Unterstützung der experimentellen Auswertung werden die dynamischen Versuche mit einer Hochgeschwindigkeitskamera dokumentiert.

Im Zusammenhang mit der Charakterisierung des Materialverhaltens bei Kurzzeitbeanspruchungen war es ein vordergründiges Forschungsziel, die Möglichkeiten und Grenzen der eingesetzten Prüfmethoden darzustellen, die Vergleichbarkeit der Verfahren aufzuzeigen und so der klein- und mittelständischen Industrie neue Hilfsmittel der Material- und Produktentwicklung zu eröffnen.

3 Fallgewichtsprüfstand (DTNW)

3.1 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens

Bei der Prüfung des Kraft-Dehnverhaltens eines Garns im Fallgewichtsprüfstand wird der Garnprüfling durch ein Fallschlagwerk (Fallgewicht bzw. Fallschlitten), das auf die untere Klemme der Einspannvorrichtung trifft, mit hoher Geschwindigkeit bis zum Bruch gedehnt. Der Kraftverlauf wird zeitabhängig aufgezeichnet und aus der gemessenen oder berechneten „Abzugsgeschwindigkeit“ die Dehnung berechnet.

Die Auftreffgeschwindigkeit ist zunächst durch die Fallhöhe des Aufbaus definiert; die Einspannlänge ergibt hieraus die Dehnrage. Die detailliertere Betrachtung der physikalischen Gegebenheiten verdeutlicht, dass während des Prüfvorgangs keine konstante Dehngeschwindigkeit vorliegt, sondern die anfängliche, durch Fallhöhe und Einspannlänge vorgegebene Dehngeschwindigkeit durch den Fadenzug reduziert wird. Gleichzeitig beschleunigt das Schlagwerk – und damit die untere Klemme – weiter. Entscheidende Parameter sind zum einen apparatetechnisch (Masse des Fallgewichts) zum anderen materialspezifisch, namentlich Modul und Höchstzugkraftdehnung, die unter den angestrebten Extrembedingungen wiederum durch die Dehngeschwindigkeit beeinflusst werden.

3.1.1 Annahme eines stoßfreien Prozesses

In erster Näherung des Fallgewichtsversuchs erfolgt die Fadenbeanspruchung durch ein Fallgewicht, das den Faden mit *konstanter* Geschwindigkeit v (analog der Abzugsgeschwindigkeit beim Zugprüfversuch) bis zum Zerreißen dehnt (Abbildung 2). Bei einem idealen Prüfverlauf, d.h. bei ungestörter Bewegung des Fallgewichtes, sind die grundlegenden Parameter hierbei die Fallhöhe h , die Beschleunigung (Erdbeschleunigung g) sowie die Einspannlänge l .

Es gilt nach dem Weg-Zeit-Gesetz $v = g \cdot t$ und $h = \frac{1}{2} g \cdot t^2$,

woraus folgt: $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$ (1)

Die Dehngeschwindigkeit ist damit: $\dot{\epsilon} = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{l}$ (2)

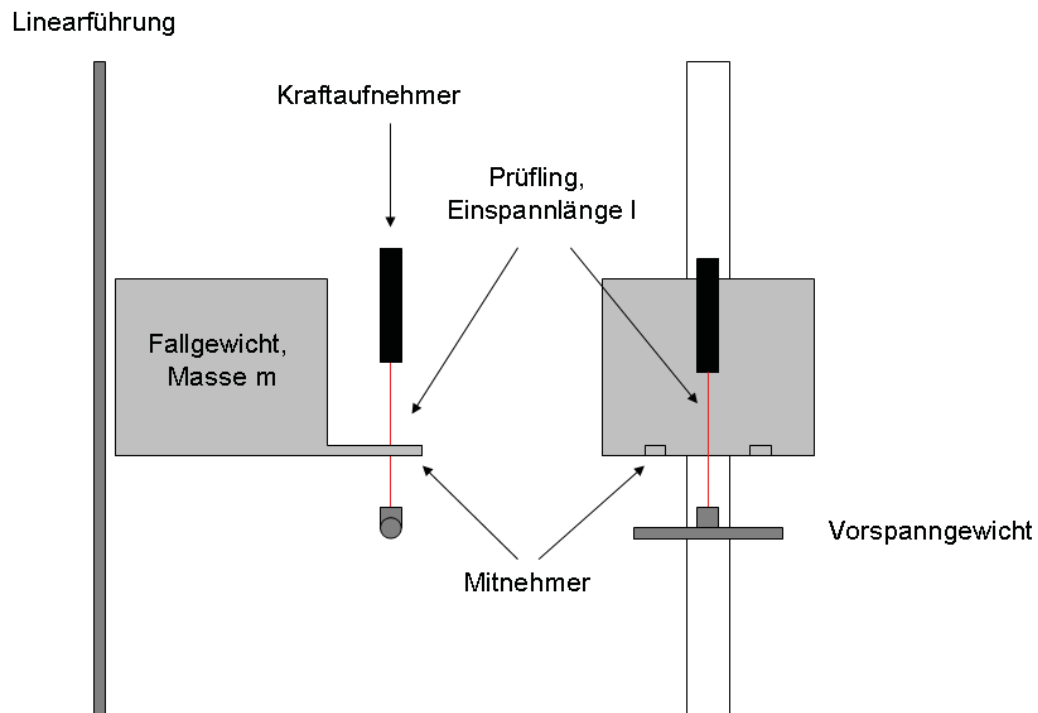


Abbildung 2: Grundsätzlich Aufbau des Fallgewichtsprüfstands.

Tabelle 3: Theoretisch erreichbare Dehnraten [s^{-1}] unter Annahme der experimentell umgesetzten Parameter (vgl. Kapitel 3.2)

		Fallhöhe [m]		
		0,505	1,83	2,4
l [m]	0,02	160,5	301,2	344,5
	0,03	108,0	201,4	230,2
	0,04	81,8	151,4	173,0
	0,05	66,0	121,5	138,7

In den vorliegenden experimentellen Untersuchungen (vgl. hierzu Kapitel 3.2) wurden Fallhöhen zwischen 0,5 und 2,4 m sowie Einspannlängen zwischen 20 und 50 mm realisiert. Damit ergeben sich theoretisch erreichbare Dehnraten zwischen 66 und 345 s⁻¹ (vgl. Tabelle 3).

Die Besonderheiten der Fallgewichtsprüfung führen zu verschiedenen Abweichungen der realen Gegebenheiten des Prüfvorgangs von dieser idealisierten Betrachtung:

- (i) Die Vorspannkraft ist experimentell nicht mehr durch Gewichte oder Prüfmaschine vorgegeben (und einstellbar) sondern durch die festgelegte Masse von unterer Klemme mit Querjoch (im vorliegenden Experiment 82,4 g) vorgegeben. Die entsprechende Vorspannkraft von 80,8 cN ist dabei für alle Prüflinge gleich und entspricht nicht der Vorspannung, die bei der Kraft-Dehnungsmessung an Garnen nach DIN EN ISO 2062 [18] *feinheitsbezogenen* mit 0,5 cN/tex vorgegeben ist. Aus dem quasi-statischen Kraft-Dehnungsverhalten der Garne ist eine spezifische Vordehnung abzuleiten, die auch die Einspannlänge für jedes Garn korrigiert.
- (ii) Die gravitationsgetriebene, nicht maschinell vorgegebene, Bewegung der beteiligten Körper bedingen einen dynamischen Verlauf der Dehn- oder Abzugsgeschwindigkeit, d.h. die Dehnrate ändert sich während der Fadendehnung infolge (a) weiterer gravitationsgetriebener Beschleunigung und (b) der Gegenwirkung der Fadenzugkraft.

Beier und Schollmeyer [10] geben an, dass Messungen an hochfixierten PET-Multifilamentgarnen eine um etwa 30 % geringere Fallgeschwindigkeit zeigen als die nach Gl.(1) berechnete. Zur Beschreibung dieses komplexen Verhaltens sind Energie- und Impulsbilanzen sowie eine Betrachtung von Stoßphänomenen zu berücksichtigen. Hierzu werden mehrere Modelle diskutiert:

Gekoppelte Systeme ohne Berücksichtigung von Stoßbeiträgen:

Beier und Schollmeyer interpretieren die Gegebenheiten nach dem Aufprall des Fallgewichts als Kinematik eines „gekoppelten Systems“; hierbei bewegen sich nach dem Aufprall Fallgewicht und Klemme/Querjoch gemeinsam. Die Autoren leiten aus einer Impulsbilanz (Abbildung 3) den zeitabhängigen Verlauf der Dehngeschwindigkeit *während* des Dehnvorgangs (Startpunkt: $t_0 = 0$) ab:

$$v(t) = \int_{t_0}^t a(t') dt' = \sqrt{2gh} + g \cdot (t - t_0) - \frac{1}{m} \int_{t_0}^t F_{KD}(t') dt' \quad (3)$$

Der erste Term entspricht hierbei der Auftreffgeschwindigkeit v_0 nach Gl. (1), der zweite Term gibt die weitere Beschleunigung des Gewichts an, und der dritte beschreibt das Abbremsen des Gewichts durch die momentane Zugkraft $F_{KD}(t')$ des gedehnten Prüflings. Hierbei ist m die Masse des Fallgewichts.

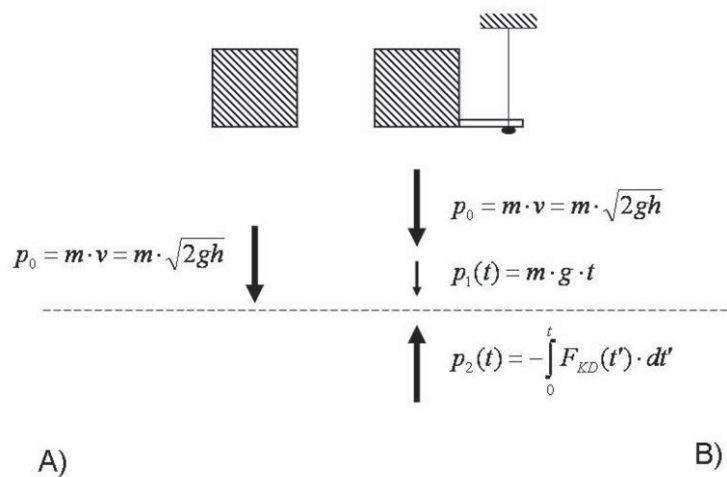


Abbildung 3: Die von Beier und Schollmeyer angenommene kinetische Situation des Fallgewichts (A) unmittelbar *vor* dem Zugvorgang und (B) *während* des Zugvorgangs. Die Impulsbeiträge $p_1(t)$ und $p_2(t)$ beschreiben die (vernachlässigbare) weitere Beschleunigung und das Abbremsen durch die Zugkraft des Fadens $F_{KD}(t)$. NB: Im Fall (B) ist der Startpunkt des Zuges als $t = 0$ definiert.

Die Beschreibung durch Beier und Schollmeyer berücksichtigt allerdings nicht den Massenbeitrag von Klemme/Querjoch nach dem Stoß und hält somit einer Bewertung der *Energiebilanz* nicht stand! Ungeachtet der physikalischen Signifikanz der Interpretation der stoßfreien Kopplung der Massen nimmt die korrekte Formulierung des Geschwindigkeitsverlaufs aus der Energie- und Impulsbilanz die Form

$$v(t) = \int_{t_0}^t a(t') dt' = \frac{m}{m'} \cdot \sqrt{2gh} + \frac{m}{m'} \cdot g \cdot (t - t_0) - \frac{1}{m'} \int_{t_0}^t F_{KD}(t') dt' \quad (4)$$

an. Hierin ist m' die Summe der Massen des Fallgewichts und von Klemme/Querjoch.

Grundsätzlich ist in beiden Modellen die (experimentelle) Kenntnis der Kraft-Dehn-Kurve $F_{KD}(t')$ erforderlich, um die dynamische Entwicklung und somit die effektive Abweichung der Dehngeschwindigkeit vom eingestellten Sollwert zu ermitteln. Zur Verdeutlichung des Einflusses des realen Bewegungsablaufs sind in Abbildung 4 die Geschwindigkeitsverläufe aufgetragen, die sich anhand eines experimentell bestimmten Kraftverlaufs aus den obigen Annahmen Gl.(1), Gl.(3) und Gl.(4) ergeben. Der Verlauf Zugkraft als Funktion der Zeit wurde an Garn A (PA 6.6 235 dtex f72) bei einer Fallhöhe $h = 505$ mm und einer Einspannlänge $l = 20$ mm aufgezeichnet. Die theoretische Dehnrage beträgt hierbei 160 s^{-1} .

Die theoretische Betrachtung zeigt, wie sehr die korrekte Beschreibung/Erfassung des Bewegungsablaufs von Fallgewicht bzw. der unteren Klemme den Verlauf der abgeleiteten Kraft-Dehn-Kurve und damit die Messgenauigkeit bestimmt.

Zusammenfassend zeigen alle diskutierten Modelle Mängel in der Beschreibung der realen Gegebenheiten: Die Annahme einer konstanten Abzugsgeschwindigkeit berücksichtigt nicht simultan wirkende Kräfte, die Beschreibung nach Beier und Schollmeyer ergibt zwar einen stetigen Geschwindigkeitsverlauf des Fallgewichts, verletzt aber die Energiebilanz. Die Modellierung eines gekoppelten Systems nach Gl. (4) schließlich ist mit einer signifikanten Sprungfunktion in der Geschwindigkeit des Fallgewichtes im Moment des Auftreffens auf die untere Klemme verbunden. Es ist zu diskutieren, inwieweit dies realen Abläufen entsprechen kann.

3.1.2 Annahme eines initialen Stoßes

Die (relativ unrealistische) Modellierung eines gekoppelten Systems mit einer signifikanten Sprungfunktion in der Geschwindigkeit des Fallgewichtes (vgl. Gl. (4)) kann verbessert werden, wenn Stoßprozesse berücksichtigt werden. Dies entspricht auch der tatsächlichen Beobachtung z.B. durch High-Speed Kameras.

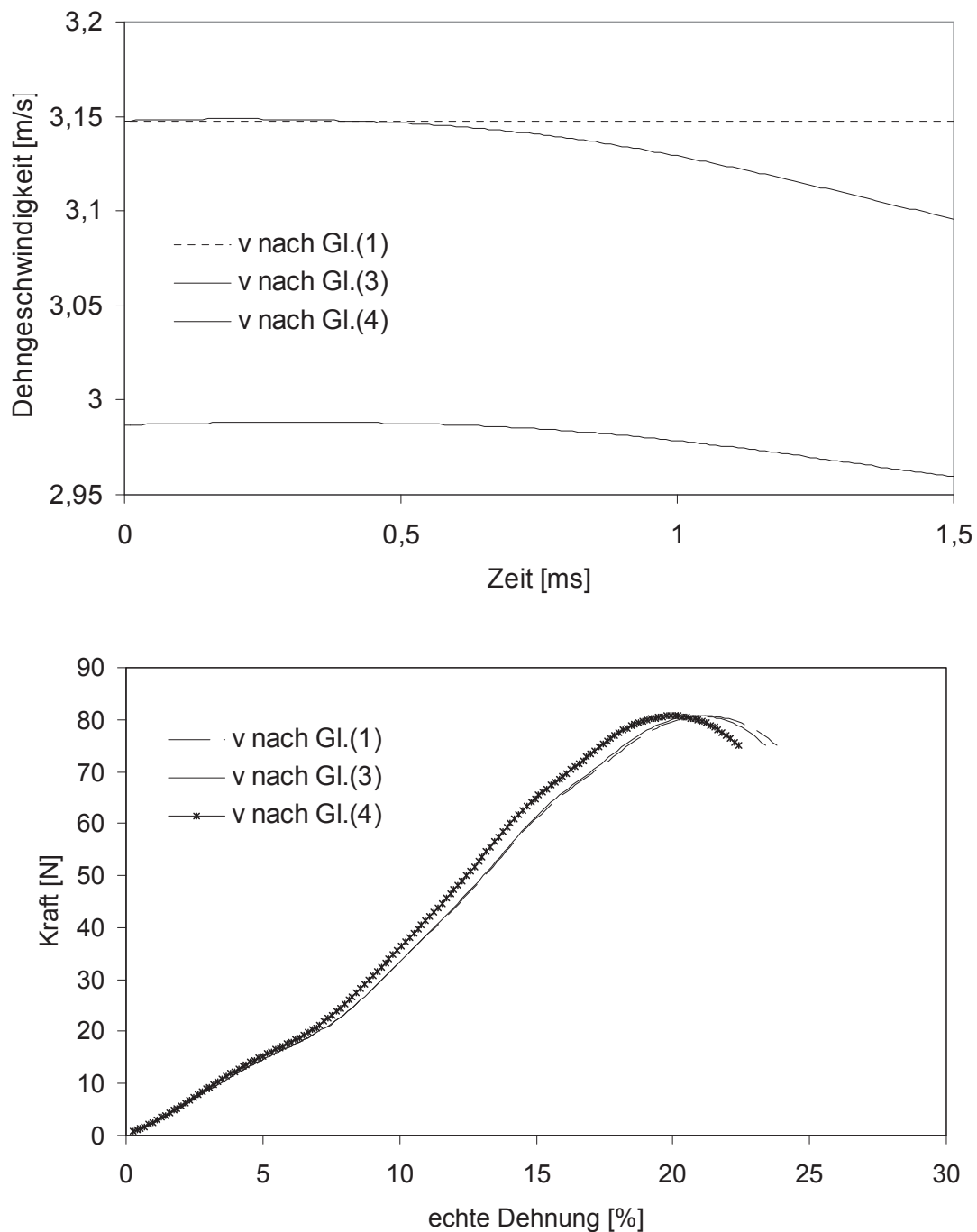


Abbildung 4: Geschwindigkeitsverlauf (oben) und Kraft-Dehn-Verlauf (unten) während des Dehnversuchs von Garn A (Fallhöhe 505 mm, nominelle Einspannlänge 20 mm) unter Annahme einer konstanten Dehngeschwindigkeit nach Gl.(1) sowie zeitabhängigen Dehngeschwindigkeiten gemäß den Modellen Gl.(3) und Gl.(4). Die Modelle Gl.(3) und Gl.(4) berücksichtigen den tatsächlich *gemessenen* Kraftverlauf.

Nimmt man einen Stoß des Fallgewichts auf die untere Klemme an, bewegen sich beide Körper nach dem Stoß unabhängig mit individueller Geschwindigkeit (ungekoppeltes System). Der Stoß bestimmt hierbei die *Anfangsgeschwindigkeit* der unteren Klemme, im folgenden als v' bezeichnet. Der weitere Verlauf kann in Analogie zu Gl.(3) bzw. Gl.(4) zunächst durch

$$v(t) = v' + g \cdot (t - t_0) - \frac{1}{m'} \cdot \int_{t_0}^t F_{KD}(t') dt' \quad (5)$$

beschrieben werden. Es sei noch einmal betont, das Gl.(5) die Bewegung der Klemme beschreibt und nicht die des Fallgewichts. Die Beschreibung ist zu korrigieren, wenn die Klemme durch den Fadenzug soweit gebremst wird, dass es zu einem zweiten Kontakt (Stoß) mit dem Fallgewicht kommt.

Nachfolgend seien die denkbaren Varianten des Stoßprozesses diskutiert.

Elastischer Stoß

Beim idealen elastischen Stoß erfolgt keine Verformungsarbeit zwischen den Partnern, d.h. die Summe der kinetischen Energien vor dem Stoß ist gleich der Summe der kinetischen Energien nach dem Stoß. Im gegebenen Fall ist die gestoßene Masse (untere Klemme) ruhend. Die Anfangsgeschwindigkeit der gestoßenen Masse m' ist durch das Verhältnis der Massen der Stoßpartner gegeben. Es gilt

$$v' = \frac{2 \cdot m}{m + m'} \cdot v_0. \quad (6)$$

Bei den gegebenen Massenverhältnissen der vorliegenden Anordnungen erhalte die untere Klemme unter diesen Umständen eine um Anfangsgeschwindigkeit, die 86 % höher ist als die Aufprallgeschwindigkeit des Fallschlittens.

Realer Stoß / Kraftstoß

Im tatsächlichen Experiment kann im Gegensatz zu den Gegebenheiten des ideal elastischen Stoßes durchaus von (reversiblen) Verformungen ausgegangen werden, die durch die Elastizität der Bauteile erlaubt sind. Dieser reale Stoß ist eine Mischform aus

elastischem und plastischem Stoß und wird gekennzeichnet durch einen Stoßparameter k , der ein Maß für die Inelastizität ist; beim elastischen Stoß gilt $k = 1$, beim inelastischen $k = 0$.

Im gegebenen Fall eines bewegten und eines ruhenden Stoßpartners ergibt sich Anfangsgeschwindigkeit der gestoßenen Klemme:

$$v' = \frac{m}{m + m'} \cdot (1 + k) \cdot v_0 \quad (7)$$

bzw. für die Verformungsarbeit:

$$k^2 = 1 - \frac{2 \cdot (m + m')}{m \cdot m'} \cdot \frac{1}{v_0^2} \cdot \Delta E \quad (8)$$

Der Einfluss des Stoßparameters auf die Anfangsgeschwindigkeit der unteren Klemme nach dem Stoß ist in Abbildung 5 für das o.g. Beispiel dargestellt.

Es bleibt allerdings bei den Gegebenheiten des Fallgewichtsprüfstand festzuhalten, dass k analytisch und auch messtechnisch nicht oder nur schwer zu bestimmen ist. Prinzipiell bleibt nur die vollständige Aufzeichnung der Klemmen- bzw. Abzugsgeschwindigkeit $v(t)$ oder die Einzelpunktmessung zu bestimmten Zeiten, wenn in bester Näherung der Geschwindigkeitsverlauf

$$v(t) = \frac{m}{m + m'} \cdot (1 + k) \cdot v_0 + g \cdot (t - t_0) - \frac{1}{m'} \cdot \int_{t_0}^t F_{KD}(t') dt' \quad (9)$$

angenommen wird, der aus den Gln.(5) und (7) abgeleitet werden kann. Sowohl v_0 als auch $F_{KD}(t')$ sind hierbei experimentell zu bestimmen.

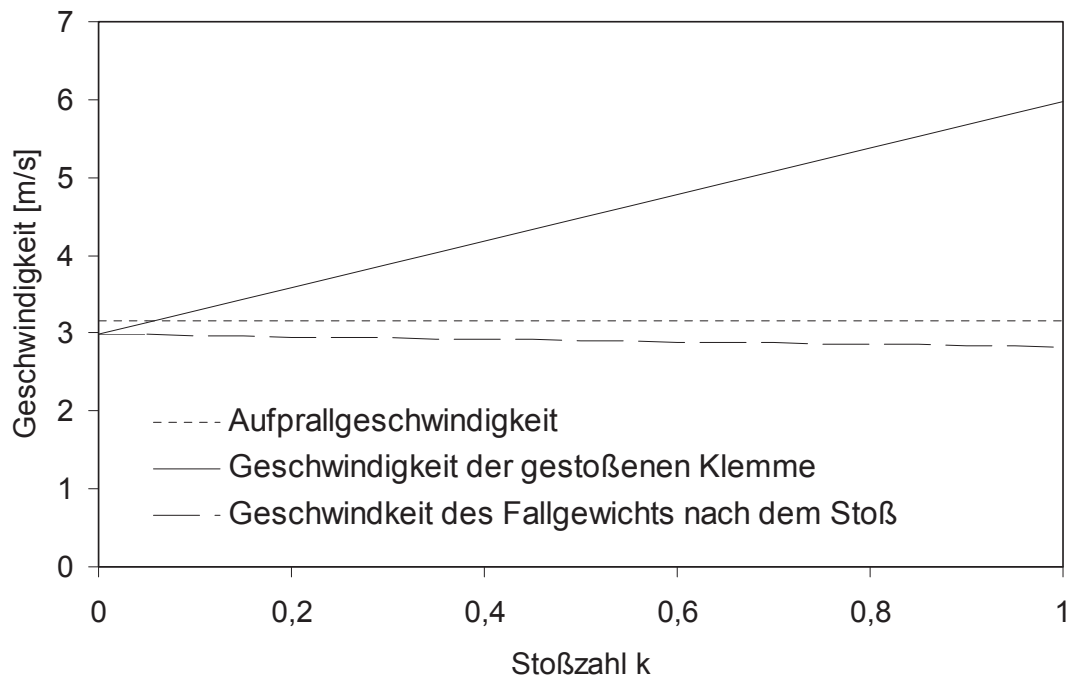


Abbildung 5: Anfangsgeschwindigkeit der unteren Klemme bei einem realen Stoß als Funktion des Stoßparameters. Angenommen ist eine Aufprallgeschwindigkeit gemäß Gl.(1) mit den Parametern Fallhöhe $h = 505$ mm und einer Einspannlänge $l = 20$ mm.

3.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise

Der Fallgewichtsprüfstand wurde für die vorliegenden Untersuchungen speziell aufgebaut. Die in Abbildung 6 gezeigte Konstruktion setzt sich aus zwei Grundkomponenten zusammen, zum einen dem „Fallschlagwerk“, zum anderen der eigentlichen Messanordnung (Probenaufnahme, Sensorik).

Das Fallschlagwerk ist als Fallschlitten („Fallgewicht“) ausgeführt, der beweglich auf einer vertikal ausgerichteten Linearfahrbahn montiert ist. Der Fallschlitten weist – wie in Abbildung 2 skizziert – zwei Mitnehmernasen auf, die durch Kontakt mit der unteren Garnklemme den Zugversuch einleiten. Die Masse des Schlittens beträgt 1,53 kg. Die Startposition des Fallschlittens, die die effektive Fallhöhe bestimmt, wird durch eine elektromagnetische Verriegelung definiert.



Abbildung 6: Gesamtansicht des Fallgewichtsprüfstands. Der Fallschlitten ist im oberen Bildbereich zu erkennen; er befindet sich - durch die elektromagnetische Auslösevorrichtung fixiert – in seiner Ausgangsposition (Fallhöhe) vor dem Reißversuch. Die eigentliche Garnprüfvorrichtung ist im unteren Bildbereich erkennbar.

Aufgrund der baulichen Gegebenheiten ist die maximale Fallhöhe 250 cm, in den dargestellten Experimenten wurde mit Fallhöhen 50,5, 187 und 240 cm gearbeitet.

Die eigentliche Messanordnung – Garnprüfvorrichtung – stellt sich als miniaturisierte Zugprüfmaschine dar. Sie ist in Abbildung 7 gezeigt. Der herkömmlichen Vorgehensweise entsprechend ist die obere Garnklemme am Kraftaufnehmer befestigt, der wiederum im oberen Querjoch fixiert ist. Als Kraftsensor wurde ein Piezosensor mit einer Empfindlichkeit von $-46,60 \text{ pC/N}$ eingesetzt. Der elektrischen Beschaltung entsprechend betrug das nutzbare Ausgangssignal – $12,5 \text{ mV/N}$. zeigt die Anordnung vor und nach dem Reißversuch.

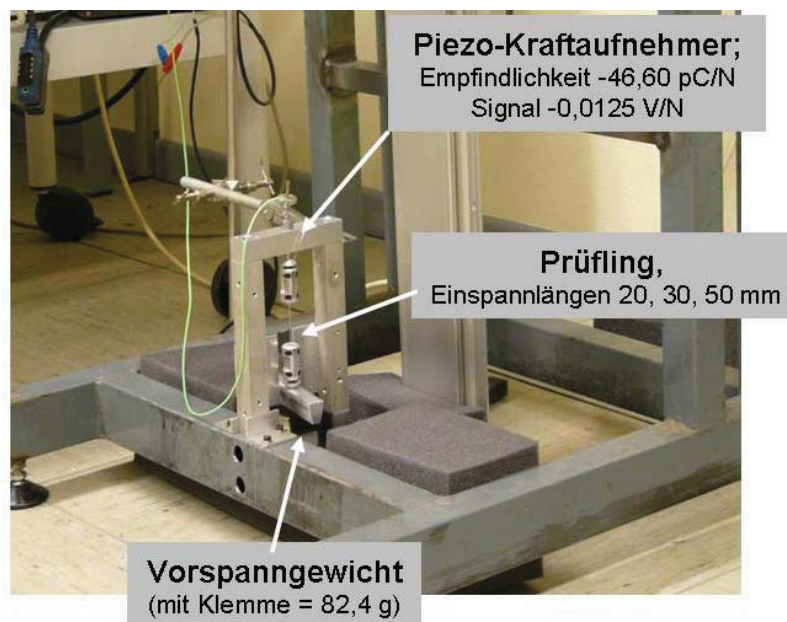


Abbildung 7: Vergrößerte Aufnahme der Messanordnung und ihrer Komponenten. Konzeptionell stellt sich die Anordnung als miniaturisierte Zugprüfmaschine dar. Im Unterschied zu konventionellen Prüfmaschinen ist die untere Garnklemme sowie das Vorspanngewicht frei hängend. Das Vorspanngewicht ist als Joch ausgeführt, das durch die Mitnehmer des Fallschlittens in Bewegung gesetzt wird.

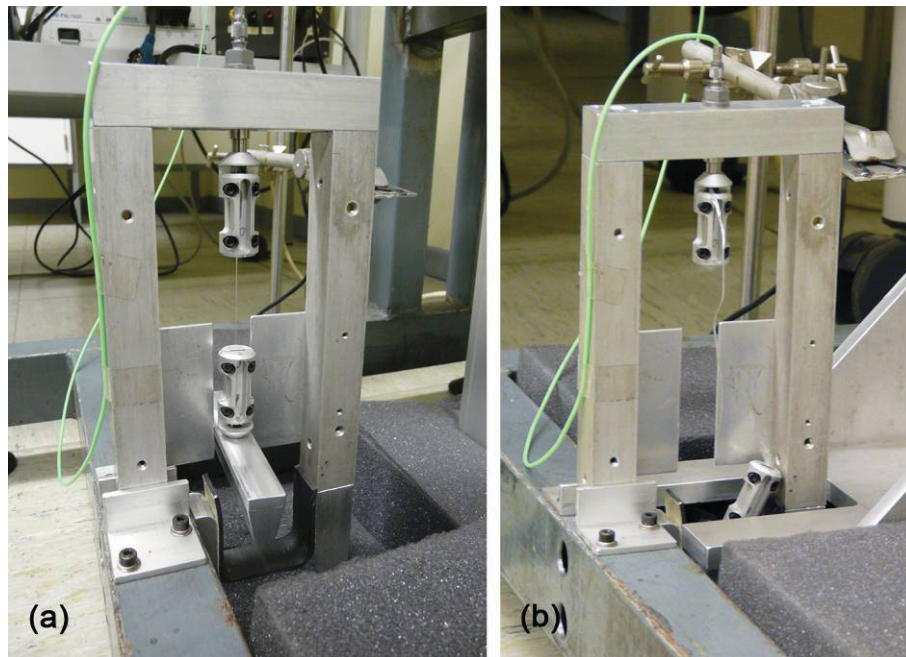


Abbildung 8: Detailaufnahme der messanordnung vor (a) und nach (b) dem Reißversuch. In der rechten Bildhälfte der Aufnahme (b) ist der Fallschlitten zu erkennen.

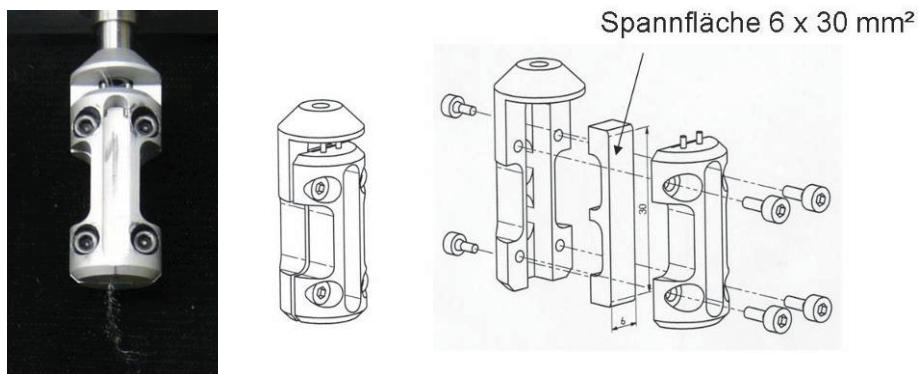


Abbildung 9: Photographische Aufnahme und Konstruktionszeichnung der speziell angefertigten Garnklemmen. Besondere Merkmale sind die aus Vulkolan ausgeführten Spannflächen, die eine besonders große Spannlänge aufweisen.

Der Prüfstand ist mit Klemmen versehen, die von der im projektbegeitenden Ausschuss vertretenen Fa. Textechno Herbert Stein GmbH & Co.KG, Mönchengladbach, speziell entwickelt und in Einzelfertigung aus Hochfestaluminium hergestellt wurden. Die Klemmen sind in Abbildung 9 dargestellt. Besondere Merkmale sind die aus Vulkolan ausgeführten Spannflächen, die mit 30 mm eine besonders große Spannlänge aufweisen. Die Konstruktion zielte zunächst auf eine möglichst geringe Masse der Klemmen ab, die auf 16 g reduziert werden konnte.

Grundsätzlich ist ein niedriges Klemmengewicht im Interesse des dynamischen Verhaltens in einer Hochgeschwindigkeitszugprüfung angestrebt. Aufgrund der speziellen Gegebenheiten der Fallgewichtsprüfung ist dies hier von untergeordneter Bedeutung, unter Umständen gar kontraproduktiv. Zum einen erfordert die Konzeption des Fallgewichtsprüfstand ein frei hängendes Vorspanngewicht, das gleichzeitig als Mitnehmer für den Fallschlitten dient (vgl. Abbildung 2). Die Masse dieses als Querjoch oder inverses T ausgebildeten Bauteils ist in der Regel hoch in Relation zum Klemmengewicht. Die Gesamtmasse von Klemme und Querjoch beträgt in der vorliegenden Ausführung 83 g. Diese vergleichsweise hohe Masse ist bei der speziellen Prüftechnik durchaus erwünscht, um den Eintrag von Signalschwingungen infolge eines stark elastischen Stoßes durch das auftreffende Fallgewicht zu mindern. In diesem Zusammenhang wird noch einmal auf die in Abschnitt 3.1 gemachten Betrachtungen verwiesen.

Als weitere Besonderheit dieser Anordnung folgt aus der grundlegenden Konzeption eine Vorspannkraft, die im Gegensatz zur DIN EN ISO 2062 unabhängig von feinheit des Garnprüflings ist. Bei der gegebenen Masse der unteren Klemme und des daran befestigten Querjochs ist die Vorspannkraft *immer* 80,8 cN und entspricht nicht der Vorspannung, die bei der Kraft-Dehnungsmessung an Garnen nach DIN EN ISO 2062 *feinheitsbezogenen* mit 0,5 cN/tex vorgegeben ist. Aus dem quasi-statischen Kraft-Dehnungsverhalten der Garne ist eine spezifische Vordehnung abzuleiten, die auch die Einspannlänge und den Nullpunkt der Kraft-Dehnkurve für jedes Garn korrigiert. Für das Beispiel einer eingestellten Einspannlänge von 20 mm zeigt die Abbildung 10 die effektiven Vorspannkraften und die tatsächlich resultierenden Einspannlängen l'.

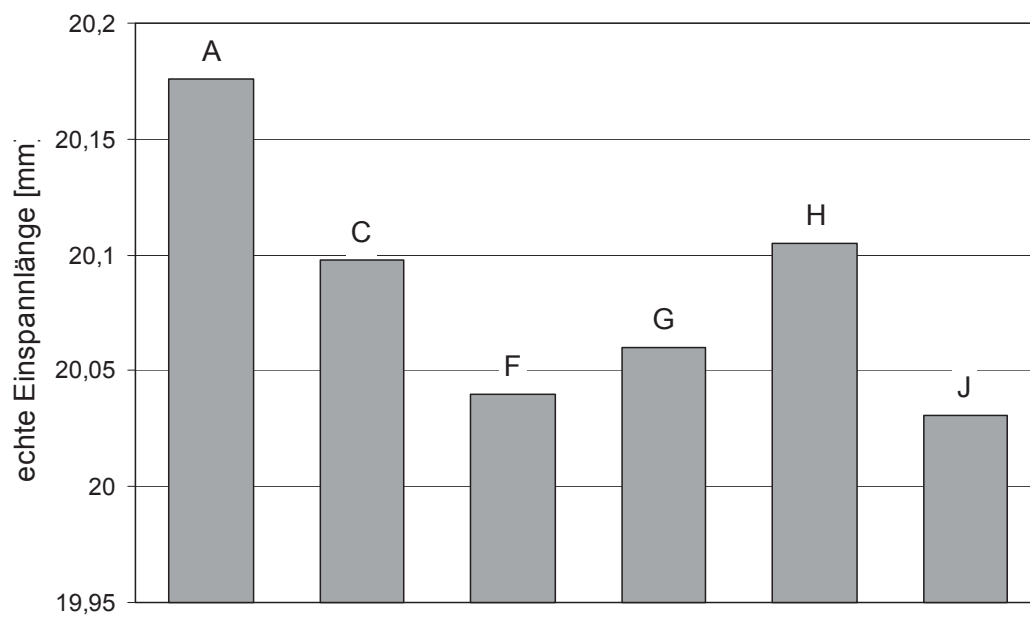
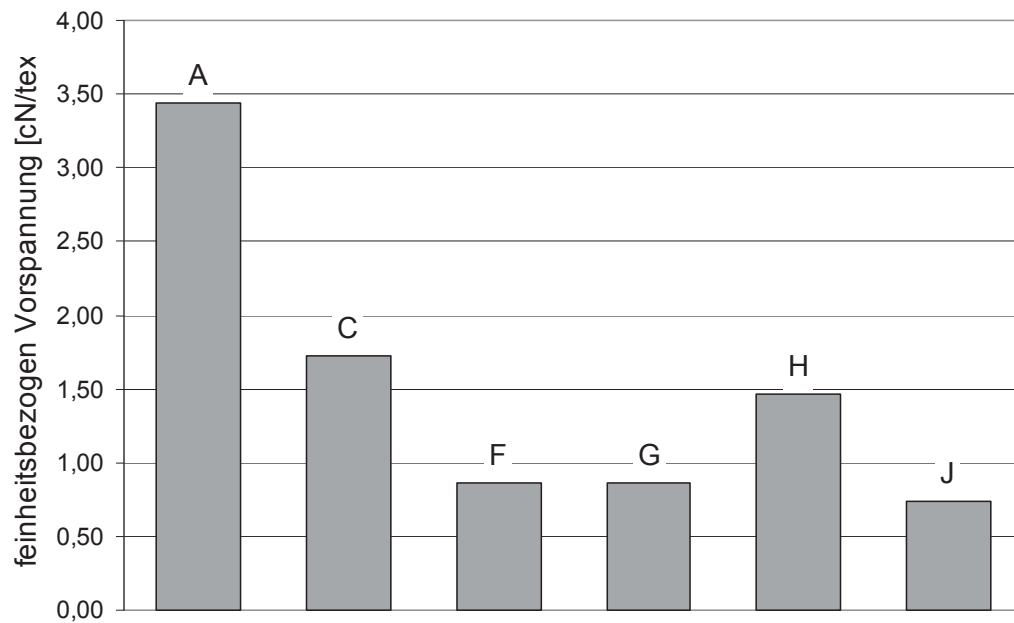


Abbildung 10: Zum Einfluss des Messprinzips auf die feinheitsbezogene Vorspannkräfte (oben) und die effektive Einspannlänge (unten), hier gezeigt für eine nominelle Einspannlänge von 20 mm.

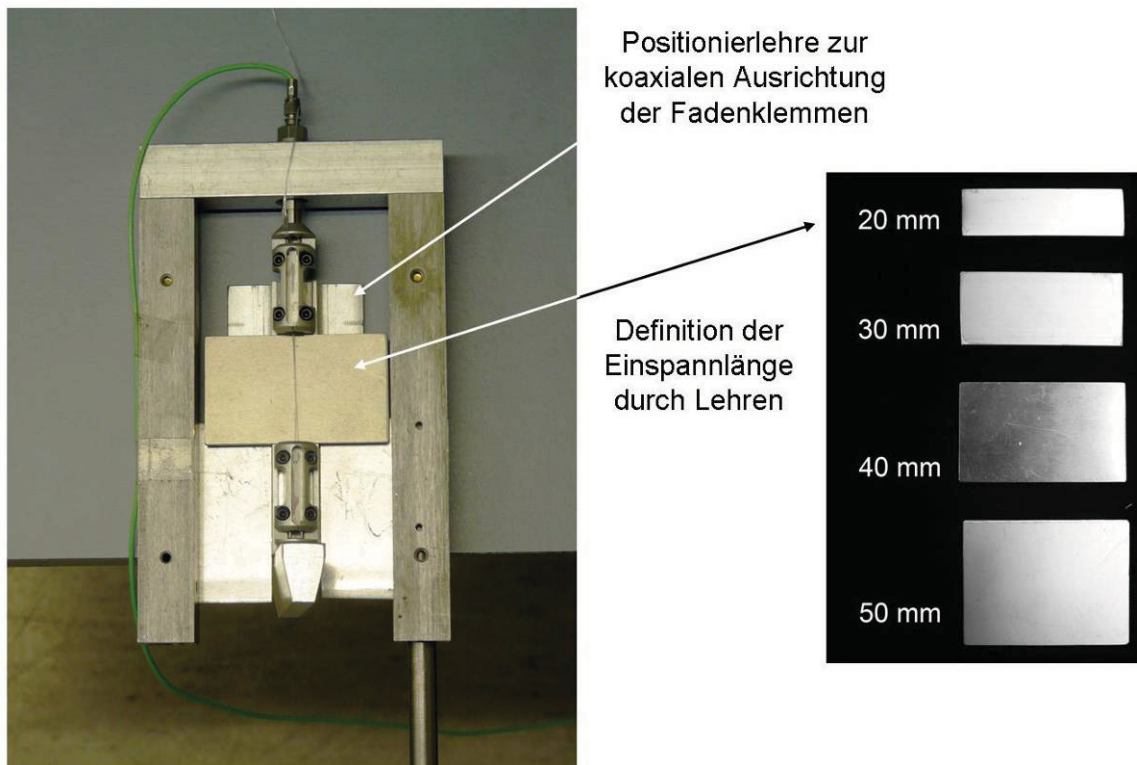


Abbildung 11: Vorgehensweise beim Rüsten der eigentlichen Messanordnung, die hierfür dem Fallgewichtsprüfstand entnehmbar gestaltet ist und auf dem Labortisch befestigt werden kann. Die Klemmen werden zur koaxialen Ausrichtung in einer Prismenlehre eingelegt. Zur Sicherstellung der korrekten Einspannlänge (nominelle Einspannlänge werden zwischen die Klemmen Abstandslehren (Abbildung rechts) positioniert.

Für das korrekte Rüsten der Messanordnung wurden spezielle Lehren angefertigt, die die koaxiale Lage der Klemmen und die exakte Einhaltung der Einspannlänge definieren. Die vorliegenden Versuche wurden mit Einspannlängen von 20, 30, 40 und 50 mm durchgeführt, für die entsprechende Lehren vorlagen. Im Interesse der einfachen Handhabung wurde der Prüfstand so konstruiert, dass die eigentliche Messanordnung zum Rüsten komplett entnommen werden kann. Der Rüstvorgang ist in Abbildung 11 verdeutlicht. Die Fixierung des Prüflings in den Klemmen wird durch jeweils vier Inbusschrauben M2 sichergestellt. Zur Definition des (gleichmäßigen) Anzugsmoments der Inbusschrauben wurde ein Akkuschrauber mit Momentbegrenzung eingesetzt.

Bei der Messung wird der Signalverlauf mittels des Piezosensors mit Hilfe eines Speicheroszilloskops zeitabhängig aufgezeichnet. Die Aufzeichnung wird durch ein

Triggersignal gestartet, dass durch den Durchlauf des Fallschlittens an einem Hallgeber erzeugt wird.

Für einen Messpunkt – d.h. Messung eines speziellen Garntyps bei einer Fallhöhe und einer Einspannlänge - wurden durchweg 10 einzelne Reißversuche durchgeführt. Die entsprechenden Signaltransienten (Ausgangssignal als $f(t)$) werden nachfolgend zunächst mathematischen Verfahren zur Glättung unterzogen. Hierzu hat sich im Rahmen der Untersuchungen gleitende Mittelwertbildung mit Binomialfilter - entsprechend einer gaussförmigen Gewichtung in einem Intervall von $-N/2$ bis $+N/2$ Stützpunkten um den einzelnen Wert - bewährt. Wie in Abbildung 12 dargestellt erfolgt je nach Filterkernel N eine zunehmende Glättung, aber auch eine gewisse Verfälschung des Kurvenverlaufs (die rot gezeichnete Kurve ist der ungefilterte Signaltransient. Die besten Ergebnisse wurden mit einem Filterkernel $N = 150$ erhalten.

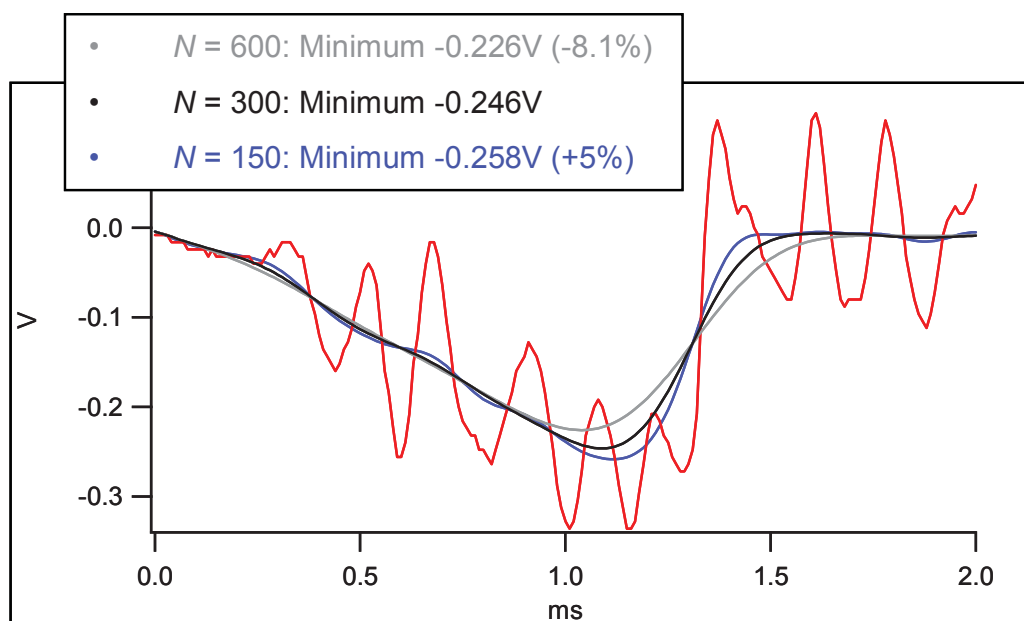


Abbildung 12: Zur Weiterverarbeitung des vom Piezosensor aufgezeichneten Signaltransienten. Die rot gezeichnete Kurve gibt den ungefilterten Signalverlauf an, die weiteren Kurven zeigen den Signalverlauf nach Glättung durch gleitende Mittelwertbildung mit Binomialfilter.

Nachfolgend erfolgten die rechnerische Mittelung der 10 Transienten und die Umrechnung dieser Kurve in eine Kraft-Zeit-Kurve.

Die Ermittlung der Kraft-Dehn-Kurven erfolgt rechnerisch aus dem Kraft-Zeit-Verlauf. In der ersten Projektphase basierte diese auf der theoretischen *Aufprall*geschwindigkeit des Fallschlittens (vgl. Gl.(1)). Wie in Abschnitt 3.1 ausgeführt, beschreibt diese den tatsächlichen Bewegungsablauf aber nur unzureichend.

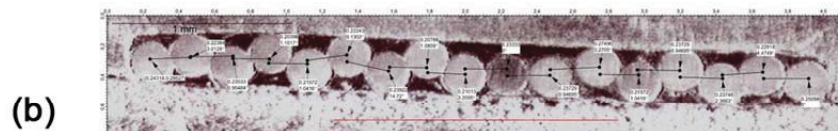
Im weiteren Verlauf der Untersuchungen wurde daher eine faseroptische Lösung zur Bestimmung der Tatsächlichen Abzugsgeschwindigkeit der unteren Klemme entwickelt. Das verfolgte Konzept stellt sich als Führung der unteren Klemme dar, in die eine mehrstufige, faseroptische Lichtschranke integriert ist (Abbildung 13a bzw. b). Die Führung ist als Anordnung zweier Halbschalen ausgeführt, durch die sich die untere Klemme während des Zug- bzw. Reißversuchs frei bewegen kann. In einer der beiden Halbschalen ist eine Beleuchtungseinheit (Halogenlampe) vorgesehen, deren Licht durch eine faseroptische Detektionseinheit aufgenommen wird, die in die zweite Halbschale integriert ist. Die Detektionseinheit ist als lineare Anordnung von 17 Lichtleitfasern (Durchmesser ca. 0,2 mm) ausgeführt. Diese werden in zwei Gruppen alternierend mittels Photodioden ausgelesen. Die Gesamtlänge der Faseranordnung beträgt 2,75 mm.

Ein typischer Signalverlauf beim Durchlauf der unteren Klemme ist in Abbildung 13c dargestellt. Aus der Steigung der Kurve und der bekannten Gesamtlänge der Faseranordnung kann die Klemmengeschwindigkeit, d.h. Dehngeschwindigkeit bestimmt werden. Es sei darauf hingewiesen, dass der betrachtete Weg der Klemme bei einer Einspannlänge von 20 mm einer Dehnung von 13,75 % entspricht, also einen erheblichen Teil des effektiven Dehnwegs überdeckt. Entsprechend kann aus dem Signal die *mittlere* Klemmen- bzw. Dehngeschwindigkeit *während* des Zugversuchs abgeleitet werden.

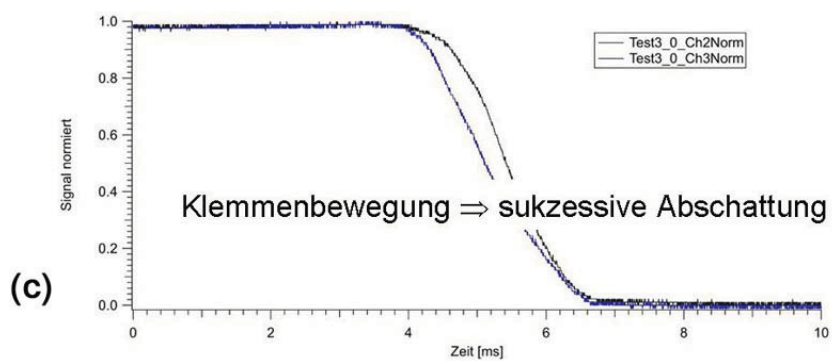
Systematische Messungen bei den gewählten Fallhöhen haben gezeigt, dass die mittlere Abzugsgeschwindigkeit in allen Fällen ca. 40 % unter der Geschwindigkeit liegt, die aus Gl.(1) abgeleitet wird. Dieser signifikante Unterschied – im Prinzip bereits von Beier und Schollmeyer [10] beschrieben – ist zum Teil Reibungsverlusten in der Linearführung des Fallschlittens zuzuschreiben. Es kann aber auch davon ausgegangen werden, dass die tatsächliche Kinematik beim Energieübertrag vom Fallschlitten auf die untere Klemme Geschwindigkeitsänderungen zur Folge (vgl. Abschnitt 3.1). Unter Berücksichtigung der tatsächlich gemessenen Abzugsgeschwindigkeiten stellen die erreichbaren Dehnraten wie in Tabelle 4 zusammengefasst dar.



Klemmenführung (Halbschalen) mit integrierter Beleuchtung (links) und Faserzeile (rechts)



Zeilenanordnung der Detektionsfasern



Signalverlauf beim Durchlauf der unteren Klemme

Abbildung 13: Zum Aufbau der faseroptischen Anordnung zur Messung der Abzugsgeschwindigkeit.

Tabelle 4: Tatsächlich erreichte Dehnraten [s^{-1}] auf Basis der gemessenen mittleren Abzugsgeschwindigkeit.

		Fallhöhe [m]		
		0,505	1,83	2,4
l [m]	0,02	100	190	205
	0,03	67	127	127
	0,04	50	95	103
	0,05	40	76	82

3.3 Beispielhafte Messergebnisse

Bereits in einer qualitativen Bewertung zeigen Signaltransienten typische Eigenarten der Messungen am Fallgewichtsprüfstand (vgl. Abbildung 14). Hier sind vor allem

- aufgelagerte Schwingungen,
- eine relativ breite Streuung der Reißdehnungen und
- ein langsamer Kurvenabfall nach dem Erreichen der Höchstzugkraft

zu nennen.

Aufgelagerte Schwingungen können zunächst auf einen signifikanten Beitrag eines elastischen Stoßes beim Aufschlag des Fallschlittens auf die untere Klemme hinweisen (vgl. Abschnitt 3.1). Wie durch die Gleichungen Gl.(6) und Gl.(7) beschrieben erfährt die untere Klemme beim Aufprall des Schlittens eine Anfangsgeschwindigkeit, die unter Umständen signifikant über der des Fallschlittens liegt. Je nach Geschwindigkeitsdifferenz und Fadenzugkraft holt der (aufgrund der Massenverhältnisse nur unwesentlich gebremste) Fallschlitten die untere Klemme wieder ein, so dass es zu einem zweiten Aufprall (Stoß) kommt. Einen derartigen Ablauf würde man allerdings in jeder Einzelmessung erwarten, was bei den aufgezeichneten Transienten nicht der Fall ist.

Eine weitere Ursache für aufgelagerte Schwingungen kann eine leichte Schräglage des Querjochs der unteren Klemme (Mitnehmer) sein. Hierdurch kommt es zu einem stoßartigen Energieeintrag durch die beiden Mitnehmernasen des Schlittens.

Die breite Streuung der maximalen Dehnung (Reißdehnung) kann auf Klemmenrutscher hindeuten. Es sei darauf hingewiesen, dass Vorversuche in einer konventionellen Zugprüfmaschine gezeigt haben, dass die Streuung der Einzelkurven im Rahmen von Kraft-Dehn-Messungen selbst unter diesen moderaten Dehnraten mit abnehmender Einspannlänge signifikant zunahm. Die systematische Analyse der Versagensbilder der Versuche am Fallgewichtsprüfstand konnte aber das übermäßige Auftreten von Klemmerutschern weder nachweisen noch widerlegen.

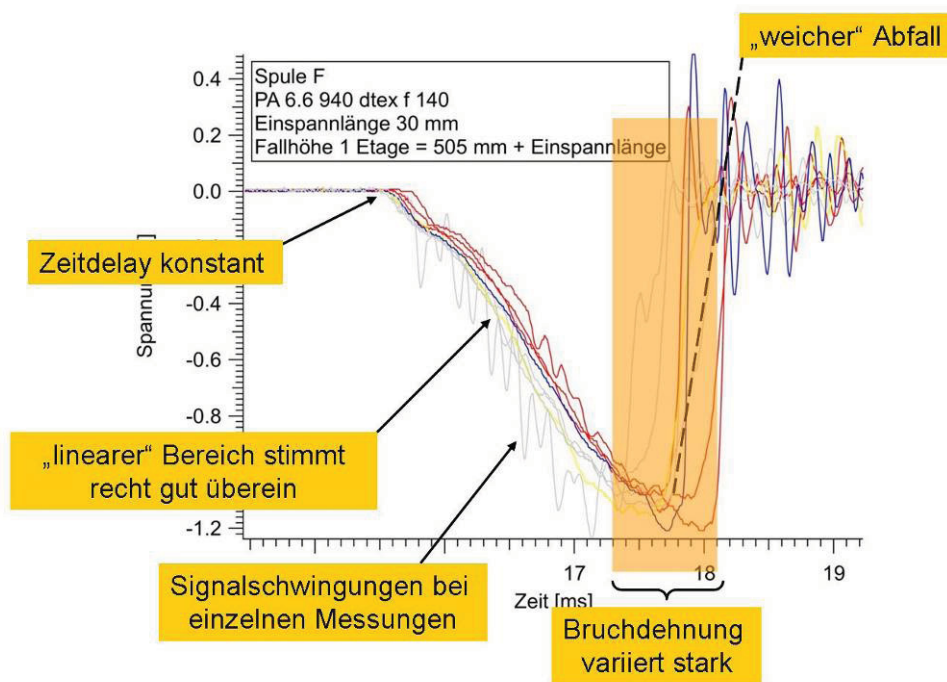


Abbildung 14: Beispielhafte Signaltransienten, wie sie an Garn F bei einer echten Dehnraten von 67 s^{-1} gemessen wurden. Die Anmerkungen verdeutlichen die Eigenarten der am Fallgewichtsprüfstand gemessenen Transienten.

Die letztgenannte Beobachtung des „weichen“ Abfalls der Signaltransienten deutet auf ein sukzessives Versagen der Einzelkapillaren hin. Hierzu wurden Untersuchungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera durchgeführt. Es wurde allerdings festgestellt, dass das verwendete Kamerasystem nicht in der Lage war, das Versagen der Kapillare individuell aufzulösen. Begrenzend hierbei war, dass bei der notwendigen Bildauflösung eine Bildfrequenz von 8000 fps erreicht werden konnte. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass der vollständige Reißversuch je nach Garn, Einspannlänge und Abzugsgeschwindigkeit zwischen 2 und 4 ms in Anspruch nimmt, die bei der genannten Bildfrequenz lediglich 16 bis 32 Einzelaufnahmen erlauben.

Aus den Transienten abgeleitete Kraft-Dehn-Kurven sind in Abbildung 15 gezeigt. Beispielhaft sind hier Daten dargestellt, die an Garn E (PA 6.6, 940 dtex f140) bestimmt. Fallhöhe und Einspannlänge betrugen hierbei 505 mm bzw. 20 mm. Infolge der Vorspannung beträgt hierbei die echte Einspannlänge 20,047 mm, entsprechend einer Vordehnung von 0,24 %. Die rechnerische Dehnrates beträgt unter diesen Konditionen 160 s^{-1} , auf Basis der tatsächlich ermittelten mittleren Abzugsgeschwindigkeit ist die echte Dehnrates im Mittel 100 s^{-1} .

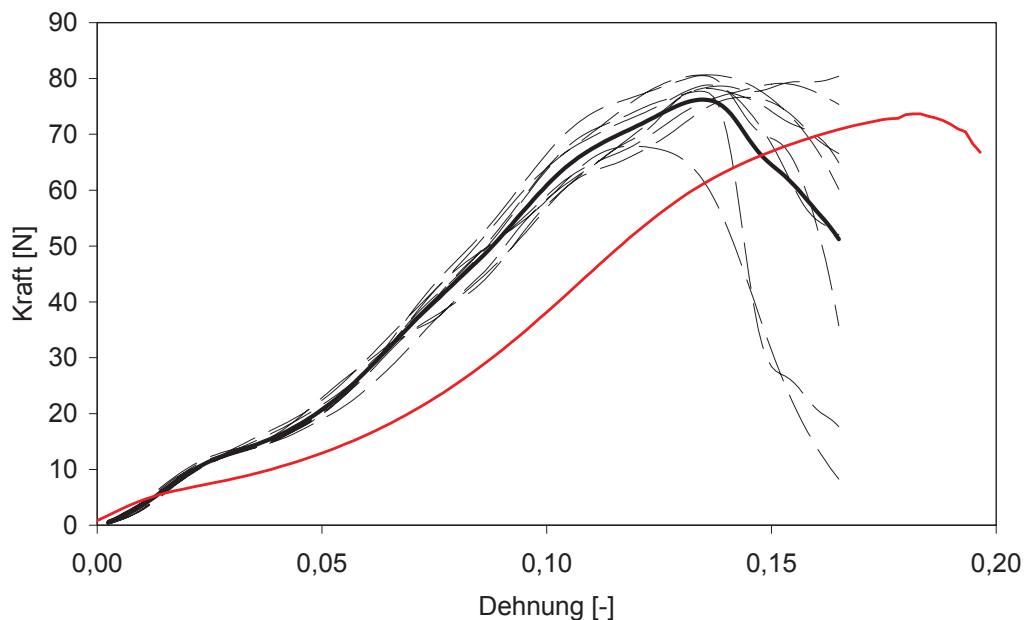


Abbildung 15: Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn E bestimmt wurden. Fallhöhe und Einspannlänge betrugen hierbei 505 mm bzw. 20 mm, die mittlere Dehnrates 100 s^{-1} . Dargestellt sind die Einzelmessungen (gestrichelt), die gemittelte Kraft-Dehn-Kurve (durchgezogen) sowie das Ergebnis der Messung nach DIN EN ISO 2062 (rot).

