



Univerza v Mariboru

*Fakulteta za strojništvo*

Magistrsko delo

**ŠTUDIJ VPLIVA HITROSTI PREIZKUŠANJA NA  
OBNAŠANJE SPECIALNIH PREJ PRI  
NATEZNEM PREIZKUSU**

November, 2011

Avtorica: Lidija GOMBOC

Mentor: izr. prof. dr. Zoran STJEPANIVIĆ

Somentorica: red. prof. dr. Majda SFILIGOJ SMOLE

Delovna mentorica: dr. Renate LÜTZKENDORF



**Univerza v Mariboru**

*Fakulteta za strojništvo*

Magisterarbeit

**STUDIE ZUM EINFLUSS DER  
PRÜFGESCHWINDIGKEIT AUF DAS  
VERHALTEN VON TECHNISCHEN GARNEN IM  
ZUGVERSUCH**

November, 2011

Vorgelegt von: Lidija GOMBOC

Mentor: Prof. Dr. Zoran STJEPANIVIĆ

Comentorin: Prof. Dr. Majda SFILIGOJ SMOLE

Arbeitsmentorin: Dr. Renate LÜTZKENDORF

## ZAHVALA

Ob koncu magistrske naloge je tudi čas, da se še enkrat zahvalim vsem, ki so me spremljali in spodbujali pri podiplomskem študiju.

Zahvaljujem se mentorju izr. prof. dr. Zoranu Stjepanoviću in somentorici red. prof. dr. Majdi Sfiligoj Smole za pomoč, vodenje in strokovne nasvete pri opravljanju magistrskega dela. Posebej se zahvaljujem izr. prof. dr. Zoranu Stjepanoviću, saj brez njegove pomoči in spodbude ne bi videla konca. Iskreno se zahvaljujem delovni mentorici dr. Renati Lützkendorf, ki me je sprejela in mi omogočila izdelavo magistrske naloge na nemškem Inštitutu TITK (Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff –Forschung) v Rudolstadt, mi pomagala pri oblikovanju teme magistrske naloge, ter spodbujala moje raziskovalno delo na Inštitutu.

Zahvaljujem se tudi sodelavcem oddelka za tekstilne in kompozitne materiale na Inštitutu TITK-a, za napotke, pomoč in za vse informacije, ki so mi jih nudili in mi s tem dali nov zagon. Posebna zahvala Marini Weiß Quasdorf, Ines Orlob, dr. Kokott-Wenderoth Sylviji in Christianu Hauspurgu. Diskusije z njimi so bile vedno poučne v eksperimentalnem in znanstvenem smislu. Zahvaljujem se jim tudi za popravilo magistrske naloge, glede znanstvenega kakor tudi slovničnega vidika.

Na koncu posebna hvala tudi staršem in sestri Klaudiji, ki so mi omogočili študij in me vedno podpirali, tako v moralnem kakor tudi v finančnem vidiku. Njihova pomoč in spodbuda sta pripomogli k uresnitvi zastavljenih ciljev.

Posebna zahvala tudi fantu dr. Szabó Lajosu za spodbudo pri uresnitvi zastavljenih ciljev. Posebej se mu zahvaljujem za njegovo podporo, njegovo potrpežljivost in za prenašanje moje slabe volje in živčnosti, še posebej v času izdelave magistrske naloge.

## DANKSAGUNG

Mit der Anfertigung der Magisterarbeit ist es an der Zeit, nochmals denjenigen zu danken, die mich begleitet und unterstützt haben.

Ich bedanke mich bei meinen zwei Mentoren Prof. Dr. Zoran Stjepanović und Prof. Dr. Majda Sfiligoj Smole für die persönliche Begleitung und Fachliche Betreuung der Magisterarbeit. Besonders danken möchte ich Prof. Dr. Zorn Stjepanović, ohne den ich niemals ein Licht am Ende der Magisterarbeit gesehen hätte.

Mein ganz besonderer Dank gilt der Arbeitsmentorin Dr. Renate Lützkendorf, die mir die Möglichkeit gab meine Magisterarbeit in Ihrer Abteilung am TITK zu erstellen. Ich danke Ihr für das inspirierende Arbeitsumfeld, für die wissenschaftliche Begleitung und die stetige Unterstützung.

Ich möchte meinen Kollegen der Abteilung Textil- und Werkstoff-Forschung für die Zusammenarbeit und die schöne Zeit, für Ihr Fachwissen und Ihre konstruktive Kritik danken. Ihre Ideen und Anregungen haben mir immer wieder den nötigen Anstoß gegeben. Ganz herzlich danke ich mich bei Marina Weiß-Quasdorf, Ines Orlob, Dr. Sylvia Kokott-Wenderoth und Christian Hauspurg. Die Diskussionen mit ihnen waren immer in experimenteller und wissenschaftlicher Hinsicht, lehrreich. Ich bedanke mich bei Ihnen auch für die sprachlichen Korrekturen an meiner Arbeit.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie, vor allem bei meinen Eltern und meiner Schwester Klaudija bedanken, die mich in moralischer und finanzieller Hinsicht unterstützt haben. Ganz besonderer Dank gilt meinem Lebensgefährten Dr. Lajos Szabó für die fortwährende mentale Unterstützung meines Magistervorhabens. Ich bedanke mich bei ihm, für seine Geduld, und dass er meine schlechte Laune und meine Zeiten der überstrapazierten Nerven ertragen hat, besonders in der Entstehungszeit dieser Arbeit.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1	WISSENSCHAFTLICHE, TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE PROBLEMSTELLUNG .....	2
1.2	ZIELSETZUNG UND LÖSUNGSWEG .....	3
<b>2</b>	<b>THEORETISCHE BETRACHTUNGEN ZUM ZUGVERSUCH.....</b>	<b>5</b>
2.1	KRAFT-DEHNUNGS-VERHALTEN VON FASERN .....	5
2.2	AUS DEM ZUGVERSUCH ERMITTELTE KENNGRÖßEN .....	7
2.2.1	Kraft-Dehnungs-Diagramm .....	7
2.2.2	Zugkraft.....	9
2.2.3	Spannung.....	10
2.2.4	Längenänderung.....	11
2.2.5	Zugarbeit .....	13
2.2.6	Modul .....	14
2.2.7	Dehnrage .....	18
2.3	EINFLUSSGRÖßEN BEIM ZUGVERSUCH.....	21
2.3.1	Einfluss der Prüfmaschine .....	22
2.3.2	Einfluss der Prüfbedingungen.....	26
<b>3</b>	<b>STAND DER PRÜFTECHNIK .....</b>	<b>30</b>
3.1	QUASISTATISCHER ZUGVERSUCH.....	30
3.1.1	Prinzipieller Aufbau einer Zugprüfmaschine – Messtechnische Erfassung ..	31
3.1.2	Normierter Zugversuch zur Textilprüfung (DIN EN ISO 2062) .....	31
3.2	DYNAMISCHER ZUGVERSUCH .....	34
3.2.1	Fallgewichtsprüfstand .....	36
3.2.2	Rotationsprüfstand .....	38
3.2.3	Spezialreißmaschine Uster Tensojet .....	40
3.2.4	Split-Hopkinson-Tensile-Bar-Anlage .....	42
3.2.5	Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.....	43
<b>4</b>	<b>STAND DER FORSCHUNG: PRÜFERGEBNISSE AN DYNAMISCHEN ZUGPRÜFGERÄTEN .....</b>	<b>44</b>

<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLER TEIL .....</b>	<b>54</b>
5.1	VERSUCHSMATERIAL .....	54
5.1.1	Feinheit.....	55
5.2	QUASISTATISCHER ZUGVERSUCH.....	57
5.3	DYNAMISCHER ZUGVERSUCH .....	60
5.3.1	Maschinenparameter .....	61
5.3.2	Optimierung der Klemmen.....	64
5.3.3	Versuchsparameter und Ergebnisdarstellung .....	65
<b>6</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>68</b>
6.1	UNTERSUCHUNGEN ZUM KLEMMENEINFLUSS .....	68
6.2	MASCHINENEINFLUSS .....	72
6.2.1	Vergleich der Prüfmethode n .....	72
6.2.2	Einfluss der Beweglichkeit der mechanische Vorlaufeinrichtung .....	73
6.3	EINFLUSS DER PRÜFBEDINGUNGEN IM QUASISTATISCHEN ZUGVERSUCH.....	74
6.3.1	Einfluss der Einspannlänge auf das Kraft-Dehnungsverhalten.....	74
6.3.2	Einfluss der Dehnrate auf das Kraft-Dehnungsverhalten.....	78
6.4	EINFLUSS DER PRÜFBEDINGUNGEN IM DYNAMISCHEN ZUGVERSUCH.....	83
6.4.1	Einfluss der Einspannlänge auf das Kraft-Dehnungsverhalten.....	83
6.4.2	Einfluss der Dehnrate auf das Kraft-Dehnungsverhalten.....	88
6.5	VERGLEICH DER DYNAMISCHEN PRÜFERGEBNISSE ZUM NORMZUGVERSUCH .....	90
6.6	AUSSAGEN ÜBER ANFANGSMODUL UND STRECKGRENZE .....	95
6.7	VERSAGENSMECHANISMEN.....	107
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>113</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS.....</b>	<b>119</b>

# ŠTUDIJ VPLIVA HITROSTI PREIZKUŠANJA NA OBNAŠANJE SPECIALNIH PREJ PRI NATEZNEM PREIZKUSU

**Ključne besede:** PA 6.6, PA 4.6, PET, multifilamentne preje, konvencionalni natezni preizkus, visokohitrostno preizkušanje, standardni dinamometer, servohidravlična natezna naprava, stopnja raztezanja, deformacijska hitrost, standard DIN EN ISO 2062.

**UDK klasifikacija:** 677.021.1.125.3 (043.3)

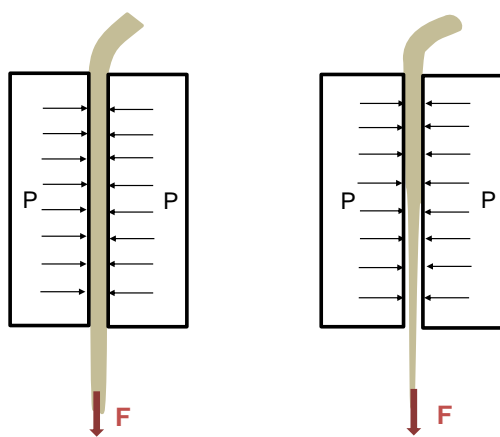
## POVZETEK

*Tekstilni materiali se ne uporabljajo le za oblačilne namene ampak se kot tehnične tekstilije pojavljajo na vseh področjih vsakdanjega življenja in se od konvencionalnih tekstilij razlikujejo glede na njihove zahteve in zmožnosti. Nekateri tehnične tekstilije so izdelane iz visokozmogljivih vlaken, ki so vlakna s posebnimi uporabnimi lastnostmi. Od ostalih vlaken se ločijo predvsem po izjemnih mehanskih lastnostih, predvsem po visoki trdnosti oz. modulu. [11, 27, 45]. Tekstilije so izpostavljene dinamičnim obremenitvam ne samo med uporabo, ampak tudi že med samo proizvodnjo, saj za sodobno proizvodnjo prej uporabljamo naprave nove generacije z visokimi deformacijskimi hitrostmi. V nadaljnji izdelavi ploskih tekstilij (tkanin in pletiv) so preje izpostavljene visokim sunkovitim in cikličnim obremenitvam in na koncu med samo uporabo prihaja do visokih razteznih obremenitev [66]. Posebej pri večini tehničnih tekstilij, ki se uporabljajo v avtomobilski industriji, pride pri uporabi do velikih nateznih obremenitev. Natezne lastnosti tekstilnega materiala največkrat pojasnjujemo zgolj s podatki, dobljenimi pri standardnih pogojih preizkušanja z nizkimi deformacijskimi hitrostmi. Za določanje mehanskih lastnosti, podrobneje za pojasnitev nateznega obnašanja (sila/raztezek) prej pri velikih hitrostih obremenitve, ustrezne metode preizkušanja ni. Šele podatki dobljeni pri velikih hitrostih obremenitve omogočajo realno oceno obnašanja izdelka oz. materiala med dinamičnimi obremenitvami.*

*Kot rezultat nateznega preizkušanja poleg natezne trdnosti in raztezka največkrat podajamo tudi krivuljo sila-raztezek, ki grafično ponazarja odvisnost med natezno silo in raztezkom. Diagram sila-raztezek omogoča izračun deformacijskega dela [21, 45, 53], kakor tudi kontrolo nateznega preizkusa [16, 45, 48], saj je iz oblike krivulje razviden pojav nepravilnosti med nateznim preizkusom, kot je zdrs preizkušanca iz prižem in podobno. Krivuljo sila-raztezek lahko razdelimo na tri dele [4, 5], kjer prvi del krivulje predstavlja*

elastično deformacijo preizkušanca, za katero je značilno, da po prenehanju delovanja sile deformacija popolnoma izgine. V tem območju je odvisnost med silo in raztežkom linearna, kar pomeni, da se raztežek povečuje proporcionalno s povečanjem sile. Drugi del krivulje predstavlja proces utrditve, za katerega je značilna plastična deformacija, pri kateri pride do nadaljnjih strukturnih sprememb. V tem delu nateznega preizkusa se material po prenehanju delovanja sile več ne povrne v prvotno obliko, enak porast sile pa povzroči večjo deformacijo kot v linearnem področju. V tretjem delu krivulje so vezi med molekulami tako močno napete, da makromolekule izgubijo vlogo nosilca napetosti. Sile v tem področju so dovolj visoke, da povzročijo prelom posameznih molekul, kar ima za posledico prelom preizkušanca.

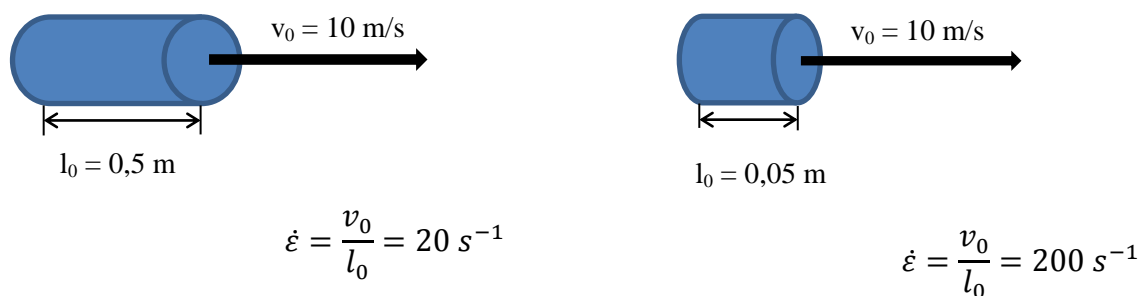
Na rezultate preizkušanja vplivajo poleg lastnosti materiala tudi pogoji merjenja, na primer klimatski pogoji, vrsta merilne naprave in izvedba nateznega preizkusa. Pomembno je omeniti vpliv napak, ki se pojavijo zaradi raztezanja preizkušanca v območju prižem (slika 1) [3, 19, 22, 53], kar ima za posledico nekorektno zajemanje deformacijskih vrednosti. Ta napaka se poveča z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, zaradi česar se pri manjših vpenjalnih dolžinah omenjena napaka ne da več zanemariti. Tudi s povečanjem tlaka prižem se ta pojav raztezanja ne da odpraviti.



Slika 1: Nadaljevanje raztezanja preizkušanca v območju prižem [19]

Zaradi variiranja vpenjalne dolžine in preizkuševalne hitrosti je priporočljivo, da pri dinamičnih obremenitvah vpeljemo dodatni veličini, ki ju imenujemo stopnja raztezanja in hitrost raztezanja ( $\dot{\epsilon}$ ), ki podrobneje določata časovno odvisno deformacijo [44]. Na sliki 2 je shematično prikazana stopnja raztezanja, ki je v nalogi tudi podrobneje predstavljena in opisana. Stopnja raztezanja je opredeljena kot razmerje med hitrostjo in vpenjalno dolžino ( $1/s$  ali  $s^{-1}$ ), medtem ko se hitrost raztezanja podaja kot raztežek v procentih na časovno enoto ( $\%/s$ ) [1, 44, 54, 74].





Slika 2: Določitev stopnje raztezanja [20]

Cilj magistrske naloge je študij in analiza rezultatov nateznega obnašanja specialnih prej pri visokih hitrostih preizkušanja, ki omogočajo boljše razumevanje obnašanja prej med postopki izdelave specialnih tkanin in pletiv, ter dinamičnimi obremenitvami pri uporabi. Iz literaturnih virov [4, 24-26, 37-39, 68-71, 78-80] je znano, da deformacijska hitrost v večini preizkušenih vzorcev vpliva na natezne lastnosti. V večini primerov se s povečanjem deformacijske hitrosti poveča natezna trdnost ob istočasnem zmanjšanju raztezka.

Čeprav pomen nateznega preizkušanja z dinamičnimi obremenitvami dobiva čedalje večji pomen, pa postopek preizkušanja še ni standardiziran. Za dinamično natezno preizkušanje so v uporabi različne merilne naprave, ki so bile konstruirane za preizkušanje mehanskih lastnosti kovin in plastičnih materialov. Ker se principi merjenja in načini izvedbe preizkušanja med metodami zelo razlikujejo, dobljenih rezultatov med seboj ni možno neposredno primerjati. Pri zelo visokih dinamičnih obremenitvah se pojavi tudi problem, da nekatere merilne naprave ne morejo časovno zajemati spremembe sile z raztezkom, saj se preizkus izvrši v nekaj milisekundah. Zaradi tega največkrat pri dinamičnih obremenitvah rezultat meritev podajata le pretržna sila in pretržni raztezek [42, 75]. Malo od teh merilnih naprav je brez velikih prilagoditev primernih za preizkušanje tekstilij. V sodobni literaturi so za dinamično preizkušanje tekstilnega materiala največkrat navedene naslednje merilne naprave, ki so v nalogi podrobneje predstavljene:

- Merilna naprava, ki deluje na principu prostega pada
- Merilna naprava, ki deluje na principu rotacije
- Split-Hopkinson-Tensile-Bar, ki deluje na principu stisnjene zraka
- Merilna naprava Uster Tensojet švicarskega podjetja Uster
- Visokohitrostna natezna naprava, ki deluje na principu servohidravlike.

V nalogi smo določili mehanske lastnosti specialnih tehničnih prej poliamidnega (PA 6.6 in PA 4.6) in polietilentereftalatnega (PET) multifilamenta visokih trdnosti. PA 6.6 multifilament finosti 92,4 tex je sestavljen iz 140 monofilamentov, PA 4.6 multifilament finosti 94,8 tex iz 140 monofilamentov, ter PET multifilament finosti 55,6 tex iz 105 monofilamentov. Za preizkušanje nateznih lastnosti smo uporabili dve različni natezni napravi, ki smo ju v nalogi podrobneje opisali. Za natezno preizkušanje pri nizkih hitrostih obremenitve smo uporabili standardni univerzalni dinamometer podjetja Zwick (Zwick Z 010), za natezno preizkušanje pri velikih hitrostih obremenitve pa univerzalno servohidravlično natezno napravo podjetja Zwick (Zwick HTM 2008), ki smo jo predhodno prilagodili za preizkušanje preje. Obe merilni napravi imata avtomatiziran sistem za zajemanje podatkov. Merilni napravi sta preko ustrezne krmilne enote povezani z osebnim računalnikom, s katerim smo izvedli krmiljenje stroja in zajemanje podatkov merjenih veličin med izvajanjem preizkusa. Obe napravi omogočata opazovanje odvisnosti med obremenilno silo in deformacijo tako numerično, kakor tudi grafično. Vsi preizkusi so potekali v klimatiziranem prostoru, pri standardnih klimatskih pogojih (temperatura  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  in relativna zračna vlažnost  $65\% \pm 5\%$  - skladno s standardom DIN EN 139 [13]). Najprej smo izvedli natezni preizkus po standardu DIN EN ISO 2062 pri vpenjalni dolžini 500 mm in z enakomerno hitrostjo preizkušanja 500 mm/min. Nato smo vpenjalno dolžino preizkušanca, ter hitrost preizkušanja spreminjali. Vpenjalno dolžino in hitrost preizkušanja smo variirali pri nižjih, kakor tudi pri visokih hitrostih preizkušanja. S takšnim modelom preizkušanja smo zajeli območje stopnje raztezanja in sicer pri nižjih hitrostih preizkušanja smo preizkušali območje med  $0,0017\text{ s}^{-1}$  in  $1,2\text{ s}^{-1}$ , kar je predstavljeno tudi v tabeli 1, ter pri visokih hitrostih preizkušanja območje med  $1\text{ s}^{-1}$  in  $500\text{ s}^{-1}$  predstavljeno v tabeli 2.

Raziskovali smo tudi vpliv prižem na rezultat preizkušanja z namenom, da določimo ustrezne prižeme za zanesljivo in trdno vpetje preizkušancev, tako za standardni dinamometer, kakor tudi za servohidravlično natezno napravo. Pri standardnem dinamometru smo uporabili pnevmatične aluminijaste prižeme, ki so se za preizkušanje specialnih prej visoke trdnosti izkazale kot najbolj primerne.

Tabela 1: Matrična tabela stopenj raztezanja, pri katerih so bili izvedeni natezni preizkusi na klasičnem dinamometru Zwick Z 010

	50 mm/min	250 mm/min	500 mm/min	1000 mm/min	1800 mm/min
25 mm	0,033	0,167	0,33	0,67	1,2
50 mm	0,0167	0,083	0,167	0,33	0,6
500 mm	0,00167	0,0083	0,0167	0,033	0,06

Tabela 2: Matrična tabela stopenj raztezanja, pri katerih so bili izvedeni natezni preizkusi na servohidravlični natezni napravi Zwick HTM 2008

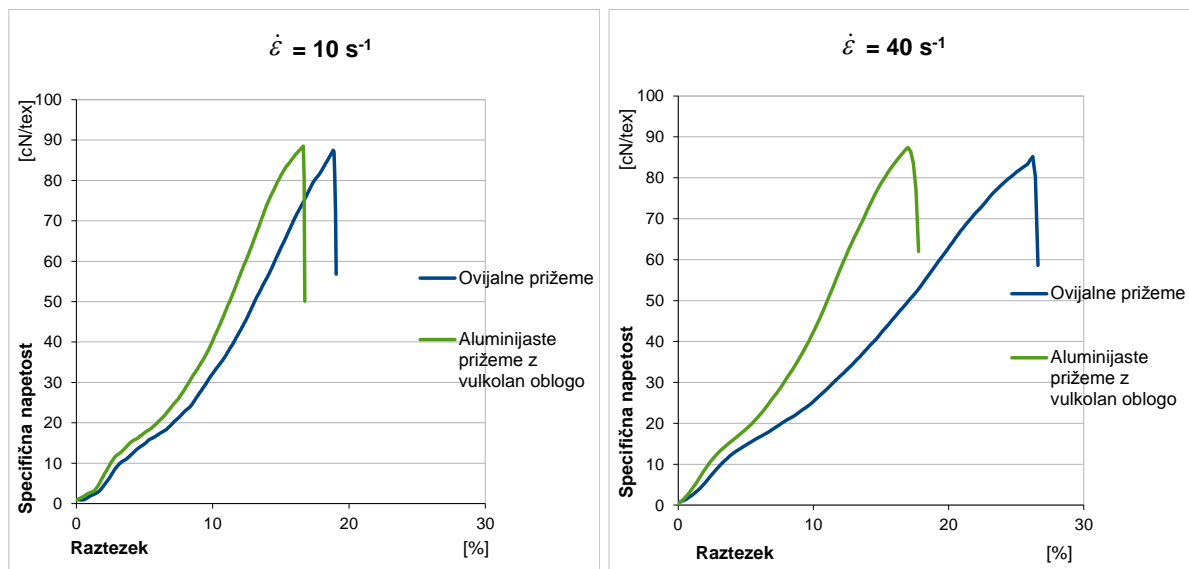
	0,5 m/s	0,8 m/s	1 m/s	1,2 m/s	2 m/s	2,5 m/s	5 m/s	8 m/s	10 m/s
20 mm	25 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	50 s <sup>-1</sup>	60 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	125 s <sup>-1</sup>	250 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
30 mm	16,7 s <sup>-1</sup>	26,7 s <sup>-1</sup>	33,3 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	66, s <sup>-1</sup>	83,3 s <sup>-1</sup>	166,7 s <sup>-1</sup>	267 s <sup>-1</sup>	333,3 s <sup>-1</sup>
50 mm	10 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	24 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	50 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	160 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>
125 mm	4 s <sup>-1</sup>	6,4 s <sup>-1</sup>	8 s <sup>-1</sup>	9,6 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	64 s <sup>-1</sup>	80 s <sup>-1</sup>
250 mm	2 s <sup>-1</sup>	3,2 s <sup>-1</sup>	4 s <sup>-1</sup>	4,8 s <sup>-1</sup>	8 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	32 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>
500 mm	1 s <sup>-1</sup>	1,6 s <sup>-1</sup>	2 s <sup>-1</sup>	2,4 s <sup>-1</sup>	4 s <sup>-1</sup>	5 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>

Ker masa vpenjalnih prižem pri servohidravlični natezni napravi bistveno vpliva na preizkušanje, ni bilo možno in smiselno izvesti preizkušanja s pnevmatičnimi ali hidravličnimi prižemami. Pri preizkušanju prej s servohidravlično natezno napravo (HTM 2008) smo zaradi tega uporabili aluminijaste prižeme, kjer smo preizkušali različne vstavke. Za te aluminijaste prižeme je značilno, da se pritisk, ki je potreben za vpetje preizkušancev, izvrši z obeh strani s pomočjo natezних vijakov. Za zanesljivo vpetje preizkušanca smo uporabili momentni ključ, ki istočasno zagotovi tudi konstanten tlak prižem pri vseh meritvah. Preizkušali smo naslednje vrste vstavkov oz. prižem:

- Aluminijasti vstavki z nazobčano površino
- Ovijalne prižeme
- Aluminijasti vstavki z vulkolan oblogo.

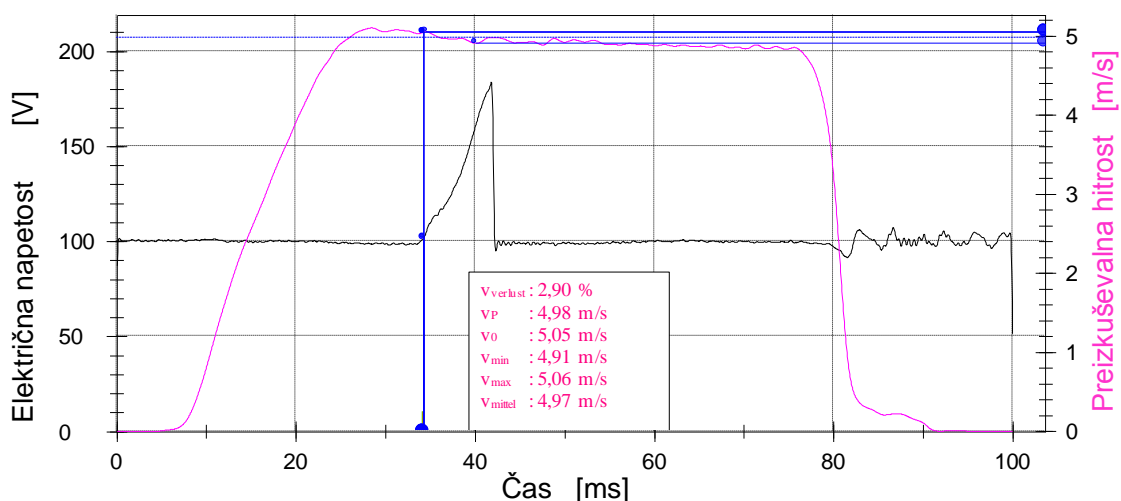
Aluminijasti vstavki z nazobčano površino, ki so primerni za preizkušanje plastičnih in kovinskih materialov, so se izkazali za neprimerne, saj nazobčana površina med izvedbo preizkusa precej poškoduje preizkuševalni tekstilni material, kar ima za posledico nizke vrednosti natezne trdnosti. Nato smo preizkušali ovijalne prižeme, pri katerih se je pojavil problem netočne vpenjalne dolžine, kar ima za posledico netočno zajemanje raztezka, saj se raztezek nemoteno širi tudi v območje prižem, kar je lepo razvidno iz diagramov na sliki 3. Kot najbolj ustrezni vstavki so se izkazali aluminijasti vstavki z vulkolan oblogo (slika 3), pri katerih ima vulkolan obloga nalogo, da ščiti preizkuševalni material, v našem primeru multifilament, pred morebitnimi poškodbami na robovih prižem. Slika 3 prikazuje primerjavo krivulj PA 6.6, dobljenih z ovijalnimi prižemami in aluminijastimi prižemami z vulkolan oblogo, pri dveh različnih stopnjah raztezanja, z dvema različnima vpenjalnima dolžinama preizkušanca. Vpenjalna dolžina preizkušanca pri stopnji raztezanja 10 s<sup>-1</sup> je znašala 500 mm, medtem ko je pri stopnji raztezanja 40 s<sup>-1</sup> znašala vpenjalna dolžina preizkušanca

125 mm. Poleg tega, da grafa potrjujeta ustreznost aluminijastih vstavkov z vulkolan oblogami, je iz grafov razvidno, da z zmanjšanjem vpenjalne dolžine pride vpliv neustreznosti vpenjalnih prižem bolj do izraza.



Slika 3: Vpliv vrste vpenjalnih prižem na rezultate preizkušanja

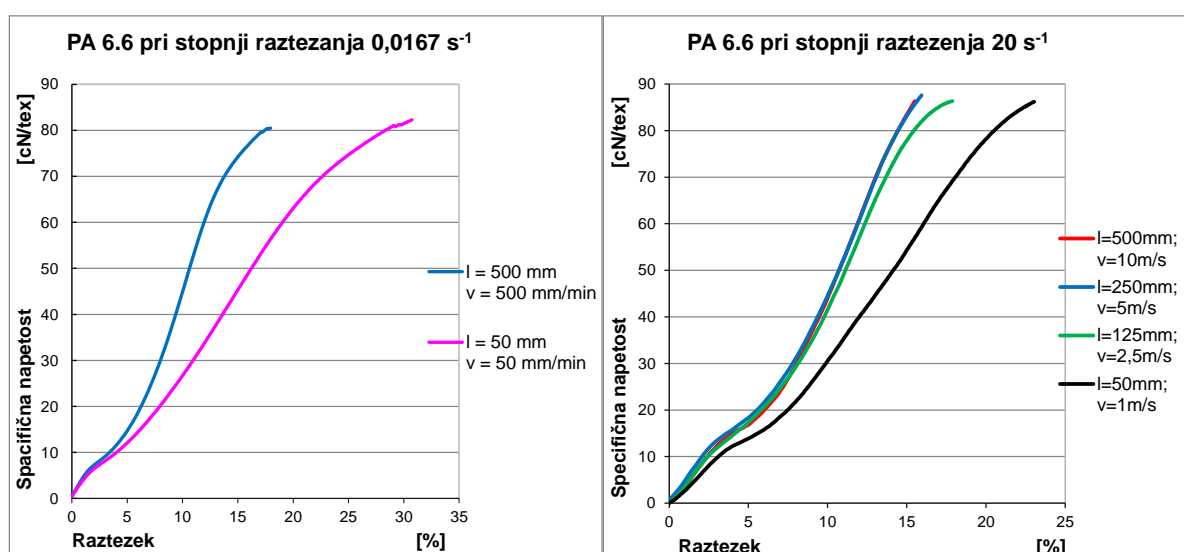
Servohidravlična preizkuševalna naprava Zwick HTM 2008 omogoča zagotovitev konstantne preizkuševalne hitrosti z manjšimi odstopanji skozi celoten potek preizkušanja, kar je razvidno tudi iz grafičnega prikaza v diagramu sila/preizkuševalna hitrost na sliki 4.



Slika 4: Grafični prikaz preizkuševalne hitrosti skozi celoten natezni preizkus v diagramu sila/preizkuševalna hitrost

Pri visokohitrostnem preizkušanju pa se zaradi velikih preizkuševalnih hitrostih v preizkušancu pojavi deformacijski impulz [3, 42, 43, 54, 66, 74], ki se z večanjem preizkuševalne hitrosti veča in vsekakor tudi bolj ali manj vpliva na grafični zapis dobljenih podatkov. Tako lahko v zapisu krivulj sila-raztezek zasledimo nihanje signala, zaradi česar smo krivulje, preden smo jih uporabili za končno primerjavo, zgladili s pomočjo programa Origin 8.5. Pri tem je bilo potrebno posvetiti pozornost obliki obeh krivulj, saj le te med seboj nista smeli preveč odstopati. V nasprotnem primeru bi lahko izgubili pomembne informacije glede vpliva preizkuševalne hitrosti na natezno obnašanje materiala.

Dobljeni rezultati, ki so prikazani na sliki 5, so potrdili teorijo o vplivu vpenjalne dolžine preizkušanca na natezno napetost preizkušanca [9, 11, 33, 39, 45, 61, 62] t.i. weakest link-theory. Iz rezultatov je razvidno, da se natezna napetost z večanjem vpenjalne dolžine zmanjšuje, medtem ko vpliva na raztezek ne moremo pojasniti, ker se je pojavila merilna napaka, ki se z vsakim zmanjšanjem vpenjalne dolžine poveča. Vzrok napak je v največji meri pojav raztezanja preizkušanca v območju prižem. Iz primerjave rezultatov nateznega preizkusa z nizkimi preizkuševalnimi hitrostmi in rezultati z visokimi hitrostmi preizkušanja je razvidno, da vpliv napak na raztezek pri večjih preizkuševalnih hitrostih ne pride več tako do izraza, kot pri manjših preizkuševalnih hitrostih. Razliko lahko pojasnimo z t.i. viskoelastičnostjo oz. manjšo možnostjo raztezanja tekstilije pri večjih preizkuševalnih hitrostih v primerjavi s postopkom raztezanja pri manjših preizkuševalnih hitrostih, saj je čas, pri katerih se izvrši visokohitrostno preizkušanje, bistveno krajši, kar je razvidno iz tabele 3. Pri ostalih dveh preizkuševalnih materialih, PA 4.6 in PET so ugotovitve enake.

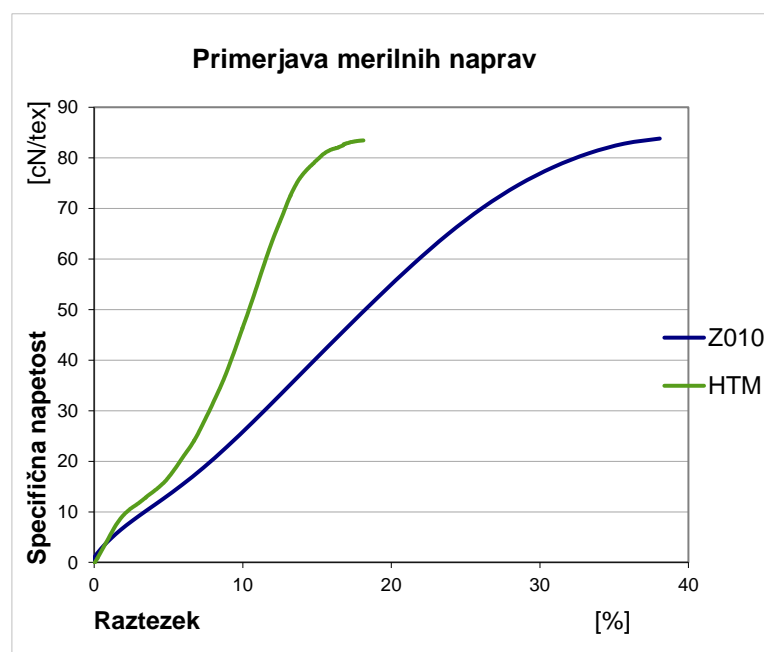


Slika 5: Vpliv vpenjalne dolžine preizkušanca na natezno trdnost in raztezek

Tabela 3: Čas preizkušanja pri različnih stopnjah raztezanja

Naprava	Stopnja raztezanja [s <sup>-1</sup> ]	Vpenjalna dolžina [m]	Hitrost	Čas preizkušanja [ms]
Z010	0,00167	0,5	50 mm/min	110.000
	0,0167	0,5	500 mm/min	11.000
	1,2	0,25	1800 mm/min	400
HTM	1	0,5	0,5 m/s	200
	40	0,05	2 m/s	5
	40	0,125	5 m/s	4
	200	0,05	10 m/s	0,7
	500	0,02	10 m/s	0,3

Podrobneje smo preučili tudi vpliv vrste merilne naprave na rezultate preizkušanja in sicer smo primerjali rezultate dobljene s standardnim dinamometrom Z010 pri stopnji raztezanja 1,2 s<sup>-1</sup>, z rezultati, dobljenimi s servohidravlično preizkuševalno napravo HTM 2008 pri stopnji raztezanja 1 s<sup>-1</sup>. Ta primerjava za preizkuševalni material PA 6.6 je prikazana na sliki 6.

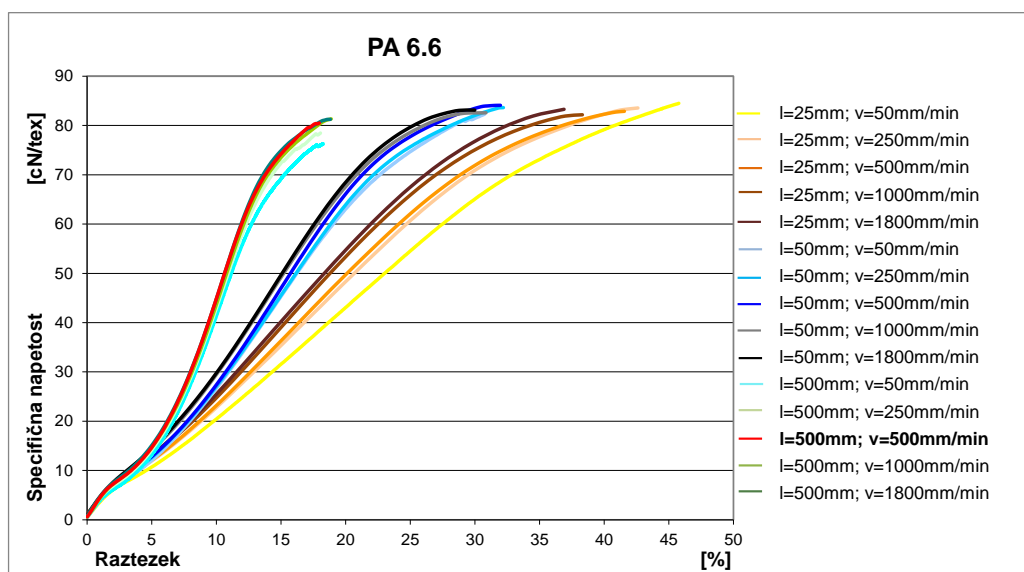


Slika 6: Vpliv vrste merilne naprave na rezultate preizkušanja

Iz diagrama je razvidno, da vrsta merilne naprave ne vpliva na natezno trdnost, saj sta obe krivulji glede natezne trdnosti na enakem vrednostnem nivoju. Primerjave vpliva vrste naprave na raztezek, pa ni bilo mogoče izvesti, saj sta bili za preizkušanje uporabljeni različni vpenjalni dolžini in sicer pri standardnem dinamometru 25 mm, pri servohidravlični preizkuševalni napravi pa 500 mm. Tukaj je bil vpliv napake pri vpenjalni dolžini 25 mm prevelik, da bi lahko prišli do uporabnih zaključkov glede vpliva vrste merilne naprave na raztezek.

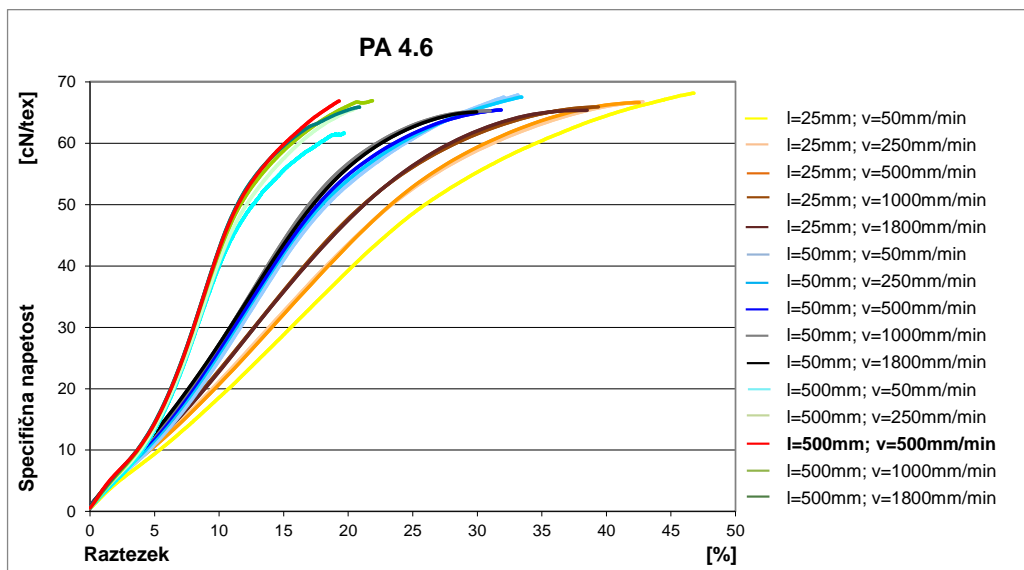
Rezultati, ki so prikazani na slikah od 7 do 9, prikazujejo vpliv hitrosti preizkušanja oz. vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje (specifična napetost/raztezek) preizkuševalnega materiala za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010, medtem ko rezultati, prikazani na slikah od 10 do 12 natančneje podajajo vpliv stopnje raztezanja na raztezek pri maksimalni natezni napetosti, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010, za vsak preizkuševalni material.

Slika 7 prikazuje vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje za preizkuševalni material PA 6.6, kjer je zaslediti majhno povečanje specifične napetosti s povečanjem stopnje raztezanja. To lahko pojasnimo z uporabo majhne vpenjalne dolžine pri večjih stopnjah raztezanja in sicer se z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, zmanjša tudi že prej omenjena verjetnost za prisotnost kritične napake (weakest link), kar privede do povečanja trdnosti preizkuševalnega materiala. Glede obnašanje raztezka pa lahko pridemo do dveh ugotovitev. Prva ugotovitev je, da se raztezek poveča z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, kar se lahko pojasni s povečanjem vpliva zaradi raztezanja preizkušanca v območju prižem, pri zmanjšanju vpenjalne dolžine [3, 19, 22, 53]. Druga ugotovitev je, da se raztezek s povečanjem preizkuševalne hitrosti zmanjša znotraj preizkuševalne serije z enako vpenjalno dolžino. Vzrok za takšno obnašanje preizkuševalnega materiala je viskoelastično obnašanje materiala [1, 4, 53]. Vpliv hitrosti preizkušanja oz. stopnje raztezanja na raztezek je nazorneje prikazan z diagramom na sliki 10, kjer so nanešene dobljene vrednosti raztezka v procentih glede na vrednosti, dobljene po standardu DIN EN ISO 2062 (rdeča točka oznake).

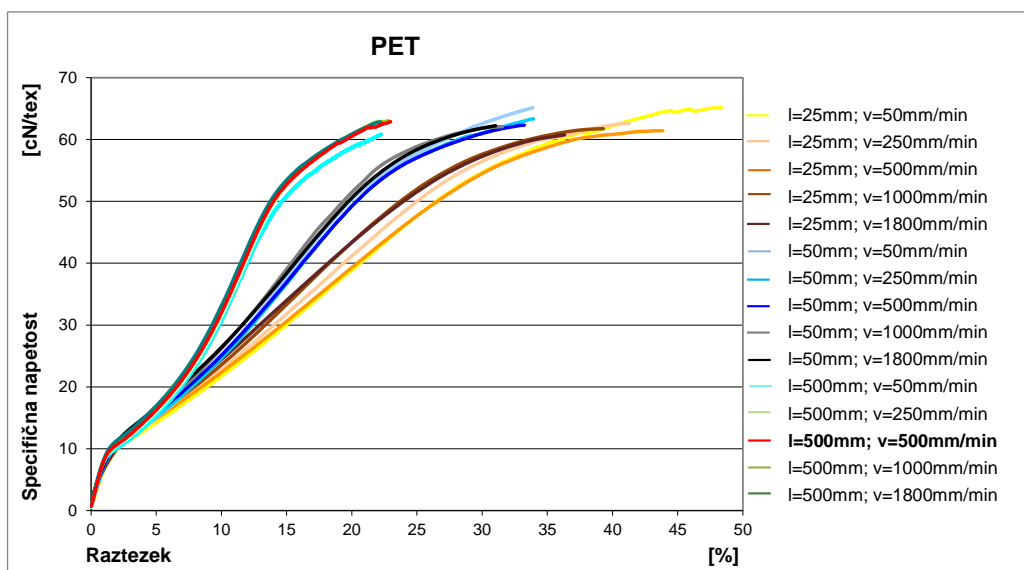


Slika 7: Vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje PA 6.6, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010

Enako obnašanje nateznih lastnosti je zaslediti tudi za preizkuševalni material PA 4.6 (sliki 8 in 11) in PET (sliki 9 in 12), kjer se enako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6 specifična napetost obeh materialov le malo spremeni s povečanjem hitrosti preizkušanja oz. s povečanjem stopnje raztezanja. Enako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6, se tudi tukaj kaže povečanje raztezka z zmanjšanjem vpenjalne dolžine, kakor tudi zmanjšanje raztezka s povečanjem hitrosti preizkušanja pri enakih vpenjalnih dolžinah.