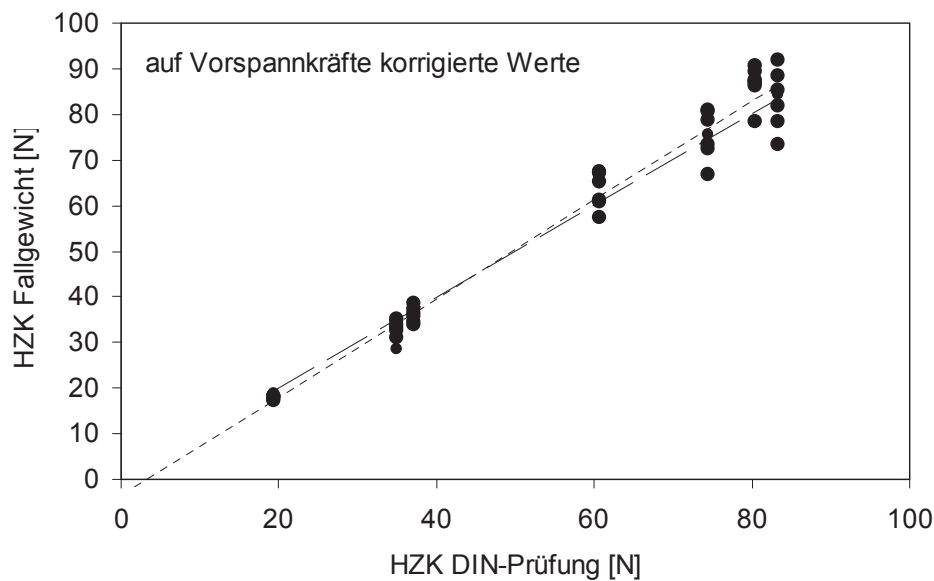


Abbildung 16: Auswertung aller gemessenen Kraft-Dehn-Kurven: Vergleich der nach DIN EN ISO 2062 gemessenen Höchstzugkräfte mit den am Fallgewichtsprüfstand gemessenen Werten (alle Garne, alle Dehnraten). Das Identitätsverhältnis ist gestrichelt dargestellt, der Fit an die experimentellen Daten gepunktet.

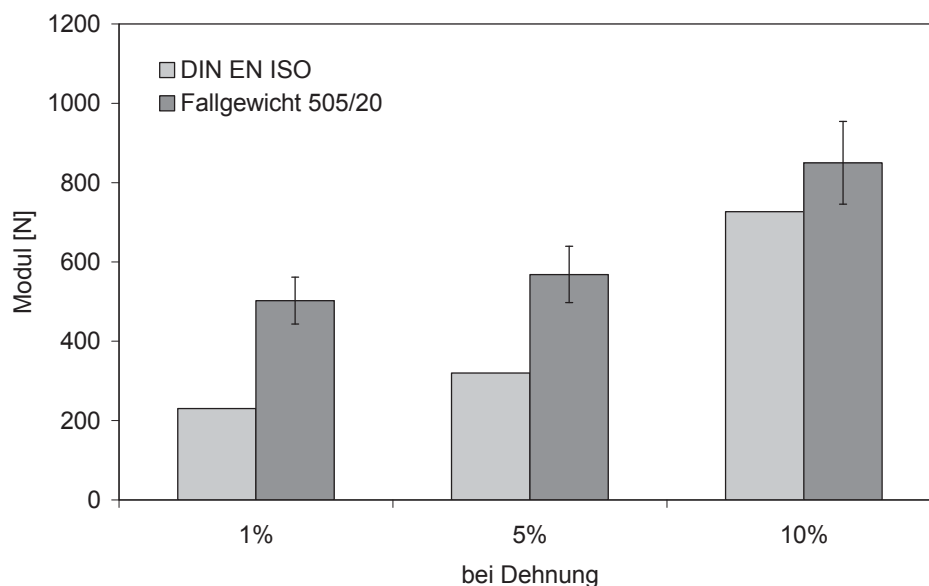


Abbildung 17: Auswertung von Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn E bestimmt wurden. Dargestellt sind die Modulwerte, die bei 1, 5 und 10 % bestimmt wurden; die Messungen erfolgten nach DIN EN ISO 2062 bzw. am Fallgewichtsprüfstand mit einer mittleren Dehnraten von 100 s^{-1} .

Auch unter Berücksichtigung der großen Variationen in den Einzelmessungen ist aus der gemittelten Kraft-Dehn-Kurve abzuleiten, dass

- die Höchstzugkräfte unverändert bleiben (vgl. auch),
- die Höchstzugkraftdehnung (Reißdehnung) infolge der signifikanten Erhöhung der Dehnrate abnimmt, und
- dementsprechend die Modulwerte zunehmen (Abbildung 17).

Dabei ist die Moduländerung besonders im Anfangsbereich der Kraft-Dehn-Kurve ausgeprägt. Eine Darstellung der Abhängigkeit der Module bei 1, 5 und 10 % Dehnung von der Dehnrate ist für das Garn E in Abbildung 18 gegeben. Grundsätzlich kann die Entwicklung der Module durch einen logarithmischen Trend (Fitkurve) beschrieben werden. Die Schwankung der Einzelwerte um die Trendkurve ist allerdings groß. Eine wesentlich Ursache hierfür ist die große Schwankung, die bei Messung mit extrem kurzer Einspannlänge beobachtet wird (vgl. Abbildung 15).

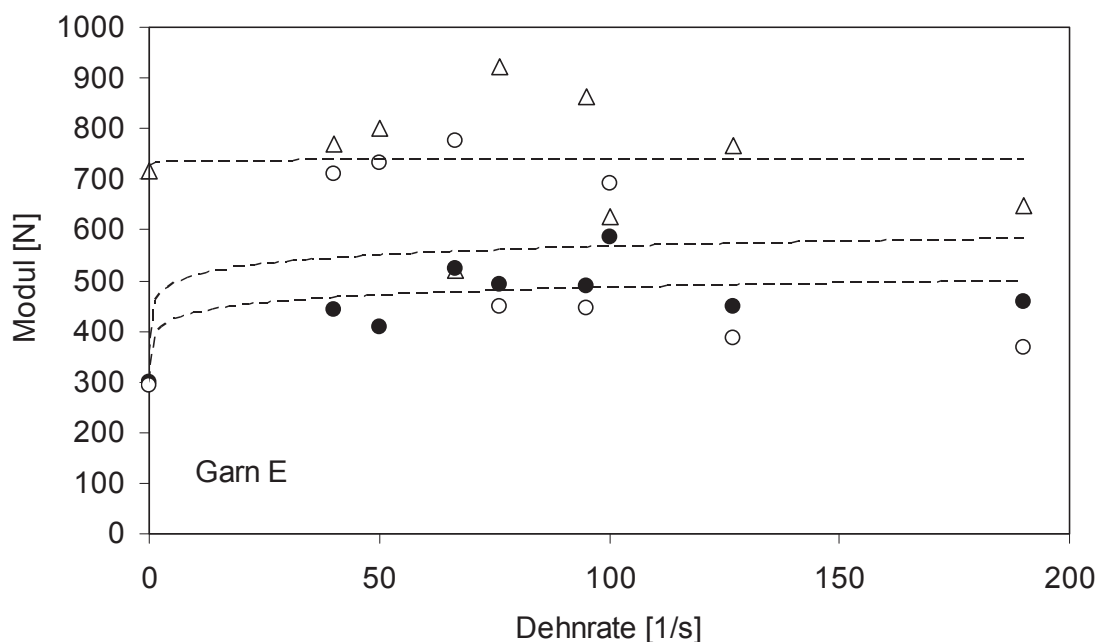


Abbildung 18: Auswertung aller Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn E bestimmt wurden. Dargestellt sind die Modulwerte, die am Fallgewichtsprüfstand unter Variation der Dehnrate bei 1 % (●), 5 % (○) und 10 % (△) bestimmt wurden.

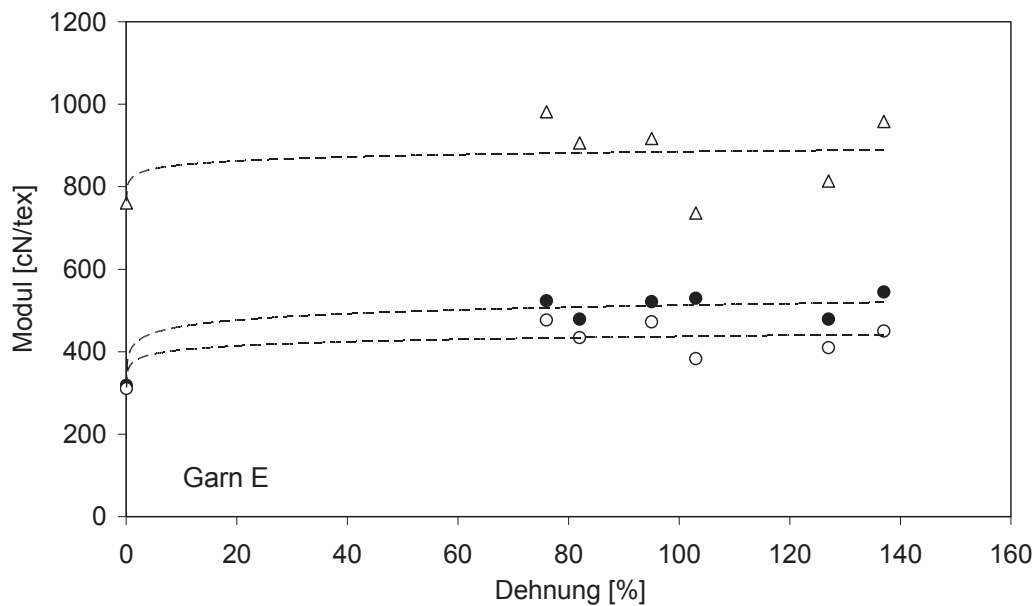


Abbildung 19: Auswertung aller Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn E mit Einspannlängen ≥ 30 mm bestimmt wurden. Dargestellt sind die Modulwerte, die am Fallgewichtsprüfstand unter Variation der Dehnrates bei 1 % (●), 5 % (○) und 10 % (Δ) bestimmt wurden.

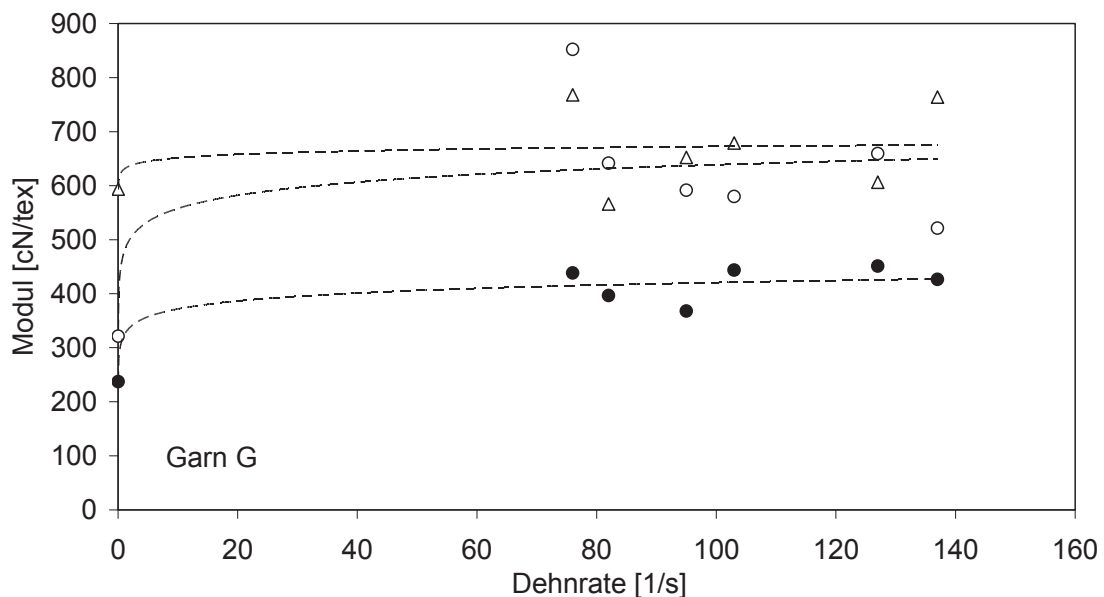


Abbildung 20: Auswertung aller Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn G mit Einspannlängen ≥ 30 mm bestimmt wurden. Dargestellt sind die Modulwerte, die am Fallgewichtsprüfstand unter Variation der Dehnrates bei 1 % (●), 5 % (○) und 10 % (Δ) bestimmt wurden.

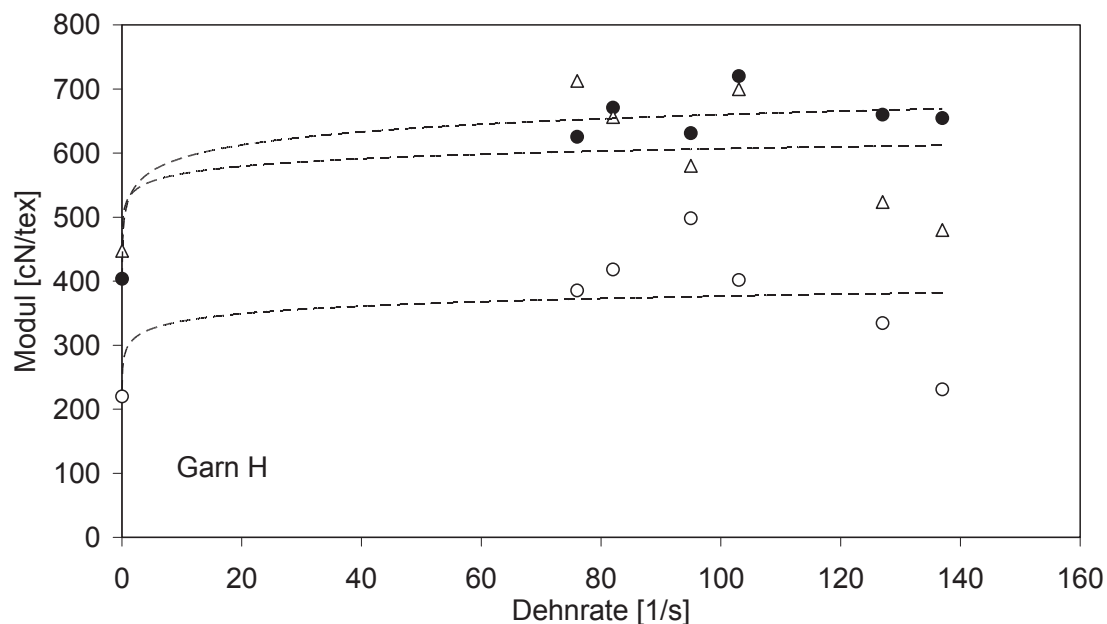


Abbildung 21: Auswertung aller Kraft-Dehn-Kurven, die an Garn H mit Einspannlängen ≥ 30 mm bestimmt wurden. Dargestellt sind die Modulwerte, die am Fallgewichtsprüfstand unter Variation der Dehnrage bei 1 % (●), 5 % (○) und 10 % (Δ) bestimmt wurden.

Eine bessere Darstellung wird erreicht, wenn nur Messungen mit Einspannlänge $l \geq 30$ mm berücksichtigt werden. Diese Auswertung zeigt für die relevanten Vertreter der untersuchten Faserstoffe PA 6.6 (Garn E, Abbildung 19), PA 4.6 (Garn G, Abbildung 20) sowie PET (Garn H, Abbildung 21) den gleichen Trend einer logarithmischen Entwicklung der Module. Diese sind speziell im Anfangsbereich der Kraft-Dehn-Kurve bis zu 50 % höher als die bei der DIN-gerechten Prüfung ermittelten Werte.

Eine orientierende Untersuchung der Versagensphänomenologie erfolgte durch rasterelektronenmikroskopische Analyse der Enden der gerissenen Fasern. Dabei hat sich gezeigt, dass die gerissenen Faserenden typische Einschnürungen (Neckbildung) und Schmelzbereiche zeigen. Der Effekt ist in den in Abbildung 22 gezeigten REM-Mikrographien am Beispiel des Garnes A verdeutlicht. Die Dehnrage betrug hierbei 100 s^{-1} . Ähnliche Morphologien werden auch an anderen Prüflingen beobachtet (Abbildung 23).

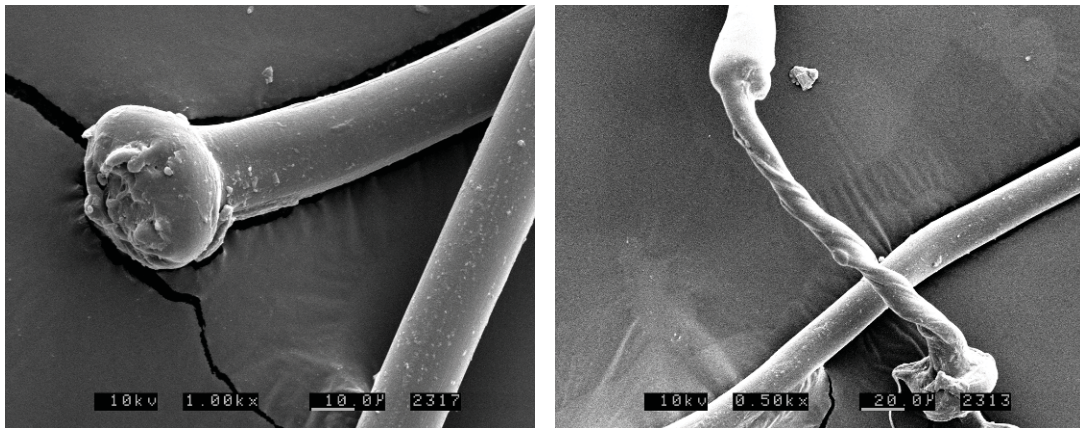
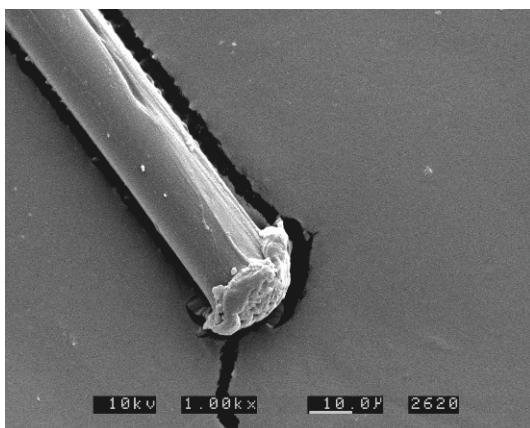
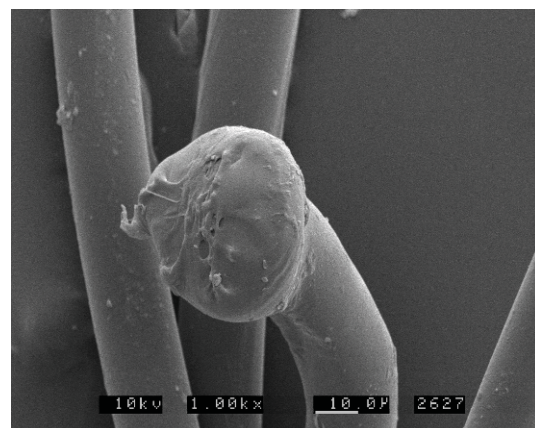


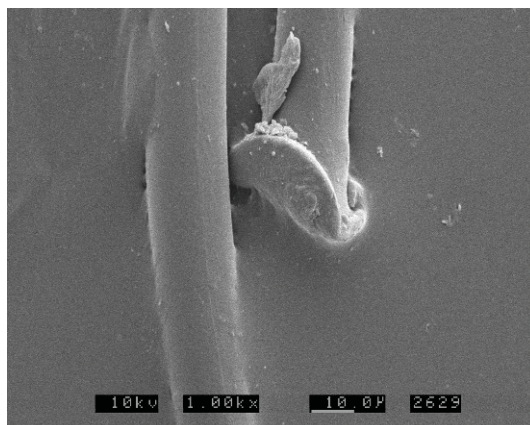
Abbildung 22: REM-Aufnahmen der Enden gerissener Fasern des Garnes A. Die Versuche erfolgten am Fallgewichtsprüfstand mit einer Dehnrage von 100 s^{-1} .



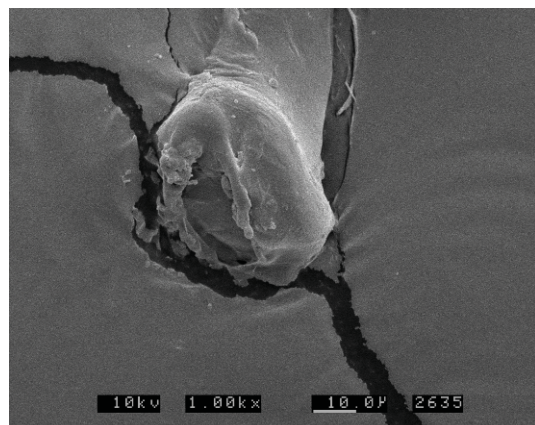
B - PA 6.6 470 dtex



C - PA 6.6 470 dtex



D - PA 6.6 580 dtex



E - PA 6.6 940 dtex

Abbildung 23: REM-Aufnahmen der Enden gerissener Fasern. Die Versuche erfolgten am Fallgewichtsprüfstand mit einer Dehnrage von 40 s^{-1} .

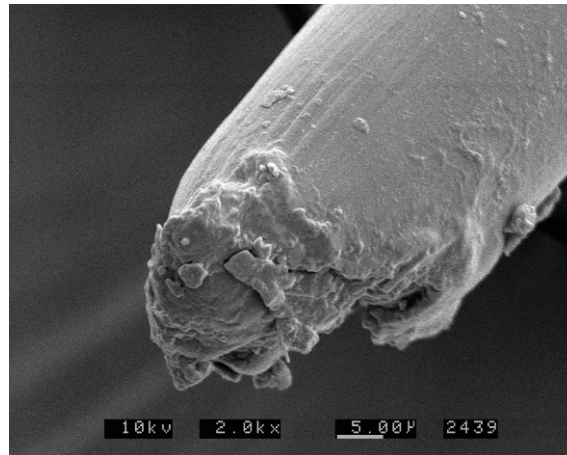


Abbildung 24: REM-Aufnahme des Endes einer gerissenen Faser des Garnes A. Der Versuch erfolgte nach DIN EN ISO 2062 an der Zugprüfmaschine. Die Dehnrates beträgt hierbei $0,0167 \text{ s}^{-1}$.

Aus diesen Beobachtungen muss ein völlig anderer Versagensmechanismus geschlossen werden als bei quasi-statischen Belastungen, wie sie bei niedrigen Dehnraten und insbesondere der Prüfung nach DIN ISO EN 2062 vorliegen. Die REM-Analyse zeigt in diesem Fall Bilder mechanischen Versagens (Abbildung 24). An dieser Stelle sei noch einmal auf das in der Einleitung dargestellte Verständnis derartiger Prozesse verwiesen: Bei hohen Dehngeschwindigkeiten das Material keine Möglichkeit zu relaxieren, da in derartig kurzen Zeiträumen keine kooperativen Platzwechsel der Makromoleküle möglich sind. Es ist bei kurzzeitigen Zugdehnungen zu beobachten, dass die resultierende Deformation anders als bei langsamen Dehnungen nicht gleichmäßig über die Fadenlänge verteilt ist, sondern sich Belastungsspitzen wellenartig ausbreiten (siehe z.B. [6,7]). Es kann vor diesem Hintergrund vermutet werden, dass die eingetragene mechanische Energie

$$\Delta E = E_{kin,0} - E'_{kin} = \frac{m}{2} \cdot v_0^2 - \frac{m'}{2} \cdot v_{HZK}^2 \quad (10)$$

sich punktuell, d.h. auf ein eingegrenztes Volumenelement konzentriert. Hierbei geben m und v_0 die Masse und die Aufprallgeschwindigkeit des Fallgewichts an (Gesamtenergie vor dem Stoß). Nach dem Zerreißen des Fadens ist die Gesamtenergie durch die verbleibende kinetische Energie von Fallgewicht und Abzugsklemme (Gesamtmasse m') und den Energieeintrag in das Fadensystem ΔE gegeben. Die Endgeschwindigkeit des Gewichtes ist als v_{HZK} bezeichnet.

Ist die Energiedichte in diesem eingegrenzten Volumenelement hoch genug, kann es nach dem mechanischen Wärmeäquivalent zum Aufschmelzen des Materials kommen. Die hierzu notwendige Energie ist grundsätzlich durch den Ausdruck

$$\Delta Q = \rho \cdot V \cdot \left[\Delta H_s + \int_{T_0}^{T_s} c(T) \cdot dT \right] \quad (11)$$

gegeben. Hierbei sind ρ die Dichte des Polymers, V das aufgeschmolzene Volumen, ΔH_s die Schmelzenthalpie, T_0 und T_s Ausgangs- und Schmelztemperatur sowie $c(T)$ die (in allgemeiner Betrachtung temperaturabhängige) Wärmekapazität. Bei bekannten Geschwindigkeiten v_0 und v_{HZK} kann so aus den Gln.(10) und (11) das Volumen einer potentiell erzeugten Schmelzzone ermittelt und mit den beobachteten Morphologien verglichen werden. Die hochaufgelöste Bestimmung der genannten Geschwindigkeiten ist mit dem aktuell eingesetzten Versuchsaufbau allerdings nicht möglich.

4 **ITV Rotationszugprüfmaschine (ITV Denkendorf)**

4.1 **Physikalische Grundlagen des Messverfahrens**

Die Rotationszugprüfung basiert auf dem Arbeitsprinzip der Speicherung der Rotationsenergie, die vom Trägheitsmoment und Winkelgeschwindigkeit der Scheibe abhängig ist. Dieses Arbeitsprinzip hat die Vorteile der nahezu unbegrenzten Steifheit, des riesigen Energie-Speichervermögen und des enorm großen Bereich der nutzbaren Belastungsgeschwindigkeit, die präzise gemessen werden kann und sich während der Prüfung aufgrund der hohen gespeicherten Rotationsenergie nicht messbar ändert.

Bei der Rotationszugprüfung erfolgt die Fadenbeanspruchung durch die Mitnahme des Fadens/Fadenschlaufe durch eine am Umfang der Rotationsscheibe befestigte Mitnahmenase. Durch die sehr hohe Masse der Rotationsscheibe (221 g) wird der Faden mit ideal konstanter Geschwindigkeit v (analog der Umfangsgeschwindigkeit an der Mitnahmenase) bis zum Zerreißen gedehnt. Beim idealen Prüfverlauf, d.h. mit optimaler Fadenklemmung und Fadeneinbringung (Timing, Geschwindigkeit und Abstimmung der Fadeneinbringung) sind die grundlegenden Parameter die Drehzahl und die Einspannlänge l .

Die Umfangsgeschwindigkeit berechnet sich mit

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (1) \text{ und } v = \omega \cdot r \quad (12)$$

$$\text{zu } v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot r \quad (13)$$

v : Umfangsgeschwindigkeit in m/s

ω : Winkelgeschwindigkeit in 1/s

f : Drehzahl in 1/s

Die Dehngeschwindigkeit ist damit: $\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r}{l}$ (14)
--

Mit den Parametern der experimentellen Untersuchungen ergeben sich folgende Dehnraten:

Tabelle 5: Dehnraten in Abhängigkeit von Drehzahl und Prüfradius

		Prüfgeschwindigkeit (r = 368 mm) [m/s]	Dehnrate in 1/s		
			l ₀ = 750 mm	l ₀ = 200 mm	l ₀ = 50 mm
Drehzahl [U/min]	62	2,5	3,3	12,5	50
	257	10	13,3	50	200
	517	20	26,7	100	400
	777	30	40,0	150	600
	1037	40	53,3	200	800
	1297	50	66,7	250	1000
	1557	60	80,0	300	1200
	1817	70	93,3	350	1400

Der Radius der Rotationsscheibe beträgt 360 mm. Die Höhe der Mitnahmenase für die durchgeführten Serienprüfungen beträgt 15 mm, die theoretische Fangposition liegt zwischen 360 und 375 mm. Zur Berechnung der Dehnraten wird der mittlere Radius 367,5 mm verwendet, der theoretisch max. Dehnratenfehler liegt somit zwischen +-2 %. Die Versuche mit der Hochgeschwindigkeits-Dokumentation zeigen jedoch, dass der Fadenfang in der Regel bei dem Radius 368 mm erfolgte. Die Streuungen liegen daher zwischen +-3 mm und führt zu einem max. Dehnratenfehler von nur 0,8 %. Falls erforderlich, kann für jeden Versuch durch eine geeignete Kameraposition die Fangposition und somit die Dehnraten exakt ermittelt werden.

Energie der rotierenden Scheibe:

Eine um die x-Achse rotierende Scheibe besitzt die Rotationsenergie:

$$E_{ROT} = \frac{1}{2} \cdot I_x \cdot \omega^2 \quad (15)$$

bzw.

$$E_{ROT} = \frac{1}{2} \cdot I_x \cdot (2 \cdot \pi \cdot f)^2 = I_x \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \quad (17)$$

Das Trägheitsmoment eines Vollzylinders, der um seine Symmetrieachse rotiert, berechnet sich zu:

$$I_x = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (18)$$

Das Trägheitsmoment I_x der Rotationsscheibe setzt sich zusammen aus der Hauptscheibe mit $m_1 = 190,55 \text{ kg}$ und $r_1 = 0,36 \text{ m}$ ($I_1 = 12,35 \text{ kgm}^2$) und den beidseitig angeflanschten Scheiben mit jeweils $m_2 = 15,19 \text{ kg}$ und $r_2 = 0,4 \text{ m}$ ($I_2 = 0,61 \text{ kgm}^2$) und beträgt somit $12,96 \text{ kgm}^2$. Die Antriebsachse wird vernachlässigt.

Bei der geringst möglichen konstanten Drehzahl von 65 U/min stehen 309 J und bei 1800 U/min eine Rotationsenergie von 230194 J für die Prüfung zur Verfügung.

Beim Reißen eines PA Garns 940 dtex (Bruchkraft 78 N und Bruchdehnung $24,5 \%$) beträgt die aufgewandte Energie nur ca. 1 J . Dies gewährleistet, dass während der Prüfung die Beeinflussung der Prüfgeschwindigkeit vernachlässigbar gering ist.

4.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise

Die Basis für den Aufbau der Rotationszugprüfmaschine waren die im AIF-Projekt Nr.12813N am ITV entwickelten Lösungen für Hochgeschwindigkeitsprüfungen an Garne und Textilien (Aramide, HPPE). Diese Prüfungen wurden auf einen Rotationsprüfstand einer Firma zur zerstörerischen Prüfung von Turbinenschaufeln und anderer höchstdrehenden Bauteile durchgeführt. Die Prüfungen zeigten, dass hierbei selbst extremste Prüfgeschwindigkeiten für Garnzugprüfungen realisierbar sind, es aber sehr viele Einflussparameter gibt und daher der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera unbedingt erforderlich ist.

Daher wurde am ITV für das Projekt ein Rotationsprüfstand für Garnzugprüfungen entwickelt und aufgebaut. Hierfür wurde dem ITV-Denkendorf von der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart (MPA-Stuttgart) freundlicherweise ein nicht mehr eingesetzter Prüfstand für Schlagprüfungen an Metallwerkstoffen überlassen. Neben den Prüfgeräte-Entwicklungsarbeiten musste auch ein geeigneter Schutzraum wegen dem hohen

Gefahrenpotential des Rotationsprüfstands (Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 70 m/s) konzipiert und aufgebaut werden. Dieser sollte zudem eine Klimatisierung ermöglichen.

4.2.1 Entwicklung und Aufbau des ITV-Rotationszugprüfstandes

Entwicklung und Aufbau des ITV-Rotationszugprüfstandes zur Hochgeschwindigkeitsprüfung an Garnen beinhaltetete zahlreiche Einzelaufgaben:

- Beschaffung des Rotations-Schlagprüfstand und Raumsuche.
- Bereitstellung von Strom und Druckluft und Beleuchtung.
- Konzeptionierung und Bau einer Sicherheitsumhausung mit der Möglichkeit der Klimatisierung.
- Anschluss der Steuerung und Funktionsprüfung des Antrieb und der Steuerung.
- Untersuchung der Einzelkomponenten des Schlagprüfstandes auf ihre Eignung.
- Konzeptionierung verschiedener Varianten des Prüfstands für Hochgeschwindigkeitszugprüfungen an Garnen.
- Schwingungsentkopplung des Prüfstands und Optimierung des Prüfstands durch einen Auswuchtservice.
- Konzeptionierung, Entwicklung und Analyse der Fadenzugprüfmethode.
- Entwicklung der Dehnungsmessung.
- Entwicklung des Messsystems und des Messprogramms
- Entwicklung der Fadeneinbringung.
- Entwicklung von Mitnahmenasen für Garne.
- Entwicklung extrem leichter Garnklemmen.
- Einsatz der High-Speed-Kamera.
- Entwicklung eines „kleineren“ Rotationsprüfstands.
- Durchführung von Serienprüfungen.
- Auswertung der Serienprüfungen.



Abbildung 25: Entwicklungsstadien des Rotationszugprüfstands



Abbildung 26: Entwicklungsstadien des Rotationszugprüfstands

Einen ausreichend großen Prüfplatz für den Rotationszugprüfstand am ITV zu organisieren gestaltete sich schwierig. Hierzu wurde der minimalste Platzbedarf für unterschiedliche Maschinenanordnungen untersucht. Das Ergebnis ist nun 12,4 m² große Fläche in einer nicht klimatisierten Maschinenhalle. Für den Betrieb des Prüfstands, muss aufgrund Sicherheitsaspekte dieser von der Maschinenhalle abgetrennt sein.

Mittels CAD-Programm wurden unterschiedliche Varianten ausgearbeitet und bzgl. Festigkeiten / Kosten analysiert. Die Sicherheitsumhausung wurde mit massiver Bosch Profilstreben 45 mm x 90 mm gefertigt. Die beiden Nuten der 90 mm Profilseite ermöglichten eine doppelwandige Ausführung. Dabei wurden entweder zwei Polycarbonat-Scheiben zur ungehinderten Sicht für z.B. High-Speed-Aufnahmen verwendet oder die Sandwichstruktur „Wellengitter, mehrere Lagen Aramidgewebe, das von der Fa. BSST bereitgestellt wurde und Wellengitter bzw. Polycarbonatscheibe“ realisiert. Hierdurch wird ein ausreichend hoher Schutz gegenüber geschossartigen Teilen für den „worst case“ erzielt.

Die Schaltschränke, Steuer- und Auswerteeinheiten des Prüfstands sind außerhalb des Prüfraumes platziert und ermöglicht so durch die aushäusige Bedienung max. Sicherheit für den Anwender. Der Rotationsprüfstand wurde im Prüfraum so positioniert, dass geringste Gefahr durch die rotierenden Scheiben für Geräte und Personen ausgeht und durch die Polycarbonat-Sicherheitsfenster auch High-Speed Videoaufnahmen von den interessierenden Bereichen - Faden- bzw. Textilfang - möglich sind. Für die Inbetriebnahme des 13,5 kW starken Antriebs musste eine ausreichend dimensionierte Stromversorgung bereitgestellt werden. Ferner erforderte der Prüfraum eine gute Beleuchtung, was durch die Installation von 6 Leuchtstoffröhrenlampen realisiert wurde. Die installierte Druckluftversorgung stellt 8 bar für die Pneumatikzylinder zur Verfügung. Die Prüfstandumhausung hat zudem eine Decke aus Polycarbonatscheiben erhalten. So konnte die Beleuchtung aushäusig erfolgen, wodurch die Lampen den Prüfraum nicht erwärmen und auch geschützt sind. Es wurden mit Klimafachleuten Lösungen diskutiert und Angebote eingeholt, so dass dieser Prüfraum nachträglich klimatisiert werden kann, was leider im Rahmen des Projektes aus Kostengründen nicht mehr möglich war. Die Steuerung und der Antrieb wurden von Elektrikern angeschlossen und überprüft und mit niedrigen Drehzahlen getestet. Damit später das Messsignal bei der hochdynamischen Zugprüfung so gering wie möglich von unerwünschten Schwingungen überlagert wird, wurden mehrere Konzepte für die Gestaltung des Rotationsprüfstandes untersucht. Da eine hohe Masse bei dynamischen Vorgängen immer von Vorteil ist, sollte der gesamte Prüfstand auf einem schweren Betonblock fest montiert sein. Hierfür mussten aber erst klar sein, wie der Prüfstand ausgeführt werden sollte und es wurden alle Gestaltungsmöglichkeiten des

Rotationsprüfstandes untersucht. Hier galt es auch zu beachten, dass die drehende Rotationscheibe niemals blockiert werden kann. Nach Festlegung der prinzipiellen Ausführung wurde von einer Firma nach CAD-Zeichnung ein ca. 400 kg schwerer Betonblock gefertigt, in dem mehrere massive 90 mm x 90 mm Boschprofile zur Befestigung des Prüfrahmens eingegossen sind. So erhält man bei der Zugprüfung einen geschlossenen Kraftfluss. Die Entkopplung zum Boden wird nach durch 8 Spezialdämpfer, die uns für diese Anwendung empfohlen wurden, erreicht. Die Dämpfer sind sowohl mit dem Fundamentblock als auch mit dem Boden fest verbunden. Beim Gießen wurden die eingelegten Röhren für die Durchgangslöcher leider verschoben und es musste daher eine massive und aufwendige Adaptionplatte für die Montage des Rotationszugprüfstands gefertigt werden, die aber auch eine noch festere Montage ermöglicht.

Prüfstandoptimierung

Es wurden erste Tests gefahren und der Rotationszugprüfstand lief ruhig. Erst beim Hochfahren auf höhere Drehzahlbereiche waren deutliche Vibrationen spürbar. Daher wurde der Auswuchtservice der Fa. Schenk Rotec GmbH beauftragt am ITV den Istzustand des Schwingungsverhalten der Rotationsscheibe zu analysieren, um eine Aussage über den Zustand und Zuverlässigkeit des Prüfstands treffen zu können. Daraufhin wurde die Rotationsscheibe optimal auf niedrigste Schwingungserscheinungen ausgewuchtet. Dabei wurden auch drei ungesicherte, durch Farbe verklebte Bolzen in Bohrungen entdeckt und entfernt. Nach mehreren Unwuchtkalibrierungen wurden über den gesamten Drehzahlbereich (schwingungskontrolliert bis 2.500 U/min, d.h., 94 m/s) einen insgesamt wesentlich niedrigeren Schwingungspegel erreicht. Wegen der deutlichen Schwingungsüberhöhung bei 1900 U/min (Resonanz) wird eine Drehzahlbegrenzung von 1800 U/min (68 m/s Umfangsgeschwindigkeit) empfohlen. Der Rotationszugprüfstand erlaubt nun Prüfgeschwindigkeiten bis 70 m/s und liegt weit über den ursprünglich angestrebten 50 m/s.

Endzustand des Unwuchtausgleichs

- Minimierung der Schwingungen auf Basis des Kanals A bei 1500 UPM zeigt über den gesamten Drehzahlbereich bis 2.500 UPM einen insgesamt niedrigeren Schwingungspegel,
- Deshalb wird der Unwuchtausgleich aus dieser Messung eingebaut!
- Auf Grund des sehr hohen Schwingungspegels bei 1900UPM (s. Seite 6 und 7) empfehlen wir eine Drehbegrenzung der Anlage auf 1800UPM
- Für diesen Drehzahlbereich liegt ein Schwingungsverlauf gemäß nebenstehendem Bild vor
- Bei der Drehzahl von ca. 1140UPM tritt im Kanal A eine Überhöhung auf, die im Betrieb Anlage ebenfalls vermieden werden sollte.
- Diese Überhöhung erreicht aber nur ca. 40% der Schwingungsüberhöhung bei 1900UPM

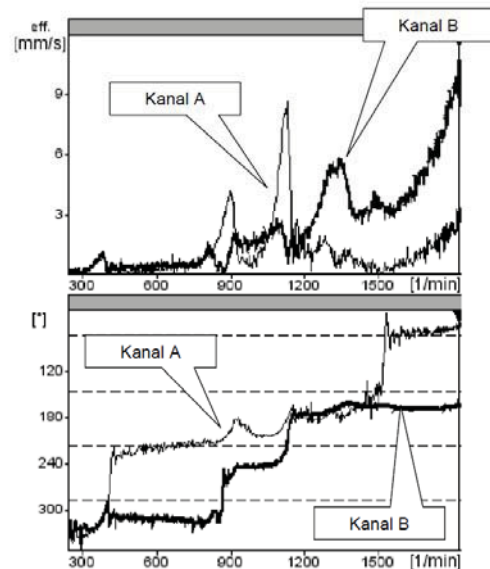


Abbildung 27: Auszug aus dem Prüfprotokoll der Unwuchtskalibrierung.

Aufgrund der Schwingungserscheinungen in den Messkraftverläufen insbesondere bei Prüfgeschwindigkeiten oberhalb 40 m/s wurde die Traverse zusätzlich versteift, um alle vermeidbaren Unsicherheiten bzgl. Schwingungsphänomene zu eliminieren. Das Hochlaufen erscheint dem Bediener nun subjektiv noch geräuschärmer als zuvor. Leider erfolgen die Verbesserungen nach der Unwuchtkalibrierung. Ev. war der Prüfrahm mit Traverse für die Schwingungsresonanzen z.B. bei 1140 Hz verantwortlich.

4.2.2 Konzeptionierung, Entwicklung und Analyse der Fadenzugprüfmethode

Zentrale Bedeutung für die Prüfstandentwicklung hatte die Auswahl des Konzepts der Fadenprüfung. Zur Auswahl standen das Einzelfaden- und das Fadenschlaufen-Prüfkonzept. Die Zugprüfung nach am Einzelfaden-Konzept entspricht der klassischen Zugprüfung. Hier ist das eine Fadenende fest eingespannt und am anderen Fadenende wird gezogen und entspricht dem Prüfkonzept DTNW und TITK. Bei der Zugprüfung nach dem ITV-Fadenschlaufenkonzept wird eine Fadenschleife gebildet, wobei beide Fadenenden fest an eingespannt sind und die Zugbelastung in der Fadenmitte angreift. Die folgenden Bilder verdeutlichen das Prüfprinzip, bei der die Krafteinleitung über einer am Scheibenumfang

befestigten Mitnahmenase erfolgt und während der Prüfung beide Fadenabschnitte bis zum Bruch gedehnt werden.

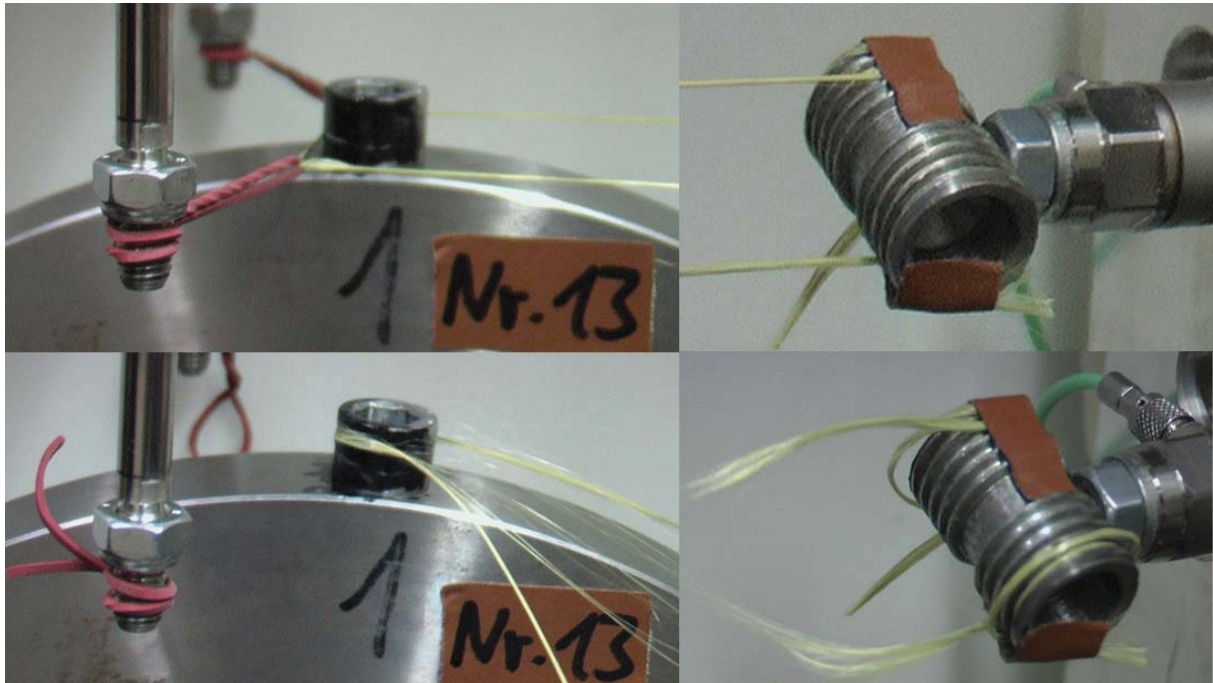


Abbildung 28: Prinzip der ITV-Fadenschlaufenprüfung

Prüfmethode Einzelfaden

Zunächst wurde das Konzept der Einzelfadenprüfung favorisiert, da hierdurch eine bessere Vergleichbarkeit mit den Prüfverfahren von DTNW und TITK erwartet wurde. Im Gegensatz zu der kleinen Rotationsscheibe bietet die große Rotationsscheibe und deren Gegebenheiten generell genügend Möglichkeiten zur Realisierung eines geeigneten Mitnahmesystems für Einzelfaden. Ferner bietet die gefertigte Sicherheitsumhausung auch ausreichend Schutz gegen umher fliegende Garnbefestigungsteile.

Das Hauptproblem ist die Realisierung der Garnmitnahme ohne dass relevante Dehnungsfehler entstehen und dabei die Krafteinleitung schonend erfolgt. Aufwendig gestaltete, teurere Garnklemmen mit geringem Klemmschlupf können nicht eingesetzt werden, da diese durch die Hochgeschwindigkeitsprüfung stark beschädigt und dann jedes Mal ersetzt werden. Ferner sollte die Garnklemmung wegen der daraus resultierenden Garnvorbelastung und insbesondere der Geschosswirkung möglichst leicht sein.

Für diese Vorentwicklungen wurde die BOSE-Wechselzugprüfmaschine eingesetzt, mit der eine Prüfgeschwindigkeit von 2 m/s über einen Kolbenweg von ca. 40 mm (10 mm Vorlauf) realisiert werden kann.

Das zu prüfende Garn wird dabei um eine Stange, Aluminium- oder Karbonrohr (Garnträger) gewickelt und in diesem Zustand mit Harz eingegossen. Damit erhält man eine Garnzugprobe mit einem „Garnanker“. Variiert werden kann somit das Träger- und Harzmaterial, die Form, Innen und Außen-Durchmesser des Trägers und die Harzdicke. Hierzu wurden negative und positive Werkzeughalbschalen aus Silikon mit Angusskanal gefertigt. In die mit Trennmittel behandelte Form wird der Träger mit dem aufgewickelten Garn eingelegt und mit „weichen“ Polyurethanharzen eingegossen. Nach dem Entformen erhält man eine Garnprobe, die fest mit dem Garnanker verbunden ist. Diese Probenvorbereitung ist sehr zeit- und arbeitsintensiv und da die Garnprobe hier ungeschützt ist, ist die Gefahr einer ungewollten Garnvorschädigung durch das Handling sehr hoch. Das 8 mm dicke Aluminiumrohr mit 1,5 mm Wandstärke mit der 2,5 mm starken Harzbeschichtung besitzt eine Masse von 9 g. Eine Automatisierung der aufwendigen Probenvorbereitung ist sehr empfehlenswert.



Abbildung 29: Herstellung einer Garnzugprobe mit Garnanker für die Einzelfadenprüfung.

Die folgenden Bilder zeigen das Ergebnis der mit der BOSE-Wechselzugprüfmaschine durchgeführten Zugprüfung mit 2 m/s. Die mit der High-Speed-Kamera dokumentierten Vorgänge im „Einspannbereich“ der Garne zeigen, dass das Garnversagen oftmals in der Nähe, nie aber direkt am Übergang erfolgte und die erarbeiteten Lösungen zu einer schonenden Krafteinleitung führt und für die High-Speed-Zugprüfungen eingesetzt werden können.

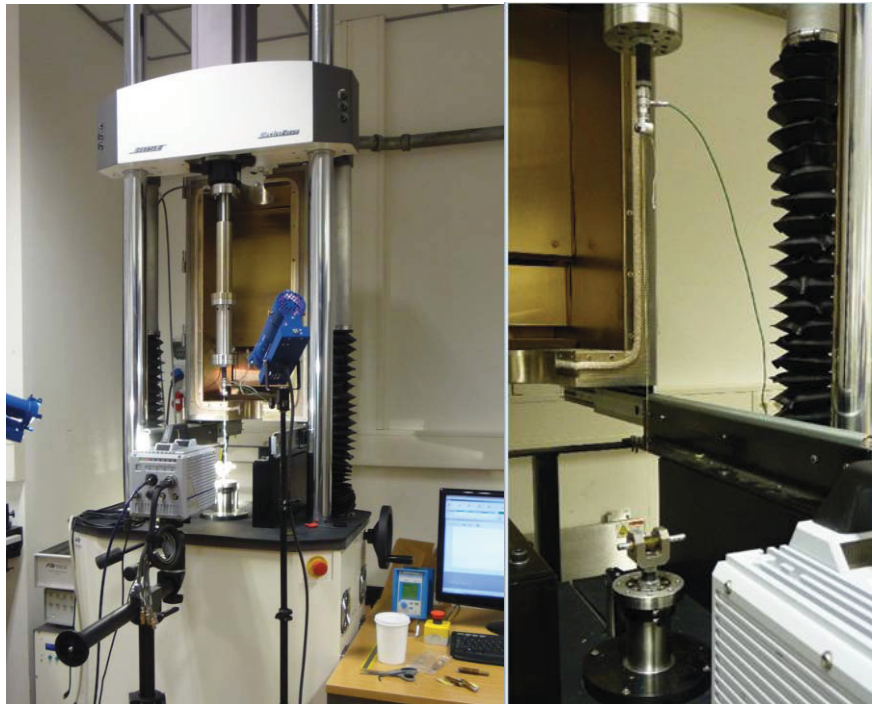


Abbildung 30: BOSE-Axial-Torsional-Wechselzugprüfmaschine, Garnzugprüfung mit 2 m/s

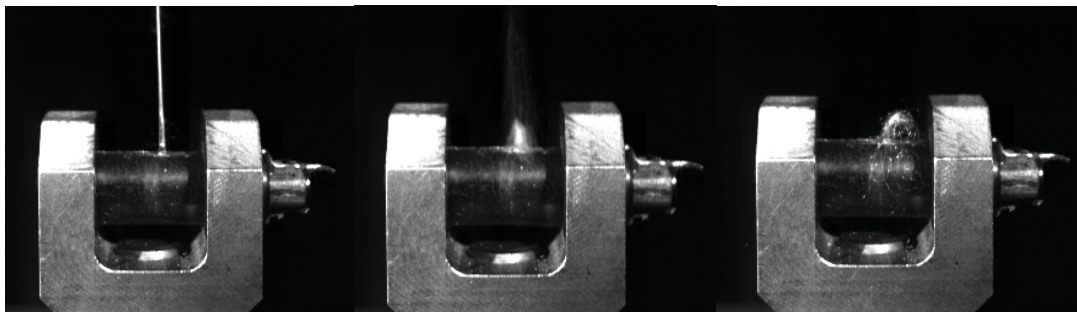


Abbildung 31: Garnzugprüfung mit 2 m/s, Überprüfung der „Garnanker“-Lösung.

Um den Mitnahmevorgang besser zu verstehen bevor am Rotationsprüfstand entsprechende Mitnahmevorrichtungen entwickelt werden, sollten Simulationen mittels der expliziten Finite-Elemente-Methode zeigen, welche Folgen der Stoßvorgang Schlagnase/Garnanker bei hohen Prüfgeschwindigkeiten hat. Für die Simulation wurde das PA 6.6 940 dtex gewählt, das mittig am Aluminiumrohr fixiert ist. Mit den nichtlinearen Materialkennwerten des Poyamids. Den Materialkennwerten für Aluminium und des aus der Druckprüfung des Harzes ermittelten E-Moduls, wurde mit dem FE-Programm LS-DYNA der Impakt zwischen der Nase und dem Garnanker samt Polyamidgarn und der Abfangvorrichtung für den Garnanker simuliert.

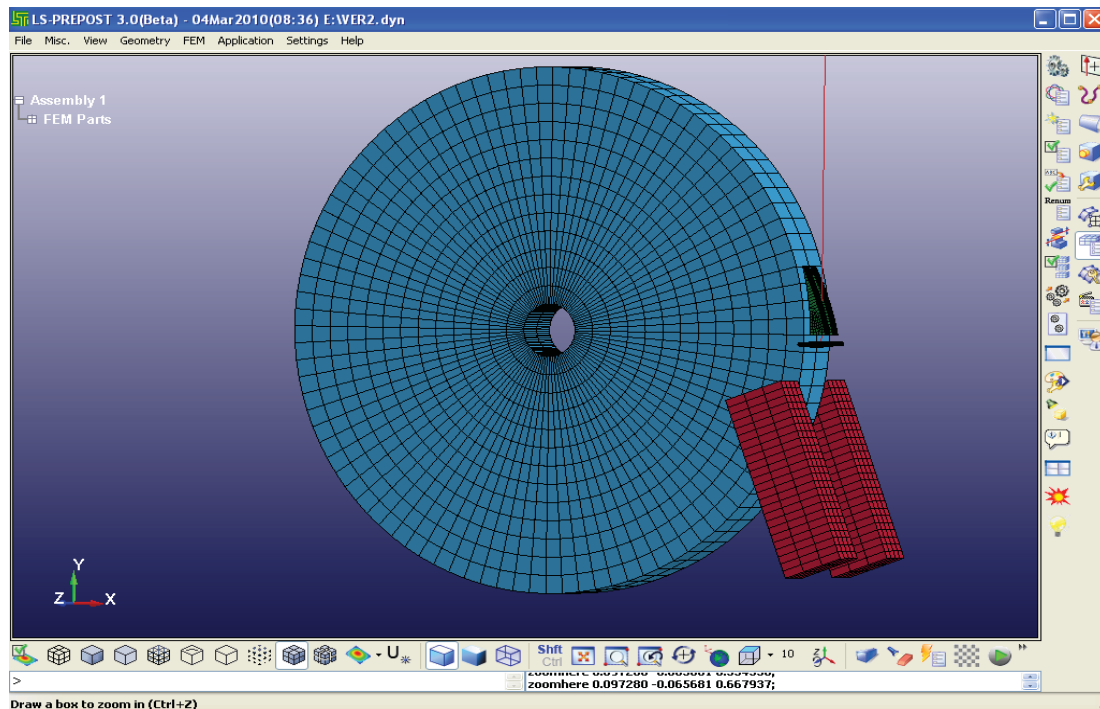
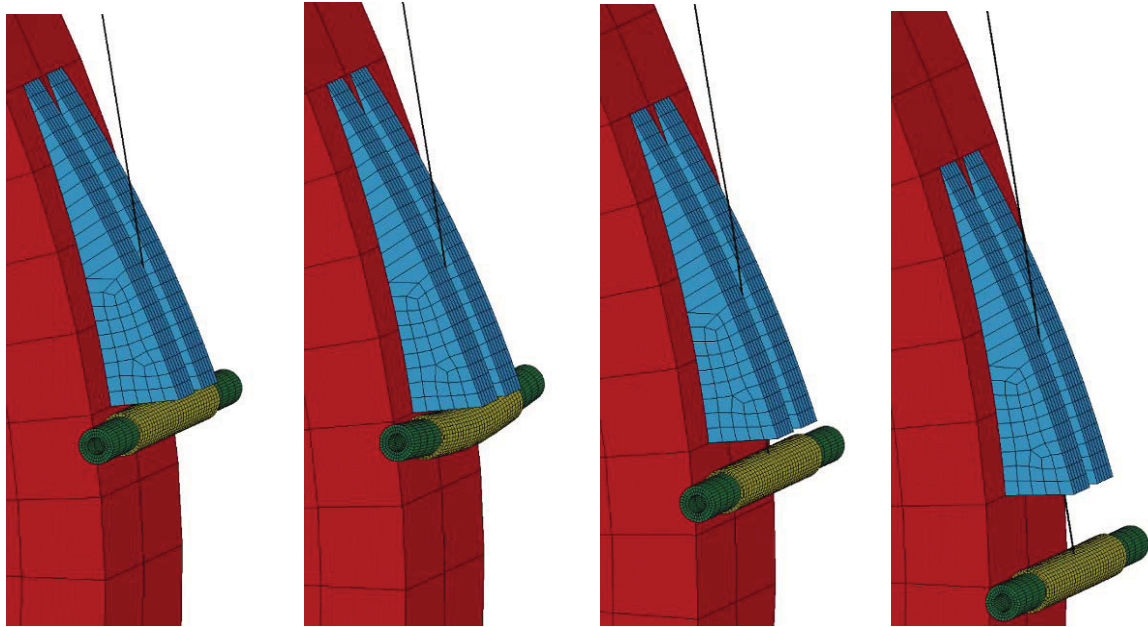


Abbildung 32: Simulationsmodell der Rotationszugprüfung für Einzelfaden.

Die Mitnahmenase trifft mit 37 m/s auf ein 75 mm langes Aluminiumrohr (8 mm Außen- und 5 mm Innendurchmesser) mit einer 2,5 mm dicken und 40 mm langen Harzbeschichtung (Gesamtmasse 9 g). Das simulierte PA 6.6 Garn mit 940 dtex ist am Aluminiumrohr mittig fixiert. Unmittelbar nach dem Impact fliegt die Mitnahmevorrichtung oszillierend mit dem Garn mit ca. 70 +/-10 m/s zur max. Garnbruchdehnung von 21% weiter. Hieraus wird schnell klar, dass die Lösung Mitnahmenase/Garnanker in dieser Art nicht für die Hochgeschwindigkeitsprüfung geeignet ist, da keine definierte Prüfgeschwindigkeit mit dieser Prüfungsart erzielt werden kann. Die Prüfgeschwindigkeit bzw. die Dehnrage hängen stark von der Ausprägung zwischen elastischer/inelastischer Stoß ab. Die Prüfgeschwindigkeit müsste mit der Hochgeschwindigkeitskamera oder anderer geeigneter Prüftechnik für jede Prüfung ermittelt werden. Eine exakte Vorwahl der Prüfgeschwindigkeit ist nur schwer möglich. Ferner können die oszillierenden Bewegungen des Garnankers das Prüfergebnis stark beeinflussen.



a) $t = 1,08 \text{ ms}$

b) $t = 1,16 \text{ ms}$

c) $t = 1,40 \text{ ms}$

d) $t = 1,80 \text{ ms}$

Abbildung 33: Simulation des Impakts zwischen der Mitnahmenase und dem Garnanker.

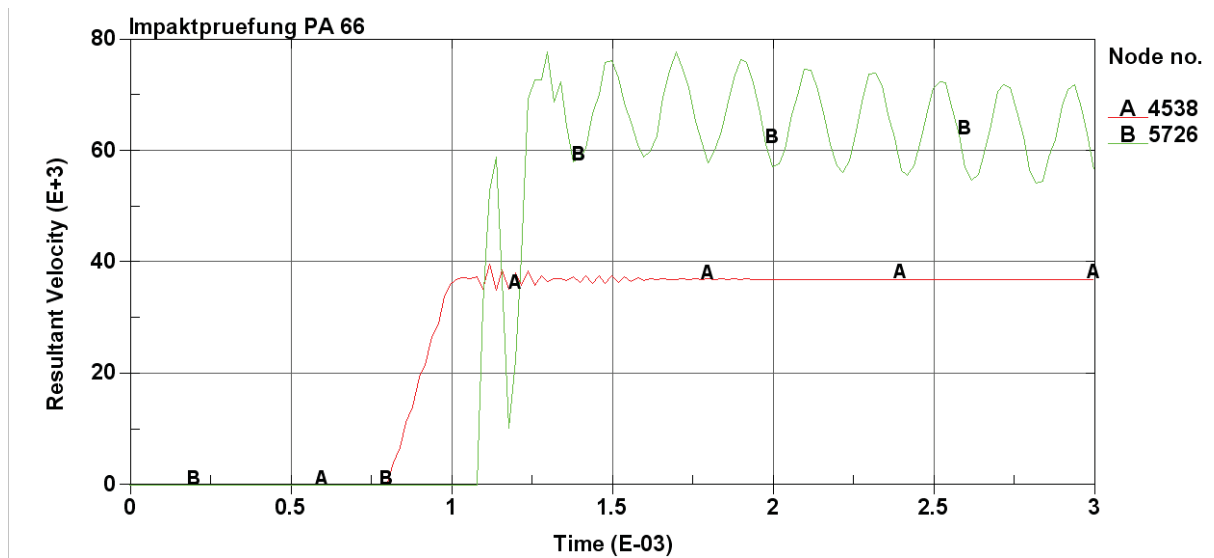


Abbildung 34: Simulation des Impakts Mitnahmenase/Garnanker.

grüne Kurve: Geschwindigkeit des Garnankers in Fadenrichtung

rote Kurve: Umfangsgeschwindigkeit der Mitnahmenase

Dieses Problem kann gelöst werden, indem durch das Aluminiumrohr ein Faden/Seil geführt wird, das beidseitig am Prüfraumen fixiert wird. Während der Prüfung spannt das Seil den Garnanker auf die Mitnahmenase bis das Seil dann letztendlich reißt. Die Garnzugprobe sollte davor gerissen sein. Um dieses Funktionsprinzip zu untersuchen, wurde eine entsprechende Simulation mit dem zusätzlichen Seilmodell durchgeführt. Im Gegensatz zum frei beweglichen Garnanker hebt sich der Garnanker nur unmittelbar nach dem Impakt etwas ab, bis die Kraft des immer stärker gespannten Seils (mehrere 100 N) zum Tragen kommt. Die Prüfungsgeschwindigkeit oszilliert dann zwar auch sehr stark, nun aber um den Wert der Umfangsgeschwindigkeit der Nase. Durch die Wahl des Materials des Garnankers und der Seilspannung können die Ausprägung der Oszillationen sicher positiv beeinflusst werden. Diese Seilpannlösung ist aber nur mit dem großen Rotationsprüfstand möglich, da dieser genügend Energie zum zusätzlichen Reißen des Seils besitzt, ohne dass die Umfangsgeschwindigkeit beeinflusst wird. Diese Lösung ist daher aber nicht für kleine und/oder leichte Rotationsscheiben geeignet.

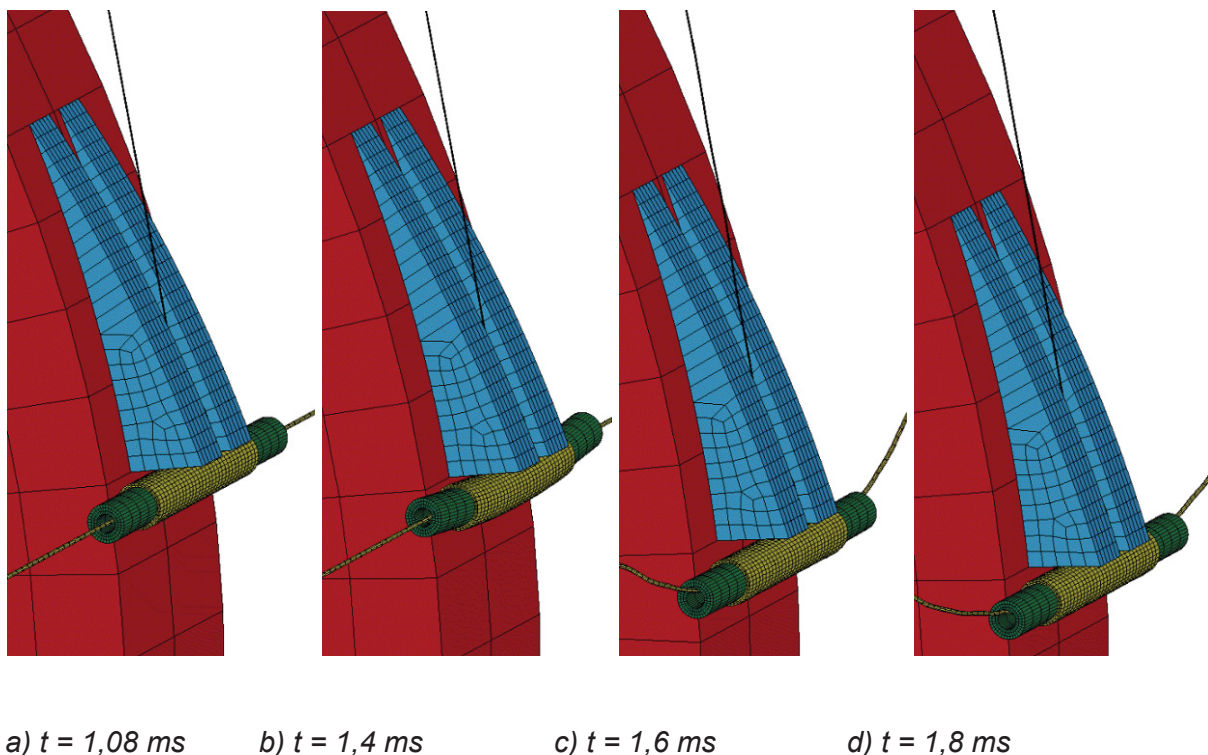


Abbildung 35: Simulation des Impakts Mitnahmenase/Garnanker mit einem Spannseil

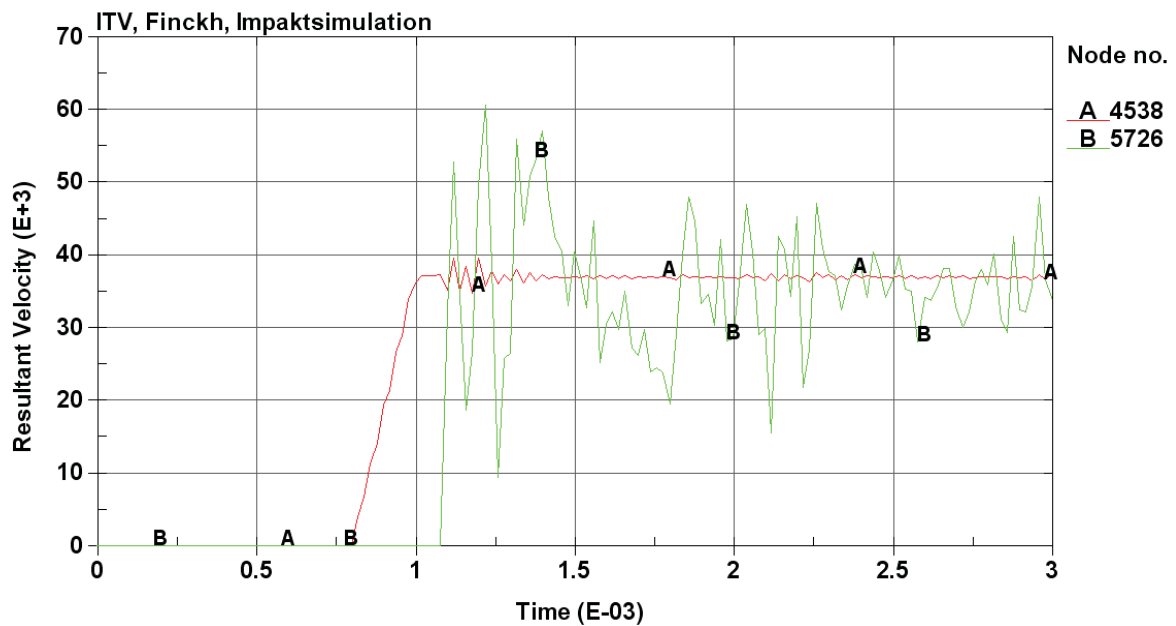


Abbildung 36: Simulation des Impakts Mitnahmenase/Garnanker mit einem Spannseil
grüne Kurve: Geschwindigkeit des Garnankers in Fadenrichtung
rote Kurve: Umfangsgeschwindigkeit der Mitnahmenase

Prüfmethode Fadenschlaufe

Die Zugprüfung mit Hilfe einer Fadenschlaufe hat viele Vorteile:

- Die Probenvorbereitung ist einfach.
- Es gibt keine zusätzliche Mitnahmemasse.
- Es gibt keine Stoßproblematik.
- Es gibt keine Sicherheitsproblematik durch schnellfliegende Masseteilchen.
- Es können höchste Prüfgeschwindigkeiten realisiert werden.
- Es ist das Prüfergebnis zweier Fäden (2 Prüfungen gleichzeitig).

Problematik bei der Prüfung mit der Fadenschlaufe:

- Der Faden wird von der Mitnahmenase umgelenkt (Einfluss durch Querbelastung).
- Bei außermittigem Fangvorgang beeinflussen Reibungsvorgänge das Prüfergebnis
- Es ist das Prüfergebnis zweier Fäden (Durchschnittswert).

Die größte Vorbehalt gegenüber dieser Fadenprüfmethode war die Unsicherheit, ob im Bereich der Fadenschlaufe beim Mitnahmevorgang durch das formschlüssige Anlegen der Fadenschlaufe an die Mitnahmenase eine Garnschädigung infolge hoher Quer- und Quetschkräfte erfolgt. Frühere Vergleichsprüfungen an Aramidgarnen mittels servo-hydraulischer Zugprüfmaschinen und Rotationsprüfständen (Bolzen mit 15 mm Ø) hatten keinen Einfluss erkennen lassen (AIF 12813 N). Um auch für alle PA und PET Garne diese Gewissheit zu haben, wurden Untersuchungen zum Einfluss zum Durchmesser der Mitnahmenase durchgeführt. Es wurden hierfür 6 montierbare Prüfkörpereinsätze aus poliertem Werkzeugstahl mit 5 bis 50 mm Durchmesser und ein entsprechende Aufnahme gefertigt. Die Serienprüfungen mit jeweils 10 Prüfungen pro Garn, Durchmesser und Fadenprüfkonzept wurden mit der klassischen Zugprüfmaschine (100 N Kraftsensor) mit 250 mm/min. Die Einspannlänge $l_0 = 250$ mm wurde bei Änderung des Prüfkörperradius durch die Startposition der Traverse konstant gehalten.

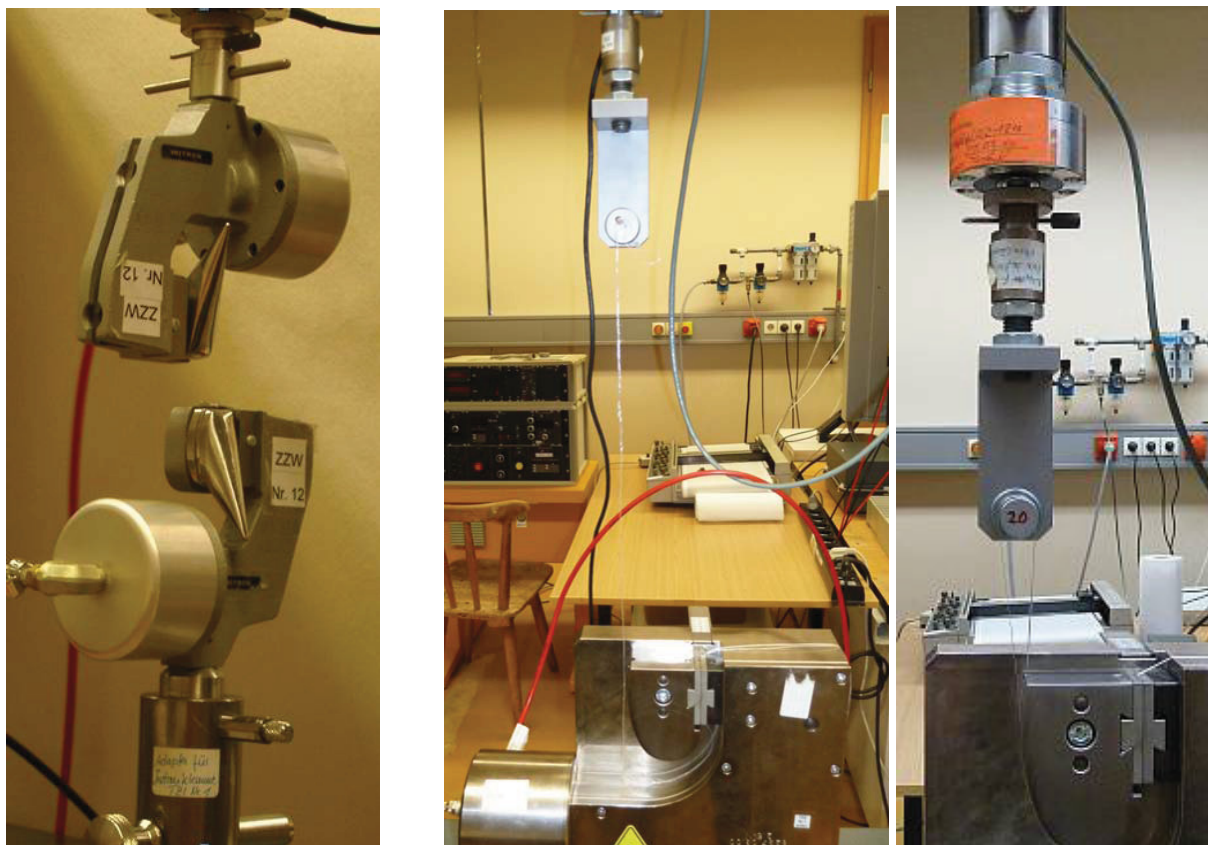


Abbildung 37: Serienprüfungen zur Überprüfung des Fadenschlaufenprüfkonzepts; links Einzelfadenprüfung, rechte Abbildungen Fadenschlaufenprüfkonzept.



Abbildung 38: Prüfkörper mit unterschiedlichem Durchmesser zur Überprüfung des Fadenschlaufenprüfkonzpts

Die Serienprüfung der Fadenschlaufen zeigten, dass bei allen PA und PET Garne (A-J) der Prüfkörperradius von 5 bis 50 mm keinen oder vernachlässigbar geringen Einfluss auf die Messergebnisse hat. Die Messkurven aller Fadenschlaufenprüfungen eines Garns waren für alle Prüfkörperdurchmesser nahezu deckungsgleich und stimmten sehr gut mit den Ergebnissen der der Einzelfaden-Serienzugprüfung überein. Dies war ein wichtiges Ergebnis. Wären bei diesen Prüfungen nennenswerte Unterschiede festgestellt worden, wäre das Konzept der Zugprüfung mittels Fadenschleife nicht weiter verfolgt worden.

Ergebnis der Untersuchung der Faden-Prüfkonzpte

Die aufgezeigten Probleme der Einzelfadenprüfung, deren zeit- und arbeitsintensive Vorbereitung und die Gefahr der Vorschädigung der Garnprobe bei der Herstellung des Garnankers, das erhöhte Sicherheitsrisiko durch unkontrolliert herumfliegende Garnanker mit mehreren 10 m/s und die vielen Vorteile des Fadenschlaufenprüfkonzpts führten zu der Entscheidung, für die geplanten Hochgeschwindigkeitsprüfungen das Prüfkonzpt der Fadenschleife anzuwenden. Es konnte mit Hilfe quasistatischer Zugprüfungen kein Einfluss der Mitnahmenasen-Durchmesser im Bereich von 5-20 mm auf Bruchkraft, Bruchdehnung oder Kraftverlauf nachgewiesen werden. Sicherheitshalber wird der Durchmesser der „Mitnahmenase“ für die Rotationsprüfungen mit 30 mm relativ groß gewählt.

4.2.3 Entwicklung der Dehnungsmessung

Dehnungsbestimmung auf der Basis der Drehzahl

Die Drehzahlmessung erfolgt über eine Gabellichtschranke mit 4 kHz Schaltfrequenz und wird vom Prüf- und Steuerprogramm des Rotationsprüfstands gemessen und angezeigt. Infolge des großen Scheibendurchmessers von 720 mm (bzw. dem Prüfradius 736 mm) führt ein kleiner Drehwinkel bereits zu großen Prüfwegen, ohne dass das Garn dabei eine relevante horizontale Auslenkung erfährt. Aus quasistatischen Zugprüfungen wird die Bruchdehnung gemessen und den Bruchdehnungsweg für die gewünschte Einspannlänge der Rotationszugprüfung ermittelt.

Um Dehnungsfehler so gering wie möglich zu halten, wird dann der Prüfrahm in horizontaler Richtung so eingestellt, dass der Fadenfang durch die Mitnahmenase in Höhe der Scheibenmitte, abzüglich des halben Bruchdehnungsweg erfolgt. Hierdurch werden Winkeländerungen bei der Zugprüfung soweit reduziert, dass der Dehnungsweg direkt aus der Drehzahl und dem Prüfradius genau bestimmt werden kann. Beim Polyamidgarn mit 25 % Bruchdehnung ergibt sich mit der Einspannlänge von 200 mm (175 mm freie Garnlänge bis zur Garnklemme, 25 mm umgelenktes Garn) ein Dehnungsweg von 50 mm. Die Garnklemmenpositionierung mit der mittigen Fangposition in der folgenden Zeichnung zeigt, dass hierdurch kein Dehnungsfehler entsteht. Aufgrund örtlicher Gegebenheiten wurden für die Serienprüfungen die Klemmenposition und die Fangposition entsprechend der zweiten Zeichnung. Der Dehnungsfehler ist hier vernachlässigbar klein.

Die für die Serienprüfung verwendete Prüfanordnung führt zu einer Längenabweichung zwischen der realen Dehnung von 50 mm von 0,25 mm (Sekante des Kreisabschnitts). Nach

der Berechnung des Kreisausschnitts mit $s = 2 \cdot r \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$ berechnet sich α mit

$\alpha = 2 \cdot \arcsin \frac{s}{2 \cdot r}$. für $r = 368 \text{ mm}$ und $s = 50,25 \text{ mm}$ zu $7,83^\circ$. Mit der Gleichung für

Kreisausschnitte mit $b = \frac{\pi}{180^\circ} \cdot r \cdot \alpha$ folgt $b = 50,29 \text{ mm}$.

Damit ist die Wegdifferenz zwischen dem tatsächlichen und dem „gemessenen“ Dehnungsweg nur 0,29 mm. Der daraus resultierende Dehnungsfehler von max. 0,58 % ist daher vernachlässigbar gering.

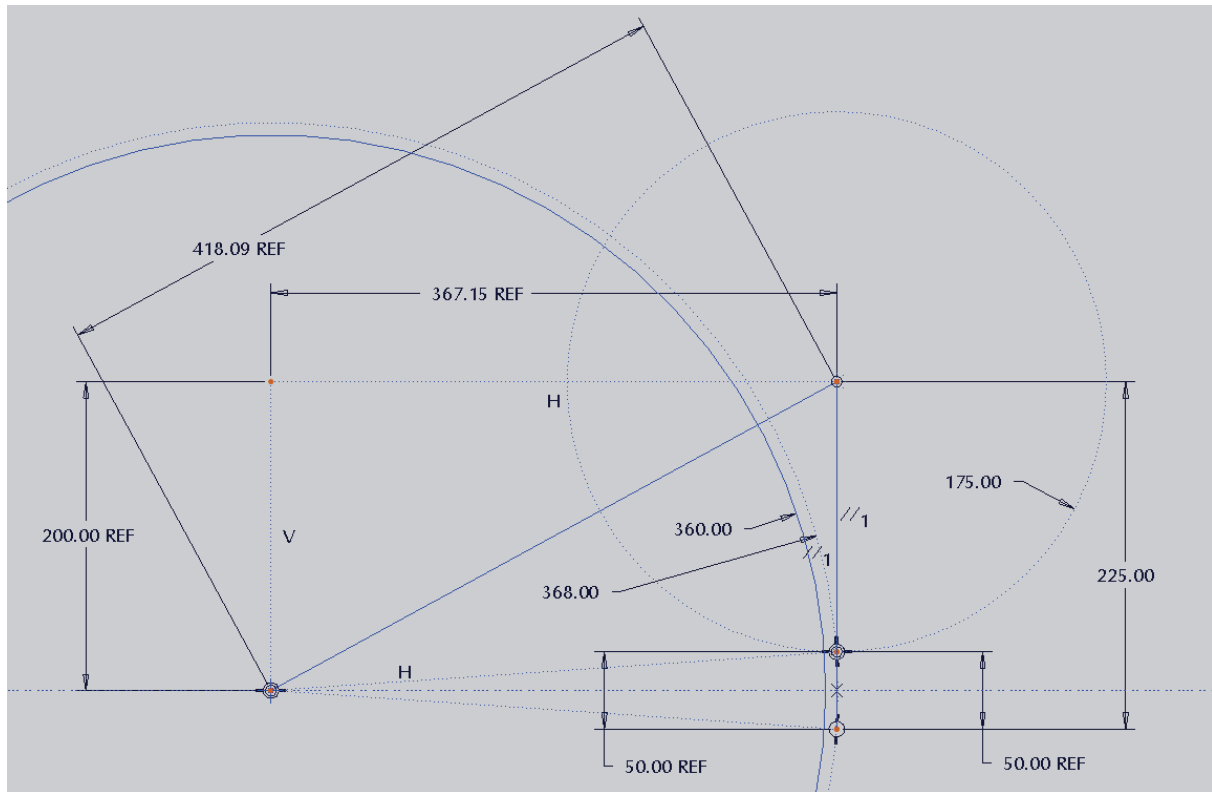


Abbildung 39: Optimale Prüfanordnung von Garnklemme und Fangposition

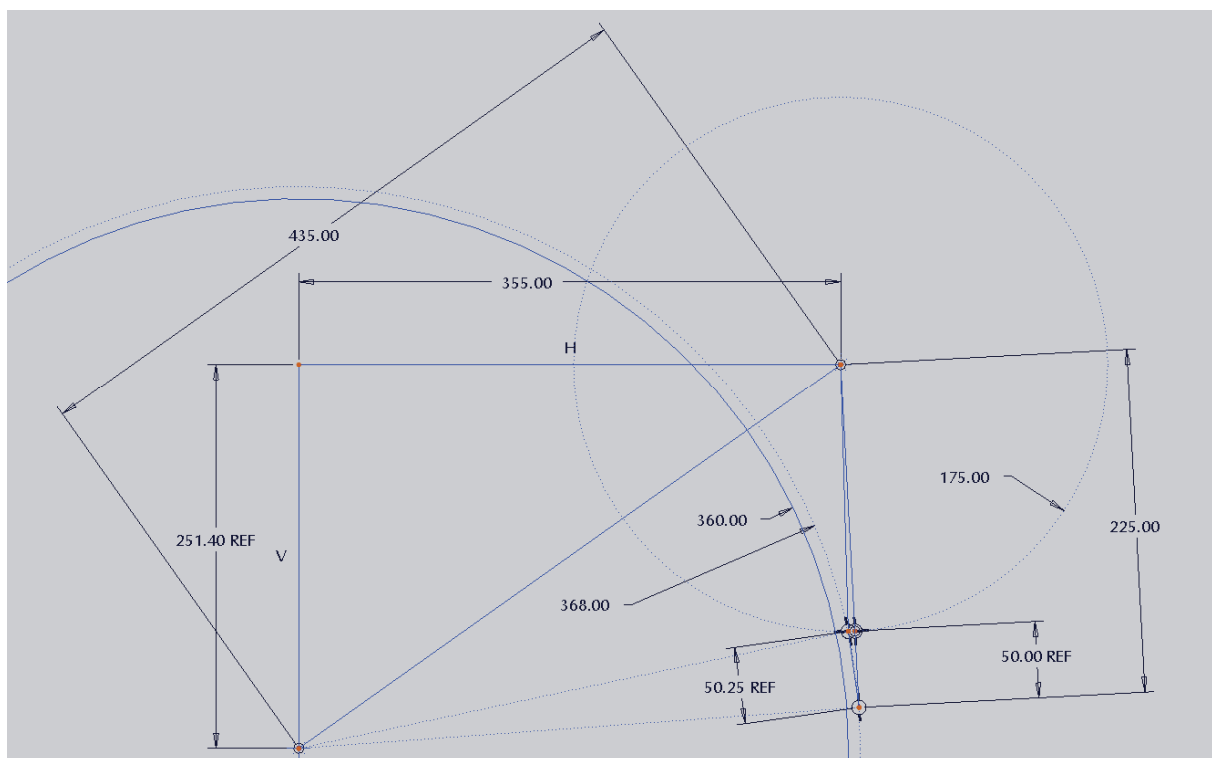


Abbildung 40: Verwendete Prüfanordnung von Garnklemme und Fangposition

Dehnungsbestimmung auf der Basis von High-Speed-Aufnahmen

Die Dehnungsmessung mit Hilfe der High-Speed-Kamera ermöglicht sehr viel kürzere Einspannlängen bzw. höhere Dehnraten, da ein Klemmenrutsch oder eine Dehnungsbehinderung über einen länger Garnstrecke im Klemmbereich keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Dehnungsmessung hat. Die Krafteinleitung kann dann sehr schonend erfolgen. Es wurden Untersuchungen zur direkten Dehnungsmessung auf dem Garn mit Hilfe der High-Speed-Kamera und dem Dehnungsmesssystem ARAMIS durchgeführt und auch geeignete Lösungen gefunden, die in Zukunft weiterverfolgt werden sollen.

4.2.4 Entwicklung des Messsystems und des Messprogramms

Die Messkette besteht nun aus zwei 5 kN Piezo-Kraftmesssensoren (Typ 9311), zwei Ladungsverstärkern (Typ 5015) der Fa. Kistler und einem Messrechner mit der Messwerterfassungskarte NI PCI 6115 (4 x 10 MSample/s). Die auf die zertifizierten Piezo-Sensoren basierende Messkette ermöglicht durch die Messbereichswahl am Ladungsverstärker eine extrem hohe Genauigkeit und Auflösung bei der Kraftmessung.

Die ersten Prüfungen wurden mit nur einer Fadensklemme durchgeführt, an der Anfang und Ende der Fadenschleife befestigt wird und somit die Zugkräfte aufsummiert wurden (Abbildung 28). Durch die getrennte Messung der Zugbelastung beider Fadenteile erhält man nun zwei Messkurven, die wichtige Informationen zur Qualität und Brauchbarkeit der Hochgeschwindigkeitszugprüfung geben. Die Versuche mit dem Prüfkonzept der Fadenschleife zeigten, dass nur durch den Einsatz von zwei Kraftsensoren eine eindeutige Aussage über die Prüfungsqualität gemacht werden kann. Da die beiden Ladungsverstärker nach der Prüfung auf ihrem Display die maximalen und minimalen Kraftwerte anzeigen, ist eine sofortige Prüfungskontrolle möglich und man hat eine gute Kontrollmöglichkeit für das Prüfprogramm und erhält immer Messwerte, auch wenn das Prüfprogramm einmal den Messvorgang nicht erfassen sollte.

Es war geplant das Prüfprogramm des ITV-Impaktprüfstands ($v_{\max} = 6 \text{ m/s}$) dahingehend zu modifizieren, dass es auch für die Aufgaben des ITV-Rotationsprüfstand eingesetzt werden kann. Bei der Impaktprüfung werden nach Start der Messung alle angeforderten Messdaten ständig in einem Ringspeicher abgelegt. Sobald der vordefinierte Schwellwert entsprechend der gewählten Triggerart erreicht wird, endet die Prüfung und die Messdaten werden angezeigt. Durch die richtige Wahl der Triggerparameter können zuverlässig auch schnellste Belastungsvorgänge wie beim ballistischen Beschuss erfasst werden.

Beim Rotationsprüfstand hingegen sind die Synchronisation der High-Speed-Aufnahme und der Messdaten, die Messung der Drehzahl und die zeitrichtige Probenzuführung ebenfalls von zentraler Bedeutung und können mit diesem Verfahren jedoch nicht realisiert werden. Die Neuentwicklung des Prüf- und Steuerprogramms für den Rotationsprüfstand war sehr zeit- und arbeitsintensiv, ermöglicht nun aber die exakte Zuordnung von Messdaten und High-Speed-Aufnahme, was die zahlreich durchgeführten Prüfungen zeigten. Es gibt aber dennoch weiter Optimierungspotential bzgl. der zeitrichtigen Probenzuführung und insbesondere der weniger arbeitsintensiven Datenauswertung.

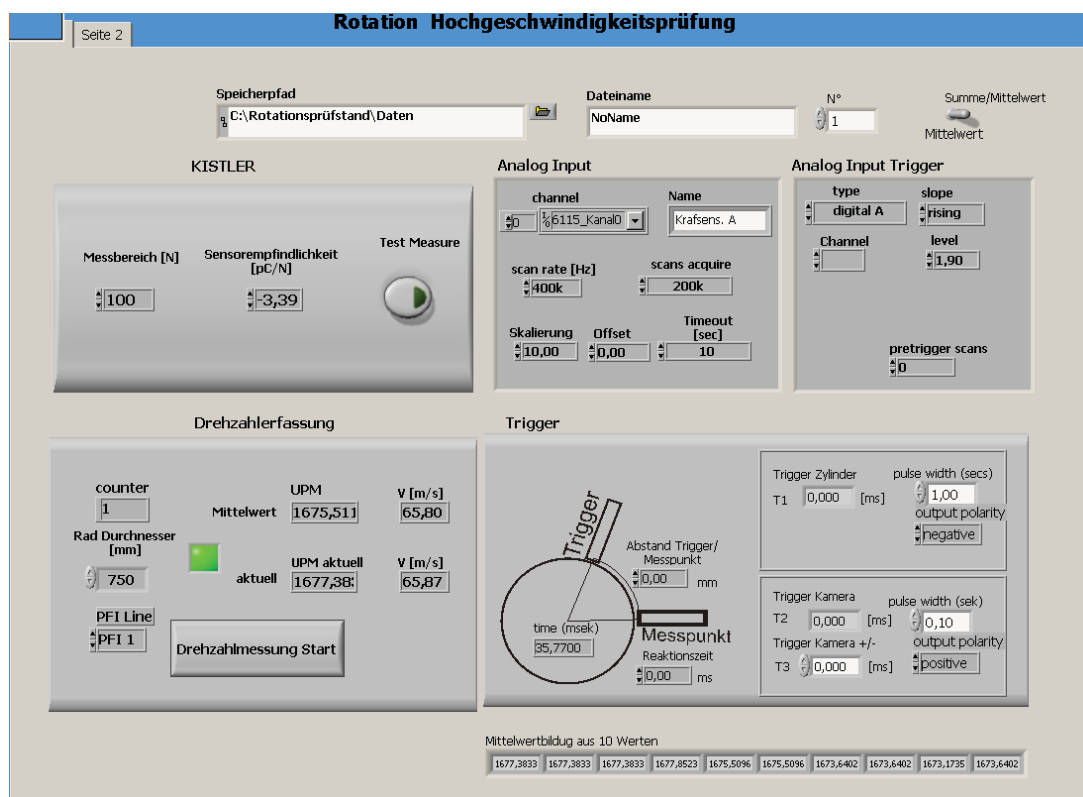


Abbildung 41: Neu entwickeltes Mess- und Steuerprogramm für die ITV-Rotationszugprüfung.

Programmbeschreibung

Im Menü „Kistler“ werden die Sensorempfindlichkeit und Messbereich des Ladungsverstärkers vorgewählt und automatisch am Ladungsverstärker eingestellt.

Im Menü „Analog Input“ und „Analog Input Trigger“ erfolgt die Kanalzuordnung für Kraft 1, Kraft 2, Weg, die gewünschte Datenerfassungsrate, die Messwertanzahl, der Triggerkanal und die Triggerart.

In Menü „Drehzählerfassung“ werden nach Aktivierung ständig die momentane Drehzahl gemessen und über 10 Werte eine mittlere Drehzahl angezeigt. Die Prüfgeschwindigkeit wird nach Eingabe des Prüfradius in mm ebenfalls online angezeigt.

Im Menü „Trigger“ erfolgen die Eingaben für die zeitliche Abstimmung der Probeneinbringung in Abhängigkeit der Drehzahl bzw. Prüfgeschwindigkeit.

Sobald der über 10 Umdrehungen gemittelte Drehzahlwert mehrere Sekunden konstant bleibt, erscheint ein zusätzlicher Schalter, mit dem die Prüfung dann gestartet werden kann. Da das richtige Timing der Prüfungseinbringung – insbesondere vor den Hochgeschwindigkeitsprüfungen - von Bedeutung ist, wird unmittelbar vor der Prüfung nochmals die aktuelle Drehzahl bestimmt, Daraufhin wird auf Basis der im Menü „Trigger“ vorgegebenen Parameter zeitrichtig die Druckluft-Magnetventile der Pneumatikzylinder zur Probenzuführung zeitrichtig geöffnet, die Kameraaufnahme und die Messwertaufnahme gestartet. Nach der Prüfung werden die gemessenen Daten für die beiden Kraftsensoren über der Zeit als Diagramm in einem weiteren Fenster angezeigt und können als ASCII oder Binärdatei exportiert werden.

4.2.5 Entwicklung der Fadeneinbringung

Die Fadenschleife wird mittels zweier Pneumatikzylinder eingebracht. Durch die geeignete Wahl der Zylinder und Magnetventile konnten mit 8 bar ungedämpft eine max. Ausfahrgeschwindigkeit über 12 m/s realisiert werden. Die max. Ausfahrgeschwindigkeit beim gering gedämpften Zylinder beträgt 11,5-12 m/s und wird nach 17 ms erreicht. Zwei ms später wird der max. Kolbenhub erreicht. Durch den Impakt erfährt der Kolben eine sehr hohe Beschleunigung entgegen seiner ursprünglichen Bewegungsrichtung und kommt erst nach ca. 45 ms zur Ruhe. Dies muss beim Fangvorgang der Fadenschleife entsprechend beachtet werden. Der linke und rechte Zylinder konnten mit Hilfe der High-Speed-Kamera so eingestellt werden, dass nun beide nahezu synchron ausfahren. Beim stark gedämpften Zylinder wird das Kolbenende zwar später erreicht, dafür ist die Kolbenschwungung viel geringer ausgeprägt. Der Kolben kommt auch hier erst nach 40 ms zur Ruhe, jedoch sind die geringeren Kolbenwegamplituden für einen sicheren Fangvorgang wesentlich besser geeignet.

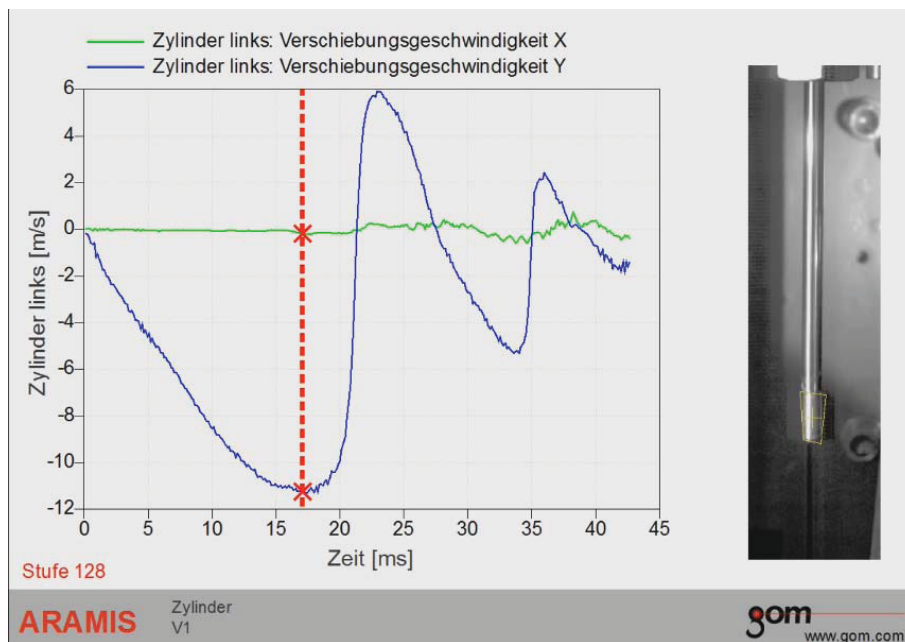


Abbildung 42: Analyse des Kolbenwegs für die Fadenzuführung – gering gedämpft

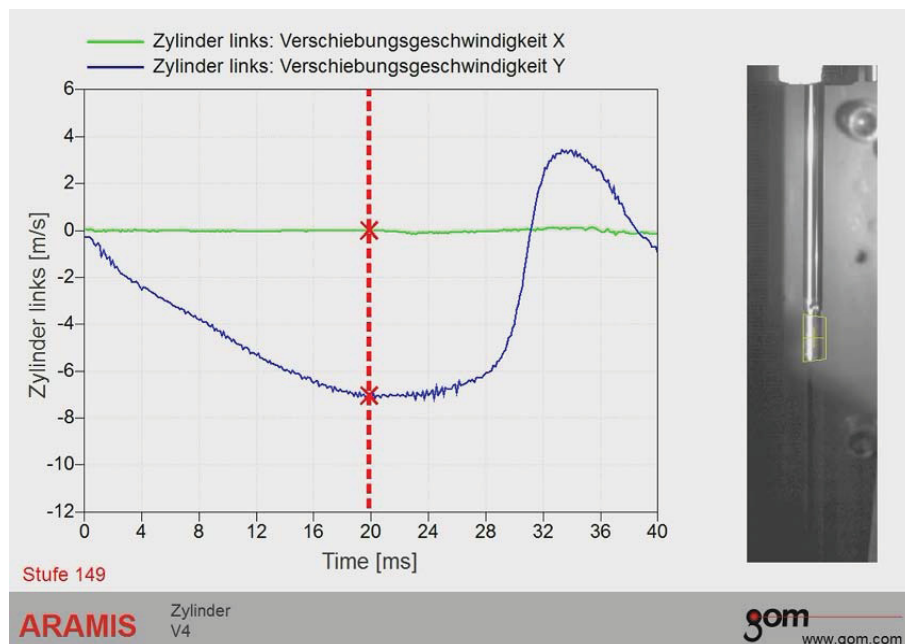


Abbildung 43: Analyse des Kolbenwegs für die Fadenzuführung – stark gedämpft

4.2.6 Entwicklung von Mitnahmenasen für Fadenschlaufen

An der Rotationsscheibe ist eine Nase fest montiert, die früher für Schlagprüfungen an metallischen Werkstoffen eingesetzt wurde (siehe Abbildung 26). Diese ist in dieser aggressiven und scharfkantigen Ausführung nicht für Garnzugprüfungen geeignet. Daher wurde für diese Schlagnase verschiedene Nasenaufsätze entwickelt, die auf der Schlagnase fixiert werden können. Die so modifizierte Schlagnase wird im Folgenden als Mitnahmenasen bezeichnet, da sie eine schonende Krafteinleitung ermöglicht.

Die Entwicklung der Mitnahmenasen durch Abform- und Modellierungsarbeiten gestaltete sich sehr zeit- und arbeitsintensiv. Zunächst wurde eine Negativ-Form der Schlagnase am Rotationsprüfstand Zwei-Komponenten-Silikon mit geringer Schwindung hergestellt.

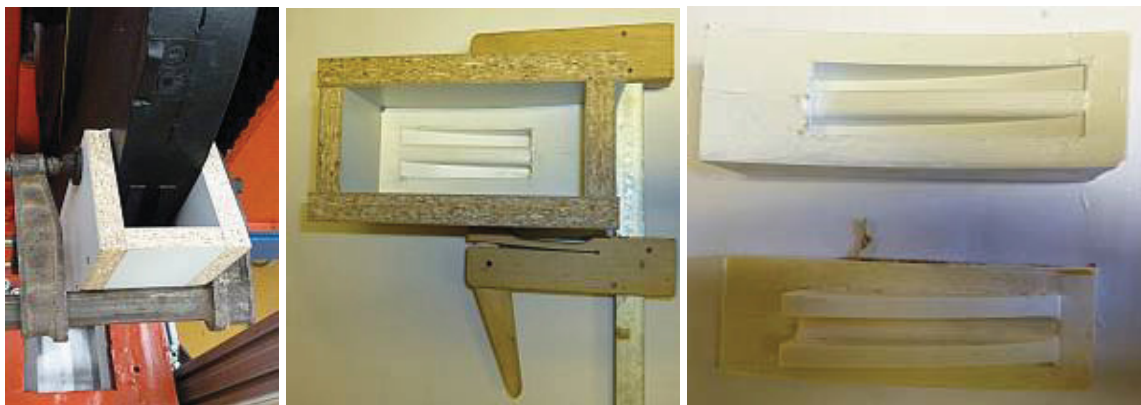


Abbildung 44: Abformung der Schlagnase zur Herstellung von Nasenaufsätzen; (links) Gießvorrichtung, (mitte) Negativform, (rechts) PU-Schlagnasenform.

Die gewünschte Geometrie der Mitnahmenase wurde aus Aluminium hergestellt. Dabei wurden Modelle des einfachen Halbzylinders bis hin zur komplex konkav geformten Form gefertigt. Nach Herstellung der entsprechenden Gießform konnten Mitnahmenasen aus unterschiedlichen Harzen mit verschiedener Duktilität und Reibungseigenschaft gefertigt werden. Die elastischen Polyurethane bieten die Möglichkeit den E- bzw. Druck-Modul gezielt einzustellen. Die „weichen“ Mitnahmenasen führten jedoch zu einer sehr hohen Reibung zwischen Mitnahmenase und Garn, mit der Folge, dass die Bruchkräfte deutlich geringer ausfielen und die Ergebnisse stark streuten. Eine möglichst glatte Oberfläche bzw. geringstmögliche Reibung ist für das Prinzip der Fadenschlaufenprüfung von Bedeutung.



Abbildung 45: Schlagnase mit aus Aluminium hergestelltem Aufsatz zur Gießformherstellung



Abbildung 46: Ergebnis des aus PU gegossenen Nasenaufsatzes

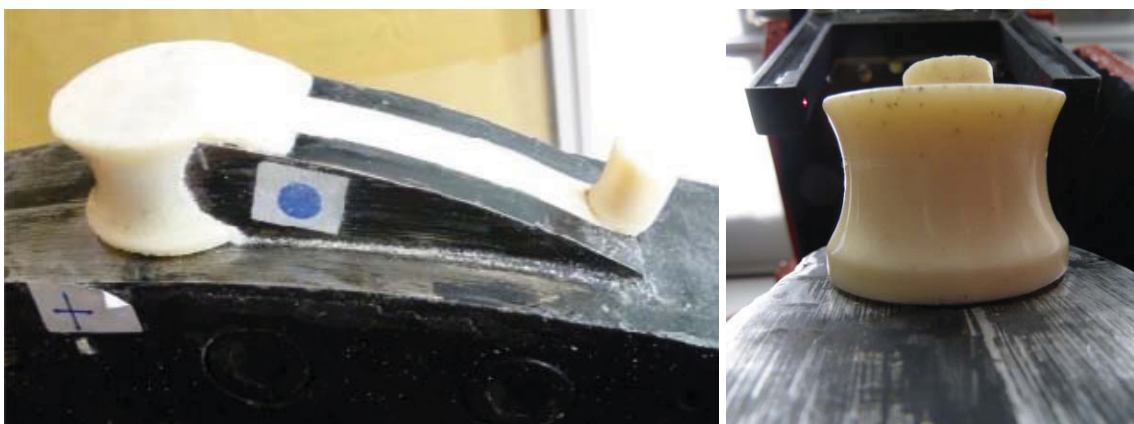


Abbildung 47: Formschlüssig eingeklebter Nasenaufsatz mit 32 mm und 13 mm Ø

Die beiden Kolbenstangen mit den an den Enden befestigten „Gummis“ spannen die durchgefädelte Fadenscheife im optimalen Fall rechteckförmig oder in Form eines symmetrischen Trapezes auf. Die Symmetrie ist wichtig, damit die Mitnahmenase die Fadenschlaufe mittig mitnimmt und die Fadenhälften gleich belastet. Hierdurch werden Ausgleichsbewegungen, zwischen der rechten und linken Fadenseite so weit wie möglich reduziert. Dies wird durch eine Phasenverschiebung der Kraftmesswerte zwischen linken und rechten Kraftmesssensor erkennbar, wobei die Bruchkraft einer der beiden Fadenseite deutlich geringer ausfällt. Dies ist insbesondere bei hoher Faden/Nase-Reibung erkennbar.

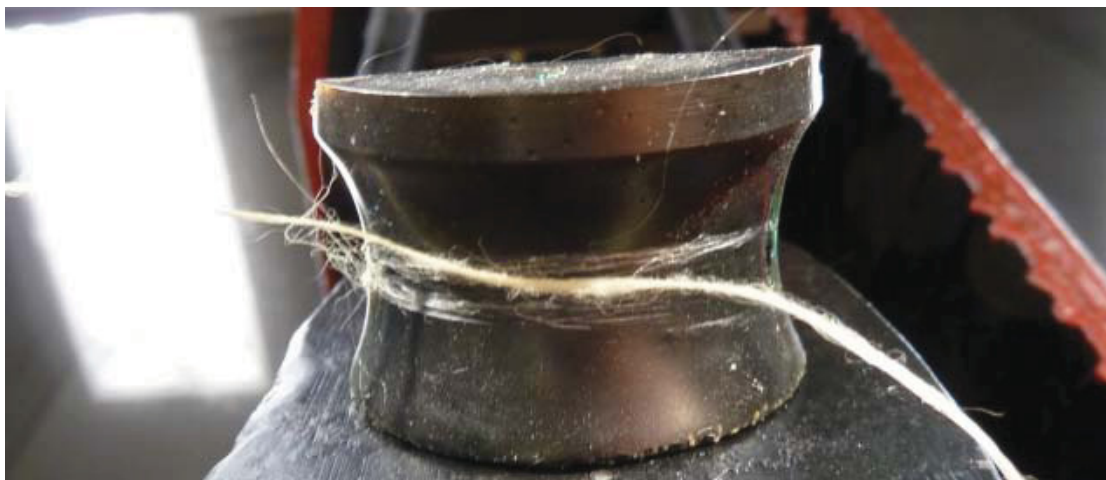


Abbildung 48: Nasenaufsatz aus „weichem“ PU mit hoher Faden/Nasen-Reibung

Je nach Öffnungsweite der Fadenschlaufe und des Durchmessers der Mitnahmenase entsteht eine Unsicherheit zur Ermittlung der tatsächlichen Dehnung bis zu dem Zeitpunkt, wo die Fadenschlaufe gerade ausgerichtet ist und dann der Weg der Mitnahmenase genau dem Dehnungsweg entspricht. In

Abbildung 49 und

Abbildung 50 sind die Verhältnisse für zwei Mitnahmenasen mit unterschiedlichem Durchmesser 13 und 32 mm dargestellt.

Beim Fangvorgang mit der 13 mm Ø Mitnahmenase beträgt der Weg vom Erstkontakt bis zum gesteckten Fadenzustand 43,8 mm, hingegen bei 32 mm Nasendurchmesser nur 22,3 mm. Mit Hilfe der High-Speed-Kamera kann der Zeitpunkt des gestreckten Zustandes exakt ermittelt und mit den Messdaten korreliert werden. Die auf diese Weise durchgeführten Auswertungen der Serienprüfungen mit 13 mm Nasendurchmesser zeigten, dass in

Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit bis zum gesteckten Zustand die „Vorkraft“ zunimmt.
Z.B. stieg beim PET Garn H die Vorkraft von 9 N (10 m/s) auf 15 N (40 m/s) an.

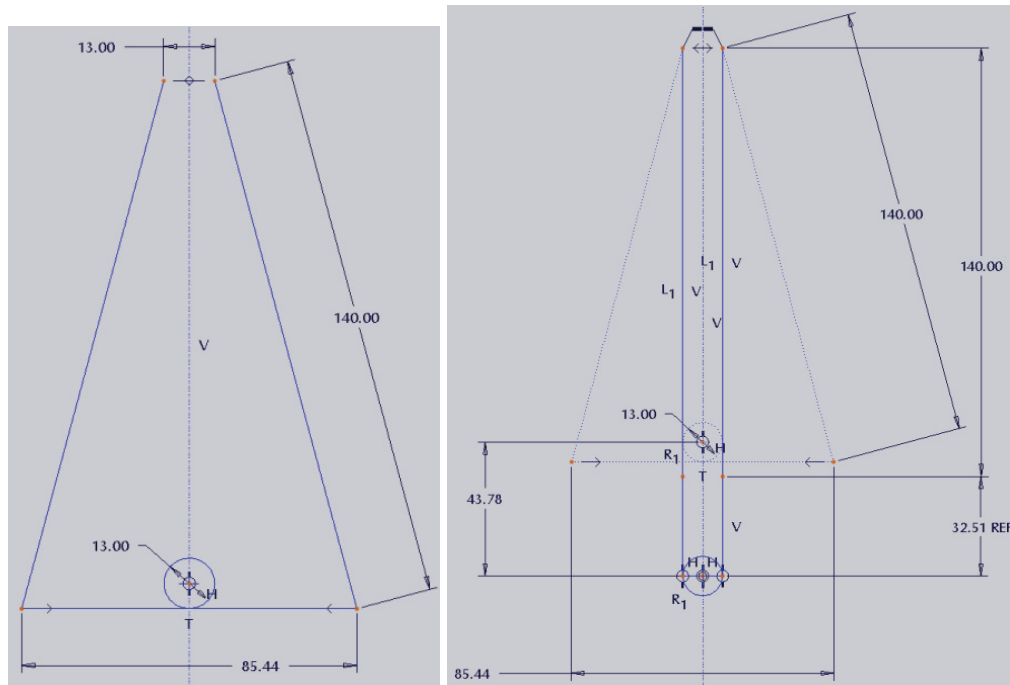


Abbildung 49: Analyse des Fangvorgangs Fadenschleife/Mitnahmenase mit 13 mm Ø;
links Fangposition, rechts Zeitpunkt der definierten Dehnung

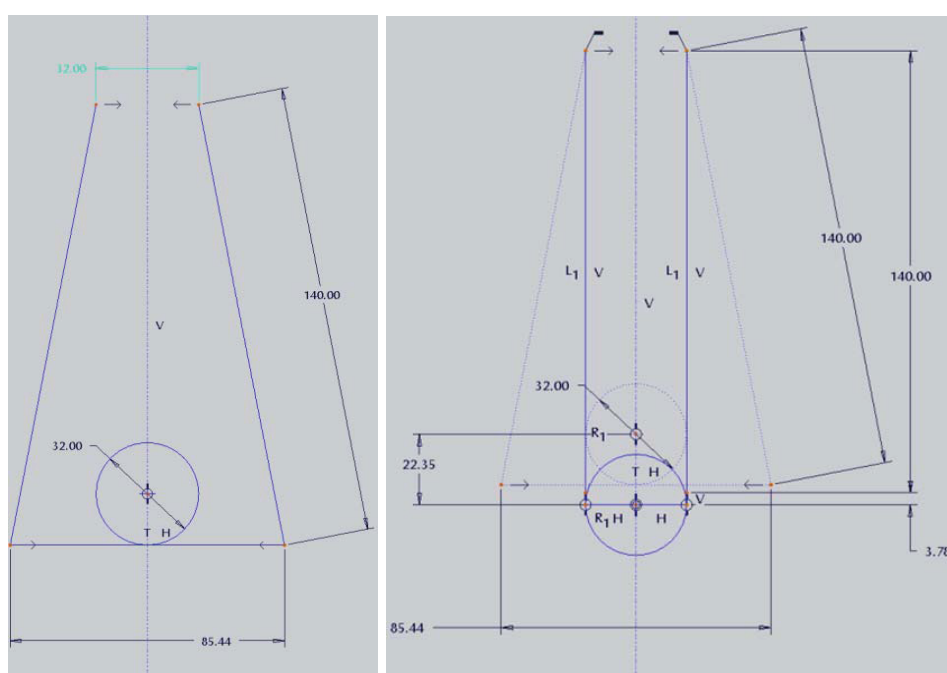


Abbildung 50: Analyse des Fangvorgangs Fadenschlaufe/Mitnahmenase mit 32 mm Ø;
links Fangposition, rechts Zeitpunkt der definierten Dehnung

Im Endzustand der Fadenschlaufenzuführung – quasi-statisch gemessen – sind beide Fadenhälften mit jeweils 0,6 N belastet, was in der Messkurve erkennbar ist.

Es wurden auch Zuführungskonzepte entwickelt, die eine vorkraftlose Zuführung ermöglichen. Prüfungen mit Prüfgeschwindigkeiten größer 20 m/s zeigten dann jedoch Messkurven mit deutlich ausgeprägten Schwingungsvorgängen, die die Auswertung erschweren.

4.2.7 Entwicklung leichter Garnklemmen

Die Entwicklung der Garnklemmen wurde auf der BOSE-Axial-Torsional-Wechselzugprüfmaschine mit bis zu 2 m/s durchgeführt. Ausgehend auf den im AIF-Projekt Nr.12813N am ITV entwickelten Klemmlösung für hochfeste Aramid- und HPPE-Garne (18 g) war hier die Zielstellung noch leichtere Klemmen mit vergleichbar schonender Krafterleitung zu entwickeln, die insbesondere auch eine schnellere Klemmung erlauben. Dabei sollten keine oder nur geringste Unsicherheiten infolge behinderter Dehnungsvorgänge im Klemmenbereich entstehen. Ausgehend von der vorhandenen Klemmenlösung (Abbildung 28) war ein Ansatz anstatt einer, zwei Garnklemmen zu verwenden. Beide Kraftsensoren werden direkt an der Traverse festgeschraubt, um alle vermeidbaren Unsicherheiten bzgl. Schwingungsphänomene zu eliminieren. Die entwickelten 9,51 g leichten Garnklemmen sind in der

Abbildung 51 dargestellt. Neben der Halbierung der Klemmenmasse und der damit verbundenen deutlichen Verbesserung der Eigenfrequenz des Messsystems, kann nun der Klemmenabstand entsprechend des Durchmessers der Mitnahmemasse angepasst werden. Die Klemmung erfolgt immer nach einem genau vorgegebenen Ablauf und ermöglicht so reproduzierbar auch die Prüfung hochfester Garne. Der einzige „Nachteil“ ist hier die sehr schonende Krafterleitung, die ein Klemmenbruch auch bei höchsten Zugkräften verhindert. Sehr kurze Einspannlängen ohne direkte Dehnungsmessung führen wegen der Dehnungsbehinderung über einen größeren Klemmbereich zu Dehnungsfehlern, die z.T. durch Vorversuche herausgerechnet werden können. Gelingt die direkte Dehnungsmessung direkt auf dem Garn ist auch diese geringe „Unsicherheit“ unbedeutend. Auf Basis dieser Garnklemmen wurden dann noch bessere Garnklemmen entwickelt. Die neuen ITV-Klemmen erfüllen die gestellten Anforderungen mit der noch geringeren Masse von 8,45 g und einem wesentlich vereinfachten Handling bei der Probeneinspannung. Die

Prüfungsergebnisse der quasistatisch durchgeführten Zugprüfungen mit den neuen und denen des DTNW zeigten, dass diese neuen Klemmen auch mit kürzester Einspannlänge problemlos einsetzbar sind. Die Fadeneinspannlänge für die weiteren Rotationszugprüfungen wurde daher von 750 mm zunächst auf 200 mm reduziert. Die bereits realisierten Dehnraten liegen über 330 1/s, Dehnraten von bis zu 1400 1/s mit 50 mm Einspannlänge sind zwar möglich, erfordern jedoch Anpassungsarbeiten wie die Verlegung der Gabellichtschränke.

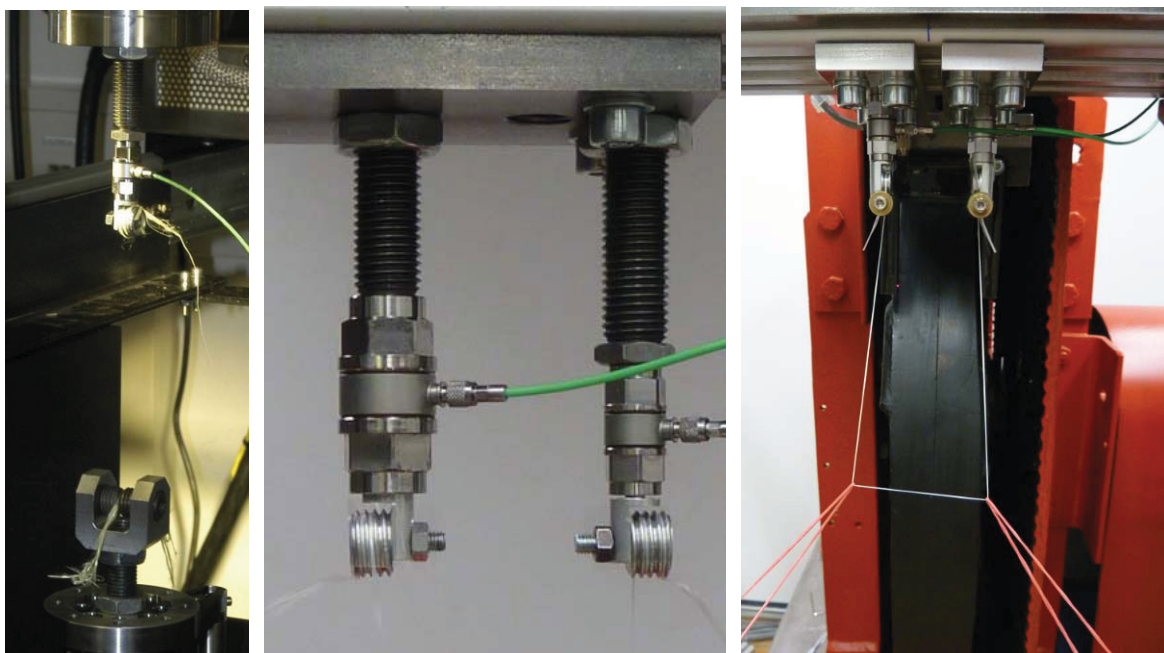


Abbildung 51: Neu entwickelte Garnklemmen für die Rotationszugprüfung; Entwicklung mit BOSE-Prüfmaschine (links), am Rotationsprüfstand (mitte) und masseoptimiert (rechts).

4.2.8 Einsatz der High-Speed-Kamera (HSK)

Für die Entwicklungsarbeiten und die Prüfungen stehen am ITV die derzeit schnellste Highspeed-Kamera Photron SA-5 mit 7500 (1 MPixel) Bilder/s und 775000 (18x124 Pixel) zur Verfügung. Die Ausleuchtung erfolgt mit vier extrem lichtstarken Kaltlicht-Beleuchtungssysteme „Dedocool“ mit speziellem Optiksistem. Die Lichtbündelung führt so zu keiner oder nur vernachlässigbaren Erwärmung der beleuchteten Proben und ermöglicht

schnelle und scharfe Bildaufnahmen bei sehr guter Ausleuchtung. Ohne den Einsatz dieser HSK wären die Entwicklungsarbeiten bzgl. Garnklemmen, Probenzuführung, Fangvorgang, Mitnahmenase, Messprogramms Auswertung und Beurteilung der Hochgeschwindigkeitsprüfung nicht möglich gewesen. Der Einsatz der HSK ist daher Bestandteil der Rotationszugprüfung. Noch weitere wichtige Informationen erhält man durch den Einsatz einer weiteren, gleichartigen Kamera. Eine HSK würde hier den Fangprozess dokumentieren, die andere würde zur Dehnungsmessung direkt auf dem Garn eingesetzt werden. Hierdurch wären noch sehr viel kürzere Einspannlängen bzw. höhere Dehnraten möglich (vgl. 4.2.3 Entwicklung der Dehnungsmessung).

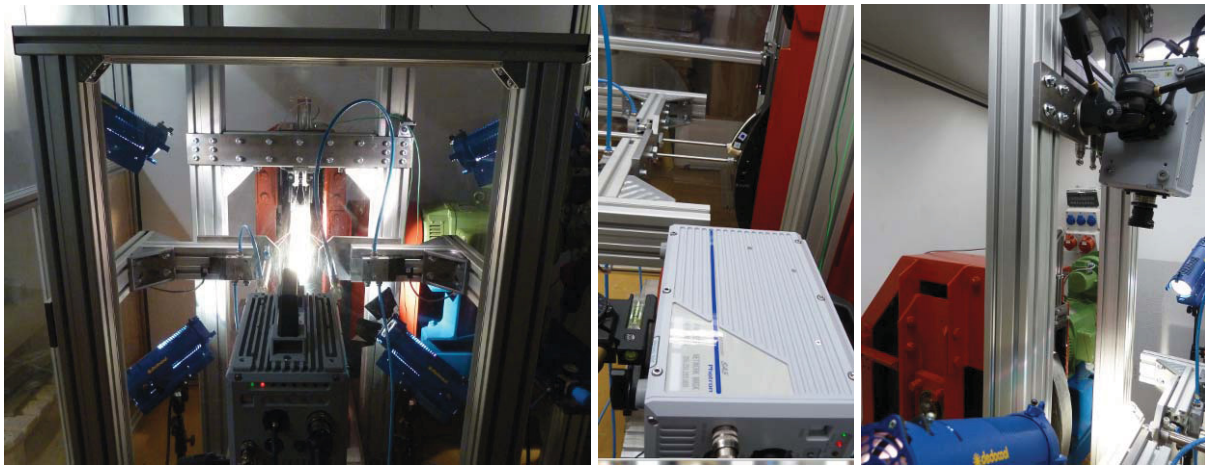


Abbildung 52: Kamerapositionen zur Dokumentation des Fangvorgangs

4.2.9 Entwicklung eines „kleinen“ Rotationsprüfstand

Ursprünglich war der große Rotationsprüfstand aus Sicherheitsgründen nur zur Prüfung von Garnen und hochfesten Textilien mit „geringeren“ Geschwindigkeiten (10-30 m/s, max. 50 m/s) geplant, da der Zustand des Prüfstandes nicht bekannt war. Die Herstellung des „kleinen“ Rotationsprüfstandes sollte Garnzugprüfungen über 50 m/s bis 100 m/s und mehr ermöglichen. Daher wurde mit der Fa. Zawischka mehrere Konzepte diskutiert; vom Einsatz der Rotationsscheibe mit nur 25 cm Durchmesser bis hin zu einer 6 mm starken Scheibe mit 1 m Durchmesser, wie sie zum Sägen von Aluminium eingesetzt wird. Das Problem ist hier die geringe Scheibendicke. Der Einsatz einer zweiten Scheibe, die mit Stegen etc. miteinander verbunden sind, führt bei den hohen Drehzahlen sicherlich zu Schwingungsvorgängen, die zunächst aufwendig untersucht werden müssten. Es wurde auch die Fertigung eines leichten Karbonrades, wie sie im Hochleistungsrad sport eingesetzt

werden, diskutiert. Die von der Fa. Zawischka angefragten Preise sprengten aber weit den verfügbaren Rahmen, da die sehr hohen Drehzahlen für Geschwindigkeiten über 100 m/s spezielle Sonderanfertigungen und zahlreiche Tests erfordern. Daher entschieden wir uns für die Lösung mit der 25 cm Rotationsscheibe, für die eine Vorrichtung mit Antrieb beschafft wurde. Es stellte sich jedoch heraus, dass die gewünschten Drehzahlen mit der gefertigten Konstruktion aus Sicherheitsgründen nicht betrieben werden sollte, diese Lösung viele Nachteile gegenüber dem großen Rotationsprüfstand besitzt und bereits für den großen Rotationsprüfstand entwickelte Lösungen hier nicht eingesetzt werden können. Mit dem „kleinen“ Scheibendurchmesser sind zudem auch nur kleinste Dehnungswege ohne größeren Fehler möglich. Da in der Zwischenzeit der große Rotationsprüfstand nach der erfolgten Schwingungsoptimierung bis zu 70 m/s sicher betrieben werden kann, der 13,5 kW Antrieb eine perfekt arbeitende Regelung zur Drehzahlkonstanz besitzt, die Höchstdrehzahl in weniger als 1 min erreicht wird und in ca. 30 s wieder zum Stillstand kommt, die Garnzugprüfungen mit den entwickelten Fadeneinbring- und Fadenfangsystem sehr gut und zuverlässig funktionieren, wurde die Lösung des kleinen Rotationsprüfstandes nicht weiter verfolgt.