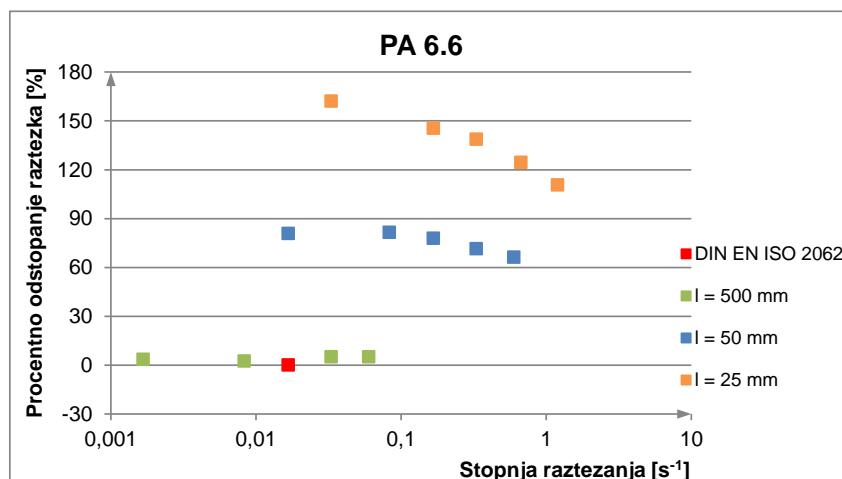


Slika 8: Vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje PA 4.6, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010

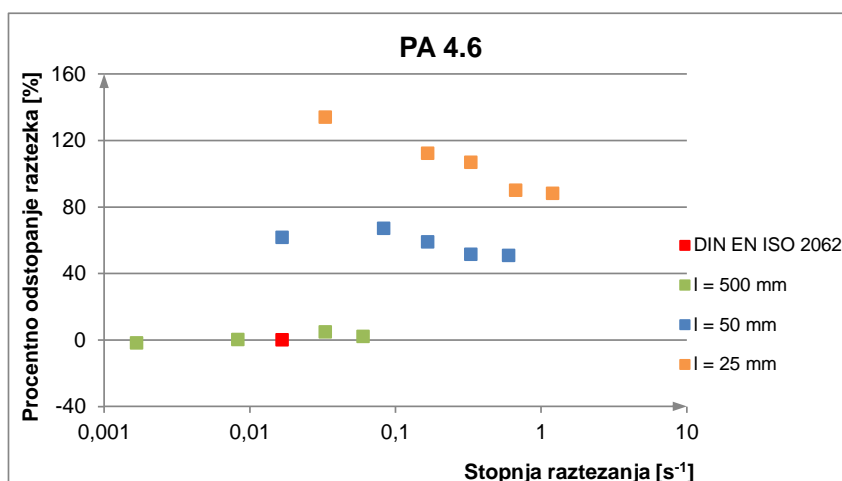


Slika 9: Vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje PET, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010

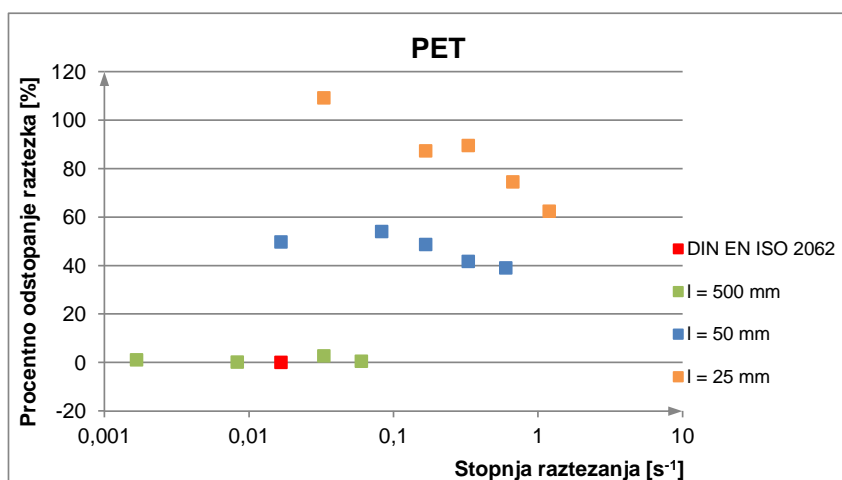




Slika 10: Procentualno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za PA 6.6, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010



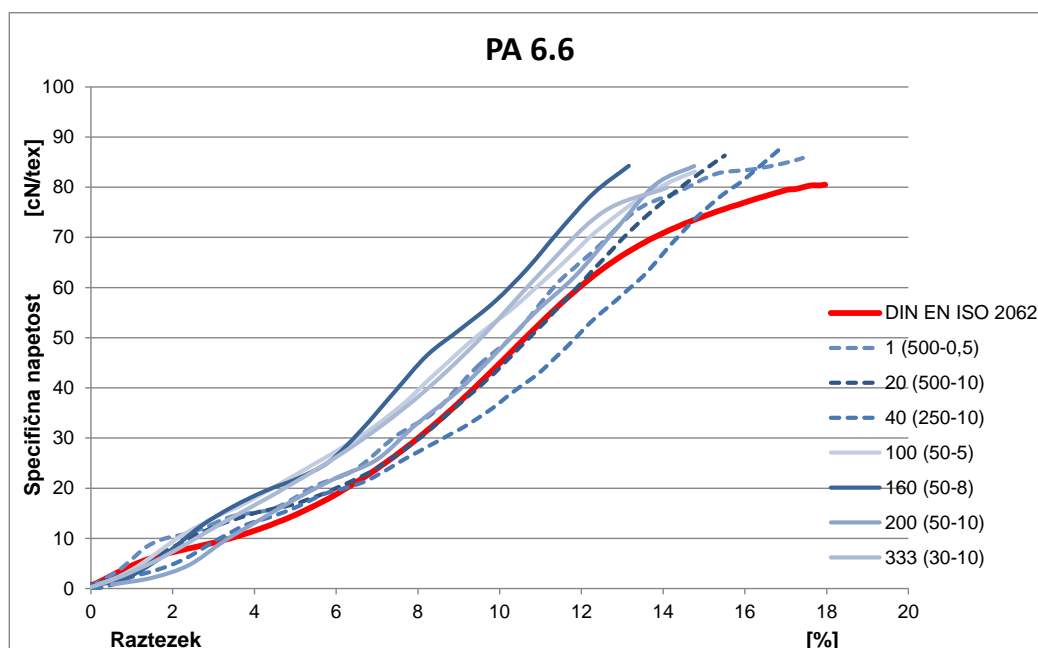
Slika 11: Procentualno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za PA 4.6, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010



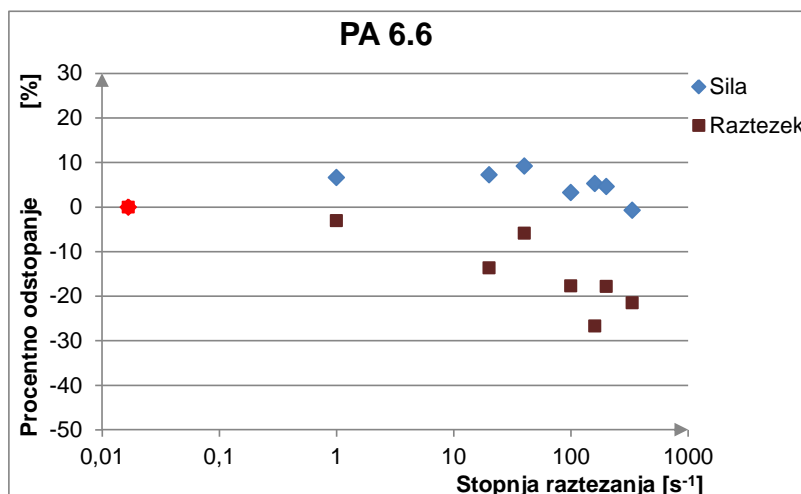
Slika 12: Procentualno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za PET, za meritve izvedene na standardnem dinamometru Z 010

Osnovni cilj naloge je bila primerjava rezultatov, dobljenih po standardu DIN EN ISO 2062 z rezultati, dobljeni z večjimi preizkuševalnimi hitrostmi. Slike od 13 do 18 prikazujejo vpliv hitrosti preizkušanja oz. vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje preizkuševalnega materiala, za meritve, izvedene na visokohitrostni servohidravlični napravi HTM 2008, za vsak preizkušan material. Rdeča krivulja predstavlja rezultate dobljene po standardu DIN EN ISO 2062, črtkane krivulje predstavljajo rezultate dobljene pri nižjih stopnjah raztezanja (od  $1\text{ s}^{-1}$  do  $40\text{ s}^{-1}$ ), medtem ko polne krivulje predstavljajo rezultate dobljene z višjimi stopnjami raztezanja (od  $100\text{ s}^{-1}$  do  $333\text{ s}^{-1}$ ). Vsaka stopnja raztezanja je predstavljena s svojim odtenkom barve, kar je razvidno tudi iz legende, kjer 1 (500 - 0,5) pomeni, da predstavlja krivulja rezultate dobljene pri stopnji raztezanja  $1\text{ s}^{-1}$ , kjer je bila vpenjalna dolžina 500 mm in hitrost preizkušanja 0,5 m/s. Za izračun procentnega odstopanja na slikah 14, 16 in 18, so rezultati, dobljeni po standardu DIN EN ISO 2062 (rdeča oznaka), bili izhodišče za izračun odstopanja, hkrati pa je potrebno povedati, da vrednosti sile predstavljajo vrednosti maksimalne natezne napetosti.

Če podrobneje pogledamo rezultate za preizkuševalni material PA 6.6, ki so prikazani na slikah 13 in 14, lahko vidimo, da se specifična napetost s povečanjem hitrosti preizkušanja oz. s povečanjem stopnje raztezanja rahlo poveča. Procentno povečanje specifične napetosti, glede na rezultate dobljene po standardu DIN EN ISO 2062 znaša okrog 10 %, pri stopnji raztezanja  $40\text{ s}^{-1}$ . Nekoliko večji vpliv hitrosti preizkušanja se kaže pri raztežku, ki se zmanjša tudi do 25 %, glede na vrednost raztežka dobljenega po standardu DIN EN ISO 2062.

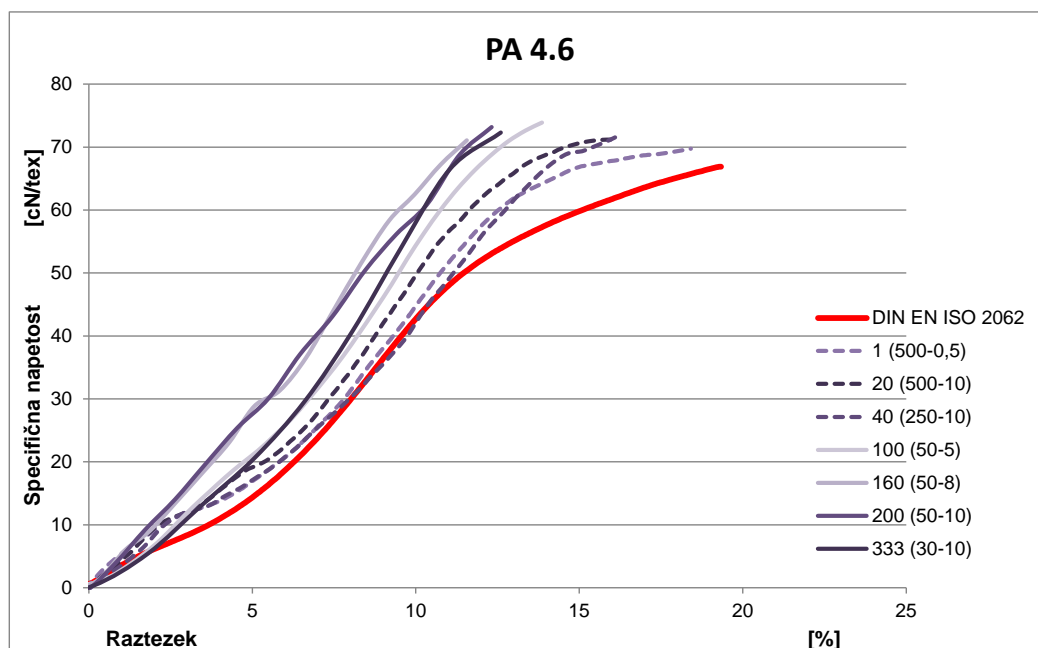


Slika 13: Vpliv stopnje raztezanja na obnašanje krivulje sila-raztezek za PA 6.6

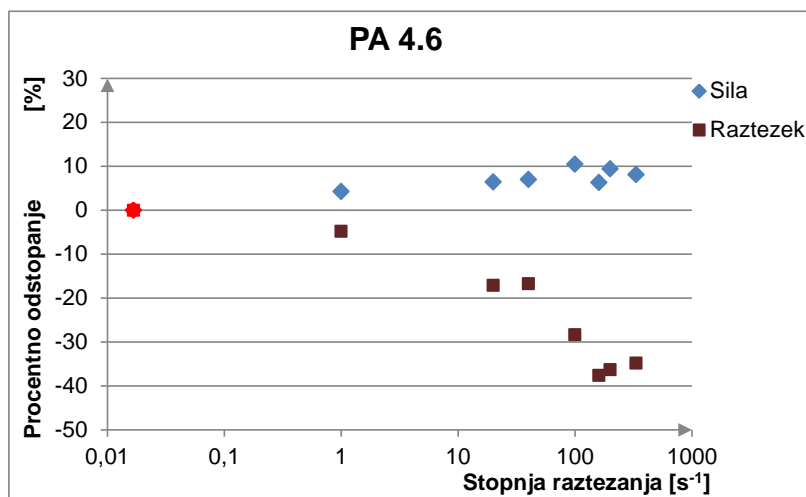


Slika 14: Procentualno odstopanje maksimalne natezne napetosti in procentno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za meritve, izvedene na visokohitrostni servohidravlični napravi HTM 2008 za PA 6.6

Enak vpliv preizkuševalne hitrosti oz. stopnje raztezanja je opazen za preizkuševalni material PA 4.6, na slikah 15 in 16. Tukaj se specifična napetost prav tako kot pri preizkuševalnem materialu PA 6.6 poveča za 10 %, medtem ko se raztezek zmanjša s povečanjem stopnje raztezanja za 40 %.

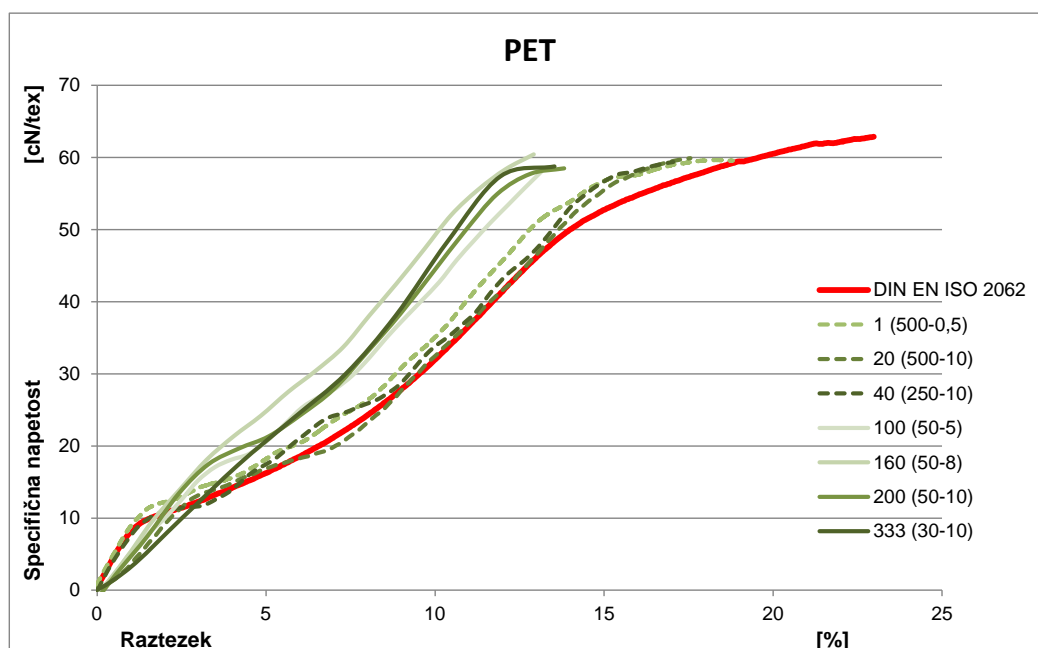


Slika 15: Vpliv stopnje raztezanja na obnašanje krivulje sila-raztezek za PA 4.6

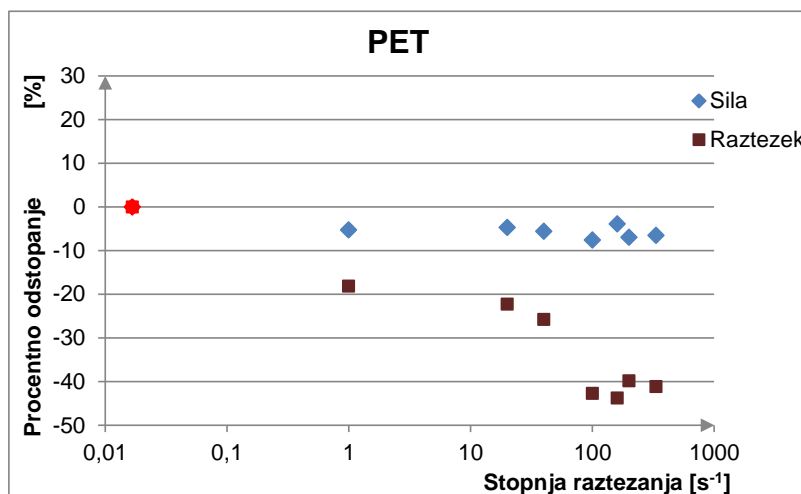


Slika 16: Procentualno odstopanje maksimalne natezne napetosti in procentno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za meritve, izvedene na visokohitrostni servohidravlični napravi HTM 2008 za PA 4.6

Tudi za preizkuševalni material PET na slikah 17 in 18 je zaslediti vpliv hitrosti preizkušanja oz. vpliv stopnje raztezanja na natezno obnašanje materiala. Tukaj se raztezek s povečanjem stopnje raztezanja zmanjša za 45 %, medtem ko se specifična natezna napetost pri PET zmanjša za okrog 8 % pri stopnji raztezanja  $1 s^{-1}$ , nakar ostane nespremenjena.



Slika 17: Vpliv stopnje raztezanja na obnašanje krivulje sila-raztezek za PET

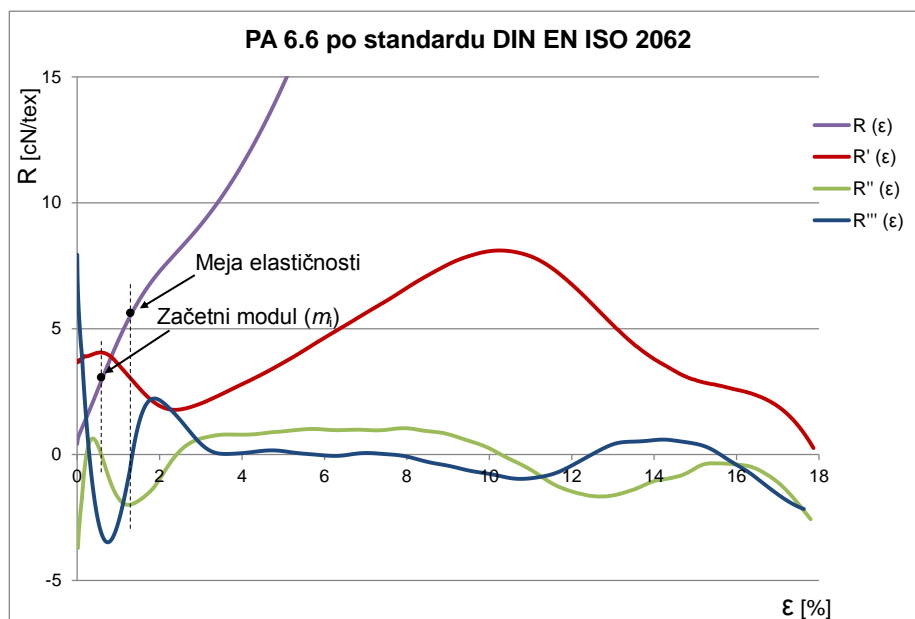


Slika 18: Procentualno odstopanje maksimalne natezne napetosti in procentno odstopanje raztezka pri maksimalni natezni napetosti v odvisnosti od stopnje raztezanja za meritve, izvedene na visokohitrostni servohidravlični napravi HTM 2008 za PET

Zaključimo lahko, da rezultati, pridobljeni z visokohitrostno servohidravlično napravo HTM 2008 kažejo, enako kot rezultati pridobljeni s standardnim dinamometrom Z 010, da hitrost preizkušanja oz. stopnja raztezanja pri vseh treh preizkuševalnih materialih le malo vpliva na natezno napetost. In sicer se natezna napetost pri obeh poliamidnih preizkuševalnih prejah s povečanjem stopnje raztezanja nekoliko poveča, medtem ko se natezna napetost polietilenteraftalatne preje zmanjša. Vzrok za takšno obnašanje polietilenteraftalata je lahko kristalizacijski proces, ki se pojavi zaradi raztezanja materiala med nateznim preizkusom, pri manjših preizkuševalnih hitrostih. Večji vpliv hitrosti preizkušanja oz. stopnje raztezanja je opazen pri raztezk, ki se pri obeh merilnih napravah in vseh treh preizkuševalnih materialih zmanjša z večanjem hitrosti preizkušanja oz. z večanjem stopnje raztezanja. Razliko v raztezk lahko pojasnimo pri vseh treh preizkuševalnih materialih z viskoelastičnostjo materiala, ki pravi, da se vsak material različno odzove ob različnih hitrostih deformacije [1, 4, 53].

Opravili smo še matematično analizo  $R/\varepsilon$  krivulj z namenom natančne določitve viskoelastičnih parametrov. Na krivulji odvoda eksperimentalne krivulje smo določili spremembe naklona krivulje specifična napetost-raztezek ( $R/\varepsilon$ ) s povečanjem stopnje raztezanja. Posebej smo se opredelili na dve točki (slika 13) in sicer:

- začetni modul  $m_i$  in
- mejo elastičnosti.



Slika 19: Grafični prikaz krivulje sila/raztezek  $R(\epsilon)$ , prvega odvoda  $R'(\epsilon)$ , drugega odvoda  $R''(\epsilon)$  in tretjega odvoda  $R'''(\epsilon)$ , ter točke začetnega modula in meje elastičnosti

Začetni modul  $m_i$  se iz diagrama določi v točki, kjer prvi odvod predstavlja prvi lokalni maksimum, drugi odvod pa seka x os, medtem ko se meja elastičnosti iz diagrama določi v točki, kjer drugi odvod predstavlja lokalni minimum, tretji odvod krivulje pa seka x os, kar je razvidno iz slike 19. Rezultati odvodov vseh treh preizkuševalnih materialov kažejo, da se s povečanjem stopnje raztezanja povečuje raztezek, kakor tudi napetost v točki  $m_i$ , kar je prikazano v tabeli 4. Enak vpliv stopnje raztezanja se kaže v točki meje elastičnosti. Iz teh rezultatov lahko zaključimo, da se začetno elastično območje krivulj z večanjem stopnje raztezanja povečuje, kar potrdi tudi premik točke meje elastičnosti.

Tabela 4: Vpliv stopnje raztezanja na začetni modul  $m_i$

Material	Stopnja raztezanja [ $s^{-1}$ ]	$\epsilon_{mi}$ [%]	$R_{mi}$ [cN/tex]	$m_i$ [cN/tex]
PA 6.6	333	2,5	9,9	384
	200	0,65	3,2	492
	160	1,1	5,6	509
	100	1,3	5,4	392
	DIN EN ISO	0,6	3	417
PA 4.6	333	2,3	7,5	313
	200	1,5	7,5	487
	160	2,5	12	472
	100	2,3	8,5	352
	DIN EN ISO	0,3	1,5	333
PET	333	2,5	10	400
	200	1,6	8,5	500
	160	0,9	6,4	711
	100	1,6	6,7	438
	DIN EN ISO	0,3	3,2	900

*Pri vsaki meritvi smo določili lego pretrga preizkušanca. Razlikovali smo med pretrgi v neposredni bližini zgornje prižeme, pretrgi na sredini preizkušanca in pretrgi v neposredni bližini spodnje prižeme. Položaje pretrgov smo statistično obdelali in ugotovili, da se z večanjem stopnje raztezanja povečuje tudi število pretrgov v neposredni bližini prižem in sicer se približno 50 % pretrgov pojavi v neposredni bližini zgornje prižeme oz. gibljive prižeme in približno 25 % v neposredni bližini spodnje, fiksne prižeme. Ti rezultati kažejo na pojav deformacijskega impulza, ki se z večanje stopnje raztezanja povečuje in tako vpliva na pretrg preizkušanca v neposredni bližini prižeme, kjer je koncentracija napetosti največja [54].*

*Ker je v nekaterih virih [1, 28, 45, 66] zaslediti analize pretrgov pri visokih preizkuševalnih hitrostih, ki kažejo na zataljeno oz. t.i. gobasto obliko pretrgov, smo izvedli analize pretrgov tudi na naših preizkuševalnih vzorcih. Konce pretrgane preje smo opazovali na posnetkih z vrstičnega elektronskega mikroskopa (SEM). Na posnetkih ni bilo zaslediti gobastih oblik pretrgov, ki naj bi bili posledica zatalitve pretrganega konca filamenta.*

*Raziskava je potrdila, da hitrost preizkušanja vpliva na obnašanje specialnih prej pri nateznem preizkusu. Prav tako je potrdila ustreznost nove metode in naprave za visokohitrostno preizkušanje, kakor tudi teorije, da vpenjalna dolžina preizkušanca vpliva na natezno napetost. Nadlje smo ugotovili, da se z večanjem stopnje raztezanja povečuje verjetnost pretrga preizkušanca v neposredni bližini prižem, kakor tudi, da se poveča začetni elastični del krivulje sila-raztezek s povečanjem stopnje raztezanja. Navedene ugotovitve predstavljajo znanstveni prispevek raziskave in magistrskega dela.*

## **STUDIE ZUM EINFLUSS DER PRÜFGESCHWINDIGKEIT AUF DAS VERHALTEN VON TECHNISCHEN GARNEN IM ZUGVERSUCH**

**Schlagwörter:** PA 6.6, PA 4.6, PET, Filamentgarne, quasistatische Zugversuch, Hochgeschwindigkeitszugversuch, klassische Zugprüfmaschine, servohydraulische Zugprüfmaschine, Dehnrage, Dehngeschwindigkeit, Prüfungsgeschwindigkeit, Norm DIN EN ISO 2062.