Abbildung 53: Entwicklung eines „kleinen“ Rotationsprüfstands

4.3 Durchführung und Auswertung von Serienprüfungen

Da es im Rahmen des Projektes nicht mehr möglich war eine Klimatisierung des Prüfraums zu beschaffen, wurden bei den Prüfungen immer Temperatur und Luftfeuchtigkeit dokumentiert. Die Abbildung 54 zeigt den Prüfraum mit dem fertig gestellten ITV-Rotationszugprüfstand. Der Einsatz der HSK ermöglicht die exakte Zuordnung von gemessenen Kraftwert und der aktuellen Belastung der Fadenschlaufe. Der Fadenbruch stimmt exakt mit dem Kraftabfall im Kraft-Zeit-Diagramm überein. Ferner wird dokumentiert, zu welchem Zeitpunkt die Fadenabschnitte der Fadenschlaufen gestreckt sind. So kann der Fehler vermieden werden, dass die Dehnungsbestimmung ab einer zur geringen Vorkraft erfolgt. Die ersten Prüfserien wurden nach Vorgabe der geringen Vorkraft 0,5 N ermittelt, mit dem Ergebnis, dass insbesondere bei hohen Prüfgeschwindigkeiten 30 – 70 m/s etwas zu große Dehnungswerte ermittelt wurden.

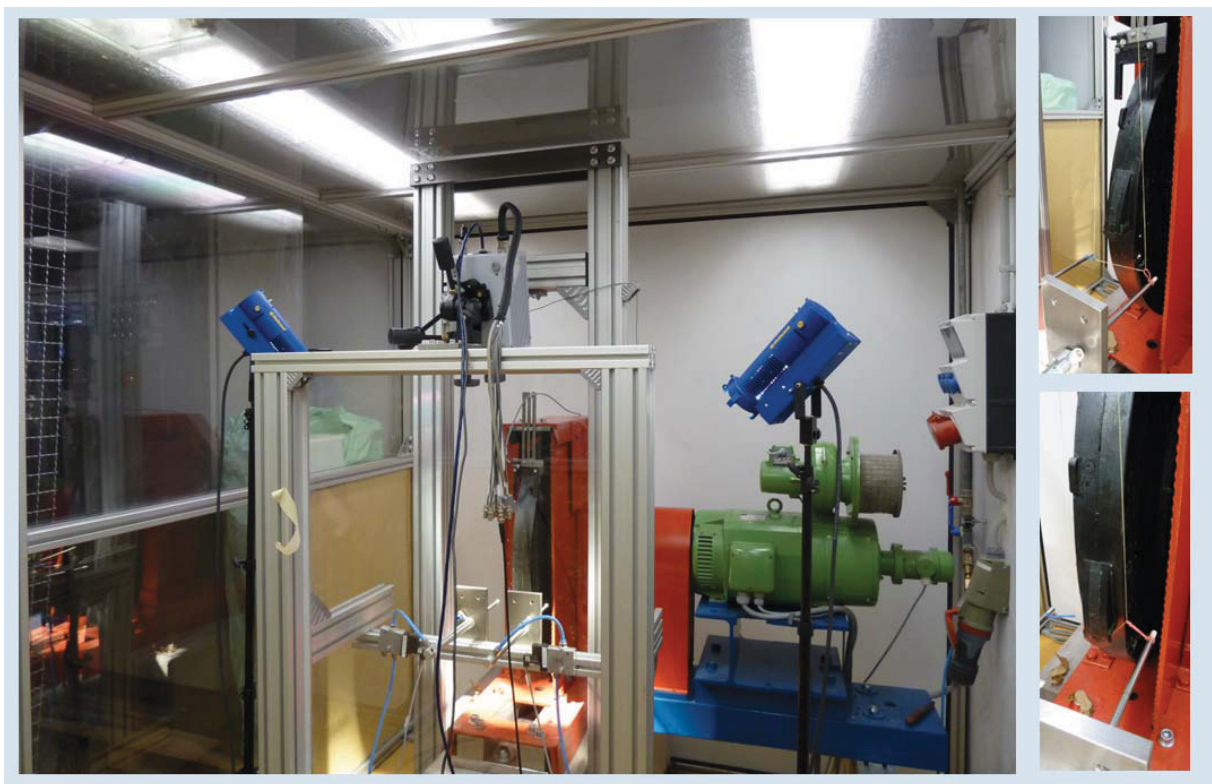


Abbildung 54: ITV-Rotationszugprüfstand zur Durchführung von Serienprüfungen

Die folgenden Bilder zeigen das Ergebnis und die Gegenüberstellung der Messkraftverläufe für die beiden Kraftsensoren und die Summe der beiden Messsensoren für eine Zugprüfung

mit 2,5 m/s und 66 m/s für die Einspannlänge $l_0 = 750$ mm. Im aktuellen Prüfprogramm wird nun die Mittelwert- anstatt der Summenkurve der Sensoren dargestellt.

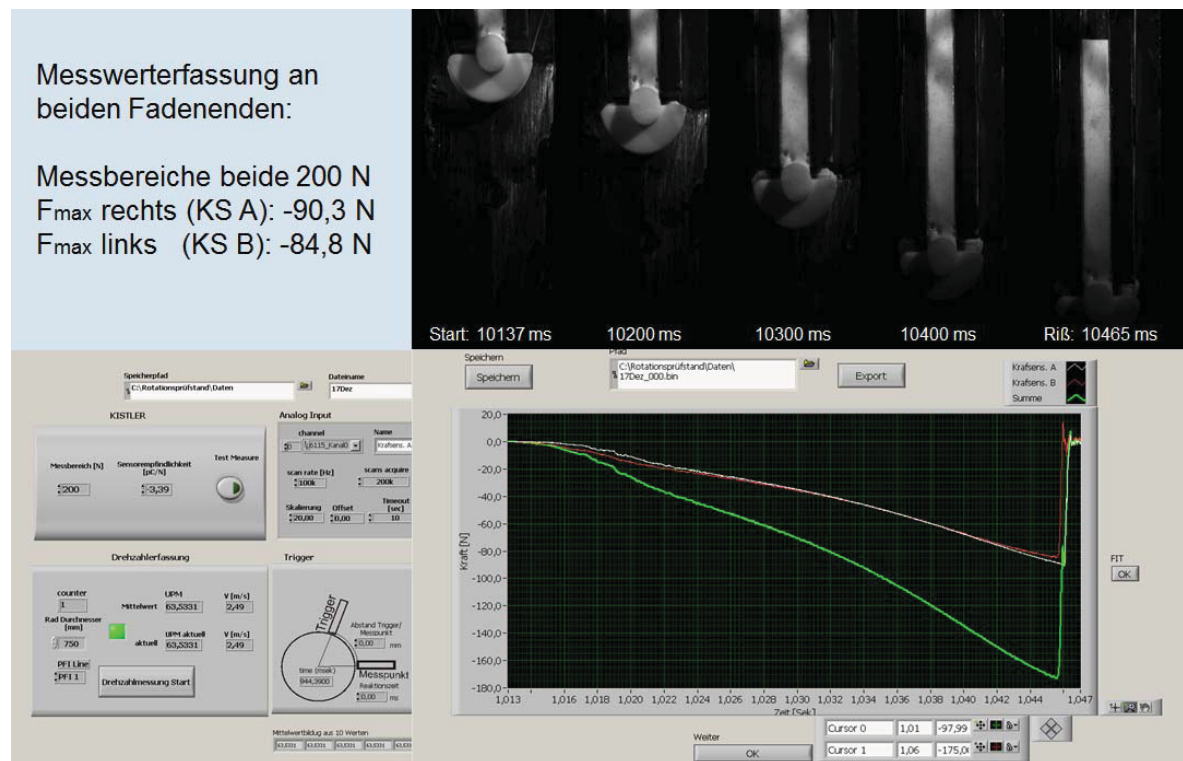


Abbildung 55: Prüfergebnisse für PET-Garne 1100 dtex, $2v = ,54$ m/s, $l_0 = 750$ mm, Dehnrate $3,4 \text{ s}^{-1}$

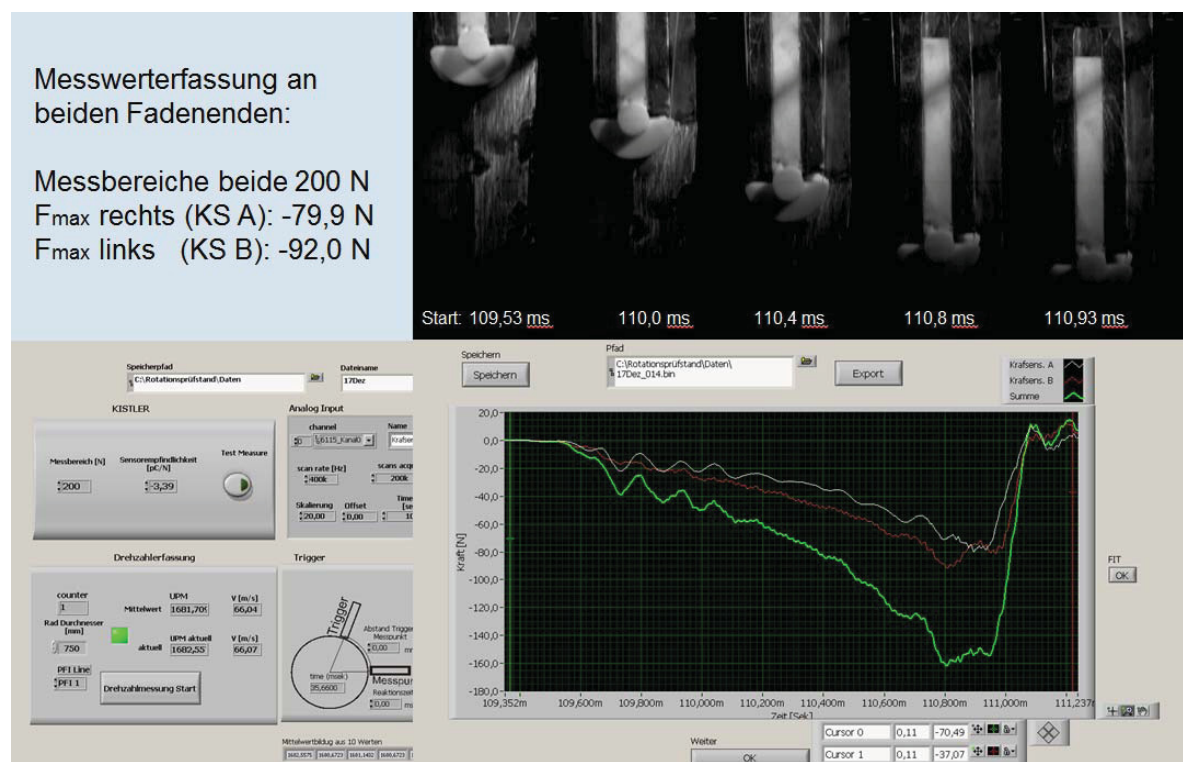


Abbildung 56: Prüfergebnisse für PET-Garne 1100 dtex, $v = 66,04 \text{ m/s}$, $l_0 = 750 \text{ mm}$,
Dehnrates $88,1 \text{ s}^{-1}$.

Das unten aufgeführte Diagramm zeigt die ersten Ergebnisse für das PET H Garns mit $l_0 = 750 \text{ mm}$ für die Prüfgeschwindigkeit von 2,5 bis 66 m/s, wobei nur die Werte des Kraftsensensors 2 ausgewertet wurden, da bei dieser Prüfserie hier immer die höchsten Bruchkräfte und Bruchrechnungen erreicht wurden. Die Probenzuführung erfolgte nicht über „Gummis“ sondern belastungsfrei. Die Prüfungen wurden ab der Vorkraft 0,5 N ausgewertet.

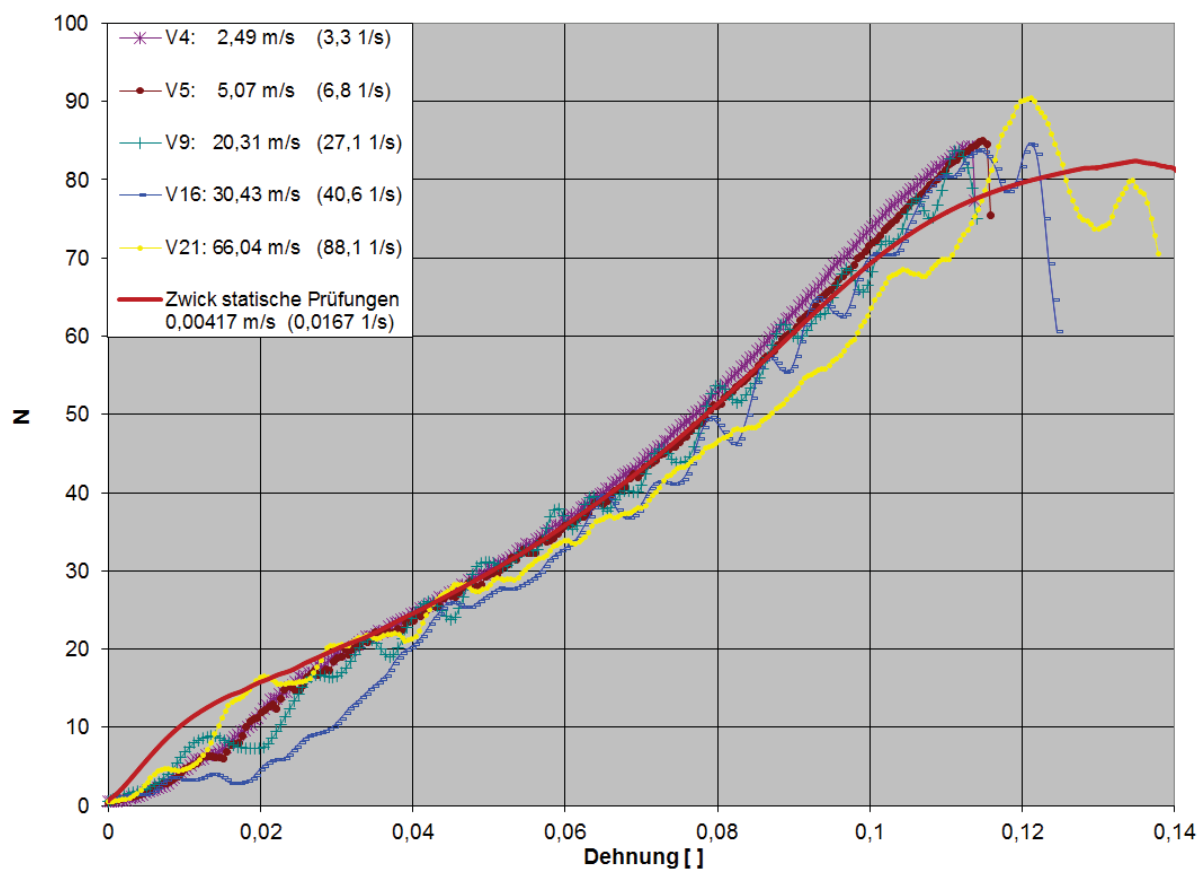


Abbildung 57: Erste Prüfergebnisse für PET-Garne 1100 dtex, $v = 2,5 \text{ bis } 66 \text{ m/s}$, $l_0 = 750 \text{ mm}$, Dehnrates $3,3 \text{ bis } 88,1 \text{ s}^{-1}$, Bestimmung der Dehnung ab 0,5 N.

4.3.1 Probleme und Phänomene der Prüfung

- Es ist kein konstantes Klima verfügbar, die Luftfeuchtigkeit und die Temperatur schwanken in Abhängigkeit von der Jahreszeit. Die Beschaffung einer Prüfraumklimatisierung ist geplant.

- Druckluftschwankungen führen zu Unsicherheiten bei der Probenzuführung.
- Die hohen Drehzahlen der großen Rotationscheibe führen zu turbulenten Luftverwirbelungen, die bei der Probenzuführung ohne oder mit geringer Vorspannung zu Fehlversuchen beim Fadenfang führen können.

Bei den Prüfungen zeigten sich Phänomene im Messkraftverlauf:

- Bei einigen Versuchen tritt eine Phasenverschiebung und Unterschiede bzgl. des Verlauf, Bruchkraft- und Bruchdehnung zwischen den beiden gemessenen Kraftverläufen auf. Die Filmauswertungen zeigen, dass dies insbesondere bei Prüfungen mit außermittigem Fangvorgang erfolgt. Mitnahmenasen mit erhöhter Nasen/Faden-Reibung verstärken diesen Effekt.

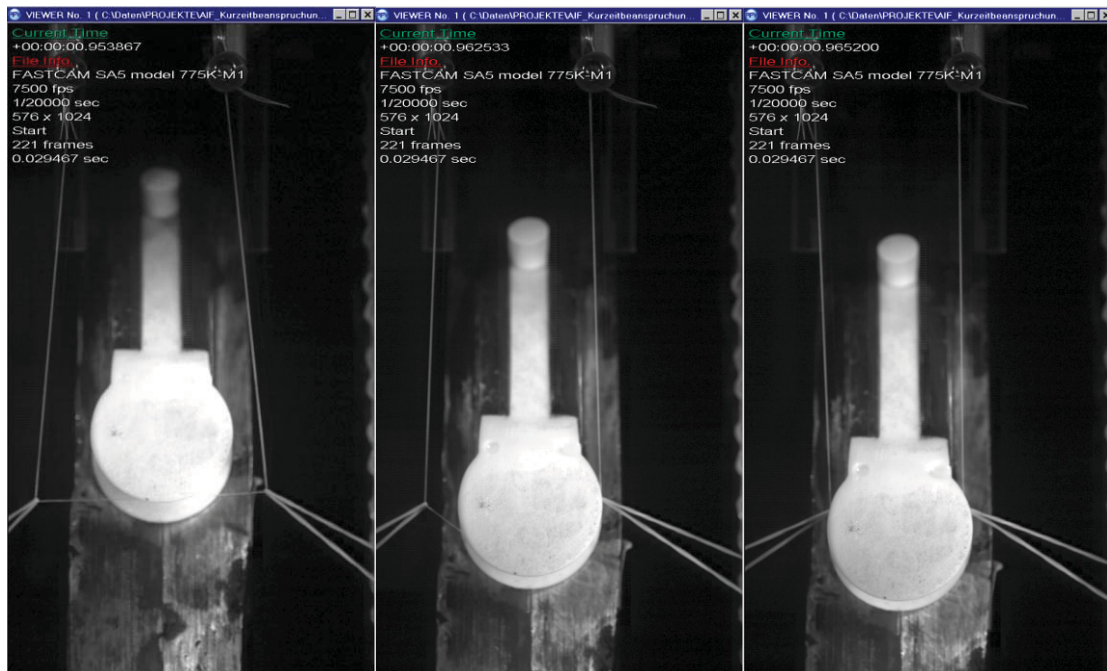


Abbildung 58: Dokumentation eines außermittigen Fadenfangs.

- Bei sehr hohen Prüfgeschwindigkeiten, große Garmlängen und insbesondere bei der vorkraftfreien Probenzuführung treten im gemessenen Kraftverlauf ausgeprägte Schwingungen auf, die nicht die Eigenfrequenz des Messsystems sein können. Die Highspeed-Filme zeigten, dass die Garnabschnitte während der Zugbelastung zusätzlich auch deutlich erkennbare Querschwingungen in Bereich dieser Frequenzen ausführen. Diese Querschwingungen könnten als Folge des Fangvorgangs entstehen, da beim schlagartigen Spannen der weit geöffneten Fadenschleife eine nach innen gerichtete Beschleunigungskomponente wirkt.

- Die Prüfungen mit der großen Mitnahmenase (32 mm) führen zu stärkeren Schwingungsvorgängen als die mit dem kleinen Durchmesser (13 mm). Als Ursache hierfür wird die schlagartigere Krafteinleitung vermutet, da bei derselben Öffnungsweite der Fadenschlaufe bis zur formschlüssigen Mitnahme durch die Nase weniger freier Fadenlänge zur Verfügung steht und hierdurch wesentlich höhere Beschleunigungen auftreten können (vgl. Abbildung 49, Abbildung 50).

Die Rotationszugprüfung mit dem Einsatz von zwei Kraftmesssensoren liefern immer zwei Messkraftverläufe. Die Messkraftverläufe sind bei sorgfältiger Prüfungsvorbereitung und niedrigen Prüfgeschwindigkeiten bis 10 m/s in der Regel nahezu deckungsgleich, mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit- insbesondere bei 40 m/s und mehr, werden die Unterschiede größer. Es treten dann Phasenverschiebungen und/oder ausgeprägte Schwingungen auf und es werden unterschiedlich große Bruchkräfte gemessen.

Hier stellt sich die Frage, welcher Kraftverlauf ist diejenige, der zur Auswertung für Kraft-Dehnungs-Diagramme herangezogen werden sollte? Es gibt hier mehrere Betrachtungsweisen:

- 1) Die Rotationsprüfung mit der Fadenschlaufe sind zwei Zugprüfungen, die gleichzeitig durchgeführt werden. Solange keine relevante Phasenverschiebung auftritt, können aus den beiden Messkraftverläufen ein gemittelter Kraftmessverlauf berechnet werden.
- 2) Jede der zwei Prüfungen sollte immer getrennt ausgewertet werden.
- 3) Es wird aus der Fadenschlaufen-Zugprüfung nur der Messkraftverlauf eines Sensors zur Auswertung verwendet. Das Auswahlkriterium für die wäre die Bruchkraft bzw. Bruchdehnung oder der Messkraftverlauf mit den geringeren Schwingungsvorgängen.

Zurzeit wird die Auswertung der Mittelwertbildung favorisiert, weitere Untersuchungen hierzu sind geplant.

Aus der Darstellung des Fangvorgangs einer trapezförmig geöffnete Fadenschlaufe in Abbildung **49** und

Abbildung **50** wird deutlich, dass vom Erstkontakt bis zu dem Moment, ab dem die Fäden der Fadenschlaufe gestreckt sind und eine weitere Nasenbewegung exakt der Fadendehnung entspricht, nicht bekannt ist, wie stark das Garn vorgedehnt ist. Bei den Prüfungen mit dem großen Nasendurchmesser (32mm) sind keine relevanten Kräfte im gestreckten Garnzustand vorhanden, hingegen bei den Prüfungen mit kleiner Nase (13mm

Ø) sind mehrere N messbar. Hier gibt es noch Optimierungspotential (Nasendurchmesser, Zuführung, Öffnungsweite ..) und weitere Untersuchungen hierzu sind geplant

Die belastungsfreie Fadenzuführung führte zu vielen Fehlversuchen und konnte im Rahmen des Projekts nicht mehr weiter optimiert werden. Ferner traten besonders bei dieser belastungsfreien Fadenzuführen sehr häufig stark ausgeprägte Schwingungen auf, die eine Auswertung bzgl. (E)-Module sehr erschwerten bzw. unmöglich machten. Aus diesem Grund wurden die weiteren Serienprüfungen wieder mit Gummis durchgeführt, wodurch die Fadenschlaufe im Fangzustand mit 0,6 N etwas gespannt ist. Eine „Unsicherheit“ ist der Kraftbeitrags des Gummis, sobald die Fadenschlaufe von der Nase mitgenommen wird. Je nach der Öffnungsweite werden dabei die Gummis bis die Fäden gestreckt sind dynamisch gedehnt. Führt das bei hochfesten Garnen zu vernachlässigbaren Fehlern, muss das aber bei „weichen“ Garnen mit geringen Bruchdehnung, Bruchkräften und E-Modul berücksichtigt werden. Hierzu sind weitere Untersuchungen geplant.

4.3.2 Aktuelle Auswertung der High-Speed-Rotationszugprüfungen

Der Messcomputer und die Ladungsverstärker werden von mehreren Prüfständen genutzt womit Zeitverluste und „Umzugsgefahren“ verbunden sind. Aufgrund der alten Hardware des Messrechners muss für die Highspeed-Aufnahme und der Auswertung von Bild und Messdaten zusätzlich ein separater Computer eingesetzt werden.

Die zurzeit durchgeführte Auswertung ist sehr zeit- und arbeitsintensiv. Je nach definierter Datenerfassungsrate und Datenanzahl im Prüfprogramm ergeben sich drei Datenreihen (Zeit, Kraft 1, Kraft 2) mit jeweils mehreren 10T Werten. In einem entwickelten Programm zur Auswertung der Rotationszugprüfung werden die Daten importiert und entsprechend der einzugebenden Daten für Drehzahl, Prüfradius, Einspannlänge in Weg und Dehnung umgerechnet und die Prüfgeschwindigkeit und Dehnrate angezeigt (s.

Abbildung 59). Die folgenden Bilder zeigen das Auswerteprogramm und die Gegenüberstellung der High-Speed-Bilder und der Messkurve beispielhaft am PET Garn mit 550 dtex (H) für eine Prüfung mit 10 m/s bei der Einspannlänge von 200 mm.

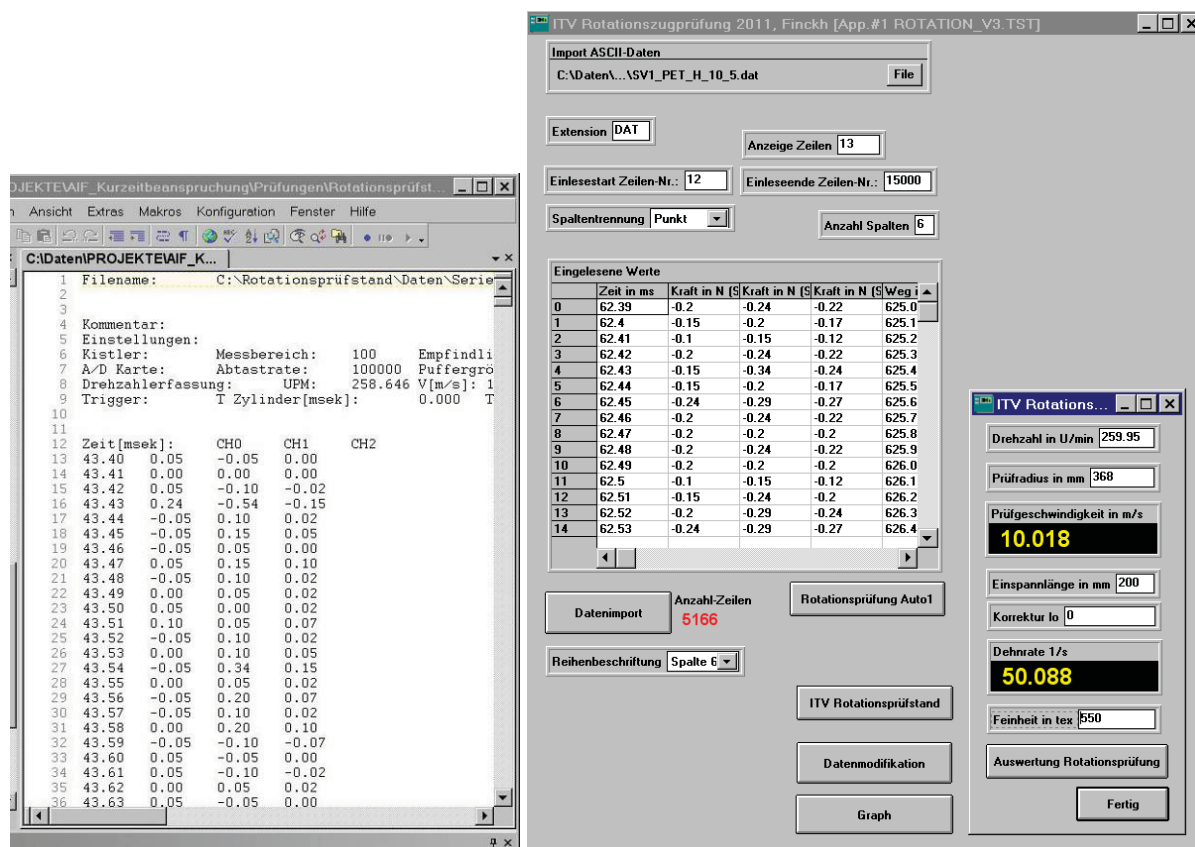


Abbildung 59: Auswertungsprogramm der ITV Rotationszugprüfung: Links exportierte Originaldatei der Prüfung, rechts importierte und berechnete Daten

Nach der Umrechnung erscheint ein neues Programmfenster, in dem die Original-Messkurve dargestellt wird. Im Dropdown-Menü kann für die X-Achse und für die Y-Achse Zeit in ms, Weg in mm, Dehnung, Kraftsensor 1 (linker Kraftsensor von vorne gesehen), Kraftsensor 2 (rechts) oder die Mittelwertkurve beider Kraftsensoren gewählt werden. Durch die beiden Schieberegler kann der Anfang und das Ende für den interessierenden Bereich beliebig gewählt werden, die beiden Kurvenpunkte sind durch eine Gerade miteinander verbunden. Die x-, und y-Koordinaten der Kurvenpunkte sowie dx und dy, die Geradensteigung als auch die Fläche unter diesem Kurvenabschnitt werden im Menüfenster angezeigt. Durch die „Cutting“ Funktion wird der interessierende Bereich ausgeschnitten und diagrammfüllend aufgezogen. Jetzt kann mit der Suchfunktion y bei x=? bzw. x bei y=? die interessierenden Werte für x oder y gefunden werden. So können Highspeed-Bilder mit dem Zeitstempel optimal dem Messwert zugeordnet werden und analysiert werden.

Steigungen bzw. feinheitsbezogene E-Module erhält man durch Selektion der feinheitsbezogene Kraft als y-Achse und Dehnung als X-Achse. Durch die Funktion

„Nullpunktsverschiebung“ erhält man die gewünschte Kurve, die dann im ASCII-Format exportiert werden kann. Um die Module bei bestimmten Werten zu erhalten, wird der gesuchte x- bzw. y-Wert eingegeben und mittels der Schieberegler die Kurvenpunkte rechts und links des gesuchten Wertes positioniert. Da die „Steigung“ dabei im Diagramm angezeigt wird, kann das Ergebnis sehr gut auf die Abbildungsqualität überprüft und angepasst werden. Die aktuelle Geradensteigung wird dabei ständig im Fenster angezeigt. Bei diesen Auswertungsarbeiten würde eine Automatisierung die Arbeit sehr erleichtern.

Die folgende

Abbildung **60** zeigt das Ergebnis einer Rotationszugprüfung mit der Fadenzuführung mittels Gummis. Im eingefahrenen Zustand ist die Fadenschlaufe mit 0,4 N belastet. Die Messung startet mit der Öffnung des Pneumatikventils und der Ladungsverstärker wird auf 0 zurückgesetzt. Bei der Fadenzuführung wird die Fadenschlaufe um 0,2 N entlastet und die Messwerte zeigen vor dem Fadenfang daher nahezu konstant-0,2 N an. Die Messkurve muss daher um 0,6 N reduziert werden. Hier zeigt sich auch der große Vorteil der durchgeführten Schwingungsentkopplung zwischen den Pneumatikzylindern der Fadenschlaufenzuführung und des Prüfrahmens mit den Kraftsensoren. Der heftige Ausfahrvorgang mit Geschwindigkeiten mit 10-12 m/s und insbesondere der schnelle Stoppvorgang führen ansonsten zu unerwünschten Schwingungen im Kraftmesssignal, die bei unserem Rotationszugprüfungen nicht auftreten.

Die folgenden, zeitrichtigen Gegenüberstellung der Highspeed-Bilder und gemessenen Kräfte (Abbildung 62 bis Abbildung 65), zeigt, dass die Zuordnung von Bild und Messwert perfekt funktioniert und hierdurch wichtige Informationen zur Prüfung und dessen Auswertung ableitbar sind.

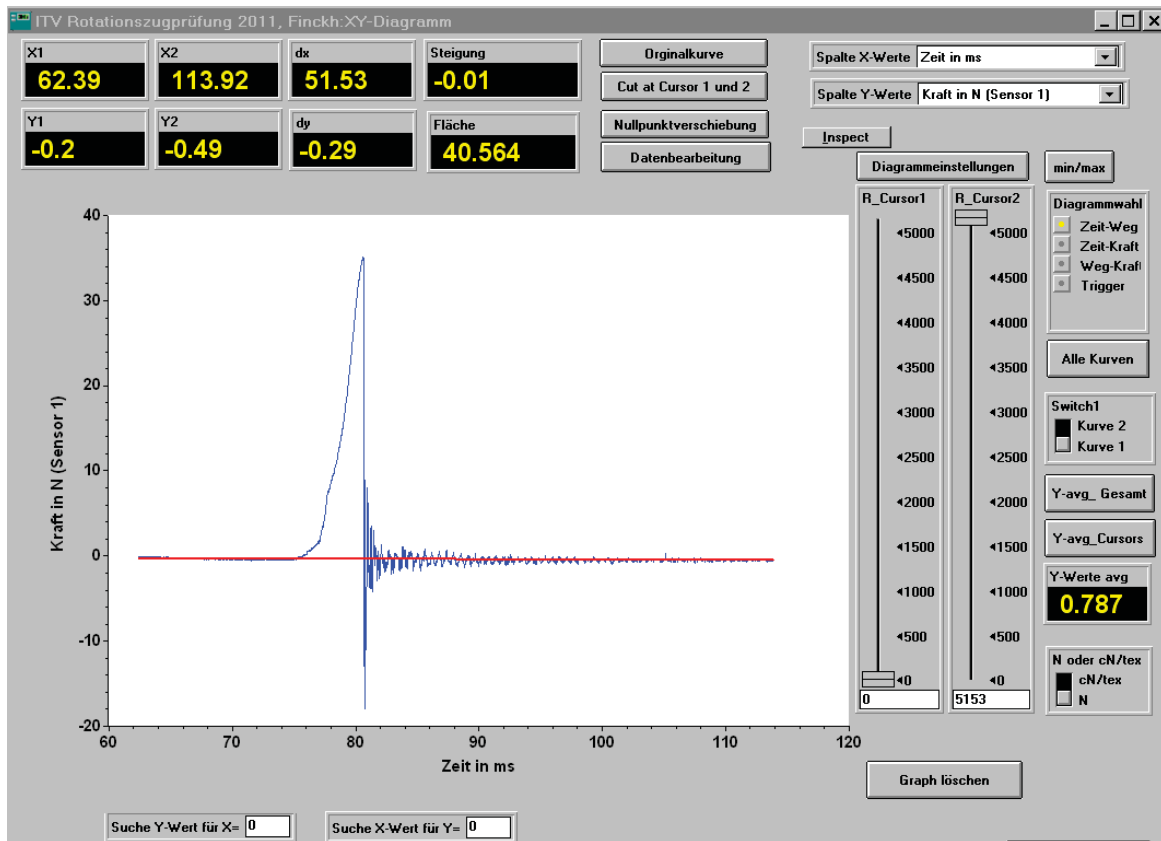


Abbildung 60: Auswertungsprogramm nach Eingabe der Prüfparameter

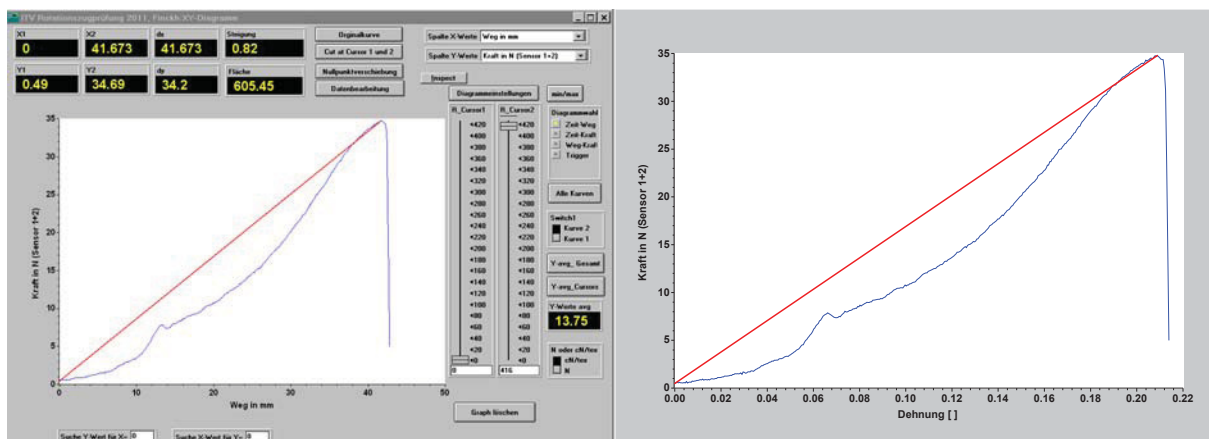


Abbildung 61: Zuschnitt des interessierenden Bereichs mit anschließender Nullpunktverschiebung, Wahl der Darstellung der X und Y-Werte (Kraftsensor 1, 2 oder 1+2 gemittelt). Dargestellt sind links das Kraft/Weg-Diagramm, rechts das Kraft/Dehnungs-Diagramm.



Abbildung 62: Bestimmung des Prüfungsbeginns anhand der High-Speed-Bilder: Links erster geringer Kraftanstieg messbar, rechts Garnabschnitte nahezu gestreckt

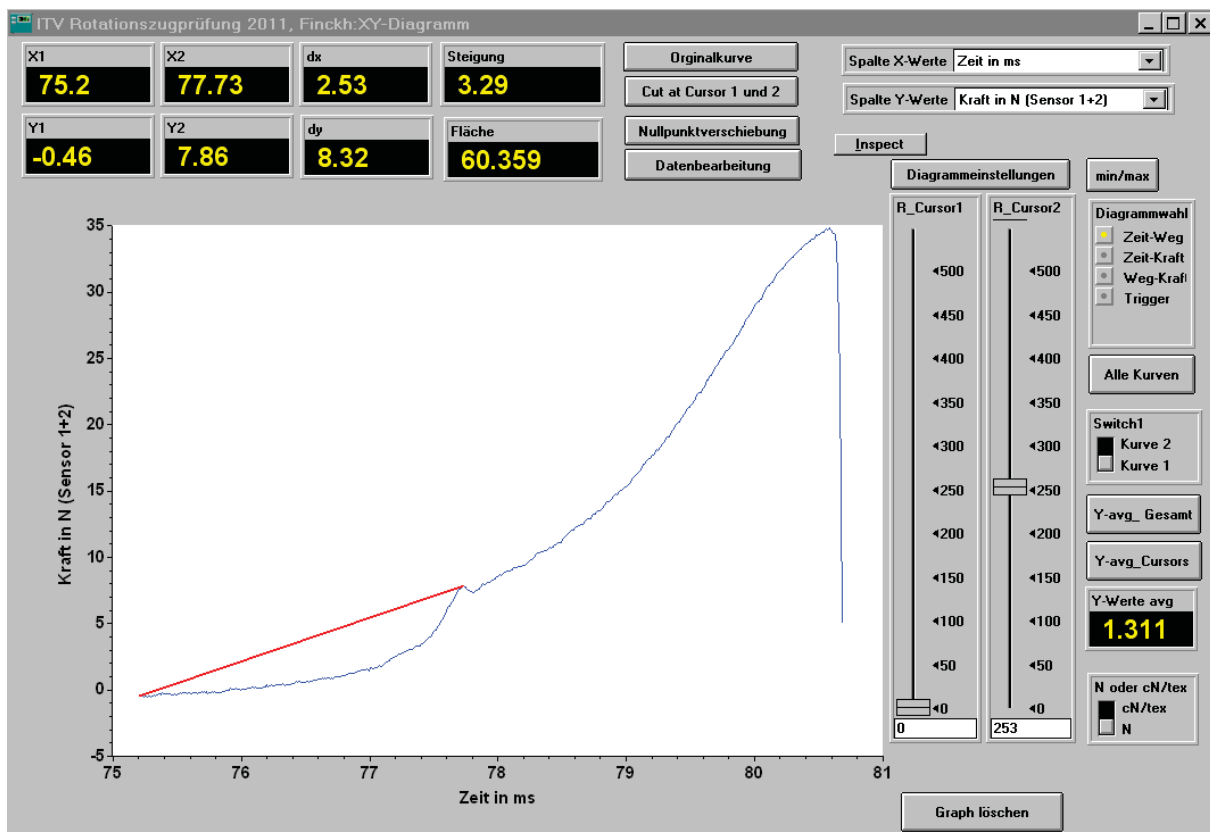


Abbildung 63: Bestimmung des Prüfungsbeginns anhand der Messkurve

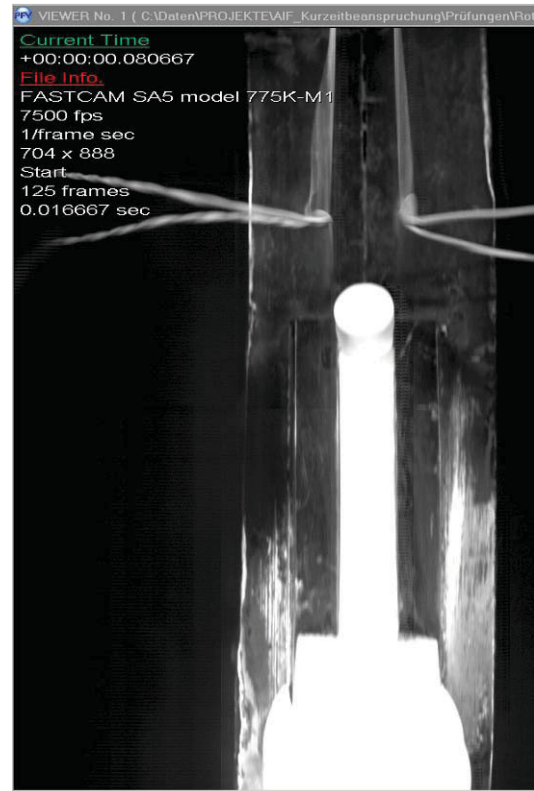
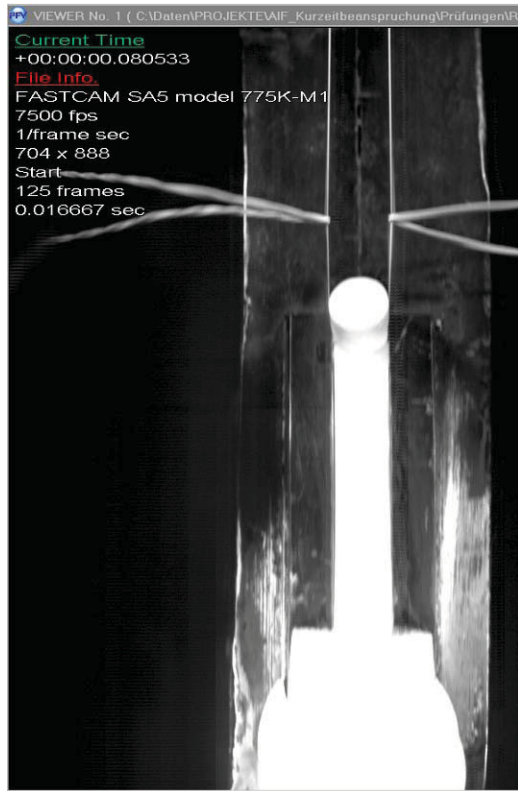


Abbildung 64: Bestimmung des Prüfungsendes anhand der High-Speed-Bilder

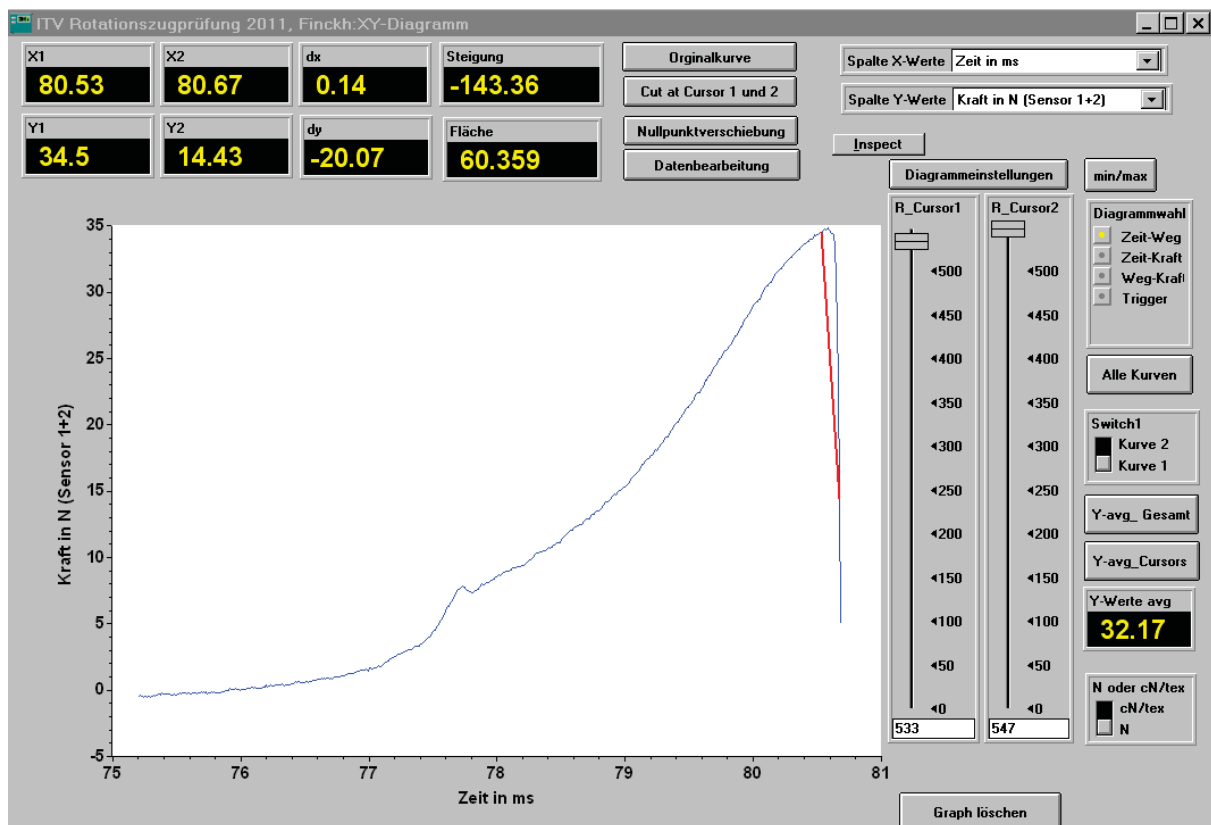


Abbildung 65: Bestimmung des Prüfungsendes anhand der Messkurve

4.3.3 Durchführung von Serienprüfungen an PA und PET-Garnen

Prüfbedingungen

- Einspannlänge 200 mm.
- Mitnahmenase mit 13 mm Durchmesser.
- Neue leichte 8,54 g Garnklemmen mit optimaler Krafteinleitung.
- 2 Piezo-Kraftmesssensoren 5 kN und Ladungsverstärker.
- Messbereich 100 N.
- Druck 6 bar.
- Fadenzuführung über Gummis (Vorkraft 0,6 N)
- Schenkellänge des symmetrischen Trapezes: 140 mm und Öffnung der Fadenschlaufe: 85 mm.
- Temperatur und Luftfeuchtigkeit variiert und wird für jede Prüfung dokumentiert.
- Die Messdaten werden ungefiltert gemessen und in Rohdatenform ausgewertet.

Aus der Vielzahl der Prüfungen wurde anhand der Messkurven, die vom Messprogramm sofort dargestellt und dokumentiert werden und den Videofilmen jeweils eine repräsentative Prüfung für 10, 20, 30 und 40 m/s ausgewählt und deren Mittelwertkurve ausgewertet.

Zur Unterscheidung der Kurven, die jeweils aus hunderten von Messwerten bestehen, sind 4 Kurvenpunkte der Kurven mit einem Symbol versehen.

Untersuchte Garne

- Garn E: PA 6.6 940 dtex f140
- Garn G: PA 4.6 940 dtex f140
- Garn H: PET 550 dtex f105

Die folgende Tabelle enthält alle Daten der ausgewählten Prüfungen, die sofort nach der Rotationszugprüfung verfügbar sind. Die Daten aller durchgeführten Prüfungen für diese Garne für 10 – 40 m/s sind in Abbildung 80 bis Abbildung 82 dokumentiert.

Tabelle 6: Messdaten der ausgewählten Rotationszugprüfungen für die Garne E, G u. H

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrates 1/s	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
PA 6.6 Garn E (940 dtex f 140)									
PA E 10 008	258,409	9,96	49,79	75,2	74,9	75,05	0,3	26,4	27,08
PA E 20 002	517,732	19,95	99,76	75,9	82,4	79,15	6,5	29,7	25,9
PA E 30 006	775,294	29,88	149,39	75,7	77,2	76,45	1,5	48,7	26,23
PA E 40 005	1034,66	39,87	199,36	80	79,1	79,55	0,9	43,4	27,02
PA 4.6 Garn G (940 dtex f 140)									
PA G 10 003	258,687	9,97	49,84	70,1	69,2	69,65	0,9	28,2	25,21
PA G 20 008	517,509	19,94	99,72	71,4	71,4	71,4	0	33,6	27,38
PA G 30 008	775,294	29,88	149,39	67,2	70,6	68,9	3,4	47,4	26,42
PA G 40 002	1035,19	39,89	199,46	71,7	69,8	70,75	1,9	46,6	26,26
PET Garn H (550 dtex f 105)									
PET H 10 005	258,855	9,98	49,88	35,1	34,5	34,8	0,6	35,2	26,49
PET H 20 022	517,286	19,93	99,67	33,8	35,1	34,45	1,3	34,4	27,98
PET H 30 013	776,096	29,91	149,54	34	35,7	34,85	1,7	37,2	27,35
PET H 40 018	1034,48	39,87	199,33	34	36,5	35,25	2,5	29,6	27,84

Die Auswertung der Messkurven erfolgt mit dem Auswertungsprogramm ITV-Rotationszugprüfung nach dem in Kapitel 4.3.2 beschriebenen Verfahren. Im Folgenden werden für jeder untersuchten Garnart zuerst die Kraft/Dehnungs(KD)-Diagramme der Garne bei der Vorkraft von 0,5 N ermittelt und dargestellt (Kraft in N über Dehnung und Feinheitsbezogene Kraft in cN/ex über Dehnung in %). Dann erfolgt eine Videoanalyse, wobei der Zeitpunkt ermittelt wird, in dem die Schlaufe nahezu gestreckt ist. Zu diesem Zeitpunkt wird die Messkraft ermittelt und stellt die Vorkraft zur Dehnung 0 % dar (vgl.

Abbildung 67) und wird im Folgendem als „korrigiertes“ KD-Diagramm bezeichnet. Es fällt auf, dass die Prüfgeschwindigkeit einen Einfluss auf die „Vorkraft“ hat. Die Ursache hierin kann die Dehnratenabhängigkeit des Gummis sein. Je höher die Prüfgeschwindigkeit, desto höher die Vorkraft. Um einen bessere Vergleichbarkeit zu erhalten, wird der - aus der zuvor durchgeführten quasi-statischen Zugprüfungen - bekannte Dehnungsanteil für die die so ermittelten Vorkräfte bestimmt und die KD-Kurven entsprechend ergänzt (Abbildung 68). Auf diese Art werden auch die Garne G und H ausgewertet. Aus den Prüfungen ist deutlich der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit bzw. die Dehnrates erkennbar. Die Garne verhalten sich bei zunehmender Belastungsgeschwindigkeit steifer, besitzen eine geringere Bruchdehnung und geringfügig höhere Bruchkräfte.

Auswertung der Prüfungen für PA 6.6 Garn E (940 dtex f 140):

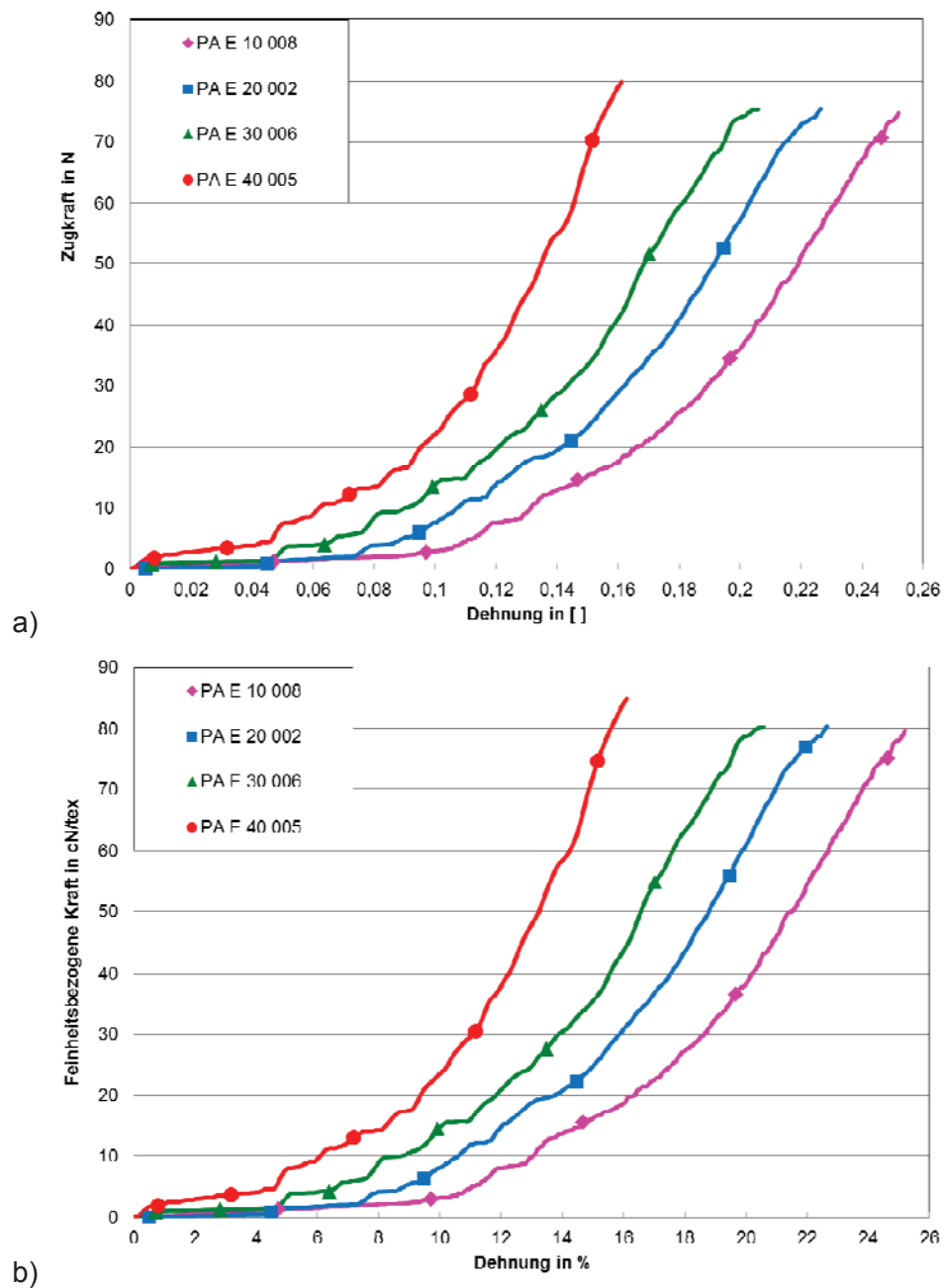
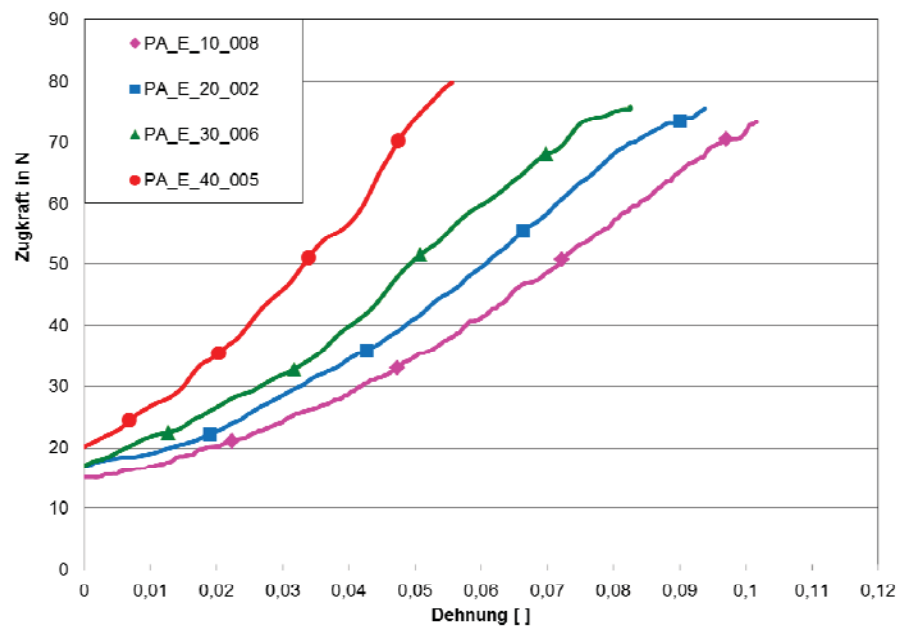
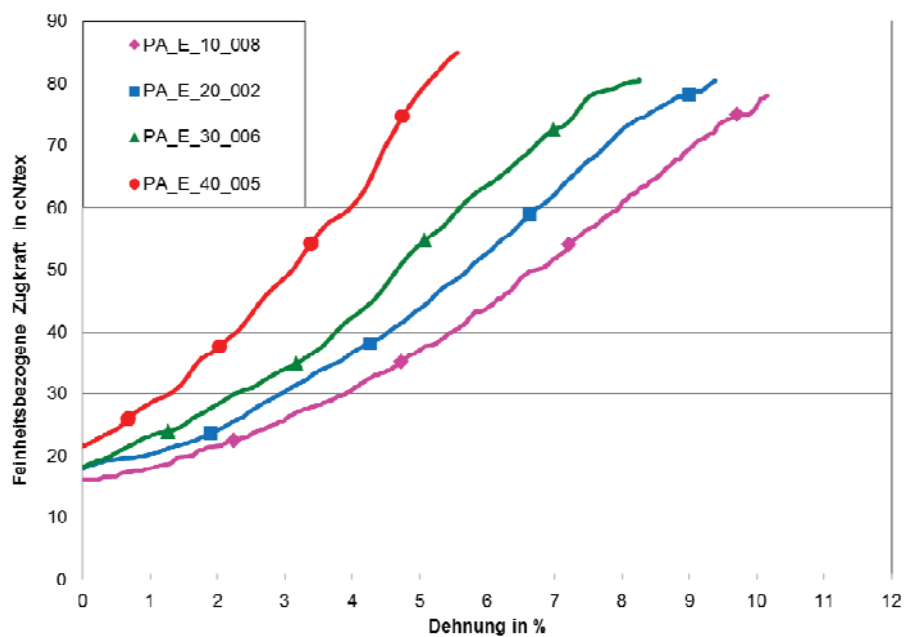


Abbildung 66: KD-Diagramme des PA 6.6 Garns E für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 - 40 m/s (a) bzw. der Dehnrate (b) 50 - 200 1/s (Dehnungsbestimmung ab 0,5 N Vorkraft). (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.



a)



b)

Abbildung 67: Korrigierte KD-Diagramme des PA 6.6 Garns E für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s (Dehnungsbestimmung ab gestreckten Fadenzustand). (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.