### **ZUSAMMENFASSUNG**

*Technische Textilien unterscheiden sich grundsätzlich in ihrem Anforderungs- und Leistungsprofil von den klassischen textilen Garnen und Flächen. So sind Garne und daraus*

*hergestellte Textilmaterialien in der Produktion und in ihrer Anwendung zunehmend hochdynamischen Belastungssituationen ausgesetzt.*

*Die Festlegung von Spezifikationen und die Auslegung der verwendeten Materialien erfolgt aber nach wie vor durch Kenngrößen, die im Normzugversuch bei vorgegebenen Prüf- und Dehngeschwindigkeiten ermittelt wurden. Auf Grund ihrer viskoelastischen Eigenschaften, verhalten sich polymere Garne jedoch abhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften - speziell der Kraft-Dehnungseigenschaften von Filamentgarnen mit oder ohne Drehung im Zugversuch unter Hochgeschwindigkeitsbelastungen - fehlt jedoch eine geeignete Prüfmethodik. Erst diese Kenntnisse ermöglichen gesicherte Aussagen über dynamisch ablaufende Anwendungssituationen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Hochleistungsgarne aus Polyamid (PA 6.6 und PA 4.6) und Polyethylenterephthalat (PET) getestet. Zuerst wurden die untersuchten Garne bei niedrigen Dehnraten von  $0,0017\text{ s}^{-1}$  bis  $1,2\text{ s}^{-1}$  (so genannte quasistatische Zugprüfung) mit einer klassischen Zugprüfmaschine Z 010 von Zwick untersucht. Außerdem wurde die Probenhalterung und die Prüftechnologie einer servohydraulische Zugprüfmaschine HTM 2008 von Zwick modifiziert. So konnten die untersuchten Garne auch bei höheren Dehnraten von  $1\text{ s}^{-1}$  bis  $500\text{ s}^{-1}$  (so genannten dynamischen Zugprüfung) geprüft werden. Um die entsprechenden Dehnraten zu realisieren, wurden Einspannlänge und Prüfgeschwindigkeit an beiden Zugprüfmaschinen variiert.*

*Grundlage der Ergebnisdiskussion ist das Kraft-Dehnungs-Verhalten, gemessen unter Beanspruchungen gemäß DIN EN ISO 2062. Die dazu vergleichende Auswertung der Versuchsreihen bei hohen Prüfgeschwindigkeiten bildet jedoch den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen und Betrachtungen. Die Versuchsergebnisse werden auch bezüglich der Einflussgrößen (Klemmen, Prüfmaschinentyp, Einspannlänge) diskutiert. Bei allen Versuchsreihen wurde das örtliche Auftreten des Fadenbruchs dokumentiert und statistisch ausgewertet. Es zeigte sich, dass viele Brüche in der Nähe der Klemmen auftraten. Ausgewählte Bruchenden die bei unterschiedlichen Dehnraten entstanden sind wurden im REM auf ihren Versagensmechanismus hin analysiert.*

*Die Studie hat gezeigt, dass sich die Prüfgeschwindigkeit auf das Verhalten von technischen Garnen im Zugversuch auswirkt. Zwar zeigte die maximale Zugkraft der Garne kaum eine Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit, jedoch reduzierten höhere Prüfgeschwindigkeiten bei allen untersuchten Garntypen die Dehnung bei maximaler Zugkraft.*



# STUDY OF THE INFLUENCE OF TEST SPEED ON THE BEHAVIOR OF SPECIAL YARNS IN THE TENSILE TEST

**Key words:** PA 6.6, PA 4.6, PET, fiber bundles, quasi-static tensile test, high speed tensile test, standard tensile testing machine, servo-hydraulic tensile testing machine, strain rates, elongation rate, testing speed, standard DIN EN ISO 2062.

## ABSTRACT

Technical textiles are fundamentally different from traditional textile yarns and textiles in their requirements- and performance-profile. Special yarns and textile materials made of these fibers are usually exposed to high dynamic load conditions during processing and in use.

The definition from specifications and the interpretation of the material behavior under dynamic load conditions is still characterized by parameters, which are determined under standard tensile test with present testing speed and strain rates. Due to their viscoelastic properties the behavior of polymeric yarns depends on the loading speed. A suitable test method is missing for the determination of mechanical properties under high strain rate – especially the stress-strain properties of filament yarns with or without twist. Presently, there are no suitable standards for the execution of high-speed tensile test for textiles. Only the high-speed tests provide the valid experimental data to describe the material behavior under high load conditions.

In this work, high performance yarns (HPF) from polyamide (PA 6.6, PA 4.6) and polyethylene terephthalate (PET) were tested. First, the investigated yarns were tested at low strain rates ranging from  $0,0017 \text{ s}^{-1}$  to  $1,2 \text{ s}^{-1}$  (so called quasi-static tensile test) using a classic tensile testing machine (Z 010). Subsequently, the clamps and the testing technology of a servo-hydraulic tensile testing machine HTM 2008 have been modified. This allowed us to test the investigated yarns at higher strain rates ranging from  $1 \text{ s}^{-1}$  to  $500 \text{ s}^{-1}$  (so called dynamic tensile test). To implement the corresponding strain rates both the gauge length and testing speed were varied on both tensile testing machines.

Basis for the discussion were the stress-strain behavior, measured under conditions according to DIN EN ISO 2062. The comparative analysis of experiments at high testing speed formed the focus of experimental studies and observations. The experimental data were also analyze and discussed in terms of influential parameter (clamps, type of testing machine, gauge length). In all experiments the local occurrence of yarn breakage has been documented

and statistically interpreted. Many fractures occurred close to the clamps. Finally, selected fracture ends which occurred under different strain rates, were analyzed by SEM on their failure mechanisms.

The study has shown that the test speed influences the behavior of technical yarns in tensile tests. Experimental results showed that the test speed does not affect significantly the maximal tensile strengths of the investigated yarns. The higher test speeds affected more the elongation. The elongation, in all of the investigated types of yarn, decreased with the increase of the test speed.

## SYMBOLVERZEICHNIS

$F$	- Zugkraft	(N)
$F_v$	- Vorspannkraft	(N)
$F_H$	- Höchstzugkraft	(N)
$F_B$	- Bruchkraft	(N)
$l$	- Länge	(m)
$l_0$	- Einspannlänge, Ausgangslänge	(m)
$l'$	- aktuelle Länge $l'$ zur Zeit $t'$	(m)
$dl$	- Differentialquotient der Länge $l$	(m)
$l_H$	- Länge bei Höchstzugkraft	(m)
$l_B$	- Länge bei Bruchkraft	(m)
$\Delta l$	- Längenänderung	(m)
$\Delta l_{el}$	- elastische Längenänderung	(m)
$\varepsilon$	- Dehnung	(%)
$\varepsilon_{el}$	- elastische Dehnung	(%)
$T_{tv}$	- Ausgangsfeinheit	(tex)(g/km)
$\rho_F$	- Faserdichte	(g/cm <sup>3</sup> )
$R$	- feinheitsbezogene Zugkraft	(N/tex)
$R_v$	- feinheitsbezogene Vorspannkraft	(N/tex)
$R_H$	- feinheitsbezogene Höchstzugkraft	(N/tex)
$R_B$	- feinheitsbezogene Bruchzugkraft	(N/tex)
$R_{1/2}$	- Mittelwert von Faserfestigkeit von Probe 1 und 2	(N/tex)
$\sigma$	- Spannung	(N/m <sup>2</sup> )
$\sigma_B$	- Bruchspannung	(N/m <sup>2</sup> )
$A$	- Querschnittfläche	(m <sup>2</sup> )
$A_v$	- Anfangsquerschnittfläche	(m <sup>2</sup> )
$W$	- Arbeit	(J)
$W_B$	- Brucharbeit	(J)
$W$	- spezifische Arbeit	(N/tex)
$v_0$	- Abzugsgeschwindigkeit	(m/s)
$E$	- E-Modul nach Definition	(N/mm <sup>2</sup> )
$m_i$	- Anfangsmodul	(N/tex)
$m_y$	- Young-Modul	(N/tex)

$m_{el}$	-	Elastizitätsmodul	(N/tex)
$m_s$	-	Sekantenmodul	(N/tex)
$\alpha$	-	Winkel	(°)
$h$	-	Höhe	(m)
$P$	-	Klemmkraft	(N)
$L$	-	Klemmlänge	(mm)
$X$	-	Markierung auf dem Prüfmaterial	
$Tt$	-	Feinheit	(tex)
$\dot{\epsilon}$	-	Dehnrage; Dehngeschwindigkeit	(s <sup>-1</sup> ; %/s)
$t$	-	Zeit	(s)
$T$	-	Temperatur	(°C)
$D$	-	beschreibt während der Beanspruchung auftretenden strukturellen Veränderungen im Messprobe	(-)
$g$	-	Gravitationskonstante	(m/s <sup>2</sup> )

Bemerkung: Die Angaben bezüglich der Dimensionierung sind nur beispielhaft angegeben. Je nach Prüfaufgabe sind auch andere Dimensionsgrößen möglich.

## ABKÜRZUNGEN

C-Fasern	-	Carbonfasern
CRE	-	Constant Rate of Elongation
CRL	-	Constant Rate of Loading
CRT	-	Constant Rate of Traverse
DIN	-	Deutsche Industrie Norm
DMS	-	Dehnungsmeßstreifen
E-Modul	-	Elastizitätsmodul
EN	-	Euronorm
HLF	-	Hochleistungsfasern
HM	-	High Modules
HMPE	-	High-Modul-Poly-Ethylene
HPF	-	High Performance Fibers
HRT	-	Heat Resistant Tangled
HT	-	High Tenacity
HTM	-	High-Speed Testing Machine
ISO	-	International Organization for Standardization
ITV	-	Institut für Textil- und Verfahrenstechnik
M40J	-	Carbonfasern von Toray
MTS	-	Material Testing System
PA	-	Polyamid
PBO	-	Poly-p-phenylbenzobioxazol
PC	-	Personal Computer
PET	-	Polyethylenterephthalat
PHP	-	Polyamide High Performance
PPTA	-	Poly-phenylene-terephthal-amide
PVA	-	Poly-vinyl-alcohol
REM	-	Rasterelektronenmikroskop
SEM	-	Scanning Electron Microscope
SiC	-	Siliziumfaser

- ST - Stabilized Tangled
- T300 - Carbonfasern von Toray
- TITK - Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff Forschung
- Z010 - klassische Zugprüfmaschiene

# 1 EINLEITUNG

Die mechanisch-technologischen Prüfungen in der Werkstofftechnik gehören zu den ältesten Untersuchungsmethoden in der Materialprüfung. Deren Ziel ist die eindeutige Beschreibung eines Werkstoffes hinsichtlich seiner physikalischen oder mechanischen Eigenschaften. Sie sind spätestens seit Leonardo da Vinci bekannt. Leonardo da Vinci (1452 - 1519) und Galileo Galilei (1564 – 1642), der als Begründer der Festigkeitslehre und der Werkstoffprüfung gilt und der Vater der heute noch benutzten Reißlänge ist, stellten bereits im 15. und 16. Jahrhundert Überlegungen über die Biegebeanspruchung und das elastische Verhalten von Materialien an. Leonardo da Vinci fertigte u. a. eine Vorrichtung, mit der die Zugfestigkeit von Draht geprüft werden kann und formulierte eine Anleitung (Prüfvorschrift) zur Durchführung von Zugprüfungen. [41, 45, 84] Weitere Erkenntnisse, wie die Formulierung des Gesetzes der Proportionalität zwischen Kraft und Formänderung von R. Hooke (1635 – 1703) kamen im Laufe der Zeit hinzu. Mitte des 18. Jahrhunderts entstanden dann schließlich die ersten Prüfmaschinen und Richtlinien, die teilweise heute noch gelten. Die Richtlinien teilen sich je nach Anwendungsfall zunächst in statische und dynamische Prüfmethoden. [84]

Neben den Textilien, die für den individuellen Konsum (wie Bekleidung, Repräsentation, Schutz, bekleidungsphysiologisches und hygienisches Verhalten u.a.) eingesetzt werden, nehmen die technischen Textilien als sog. High-Tech-Produkte ständig an Bedeutung zu. Mit gezielten Herstellungsbedingungen und Werkstoff-Kompositionen bieten sie Eigenschaften, von denen man selbst vor wenigen Jahrzehnten nicht zu träumen wagte. Entsprechend der jeweiligen Anwendung müssen Textilien mit spezifischen Eigenschaften ausgestattet sein. Dazu gehören ihre Widerstandsfähigkeit gegen unterschiedliche Stoffe, Strahlungen, Temperatureinflüsse und sonstige Umgebungsbedingungen ebenso wie ihre mechanische Belastbarkeit. Die Vielzahl der Anwendungen und die hohen Anforderungen an diese Textilien setzen – insbesondere in Forschung und Entwicklung – differenzierte Prüfmethoden voraus.

Sehr früh erkannte man, dass die Kennwerte geprüft unter niedrigen Belastungsgeschwindigkeiten nicht ausreichen, um schlagartig belastete Bauteile richtig zu charakterisieren und auszulegen. Auch im Textilbereich bestand und besteht großes Interesse, das Werkstoffverhalten unter schlagartigen Belastungen von textilen Garnen zu ermitteln. Das gilt insbesondere seit der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts mit dem Einsatz textiler

Materialien für ballistische Anwendungen. Erste Hochgeschwindigkeitsprüfungen [42, 64, 66, 75] an Textilien sind aus dem Jahre 1950 bekannt.

## 1.1 Wissenschaftliche, technische und wirtschaftliche Problemstellung

Mit der Verwendung von synthetischen Fasern für die Herstellung zahlreicher technischer Produkte wie Reifen, Sicherheitsgurte, Airbags, Ballistik-Materialien, Seilen, usw. wurden seit den 60er Jahren des vorigen Jahrhunderts die „klassischen“ Polymerfasern aus Polyamid (z.B. Perlon, Nylon) und Polyester (z. B. Diolen, Trevira, Dacron) optimiert. Die sehr festen und steifen, dazu leichten und thermostabilen Fasern nennt man Hochleistungsfasern (HLF oder englisch HPF). Sie werden in der Regel für die Herstellung von hoch beanspruchten Strukturelementen eingesetzt. [ 11, 27, 72]

Diese Hochleistungsfasern bzw. technischen Garne und daraus hergestellten Textilmaterialien sind in der Produktion und ihrer Anwendung zunehmend hochdynamischen Belastungssituationen ausgesetzt. Die Herstellung der Garne erfolgt auf Maschinenteknik neuester Generation unter sehr hohen Deformationsgeschwindigkeiten. Bei der Weiterverarbeitung zu textilen Flächen sind diese sehr hohen Schlaggeschwindigkeiten und zyklischen Beschleunigungskräften ausgesetzt und auch im Gebrauch treten hohe Verformungsgeschwindigkeiten, verbunden mit außerordentlich hohen Dehngeschwindigkeiten<sup>1</sup> auf. [66]

Klassisch werden die textilmechanischen Kenngrößen von Garnkonstruktionen, Flächengebilden und Nähten mit Normzugversuch, d.h. mit niedrigen Prüf- und Dehngeschwindigkeiten, ermittelt. Im allgemein gilt für hochgeschwindigkeits Beanspruchungen von Materialien, dass sich die mechanischen Eigenschaften von Metalle, Verbunden und polymeren Werkstoffen mit zunehmender Dehnrates<sup>2</sup> deutlich verändern [6, 17, 56], d.h. mit zunehmender Dehnrates steigen die Bruchkraft und Steifigkeit an. Aus diesem Grund werden in der Praxis an fertigen Produkten meist aufwändige Tests unter anwendungsnahen, schlagartigen Bedingungen durchgeführt. Die Festlegung von Spezifikationen und die Auslegung der verwendeten Materialien erfolgt jedoch nach wie vor auf der Grundlage der mit Normversuchen ermittelten Kenngrößen. Es fehlt eine geeignete Prüfmethodik für die Ermittlung der mechanischen Eigenschaften, speziell der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von Filamentgarnen im Zugversuch unter

---

<sup>1</sup> Definiert im Abschnitt 2.2.7

<sup>2</sup> Definiert im Abschnitt 2.2.7



Hochgeschwindigkeitsbelastung. Zwischen den realen Einsatzbedingungen und den verfügbaren Garnprüfverfahren ergibt sich eine Lücke, die sich als begrenzender Faktor für die Neu- und Weiterentwicklung von entsprechenden Produkten darstellt [1]. Die Prüfbarkeit und Sicherstellung der Werkstoffeigenschaften bei hohen Prüf- und Dehngeschwindigkeiten sind die Voraussetzung für eine breite industrielle Anwendung. Erst diese Kenntnisse ermöglichen gesicherte Aussagen über ablaufende Anwendungssituationen unter schlagartigen Beanspruchungen, ein besseres Verständnis für Vorgänge im Polymergarnen und die Auswahl, Optimierung und Eigenschaftseinstellung von Polymergarnen.

In den früheren 1960er Jahren wurde vor dem Hintergrund steigender Geschwindigkeiten in Prozessen wie Weben, Hochleistungsnähen etc., eingehende Untersuchungen zum viskoelastischen Verhalten von Synthesefasern bei hohen Geschwindigkeiten durchgeführt. Aus diesen Untersuchungen ist bekannt, dass das elastische Verhalten von normalfesten Synthesefasern unter diesen Bedingungen nicht mehr dem Verhalten unter Normzugversuch entspricht. [1, 66]

Die genannten Untersuchungen wurden vor dem Hintergrund der fortschreitenden Produktionstechnik durchgeführt, in denen mit der Maschinenentwicklung Dehnraten von einigen  $10 \text{ s}^{-1}$  auftraten [1]. Als Versuchsgarne wurden aber nur normalfeste Polyamid- und Polyester-Fasertypen, welche in der Bekleidungsindustrie zum Einsatz kommen (z.B. Nylon, Perlon, Polyesterfasern), getestet. Versuche mit höheren Geschwindigkeiten wurden vorrangig auf Prüfständen durchgeführt, welche nach dem Fallgewichtsprinzip und/oder Rotationsprinzip arbeiten.

## 1.2 Zielsetzung und Lösungsweg

Der theoretische Teil der Arbeit basiert auf einer umfassenden Literaturrecherche. Es wird als Grundlagenwissen zunächst das Kraft-Dehnungs-Verhalten von Fasern (Kapitel 2.1) und die Kenngrößen des Zugversuches (Kapitel 2.2) dargelegt. Gleichzeitig werden die im Rahmen der Arbeit zu untersuchenden Einflussgrößen (Kapitel 2.3) erläutert. Dabei liegen folgende Fragestellungen zu Grunde: Welche Kenngrößen des Zugversuches sind für die Garnprüfung wichtig? Welche Prüfparameter beeinflussen die Ergebnisse?

In Kapitel 3 wird der Stand der Prüftechnik diskutiert; d.h. in Kapitel 3.1 wird der quasistatische Zugversuch und in Kapitel 3.2 der dynamische Zugversuch dargestellt. Wobei in dieser Arbeit eine einmahlige Belastung mit hoher Dehnrates als dynamisch definiert wird. Bevorzugt werden die dynamischen Prüfverfahren betrachtet, die derzeit in der Fachliteratur

publiziert werden. Prüfverfahren mit der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine sind der Hauptgegenstand der Arbeit und werden in Kapitel 5.3 detailliert beschrieben.

Weiterhin wird in Kapitel 4 der Stand der Forschung zu Prüfergebnissen an dynamische Zugprüfungen dargestellt. Berücksichtigt werden veröffentlichte Untersuchungsergebnisse an textilen Materialien der verschiedenen Aufmachungsformen (textiler Halbzeuge sowie textiler Flächengebilde), ermittelt mit unterschiedlichen dynamischen Prüfverfahren.

Im praktischen Teil (Kapitel 5) der Arbeit werden textilphysikalische Untersuchungen durchgeführt. Als Versuchsmaterialien werden Filamentgarne (Kapitel 5.1), hergestellt aus drei verschiedenen Polymeren; aus PA 6.6, PA 4.6 und PET, eingesetzt. Die textilen Grundparameter der Filamentgarne werden in Kapitel 5.1.1 und 5.2 dargelegt. In Kapitel 5.3 werden die Versuchsreihen zum dynamischen Zugversuch näher beschrieben, und in Abhängigkeit von den gewählten Maschinenparametern, Klemmentypen und Versuchsparametern dargelegt.

Anschließend werden in Kapitel 6 die Resultate der Untersuchungen dargestellt und diskutiert. In Kapitel 6.1 und 6.2 werden folgende Fragestellung untersucht: Welche methodische Unterschiede bestehen zwischen der Prüfung quasistatisch (Normversuch) und dynamisch? Wie beeinflussen die verschiedenen, verwendeten Klemmen das Prüfergebnis? Welche Klemmentypen sind für die dynamischen Untersuchungen zu empfehlen? Ist ein Einfluss der Prüfmaschinenparameter auf die Versuchsergebnisse nachweisbar? In Kapitel 6.3 wird der Einfluss der technologischen Prüfbedingungen (Einspannlänge, Dehnrate) für den quasistatischen Zugversuch und im Kapitel 6.4 für den dynamischen Zugversuch untersucht. Im Kapitel 6.5 wird dann der Vergleich der dynamischen Prüfergebnisse zum Normzugversuch dargestellt und im Kapitel 6.6 wird die Aussage über Anfangsmodul und Streckgrenze gemacht. Darüber hinaus werden in Kapitel 6.7 Statistiken zu den Versagungsmechanismen (Bruchanalysen, REM-Aufnahmen) diskutiert und bewertet.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick im Kapitel 7.

## 2 THEORETISCHE BETRACHTUNGEN ZUM ZUGVERSUCH

### 2.1 Kraft-Dehnungs-Verhalten von Fasern

Jeder Festkörper verhält sich aufgrund seiner werkstoffmechanischen Eigenschaften differenziert auf äußere mechanische Kräfte. Die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Materialien erfolgt durch das allgemeine Werkstoffgesetz nach Gleichung 2.1 [7].

$$f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T, D)=0 \quad (2.1)$$

Hierbei bedeutet:

$\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] - Spannung

$\varepsilon$  [%] - Dehnung

$\dot{\varepsilon}$  [%/s] - Dehnungsgeschwindigkeit

$t$  [s] - Zeit

$T$  [°C] - Temperatur

$D$  - beschreibt während der Beanspruchung auftretenden strukturellen Veränderungen im Messprobe

Die wichtigste Methode zur Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ist die Kraft-Dehnungs-Messung im Zugversuch. Dabei wird eine meist hantelförmige Messprobe in zwei Klemmen eingespannt, auseinandergezogen und kontinuierlich Zugkraft und Längenänderung der Messprobe erfasst.