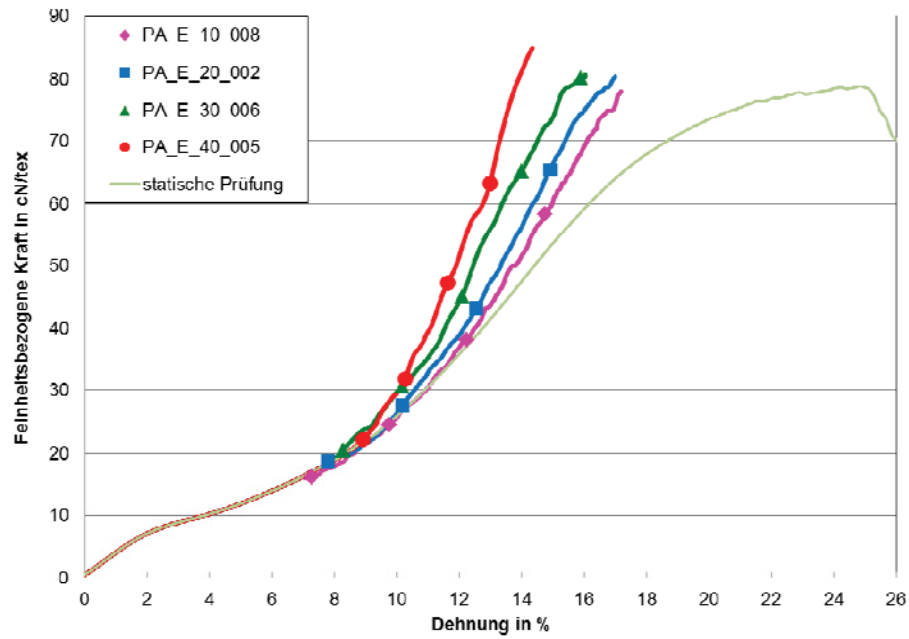


Abbildung 68: Mit statischem Dehnungsanteil ergänztes, feinheitsbezogenes KD-Diagramm des PA 6.6 Garns E für Prüfgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s.

Auswertung der Prüfungen für das PA 4.6 Garn G (940 dtex f 140)

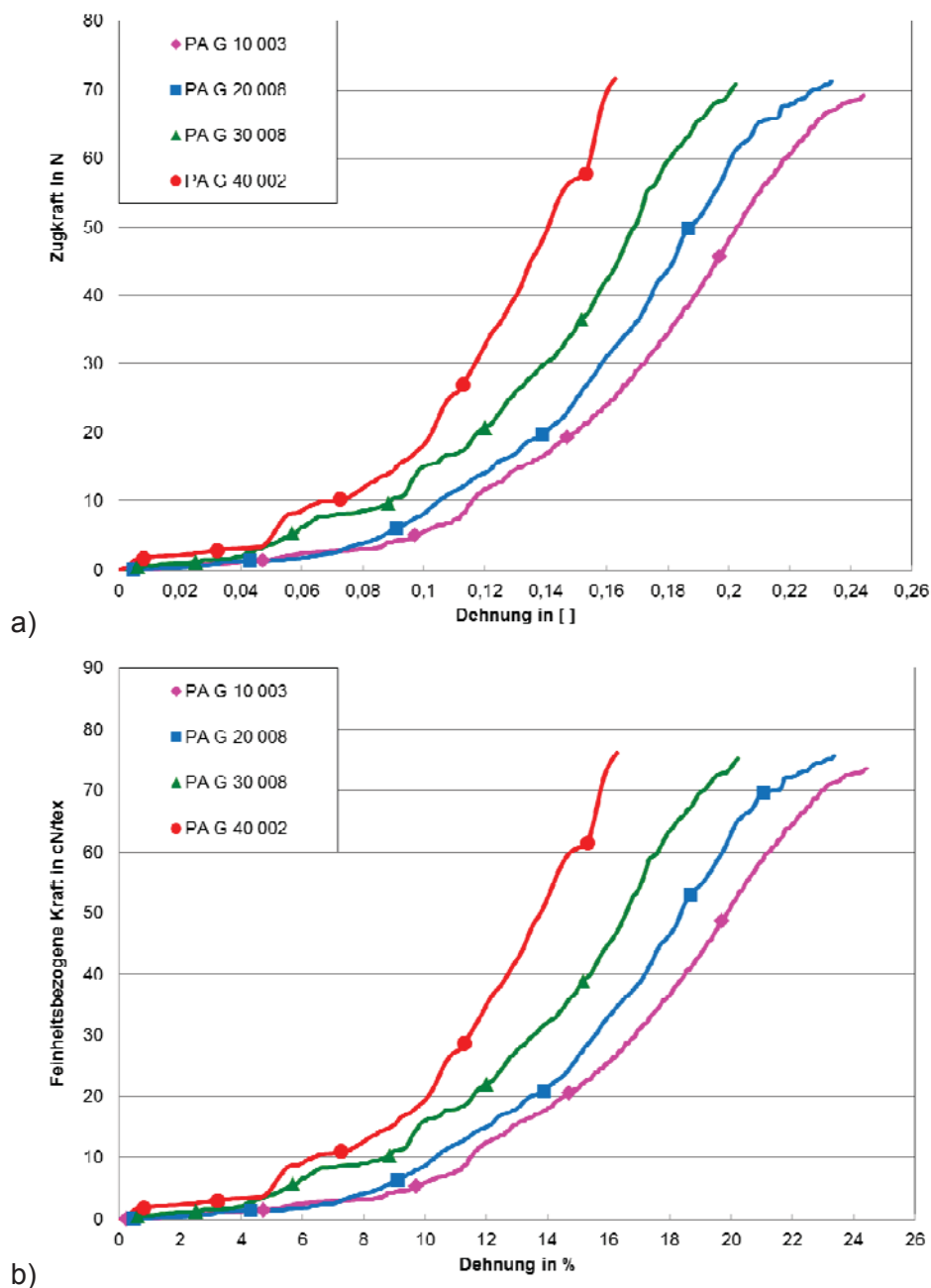


Abbildung 69: KD-Diagramme des des PA 4.6 Garns G für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 - 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 - 200 1/s (Dehnungsbestimmung ab 0,5 N Vorkraft). (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.

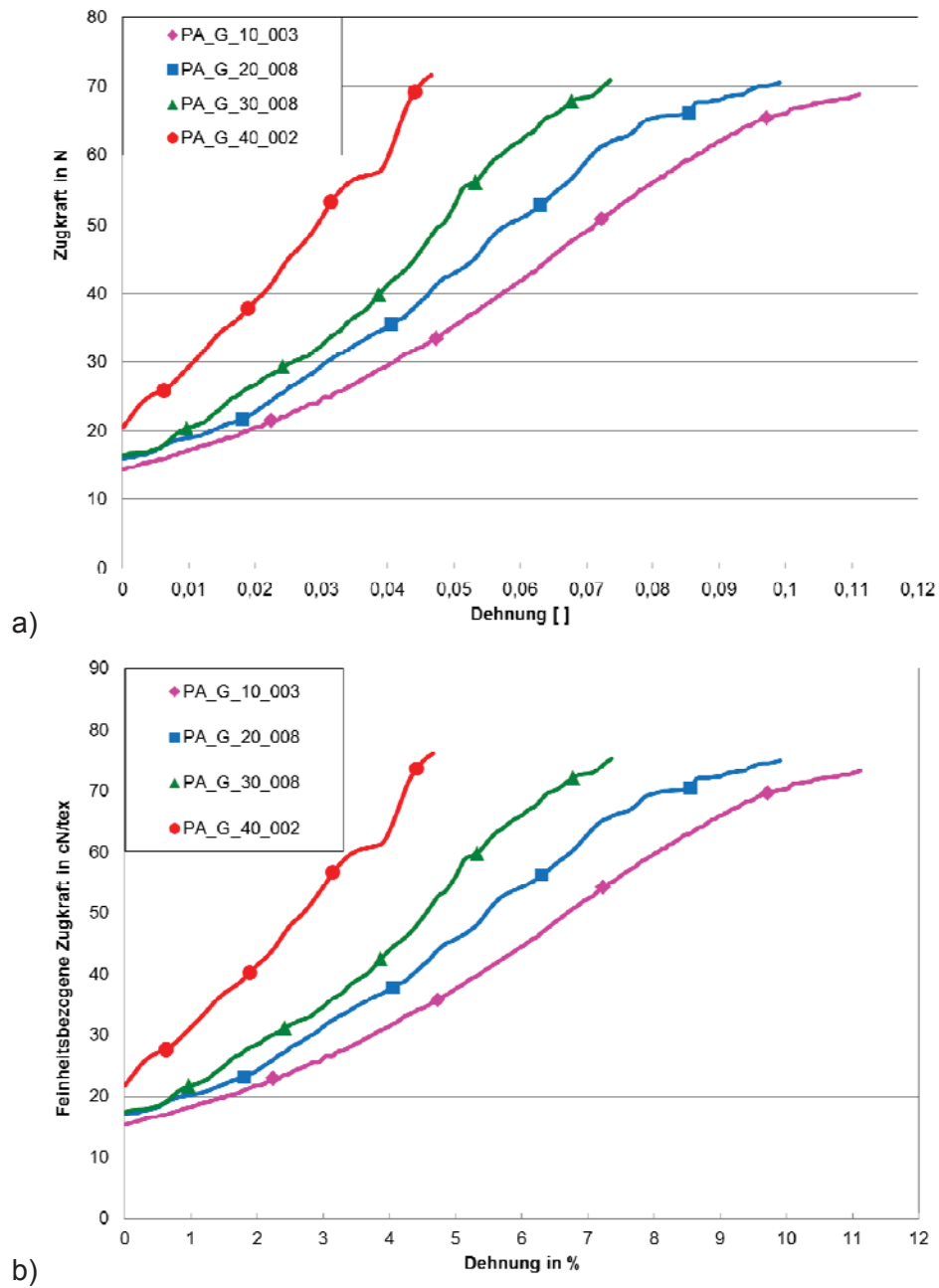


Abbildung 70: Korrigierte KD-Diagramme des PA 4.6 Garns G für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s. (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.

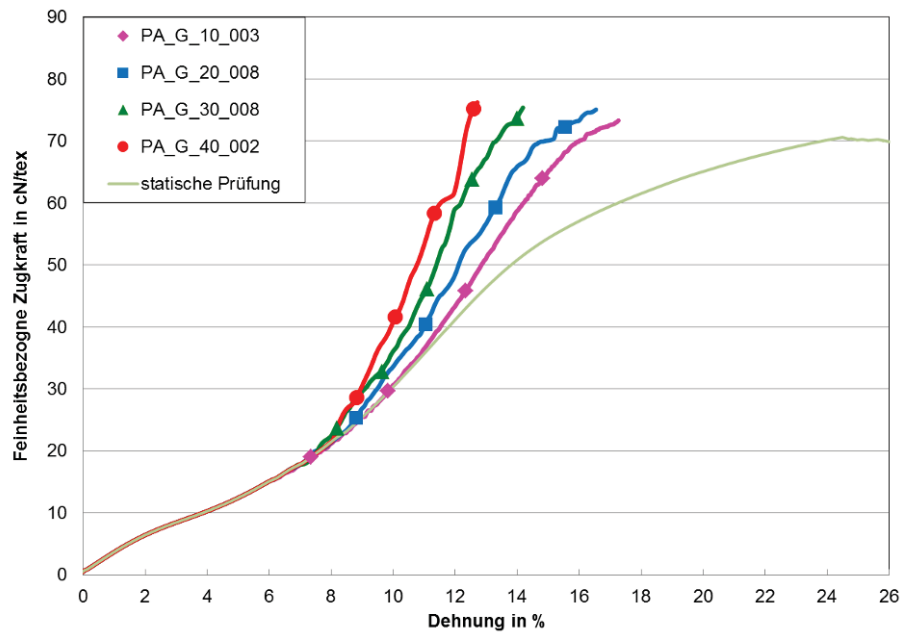


Abbildung 71: Mit statischem Dehnungsanteil ergänztes feinheitsbezogenes KD-Diagramm des PA 4.6 Garns G für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 - 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s.

Auswertung der Prüfungen für PET Garn H (550 dtex f 105)

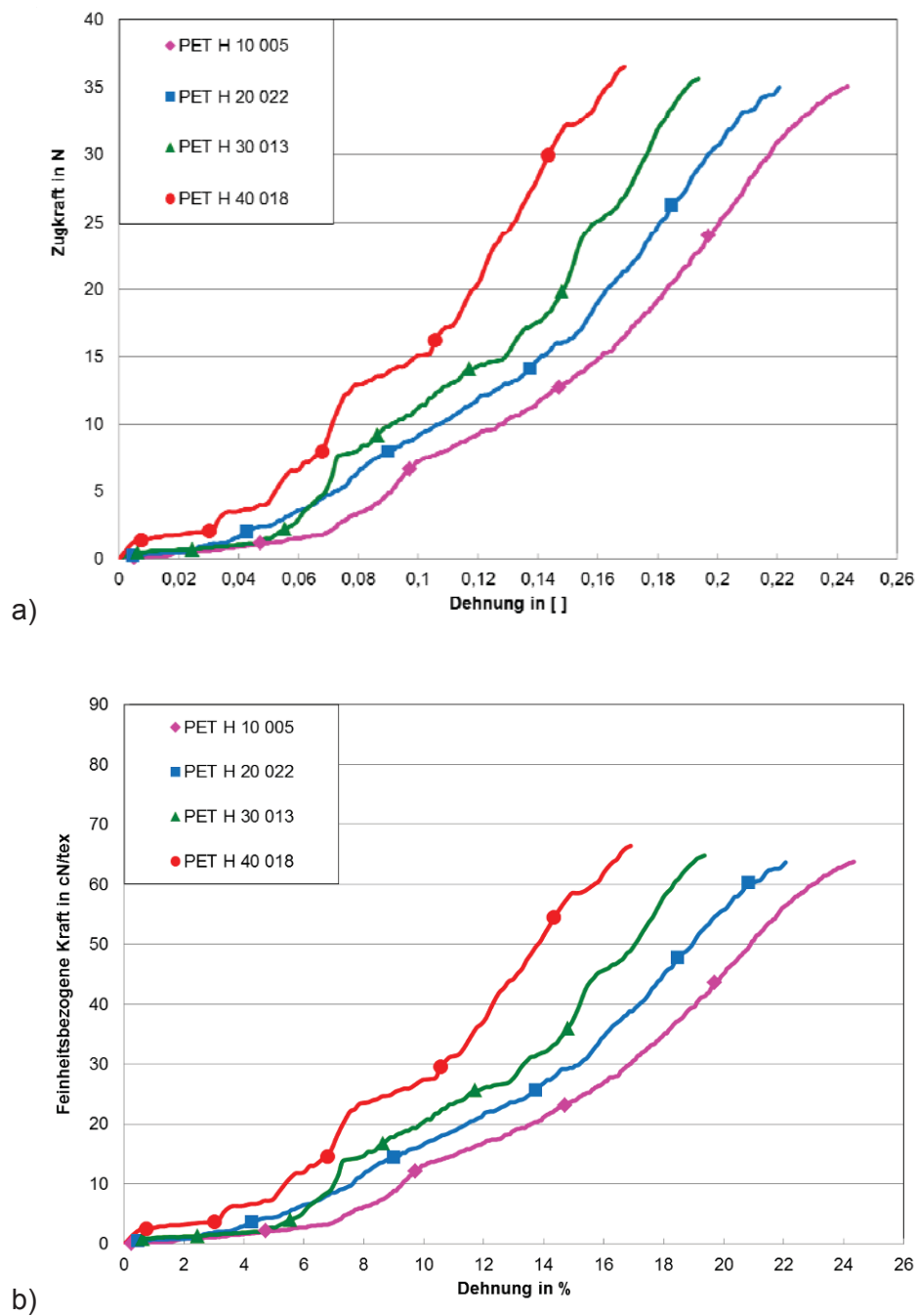


Abbildung 72: KD-Diagramme des PET Garns H für Prüfgeschwindigkeiten von 10 - 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 - 200 1/s (Dehnungsbestimmung ab 0,5 N Vorkraft). (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.

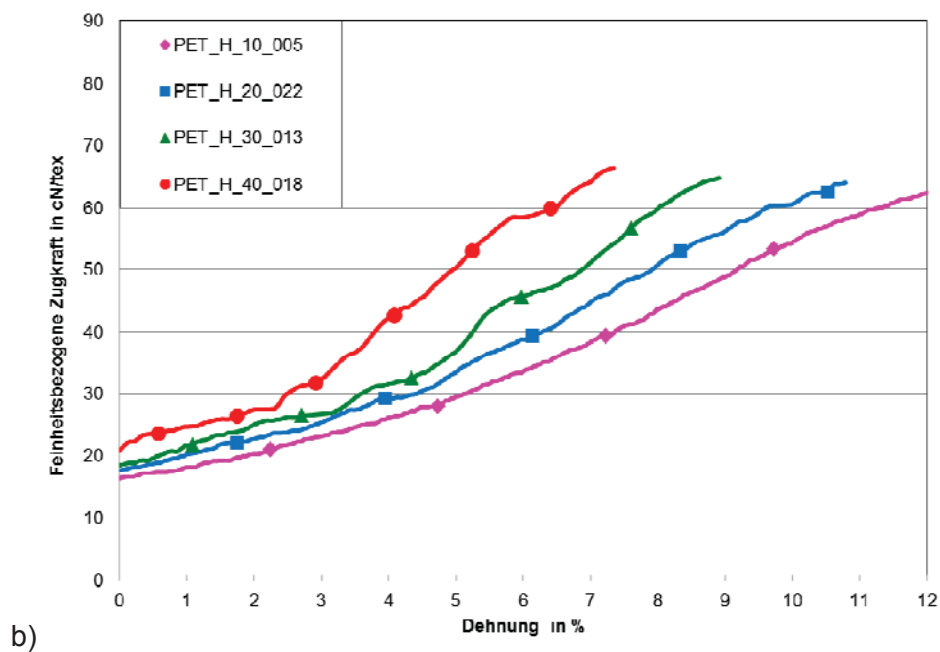
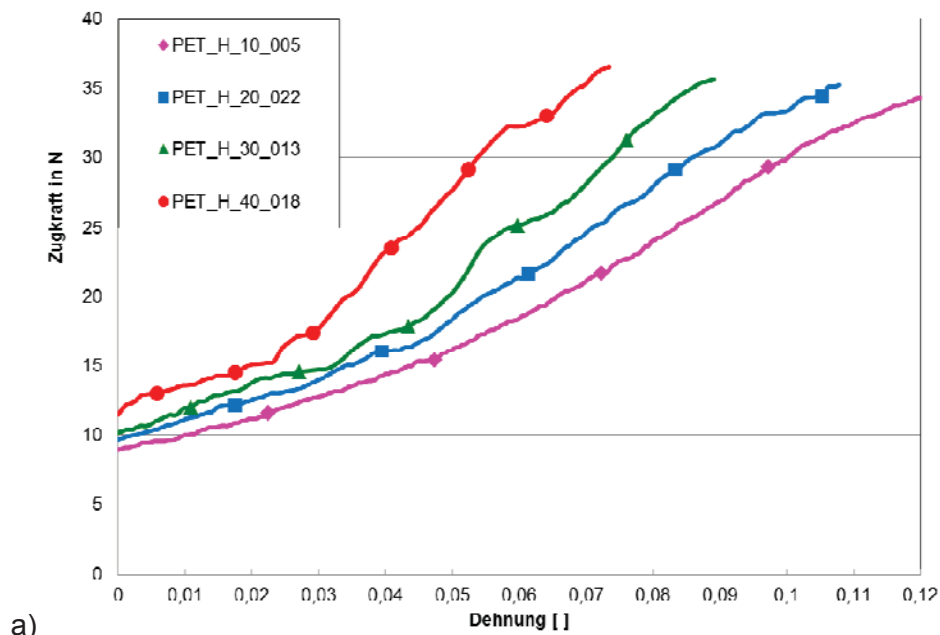


Abbildung 73: Korrigierte KD-Diagramme des PET Garns H für Prüfungsgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s. (a) Absolutkräfte, (b) Feinheitsbezogene Kräfte.

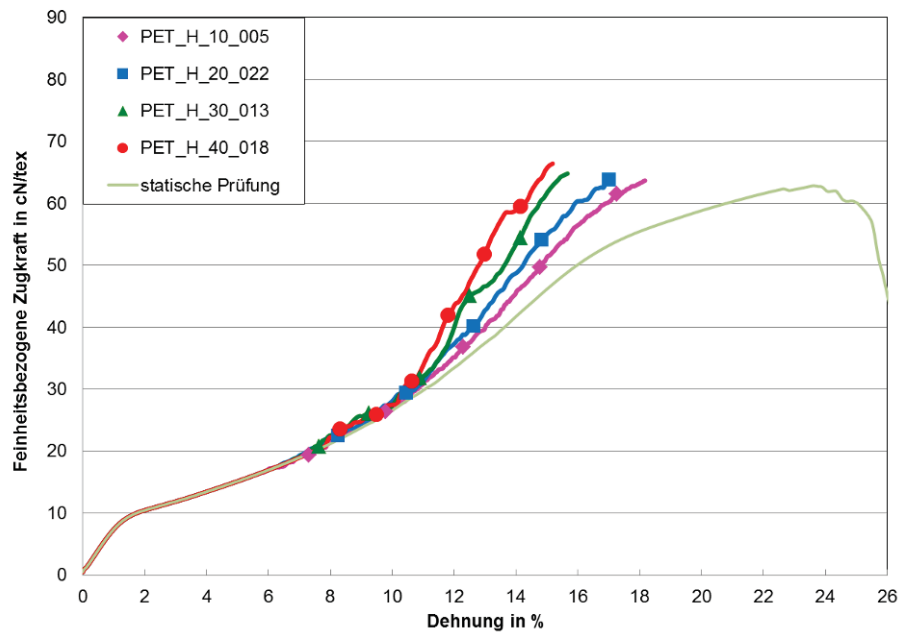


Abbildung 74: Mit statischem Dehnungsanteil ergänztes, feinheitsbezogenes KD-Diagramm des PET Garns H für Prüfgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrates 50 – 200 1/s.

Ergebnisse aller Serienprüfungen für die PA 6.6 (E), PA 4.6 (G) und PET (H) Garne

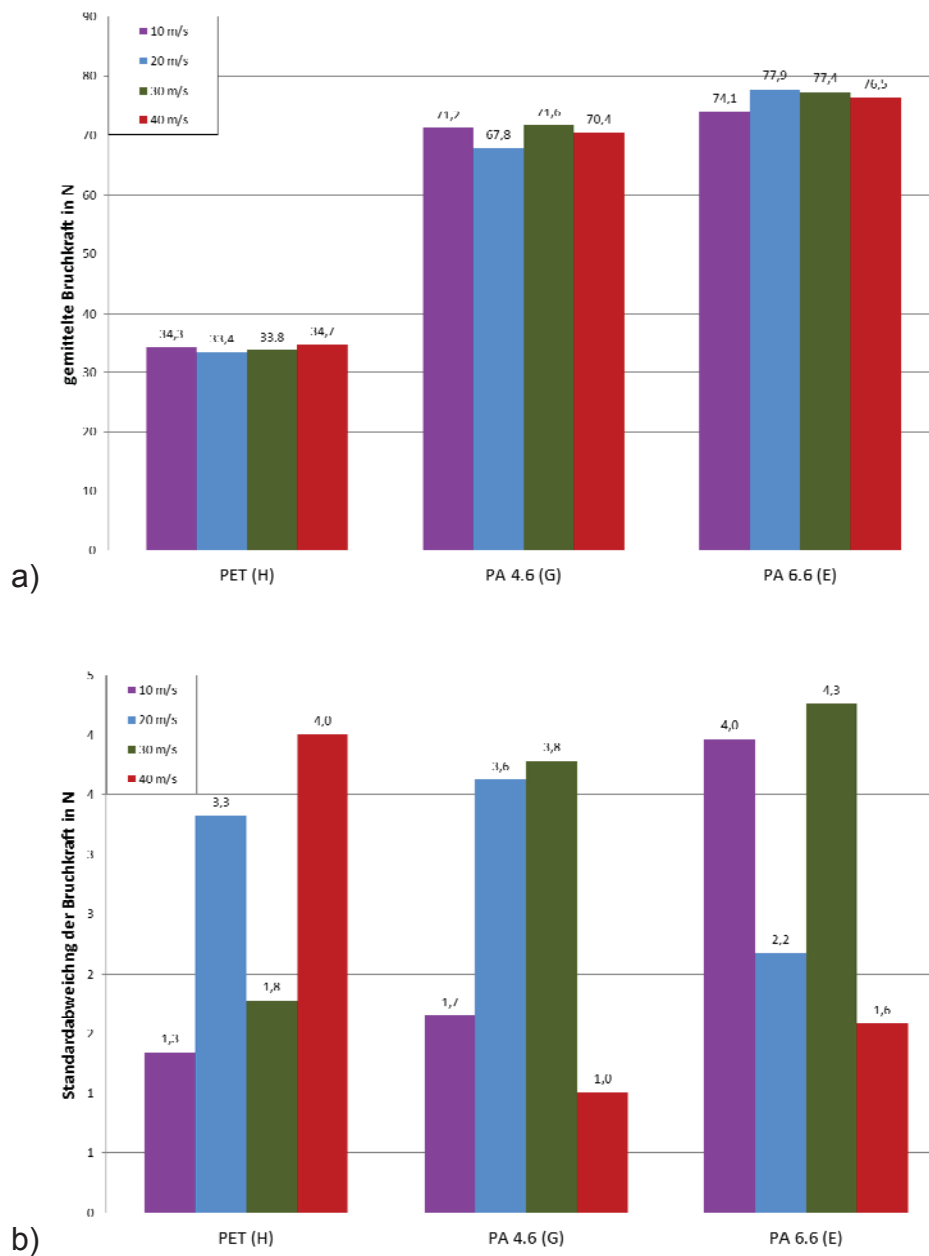


Abbildung 75a: Gemittelte Bruchkräfte (alle Prüfungen) für PET (H), PA 6.6 (E) und PA 4.6 (G), b: Standardabweichung

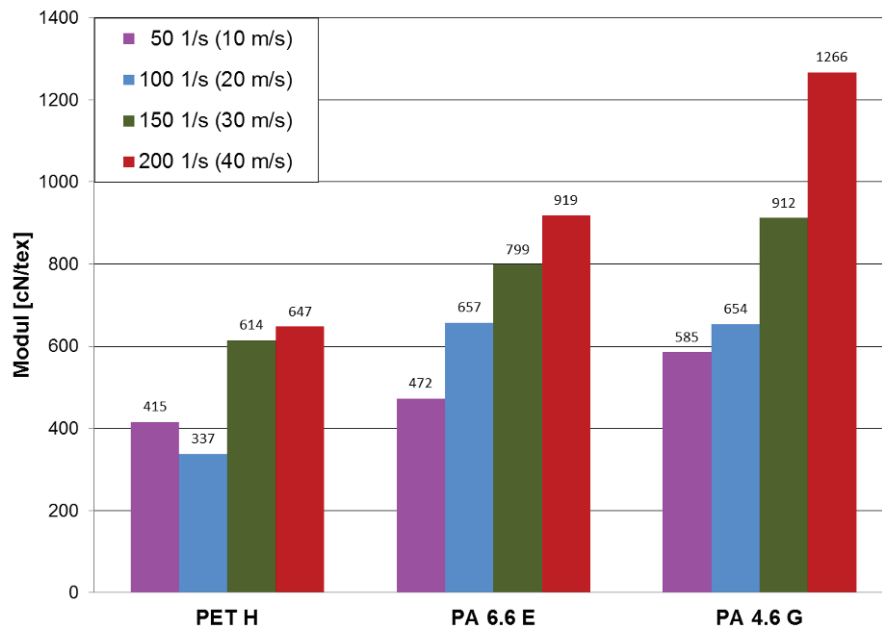


Abbildung 76: Module bei 10 % Dehnung für PET (H), PA 6.6 (E) und PA 4.6 (G) Garne für Prüfgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrate 50 – 200 1/s.

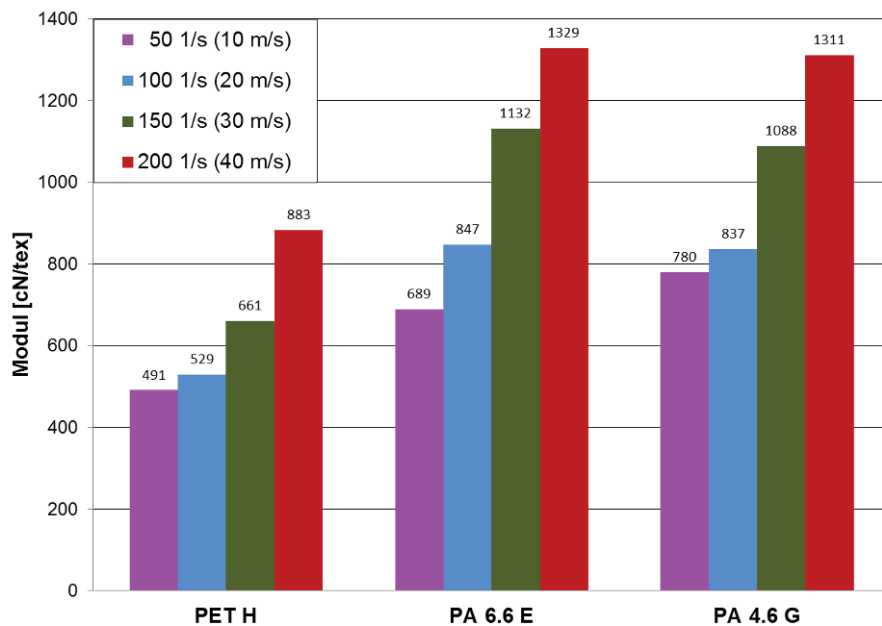


Abbildung 77: Module bei 12 % Dehnung für PET (H), PA 6.6 (E) und PA 4.6 (G) Garne für Prüfgeschwindigkeiten von 10 – 40 m/s bzw. der Dehnrate 50 – 200 1/s.

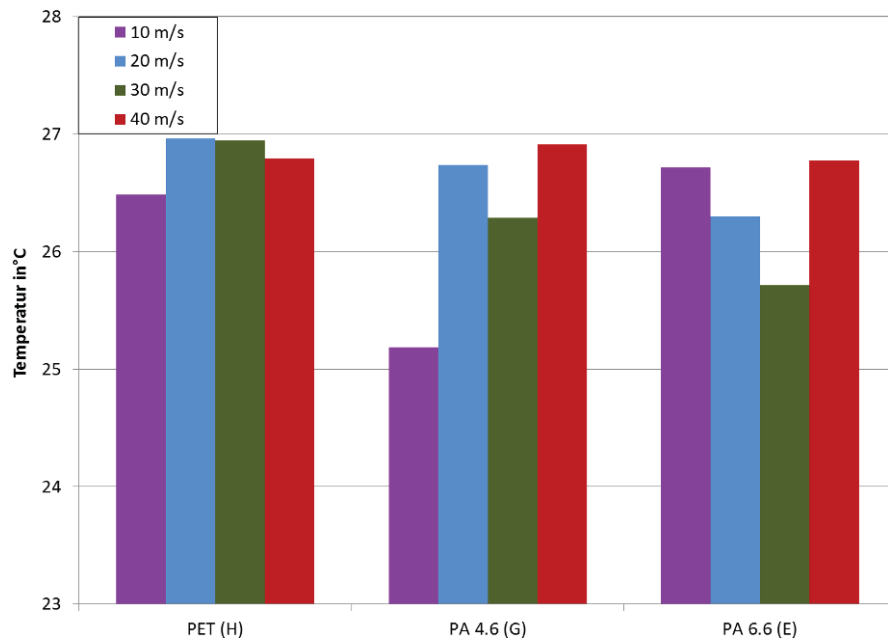


Abbildung 78: Gemittelte Temperaturen für PET (H), PA 6.6 (E) und PA 4.6 (G) für alle Prüfungen.

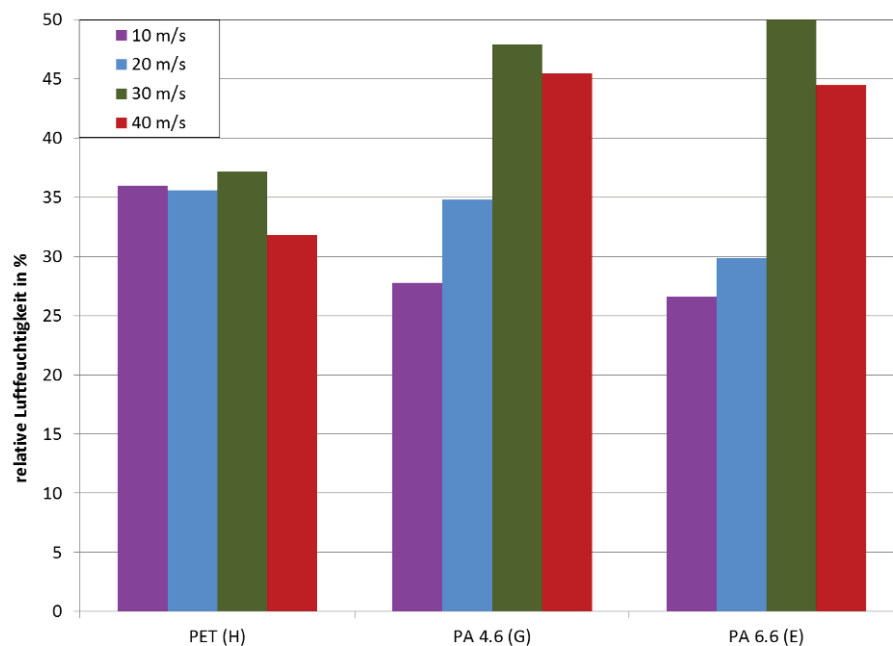


Abbildung 79: Gemittelte rel. Luftfeuchtigkeit PET (H), PA 6.6 (E) und PA 4.6 (G) für alle Prüfungen.

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrage	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV10_PA_E_10_000	258,989	9,98	49,90	77,7	79,2	78,45	1,5	26,3	26,04
SV10_PA_E_10_001	258,342	9,96	49,78	78,9	81,8	80,35	2,9	26,3	26,25
SV10_PA_E_10_002	259,02	9,98	49,91	80,7	75,9	78,3	4,8	26,4	26,22
SV10_PA_E_10_003	258,933	9,98	49,89	70,2	73,3	71,75	3,1	27,1	26,29
SV10_PA_E_10_004	258,565	9,96	49,82	73	73,2	73,1	0,2	27	26,54
SV10_PA_E_10_005	259,045	9,98	49,91	65	68,4	66,7	3,4	27,1	26,77
SV10_PA_E_10_006	259,313	9,99	49,97	72,2	73,3	72,75	1,1	26,5	26,95
SV10_PA_E_10_007	258,867	9,98	49,88	69,6	70,2	69,9	0,6	26,5	26,98
SV10_PA_E_10_008	258,409	9,96	49,79	75,2	74,9	75,05	0,3	26,4	27,08
SV10_PA_E_10_009	258,687	9,97	49,84	74	74,3	74,15	0,3	26,3	27,33
SV10_PA_E_10_010	258,654	9,97	49,84	73	75,7	74,35	2,7	26,2	27,42
Mittelwert	258,802	9,973	49,867	73,591	74,564	74,077	1,900	26,555	26,715
Standardabweichung	0,297	0,011	0,057	4,497	3,731	3,967	1,557	0,342	0,476

a) Prüfgeschwindigkeit 10 m/s

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrage	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV10_PA_E_20_000	517,375	19,94	99,69	81,9	80,2	81,05	1,7	30,2	25,4
SV10_PA_E_20_001	516,573	19,91	99,54	74,8	77,6	76,2	2,8	30,2	25,6
SV10_PA_E_20_002	517,732	19,95	99,76	75,9	82,4	79,15	6,5	29,7	25,9
SV10_PA_E_20_003	517,464	19,94	99,71	75,2	78	76,6	2,8	30	26
SV10_PA_E_20_004	516,929	19,92	99,60	80	77,3	78,65	2,7	30	26,1
SV10_PA_E_20_005	517,286	19,93	99,67	77,8	78,9	78,35	1,1	30	26,3
SV10_PA_E_20_006	515,729	19,87	99,37	74,7	73,3	74	1,4	30	26,5
SV10_PA_E_20_007	515,552	19,87	99,34	79,7	79,4	79,55	0,3	29,4	26,8
SV10_PA_E_20_008	517,286	19,93	99,67	77,6	82,1	79,85	4,5	29,7	26,75
SV10_PA_E_20_009	515,818	19,88	99,39	79,8	70,2	75	9,6	29,6	26,86
SV10_PA_E_20_010	516,929	19,92	99,60	80,7	76,1	78,4	4,6	29,2	27,09
Mittelwert	516,788	19,915	99,577	78,009	77,773	77,891	3,455	29,818	26,300
Standardabweichung	0,766	0,030	0,148	2,573	3,611	2,173	2,714	0,325	0,550

b) Prüfgeschwindigkeit 20 m/s

Abbildung 80a,b: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PA 6.6 Garn E für 10 und 20 m/s.

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrage	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV11_PA_E_30_000	775,95	29,90	149,51	79,4	81,7	80,55	2,3	51,6	25,2
SV11_PA_E_30_001	775,594	29,89	149,44	80,1 (n. g.)	77,6 (n. g.)			-	-
SV11_PA_E_30_002	775,594	29,89	149,44	69,3	91,1	80,2	21,8	-	-
SV11_PA_E_30_003	775,895	29,90	149,50	81,1	80,1	80,6	1	-	-
SV11_PA_E_30_004	775,795	29,90	149,48	73,7	90,2	81,95	16,5	-	-
SV11_PA_E_30_005	776,096	29,91	149,54	82,6	80,4	81,5	2,2	-	-
SV11_PA_E_30_006	775,294	29,88	149,39	75,7	77,2	76,45	1,5	-	-
SV11_PA_E_30_007	775,995	29,90	149,52	76,4	73,5	74,95	2,9	-	-
SV11_PA_E_30_008	775,795	29,90	149,48	71,7	70,9	71,3	0,8	-	-
SV11_PA_E_30_009	775,795	29,90	149,48	70,8	69,5	70,15	1,3	-	-
SV11_PA_E_30_010	775,795	29,90	149,48	79,9	72,7	76,3	7,2	48,7	26,23
Mittelwert	775,782	29,896	149,481	76,060	78,730	77,395	5,750	50,150	25,715
Standardabweichung	0,222	0,009	0,043	4,622	7,532	4,261	7,400	2,051	0,728

c) Prüfgeschwindigkeit 30 m/s

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrage	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV14_PA_E_40_000	1034,83	39,88	199,40	76,5	77,6	77,05	1,1	45,5	26,53
SV14_PA_E_40_001	1035,55	39,91	199,53	77,9	74,4	76,15	3,5	-	-
SV14_PA_E_40_002	1034,66	39,87	199,36	78,1	79,5	78,8	1,4	-	-
SV14_PA_E_40_003	1034,12	39,85	199,26	79,6	81	80,3	1,4	-	-
SV14_PA_E_40_004	1033,94	39,84	199,22	76,5	78,5	77,5	2	-	-
SV14_PA_E_40_005	1034,66	39,87	199,36	80	79,1	79,55	0,9	43,4	27,02
Mittelwert	1034,627	39,871	199,356	78,100	78,350	78,225	0,250	44,450	26,775
Standardabweichung	0,570	0,022	0,110	1,485	2,240	1,588	0,950	1,485	0,346

d) Prüfgeschwindigkeit 40 m/s

Abbildung 80c,d: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PA 6.6 Garn E für 30 und 40 m/s.

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrate	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV7_PA_G_10_1	258,698	9,97	49,85	27,6 (n. g)	31,7 (n. g)			30,2	23,55
SV7_PA_G_10_001	258,654	9,97	49,84	71,5 (n.g.)	72,7 (n.g.)			29	24,46
SV7_PA_G_10_002	259,033	9,98	49,91	76,6	70,6	73,6	6	28,4	24,9
SV7_PA_G_10_003	258,687	9,97	49,84	70,1	69,2	69,65	0,9	28,2	25,21
SV7_PA_G_10_004	259,156	9,99	49,94	70,7	69,8	70,25	0,9	27,5	25,07
SV7_PA_G_10_005	258,353	9,96	49,78	70,5	68,1	69,3	2,4	27,5	25,26
SV7_PA_G_10_006	259,089	9,98	49,92	72,8	71,8	72,3	1	27,6	25,38
SV7_PA_G_10_007	258,776	9,97	49,86	72	74,9	73,45	2,9	26,9	25,62
SV7_PA_G_10_008	258,242	9,95	49,76	70,6	70,2	70,4	0,4	26,7	25,73
SV7_PA_G_10_009	258,955	9,98	49,90	71,6	72,2	71,9	0,6	26,8	25,79
SV7_PA_G_10_010	259,123	9,99	49,93	70,5	69,2	69,85	1,3	26,6	26,05
Mittelwert	258,797	9,973	49,866	71,711	70,667	71,189	1,822	27,764	25,184
Standardabweichung	0,308	0,012	0,059	2,030	2,044	1,654	1,772	1,113	0,703

a) Prüfgeschwindigkeit 10 m/s

<i>ITV Denkendorf</i>	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrate	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV3_G_20_1	517,509	19,94	99,72	31,6 (n. g)	23,3 (n. g)			37,6	24,55
SV3_G_20_2	517,286	19,93	99,67	27,6 (n. g)	29,6 (n. g)			37,3	24,95
SV3_G_20_3	517,553	19,94	99,72	23,3 (n. g)	30,4 (n. g)			36	25,64
SV3_G_20_4	517,866	19,96	99,78	60,8(n. g)	67,2 (n. g)			36	25,85
SV3_G_20_5	517,643	19,95	99,74	38,5(n. g)	49,6 (n. g)			34,9	26,43
SV3_G_20_6	516,217	19,89	99,47	67,3	66	66,65	1,3	34,7	26,79
SV3_G_20_7	517,419	19,94	99,70	69,6	68,6	69,1	1	34,2	27,06
SV3_G_20_8	517,509	19,94	99,72	71,4	71,4	71,4	0	33,6	27,38
SV3_G_20_9	517,643	19,95	99,74	61,2	62,9	62,05	1,7	33,7	27,55
SV3_G_20_10	517,777	19,95	99,77	68,7	68,1	68,4	0,6	33,9	27,45
SV3_G_20_11	517,911	19,96	99,79	70,5	76,3	73,4	5,8	34,9	27,08
SV3_G_20_12	517,821	19,96	99,78	69,9	69,5	69,7	0,4	35	27,55
SV3_G_20_13	517,732	19,95	99,76	62,9	63,6	63,25	0,7	34,8	27,27
SV3_G_20_14	517,687	19,95	99,75	19,8 (n. g)	30,1 (n. g)			34	27,62
SV3_G_20_15	516,706	19,91	99,56	64,2	65,2	64,7	1	33,5	27,52
SV3_G_20_16	517,598	19,95	99,73	67,9	71,5	69,7	3,6	33,8	27,78
SV3_G_20_17	517,777	19,95	99,77	29,7 (n. g)	28,7 (n. g)			33,7	26,07
Mittelwert	517,509	19,943	99,716	67,360	68,310	67,835	1,610	34,800	26,738
Standardabweichung	0,435	0,017	0,084	3,457	4,104	3,625	1,772	1,260	0,992

b) Prüfgeschwindigkeit 20 m/s

Abbildung 81a,b: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PA 4.6 Garn G (940 dtex f 140) für 10 und 20 m/s.

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrates	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV12_PA_G_30_000	775,995	29,90	149,52	72,2	76,8	74,5	4,6	48,9	25,93
SV12_PA_G_30_001	775,294	29,88	149,39	65,6	68,3	66,95	2,7	-	-
SV12_PA_G_30_002	775,594	29,89	149,44	70,1	68,7	69,4	1,4	-	-
SV12_PA_G_30_003	775,093	29,87	149,35	76,4	73	74,7	3,4	-	-
SV12_PA_G_30_004	775,594	29,89	149,44	79,1	75,1	77,1	4	-	-
SV12_PA_G_30_005	775,895	29,90	149,50	77,5	76,7	77,1	0,8	-	-
SV12_PA_G_30_006	775,795	29,90	149,48	69,9	76,9	73,4	7	-	-
SV12_PA_G_30_007	776,196	29,91	149,56	67,7	68,8	68,25	1,1	-	-
SV12_PA_G_30_008	775,294	29,88	149,39	67,2	70,6	68,9	3,4	-	-
SV12_PA_G_30_009	775,294	29,88	149,39	69,2	68,6	68,9	0,6	47,4	26,42
SV12_PA_G_30_010	756,096	29,14	145,69	70,8	66,3	68,55	4,5	47,3	26,51
Mittelwert	773,831	29,821	149,105	71,427	71,800	71,614	3,045	47,867	26,287
Standardabweichung	5,892	0,227	1,135	4,430	4,002	3,786	1,974	0,896	0,312

c) Prüfgeschwindigkeit 30 m/s

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgesch- windigkeit	Dehnrates	Kraft- Sensor 1	Kraft- Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft- differenz	relative Luft- feuchtigkeit	Temp- eratur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV13_PA_G_40_000	1035,55	39,91	199,53	68,3	70,4	69,35	2,1	46,6	26,26
SV13_PA_G_40_001	1034,48	39,87	199,33	70,9	69,1	70	1,8	-	-
SV13_PA_G_40_002	1035,19	39,89	199,46	71,7	69,8	70,75	1,9	-	-
SV13_PA_G_40_003	1035,01	39,89	199,43	69,1	69,6	69,35	0,5	-	-
SV13_PA_G_40_004	1035,01	39,89	199,43	70	71,7	70,85	1,7	-	-
SV13_PA_G_40_005	1035,55	39,91	199,53	72,4	71,5	71,95	0,9	44,3	26,91
Mittelwert	1035,132	39,891	199,454	70,400	70,350	70,375	1,483	45,450	
Standardabweichung	0,402	0,015	0,077	1,562	1,056	1,009	1,626	0,460	

d) Prüfgeschwindigkeit 40 m/s

Abbildung 81c,d: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PA 4.6 Garn G (940 dtex f 140) für 30 und 40 m/s.

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgeschwindigkeit	Dehnrate	Kraft-Sensor 1	Kraft-Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft-differenz	relative Luftfeuchtigkeit	Temperatur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV1_PET_H_10_001	258,698	9,97	49,85	36,1	33,3	34,7	2,8	36,1	25,81
SV1_PET_H_10_002	258,709	9,97	49,85	33	32,4	32,7	0,6	35,7	26,07
SV1_PET_H_10_003	258,877	9,98	49,88	33,8	35,3	34,55	1,5	36,6	26,34
SV1_PET_H_10_004	258,676	9,97	49,84	33,5	33,5	33,5	0	35,6	26,37
SV1_PET_H_10_005	258,855	9,98	49,88	35,1	34,5	34,8	0,6	35,2	26,49
SV1_PET_H_10_006	259,403	10,00	49,98	34,8	34,3	34,55	0,5	35,3	26,44
SV1_PET_H_10_007	259,145	9,99	49,93	13 (n. g)	13 (n. g)			36	25,67
SV1_PET_H_10_008	259	9,98	49,91	17,4 (n. g)	18,2 (n. g)			36,2	26,3
SV1_PET_H_10_009	259,302	9,99	49,96	32,8	30,4	31,6	2,4	36,6	26,2
SV1_PET_H_10_010	257,754	9,93	49,67	35,2	35,3	35,25	0,1	36,6	26,34
SV1_PET_H_10_011	257,61	9,93	49,64	35,9	35,9	35,9	0	36,5	26,45
SV1_PET_H_10_012	258,397	9,96	49,79	35,9	35,8	35,85	0,1	36,5	26,61
SV1_PET_H_10_013	259,359	9,99	49,97	35,7	35,1	35,4	0,6	36,5	26,72
SV1_PET_H_10_014	253,581	9,77	48,86	33,1	31	32,05	2,1	36,2	26,9
SV1_PET_H_10_015	261,745	10,09	50,43	25,1 (n. g)	31,2 (n. g)			35,6	26,98
SV1_PET_H_10_016	255,264	9,84	49,19	15,8 (n. g)	14,4 (n. g)			35,8	26,9
SV1_PET_H_10_017	258,933	9,98	49,89	34,7	34,8	34,75	0,1	35,5	27,01
SV1_PET_H_10_018	259,313	9,99	49,97	34,8	34,5	34,65	0,3	35,3	27,12
Mittelwert	258,479	9,961	49,805	34,600	34,007	34,304	0,836	35,989	26,484
Standardabweichung	1,726	0,067	0,333	1,158	1,708	1,344	0,958	0,499	0,406

a) Prüfgeschwindigkeit 10 m/s

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgeschwindigkeit	Dehnrate	Kraft-Sensor 1	Kraft-Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft-differenz	relative Luftfeuchtigkeit	Temperatur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV2_PET_H_20_001	516,484	19,90	99,52	33,8	33,5	33,65	0,3	39	24,08
SV2_PET_H_20_002	517	19,92	99,62	36,5	42,2	39,35	5,7	38,2	24,49
SV2_PET_H_20_003	517,375	19,94	99,69	33,9	35,8	34,85	1,9	37,3	25,07
SV2_PET_H_20_004	517	19,92	99,62	33,8	35,6	34,7	1,8	36,3	25,64
SV2_PET_H_20_005	517,553	19,94	99,72	33,4	35,8	34,6	2,4	35,2	26,2
SV2_PET_H_20_006	517,149	19,93	99,65	32,5	33,9	33,2	1,4	35,2	26,34
SV2_PET_H_20_007	517,553	19,94	99,72	33,2	33,2	33,2	0	37,8	25,62
SV2_PET_H_20_008	517,286	19,93	99,67	32,8	33,1	32,95	0,3	37,8	25,77
SV2_PET_H_20_009	516,795	19,92	99,58	31	31,7	31,35	0,7	36,2	26,55
SV2_PET_H_20_010	517,687	19,95	99,75	32,4	33,2	32,8	0,8	35,8	26,74
SV2_PET_H_20_011	517,598	19,95	99,73	15	23,8	19,4	8,8	35,1	27,36
SV2_PET_H_20_012	517,866	19,96	99,78	29,5	30,6	30,05	1,1	35,3	27,24
SV2_PET_H_20_013	516,573	19,91	99,54	35,3	34,7	35	0,6	35,3	27,2
SV2_PET_H_20_014	516,573	19,91	99,54	34,2	33,6	33,9	0,6	35,6	27,21
SV2_PET_H_20_015	517,643	19,95	99,74	32,9	33,7	33,3	0,8	34,8	27,32
SV2_PET_H_20_016	517,553	19,94	99,72	32,9	33,4	33,15	0,5	34,8	27,59
SV2_PET_H_20_017	517,553	19,94	99,72	33,7	33,7	33,7	0	34,7	27,63
SV2_PET_H_20_018	517,643	19,95	99,74	33,3	33,5	33,4	0,2	34,5	27,78
SV2_PET_H_20_019	517,464	19,94	99,71	36,5	35,3	35,9	1,2	34,7	27,74
SV2_PET_H_20_020	517,821	19,96	99,78	34,9	36,2	35,55	1,3	35,3	27,93
SV2_PET_H_20_021	517,866	19,96	99,78	36,9	35,9	36,4	1	34,8	27,63
SV2_PET_H_20_022	517,286	19,93	99,67	33,8	35,1	34,45	1,3	34,4	27,98
SV2_PET_H_20_023	517,553	19,94	99,72	35,2	34,9	35,05	0,3	34,5	27,96
SV2_PET_H_20_024	517,732	19,95	99,76	31,3	30,8	31,05	0,5	34,2	28,24
SV2_PET_H_20_025	516,44	19,90	99,51	34,8	33,5	34,15	1,3	34,3	28,19
SV2_PET_H_20_026	517,416	19,94	99,70	35	33,6	34,3	1,4	34,2	28,14
SV2_PET_H_20_027	517,375	19,94	99,69	32,4	34,7	33,55	2,3	34,7	28,28
Mittelwert	517,327	19,936	99,681	32,996	33,889	33,443	1,426	35,556	26,960
Standardabweichung	0,432	0,017	0,084	3,970	2,935	3,318	1,849	1,336	1,184

b) Prüfgeschwindigkeit 20 m/s

Abbildung 82a,b: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PET Garns H (550 dtex f 105) für 10 und 20 m/s.

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgeschwindigkeit	Dehnrate	Kraft-Sensor 1	Kraft-Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft-differenz	relative Luftfeuchtigkeit	Temperatur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV4_PET_H_30_001	775,995	29,90	149,52	35,1	36,3	35,7	1,2	42,2	23,35
SV4_PET_H_30_002	775,995	29,90	149,52	36,1	36,2	36,15	0,1	39,4	24,43
SV4_PET_H_30_003	775,694	29,89	149,46	34,5	38	36,25	3,5	38,1	25,12
SV4_PET_H_30_004	776,196	29,91	149,56	32,6	37,9	35,25	5,3	41,5	25,09
SV4_PET_H_30_005	775,895	29,90	149,50	33,5	36,3	34,9	2,8	40,4	25,29
SV4_PET_H_30_006	775,895	29,90	149,50	33,3	36,8	35,05	3,5	39,3	25,66
SV4_PET_H_30_007	775,795	29,90	149,48	30,6	35,9	33,25	5,3	38	26,43
SV4_PET_H_30_008	776,096	29,91	149,54	30,7	32,1	31,4	1,4	38	26,55
SV4_PET_H_30_009	775,895	29,90	149,50	33,5	34	33,75	0,5	38,2	26,64
SV4_PET_H_30_010	775,895	29,90	149,50	33,7	34,4	34,05	0,7	37,7	26,96
SV4_PET_H_30_011	775,795	29,90	149,48	32,6	34,4	33,5	1,8	36,9	27,32
SV4_PET_H_30_012	776,096	29,91	149,54	30,1	29,6	29,85	0,5	36,8	27,53
SV4_PET_H_30_013	776,096	29,91	149,54	34	35,7	34,85	1,7	37,2	27,35
SV4_PET_H_30_014	775,594	29,89	149,44	33,4	34,3	33,85	0,9	36,3	27,71
SV4_PET_H_30_015	775,895	29,90	149,50	33,4	35,4	34,4	2	36,3	27,85
SV4_PET_H_30_016	775,795	29,90	149,48	33,9	34,3	34,1	0,4	36	27,9
SV4_PET_H_30_017	776,795	29,94	149,68	30,2	33,5	31,85	3,3	35,5	28,11
SV4_PET_H_30_018	775,995	29,90	149,52	35,5	35,1	35,3	0,4	36,1	27,39
SV4_PET_H_30_019	776,096	29,91	149,54	23 (n.g.)	26,4 (n.g.)			36,1	27,52
SV4_PET_H_30_020	775,694	29,89	149,46	27,3 (n.g.)	30,6 (n.g.)			35,2	28,04
SV4_PET_H_30_021	775,895	29,90	149,50	35	29,3	32,15	5,7	36	27,84
SV4_PET_H_30_022	775,193	29,87	149,37	29,7	31,8	30,75	2,1	34,8	28,22
SV4_PET_H_30_023	775,494	29,89	149,43	35,2	35,8	35,5	0,6	34,3	28,44
SV4_PET_H_30_024	775,895	29,90	149,50	30,5	32,6	31,55	2,1	34,4	28,42
SV4_PET_H_30_025	776,196	29,91	149,56	33,9	35	34,45	1,1	34,2	28,4
Mittelwert	775,915	29,901	149,507	33,087	34,552	33,820	2,039	37,156	26,942
Standardabweichung	0,291	0,011	0,056	1,907	2,276	1,782	1,683	2,154	1,383

c) Prüfgeschwindigkeit 30 m/s

ITV Denkendorf	Drehzahl	Prüfgeschwindigkeit	Dehnrate	Kraft-Sensor 1	Kraft-Sensor 2	gemittelte Kraft	Kraft-differenz	relative Luftfeuchtigkeit	Temperatur
Probennummer:	U/min	m/s	1/s	N	N	N	N	%	°C
SV6_PET_H_40_001	1034,66	39,87	199,36	36,7	38,1	37,4	1,4	36,7	24,45
SV6_PET_H_40_002	1034,66	39,87	199,36	28,1	34,8	31,45	6,7	36,7	24,73
SV6_PET_H_40_003	1035,01	39,89	199,43	29,9	40,8	35,35	10,9	35,1	25,27
SV6_PET_H_40_004	1034,3	39,86	199,29	37,1	32,6	34,85	4,5	35,3	25,8
SV6_PET_H_40_005	1033,59	39,83	199,16	35	38,3	36,65	3,3	33,5	26,2
SV6_PET_H_40_006	1033,94	39,84	199,22	36,9	37,7	37,3	0,8	32,8	26,65
SV6_PET_H_40_007	1034,48	39,87	199,33	30	35,9	32,95	5,9	32,6	26,86
SV6_PET_H_40_008	1033,76	39,84	199,19	15,2	20,9	18,05	5,7	33,3	25,68
SV6_PET_H_40_009	1034,66	39,87	199,36	30,9	36,6	33,75	5,7	32,7	26,03
SV6_PET_H_40_010	1033,76	39,84	199,19	35	36,6	35,8	1,6	31,7	26,57
SV6_PET_H_40_011	1035,1	39,89	199,45	32,7	36,6	34,65	3,9	31,6	26,53
SV6_PET_H_40_012	1034,3	39,86	199,29	33,3	36,1	34,7	2,8	30,9	26,91
SV6_PET_H_40_013	1034,12	39,85	199,26	34,9	36	35,45	1,1	30,7	27,27
SV6_PET_H_40_014	1034,83	39,88	199,40	33,8	34,1	33,95	0,3	30,6	27,15
SV6_PET_H_40_015	1034,66	39,87	199,36	35	35,9	35,45	0,9	30,5	27,47
SV6_PET_H_40_016	1034,66	39,87	199,36	35,2	34,9	35,05	0,3	30,4	27,25
SV6_PET_H_40_017	1034,66	39,87	199,36	34,6	36,4	35,5	1,8	30	27,58
SV6_PET_H_40_018	1034,48	39,87	199,33	34	36,5	35,25	2,5	29,6	27,84
SV6_PET_H_40_019	1034,48	39,87	199,33	36	35	35,5	1	29,8	27,83
SV6_PET_H_40_020	1035,01	39,89	199,43	37,2	40,1	38,65	2,9	29,4	28,03
SV6_PET_H_40_021	1034,83	39,88	199,40	34,8	36,4	35,6	1,6	29,3	28,12
SV6_PET_H_40_022	1035,01	39,89	199,43	35,1	38,2	36,65	3,1	29,2	27,99
SV6_PET_H_40_023	1034,83	39,88	199,40	36,4	41,6	39	5,2	29,1	28,05
Mittelwert	1034,513	39,867	199,334	33,383	36,091	34,737	3,213	31,804	26,794
Standardabweichung	0,431	0,017	0,083	4,656	3,914	4,008	2,574	2,375	1,077

d) Prüfgeschwindigkeit 40 m/s

Abbildung 82c,d: Messdaten der Rotationszugprüfungen für das PET Garns H (550 dtex f 105) für 30 und 40 m/s.

Zusammenfassung der Ergebnisse

- Der am ITV entwickelte Rotationsprüfstand für Hochgeschwindigkeitszugprüfungen ermöglicht Prüfgeschwindigkeiten von bis zu 70 m/s anstatt mit den für das Projekt geplanten 50 m/s.
- Infolge der neu entwickelten Garnklemmen sind nun auch kürzere Einspannlängen von 200 mm und weniger als die geplanten 750 mm möglich. Die max. Dehnraten liegen daher bei 350 1/s (bzw. 1400 1/s bei 50 mm Einspannlänge, Abbildung 83). Für kleinere Einspannlängen als 200 mm sind weitere Entwicklungsarbeiten erforderlich.
- Die Messwert- und die Bilderaufnahme erfolgt exakt synchron, es ist eine eindeutige Zuordnung von Messwert und Garnzustand vorhanden. Die gemessene Umfangsgeschwindigkeit ist - wie auch die Auswertung von High-Speed-Videofilmen zeigten – bis zur Maximalgeschwindigkeit exakt.
- Das Fadenschleifen-Prüfkonzept, der Einsatz von zwei Kraftmesssensoren für die Fadenenden, Prüfen mit und ohne Vorkraft und der Einsatz der High-Speed-Kamera funktionieren einwandfrei.
- Es können unterschiedliche Mitnahmenasen eingesetzt werden.
- Es können auch Einzelfadenzugprüfungen durchgeführt werden. Jedoch ist diese Prüfung mit dem Rotationsprüfstand sehr zeit- und arbeitsaufwendig.
- Der Rotationsprüfstand wurde für eine Klimatisierung vorbereitet.
- Die entwickelten Lösungen des Fadenschlaufen-Prüfung und die Garnklemmen können auch für die am ITV verfügbaren BOSE-Axial-Torsional-Wechselzugprüfmaschine eingesetzt werden, die die dynamische Prüfung bis zu 2,5 m/s kürzeste Garnlängen bei Einsatz einer Temperaturkammer (-150 bis 350°C) ermöglichen.
- Es ist die direkte Dehnungsmessung auf dem Garn mit Hilfe der am ITV verfügbaren Hochgeschwindigkeitskamera und dem 3d-Dehnungsmesssystem ARAMIS, Fa. GOM geplant. Hierdurch werden noch kürzere Einspannlängen und somit wesentlich höhere Dehnraten mit noch verlässlicher Dehnungsmessung möglich.
- Für die PA 4.6 Garn E, PA 6.6 Garn G und PET Garn H wurden über 180 Prüfungen mit 10, 20, 30 und 40 m/s durchgeführt. Ausgewählte repräsentative Zugprüfungen wurden detailliert ausgewertet und zeigen eindeutig einen relevanten Dehnrateneinfluss auf das Garnverhalten. Die Bruchdehnung wird mit zunehmender Dehnrates deutlich geringer und die Steifigkeit wächst ebenfalls deutlich an.
- Die Auswertung aller Prüfungen für 50 - 200 1/s zeigte, dass die gemittelten Bruchkräfte gleich oder etwas höher als die statisch bestimmten Bruchkräfte liegen. Die Unterschiede der Bruchkräfte innerhalb der Prüfserie zwischen 50 – 200 1/s sind sehr gering, bzw. liegen innerhalb der Streuung.