Die Zugeigenschaften von Fasern sind ähnlich vielfältig wie ihre chemischen Strukturen. Bereits 1940 ermittelte Meredith die mechanischen Eigenschaften von verschiedenen Fasern im einfachen Zugversuch, welche in Abbildung 2.1 dargestellt sind [45]. Hierbei handelt es sich um klassische textile Fasertypen. In Abbildung 2.2 werden die Zugeigenschaften von synthetischen Fasern der neuen Generation - Hochleistungsfasern wie Hochmodul-Fasern (HM) und Hochfeste-Fasern (HT) - gezeigt.

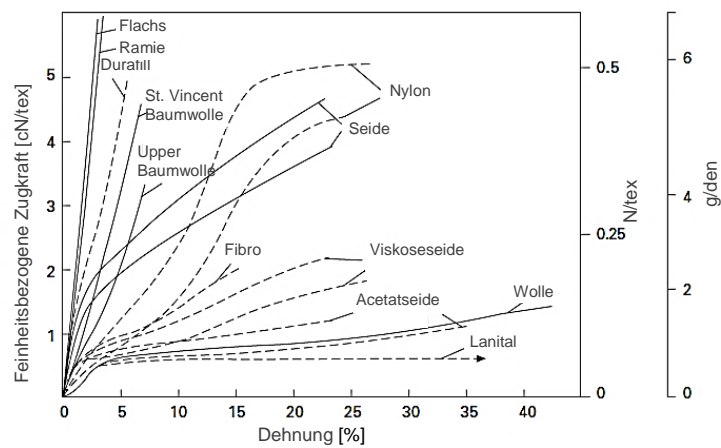


Abbildung 2.1: Kraft-Dehnungs-Kurve von verschiedenen Fasern [45]

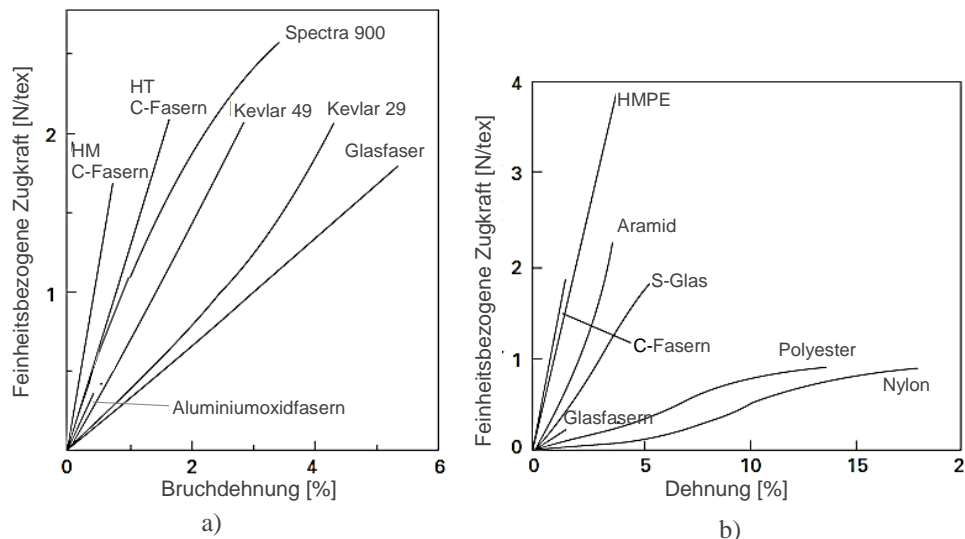


Abbildung 2.2: Typische Kraft-Dehnungs-Kurve von Hochleistungsfasern [45]

Charakteristisch für Hochleistungsfasern sind ihre hohen Festigkeiten und Modulwerte, wie es in der Abbildung 2.2 zu sehen ist. Die konventionellen Fasern (Abbildung 2.1), mit Festigkeitswerten von 0,1 bis 0,6 N/tex besitzen etwa 10-mal niedrigere Festigkeits- und E-Modulwerte gegenüber den Hochleistungsfasern; dabei erreichen die HMPE-Fasern (Hochmodul-Polyethylen) die höchsten Zugkräfte aller Hochleistungsfasern. Auch anorganische Fasern aus Glas und Stahl erfüllen hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften die Anforderungen von Hochleistungsfasern. Zu beachten sind jedoch deren relativ hohen Dichten, die die feinheitsbezogenen Eigenschaftswerte entsprechend beeinflussen.

## 2.2 Aus dem Zugversuch ermittelte Kenngrößen

### 2.2.1 Kraft-Dehnungs-Diagramm

Auf Grundlage des allgemeinen Werkstoffgesetzes (Gleichung 2.1) sind die Ergebnisse des Zugversuches u.a. abhängig von (s.a. Kapitel 2.3):

- einwirkenden äußeren Kräften,
- Längenänderungen,
- Belastungsgeschwindigkeiten,
- Werkstoffspezifischen Eigenschaften,
- Temperatur.

Als Ergebnis des Versuches erhält man Kraft-Dehnung-Kurven, die von der Größe und Form des Probekörpers abhängen. Ein qualitativer Werkstoffvergleich ist dadurch nicht möglich, weshalb die absoluten Parameter üblicherweise für technische Anwendungen auf den Ausgangsquerschnitt  $A_0$  und die Einspannlänge  $l_0$  normiert werden. Bei textilen Anwendungen erfolgt die Angabe feinheitsbezogen (s.a. Kapitel 2.2.3). Aus diesen Kraft-Dehnungs-Diagrammen können wesentliche Informationen für die Prozessführung, die spätere Verarbeitung und Gebrauchseigenschaften gewonnen werden. Nachfolgend sollen die aus den Kraft-Dehnungs-Kurven ermittelten Kenngrößen definiert werden.

### *Feinheitsbezogenes Kraft-Dehnungs-Diagramm*

Die von dem Zugprüfgerät aufgezeichneten Kraft-Dehnungs-Paare werden rechnergestützt in die normierten Größen umgerechnet und für textile Materialien als feinheitsbezogene Kraft-Dehnungs-Kurve ausgegeben [48]. Das Diagramm stellt den Zusammenhang zwischen feinheitsbezogene Zugkraft und Dehnung grafisch dar und dient unter anderem zur Berechnung der Zugarbeit sowie zur Kontrolle des Zugversuches.

In der Abbildung 2.3 kann man sehen, dass die feinheitsbezogene Bruchkraft und Bruchdehnung den Endpunkt der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve charakterisieren. Die feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve die in der Abbildung 2.3 dargestellt ist, kann man nach Literatur [4, 5] in 3 Bereiche aufteilen:

- Bereich I

Der Bereich I wird als Bereich der quasi-elastischen Dehnung beschrieben, in dem die Deformation des Fadenmaterials durch reversible Vorgänge wie z.B. einer Änderung im Bindungswinkel hervorgerufen wird.

- Bereich II

Der mittlere Bereich II kennzeichnet den Vorgang der Verfestigung. Er ist im Diagramm durch die Ausbildung eines Schrumpf-Sattels erkennbar. Hier kommt es zu weiteren strukturellen Veränderungen. Bei polymeren Textilien ist das u.a. eine weitere Orientierung von kristallinen und nichtkristallinen Bereichen. Im weiteren Verlauf treten auf Grund von Platzwechselfvorgängen irreversible Deformationen wie Entknäulung, Verstreckung, Enthakung, Deformation des Netzwerkes sowie der Bruch der gespannten Kettenmoleküle hinzu. Es sind große Kräfte nötig, so dass die Kurve bis zu einem Maximalwert ansteigt. In diesem Bereich kommt es zu den Platzwechselfvorgängen.

- Bereich III

Im Endbereich sind die Ketten so stark beansprucht, dass die Makromoleküle durch Fließvorgänge, ihre Rolle als Spannungsträger verlieren. Es kommt zu irreversiblen strukturellen Veränderungen auf Grund von Gleitprozessen, welche schließlich zum endgültigen Versagen führen.

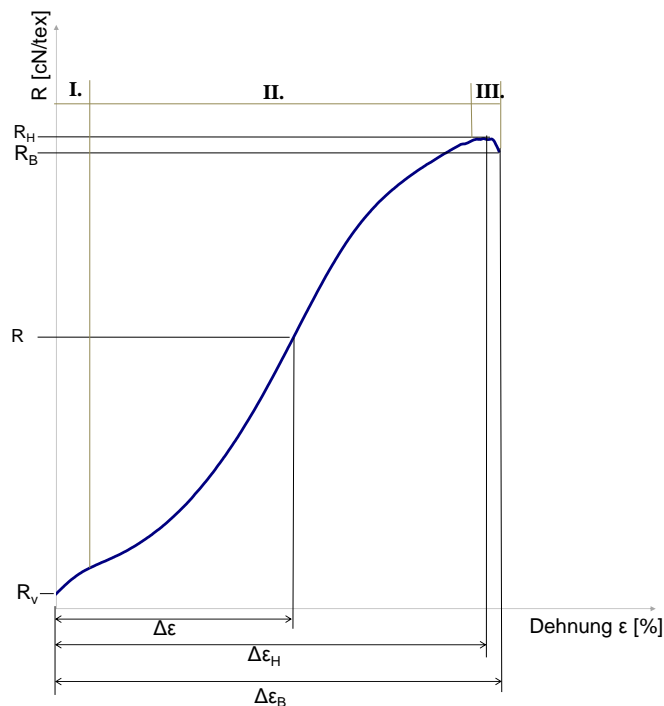


Abbildung 2.3: Feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve [53]

Änderungen des Materialverhaltens treten im Kurvenverlauf oftmals kaum zu Tage. Geringfügige Unterschiede im Kurvenverlauf können durch die stetige Bestimmung der Module deutlicher sichtbar werden, so dass es sich anbietet, kontinuierliche Module-Dehnungs-Kurve zu ermitteln.

Diskrepanzen während der Versuchsdurchführung, wie z.B. unkorrektes Einspannen der Messprobe oder Rutschen der Messprobe in den Klemmen können aus dem Verlauf des Kraft-Dehnungs-Diagramms erkannt werden [16, 48], da es zur Verschiebung des Kurvenverlaufes kommt, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Die Streckung der eingespannten Messprobe und das Rutschen der Messprobe in den Klemmen treten bereits bei sehr kleinen Zugkräften auf und können meistens durch die Vorspannkraft beseitigt werden. Dies gilt auch für die Beseitigung der Faserkräuselung [45, 48].

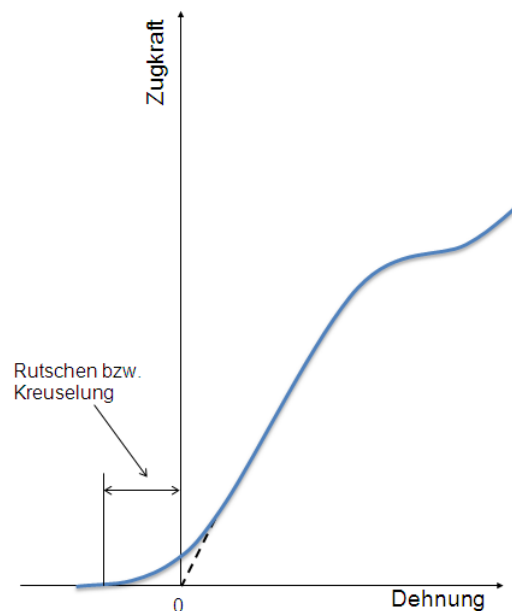


Abbildung 2.4: Kraft-Dehnung-Kurve [45]

### 2.2.2 Zugkraft

Das physikalische Grundprinzip  $actio = reactio$  bildet die Grundlage des mechanischen Formänderungsverhaltens von Materialien. Es ist dadurch gekennzeichnet, dass eine äußere Kraft auf eine Messprobe einwirkt, welche eine Gegenkraft mit gleichem Betrag aber entgegengesetzter Richtung hervorruft. Kraft und Gegenkraft befinden sich solange im Gleichgewicht, bis die äußere Kraft die innere auf Grund irreversibler Materialveränderungen

überwiegt und die Messprobe zerreißt. Somit ist die äußere und messbare Kraft  $F$  zu jedem Zeitpunkt gleich der in der Messprobe wirkenden Kraft und ist ein wesentliches Beurteilungskriterium für jeden Werkstoff. [48, 53] Während des zeitlichen Verlaufes des Zugversuches wirken in der Probe verschiedene charakterisierende Kräfte [16, 53]:

- Die Vorspannkraft  $F_v$ ; ist die zu Beginn des Zugversuches auf die Messprobe einwirkende Kraft, um einheitliche Ausgangsbedingungen für die Prüfung zu schaffen,
- Die Höchstzugkraft  $F_H$ ; ist die während des Zugversuches maximal gemessene Kraft,
- Die Bruchkraft  $F_B$ ; ist die unmittelbar vor dem völligen Trennen der Messprobe gemessene Kraft.

### 2.2.3 Spannung

Wie in Kapitel 2.2.1 bereits erwähnt wurde, ist die Höhe der wirkenden Kräfte auch von der Größe und Form der Probekörper abhängig. Um einen universellen Werkstoffvergleich zu ermöglichen, wird die Zugkraft  $F$  auf den Anfangsquerschnitt  $A$  bezogen (hier geht man davon aus, dass die infolge Querkontraktion auftretende Querschnittsveränderung vernachlässigbar ist) [45, 53].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Hierbei bedeutet:

$\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] - Zugspannung

$F$  [N] - Kraft

$A$  [mm<sup>2</sup>] - Querschnittfläche

In Anlehnung an die in Kapitel 2.2.2 typischen Kräfte werden unter Nutzung der Gleichung 2.2 charakteristische Spannungen definiert:

- Die Vorspannung ist die Zugspannung zu Beginn des Zugversuches.
- Die Höchstzugspannung, auch als Zugfestigkeit bezeichnet, ist die Spannung, welche sich aus der auf den Anfangsquerschnitt bezogenen Höchstzugkraft ergibt.
- Die Bruchspannung  $\sigma_B$  ist die Zugspannung die unmittelbar vor dem Bruch der Messprobe gemessene wird und ergibt sich als Quotient der Bruchkraft und dem Anfangsquerschnitt  $A$  des Messprobe bei Bruch.



Da die Ermittlung der Querschnittsfläche  $A$  für textile Materialien schwierig ist, wird die mittlere tragende Querschnittsfläche  $A_v$  aus der Ausgangsfeinheit  $T_{iv}$  und der Dichte  $\rho_F$  des Faserstoffes nach Gleichung 2.3 berechnet.

$$A_v = \frac{T_{iv}}{\rho_F} \quad (2.3)$$

Hierbei bedeutet:

$A_v$  [m<sup>2</sup>] - Ausgangsquerschnittfläche

$T_{iv}$  [g/1000 m]- Ausgangsfeinheit

$\rho_F$  [g/m<sup>3</sup>] - Faserdichte

In der Textilprüfung hat sich die feinheitsbezogene Normierung der Kräfte durchgesetzt. Im Allgemeinen gilt für die Definition der charakterisierenden Kräfte Gleichung 2.4 [45, 53].

$$R = \frac{F}{T_{iv}} \quad (2.4)$$

Hierbei bedeutet:

$R$  [N/tex] - feinheitsbezogene Zugkraft

$F$  [N] - Kraft

$T_{iv}$  [tex] - Ausgangsfeinheit

Analog zu Höchstzugkraft  $F_H$ , Vorspannkraft  $F_v$  oder Bruchkraft  $F_B$  sind die feinheitsbezogene Kräfte  $R_H$ ,  $R_v$  bzw.  $R_B$  angegeben (Abbildung 2.3). Für die feinheitsbezogene Höchstzugkraft  $R_H$  wird auch die Bezeichnung Feinheitsfestigkeit verwendet. Die feinheitsbezogene Höchstzugkraft  $R_H$  dient insbesondere für den Vergleich des Festigkeitsverhaltens von Garnen mit unterschiedlicher Feinheit. Für den Vergleich verschiedener Fasermaterialien sollten die Spannungen nach Gleichung 2.3 berechnet werden.

#### **2.2.4 Längenänderung**

Die äußere Kraft deformiert gegen den Widerstand der innere Kraft die Messprobe und ruft auf diese Weise eine messbare Formänderung  $\Delta l$  hervor. Am Ende des Zugversuches bewirkt die Zugkraft die Einstellung einer Länge  $l$  der Messprobe zwischen den Klemmen der

Zugprüfmaschine. Die Längenänderung  $\Delta l$  ist die Differenz zwischen der gemessenen Länge  $l$  und der Ausgangslänge  $l_0$  der Messprobe, Gleichung 2.5 [45, 53].

$$\Delta l = l - l_0 \quad (2.5)$$

Hierbei bedeutet:

$\Delta l$  [mm] - Längenänderung

$l$  [mm] - Endlänge

$l_0$  [mm] - Ausgangslänge

Das Verhältnis der Längenänderung zur Ausgangslänge stellt die Definition der Dehnung dar und ist eine dimensionslose Größe, die eine Längenänderung pro Längeneinheit repräsentiert (Gleichung 2.6). Sie wird meistens in % angegeben:

z.B.  $\varepsilon_x = 1\% = 0,01$ , das bedeutet, dass sich eine Messprobe mit einer Ausgangslänge von 1 m um 0,01 m dehnt.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\% \quad (2.6)$$

Hierbei bedeutet:

$\varepsilon$  [%] - Dehnung

$\Delta l$  [mm] - Längenänderung

$l_0$  [mm] - Ausgangslänge

Mit der auf die Ausgangslänge normierten Längenänderung können Proben unterschiedlicher Ausgangslänge miteinander verglichen werden. In Anlehnung an Kapitel 2.2.2 können folgende charakteristische Größen definiert werden [16, 53]:

- Länge  $l_H$ ; Längenänderung  $\Delta l_H$ ; Höchstzugkraftdehnung  $\varepsilon_H$  sind die jeweiligen Größen bei Höchstzugkraft  $F_H$ .
- Länge  $l_B$ ; Längenänderung  $\Delta l_B$ ; Bruchdehnung  $\varepsilon_B$  sind die jeweiligen Größen bei Bruchkraft  $F_B$ .

### 2.2.5 Zugarbeit

Aus den Kraft-Längenänderungs-Kurven kann die zur Verformung geleistete Arbeit ermittelt werden:

$$W = \int F \cdot dl \quad (2.7)$$

Hierbei bedeutet:

$W$ [J]	- Arbeit
$F$ [N]	- Kraft
$dl$ [mm]	- Differentialquotient der Länge $l$

Wie in Kapitel 2.2.3 dargelegt wurde, ist es in der Textilprüfung üblich feinheitsbezogene Kraft-Dehnungs-Kurven auszuwerten. Für die Vergleichbarkeit der Verformungs-/Brucharbeit unterschiedlicher textiler Materialien ist es notwendig, die spezifische oder massebezogene Arbeit einzuführen. Nach Gleichung 2.8 definiert sie sich aus:

$$w = \frac{W_B}{T_{iv} \cdot l_0} \quad (2.8)$$

Hierbei bedeutet:

$w$ [Nm/g]	- spezifische (massebezogene) Zugarbeit
$W_B$ [J]	- Brucharbeit
$T_{iv}$ [tex]	- Ausgangsfeinheit
$l_0$ [mm]	- Ausgangslänge

Beim Integral bis zum Bruch spricht man von der geleisteten Brucharbeit  $W_B$  und beim Integral bis zur Höchstzugkraft von Höchstzugkraft-Arbeit  $W_H$ . Graphisch beschreibt die Fläche unter der Kraft-Längenänderungs-Kurve die geleistete Arbeit, wie in Abbildung 2.5. straffiert dargestellt ist. [21, 45, 53]

Die Arbeit  $W$  kann bei rechnergesteuerten Zugprüfmaschinen über die Software direkt als Kennwert ausgegeben werden. Bei weniger komfortablen Prüfmaschinen muss sie durch Ausplanimetrieren der Fläche unter der Kraft-Dehnungs-Kurve, wie in der Abbildung 2.5 schematisch Dargestellt ist, ermittelt werden [45, 53].

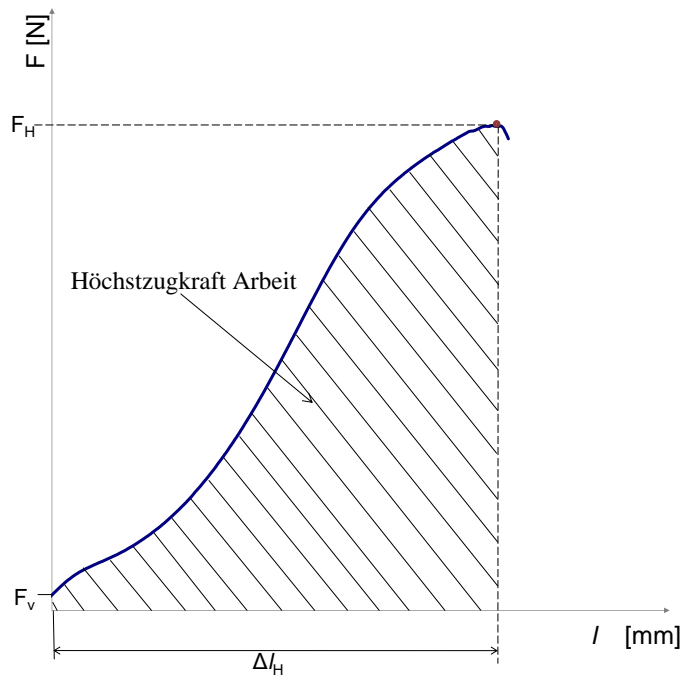


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der Höchstzugkraft-Arbeit [21]

### 2.2.6 Modul

Stoffe, welche eine durch äußere Kräfte geleistete Arbeit als reversible Formänderungsenergie speichern, verhalten sich elastisch. Das heißt, dass Kraft und Verformung in unmittelbarer Wechselwirkung stehen. Der Zusammenhang wird im Hookschen Gesetz beschrieben [2, 53, 73]:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon_{el} \quad (2.9)$$

Hierbei bedeutet:

$\sigma$  [N/mm<sup>2</sup>] - Spannung

$E$  [N/mm<sup>2</sup>] - Elastizitätsmodul

$\varepsilon_{el}$  [-] - elastische Dehnung

Die elastischen Verformungen beruhen auf einer reversiblen Verschiebung der Atome und Moleküle aus ihrer Gleichgewichtslage, somit ist die elastische Konstante  $E$  ein Maß für den aus den Bindungskräften resultierenden Widerstand und stellt als Elastizitätsmodul  $E$  eine Werkstoffkenngröße dar. Bei gleicher Zugspannung  $\sigma$  wird demnach ein Körper mit einem höheren Modul (Abbildung 2.6, Elastizitätsmodul 1) weniger verformt als einer mit niedrigem Modul (Abbildung 2.6, Elastizitätsmodul 2), was man in der Abbildung 2.6 sehen kann.

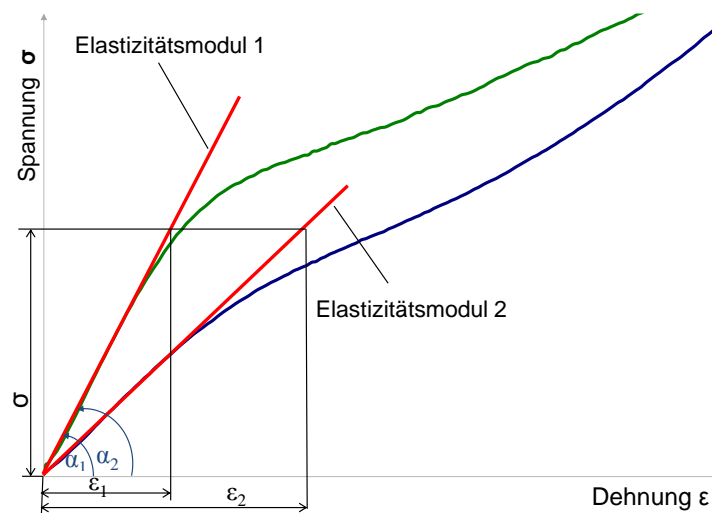


Abbildung 2.6: Zugelastizitätsmodul [53]

Aufgrund der schwierig zu ermittelnden Spannung  $\sigma$  wird in der Textiltechnik statt dieser die feinheitsbezogene Zugkraft  $R$  verwendet, um den Elastizitätsmodul  $m$  zu definieren, Gleichung 2.10. Auf Grund der in der Textilprüfung üblichen feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Darstellung ergeben sich für die Modulbestimmung an textilen Materialien folgende Unterschiede. Analog zu kompakten Materialien liegt ebenfalls ein elastisches Verhalten der textilen Materialien vor (Gleichung 2.10):

$$R = m \cdot \varepsilon_{el} \quad (2.10)$$

Hierbei bedeutet:

$R$  [N/tex] - feinheitsbezogene Kraft

$m$  [N/tex] - Elastizitätsmodul

$\varepsilon_{el}$  [-] - elastische Dehnung

Der Modul  $m$  wird analog der feinheitsbezogenen Zugkraft in N/tex angegeben. Die Grenze der elastischen Deformation ist bei Textilien keine feste Materialkenngröße. Sie muss speziell für das jeweilige textile Material in der Elastizitätsprüfung bestimmt werden [53]. Der in der Literatur [2] postulierte Gültigkeitsbereich der linearen Viskoelastizitätstheorie liegt für Polymere zwischen 0 % und 0,5 % Dehnung.

Aus den Gleichungen 2.2 bis 2.4 sowie 2.9 bis 2.10 ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Elastizitätsmodul  $E$  und textilen Elastizitätsmodul  $m$ :

$$\sigma = R = \frac{F}{T_{tv}} = E \cdot \varepsilon \quad (2.11)$$

$$E = m = \frac{R}{\varepsilon} = \tan \alpha \quad (2.12)$$

Hierbei bedeutet:

$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	- Spannung
$R$ [N/tex]	- feinheitsbezogene Kraft
$F$ [N]	- Kraft
$T_{tv}$ [tex]	- Ausgangsfeinheit
$E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	- Elastizitätsmodul
$\varepsilon$ [-]	- Dehnung
$m$ [N/tex]	- Elastizitätmodul
$\tan \alpha$	- Winkelfunktion

Die Modul-Bestimmung aus dem feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Diagramm kann nach unterschiedlichen Methoden erfolgen, z.B. durch die Bestimmung des Anstieges der Tangente im Punkt  $(\varepsilon, R)$ , oder die Bestimmung des Anstieges der Sekante zwischen den Punkten  $(0, 0)$  und  $(\varepsilon, R)$  [47, 53, 58, 72].

- *Tangentenmodul*

Die Bestimmung des Tangentenmodules erfolgt durch das Anlegen einer Tangente in einem definierten Punkt der Kurve und anschließender Bestimmung des Tangentenanstieges. Er ist, vorwiegend aus der englischsprachigen Literatur, auch als Young-Modul  $E_Y$  (eng. Young's modulus) bekannt und ist im elastischen Bereich der Spannungs-Dehnungs-Kurve definiert, gilt streng genommen nur für die Hooksche Elastizität. Da dies bei Textilien meist nicht vorausgesetzt werden kann, wird entweder der Anfangsmodul  $m_i$  (Abbildung 2.7a) oder der Modul  $m_x$  (Abbildung 2.7b) für eine bestimmte vorgegebene Dehnung  $\varepsilon_x$  im weitgehend geradlinig verlaufenden Anfangsteil der Kurve, in dem sich die Messprobe elastisch verhält, z.B. als Modul  $m_{2\%}$ , bei  $\varepsilon = 2\%$ , angegeben. Häufig wird der Anfangsmodul bei Fasern als Elastizitätsmodul angegeben. [47, 53, 72]

Der Anfangsmodul  $m_i$  entspricht dem Anstieg der Tangente an die feinheitsbezogene Kraft-Dehnungs-Kurve zu Beginn der Zugbeanspruchung und wird in Abbildung 2.7a dargestellt. In der Prüfpraxis entspricht dies dem Schnittpunkt der Kurve mit der Ordinate bei  $\varepsilon = 0$ , bei der die Messprobe unter der feinheitsbezogene Vorspannkraft  $R_v$  steht. Der Anfangsmodul kann aus der Gleichung 2.10 berechnet werden.

Da die meisten Textilien während der Verarbeitung und im Gebrauch einer in diesem Bereich liegenden Beanspruchung ausgesetzt sind, stellt dieser Anfangsmodul einen wichtigen Kennwert zur Fasercharakterisierung dar [53].

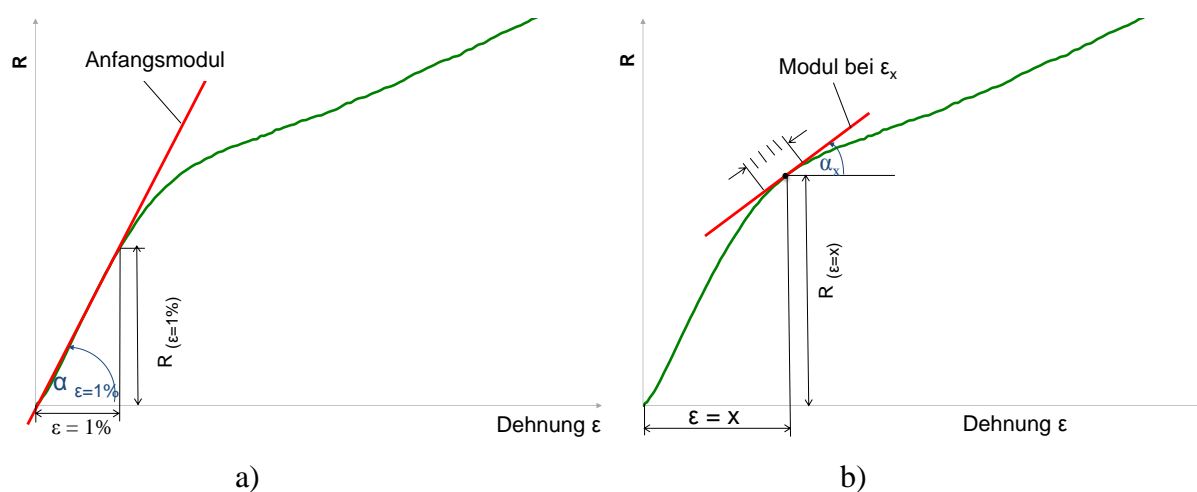


Abbildung 2.7: Tangentenmodulbestimmung; a) Anfangsmodul b) Modul bei  $\varepsilon_x$  [53, 73]

- *Sekantenmodul*

Der Sekantenmodul  $m_s$  ist der Anstieg der Sekante zwischen zwei beliebigen Punkten der Kraft-Dehnungs-Kurve, siehe Abbildung 2.8a. Je kleiner der Abstand beider Punkte auf der Kurve ist, umso mehr nähert sich der Sekantenmodul dem Tangentenmodul. Der Sekantenmodul wird in dem Bereich bestimmt, der für das Verarbeitungs- oder das Gebrauchsverhalten von Bedeutung ist. Üblicherweise wird der erste Sekantenpunkt auf den Beginn der Kurve und der zweite als Punkt bei einer bestimmten Dehnung festgelegt, welche als Index angegeben wird. Zeitweise wird der Sekantenmodul zwischen dem Beginn des Zugversuchs und dem Punkt, an dem die Messprobe reißt als sogenannter mittlerer Sekantenmodul (Abbildung 2.8b) angegeben. Dieser besitzt bezüglich des Deformationsverhaltens aber keine große Aussagekraft. Der Sekantenmodul wird nach

Gleichung 2.13 aus der Differenz der feinheitsbezogenen Zugkräfte und der Differenz der Dehnung beider Sekantenpunkte berechnet. [47, 53, 73]

$$m_s = \frac{R_2 - R_1}{\frac{\varepsilon_2 - \varepsilon_1}{100}} = \frac{\Delta R \cdot 100}{\Delta \varepsilon} \quad (2.13)$$

Hierbei bedeutet:

- $m_s$  [N/tex] - Sekantenmodul
- $R_2$  [N/tex] - feinheitsbezogene Zugkraft bei Punkt 2
- $R_1$  [N/tex] - feinheitsbezogene Zugkraft bei Punkt 1
- $\varepsilon_2$  [%] - Dehnung bei Punkt 2
- $\varepsilon_1$  [%] - Dehnung bei Punkt 1
- $\Delta R$  [N/tex] - feinheitsbezogene Zugkraftänderung
- $\Delta \varepsilon$  [%] - Dehnungsänderung

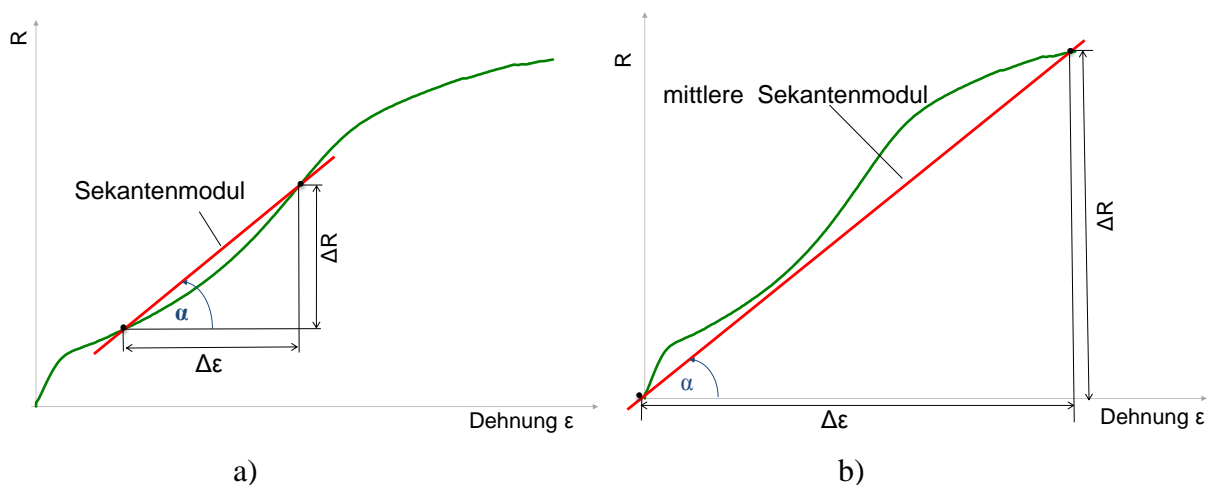


Abbildung 2.8: Sekantenmodul: a) Definiert, b) mittlerer Sekantenmodul [53]

### 2.2.7 Dehnrage

Die Dehnrage stellt einen Parameter dar, welcher das Werkstoffverhalten direkt beeinflusst. Da er jedoch aus verschiedenen variablen Versuchsgrößen definiert ist, soll er an dieser Stelle näher diskutiert werden.



Der Einfluss der Versuchsgeschwindigkeit auf das Werkstoffverhalten ist seit langem bekannt. Untersuchungen bei veränderten Versuchsgeschwindigkeiten sind für die Interpretation des dynamischen Werkstoffverhaltens unerlässlich. Dieses Werkstoffverhalten ist unter anderem bei Hochgeschwindigkeitsbearbeitungsmaschinen, welche auch für die Herstellung textiler Materialien zunehmend Anwendung finden, oder für schlagartige Belastungsfälle im Gebrauch von Bedeutung. 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 muss eine neue Größe definiert werden, welche die Dehnung pro Zeiteinheit in der Probe berücksichtigt. [44] Nach [1, 44, 54, 74] ist die Dehngeschwindigkeit  $\dot{\epsilon}$  nach Gleichung 2.14 definiert aus:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{l_0} \cdot 100 \quad (2.14)$$

Hierbei bedeutet:

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

bzw. aus

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{l_0} \quad (2.15)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{\epsilon}$ [s <sup>-1</sup> ]	- Dehnrage
$v_0$ [m/s]	- Abzugsgeschwindigkeit
$l_0$ [m]	- Einspannlänge

Zur besseren Vergleichbarkeit der beiden Größen wird für die Dehngeschwindigkeit nach Gleichung 2.15 auch der Begriff Dehnrage genutzt; er wird nachfolgend in der Arbeit angewendet. In Abbildung 2.9 wurde der Zusammenhang der einzelnen Messgrößen visualisiert. Es ist deutlich erkennbar, dass durch veränderte Einspannlängen bei gleicher Abzugsgeschwindigkeit in der Messprobe unterschiedliche Dehnraten impliziert werden.

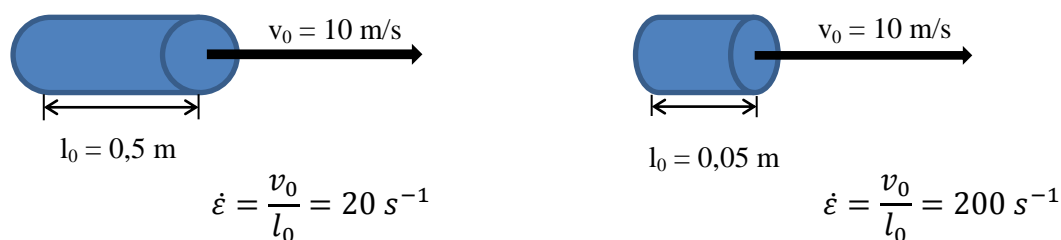


Abbildung 2.9: Zusammenhang von Dehnrates, Abzugsgeschwindigkeit und Einspannlänge [20]

Die Kraft-Dehnungseigenschaften können zum einen bei unterschiedlichen Dehngeschwindigkeiten ermittelt werden. Zum anderen ist je nach Beanspruchungsart und Höhe der Dehnrates das geeignete Prüfverfahren auszuwählen. In Abbildung 2.10 ist dieser Zusammenhang dargestellt [7].

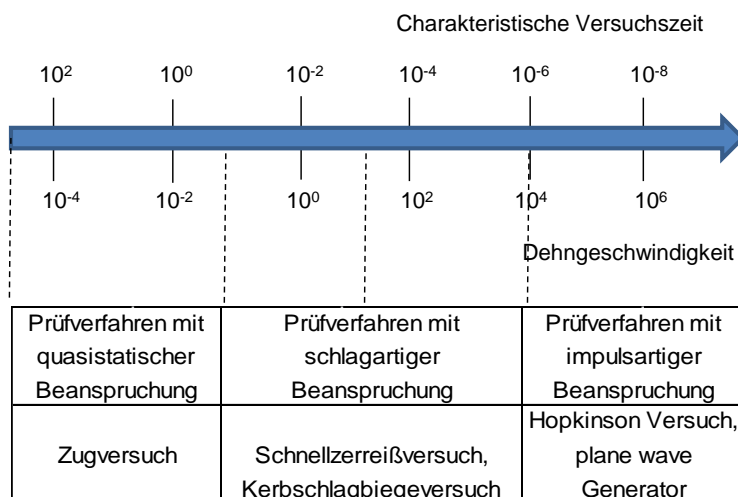


Abbildung 2.10: Auswahl des Prüfverfahrens in Abhängigkeit von der Dehngeschwindigkeit und Beanspruchungsart [7]

In der Tabelle 2.1 sind noch einmal alle Parameter mit ihren Bezeichnungen und Einheiten, die häufig in der Literatur angegeben werden, zusammengestellt. Hierin soll auf den irreführenden Gebrauch der Einheit N/tex hingewiesen werden. Die Verwendung der Einheit Nm/g oder J/g stellt einen eindeutigen Bezug zum Parameter Arbeit her, wie bereits im Kapitel 2.2.5 dargelegt wurde.

Tabelle 2.1: Parameter und ihre Einheiten

Parameter	Bezeichnung	Einheit
Kraft	$F$	N
Spannung	$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>
Feinheitsbezogene Kraft	$R$	N/tex
Längenänderung	$\Delta l$	mm
Dehnung	$\varepsilon$	%
Spezifische Arbeit	$w$	N/tex
Elastizitätsmodul	$E$	N/tex
Dehnrate	$\dot{\varepsilon}$	s <sup>-1</sup>

### 2.3 Einflussgrößen beim Zugversuch

Die zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Fasern oder Garnen verwendeten Kenngrößen wie Festigkeit  $R$ , Dehnung  $\varepsilon$  und E-Modul  $m$  sind keine absolute stoffspezifische Kennwerte, sondern hängen von den Umgebungs- und Versuchsbedingungen ab. Die Berücksichtigung dieser Einflussgrößen ist schon bei den quasistatischen Prüfungen des mechanischen Formänderungsverhaltens von besonderer Bedeutung, da die Einflussgrößen die Versuchsergebnisse verfälschen können. Zur Gewährleistung der erforderlichen Messsicherheit und Reproduzierbarkeit müssen deshalb zur Prüfung des Formänderungsverhaltens vor allem die folgenden Einflussgrößen beachtet und zur Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse konstant gehalten werden. [53] Nachfolgend werden nur die in der Abbildung 2.11 dargestellten Einflussgrößen der Prüfmaschine und der Prüfbedingungen diskutiert. Einflussgrößen, die sich aus den Umgebungsbedingungen (wie Temperatur, Luft, Gas, Wasser usw.) ergeben können, werden nicht betrachtet. Alle Prüfungen, die im Kapitel 6 dargestellt sind werden bei Normalprüfklima (ISO 139) und mit einer Vorspannkraft von 0,5 cN/tex durchgeführt.

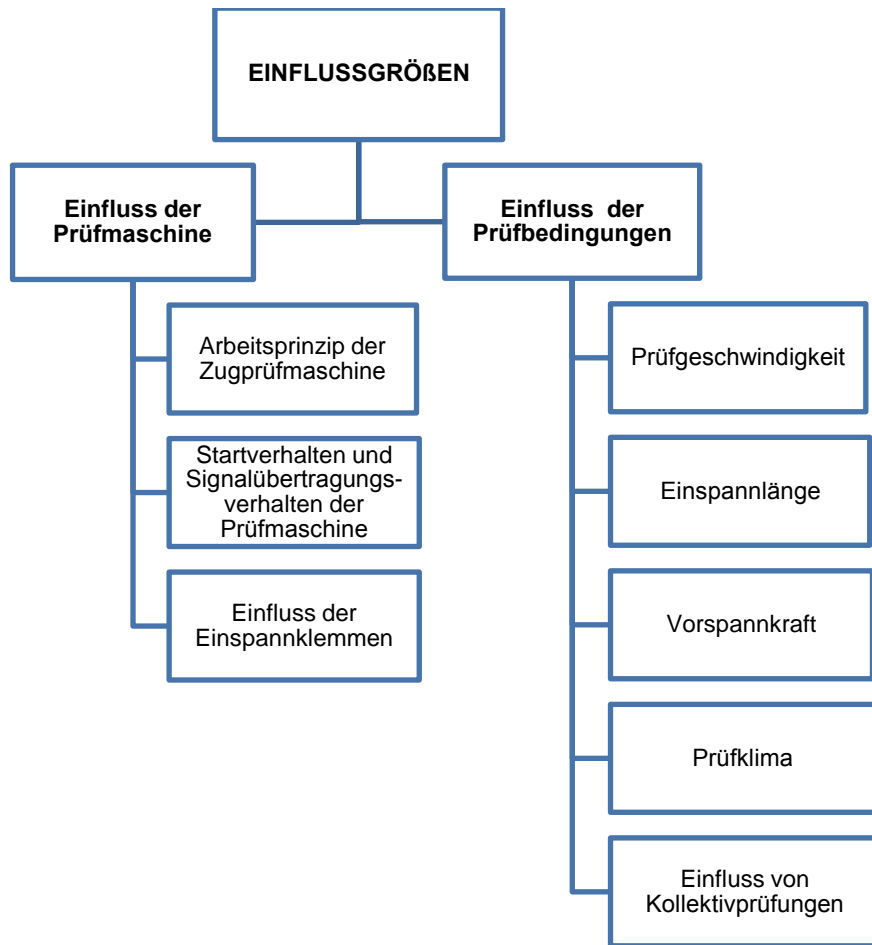


Abbildung 2.11: Darstellung der Einflussgrößen beim Zugversuch

### 2.3.1 Einfluss der Prüfmaschine

#### *Arbeitsprinzip der Zugprüfmaschine*

Die klassischen Zugprüfmaschinen arbeiten nach einem der folgenden 3 Prinzipien [15, 45, 53]:

- Zugprüfmaschine nach dem Prinzip der konstanten Geschwindigkeit der ziehenden Klemme (engl.: constant rate of travel, CRT),
- Zugprüfmaschine mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit (engl.: constant rate of loading, CRL),
- Zugprüfmaschine mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit bzw. konstanter Dehnungszunahme (engl.: constant rate of specimen extension, CRE).

Bei der Zugprüfmaschine nach dem Prinzip der konstanten Geschwindigkeit der ziehenden Klemme bewegt sich die untere Klemme mit konstanter Abzugsgeschwindigkeit nach unten. Hier sind die Längenänderung je Zeiteinheit und auch die Kraftänderung je Zeiteinheit keine konstanten Größen.

Bei der Zugprüfmaschine mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit wird die Probe unter konstanter Belastungszunahme je Zeiteinheit beansprucht. Diese Zugprüfmaschinen sind nur für Messproben geeignet, bei deren Zugbelastung kleine bis mittlere Kräfte aufzubringen sind, da sich bei höheren Belastungen der Messfehler aufgrund zu hohe Reibungskräfte vergrößert.