- Der ITV-Rotationszugprüfstand besitzt noch weiteres Optimierungspotential, um noch bessere Ergebnisse bei noch höheren Dehnraten zu erzielen und Grundsatzuntersuchungen an Garnen und insbesondere auch für textile Flächen durchzuführen.

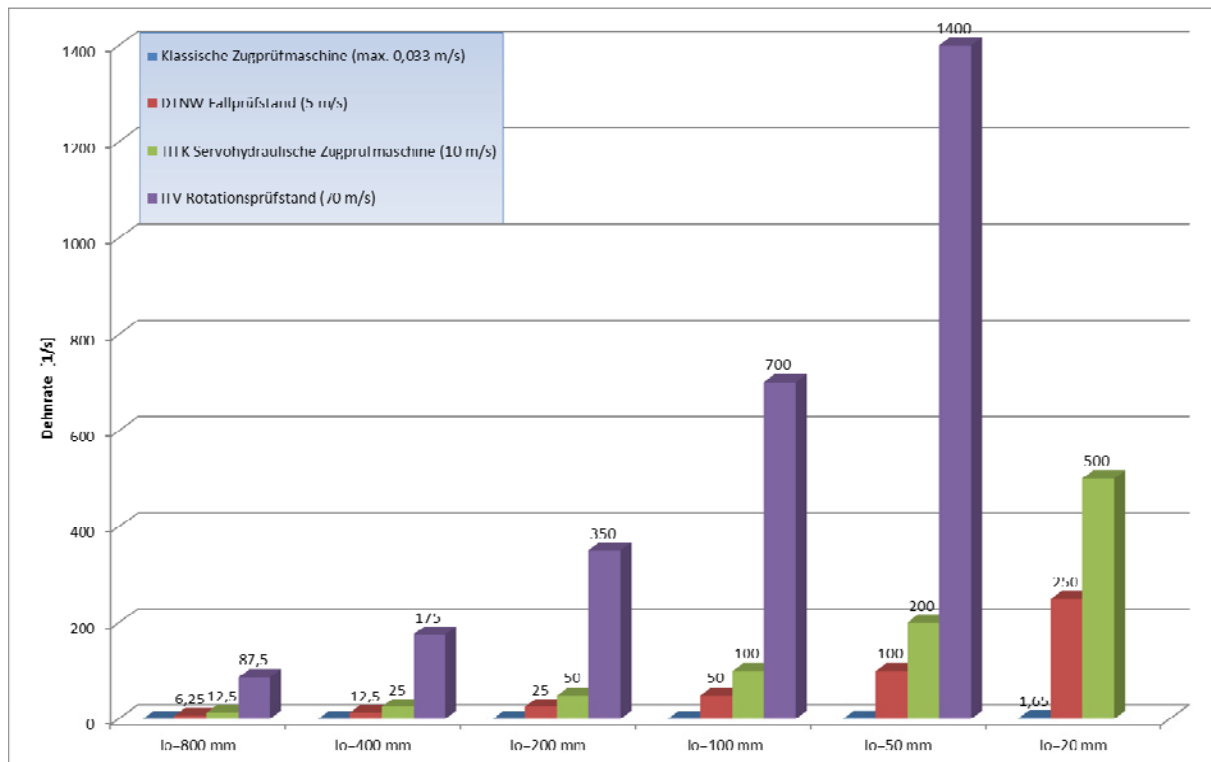


Abbildung 83: Vergleich der Dehnraten der Prüfmethode der drei Forschungseinrichtungen in Abhängigkeit von der Einspannlänge l_0

5 Hochgeschwindigkeit-Zugprüfmaschine

5.1 Physikalische Grundlagen des Messverfahrens

5.1.1 Servohydraulische Hochgeschwindigkeits- Zugprüfmaschinen

Prüfmaschinen für den quasistatischen Zugversuch werden seit vielen Jahren gebaut und sind technisch sehr ausgereift. Moderne Prüfmaschinen arbeiten mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit, um sicherzustellen, dass die Messproben mit unterschiedlichem Kraft- Dehnungsverlauf rheologisch gleichen Verformungsabläufen unterworfen sind.

Der quasistatische Zugversuch hat als mechanisches Prüfverfahren eine große Bedeutung erlangt. Er ist hinreichend untersucht und die Ergebnisse wurden in Normen festgeschrieben. Die Erkenntnisse der Textilprüfung zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften von textilen Garnen im quasistatischen Zugversuch sind in der Norm DIN EN ISO 2062 definiert. Die wichtigsten normativen Festlegungen sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Prüfbedingungen bei quasistatischen Untersuchungen [18]

Prüfbedingungen	Einheit	Wert
Vorspannkraft	cN/tex	0,5
Einspannlänge	mm	500 ± 2
Prüfgeschwindigkeit	mm/min	500 ± 5
Raumfeuchte	%	65 ± 2
Raumtemperatur	°C	20 ± 2
Probezahl		20

Während umfangreiche Kenntnisse über das mechanische Faser/Textilverhalten bei quasistatischer Belastung vorhanden sind, liegen für höhere Belastungsgeschwindigkeiten v_0 ($v_0 > 5$ m/s) nur wenige Daten vor (vgl. auch Kap.1).

Mit *servohydraulischen Hochgeschwindigkeitsprüfmaschinen* können dehnratenabhängige Kennwerte über einen weiten Verformungsgeschwindigkeitsbereich ermittelt werden. Das Funktionsprinzip dieser *Hochgeschwindigkeitszugprüfung* ist mit dem der quasistatischen Zugprüfung vergleichbar. Die für die dynamischen Prüfungen notwendigen hohen Dehnraten werden durch eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit und Variation der Einspannlänge erreicht.

Unter Berücksichtigung von Prüfgeschwindigkeiten bis zu 20 m/s und einer praktikablen Einspannlänge von 0,02 m ergeben sich hier Dehnraten bis zu 1000 s^{-1} . Servohydraulische Anlagen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Verformungsraten vom quasistatischen Bereich (mm/s) bis zum dynamischen Bereich (mehrere m/s) bereitstellen können. Es wird ein Kolben, an dem die ziehende Klemme befestigt ist, durch Druck, in diesem Fall durch den dynamischen Druck der Flüssigkeit bewegt. Im Gegensatz zum quasistatischen Zugversuch muss bei der Hochgeschwindigkeitszugprüfung zunächst die Probenhalterung bzw. eine Zusatzmasse, die bei Kraftschluss die Halterung schlagartig mitreißt, auf die gewünschte Versuchsgeschwindigkeit beschleunigt werden. Es erfolgt die rechnergestützte Aufzeichnung der Kraft-Zeit- sowie der Weg-Zeit-Daten, aus denen die Kraft-Weg-Kurven bzw. Spannungs-Dehnungs-Kurven erstellt und die Bruchkennwerte ermittelt werden.

Die Prüfmethodik und die Messtechnik haben bei dynamischen Zugversuchen gegenüber den quasistatischen Zugversuchen einen weit höheren Einfluss auf die Prüfergebnisse. Die Ursachen liegen zum einen in den sehr kleinen Versuchszeiten und zum anderen im Auftreten dynamischer Effekte mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit. Durch die schlagartige Beschleunigung von Probe und Probenhalterung werden Wellen bzw. Nachschläge verursacht, die man als sägezahnartige Schwingungen im Kraftsignal sieht. Auch mit größtmöglicher Optimierung lässt sich dieser Effekt gerade bei sehr hohen Geschwindigkeiten nicht vermeiden. Zwar ist es möglich mit Hilfe digitaler Filter die Schwingung zu reduzieren, allerdings bringt dieses Vorgehen die Gefahr einer Verzerrung und damit einer Verfälschung des gesamten Messsignals.

In [10,19,20,21] wird erwähnt, dass mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Kontaktsteifigkeit (Aufschlagdämpfung) elastische Wellen im Probekörper angeregt werden, die an Grenzflächen (Einspannung) reflektiert werden und mehrmals in den Probekörper hin- und herlaufen. Zu Beginn des Versuches liegen im Probekörper daher keine homogenen Spannungszustände vor. Davon kann man erst ausgehen, wenn die Spannungswellen mehrmals den Probekörper durchlaufen haben. Daher werden in Schnellzugversuchen an Kunststoffen bevorzugt verkürzte Probekörper eingesetzt, damit sich die quasihomogenen Spannungszustände möglichst schnell einstellen.

Hydraulische Prüfmaschine erreichen nicht ganz die hohen Geschwindigkeiten, die z.B. mit Rotationsprüfmaschine möglich sind, können dagegen aber auch im Bereich niedrigster Geschwindigkeiten betrieben werden.

5.1.2 Dehngeschwindigkeit / Dehnrate

Hochgeschwindigkeitsprüfungen sind wesentlich komplexer als die quasistatischen Zugprüfungen. Bei der Zugbeanspruchung von Materialien unter hohen Verformungsgeschwindigkeiten handelt es sich um einen Vorgang, der unter dynamischen Gesetzmäßigkeiten abläuft. Das bedeutet, dass der Einfluss der Zeit in vielfacher Hinsicht zu beachten ist. Die Angabe der Abzugsgeschwindigkeit v_0 gibt die unmittelbaren Verhältnisse in der Messprobe nicht eindeutig wieder, da sie nur die Geschwindigkeitsverhältnisse der ziehenden Klemmen kennzeichnet. Deshalb wurde eine Größe definiert, die die Dehnung pro Zeiteinheit in der Probe berücksichtigt. Nach [8] berechnet sich der Kennwert *Dehngeschwindigkeit* $\dot{\epsilon}$ nach Gleichung (12) wie folgt:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{l_0} \times 100 \quad (12)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{\epsilon}$	Dehngeschwindigkeit in [%/s]
v_0	Abzugsgeschwindigkeit in [m/s]
l_0	Einspannlänge in [m]

bzw.

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{l_0} \quad (13)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{\epsilon}$	Dehnrate in [s ⁻¹]
v_0	Abzugsgeschwindigkeit in [m/s]
l_0	Einspannlänge in [m]

Nachfolgend wird der Begriff *Dehnrate* in der Arbeit verwendet.

In Abbildung 84 wird der Zusammenhang der einzelnen Messgrößen einfach erläutert. Es ist deutlich erkennbar, dass durch veränderte Einspannlängen bei gleicher Abzugsgeschwindigkeit in der Messprobe unterschiedliche Dehnraten impliziert werden.

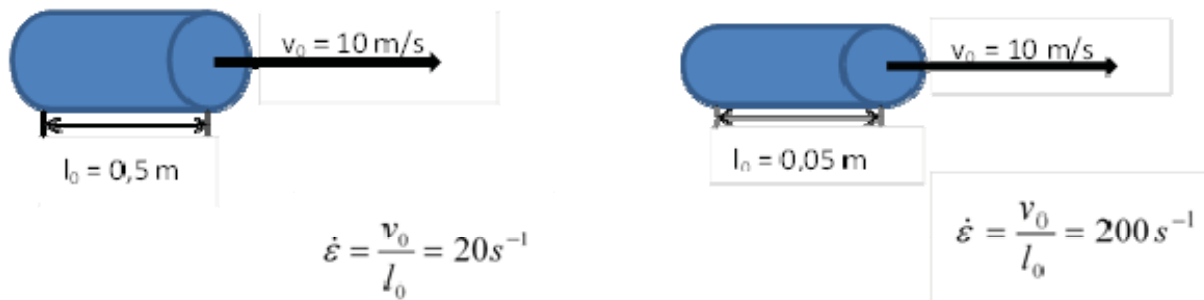


Abbildung 84: Zusammenhang Dehnrage, Abzugsgeschwindigkeit und Einspannlänge [X]

Mit den Parametern der experimentellen Untersuchungen ergeben sich z. B. folgende Dehnraten:

Einspannlänge [mm]	Abzugsgeschwindigkeit [m/s]				
	0,5	1	2	5	10
20	25 s ⁻¹	50 s ⁻¹	100 s ⁻¹	250 s ⁻¹	500 s ⁻¹
30	16,7 s ⁻¹	33,3 s ⁻¹	66,6 s ⁻¹	166,7 s ⁻¹	333,3 s ⁻¹
50	10 s ⁻¹	20 s ⁻¹	40 s ⁻¹	100 s ⁻¹	200 s ⁻¹
125	4 s ⁻¹	8 s ⁻¹	16 s ⁻¹	40 s ⁻¹	80 s ⁻¹
250	2 s ⁻¹	4 s ⁻¹	8 s ⁻¹	20 s ⁻¹	40 s ⁻¹
500	1 s ⁻¹	2 s ⁻¹	4 s ⁻¹	10 s ⁻¹	20 s ⁻¹

5.1.3 Funktionsprinzip der Hochgeschwindigkeits- Zugprüfmaschine

Im Forschungsprojekt wird für die Durchführung der dynamischen Zugversuche die Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine HTM 2008 der Firma Zwick GmbH & Co. verwendet, die in Abbildung 85 zu sehen ist. Es handelt sich um eine servohydraulische Universal-Prüfmaschine zur Durchführung von Zug-, Druck- und Biegeversuchen.

Die Dehnungsmessung erfolgt mit inkrementaler Messmethode, wobei die Wegsensoren den Weg nicht direkt messen, sondern dieser in kleine Einheiten (Inkrementen) geteilt ist und über eine Zählhaltung die Inkrementen als Funktion der Zeit erfasst werden. Mit dieser Methode werden immerhin Genauigkeiten < 1 µm erreicht werden. Der Vorteil von Inkrementalgebern ist ihr relativ einfacher Aufbau. Als nachteilig ist die nur indirekte

Bestimmung des Hauptmesswertes zu nennen wodurch die Maschine beim Start grundsätzlich eine Referenzmarke anfahren muss, um sich überhaupt „orientieren“ zu können.

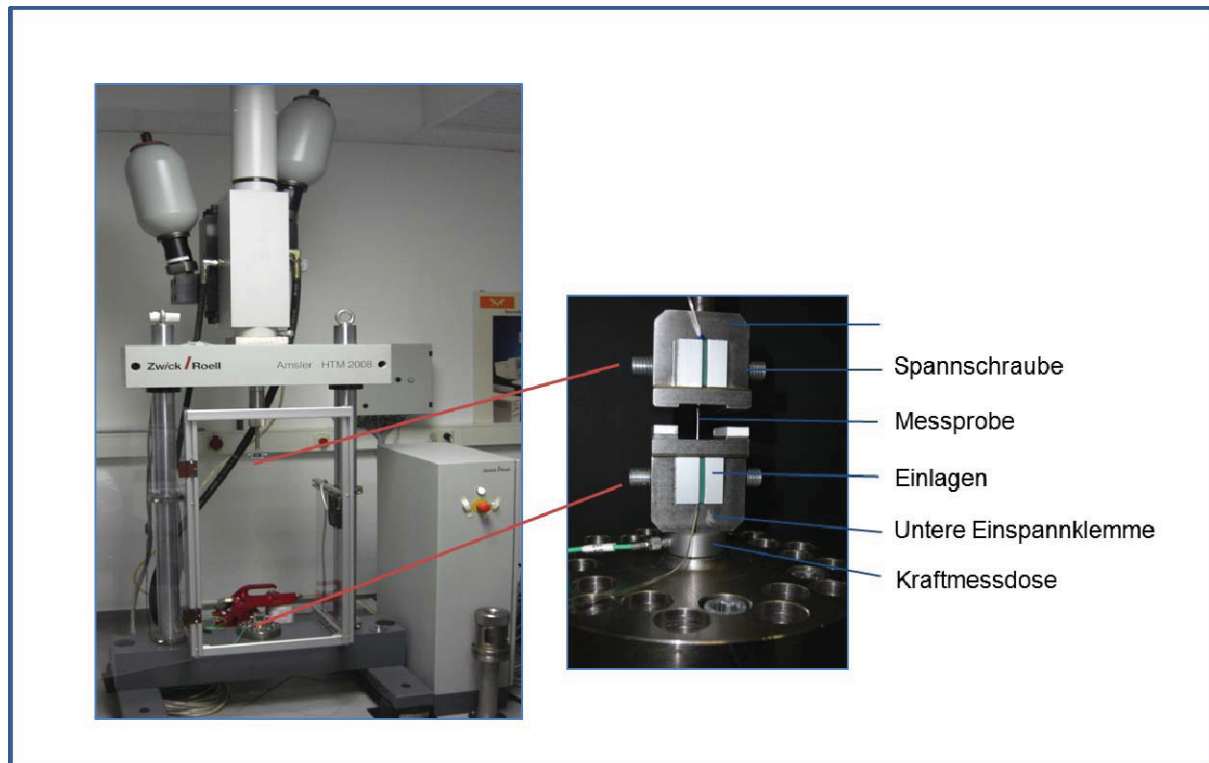


Abbildung 85: Eingesetzte Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine HTM 2008

Zur experimentellen Ermittlung der Zugfestigkeit werden die Messproben mit einer näherungsweise konstanten Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Abbildung 86 dokumentiert einen entsprechenden Prüfablauf an der Prüfmaschine HTM 2008. Als Ergebnis erhält man eine Kraft- Dehnungs- Kurven, wie in Abbildung 87 dargestellt. Die gewünschte Prüfgeschwindigkeit wird über eine Vorlaufstrecke bzw. Beschleunigungsstrecke erreicht, die selbständig ermittelt wird. Der Kolbenweg, um auf eine näherungsweise konstante Geschwindigkeit zu beschleunigen, beträgt 150 mm.

Von Vorteil gegenüber den beiden anderen im Projekt eingesetzten dynamischen Prüfmaschinen ist neben dem Geschwindigkeitsbereich von 0,5 m/s bis 10 m/s (max. bis 12 m/s) insbesondere, die Möglichkeit der Realisierung einer näherungsweise konstanten Abzugsgeschwindigkeit (s. a. Abbildung 88).

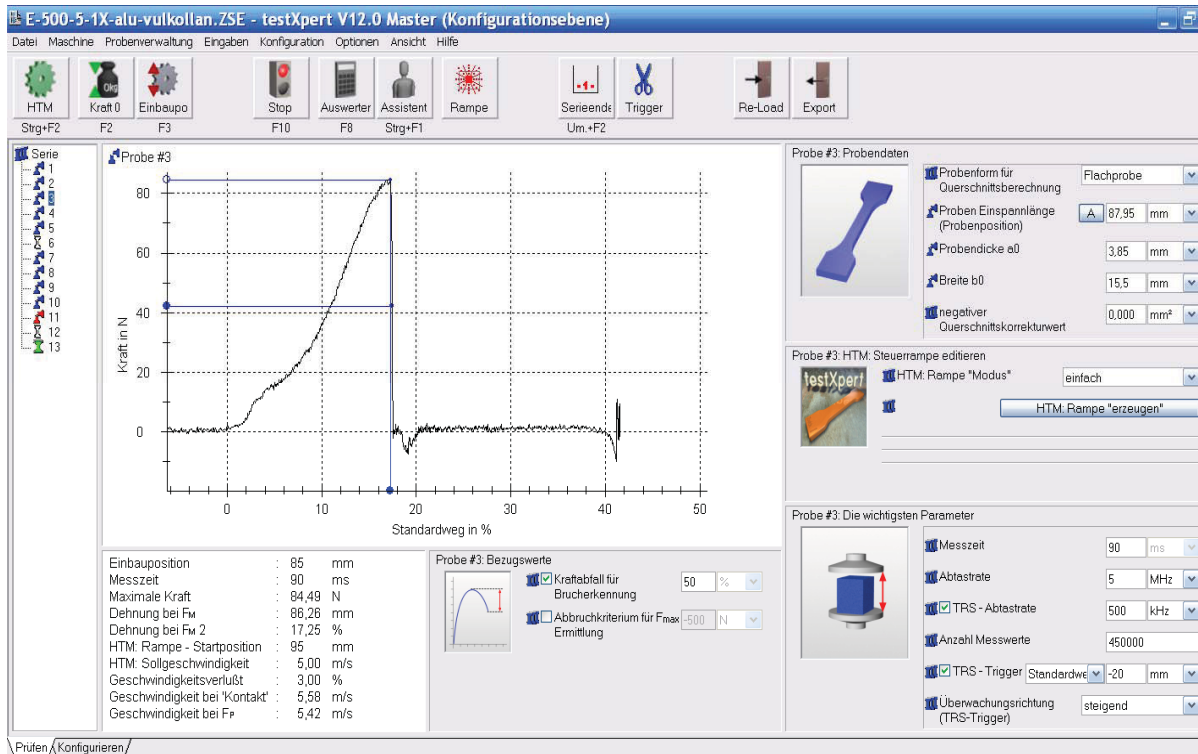


Abbildung 86: Beispielhafter Prüfverlauf (Prüfprotokoll) HTM 2008

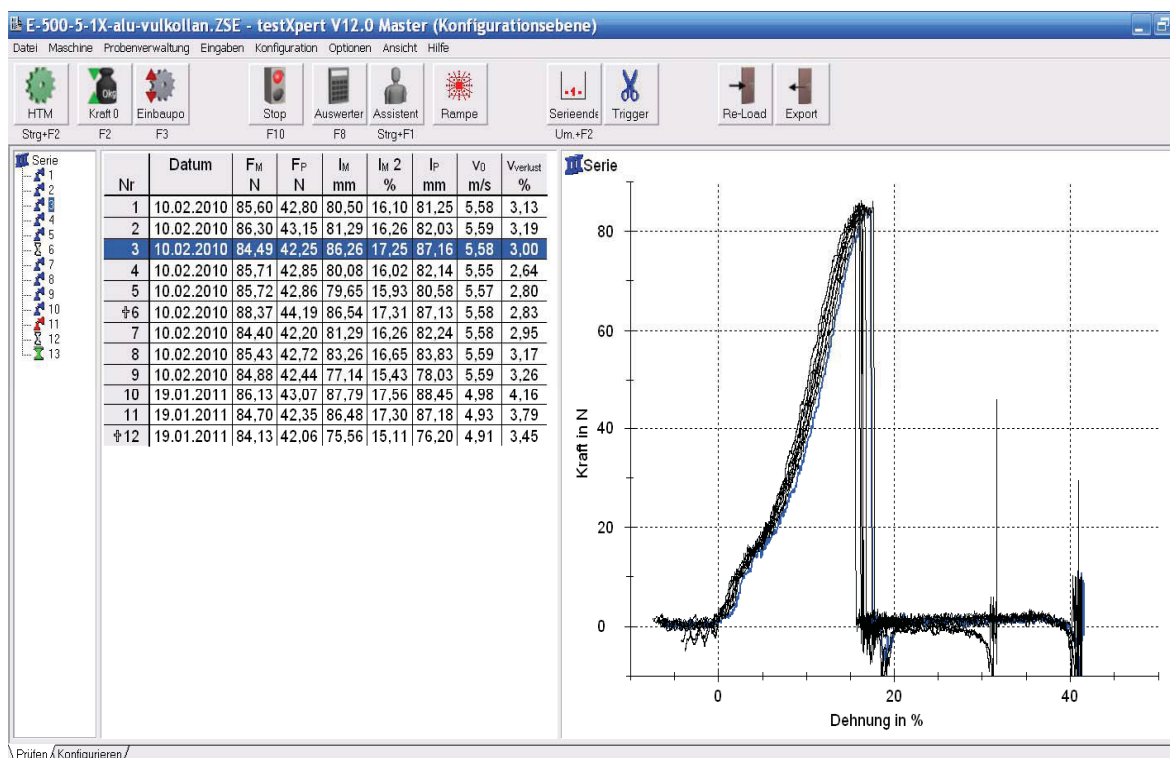


Abbildung 87: Messprotokoll- Ausgewählte Kraft- Dehnungskurven

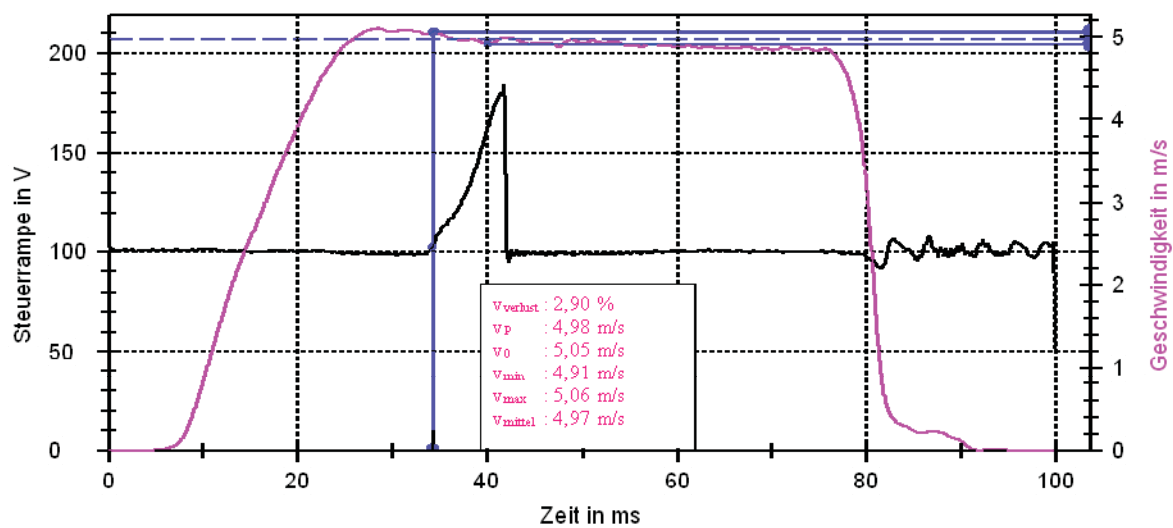


Abbildung 88: Beispielhafte Prüfung- Realisierung einer näherungsweise konstanten Belastungsgeschwindigkeit

5.2 Experimenteller Aufbau und Vorgehensweise

5.2.1 Versuchsmaterial

Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss 3 Standardfadenmaterialien aus Tabelle 2 (vgl. Abschnitt 2) ausgewählt. Das sind:

- PA6.6 940dtex f 140
- PA4.6 940dtex f 140
- PET 550dtex f 105

Die wichtigsten Eigenschaften der 3 Versuchsmaterialien sind in Tabelle 8 zusammengestellt:

Tabelle 8: Charakteristische Parameter der eingesetzten Versuchsmaterialien

Polymerart	Einheit	PA 6.6	PA 4.6	PET
Garnfeinheit	tex	95,1	95,6	56,1
Filamentenzahl		140	140	105
Einzelfilamenten-Durchmesser	μm			
Dichte	g/cm^3	1,14	1,18	1,33
Glastemperatur	$^{\circ}\text{C}$			80,7
Schmelztemperatur	$^{\circ}\text{C}$	262,8	282,2	247,6

5.2.2 Versuchsdurchführung – Zugversuche

Quasistatischer Zugversuch

Zur Ermittlung korrelativer Zusammenhänge wurden zunächst quasistatische Prüfungen nach DIN EN ISO 2060 [1] durchgeführt. Zur Durchführung dieser Versuche wurde die Universalprüfmaschine Z010 der Firma Zwick GmbH & Co. verwendet, die in Abbildung 89 zu sehen ist.

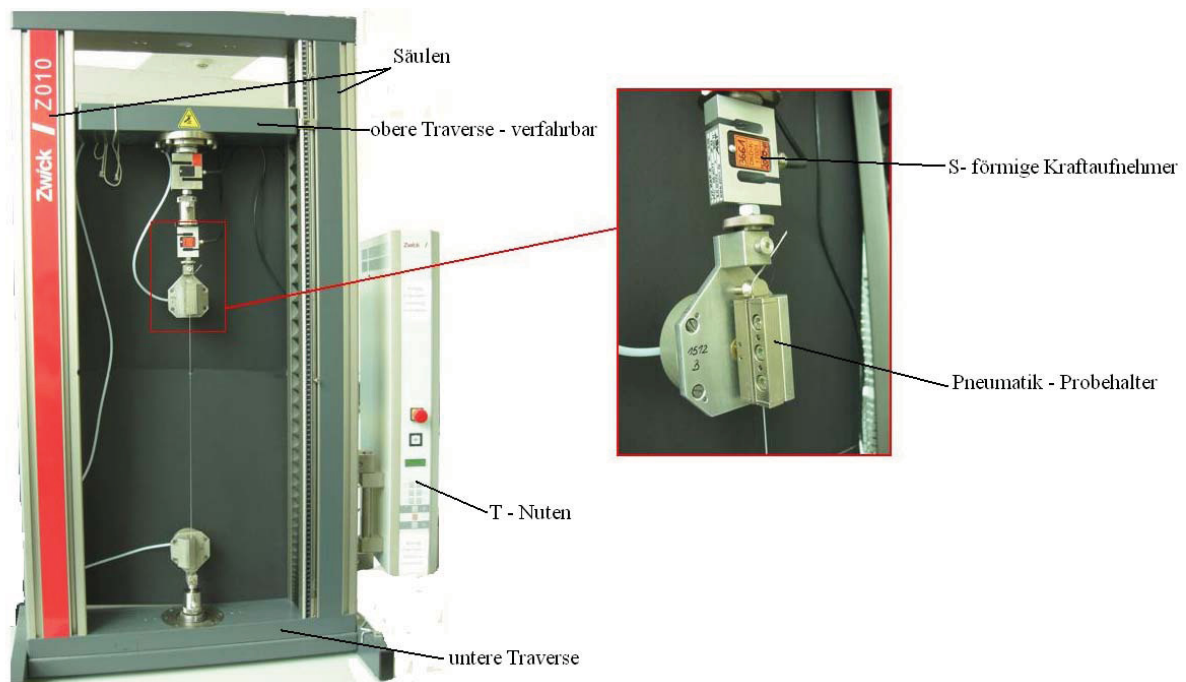


Abbildung 89: Prüfmaschine Zwick Z010- Quasistatischer Zugversuch

Die normierten Prüfbedingungen enthält Tabelle 9. Auf Grundlage der Gl.(13) (s. Abschnitt 5.1.2) wurde weiterhin die Dehnraten variiert. Die realisierten Dehnraten können der Versuchsmatrix aus Tabelle 10 entnommen werden. Bei diesen Versuchsreihen waren keine Optimierungen bezüglich Methodik und Prüftechnik erforderlich.

Tabelle 9: Quasistatischer Zugversuch DIN EN ISO 2060 [18] - Norm- Prüfbedingungen

Prüfbedingungen	Einheit	Wert
Vorspannkraft	cN/tex	0,5
Einspannlänge	mm	500 ± 2
Prüfgeschwindigkeit	mm/min	500 ± 5
Raumfeuchte	%	65 ± 2
Raumtemperatur	°C	20 ± 2
Probezahl		20

Tabelle 10: Quasistatischer Zugversuch - geprüfter Dehnratenbereich

Einspannlänge [mm]	Abzugsgeschwindigkeit [mm/min]				
	50	250	500	1000	1800
25	$0,033s^{-1}$	$0,167s^{-1}$	$0,33s^{-1}$	$0,67s^{-1}$	$1,2s^{-1}$
50	$0,0167s^{-1}$	$0,083s^{-1}$	$0,1670s^{-1}$	$0,33s^{-1}$	$0,6s^{-1}$
500	$0,001671s^{-1}$	$0,0083s^{-1}$	$0,0167s^{-1}$	$0,0033s^{-1}$	$0,06s^{-1}$

Dynamischer Zugversuch- Optimierung Prüftechnik HTM 2008

In Abschnitt 5.1.3 sowie in Abbildung 85 bis Abbildung 88 wurde das Funktions- und Auswerteprinzip der eingesetzten HTM 2008 bereits ausführlich dargestellt.

Im Zusammenhang mit der Charakterisierung des Materialverhaltens bei Kurzzeitbeanspruchung bestand ein begleitendes Forschungsziel in der Optimierung der eingesetzten dynamischen Prüftechniken, der Darstellung der Möglichkeiten und Grenzen sowie der Vergleichbarkeit der eingesetzten Prüfmethoden.

Variierbare Parameter sind für alle Materialien die Einspannlänge, Abzugsgeschwindigkeit und Probenklemmung. Unter Variation dieser Parameter sollen anhand der an den Garntypen ermittelten Kraft-Dehn-Verläufe die maximal möglichen Dehnraten, systematische und statistische Fehler und Einsatzgrenzen festgestellt und die Prüfabläufe optimiert werden. Die nachfolgend beschriebenen und notwendigen Anpassungsarbeiten wurden von den Firmen Textechno (Optimierung Klemmenbeläge) und Phönix Werkzeugbau (Variation Einspannlänge) technisch begleitet.

Optimierung Probenhalterung

Allgemein bekannt ist das Problem der sicheren Klemmung von glatten, hochfesten Filamentgarnen. Zum sicheren rutschfreien Einspannen dieser Materialien wird ein hoher Klemmendruck empfohlen, der aber durch Quetschen an der Einspannstelle die Probe vorschädigt und damit das Ergebnis verfälschen kann [22].

Unabhängig von der Art der Beschleunigung ist auch die Ankopplung der beschleunigten Masse an die Messprobe von großer Bedeutung. Bei den Hochgeschwindigkeitsprüfungen muss die Klemmenmasse so gering wie möglich gewählt werden. Zum einen werden die Klemmen auf die hohen Prüfgeschwindigkeiten beschleunigt und nach Prüfende wieder abgebremst, zum anderen sollte bei hohen Prüfgeschwindigkeiten auch die Eigenfrequenz des Messsystems sehr hoch liegen, damit das Nutzsignal nicht vom Eigenfrequenzverhalten des Messsystems zu stark beeinflusst wird.

Folgende Klemmentypen und Klemmbackenbeläge (Abbildung 90) wurden getestet:

- 1) Umschlingungsklemmen für Garne,
- 2) Parallelschraubklemmen- Spannbacken beidseitig mit profilierter Oberfläche,
- 3) Parallelschraubklemmen- Spannbacken eine Seite Aluminium glatt, andere Seite Aluminium mit Vulkollan-Belag.

Die Spannflächenabmessung der Parallelklemmen beträgt immer 20 mm x 25 mm. Die leichten Parallel-Schraubklemmen werden vom Prüfmaschinenhersteller insbesondere für dynamische Zugversuche an kompakten Streifenproben empfohlen.

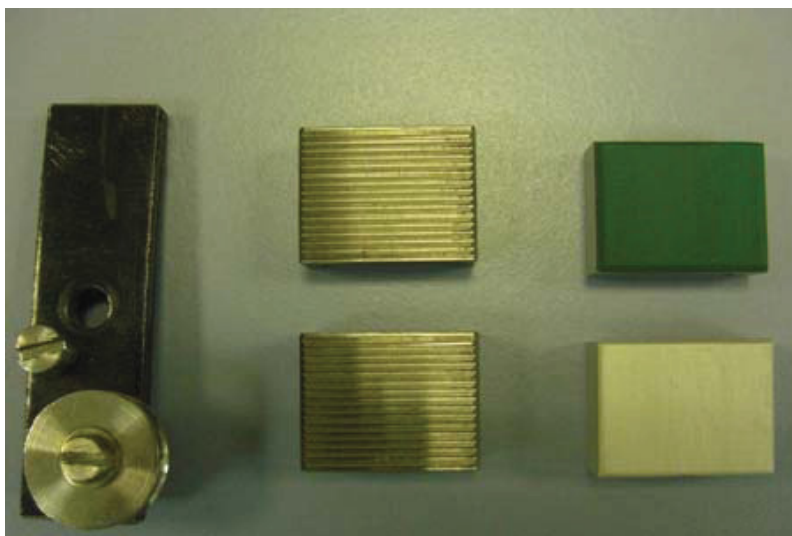


Abbildung 90: HTM 2008 - Getestete Klemmeneinlagen

Bei Einsatz dieser Klemmen mit beidseitig profilierten Spannbacken zeigte es sich jedoch, dass diese profilierte Oberfläche für die hochfesten und querkraftempfindlichen Garne nicht geeignet ist. Die scharfen Oberflächenkanten schädigen das Garn während der Prüfung so stark, dass alle Garne vornehmlich im Klemmenbereich reißen, so dass keine repräsentativen Messwerte erhalten werden.

Für den Vergleich Umschlingungsklemme und Parallel- Schraubklemme (Spannbacken Aluminium glatt zu Aluminium mit Vulkollan- Belag) wurden dynamische Zugversuche mit den in Tabelle 11 angegebenen Prüfbedingungen durchgeführt.

Tabelle 11: Optimierungsversuche Klemmen- Prüfbedingungen

Parameter	Einheit	Werte		
Dehnrage	1/s	10	40	80
Einspannlänge	mm	500	125	125
Geschwindigkeit	m/s	5	5	10
Vorspannkraft	cN/tex	2	2	2

Abbildung 91 zeigt die eingesetzten Parallel- Schraubklemmen(Spannbacken Aluminium glatt zu Aluminium mit Vulkollan- Belag). Die dabei erzielten mittleren Kraft-Dehnungs-Kurven sind in Abbildung 92 bis Abbildung 94 dargestellt.

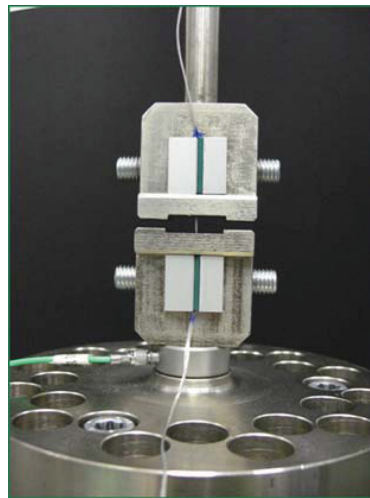


Abbildung 91: HTM 2008- Eingesetzte Parallel- Schraubklemmen (Spannbacken Aluminium glatt/ Vulkollan)

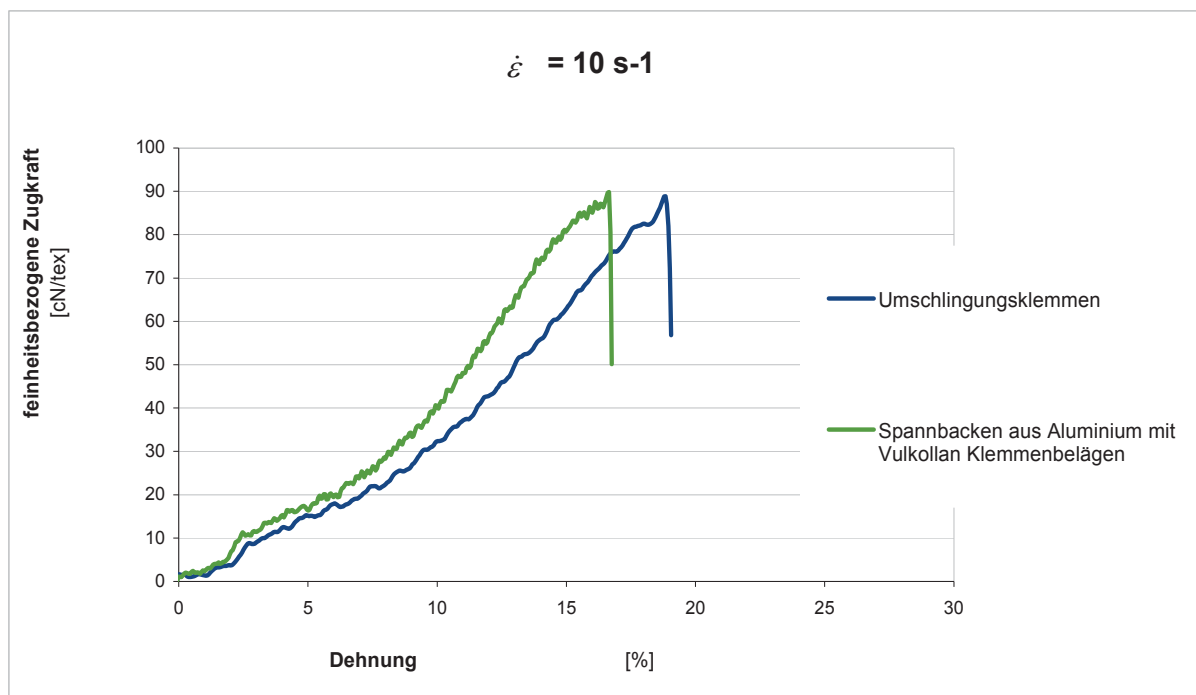


Abbildung 92: Klemmenvergleich bei Einspannlänge 500 mm, Dehnrage 10 s^{-1}

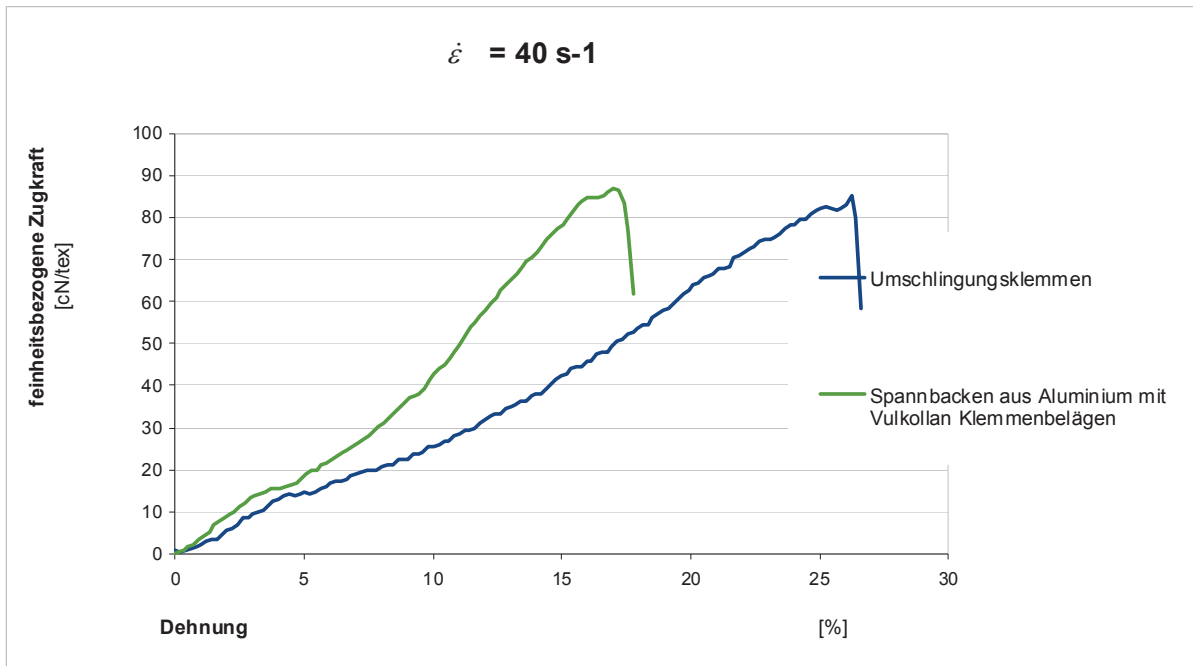


Abbildung 93: Klemmenvergleich bei Einspannlänge 125 mm, Dehnrage 40 s^{-1}

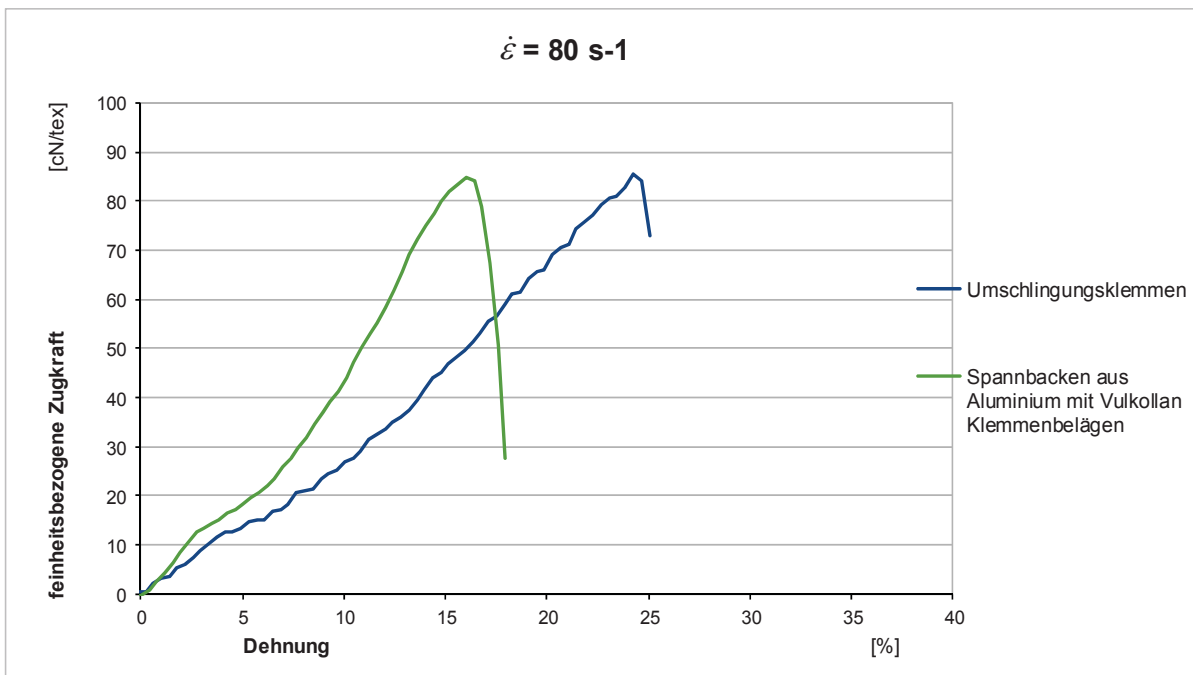


Abbildung 94: Klemmenvergleich bei Einspannlänge 125 mm, Dehnrage 80 s^{-1}

Der Vergleich der Kurven verdeutlicht, dass die maximalen Zugkräfte beider Klemmentypen auf gleichem Niveau liegen. Die Messproben werden an den Parallel- Schraubklemmen (Spannbacken Aluminium glatt zu Aluminium mit Vulkollan- Belag) nicht beschädigt. Deutliche Unterschiede zeigten sich bei den ermittelten Dehnungswerten. Die Ursache für die höheren Dehnungen mit den Umschlingungsklemmen liegt bekanntermaßen an einer unzureichenden Begrenzung der Einspannlänge l_0 , so dass die Längenänderung der Garnproben in den Klemmen mit erfasst wird. Dieser Dehnungsfehler ist bei allen Versuchen vorhanden. Aus diesem Grund wurden für die weiteren Prüfungen die Parallel-Schraubklemmen mit Spannbacken aus Aluminium glatt zu Aluminium mit Vulkollan- Belag ausgewählt. Der ausreichende Klemmndruck wird mit einem Akkuschrauber mit Momentbegrenzung erzeugt, womit bei allen Messungen ein konstanter Klemmndruck gewährleistet ist.

Alterung des Klemmenbelages

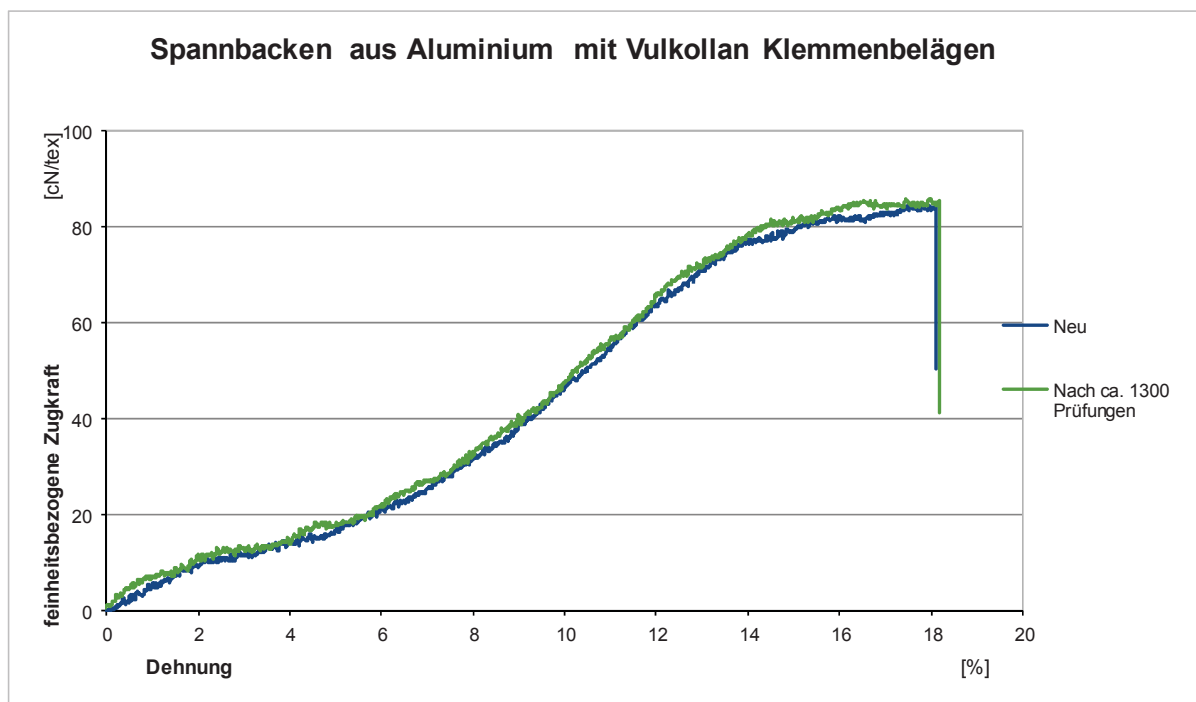


Abbildung 95: Untersuchung des mechanischen Alterungsverhaltens von Vulkollan-Klemmbackenbelägen nach 1300 Zugversuchen (Einspannlänge $l_0 = 500$ mm, Prüfgeschwindigkeit $v = 0,5$ m/s)

Probemessungen haben gezeigt, dass die Vulkollan- Klemmbackenbeläge auch nach ca. 1300 Prüfungen nicht beschädigt sind; es wurden keine Veränderungen der Messergebnisse festgestellt. Die erzielten Kraft- Dehnungskurven sind in Abbildung 95 an einem Probebeispiel aufgezeigt. Die Spannbackenbeläge mit Vulkollan Beschichtung sind somit mindestens für 1300 Prüfungen einsetzbar.

Optimale Anzahl Messproben

Die Art der Probenahme übt einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis aus. Untersuchungen sind daher an repräsentativen Proben durchzuführen, so dass die Probenahme in einer bestimmten Art und Weise zu erfolgen hat. Nur so kann ein Schluss auf die entsprechende Eigenschaft der gesamten Menge gezogen werden.

Textilien sind keine ideal gleichmäßigen Körper, deren Eigenschaften unterliegen oft beträchtlichen Schwankungen. Diese Erkenntnis führt zu der Schlussfolgerung, dass sich beim Prüfen einer bestimmten Eigenschaft an nur einer Messprobe oder an wenigen Messproben Zufallswerte ergeben, die zu Fehlschlüssen führen können. Die Anzahl der dem Prüfling zu entnehmenden Proben muss so groß sein, dass die an das Messergebnis gestellten Genauigkeitsansprüche erfüllt werden [21]. Weil für die dynamische Prüfungen von Hochleistungsgarnen mit der HTM 2008 keine Kenntnisse zu den Werteverteilungen bekannt waren, wurde in Vorversuchen durch die Bestimmung der Streuung eine notwendige Anzahl der Einzelprüfungen von mindestens 10 bis 12 Messproben ermittelt.

Nachfolgend wurde deshalb jede Versuchsreihe mit 12 Messproben durchgeführt und am Ende jeweils zwei Extremwerte verworfen. Für abschließende vergleichende Betrachtungen und Auswertungen wurden nur die mittleren Kraft- Dehnungskurven und Modul- Kurven betrachtet.

Ausgewählte Versuchsreihen

Die in 5.2.1 ausgewählten Versuchsgarne wurden vor der dynamisch-mechanischen Beanspruchung 24 Stunden in Normalklima ($20\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$, $65\% \pm 2\%$) gelagert und unter diesen normierten Bedingungen auch geprüft.

Die Variation der Dehnraten erfolgt auf Grundlage der Gl.(13) (Abschnitt 5.1.2). Die realisierten Dehnraten können aus der Versuchsmatrix in der Tabelle 12 entnommen werden.

Tabelle 12: Versuchsmatrix- Durchgeführte Versuchsreihen

l_0 [mm]	Abzugsgeschwindigkeit [m/s]							
	0,5	0,8	1	1,2	2	5	8	10
20	25s^{-1}	40s^{-1}	50s^{-1}	60s^{-1}	100s^{-1}	250s^{-1}	400s^{-1}	500s^{-1}
30	$16,7\text{s}^{-1}$	$26,7\text{s}^{-1}$	$33,3\text{s}^{-1}$	40s^{-1}	$66,6\text{s}^{-1}$	$166,7\text{s}^{-1}$	$266,7\text{s}^{-1}$	$333,3\text{s}^{-1}$
50	10s^{-1}	16s^{-1}	20s^{-1}	24s^{-1}	40s^{-1}	100s^{-1}	160s^{-1}	200s^{-1}
125	4s^{-1}	$6,4\text{s}^{-1}$	8s^{-1}	$9,6\text{s}^{-1}$	16s^{-1}	40s^{-1}	64s^{-1}	80s^{-1}
250	2s^{-1}	$3,2\text{s}^{-1}$	4s^{-1}	$4,8\text{s}^{-1}$	8s^{-1}	20s^{-1}	32s^{-1}	40s^{-1}
500	1s^{-1}	$1,6\text{s}^{-1}$	2s^{-1}	$2,4\text{s}^{-1}$	4s^{-1}	10s^{-1}	16s^{-1}	20s^{-1}

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden:

Das bestehende Fadenprüfsystem an der servohydraulischen Prüfmaschine HTM 2008 mit der Ausstattung test Control (MSR – Elektronik) und der test Xpert® -Prüfsoftware ist für die in Tabelle 5.6 aufgeführten Versuchsreihen voll einsetzbar.

Aufgrund der steuerungsseitigen Möglichkeiten der Anlage kann die Dehnrates nahezu bis in die Bereiche des quasistatischen Zugversuches reduziert werden. Das optimale Dehnratesfenster liegt im Bereich von 1 s^{-1} bis 500 s^{-1} . Für die exakte Fadenklemmung der hochfesten Polyamid- und Polyestertypen sind leichte Schraub- Probenhalter mit glatten Backenbelägen und einer Kombination von Aluminium und Vulkollan- Belägen am besten geeignet; es wurden bei den bis hierher vorliegenden Versuchsreihen keine Garnbeeinflussungen beobachtet. Durch die beim Bruch frei werdende elastische Energie wird das freie Fadenstück nach oben geschleudert. Bedingt durch die Auswertesoftware der Anlage können neben den Bruchkennwerten auch die einzelnen Versuchsdaten in Form von Kraft-Zeit-Kurven oder Kraft- Dehnungs- (bzw. Weg-) Kurven direkt aufgezeigt werden. Für repräsentative Prüfergebnisse sollte die notwendige Anzahl der Einzelprüfungen mindestens 10 bis 12 Messproben betragen.

5.3 Beispielhafte Messergebnisse

5.3.1 Beispielhafte Kraft- Dehnungs-Kurven bei Normalklima

Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung an PA 6.6 940 dtex f 140

Die Tabelle 13 sowie Abbildung 96 und Abbildung 97 zeigen die Ergebnisse der dynamischen Versuche am Versuchsgarn PA 6.6 940 dtex f 140 im Dehnratenbereich von 1s^{-1} bis 500s^{-1} . Zum Vergleich wurden die Kraft- Dehnungswerte des quasistatischen Versuches (Normversuch) mit dargestellt. Die in den Balkendiagrammen gewählten Balkenfarben kennzeichnen die jeweils gewählte Einspannlänge.

Die Höchstzugkraft nimmt bis zur Dehnrate 20s^{-1} maximal um 10% zu und bleibt dann relativ konstant auf diesem Kräfteniveau. Bei den Einspannlängen 500, 250 und 125 mm steigt mit der Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit- wenn auch nur gering- die Höchstzugkraft an. Dagegen verhält sich die Dehnung unterschiedlich, zeigt aber insgesamt einen abnehmenden Trend.

Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung an PA 4.6 940 dtex f 140

In Tabelle 14 sind die technologischen Einstellparameter zur Erhöhung der Dehnrate und die dabei erzielten Kraft- und Dehnungswerte (Mittelwerte) für PA 4.6 940dtex f 140 aufgelistet.

In Abbildung 98 und Abbildung 99 sind die Ergebnisse der dynamischen Versuche am Versuchsgarn PA 4.6 940dtex f 140 im Dehnratenbereich von 1s^{-1} bis 500s^{-1} als Balkendiagramm dargestellt. Zum Vergleich wurden wieder die Werte des quasistatischen Versuches (Normversuch) mit angegeben. Die in den Diagrammen gewählten Balkenfarben kennzeichnen die jeweils gewählte Einspannlänge.

Die Höchstzugkräfte liegen im untersuchten Dehnratenbereich etwa auf dem Kräfteniveau des quasistatischen Versuches. Ein markanter Anstieg der Höchstzugkraft mit der Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bei jeweils gleicher Einspannlänge ist nicht zu verzeichnen. Verglichen mit der PA 6.6 Type, zeigt sich bei PA 4.6 bis zur Dehnrate 400s^{-1} ein stärkerer Abwärtstrend bei den Dehnungswerten.