Die Prüfmaschinen mit den oben beschriebenen zwei Prüfprinzipien sind nach den gültigen Normen nicht mehr zugelassen. Auf Grund messtechnischer Vorteile sind ausschließlich die Prüfmaschinen mit der konstanten Verformungsgeschwindigkeit zu benutzen, wo die Messprobe um konstante Beträge je Zeiteinheit gedehnt und damit mit konstanter Dehnungsgeschwindigkeit beansprucht wird. [15, 53]

Da die Fasern ein nicht lineares Kraft-Dehnungs-Verhalten haben, erhält man bei Anwendung unterschiedlicher Prüfverfahren Unterschiede in den Kraft-Dehnungs-Kurvenverläufen (vgl. Abbildung 2.12). Bei dem Prüfverfahren mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit, kann die Kraft sinken (abfallen), wenn die Dehnung steigt. Bei der Prüfung mit konstanter Belastungsgeschwindigkeit ist das eigentlich nicht möglich, weil die Kraft durch den ganzen Prüfverlauf ansteigen muss. [45]

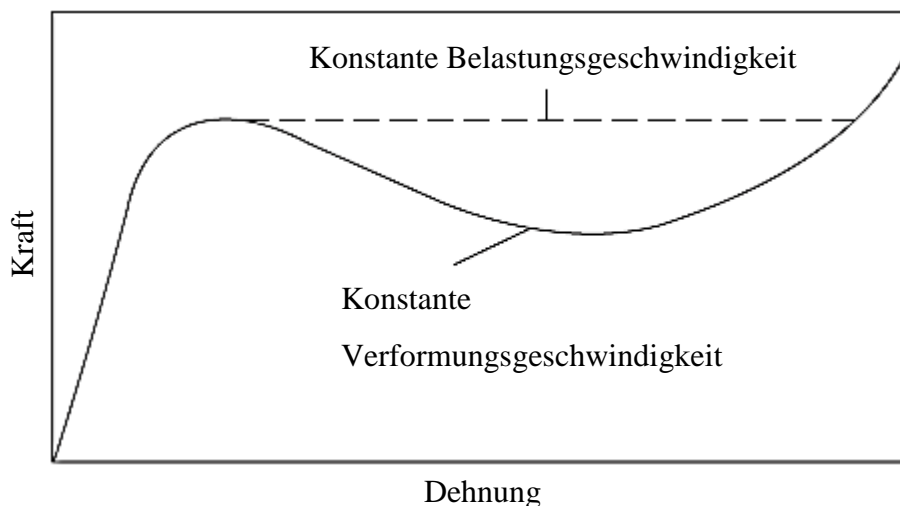


Abbildung 2.12: Unterschiede im Kurvenverlauf bei CRE und CRL Prüfverfahren [45]

### ***Startverhalten und Signalübertragungsverhalten der Prüfmaschine***

Beim Startverhalten der Prüfmaschine ist zu beachten, dass jede Zugprüfmaschine je nach technischem Stand eine unterschiedliche Warmlaufphase hat, die gegebenenfalls vor Durchführung der ersten Prüfungen experimentell ermittelt werden muss. Diese gewisse Warmlaufzeit ist auch beim Wechsel eines Kraftmesswandlers einzuhalten. [53]

### ***Einfluss der Einspannklemmen***

Die richtige Auswahl der Klemmen und Klemmenbeläge ist entscheidend für die möglichst vollständige Vermeidung von Prüf Fehlern wie Klemmenbruch und Klemmenschlupf. Insbesondere für die Prüfung von textilen Materialien erfordert die Wahl der Klemmen einen hohen Aufwand. Der Einfluss der Einspannklemmen kann je nach zu prüfendem Textil sehr gravierend sein. Von den Herstellern werden für jede ihrer Zugprüfmaschine eine Vielzahl von Einspannklemmen und Klemmeneinlagen angeboten. Es können Umschlingungsklemmen bis zu speziellen Backenklemmen mit profilierten Oberflächen, Horizontalklemmen oder vertikale Backenklemmen mit unterschiedlichen Klemmlängen sein. Der Klemmdruck wird extern durch pneumatischen bzw. hydraulischen Druck oder mechanisch (selbstspannende Einspannklemmen) erzeugt.

Beim Einspannen der textilen Messproben ist darauf zu achten, dass:

- sich keine Kringel bilden,
- keine Drehungen verlorengehen,
- die Messprobe zur Vermeidung von Drallaufschüben nicht über die Kante gezogen wird und
- die Messprobe im Beanspruchungsbereich nicht mit ungeschützten Händen berührt wird.

Die Beschaffenheit der Klemmen, der Belag der Klemmbacken sowie der Klemmdruck müssen so gewählt werden, dass [16, 48, 53, 66, 82]:

- die Messprobe bis zum vorderen Klemmenrand geklemmt wird,
- die Krafteinleitung möglichst „sanft“ erfolgt und die Flächenpressung reduziert wird (z.B. Einsatz großer Backenlänge),
- die Messprobe korrekt und ohne Beschädigung geklemmt wird,
- die Messprobe bis zum Probenbruch sicher und rutschfrei gehalten wird.

Bei textiltechnologischen Ringversuchen kann immer wieder festgestellt werden, dass trotz Verwendung von Prüfgeräten des gleichen Gerätetyps von verschiedenen Laboratorien besonders bezüglich der Dehnung unterschiedliche Werte geprüft werden. In [22] wird darauf verwiesen, dass die Dehnungsermittlung vor allem bei gering verstreckten Material schwierig ist und ihre Ursache in der diffizilen Begrenzung der gewählten Einspannlänge zu suchen ist. Versuchungsergebnisse an unverstreckten Material zeigten, dass nahezu 75 % des in den Klemmen befindlichen Materials beim Prüfen aus den Klemmen herausgezogen wird [22], weil sich der Streckvorgang in die Klemmen hinein fortsetzt, wie in Abbildung 2.13 schematisch dargestellt ist. Der daraus resultierende Messfehler ist bei der Zugprüfung nicht zu vermeiden und vergrößert sich noch beträchtlich, wenn man die Einspannlänge vom 500 mm auf 100 mm oder gar auf kleinere Einspannlängen verringert. In der Literatur [3, 19, 53] wird dieser Messfehler auch als Klemmdehnung bezeichnet. Das Herausfließen des Materials aus den Klemmen, hat zur Folge, dass sich dadurch auch die Messprobendicke in den Klemmen verkleinert. Bei Hydraulik- und Pneumatik-Klemmen bleibt der Klemmdruck konstant, weil der Druckerzeuger kontinuierlich Öl oder Luft nachfördert. Bei Schraubklemmen reduziert sich der Klemmdruck entsprechend der Steifigkeit und elastischen Rückverformung der Klemmen etwas [82].

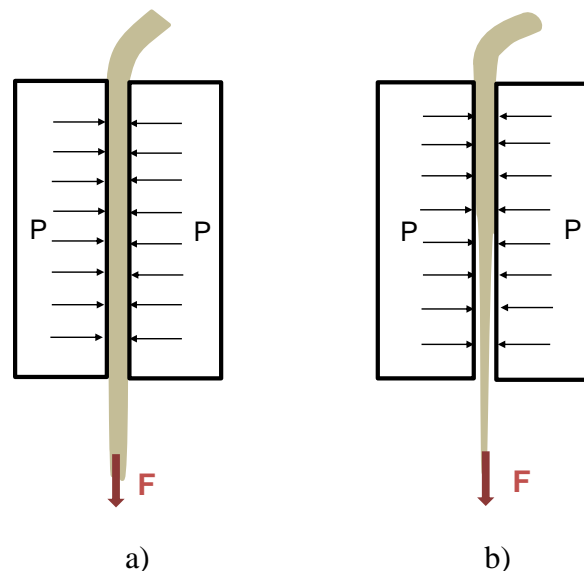


Abbildung 2.13: a) Entstehen und b) Verlauf des Klemmfehlers [19]

### ***2.3.2 Einfluss der Prüfbedingungen***

#### ***Einfluss der Prüfgeschwindigkeit***

Wie in Kapitel 2.2.7 dargelegt wurde, hat die Prüfgeschwindigkeit unmittelbaren Einfluss auf die in der Probe anliegende Dehnrage, so dass sie sich auf die während der Belastung verändernden energetischen Bindungsverhältnisse auswirkt. Im Vergleich zu den unter langsamen Verformungsgeschwindigkeiten beanspruchten Textilien werden bei SchnellzerreiBversuchen in der Regel höhere Festigkeitswerte und geringere Dehnungswerte gemessen (Kapitel 4). Aber auch im quasistatischen Zugversuch wird mit zunehmender Dehnrage eine höhere Höchstzugkraft ermittelt. Die Prüfgeschwindigkeit kann bei großen Unterschieden auch den Verlauf der Kraft-Dehnungs-Kurve beeinflussen [53].

Bei sehr hohen Dehnraten hat das Material kaum Zeit, auf die einwirkenden Kräfte zu reagieren, die Kraft-Dehnungs-Kurve steigt steil an und die Messprobe reißt bereits bei geringer Dehnung. Eine langsamere Dehnung der Messprobe erlaubt in größerem Maße eine Umorientierung der polymeren Molekülketten, man erhält dabei dann ein geringeres Modul und eine höhere Zugdehnung. [4] Die Ergebnisse unserer eigenen Messungen zur Abhängigkeit des Kraft-Dehnungs-Verhalten von der Prüfgeschwindigkeit werden in Kapitel 6 vorgestellt.

#### ***Einspannlänge***

Mit zunehmender Einspannlänge nimmt die Festigkeit im Mittel einer Messreihe hyperbolisch ab, da die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Schwachstellen bzw. Oberflächendefekten in der Messprobe bei längeren Proben größer ist als bei kürzeren [59]. So verweisen Autoren in der Literatur [9, 11, 33, 39, 45, 61, 62], dass die Zugfestigkeit, Reißdehnung und Elastizitätsmodul der untersuchten Fasern von der Einspannlänge abhängig sind.

Um reproduzierbare Prüfergebnisse zu erhalten, sind deshalb die normativ vorgeschriebenen Einspannlängen einzuhalten. Die Ergebnisse unserer eigenen Messungen zur Abhängigkeit des Kraft-Dehnungs-Verhalten von der Einspannlänge werden in den Kapiteln 6.2.1 und 6.3.1 vorgestellt.



### ***Vorspannkraft***

In der Textilprüfung von Garnen ist es üblich, das Garn vor der Prüfung mit einer Vorspannung zu belasten. Dadurch soll gewährleistet werden, dass weitestgehend alle Einzelfilamente schon zu Versuchsbeginn belastet sind und Einspanndifferenzen korrigiert werden. Es kann auch festgestellt werden, ob beim Einspannen des Garnes in die Klemmen die Vorspannkraft bereits überschritten wurde. Nach [2] birgt diese Methode jedoch die Gefahr, dass die Belastung schon zu Beginn des Versuches außerhalb des linear-elastischen Bereiches des Materials liegt. Die Höhe der Vorspannkraft hat keinen Einfluss auf den Betrag der gemessenen Kräfte. Verändert wird aber infolge der Vordehnung die gemessene Gesamtdehnung und zwar wird die Höchstzugkraft Dehnung bzw. Bruchdehnung um die durch die Vorspannkraft erzeugte Dehnung reduziert. [21] Die Vorspannkraft wird auf die Messprobe durch langsame Bewegung der ziehenden Klemmen aufgebracht und sobald die vorgegebene Vorspannkraft erreicht ist, erfolgt die Bestimmung der Dehnung. Bei größeren Vorbelastungen verändert sich aufgrund der Querschnittsverringeringung auch die Feinheit der Probe. Deshalb sollte die in den Normen festgelegte Größe der Vorspannkraft eingehalten werden. Bei Abweichungen von der Norm muss das zudem hinreichend dokumentiert werden. In modernen Prüfmaschinen erfolgt das Aufbringen der Vorspannung computergesteuert, so dass der Vordehnungseffekt softwareseitig bei der Auswertung berücksichtigt wird. [53] Alle Prüfungen, die im Kapitel 6 dargestellt sind werden mit einer Vorspannkraft von 0,5 cN/tex durchgeführt.

### ***Prüfklima***

Viele Eigenschaften der Faserstoffe werden in einem beachtlichen Maße durch die vorherrschenden Klimaparameter verändert. Wird ein textiles Material in einem Raum ausgelegt, so gibt es entweder Feuchte ab, wenn die Luft im Raum trockener ist, oder es nimmt Feuchte auf, wenn es im Raum feuchter ist. Nach einer bestimmten Zeit hat sich ein Gleichgewichtszustand zwischen der Luftfeuchte im Raum und der Feuchte im Textil eingestellt. [45, 53]

Wegen der Einlagerung der Wassermoleküle zwischen die Polymerketten der Faser verändert sich das Gewicht, die Abmaße, die textilphysikalischen und die textilchemischen Eigenschaften sowie die damit im Zusammenhang stehenden vielfältigen Gebrauchseigenschaften der Textilien. Die Fasereigenschaften verändern sich umso stärker, je

mehr Wassermoleküle, sich in die Fasern einlagern können. D.h. die durch die chemische und morphologische Struktur bedingte unterschiedliche Feuchteaufnahmefähigkeit der verschiedenen Faserstoffe ist für das Ausmaß der Eigenschaftsveränderungen des jeweiligen Faserstoffs verantwortlich. Die Eigenschafts-Feuchte-Kurven verlaufen im Bereich zwischen etwa 30 % und 70 % relativer Luftfeuchte annähernd linear, dann aber im Bereich hoher Luftfeuchte bewirken schon kleine Luftfeuchteänderungen starke Veränderungen der Faserstofffeuchte. [34, 53]

Die Temperatur wirkt sich im Bereich der üblichen Raumtemperaturen nicht unmittelbar auf die Faserstoffeigenschaften aus, sofern es sich nicht um Prüfungen im höheren Temperaturbereich handelt. Erst oberhalb der Umwandlungspunkte 2. Ordnung (Glasübergangstemperatur) der Faserstoffe verändert eine Temperaturänderung auch deutlich die Faserstoffeigenschaften. Jedoch verändert sich die Feuchteaufnahmefähigkeit der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur, was wiederum Eigenschaftsveränderungen nach sich ziehen kann. [34, 53]

#### *Unterschied relative und absolute Luftfeuchte*

Absolute Luftfeuchte ist stark temperaturabhängig, d.h. kalte Luft kann absolut weniger Wasserdampf aufnehmen. Dadurch entspricht die gleiche Wasserdampfmenge bei tiefen Temperaturen einer höheren relativen Luftfeuchte und nimmt mit steigenden Temperaturen ab. [34]

Diese Temperatur-Feuchte-Abhängigkeiten können die Reproduzierbarkeit der Prüfergebnisse maßgeblich vermindern. Um diesen Klimaeinfluss auszuschließen, sehen alle Prüfvorschriften vor, dass die zu prüfenden textilen Materialien vor der Prüfung an ein vereinbartes Klima, meist das Normalklima DIN EN 139 [13] (Temperatur  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , relative Luftfeuchte  $65\% \pm 2\%$ ), anzugleichen und die Prüfungen selbst in diesem Klima durchzuführen sind [13, 45, 53]. Sämtliche Kenngrößen für die mechanischen Eigenschaften lassen sich aus diesen Gründen nur unter Kenntnis der Versuchsbedingungen oder unter definierten Standardbedingungen sinnvoll prüfen und vergleichen.

Alle Prüfungen, die im Kapitel 6 dargestellt sind werden bei Normalprüfklima (DIN EN 139) mit Temperatur  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  und relative Luftfeuchte  $65\% \pm 2\%$  durchgeführt.

### ***Einfluss von Kollektivprüfungen***

Bei der Prüfung von Filamentgarnen ist es üblich, das gesamte Filamentbündel zu prüfen, weil in der Regel das Filamentbündel und nicht die Einzelfilamente verwendet werden. Man spricht von einer Kollektivprüfung. Die Filamentgarne bestehen aus mehreren hundert bis tausend einzelnen Filamenten; wobei nicht alle Einzelfilamente gleichmäßig gestreckt sind (Abbildung 2.14). Dieses führt, bei Zugbelastung eines Filamentgarnes zu unterschiedlichen Dehnungen in den einzelnen Filamenten. Deswegen können höher belastete Fasern unter Umständen versagen, bevor alle Fasern eines Bündels an der Lastabtragung beteiligt sind. Versagen einzelne Fasern, so muss die frei werdende Kraft durch die noch intakten Fasern aufgenommen werden. Können diese die zusätzliche Beanspruchung nicht mehr ertragen, so wird das Versagen des ganzen Bündels eingeleitet. Deshalb liefern die Ergebnisse von Filamentbündelprüfungen, kaum Angaben über die Eigenschaften der Einzelfilamente. Im praktischen Versuch kann die Filamentgarnfestigkeit nicht mit der Summe der Einzelfilamentenfestigkeit gleichgesetzt werden. Die Filamentbündelfestigkeit ist kleiner als die Summe der Einzelfilamentfestigkeit und ist abhängig von der Einspannlänge und der Streuung der Höchstzugkraftdehnung aller Filamente. Durch die verhinderte Schwingungsantwort des Kraftwandlers oder durch Schwingungen, sind die erhaltenen Angaben aus der Faserbündelprüfung bis zu einem gewissen Grade verschleiert. Das heißt, wenn einzelne Fasern in einem Bündel brechen, wird in der Prüfeinrichtung eine Schwingung erzeugt, die Prüfergebnisse verfälschen kann. Da die Fasern in einem Bündel nach verschiedenen Dehnungen brechen, werden diese Schwingungen über den größten Teil der Prüfung erzeugt. Die Schwingung dürfte die Angaben zum ganzen Bündel nicht stark beeinflussen, aber sie genügt üblicherweise um jeden Versuch genaue Angaben über Eigenschaften oder Beiträge einzelner Fasern abzuleiten sinnlos erscheinen zu lassen. [2, 9, 12, 32, 37, 53, 70]

Die in der vorliegenden Studie nachfolgend durchgeführten Prüfungen werden am Filamentgarn durchgeführt.

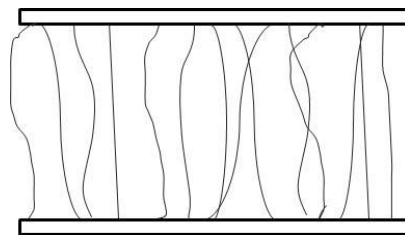


Abbildung 2.14: Ausrichtung der Einzelfilamente im einen Filamentgarn [45]

### 3 STAND DER PRÜFTECHNIK

Je nach der Dynamik der Zugprüfung handelt es sich um eine ruhende (statische) oder um eine bewegende (dynamische) Belastung. In der Textilprüfung werden auch die unter geringen Belastungsgeschwindigkeiten durchgeführte Prüfungen noch als statische Prüfung bezeichnet, obwohl streng genommen nur die Ermittlung der Spannungsänderung in der Messprobe bei konstanter Formänderung oder die Bestimmung der Formänderung des Messprobe bei konstanter Belastung als statische Prüfung bezeichnet werden dürfen [53]. Die Kennzeichnung als „quasistatische Prüfung“ ist für alle Prüfungen die unter geringen Belastungsgeschwindigkeiten geprüft werden bessere Ausdruck und wird daher in der vorliegenden Arbeit für die Zugversuche die an der Zugprüfmaschine Z 010 durchgeführt werden, benutzt.

Die dynamische Prüfung bezeichnet normalerweise mehrzyklische Prüfungen, wobei nach Literatur [53], sowie auch in verschiedenen englischen Literaturstellen, kann die bezeichnung dynamische Prüfung auch für einmalige Beanspruchungen mit Beanspruchungsgeschwindigkeit über 1000 %/min ( $0,2 \text{ s}^{-1}$ ), verwendet werden. In dieser Arbeit wird der Ausdruck dynamische Zugversuch für die Zugversuche die mit der Zugprüfmaschine HTM 2008 durchgeführt werden, benutzt.

Im Kapitel 3.1 der vorliegenden Arbeit wird die quasistatische Zugfestigkeitsprüfung beschrieben. Verschiedene dynamische Festigkeitsprüfungen stehen im Kapitel 3.2 im Mittelpunkt des Interesses, während im Kapitel 5 die Festigkeitszugprüfung mit servohydraulischer Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine ausführlich vorgestellt wird. An dieser Stelle wird explizit auf Versuchsdurchführung, Versuchsauswertung und Untersuchung der Einflussfaktoren auf die Versuchsergebnisse eingegangen.

#### 3.1 Quasistatischer Zugversuch

Obwohl im praktischen Gebrauch Textilien nur selten bis zum Zerreißen beansprucht werden, ist der quasistatische Zugversuch mit seiner stetig steigenden Beanspruchung bis zum Bruch auch heute noch die wichtigste Prüfung, um mechanische Kennwerte des textilen Materials zu erhalten. Er stellt eine technisch sehr ausgereifte Prüfung dar und liefert mit der Kraft-Dehnungs-Kurve eine sehr komplexe Aussage über das textile Materialverhalten bezüglich Festigkeit, Dehnung, Elastizität, indirekt aber auch über die Sprödigkeit.

Der quasistatische Zugversuch wird sowohl an klimatisierten Proben (Normklimazugversuch) als auch an nassen Proben (Nasszugversuch) durchgeführt. Entsprechend dem Verwendungszweck des zu prüfenden Textilmaterials können auch andere Temperaturbedingungen gewählt werden. Hierzu sind Zugprüfmaschinen mit spezieller Temperaturkammer erforderlich.

### ***3.1.1 Prinzipieller Aufbau einer Zugprüfmaschine – Messtechnische Erfassung***

Prüfmaschinen für den Zugversuch werden seit vielen Jahren gebaut und sind technisch sehr ausgereift. Als namhafte Hersteller sind Zwick Roell GmbH, Instron und MTS System GmbH bekannt. Das wesentliche Prinzip einer Zugprüfmaschine besteht im Messen der aufbrachten Kraft und der verursachten Verformung der Probe. Dabei ist die Belastung der Probe stufenlos mit möglichst geringer Stoßwirkung zu realisieren (vergleiche auch Kapitel 2.3.1). Eine Zugprüfmaschine besteht im Wesentlichen aus einem steifen Lastrahmen mit mechanischem oder hydraulischem Antrieb, einer Kraftmessdose, dem Dehnungsmesssystem, den Einspannköpfen (= Klemmen) und dem PC mit Steuer- und Auswertungsprogramm. Die technische Umsetzung erfolgt, indem die Probe in den Klemmen der Prüfmaschine befestigt und zunehmend bis zum Bruch gedehnt wird. Die Krafterzeugung erfolgt durch elektromechanische oder servohydraulische Antriebssysteme im geschlossenen Regelkreis, um eine konstante Dehngeschwindigkeit zu garantieren (Abbildung 5.2b). Der Kraftsensor ist im Kraftschluss mit dem Lastrahmen verbunden und arbeitet in der Regel auf der Basis von Dehnmessstreifen. Das Messen der Verlängerung erfolgt durch mechanische, digitale, induktive oder kapazitive Wegaufnehmer (Extensometer), die unmittelbar an der Probe angeschlossen werden. Die Messwerterfassung und Messwertauswertung erfolgt bei neueren Maschinen ausschließlich rechnergestützt. [81]

### ***3.1.2 Normierter Zugversuch zur Textilprüfung (DIN EN ISO 2062)***

Der quasistatische Zugversuch hat als mechanisches Prüfverfahren die größte Bedeutung erlangt. Er ist hinreichend untersucht und die Ergebnisse wurden in zahlreichen Normen festgeschrieben, so dass für jede Werkstoffgruppe explizite Normen der Zugprüfung vorliegen. Die Erkenntnisse der Textilprüfung zur Bestimmung der mechanischen

Eigenschaften im quasistatischen Zugversuch fanden in der Norm DIN EN ISO 2062: „Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten“ [15] Eingang. Die Norm enthält neben den Vorgaben zur Versuchsdurchführung und Versuchsauswertung auch Definitionen der Kenngrößen und Vorschriften zu der zu verwendenden Probengeometrie. Dabei soll der Zugversuch stets so eingerichtet werden, dass die Erreichung der Bruchkraft innerhalb von 20 Sekunden erfolgt [15]. Vor Beginn der Versuchsdurchführung ist darauf zu achten, dass sich die Klemmen in der richtigen Ausgangstellung und die Messwertanzeiger in Nullstellung befinden.

Während der Vorbereitung und Versuchsdurchführung sind die Messprobe nicht mit den Fingern zu berühren, sondern nur mit einer Pinzette zu fassen. Zuerst wird die Messprobe in der oberen Klemme befestigt. Die Messprobe muss sich genau in Zugrichtung befinden und hängt zunächst frei zwischen den geöffneten Klemmbacken der unteren Klemme. Dann wird auch die untere Klemme geschlossen. Es ist auch zu beachten, dass sich die Drehungszahl der Messprobe beim Abziehen und Einspannen nicht verändert.

Die Messprobe wird dann mit einer Vorspannkraft  $F_v$  belastet. Die Vorspannkraft definiert den Startpunkt für die Prüfung. Bei Erreichen der eingegebenen Kraft wird die Wegmessung genullt, wie in der Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist. Da die Vorspannungskraft die Größe der gemessenen Dehnung beeinflusst, ist die Größe der Vorspannungskraft als eine der einzuhaltenden Prüfbedingungen in der Norm stets vorgeschrieben.

Die Einspannlänge ist nach Pospischil [48] als Abstand zwischen der unteren Kante der oberen Einspannklemme und der oberen Kante der unteren Einspannklemme vor Beginn des Zugversuches definiert. Nach der Norm [15] muss die Einspannlänge  $500 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$  oder  $250 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  betragen.