Tabelle 13: PA 6.6 940 dtex f140 - Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung (Mittelwerte)

Einspannlänge [mm]	Prüfgeschwindigkeit [m/s]	Dehnrage [s ⁻¹]	Höchstzugkraft [N]	Dehnung bei Höchstzugkraft [%]
500	0,0083	0,00167	75,74	16,20
500	0,5	1	81,86	16,61
250	0,5	2	83,16	16,12
125	0,5	4	81,18	14,94
500	5	10	85,96	16,51
500	8	16	85,44	16,16
500	10	20	85,28	15,94
20	0,5	25	84,35	14,68
250	8	32	82,66	16,45
250	10	40	83,48	16,61
125	8	64	81,10	16,69
125	10	80	82,07	16,89
50	5	100	79,45	14,25
50	8	160	77,69	11,53
50	10	200	79,33	13,96
20	5	250	80,98	16,64
30	8	266	75,06	12,50
30	10	333	72,15	13,56
20	8	400	76,69	12,43
20	10	500	76,47	15,33

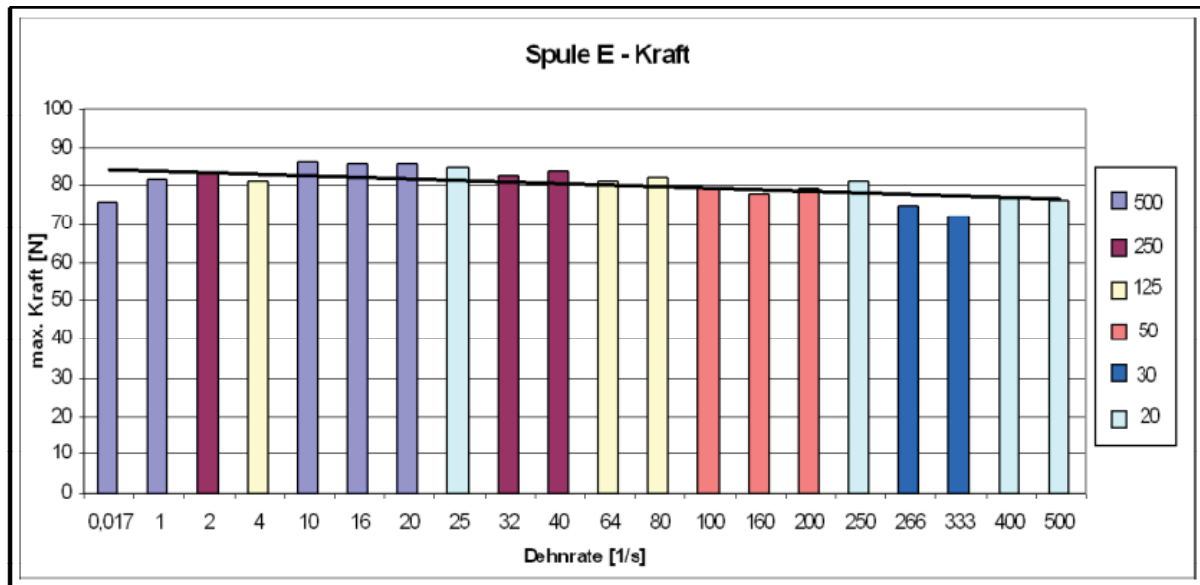


Abbildung 96: PA 6.6 940 dtex f140 - Einfluss der Dehnrate auf die Höchstzugkraft (= max. Kraft)

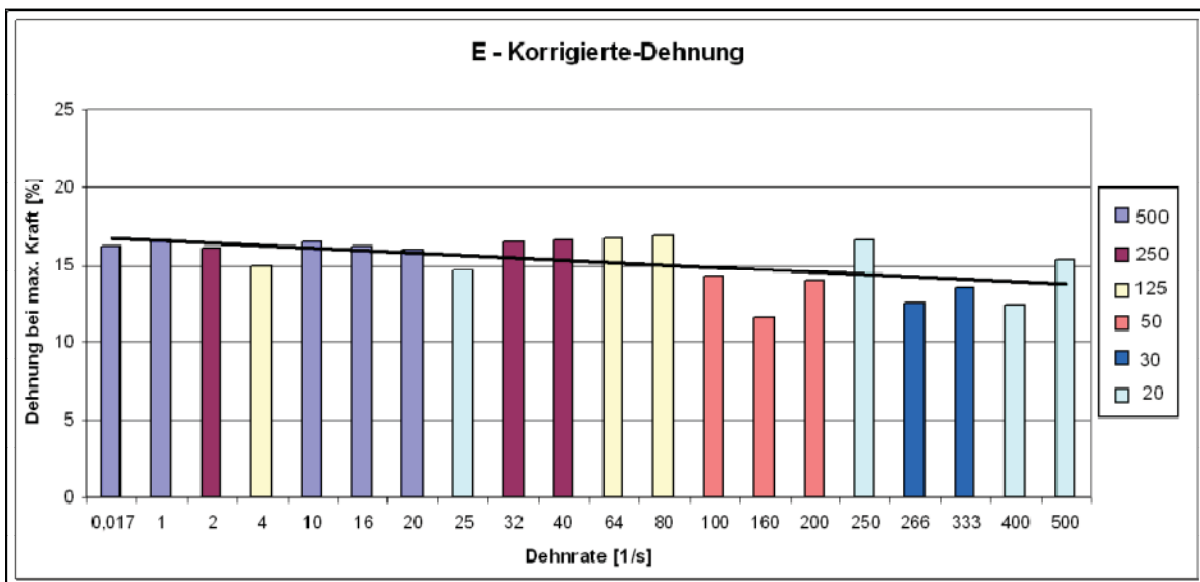


Abbildung 97: PA 6.6 940 dtex f140 - Einfluss der Dehnrate auf die Dehnung bei Höchstzugkraft

Tabelle 14: PA 4.6 940 dtex f140 - Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung (Mittelwerte)

Einspannlänge [mm]	Prüfgeschwindigkeit [m/s]	Dehnrage [s ⁻¹]	Höchstzugkraft [N]	Dehnung bei Höchstzugkraft [%]
500	0,0083	0,00167	64,22	19,00
500	0,5	1	68,43	17,26
250	0,5	2	69,50	17,47
125	0,5	4	70,54	16,74
500	5	10	70,31	16,98
500	8	16	70,83	16,89
500	10	20	68,48	16,04
20	0,5	25	70,77	10,90
250	8	32	71,85	16,26
250	10	40	70,58	16,79
125	8	64	69,71	16,33
125	10	80	70,54	17,37
50	5	100	69,28	11,56
50	8	160	67,45	10,69
50	10	200	66,59	12,92
20	5	250	71,45	14,02
30	8	266	66,83	11,23
30	10	333	64,01	12,79
20	8	400	65,44	8,08
20	10	500	66,31	19,65

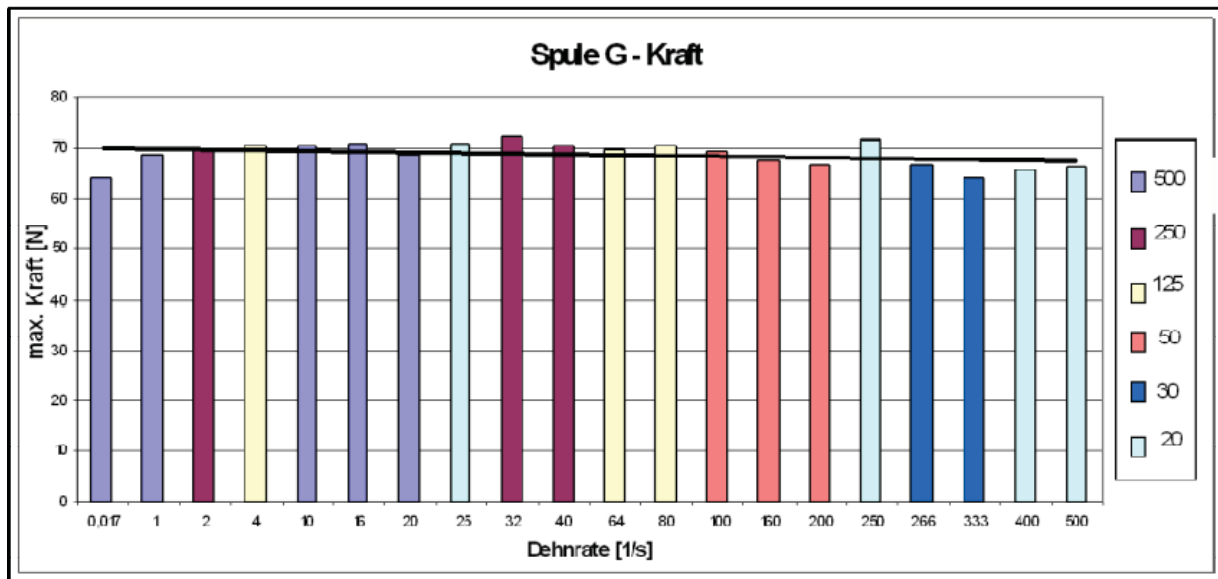


Abbildung 98: PA 4.6 940 dtex f140 - Einfluss der Dehnrate auf die Höchstzugkraft (= max. Kraft)

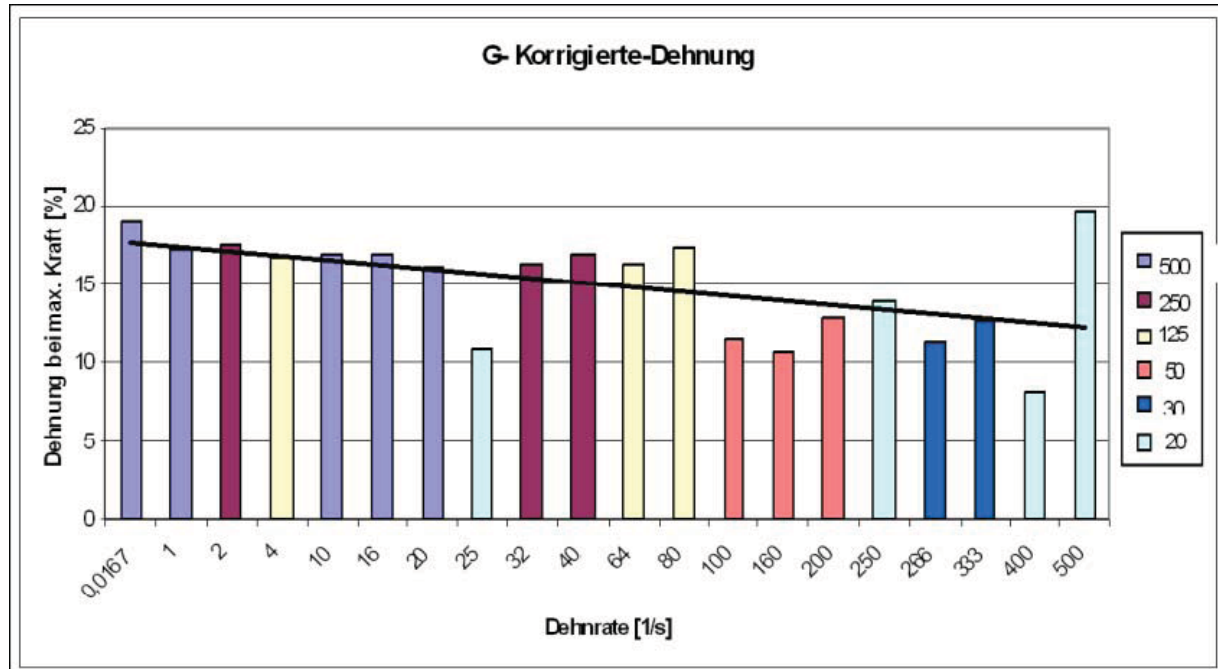


Abbildung 99: PA 4.6 940 dtex f140 - Einfluss der Dehnrate auf die Dehnung bei Höchstzugkraft

Tabelle 15: PET 550dtex f 105 - Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung (Mittelwerte)

Einspannlänge [mm]	Prüfgeschwindigkeit [m/s]	Dehnrage [s ⁻¹]	Höchstzugkraft [N]	Dehnung bei Höchstzugkraft [%]
500	0,0083	0,00167	35,35	21,10
500	0,5	1	35,10	18,04
250	0,5	2	36,30	17,64
125	0,5	4	36,46	18,36
500	5	10	37,61	18,50
500	8	16	36,93	17,64
500	10	20	34,43	16,39
20	0,5	25	36,16	13,75
250	8	32	36,57	17,37
250	10	40	36,18	17,68
125	8	64	35,42	15,81
125	10	80	36,43	16,17
50	5	100	35,83	9,38
50	8	160	34,63	9,45
50	10	200	33,23	11,05
20	5	250	36,21	7,74
30	8	266	32,99	8,54
30	10	333	31,11	9,04
20	8	400	35,90	5,20
20	10	500	33,39	7,35

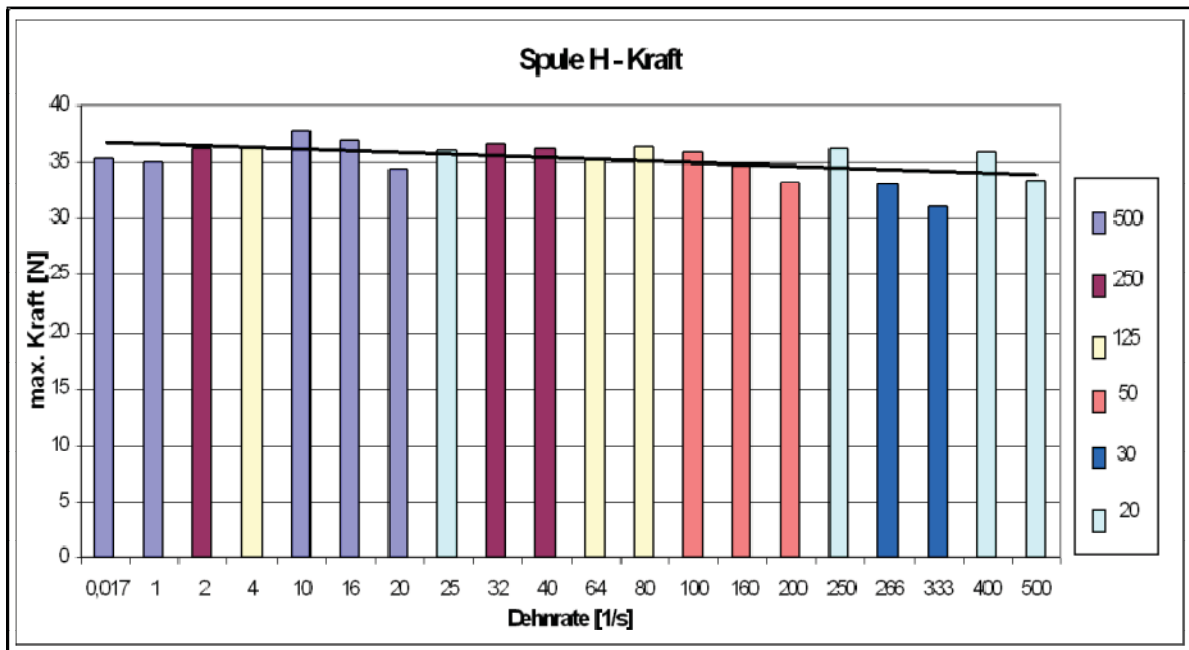


Abbildung 100: PET 550 dtex f105 - Einfluss der Dehnrate auf die Höchstzugkraft (= max. Kraft)

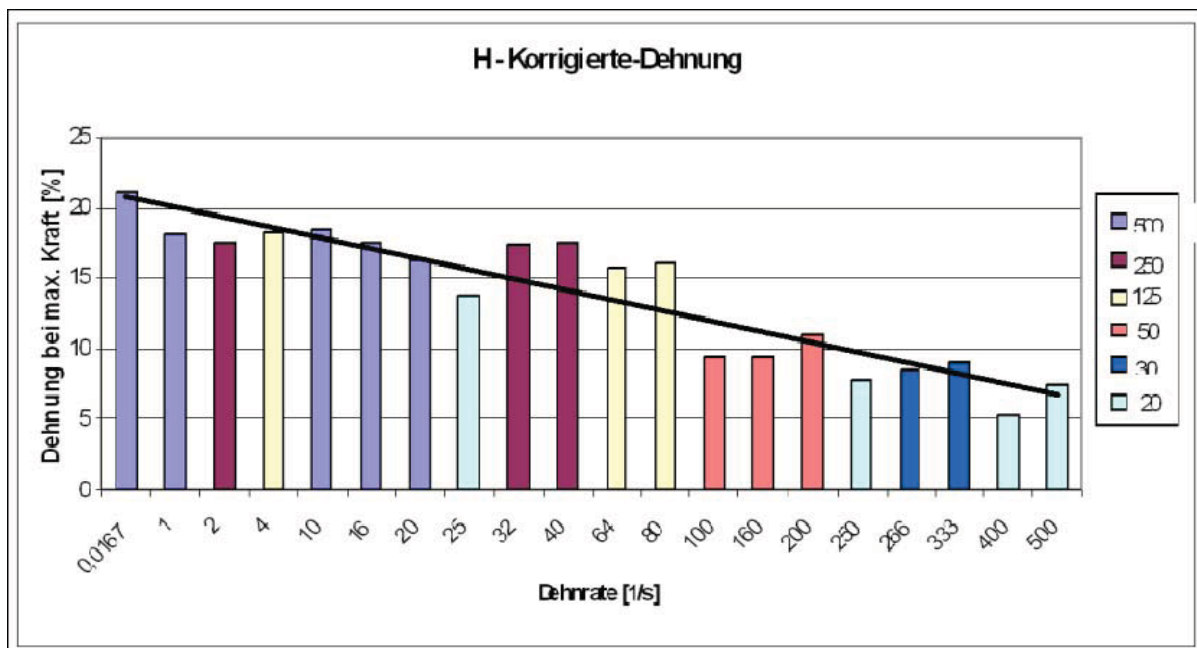


Abbildung 101: PET 550 dtex f105 - Einfluss der Dehnrate auf die Dehnung bei Höchstzugkraft

Ergebnisse der dynamischen Zugprüfung an PET 550 dtex f 105

Analog sind in Tabelle 15 die technologischen Einstellparameter zur Erhöhung der Dehnrates und die dabei erzielten Kraft- und Dehnungswerte für PET 550 dtex f 105 angegeben.

Abbildung 100 und Abbildung 101 zeigen in der Balkengraphik die Ergebnisse der dynamischen Versuche am Versuchsgarn PET 550 dtex f 105 im Dehnratenbereich von 1 s^{-1} bis 500 s^{-1} . Zum Vergleich wurden wieder die Werte des quasistatischen Versuches (Normversuch) mit dargestellt. Die jeweils gewählten Balkenfarben kennzeichnen die gewählten Einspannlängen.

Die Höchstzugkräfte liegen im untersuchten Dehnratenbereich etwa auf dem Kräftelevel des quasistatischen Versuches. Ein markanter Anstieg der Höchstzugkraft mit der Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bei jeweils gleicher Einspannlänge ist nicht zu verzeichnen. Gegenüber den Garnproben aus PA 6.6 und PA 4.6 ist bis zur Dehnrates 400 s^{-1} jedoch ein markanter Abwärtstrend für die Dehnungswerte um etwa 75% zu verzeichnen.

Einfluss Einspannlänge bei gleicher Dehnrates

Betrachtet man jedoch die Ergebnisse der dynamischen Versuche, gemessen bei jeweils der gleichen Dehnrates, so zeigt sich analog zu den quasistatischen Versuchen (Theorie Schwachstelleneffekt), dass allgemein mit der Verkleinerung der Einspannlänge die Maximalkräfte steigen. Das trifft gesichert bei den Einspannlängen 500 mm, 250 mm und 125 mm zu. Beispielhaft zeigen das die Kraft- Dehnungsdiagramme in Abbildung 102 für PA 4.6 940 dtex f140 und Abbildung 103 für PET 550 dtex f 105.

Bei weiterer Verringerung der Einspannlängen zeigten sich zum Teil sehr unterschiedliche Dehnungswerte. Insbesondere ab einer Einspannlänge unter 30 mm sind die bei hohen Geschwindigkeiten gemessenen Dehnungswerte als nicht gesichert zu bewerten. Hier lässt sich der Einfluss der Klemmendehnung (mit kleiner werdender Einspannlänge wirkt sich der Fehler stärker auf das Messergebnis aus) vermuten.

Nachfolgend sind in den Abbildung 104 bis Abbildung 106 beispielhaft die dynamischen Kraft (feinheitsbezogene Kraft)- Dehnungskurven der 3 Versuchsgarne bei hohen Dehnrates dargestellt.

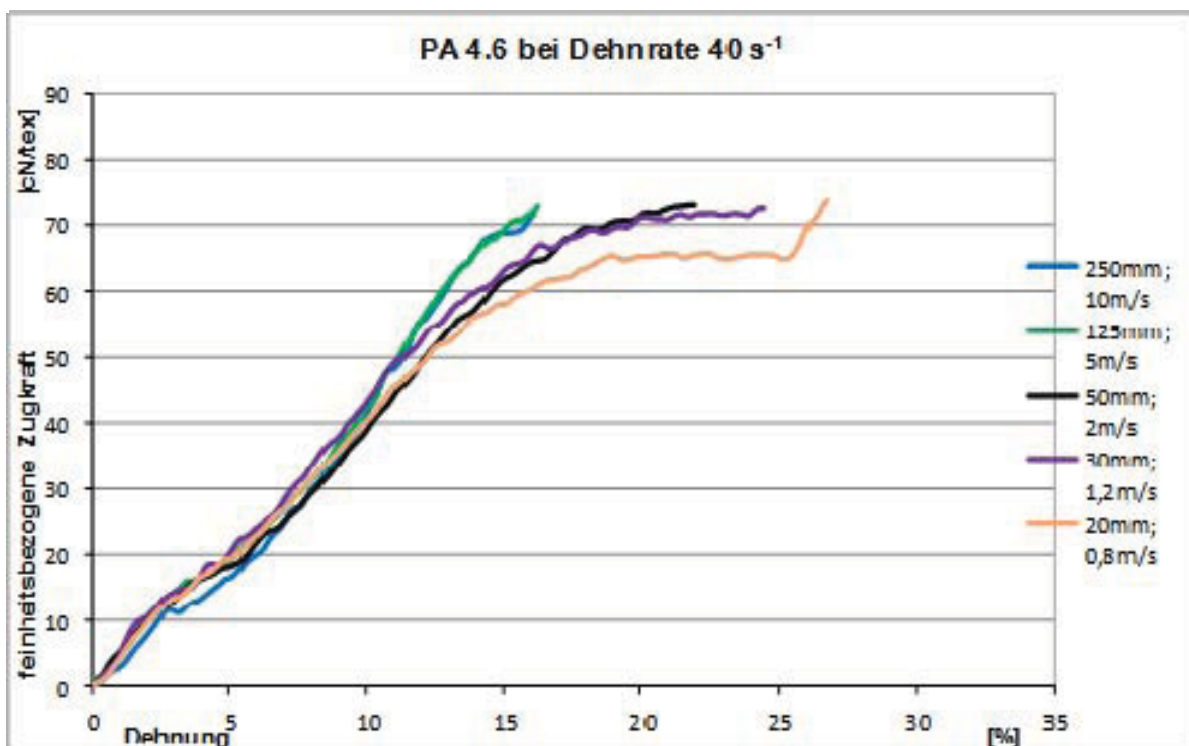
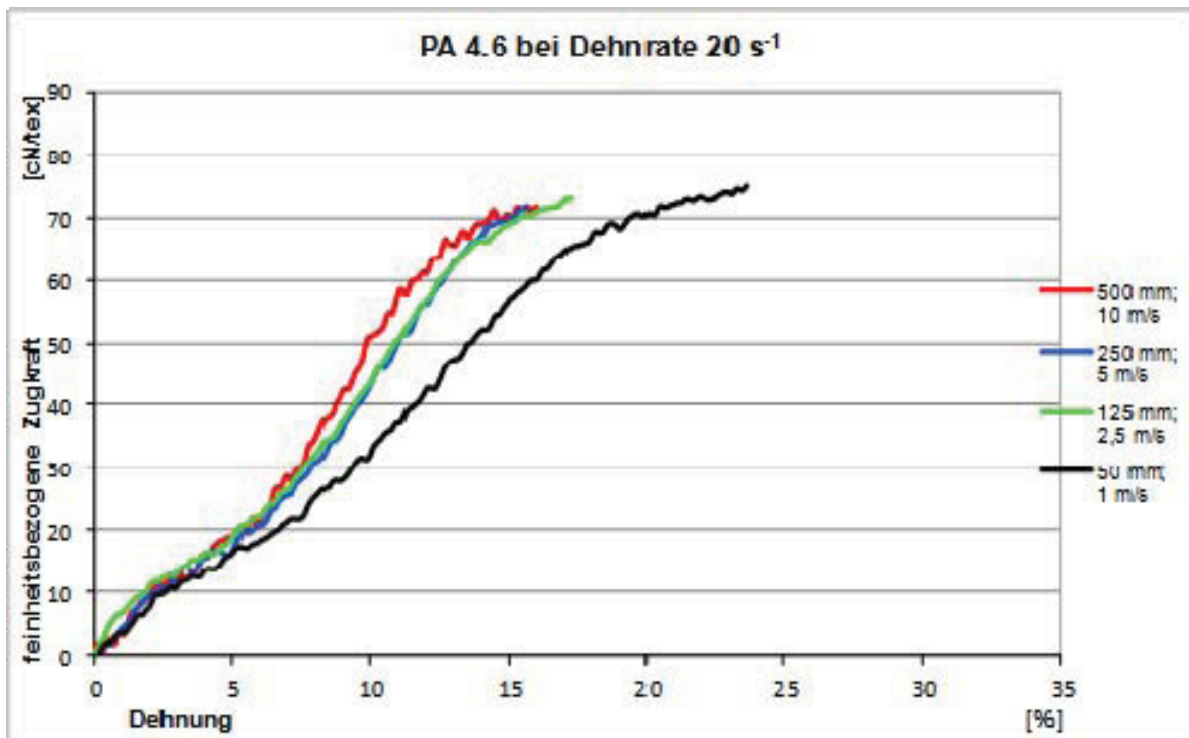


Abbildung 102: PA 4.6 940 dtex f140 - Einfluss der Einspannlänge auf die Maximalkraft
(Dehnrate konstant)

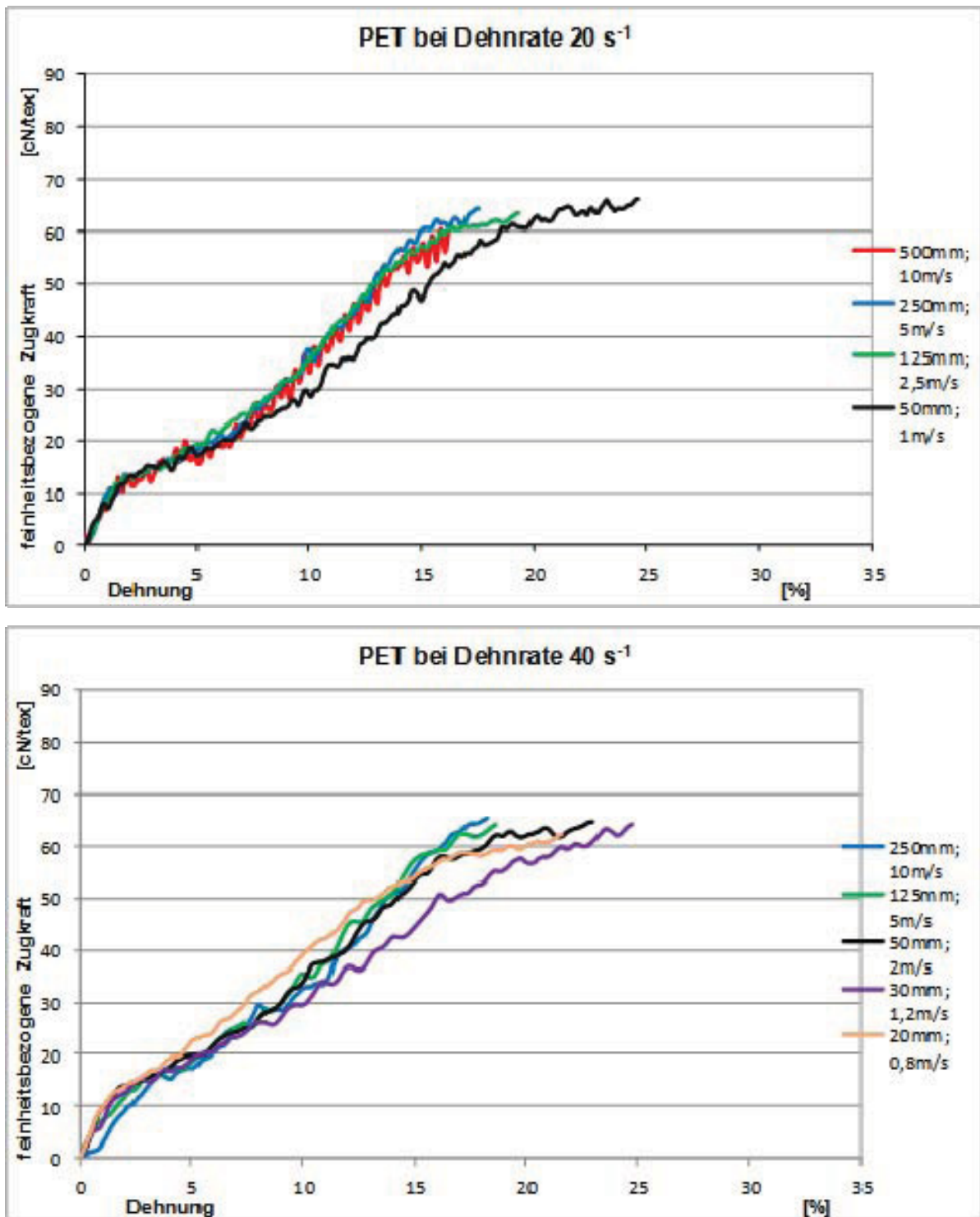


Abbildung 103: PET 550 dtex f 105 - Einfluss der Einspannlänge auf die Maximalkraft
(Dehnrate konstant)

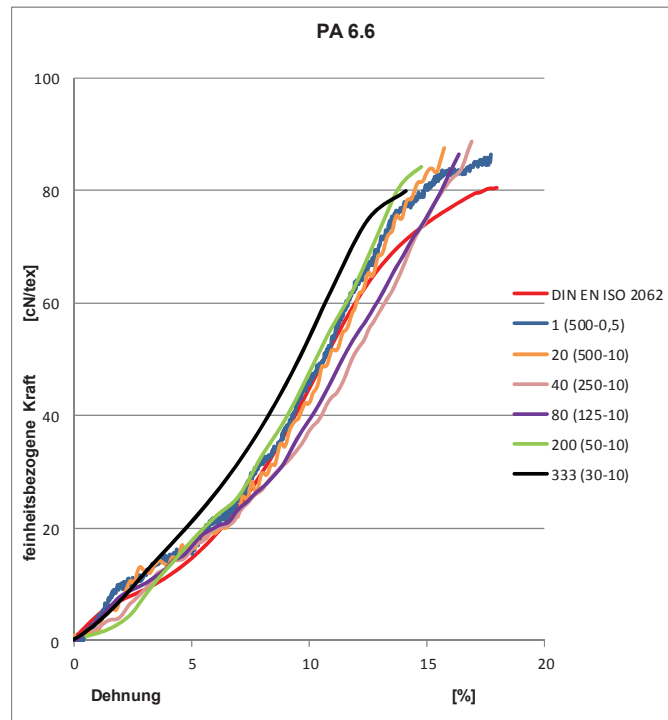


Abbildung 104: PA 6.6 940 dtex f140- Dynamisches Werkstoffverhalten

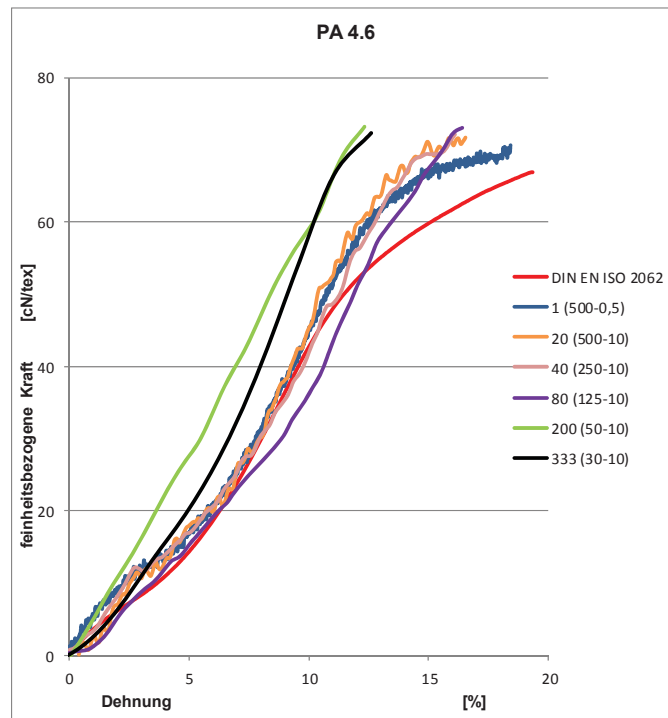


Abbildung 105: PA 4.6 940 dtex f140- Dynamisches Werkstoffverhalten

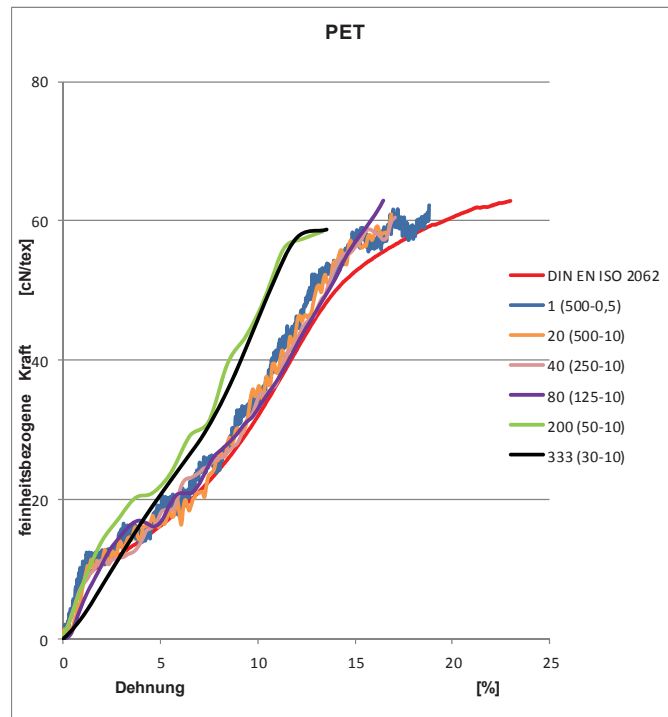


Abbildung 106: PET 550 dtex f105- Dynamisches Werkstoffverhalten

Die aufgezeigten Kurven kennzeichnen das dynamische Werkstoffverhalten dieser Hochleistungsgarne bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten und hohen Dehnraten.

Zusammenfassend kann eingeschätzt werden:

Mit der eingesetzten Prüftechnik ist an der servohydraulischen Prüfmaschine HTM 2008 das dynamische Werkstoffverhalten hochfester Polyamid- und Polyesterfilamentgarne gesichert prüfbar. Die begrenzenden technologischen Einstellparameter sind definiert mit:

- Prüfgeschwindigkeit 10 m/s
- Maximale Dehnrates 333 s^{-1}
- Minimale Einspannlänge 30 mm.

Auswertung Module

Hierzu wurden jeweils bei 1, 5 und 10 % Dehnung bzw. einer Zugkraft von 3, 15 und 50 N für alle 3 Versuchsgarne die Modulwerte bestimmt und in Abhängigkeit von der Dehnrates aufgetragen. Eine Ausnahme war das PET- Garn, das aufgrund einer geringeren Höchstzugkraft nur bei 3, 15 und 20 N ausgewertet wurde.

Tabelle 16: PA 6.6 940 dtex f 140 Modulwerte bei 1, 5 und 10% Dehnung

Dehnrates [s ⁻¹]	1%		5%		10%	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	347,8	365,7	348,4	366,3	768,4	808,0
1	450,9	474,2	374,7	394,0	740,8	778,9
20	373,9	393,1	321,3	337,9	755,8	794,7
80	354,0	372,2	305,8	321,6	703,5	739,7
160	496,3	521,9	511,1	537,5	843,6	887,1
200	423,4	445,2	440,2	462,9	767,2	806,7
333	360,0	378,6	475,6	500,1	813,0	854,9

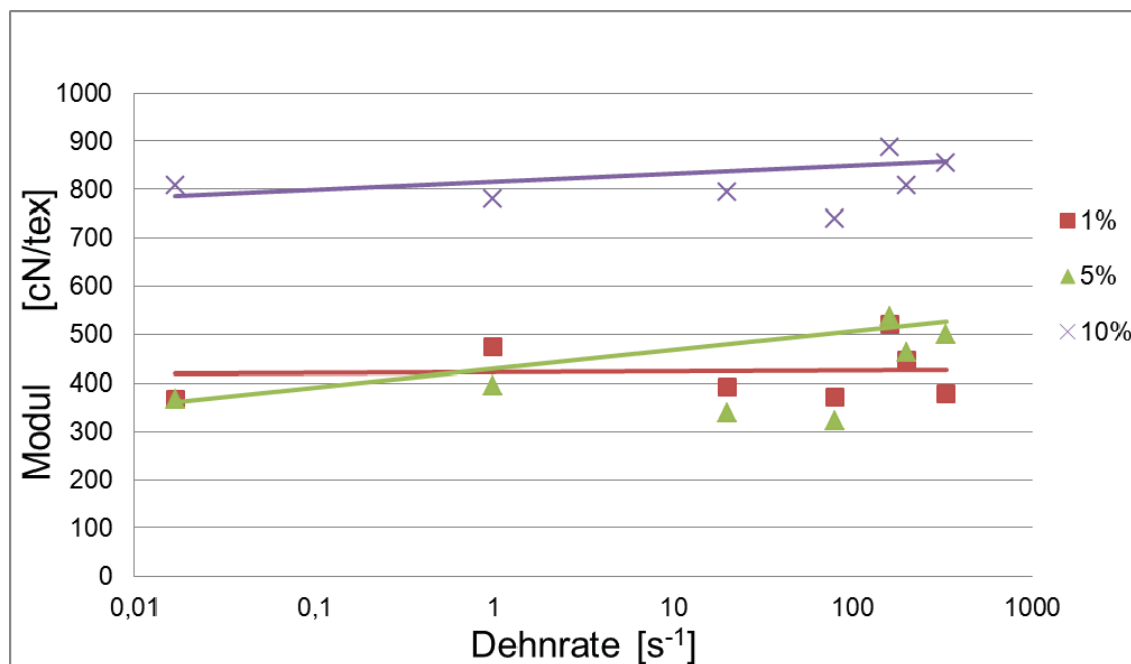

Abbildung 107: PA 6.6 940 dtex f 140- Auswertung Module 1, 5 und 10% Dehnung

Tabelle 17: PA 6.6 940 dtex f 140 Modulwerte bei 3, 15 und 50 N

Dehnrate [s ⁻¹]	3N		15 N		50N	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	384,5	404,4	364,5	383,2	737,2	775,2
1	446,0	469,0	321,8	338,3	843,3	886,8
20	318,3	334,6	342,1	359,7	762,0	801,2
80	310,4	326,4	408,2	429,2	713,6	750,3
160	451,9	475,2	526,2	553,3	833,5	876,4
200	365,6	384,4	488,5	513,7	749,7	788,3
333	360,9	379,5	463,4	487,2	794,9	835,9

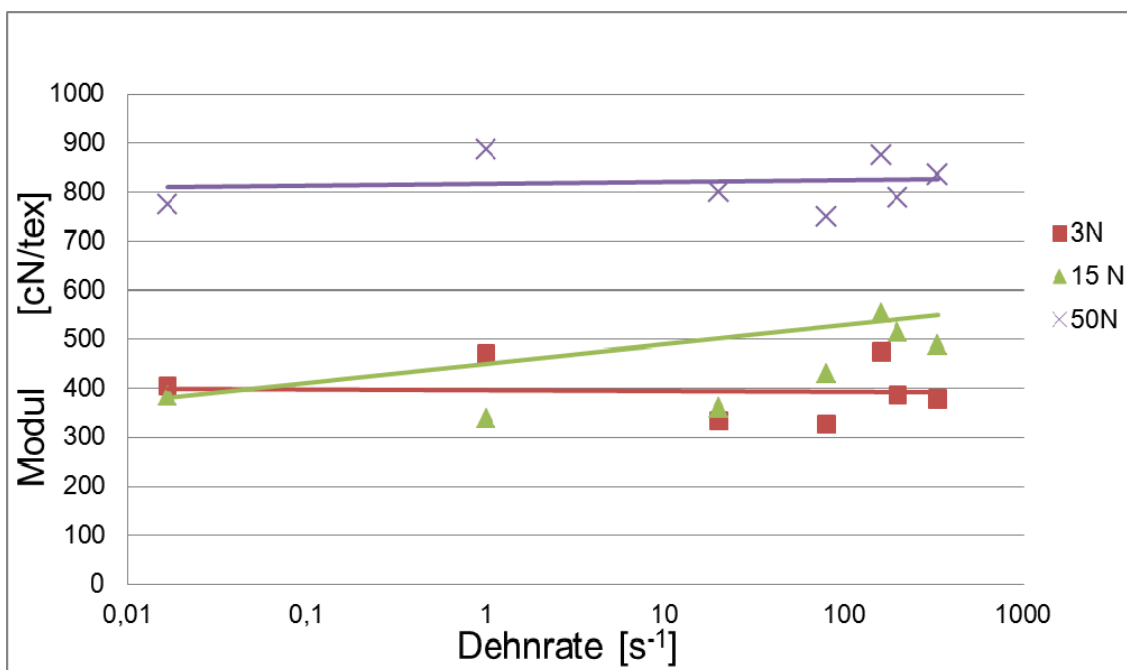

Abbildung 108: PA 6.6 940 dtex f 140- Auswertung Module bei 3, 15 und 50 N
Zugkraft

Tabelle 18: PA 4.6 940 dtex f 140 Modulwerte bei 1, 5 und 10% Dehnung

Dehnrate [s ⁻¹]	1%		5%		10%	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	278,4	291,2	370,2	387,2	569,6	595,8
1	430,0	449,8	373,8	391,0	679,0	710,3
20	276,6	289,3	341,1	356,8	700,8	733,1
80	292,7	306,2	348,5	364,5	580,6	607,3
160	460,9	482,1	554,1	579,6	650,9	680,9
200	386,8	404,6	490,1	512,6	748,2	782,7
333	269,6	282,1	445,9	466,4	697,5	729,6

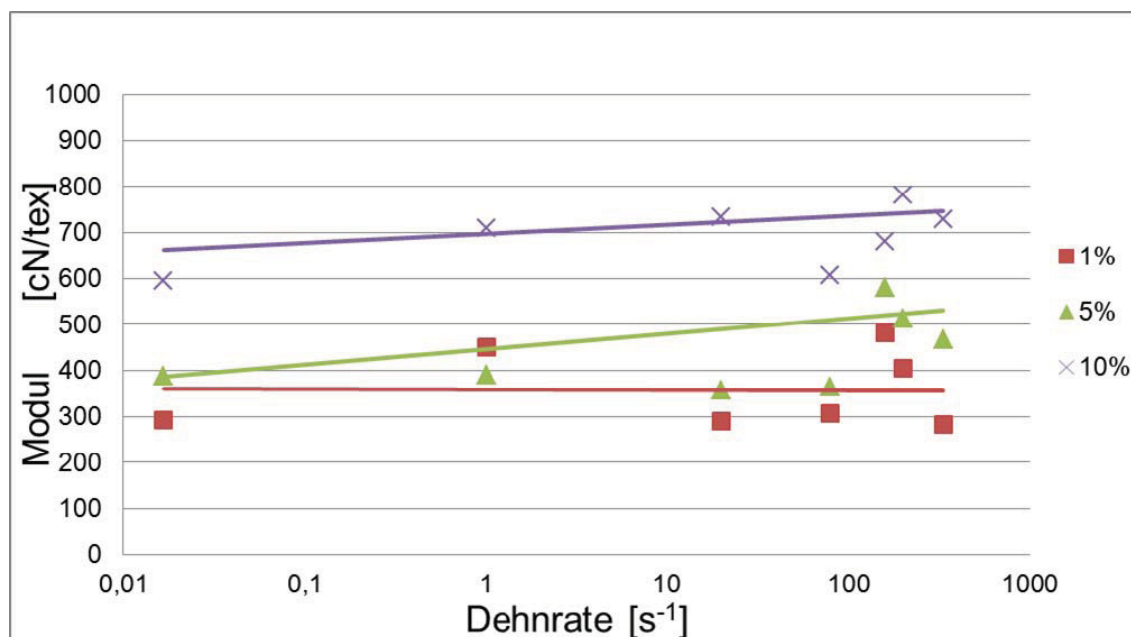

Abbildung 109: PA 6.6 940 dtex f 140- Auswertung Module bei 1, 5 und 10% Dehnung

Tabelle 19: PA 4.6 940 dtex f 140 Modulwerte bei 3, 15 und 50N Zugkraft

Dehnrate [s ⁻¹]	3N		15 N		50N	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	292,1	305,6	404,0	422,6	308,0	322,2
1	368,0	384,9	259,6	271,5	612,1	640,3
20	288,1	301,4	403,6	422,2	661,4	691,8
80	359,6	376,2	353,1	369,4	640,4	669,9
160	443,4	463,8	334,1	349,5	791,1	827,5
200	422,9	442,4	442,7	463,1	735,1	768,9
333	352,7	368,9	432,9	452,9	706,4	738,9

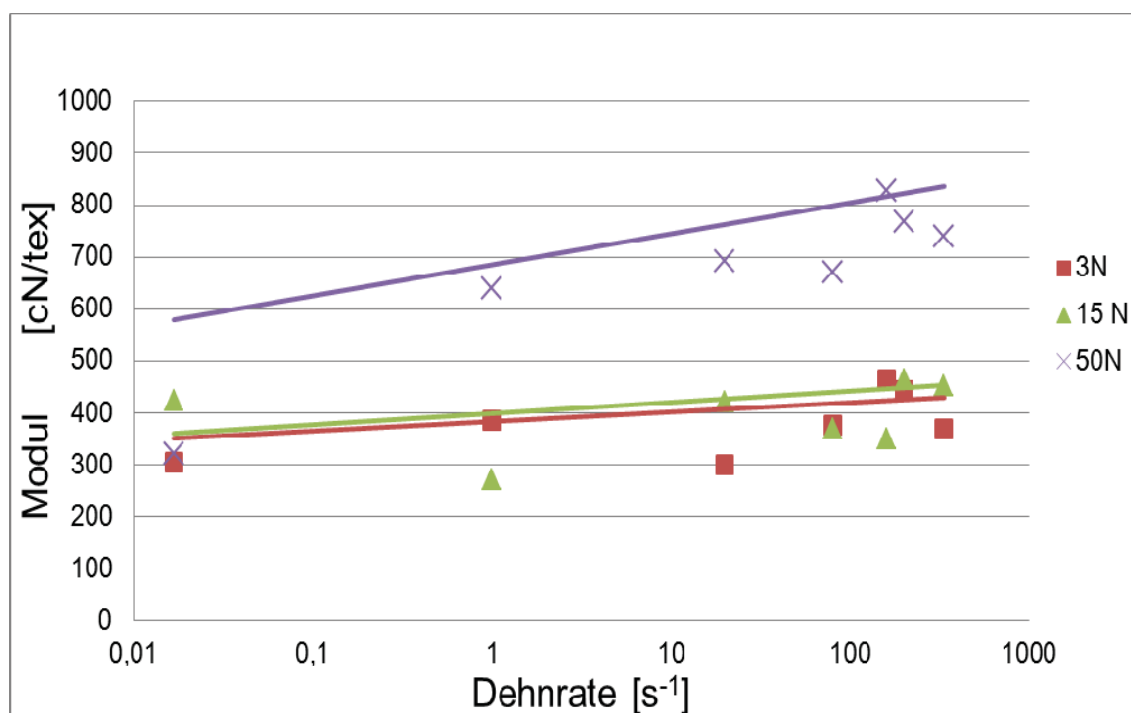

Abbildung 110: PA 4.6 940 dtex f 140- Auswertung Module bei 3, 15 und 50 N

Tabelle 20: PET 550 dtex f 104 Modulwerte bei 1, 5 und 10% Dehnung

Dehnrates [s ⁻¹]	1%		5%		10%	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	283,4	505,2	107,5	191,7	230,9	411,6
1	269,1	479,7	147,8	263,4	290,6	518,1
20	334,9	597,0	123,4	220,0	251,0	447,4
80	348,0	620,3	146,4	260,9	242,9	433,0
160	384,8	685,9	234,9	418,8	313,4	558,6
200	377,0	671,9	165,2	294,5	342,8	611,0
333	275,7	491,4	201,7	359,6	306,2	545,9

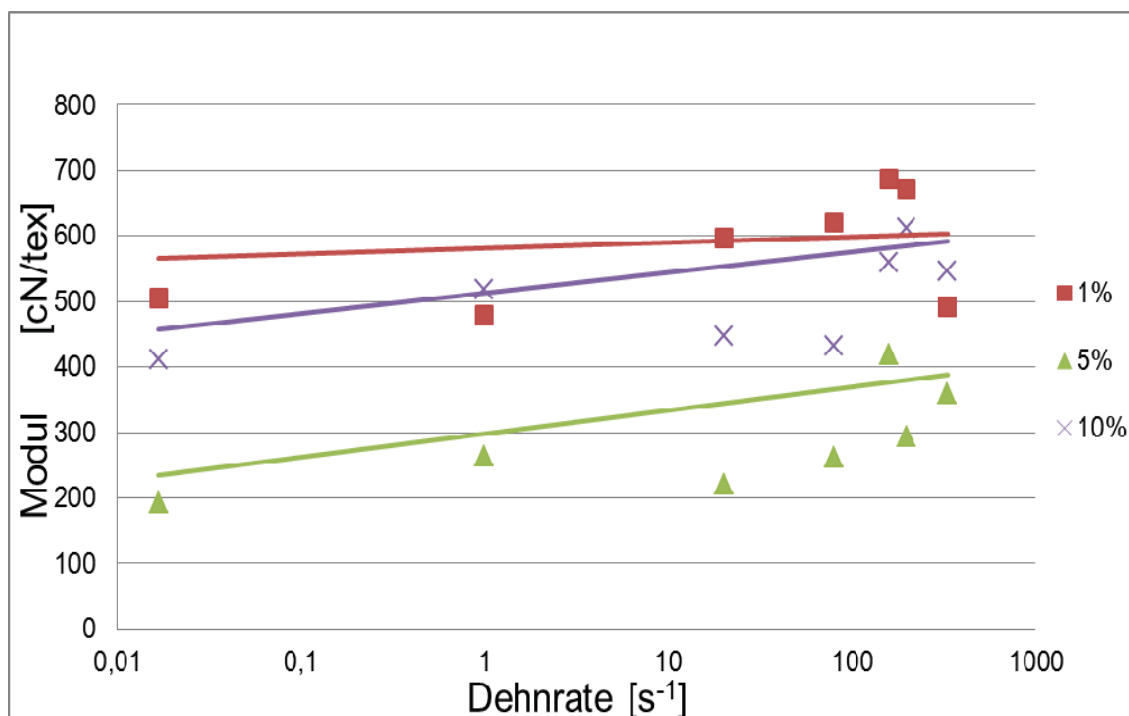
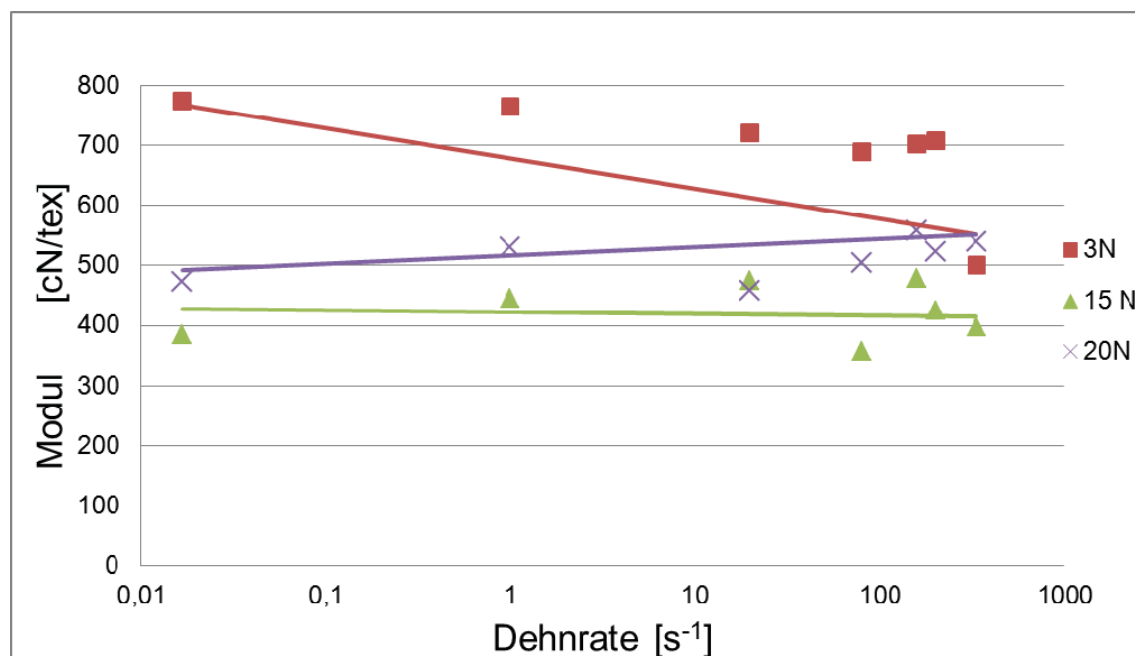

Abbildung 111: PET 550 dtex f 105- Auswertung Module bei 1, 5 und 10% Dehnung

Tabelle 21: PET 550 dtex f 105- Modulwerte bei 3, 15 und 20N Zugkraft

Dehnrade [s ⁻¹]	3N		15 N		20N	
	N	cN/tex	N	cN/tex	N	cN/tex
0,0167	433,8	773,3	215,8	384,7	265,1	472,5
1	428,7	764,1	250,3	446,1	297,9	531,0
20	404,0	720,1	266,9	475,7	257,4	458,9
80	386,9	689,7	200,0	356,5	282,7	504,0
160	394,1	702,5	268,5	478,5	313,1	558,1
200	396,7	707,1	238,6	425,3	293,8	523,7
333	280,9	500,7	223,2	397,9	302,8	539,8


Abbildung 112: PET 550 dtex f 104 - Auswertung Module bei 3, 15 und 20N Zugkraft

Die Ergebnisse für die 3 Versuchsspulen sind in Tabelle 16 bis Tabelle 21 und Abbildung 107 bis

Abbildung 112 dargestellt.

Trotz teils großer Messschwankungen von 10 bis 20 % ist festzuhalten, dass die Modulwerte der Polyamidgarne bei Erhöhung der Dehnrates rasch ansteigen. Es werden Werte erreicht, die bis zu 50 % über dem quasi-statischen Verhalten liegen. Abweichend von den Polyamiden nimmt das Anfangsmodul des PET-Garns (d.h. bei kleinen Zugkräften mit entsprechenden Dehnungen unter 1 %) bei Erhöhung der Dehnrates ab. Das gilt ausschließlich im Anfangsbereich der KD-Kurve. Bei höheren Dehnungen zeigt auch das PET-Garn eine Zunahme des Moduls.

5.3.2 Beispielhafte Kraft- Dehnungs-Kurven bei ausgewählten Temperaturen

Abschließende Anmerkungen betreffen den Einfluss der Messtemperatur. Es wurden an allen 3 Versuchsgarnen Prüfungen im Temperaturbereich von -35°C und 60°C durchgeführt. Beispielhafte Kraft - Dehnungskurven bei ausgewählten Messtemperaturen sind in den Abbildung 113 bis Abbildung 115 dargestellt.

Bei niedriger Prüftemperatur (-35°C) zeigt sich bei allen 3 Fadentypen bei gleichzeitig zunehmender Dehnrates eine Zunahme der Höchstzugkraftwerte und Abnahme der Dehnungswerte. Eine Erhöhung der Prüftemperatur führt zu umgekehrten Kraft- Dehnungs-Trends. Ein vergleichbares Verhalten wird nach aktuellen Messungen des DTNW auch bereits beim quasi-statischen Messen bei $0,0167 \text{ s}^{-1}$ beobachtet.

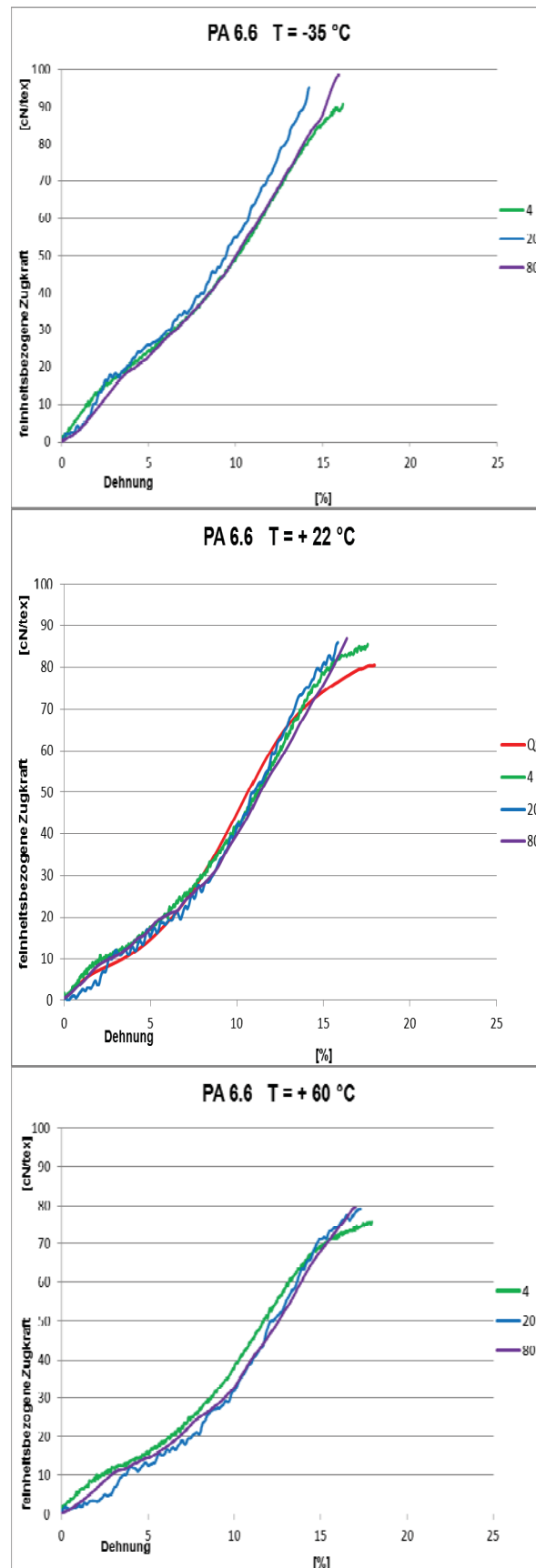


Abbildung 113: PA 6.6 940 dtex f 140 – Dynamische Zugversuche bei ausgewählten Temperaturen und Dehnraten

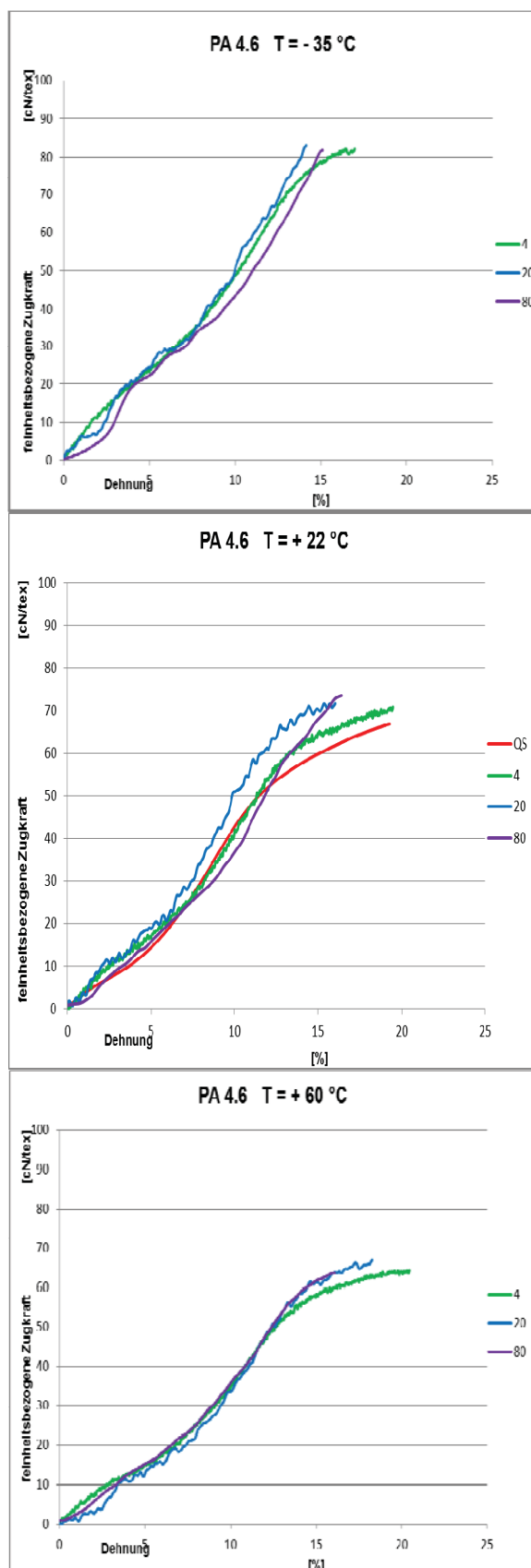


Abbildung 114: PA 4.6 940 dtex f 140 – Dynamische Zugversuche bei ausgewählten Temperaturen und Dehnraten

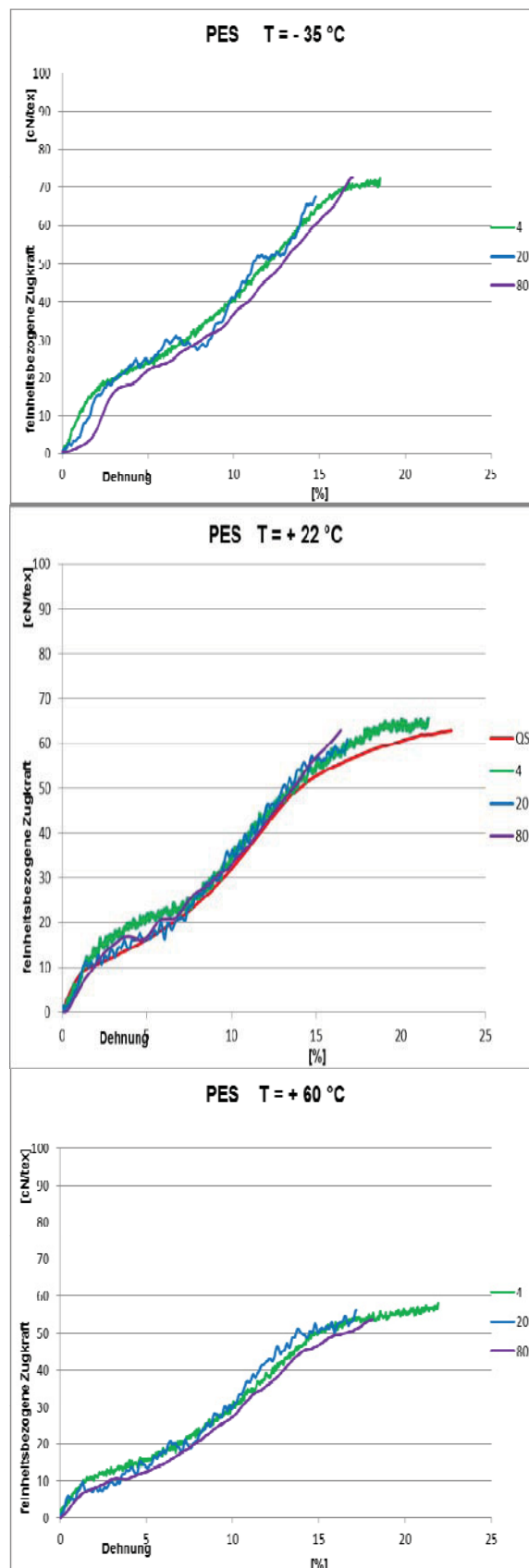


Abbildung 115: PET 550 dtex f 105 – Dynamische Zugversuche bei ausgewählten Temperaturen und Dehnraten

5.3.3 Versagensmechanismen

Fadenbruchstatistik

Nach [8] ist zu vermuten, dass auf Grund der Art des Spannungsaufbaus in der Probe, mit steigender Dehnrate der Bruch immer wahrscheinlicher in der Nähe der Abzugselemente eintritt.

Bei allen Messreihen wurden die Fadenbruchstellen statistisch erfasst und bewertet. Es wurden die Fadenbrüche in der Mitte, oben und unten sowie der Gesamtanteil der Klemmenbrüche ermittelt. In der Abbildung 116 sind die Statistiken graphisch dargestellt.

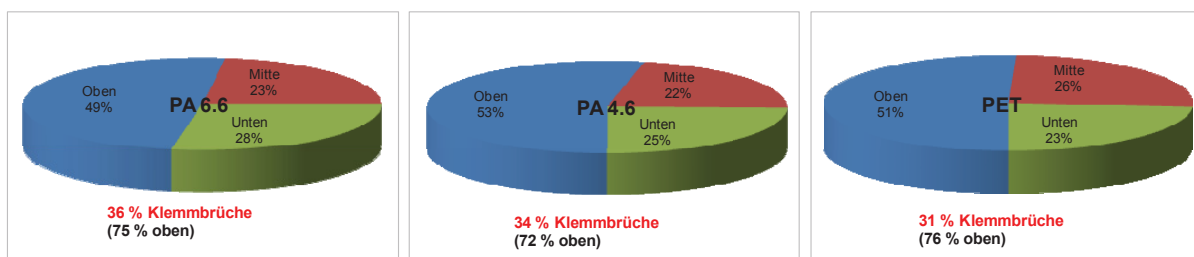


Abbildung 116: Fadenbruchstatistik bei den dynamischen Prüfungen - Vergleich der 3 Versuchsgarne

Die durch die statistischen Untersuchungen gelieferten Ergebnisse weisen darauf hin, dass bei allen 3 Versuchsgarnen die Fadenbrüche nur zwischen 20 % bis 25 % in der Einspannlängenmitte liegen. Alle anderen Brüche konzentrieren sich in der Nähe der Klemmen; wobei ca. 50 % an der oberen Klemme auftreten. Bei 30 bis 35 % aller Brüche handelt es sich um Klemmenbrüche, wovon ca. 75% in der oberen ziehenden Klemme auftraten.

Mit der Erhöhung der Dehnrate (Verkleinerung der Einspannlänge und Vergrößerung der Prüfgeschwindigkeit) nimmt die Häufigkeit von Klemmenbrüche zu. Es deutet darauf hin, dass sich mit Vergrößerung der Dehnrate auch die Wahrscheinlichkeit dass die Probenbruch in der Nähe der Abzugsklemmen eintritt vergrößert.

REM- Untersuchungen

REM-Untersuchungen der Faserbruchenden zeigen gegenüber den Messungen des DTNW markante Unterschiede (vgl. auch Abschnitt 3.3); die Proben aus den Messungen des DTNW weisen trotz nominell gleicher Dehnraten Schmelzzonen auf, die vom TITK nicht beobachtet werden. Ausgewählte Fadenbruchenden bei prägnanten Dehnratenunterschieden zeigen Abbildung 117 bis Abbildung 119. Es wird jeweils das zusammengehörige obere und untere Fadenbruchende abgebildet.

Lediglich bei der Polyestertype sind in der Längsrichtung bei der höchsten Dehnrates stärkere Aufsplitterungen zu sehen. Hier sollten weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden, die jedoch nicht ursächlich Bestandteil des Projektes sind.

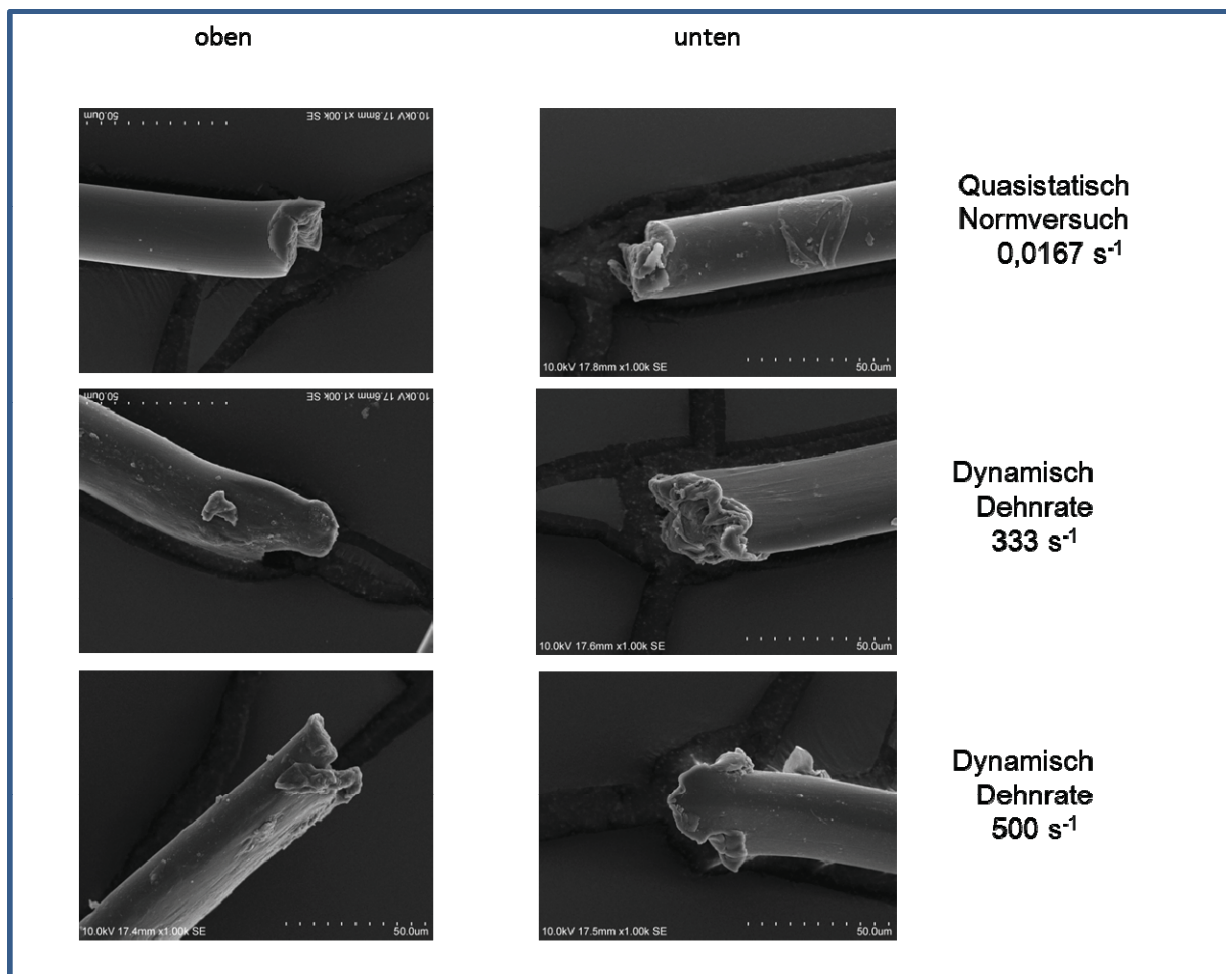


Abbildung 117: PA 6.6 940 dtex f 140 - REM-Untersuchungen bei ausgewählten Dehnrates

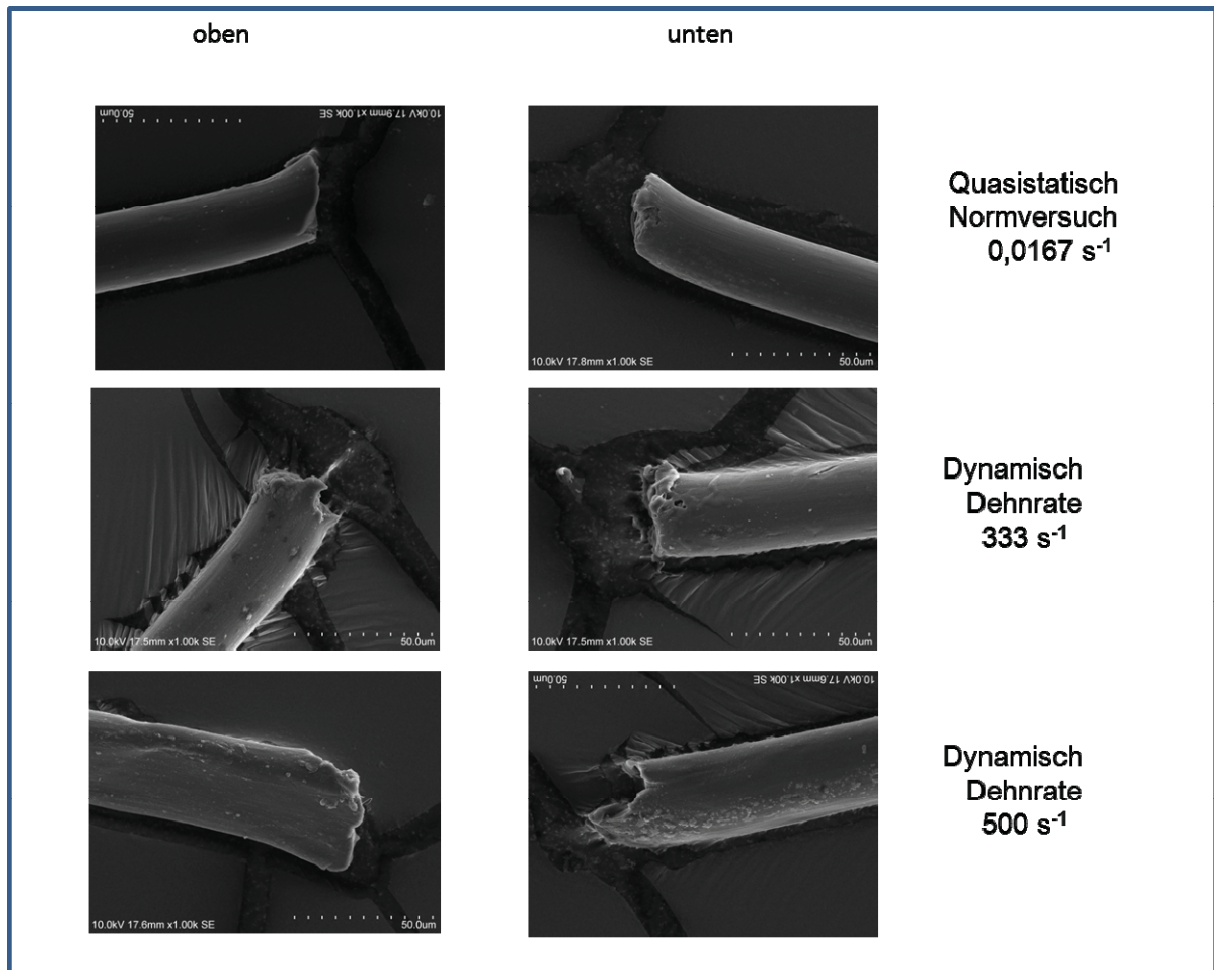


Abbildung 118: PA 4.6 940 dtex f 140 - REM-Untersuchungen bei ausgewählten Dehnrates

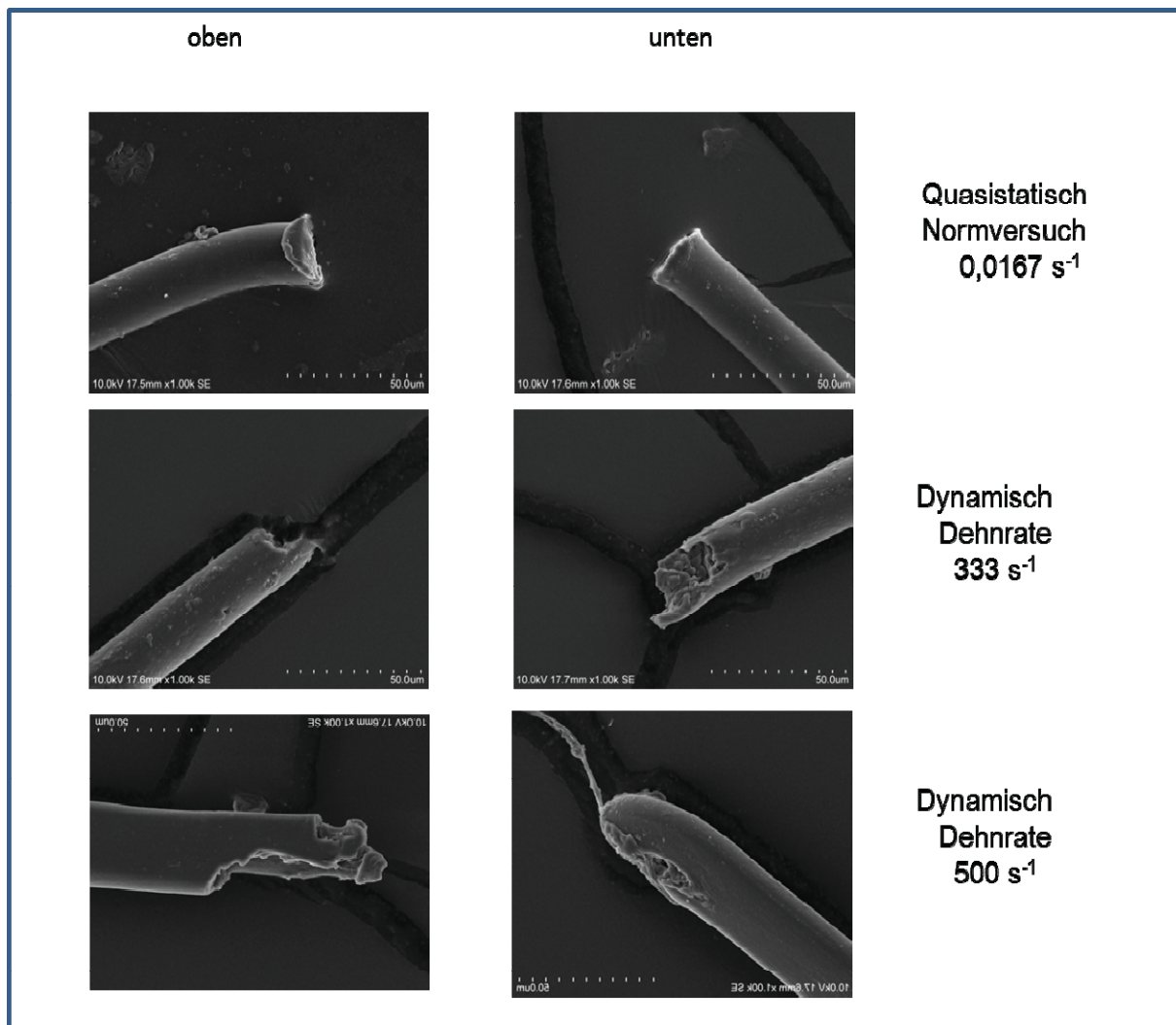


Abbildung 119: PET 550 dtex f 104 - REM-Untersuchungen bei ausgewählten Dehnrates

6 Ergebnisvergleich

Für einen abschließenden Vergleich der Ergebnisse der drei Messverfahren wurden in Absprache mit dem Projektbegleitenden Ausschuss 3 Standardfadenmaterialien aus Tabelle 2 (vgl. Abschnitt 2) ausgewählt. Dies waren:

- Garn E: PA6.6 940 dtex f 140
- Garn G: PA4.6 940 dtex f 140
- Garn H: PET 550 dtex f 105

Innerhalb des jeweiligen nutzbaren Variationsbereichs der Dehngeschwindigkeiten wurden Kraft-Dehn-Kurven aufgezeichnet und an neuralgischen Punkten ausgewertet. Zur Charakterisierung der Veränderung des mechanischen Verhaltens bei Erhöhung der Dehnrate wurden aus allen KD-Kurven die „lokalen“ Module bei Dehnungen 1, 5 und 10 % bzw. bei Zugkräften 3, 15 und 50 N² bestimmt. Während die Angabe des Moduls bei bestimmten Dehnungen die konstruktive Auslegung des technischen Textils bei bestimmten geometrischen Verformungen erlaubt – z.B. das Entfaltens des Airbags – kann die Angabe des Moduls bei bestimmten Zugkräften Auskunft über das Verhalten technischer Textilien im Einbauzustand geben – z.B. vorgespannte Bänder, Gurte o.ä.

Entsprechende, am Fallgewichtsprüfstand des DTNW bzw. der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine des TITK ermittelte Daten sind nachfolgend zusammengestellt (Abbildung 120 bis Abbildung 125). Hierbei sind die an den verschiedenen Prüfeinrichtungen bestimmten Daten in jeweils einer Graphik gegenübergestellt. Im Fall des Garns G sind ebenfalls Daten des Rotationsprüfstands des ITV wiedergegeben³.

Die in die Graphen eingezeichneten Linien verdeutlichen den *Trend* der gemessenen Module; sie sind *nicht* als mathematischer Fit zu verstehen. Hierbei ist auch die große Schwankung der Daten zu berücksichtigen, die insbesondere beim Fallgewichtsprüfstand (vgl. Abbildung 120) trotz Weglassens der Messungen bei lediglich 20 mm Einspannlänge sowie bei Rotationsprüfstand beobachtet werden.

² Eine Ausnahme bildete das Garn H, dessen Höchstzugkraft bei ca. 35 cN liegt. Hier wurde das Modul bei 20 cN ermittelt.

³ Anmerkung: Die Auswertung der vorliegenden Kraft-Dehn-Messungen am Rotationsprüfstand dauert noch an und wird in einer späteren Publikation detailliert ausgeführt.

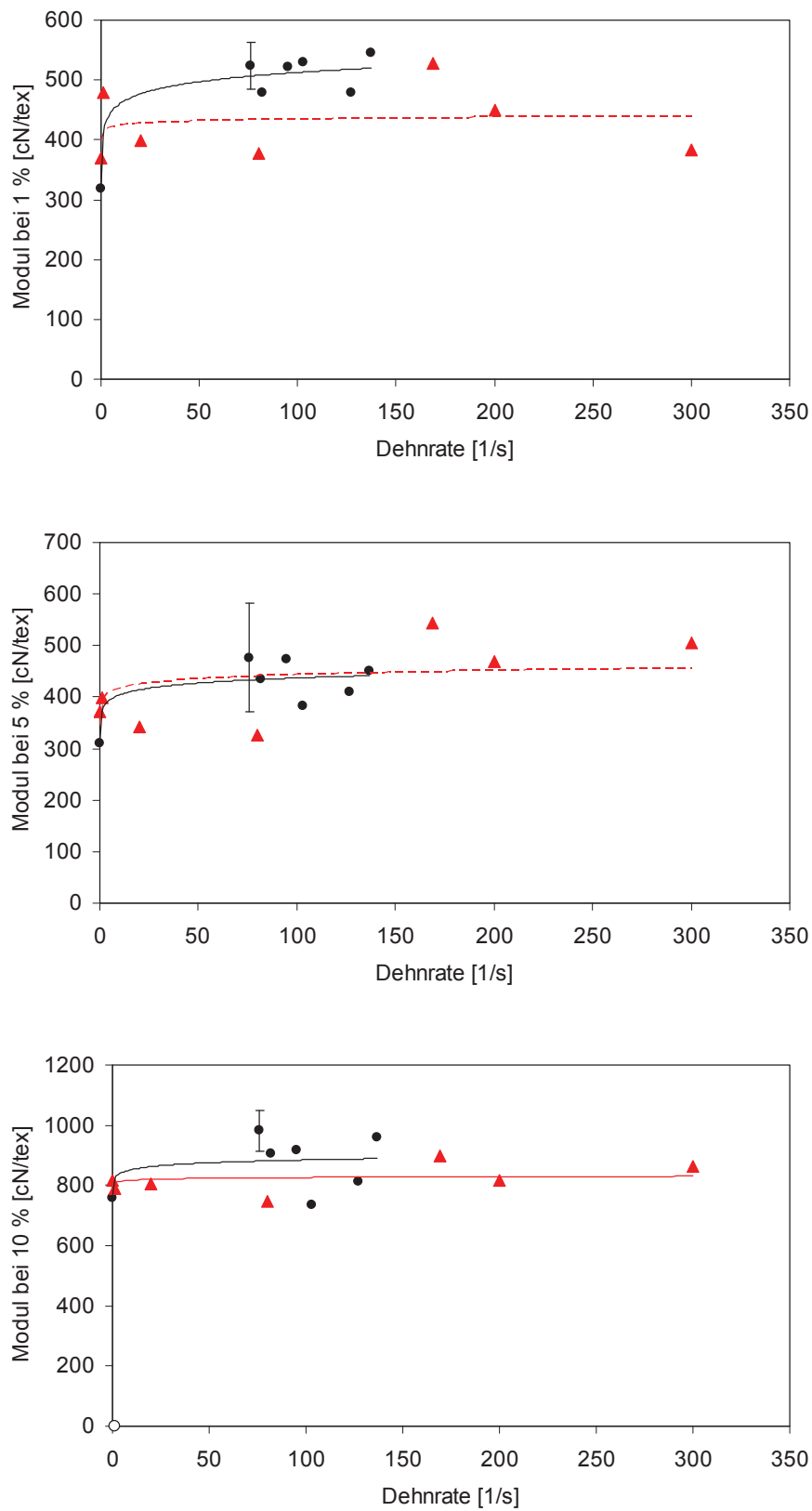


Abbildung 120: Modulwerte des Garns E bei 1, 5 und 10 % Dehnung; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

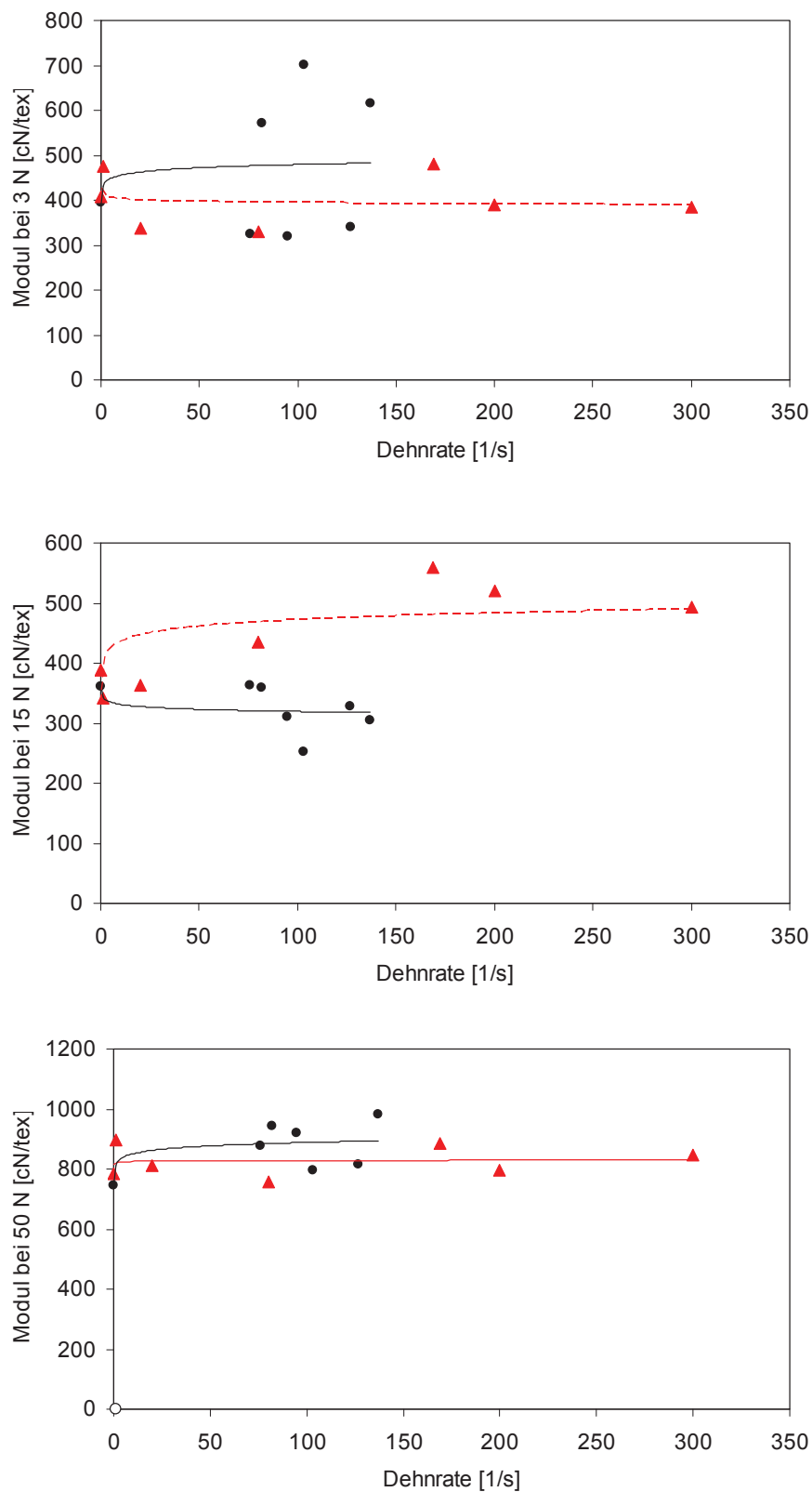


Abbildung 121: Modulwerte des Garns E bei 3, 15 und 50 N Zugkraft; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

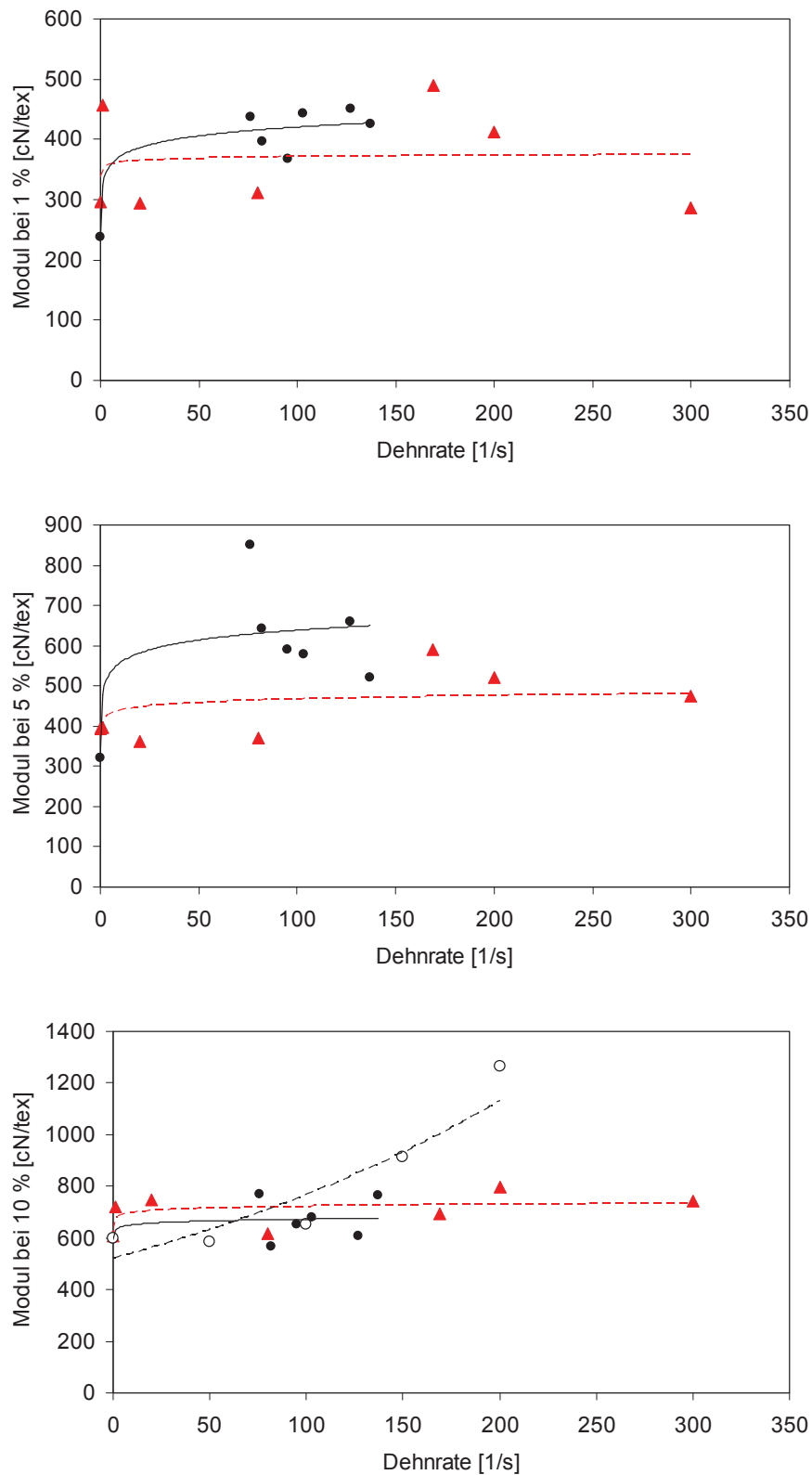


Abbildung 122: Modulwerte des Garns G bei 1, 5 und 10 % Dehnung; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (O) Messung mit dem Rotationsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

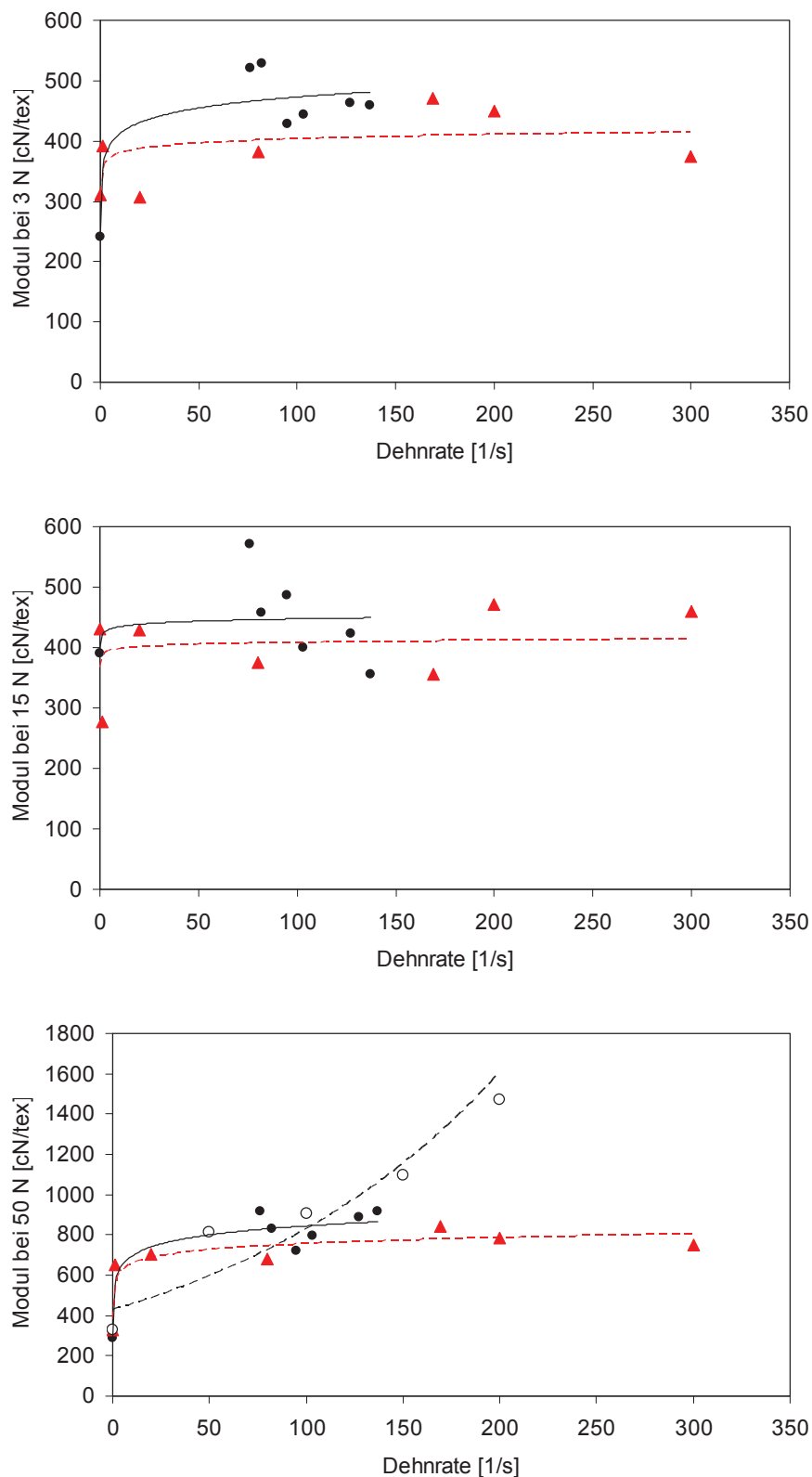


Abbildung 123: Modulwerte des Garns G bei 3, 15 und 50 N Zugkraft; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (O) Messung mit dem Rotationsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

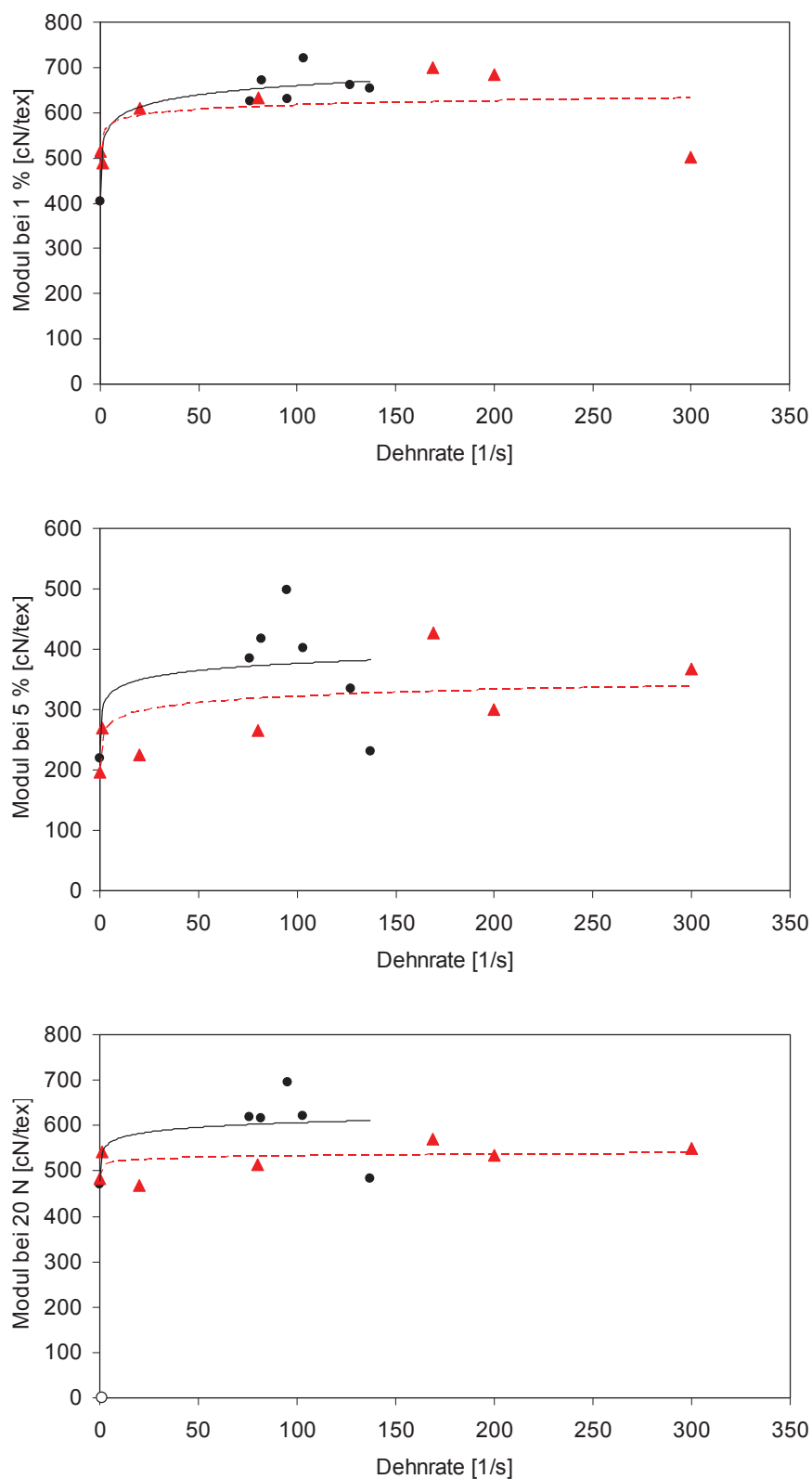


Abbildung 124: Modulwerte des Garns H bei 1, 5 und 10 % Dehnung; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

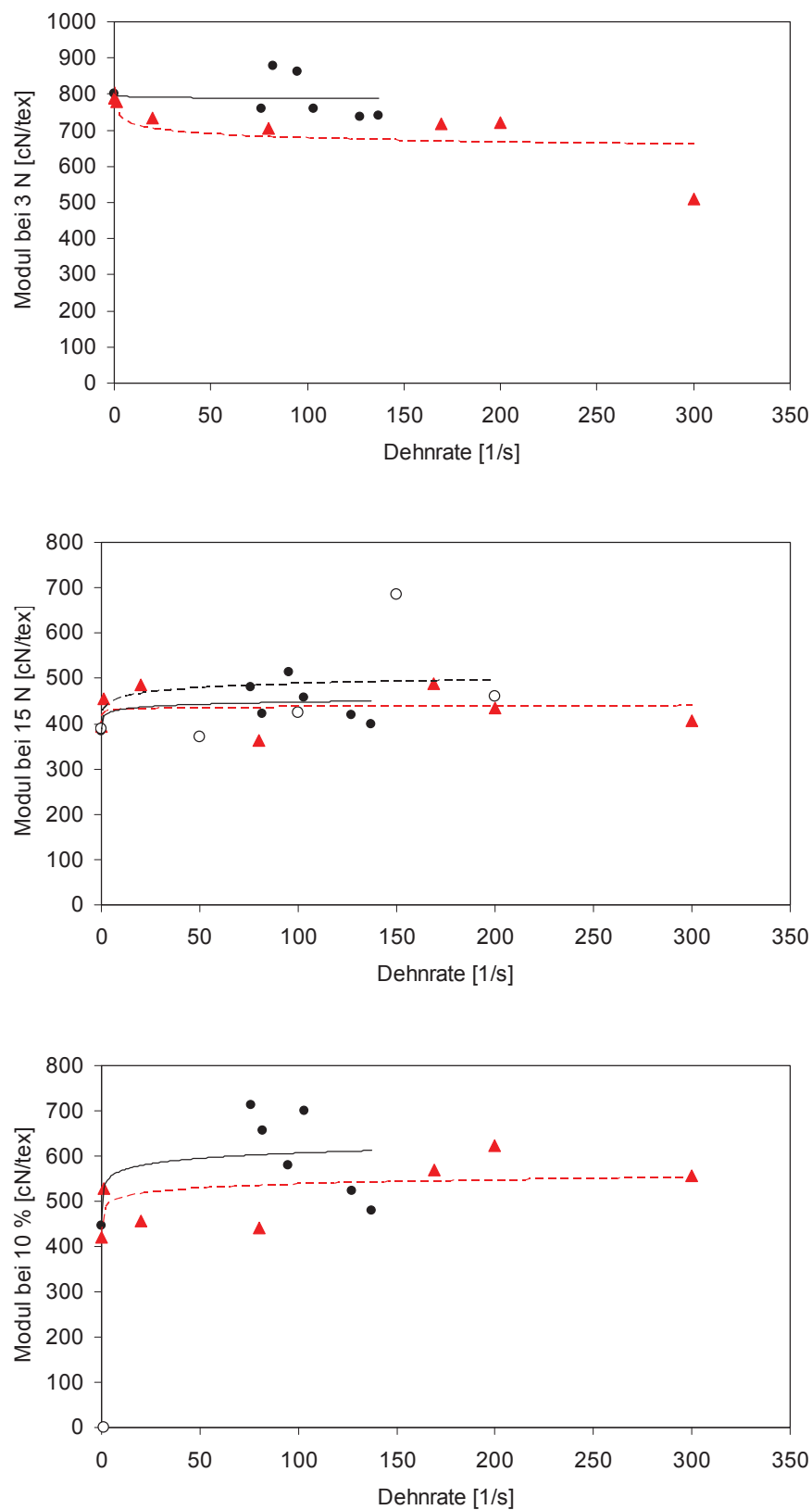


Abbildung 125: Modulwerte des Garns H bei 3, 15 und 20 N Zugkraft; (•) Messung mit dem Fallgewichtsprüfstand, (▲) Messung mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

Dennoch ist die von Fallgewichtsprüfstand bzw. Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine bestimmte Entwicklung der Module mit der Dehnrates vergleichbar, in Beispielen übereinstimmend. Die Graphen verdeutlichen, dass beide Verfahren in den meisten Fällen eine Steigerung des Moduls mit der Dehnrates vorhersagen, die einem logarithmischen Trend folgt. Die „lokalen“ Module übersteigen den quasi-statischen Wert um bis zu 50 %. Die mit Hilfe des Rotationsprüfstands ermittelten Module des Garns G (bestimmt bei 10 % Dehnung bzw. einer Zugkraft von 50 N) folgen dagegen einem potentiell ansteigenden Verlauf.

Zum Verhalten der unterschiedlichen Garne kann zusammengefasst werden:

- Das PA 6.6-Garn E zeigt insbesondere im Anfangsbereich der Kraft-Dehn-Kurve bei Dehnungen ≤ 1 % eine große Dynamik mit Steigerung der Dehnrates; in den Bereichen höherer Dehnungen bzw. Zugkräfte ist die Modulerhöhung weniger ausgeprägt.
- Das PA 4.6-Garn G zeigt in allen Bereichen der Kraft-Dehn-Kurve einer Erhöhung des Moduls mit der Dehnrates.
- Das PET-Garn H weist eine Modulsteigerung vor allem im Bereich mittlerer und höherer Dehnungen auf. Im Gegensatz zu den Polyamidtypen deuten die Messungen mit dem Fallgewichtsprüfstand (FS 1) und der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine (FS 3) übereinstimmend auf eine Abnahme des Moduls im Anfangsbereich der Kraft-Dehn-Kurve hin (vgl. Abbildung 125, Messung bei 3 N). Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der Darstellung der an der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine gemessenen KD-Kurven in Abbildung 106.

7 Wertende Zusammenfassung

7.1 Gegenüberstellung der Ergebnisse mit der Zielsetzung des ursprünglichen Forschungsantrags

Vor dem Hintergrund der weiteren Entwicklung von Garnen für den Einsatz in Hochleistungstextilien war es das Ziel des abgeschlossenen Forschungsvorhabens, das viskoelastische Verhalten technischer Garne bei einer Kurzzeitbeanspruchung mit extremen Dehnraten zu untersuchen. Wesentlich hierbei war die Simulation der dynamischen Abläufe in realen Vorgängen, wobei hier speziell an das Entfalten eines Airbags und die hochfrequente Beanspruchung eines Reifencords gedacht war. Als Parameterfeld wurden vor diesem Hintergrund Dehnungsgeschwindigkeiten bis über 250 s^{-1} bei Zimmertemperatur sowie in Extrembereichen von -40 °C und $+80 \text{ °C}$ avisiert.

In den drei Forschungsstellen wurden für diese Untersuchungen ein Fallgewichtsprüfstand, ein Rotationsprüfstand sowie eine (kommerzielle) Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine eingesetzt. Zur Standardisierung wurden die Messungen an 9 technischen Garnen aus PA 6.6, PA 4.6 und PET durchgeführt. Für einen unmittelbaren Vergleich der drei Prüfverfahren wurden hieraus ein PA 6.6 940 dtex f140, ein PA 4.6 940 dtex f140 und ein PET 550 dtex f105 ausgewählt.

Zusammenfassend kann zunächst gesagt werden, dass alle eingesetzten Prüfeinrichtungen Messungen mit den angestrebten Dehnraten realisieren konnten und sinnvolle Kraft-Dehnungsmessungen erlauben. Eine Variation der Messtemperatur ist beim derzeitigen Stand nur an der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine möglich.

Aus diesen Messungen konnte hinsichtlich der Garneigenschaften abgeleitet werden, dass

- Die Höchstzugkraft der Garne von der Dehnrate unabhängig ist,
- die Höchstzugkraftdehnung (Reißdehnung) bei Steigerung der Dehnrate dagegen abnimmt,
- mit der Steigerung der Dehnrate bei allen Garnen eine dynamische Entwicklung des Elastizitätsmoduls beobachtet wird,
- der E-Modul speziell im Anfangsbereich der KD-Kurve zunimmt und schließlich
- die Module bei dynamischer Belastung zum Teil 50 % über den quasi-statischen Werten (gemäß der Messung nach DIN EN ISO 2062) liegen.

Der Einfluss der Messtemperatur auf das mechanische Verhalten der Garne konnte mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine an FS3 nachgewiesen werden. Bei niedriger Prüftemperatur (-35°C) zeigt sich bei allen 3 Fadentypen bei gleichzeitig zunehmender Dehnrates eine Zunahme der Höchstzugkraftwerte und Abnahme der Dehnungswerte. Eine Erhöhung der Prüftemperatur führt zu umgekehrten Kraft- Dehnungs-Trends.

7.2 Auswirkungen auf den wissenschaftlich-technischen Fortschritt

Die systematische Untersuchung der Methodik der drei Prüfeinrichtungen und der jeweiligen physikalischen Hintergründe hat die Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Verfahren aufgezeigt und wesentliche Unterschiede herausgearbeitet.

Es hat sich gezeigt, dass die Verfahren in mehreren Aspekten signifikante Unterschiede zu den jeweils anderen aufweisen. Zu nennen sind hier:

- Variationsbereich der (initialen) Abzugsgeschwindigkeit,
- realisierbare Einspannlängen,
- hieraus resultierende Dehnrates, aber auch
- Verlauf der Abzugsgeschwindigkeit (konstant, dynamisch) und
- Definition der Dehnungsnullpunkts und der Vorspannung.

Diese Erkenntnisse sind für Hersteller technischer Chemiefasern und Textilien, insbesondere solcher, wie z.B. ballistische Materialien, Reifencord oder Airbags, die Kurzzeitbeanspruchungen mit extrem hohen Dehnrates unterliegen, von hoher Bedeutung. Der Vergleich der Prüfverfahren gibt der Industrie entscheidende Hinweise für die geeignete Vorgehensweise bei der weiteren Materialprüfung aber auch Produktentwicklung an die Hand.

Die untersuchten Prüfverfahren konnten bisher nicht verfügbare Daten liefern, die für Hersteller von Chemiefasern, technischer Textilien und für die weiterverarbeitende Industrie von entscheidender Bedeutung sind. Sie stellen die Grundlagen für neue bzw. verbesserte Hochleistungsprodukte speziell für sicherheitsrelevante Bereiche dar; genannt sei hier nur der Einsatz in Airbags.

Dabei ist die Kenntnis der Dehnratesabhängigkeit der Elastizitätsmodule von zentraler Bedeutung. Diese drückt sich summarisch in einer Abnahme der Reißdehnung der Garne

aus, entsprechend nehmen die Module im gesamten Verlauf der KD-Kurve zu. Für alle untersuchten Faserpolymere zeigt sich dabei ein logarithmischer Trend, wobei die Module bei hohen Dehnraten zum Teil 50 % über den quasi-statisch gemessenen Werten liegen. Die Messungen haben gezeigt, dass die Dynamik der Module im Anfangsbereich der KD-Kurven bei Dehnungen um 1 % besonders ausgeprägt ist.

Eine orientierende Untersuchung der durch rasterelektronenmikroskopische Analyse der Enden der gerissenen Fasern hat gezeigt, dass die gerissenen Faserenden typische Einschnürungen (Neckbildung) und Schmelzbereiche aufweisen. Die Daten liefern somit Hinweise auf Versagensmechanismen, die charakteristisch für die extrem Belastungskonditionen sind und von denen des quasi-statischen Belastungsversuches nach DIN EN ISO 2062 abweichen.

Die eingesetzten Methoden liefern in guter Näherung vergleichbare Daten und Trends, so dass hier keine Wertung des methodischen Ansatzes getroffen werden kann. Im speziellen Anwendungsfall des zu untersuchenden Produktes (Halbzeugs) können die erarbeiteten Kenntnisse aber Hinweise auf die geeignete Methodik liefern, die die realen Gegebenheiten am besten simuliert.

7.3 Nutzen der Ergebnisse für kleine und mittlere Unternehmen

Die angestrebten Ergebnisse sind für Hersteller technischer Chemiefasern und Textilien, insbesondere solcher, wie z.B. ballistische Materialien, Reifencord oder Airbags, die Kurzzeitbeanspruchungen mit extrem hohen Dehnraten unterliegen, von hoher Bedeutung. Sie unterstützen die Entwicklung, Herstellung und Nachbearbeitung entsprechender Hochleistungsprodukte. Sicherheitstextilien sind im Beanspruchungsfall oftmals außerordentlich hohen Dehnraten ausgesetzt. Hierzu zählen ballistische oder auch extreme Stoßbeanspruchungen ebenso wie die im vorliegenden Projekt im Fokus stehende Kurzzeitbeanspruchung bei der Entfaltung eines Airbags. Kennzeichnend sind hier Dehngeschwindigkeiten bis zu 25.000 %/s bei Dehnungen teilweise bis über 25 %. Wenngleich seit langem bekannt ist, dass sich das Materialverhalten unter derartigen Bedingungen vom quasi-statischen Verhalten bei DIN-gerechten Prüfungen (Dehngeschwindigkeit 1,7 %/s) unterscheidet, war der Kenntnisstand hinsichtlich konkreter Daten lückenhaft.

Die Prüftechnik stellt unter derart extremen Bedingungen eine große methodische Herausforderung dar. Zentraler Punkt des abgeschlossenen Projektes war die Darstellung dreier alternativer Prüfverfahren, die teilweise völlig neue Ansätze verfolgten. Der vergleichende Einsatz sollte der Industrie entscheidende Hinweise für die geeignete Vorgehensweise bei der weiteren Materialprüfung aber auch Produktentwicklung an die Hand geben.

7.4 Beabsichtigte Umsetzung der angestrebten Forschungsergebnisse

Die Verbreitung der Projektergebnisse macht sich unterschiedliche Wege zunutze:

Direkte Multiplikatoren sind die bereits in die Projektaktivitäten eingebundenen und am Projektbegleitenden Ausschuss beteiligten Unternehmen, der sich aus Herstellern und Weiterverarbeitern von technischen Garnen und Textilien zusammensetzte. Darüber hinaus wurden und werden breitere Kreise relevanter Industriebereiche durch Vorträge auf Sitzungen des Wissenschaftlichen Beirats der Forschungsstellen angesprochen.

Das DTNW hat die Forschungsergebnisse darüber hinaus durch Internetpräsentation vorgestellt. Das TITK veröffentlicht einen Überblicksstand ihrer Ergebnisse auf der TITK-Homepage bis 22.06.2011. Das ITV veröffentlicht einen Überblicksstand ihrer Ergebnisse auf der ITV - Homepage ab Juli/August 2011.

Die Forschungsstellen werden sie durch Vorträge bei nationalen und internationalen Fachtagungen und durch Beiträge in den deutschsprachigen Fachzeitschriften einem breiten Publikum vermitteln. Zusätzliche Plattformen bilden die Aachen-Dresdner Textiltagung, die Messe „Techtextil“ in Frankfurt sowie das Textil- Symposium in Ulm.

Nachfolgend ist der vorgesehene Zeitplan und tatsächliche Status von **Transfermaßnahmen und der Umsetzung der Forschungsergebnisse** skizziert:

Transfermaßnahme	geplant	Status
Projektbegleitende Ausschüsse	3 Treffen über die Projektlaufzeit waren bei Antragstellung vorgesehen	durchgeführt wurden 5 Sitzungen am: 22.01.2009 29.10.2009 25.03.2010 18.11.2010 24.02.2011
direkter Austausch mit Unternehmen während der Projektlaufzeit - Vorführungen der Prüfeinrichtungen	-	28.01.2010 11.06.2010
Interne Gremien	Wissenschaftlicher Beirat des DTNW	07.05.2009 29.04.2010
	TITK Wissenschaftlicher Beirat Hauskolloquium	02.09.2009 06.10.2010
Posterpräsentationen/Vorträge	Zwick /Roell Textil Symposium Ulm	27.01.2011
	Synthetic Fibre Talks 2011, 06.05.2011, Vaals (NL)	06.05.2011
Teilnahme an Messen	Techtextil Frankfurt 2011 1 Poster zur Prüftechnik	24.5. – 26.05.2011
Erstellen einer Ergebniskurzfassung zur Verbreitung über das Forschungskuratorium Textil e.V.		am 03.03.2011 erfolgt
Erstellen einer Ergebniskurzfassung und direkter Versand an mögliche Interessenten	nach Erstellung des Abschlussberichtes ab Juni 2011	in Vorbereitung
Erstellen einer Ergebniskurzfassung und Veröffentlichung auf den Webseiten der Forschungsstellen	www.dtnw.de	aktiv
	www.titk.de	ab 22.06.2011
	www.itv-denkendorf.de	ab Juli 2011
Publikationen in Fachjournal(en)	Melliand Textilberichte	in Vorbereitung

8 Erläuterung zur Verwendung von Zuwendungen

8.1 Notwendigkeit der durchgeführten Arbeiten

Die durchgeführten Arbeiten entsprechen den für die Umsetzung des Forschungsprojektes notwendigen Tätigkeiten und Arbeitsschritten und waren zur Erreichung des Forschungsziels erforderlich. Es wurden nur solche Arbeiten geleistet, die in Art und Umfang zur Umsetzung des Projektes angemessen waren.

8.2 Verwendung der Zuwendung

Das wissenschaftliche Personal sowie die Laboranten wurden entsprechend der im Antrag vorgesehenen Arbeitsschritte eingesetzt. Der Personaleinsatz war angemessen und notwendig.

9 Veröffentlichungen

- ⇒ Homepage der Forschungsstelle 1, www.dtnw.de
- ⇒ Homepage der Forschungsstelle 2, www.itv-denkendorf.de (ab Juli 2011)
- ⇒ Homepage der Forschungsstelle 3, www.titk.de (22.06.2011)

10 Angaben über Schutzrechte

keine

11 Danksagung

Das Forschungsvorhaben IGF-Nr. 15925 BG der Forschungsvereinigung Forschungskuratorium Textil e.V., Reinhardtstraße 12-14, 10117 Berlin, wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Den im projektbegleitenden Ausschuss aktiven Unternehmen danken wir für die Bereitstellung umfangreichen Versuchsmaterials.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

12 Durchführende Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Deutsches Textilforschungszentrum Nord-West e.V. (DTNW)
Institut an der Universität Duisburg-Essen
Adlerstraße 1, 47798 Krefeld
Tel.: 02151/843-0 Fax: 02151/843-143
Email: info@dtnw.de

Leiter der Forschungsstelle: Professor Dr. Jochen S. Gutmann
Tel.: 02151/843-190 Fax: 02151/843-143
Email: jochen.gutmann@dtnw.de

Projektleiter: Dr. Thomas Bahners
Tel.: 02151/843-156 Fax: 02151/843-143
Email: bahners@dtnw.de

Forschungsstelle 2: Deutsche Institute für Textil- und Faserforschung Denkendorf
Institut für Textil- und Verfahrenstechnik (ITV)
Körschtalstraße 26, 73770 Denkendorf
Tel.: 0711/9340-0 Fax: 0711/843-297
Email: info@dtnw.de

Leiter der Forschungsstelle: Professor Dr.-Ing. Heinrich Planck
Tel.: 0711/9340-216 Fax: 0711/843-297
Email: Heinrich.Planck@itv-denkendorf.de

Projektleiter: Hermann Finckh
Tel.: 0711/9340-401 Fax: 0711/843-297
Email: Hermann.Finckh@itv-denkendorf.de

Forschungsstelle 3: Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff-Forschung
e.V. (TITK)
Breitscheidstraße 97, 07407 Rudolstadt-Schwarza
Tel.: 03672/379-0 Fax: 03672/379-379
Email: info@titk.de

Leiter der Forschungsstelle: Dr.-Ing. Ralf Bauer
Tel.: 03672/379-0 Fax: 03672/379-379
Email: info@titk.de

Projektleiter: Marina Weiß-Quasdorf
Tel.: 03672/379-329 Fax: 03672/379-379
Email: Weiss-Quasdorf@titk.de

13 Literaturverzeichnis

-
- [1] J. Lünenschloß, Text. Prax., **16** (1961) 182
 - [2] O. Becker, W. Stein, G. Lenßen, H. van der Weyden, Melliand Textilber., **65** (1984) 442
 - [3] M. Beier und E. Schollmeyer, Angew. Makromol. Chem., **168** (1989) 53-79
 - [4] G.W: Urbanczyk, Faserforsch. Textiltech., **9** (1958) 488
 - [5] G. Holden, J.Text.Inst., **50** (1959) T41
 - [6] J. Szosland und M. Scolzynski, Textiltechnik (Leizig), **27** (1977) 302
 - [7] D. Roylance, Text.Res. J., **47** (1977) 679
 - [8] Reumann Ralf-Dieter. Studie über das Verhalten von monofiler Polyamid-Spinn- und – Reckseide gegenüber Zugbeanspruchungen bei unterschiedlichen, insbesondere hohen Dehnungsgeschwindigkeiten: Dissertation. Dresden: Fakultät für Maschinenwesen, 1974.
 - [9] W. Bobeth, *Textile Faserstoffe*, Springer, Berlin Heidelberg New York, 1993
 - [10] M. Beier und E. Schollmeyer, Angew. Makromol. Chem., **168** (1989) 37-79, **169** (1989) 1-15
 - [11] Y. Wang und Y.M. Xia, Composites, Part A, **29** (1998) 1411-1415
 - [12] Y. Wang und Y.M. Xia, Composites, Part A, **30** (1999) 1251-1257
 - [13] Y. Wang, Y.M. Xia und Y. Jiang, Appl. Composite Mat. **8** (2001) 297-306
 - [14] J. Xiong, B. Gu und S. Wang, J. Dong Hua Univ., **19** (2002) 54-58
 - [15] B. Gu und X. Pan, J. Dong Hua Univ., **19** (2002) 5-9
 - [16] T.A. Godfrey, J. Text. Inst., Part 1: Fibre Science and Textile Technology, **92** (2001) 16-33
 - [17] Institut für Textil- und Verfahrenstechnik, DITF; Universität Karlsruhe, Institut für Mechanik: Entwicklung extrem leichter durchstichfester bzw. schussfester Schutzkleidung mit Hilfe der rechnergestützten Simulation: AiF 12813 N, 2005
 - [18] DIN EN ISO 2062. Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1995.
 - [19] Maurer Gerhard. Schnellzugversuche an Kunststoffen. Zwick/Roell: 14. Fachmesse für Prüftechnik, 2005.
 - [20] Martin Heino. Die Reißfestigkeit von Textilfäden bei verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten. Faserforschung und Textiltechnik 10 (1959), No. 8, S. 371 – 376.

-
- [21] Stone Walter K., Schiefer Herbert F., Fox George. Kraft-Dehnungs-Beziehungen in Garnen, die einer raschen Stoßbelastung ausgesetzt werden. *Textil-Praxis* (1955), S. 1083 – 1088.
- [22] Finckh Hermann. Hochgeschwindigkeits- Zugprüfung an technischen Garnen. Zwick/Roell, 1. Textil Symposium Ulm, 2011