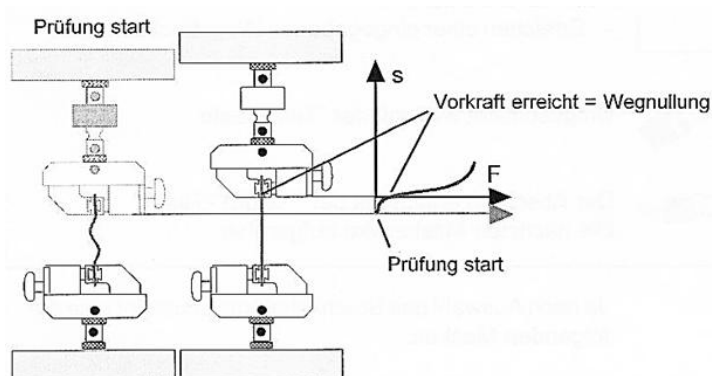


Abbildung 3.1: Wegmessung genullt [81]

Während des Versuches bewegt sich die ziehende Klemme mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit relativ zur anderen, praktisch feststehenden Klemme einachsiger bis zum Bruch. Die konstante Abzugsgeschwindigkeit der bewegenden Klemme nach Norm [15] muss  $500 \text{ mm/min} \pm 2 \%$  oder  $250 \text{ mm/min} \pm 2 \%$  betragen. Nach dem Bruch der Messprobe werden die Werte gespeichert, die untere Klemme wird in ihre Ausgangsstellung zurückgebracht, und die neue Messprobe kann wieder eingespannt werden.

Klemmenbrüche<sup>3</sup> (im Abstand von 5 mm oder weniger zu den Klemmbacken [15]) oder sonstige fehlerhafte Brüche werden zur Berechnung des arithmetischen Mittelwertes nicht herangezogen, wenn diese Werte unter dem niedrigsten Wert des normalen Bruches liegen. Die fehlerhaften Brüche sind deshalb zu kennzeichnen, da über deren eventuelle Berücksichtigung bei der Mittelwertbildung erst nach Abschluss der Prüfung entschieden werden kann.

Textile Fasern, Einzelfilamente, Garne, usw. sind keine ideal gleichmäßigen Körper. In allen Produktionsstufen wird zwar eine Homogenisierung angestrebt, aber nicht vollständig erreicht. Aus diesem Grunde unterliegen die Eigenschaften oft beträchtlichen Schwankungen; die Einzelergebnisse streuen. Diese Erkenntnis führt zu der Schlussfolgerung, dass zum Erhalt zuverlässiger Messergebnisse, es erforderlich ist, möglichst viele Messungen durchzuführen, um statistische Schwankungen in Materialfestigkeit, Einklemmbedingung, Klemmenschlupf und Klemmendehnung auszuschalten. Entsprechend der Normvorgaben [15] sollen mindestens 20 Messproben geprüft werden. In der Tabelle 3.1 sind noch einmal alle Prüfbedingungen die beim quasistatischen Untersuchungen zu beachten sind, zusammengestellt.

Tabelle 3.1: Prüfbedingungen bei quasistatischen Untersuchungen

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

<sup>3</sup> Bruch der Messprobe in unmittelbarer Nähe der Klemmen

### 3.2 Dynamischer Zugversuch

Textilmaterialien werden sowohl in der Fertigung als auch im Gebrauch häufig schnellen bzw. schlagartigen Beanspruchungen ausgesetzt. Als Beispiele seien Belastung von Cord in Auto- und Flugzeugreifen, von Bergseilen beim Absturz des Bergsteigers, von Fallschirmseilen beim Öffnen des Fallschirmes sowie Airbag-Gewebe beim Auslösen des Airbags genannt. Die klassische quasistatische Materialprüfung reicht für die Materialcharakterisierung bei diesen Dehnraten nicht aus.

Während umfangreiche Kenntnisse über mechanisches Faser/Textilverhalten bei quasistatischer Belastung vorhanden sind, liegen für höhere Belastungsgeschwindigkeiten ( $v_0 > 5 \text{ m/s}$ ) nur wenige Daten vor. Trotz seiner fortwährend steigenden Bedeutung ist der Hochgeschwindigkeitszugversuch noch nicht genormt. Schon längere Zeit bemüht sich die moderne Werkstoffprüfung um systematische Erforschung der dynamischen Werkstoffbeanspruchungen, wobei bereits mannigfaltige Prüfverfahren entwickelt wurden, die aber vorwiegend nur auf dem Gebiet der Metallprüfung und der Kunststoffprüfung zur Anwendung kommen. Nur einige Prüfverfahren sind auf Textilien ohne besondere Schwierigkeiten übertragen worden und werden in diesem Kapitel näher beschrieben. Die Versuchstechnik bei dynamischer Deformation wird nach Literatur [52] entsprechend ihrer Dehnrate (s.a. Kapitel 2.2.7) in drei Bereiche geteilt, nämlich in hohe Dehnraten ( $10^2 \text{ s}^{-1} - 10^4 \text{ s}^{-1}$ ), in sehr hohe Dehnraten ( $10^4 \text{ s}^{-1} - 10^6 \text{ s}^{-1}$ ) und ultra hohe Dehnraten ( $> 10^6 \text{ s}^{-1}$ ). Die Versuchstechnik bei niedrigen Dehnraten ( $10^{-3} \text{ s}^{-1} - 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) repräsentieren die quasistatische Deformation und die Dehnraten  $< 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  betrachtet man als Untersuchungen im Fließbereich.

Bei der Prüfung der Textilmaterialien hinsichtlich ihres Verhaltens bei hohen Deformationsgeschwindigkeiten unterscheidet man in der Literatur [8, 42] grundsätzlich zwischen Schlagzerreiversuchen und Schnellzerreiversuchen. Während bei den Schlagzerreiversuchen charakterisierende Daten wie Bruchkraft, Bruchdehnung und/oder Brucharbeit ausschließlich für den Bruchpunkt erfasst werden, erfolgt bei den Schnellzerreiversuchen mit der Aufnahme der Kraft-Dehnungs-Kurve die Untersuchung des gesamten zeitlichen Verlaufes. Die Schlagzerreiprfung kann mit Fallschlagwerken, Pendelschlagwerken, Schwungrad-Schlagzerreimaschinen oder mit ballistischen Methoden durchgeführt werden.



Des Weiteren findet man in der Literatur [17, 54] die Unterteilung der Untersuchungsmethoden entsprechend ihrer wirkenden Energien in:

1. Methoden, die auf potentieller Energie basieren,
2. Methoden, die auf kinetischer Energie basieren und
3. Methoden, die auf hydraulischer Energieübertragung basieren.

Auf Basis der Umwandlung von potentieller Energie arbeiten Fallwerke (Abbildung 3.2.a) und Pendelschlagwerke (Abbildung 3.2.b) sowie Verfahren mit pneumatischen Belastungsmechanismen und Schlagwerke mit Federkraft. Die Umwandlung kinetischer Energie findet in Rotationsschlagwerken, bei ballistischen Methoden und der Hopkinson-Bar Technik (Abbildung 3.4c) Anwendung. Auch raketentriebene Apparate zählen zu dieser Rubrik. Die hydraulischen Schlagwerken (siehe Abbildung 3.4d) können sehr präzise die Materialeigenschaften messen. Die Schlagwerke mit Explosionsgasdruck lassen sich nicht eindeutig zuordnen. Sie zählen einerseits zu den pneumatischen Schlagwerken, sind aber andererseits den Schlagwerken mit kinetischem Energieträger zuzuordnen. Eine Sonderstellung nehmen auch die elektrodynamischen Schlagwerke ein.

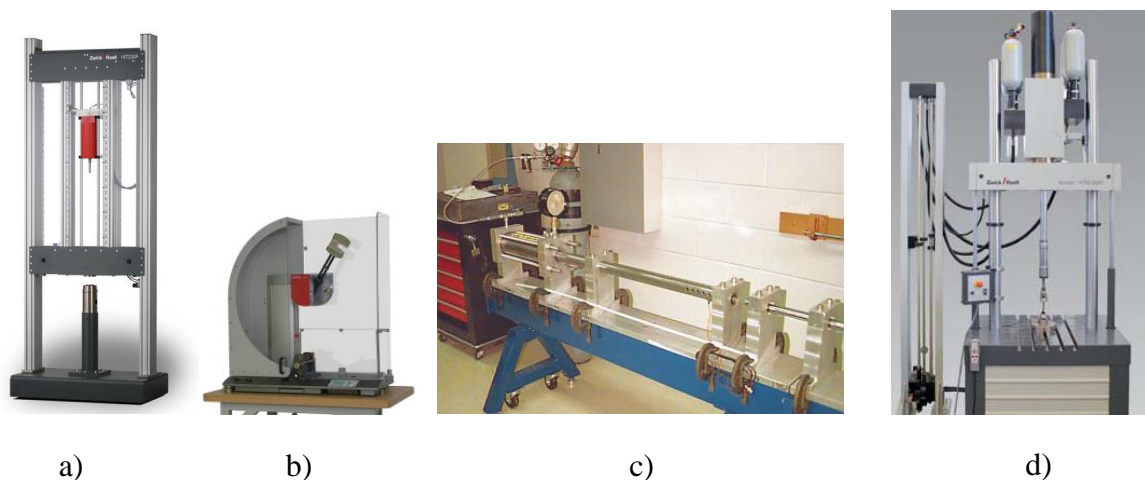


Abbildung 3.2: Schnellgeschwindigkeitsprüfmethoden [57, 83]

Untersuchungen mit hohen Verformungsgeschwindigkeiten gestalten sich dadurch problematisch, dass es zum einen schwierig realisierbar ist, Dehnraten über  $100 \text{ s}^{-1}$  technisch zu erzielen, und zum anderen können die Kraft-Dehnungs-Kurven messtechnisch nicht erfasst werden [42, 75].

Die Untersuchung des Materialverhaltens bei Kurzzeitbeanspruchungen kann mit unterschiedlichen Prüfverfahren durchgeführt werden. Gegenstand dieser Arbeit war die

Beurteilung der Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Durchführung von Serienprüfungen mit unterschiedlichsten Dehnraten an technischen Filamentgarnen, hierbei sind die schnelle, personenunabhängige Probenvorbereitung und die Wiederholbarkeit der Prüfergebnisse die wichtigen Kriterien. Aus diesem Grund werden nachfolgend Prüfgeräten, die in der Laborpraxis vorwiegend angewendet werden, beschrieben. Das sind die folgenden Geräte:

- Fallgewichtsprüfstand,
- Rotationsprüfstand,
- Spezialreißmaschinen Uster Tensojet,
- Split-Hopkinson-Tensile-Bar-Verfahren und
- Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine.

### ***3.2.1 Fallgewichtsprüfstand***

Das physikalische Prinzip dieses Prüfverfahrens beruht auf der Umwandlung von potentieller in kinetische Energie auf Grund der Gravitationskraft. Sie dienen in erster Linie den Untersuchungen des Aufprall- und Energieabsorptionsverhaltens von kompakten Materialien. Der Prüfstand gestattet es, eine Messprobe durch ein genau positioniert fallendes Prüfobjekt bzw. Fallgewicht definiert zu belasten. Wie in der Abbildung 3.3 zu sehen ist wird das Fallgewicht auf ein bestimmtes Niveau gehoben, aus welchem es dann im Allgemeinen frei auf die Probe fällt.

Für textile Materialien wird ein modifizierter Aufbau genutzt, damit die Garnproben auf Zug beansprucht werden. Die Messprobe wird am oberen Ende fest eingespannt, an dem sich auch der Kraftsensor befindet. Das untere Ende der Messprobe wird in einem freibeweglichen Auffangkörper befestigt. Der Auffangkörper wird von der Fallmasse erfasst, mitgerissen und verformt so die Messprobe bis zum Bruch. Es werden Belastungsgeschwindigkeiten von bis zu ca. 6 m/s erreicht. Die Dehnrates  $\dot{\epsilon}$  ergibt sich durch die Fallhöhe  $h$  und die Länge der Messprobe (Fadenschlaufe)  $l$ . Es gilt die Gleichung 3.1. [1, 3]

Der Auffangkörper bestimmt vor der Messung die Vorspannung. Diese ist von der Masse des Auffangkörpers abhängig und kann nicht variiert werden. Daher ist es notwendig, dass dieser aus leichtem Material hergestellt ist, so dass die Vorspannungskraft eine Dehnung bis 0,5 % nicht übersteigt.

Messtechnisch wird die Kraft-Zeit-Kurve erfasst, an Hand der bekannten Auftreffgeschwindigkeit rechnerisch die Dehnung ermittelt und die Ergebnisse in eine Kraft-Dehnungs-Kurve überführt.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot h}}{l} \quad (3.1)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{\varepsilon}$ [1/s]	- Dehnrate
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	- Gravitationskonstante
$h$ [m]	- Fallhöhe
$l$ [m]	- Probenlänge

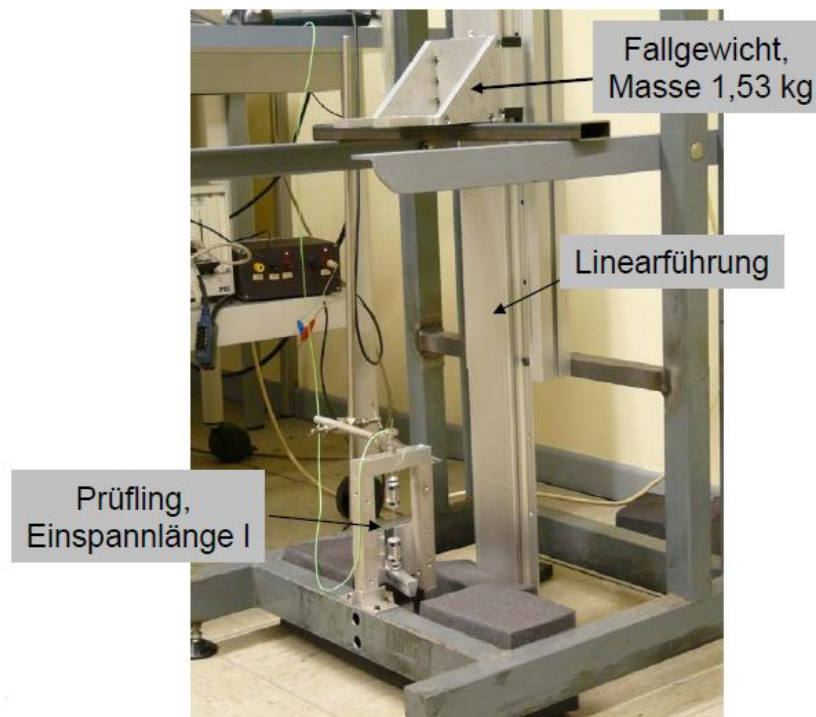


Abbildung 3.3: Darstellung des Fallgewichtsprüfstandes in Prüflabor des DTNW Krefeld [1]

Der Nachteil dieser Methode ist in der numerischen Bestimmung der Dehnung zu suchen, da die tatsächlichen Verformungsgeschwindigkeiten, welche auch von der Baugröße der Maschine abhängen, messtechnisch nicht erfasst werden können. Der Fallgewichtsprüfstand kann mit Hilfe einer High-Speed-Videokamera optimiert werden, um die Längenänderung während der Messung zu messen. [1, 3]

### 3.2.2 Rotationsprüfstand

Der Rotationsprüfstand, wie in Abbildung 3.4 zu sehen ist, besteht aus einer vertikal gelagerten runden Scheibe, auf deren äußerem Rand sich ein Fadenfangsystem befindet. Das Fadenfangsystem ist in Abbildung 3.5 zu sehen.



Abbildung 3.4: Rotationsprüfstand für Garnzugprüfungen in Prüflabor des ITV Denkendorf  
[65]

Die Rotationsscheibe wird mit einem Motor auf die gewünschte Drehzahl beschleunigt. Mit Erreichen der gewählten Drehzahl erfährt das Fadenfangsystem eine Schlaggeschwindigkeit, so dass innerhalb einer Scheibenumdrehung das Fadenfangsystem in den Auffangkörper eingreifen und diesen mitreißen muss. Durch diese schlagartig eingeführte Fadenschleife wird die Fadenprobe mit einer Umfangsgeschwindigkeit von höchstens 260 m/s bis zum Bruch auf Zug belastet.

Bei Umfangsgeschwindigkeiten von 260 m/s stehen max. 1,7 ms für den Fadenfang zur Verfügung. Innerhalb dieser Zeit wird die Fadenschleife ca. 10 mm weit transportiert. Der umlaufende Bolzen gewährleistet einen sicheren Fangvorgang der Fadenschleife. Durch den am Ende des Fadeneinbringvorgangs schlagartigen Abbremsvorgang sind am Messsystem der Garnklemme Schwingungseffekte messbar. Die Einspannlänge muss so groß gewählt werden, dass das Fadenfangsystem möglichst lange auf der Schlaglatte im Eingriff bleibt, andernfalls kann es passieren, dass bei größerer Dehnung der Messprobe kein Bruch zu

Stunde kommt, da bereits vorher das Fadenfangsystem außer Eingriff ist. In der Abbildung 3.5 ist auch ein Fadenfangprozess dargestellt, wobei man hier von einer Fadenschleifen Prüfung spricht. [1, 20, 65] Die Prüfung mittels Fadenschleife hat Vor- und Nachteile, die in der Literatur [20] zusammengestellt sind.

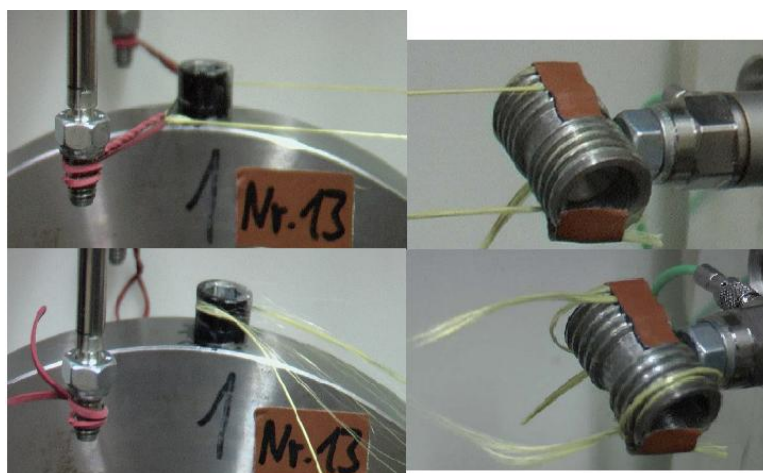


Abbildung 3.5: Darstellung des Fadenfangprozesses [1, 20]

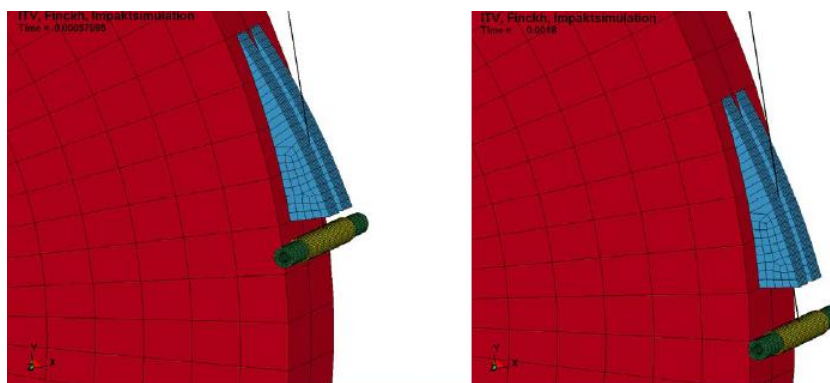


Abbildung 3.6: Rotationsprüfmethode mit Einzelfaden [20]

In der Abbildung 3.6 ist die Rotationsprüfmethode mit Einzelfaden schematisch dargestellt, wobei der zu prüfende Faden mehrfach um ein Rohr gewickelt ist und mit einem Harz anschließend eingegossen wird. Auch für diese Art der Prüfung sind in der Literatur [20] Vor- und Nachteile zusammengefasst.

Beim idealen Prüfverlauf, d.h. mit optimaler Fadenklemmung und Fadeneinbringung sind die grundlegenden Parameter die Drehzahl und die Einspannlänge. Aus der Umfangsgeschwindigkeit und Einspannlänge ergeben sich nach der Gleichung 3.2 verschiedenen Dehnraten [1].

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r}{l} \quad (3.2)$$

Hierbei bedeutet:

$\dot{\varepsilon}$	- Dehnrate
$\pi$	- mathematische Konstante
$f$ [1/s]	- Drehzahl
$r$ [mm]	- Radius
$l$ [mm]	- Einspannlänge

Mit dem Rotationsprüfstand können nach [20] sehr hohe Dehnraten erzeugt werden. So ermöglicht eine 10 kg schwere Scheibe ( $\varnothing$  28 cm) bei kleinen Einspannlängen ( $\sim$  0,1 m) Dehnraten weit über  $100 \text{ s}^{-1}$ . Die Auswertung erfolgt durch die Erfassung der Kraft-Zeit-Kurven und einer numerischen Ermittlung der Dehnung. Eine direkte Messung der Längenänderung ist nicht möglich, kann jedoch mit Hilfe der High-Speed-Videotechnik optimiert werden [1, 20, 65]. Aufgrund der hohen Kosten und der Gefährlichkeit bzgl. der Maschinenbedienung ist diese Methode für eine standardisierte Prüfung nicht geeignet.

### 3.2.3 Spezialreißmaschine Uster Tensojet

Zugprüfmaschinen wie der Uster Tensojet 4 [51, 53], der in Abbildung 3.7 dargestellt ist, wurden entwickelt, um höhere Verformungsgeschwindigkeiten zu ermöglichen, die auch bei der Verarbeitung von Garnen, z.B. beim Weben, auftreten. Derartige Zugprüfmaschinen realisieren teilweise schon Verformungsgeschwindigkeit von 50 m/min – 400 m/min (= 0,8 m/s bis 6,6 m/s), bei einer Einspannlänge von 500 mm. Das entspricht einer Dehnrate von  $1,6 \text{ s}^{-1}$  bis  $13,2 \text{ s}^{-1}$ .

Die Klemmung und die Zugbeanspruchung erfolgen durch zwei sich ständig drehende Klemmwalzenpaare, die in der Abbildung 3.8, mit 5 und 8 bezeichnet sind, und die aus jeweils einer kreisrunden gummibeleagten Walze und einer Metallwalze bestehen. Bei dem Versuch wird die Messprobe zuerst kontinuierlich durch die Transportwalzen 1 von der Spule abgezogen und bei geschlossenen Steuerwalzen 3 in einem Zwischenspeicher 2 gespeichert. Die Klemmwalzen geben durch entsprechende Drehung einen Luftspalt zwischen den Walzen frei. In demselben Moment öffnen sich die Steuerwalzen 3 und die Messprobe gelangt mittels Druckluft durch die geöffneten Klemmwalzenpaare hindurch in den 500 mm langen Messkanal 6. Durch die weitere Drehung der Klemmwalzen 5 und 8 wird die Messprobe

gleichzeitig oben und unten zwischen Metall- und Gummiwalze geklemmt und nachfolgend bis zum Bruch auf Zug beansprucht. Die Kraft wird in der Mitte der Messstrecke durch einen Kraftsensor 7 gemessen, wobei sich die Dehnung aus dem Drehungswinkel der Klemmwalzen während des Zugversuchs ergibt. Dann öffnen sich die Klemmwalzen und die Messprobe wird von der Absaugdüse 9 in einen Behälter gesaugt. Die Zugprüfanlage besitzt einen Kraftmessbereich von 0,7 N – 50 N und einen Dehnungsmessbereich von 3 % – 70 % und dient der Prüfung von Stapelfasergarnen. [51, 53]



Abbildung 3.7: Zugprüfmaschine Uster Tensojet 4 [51]

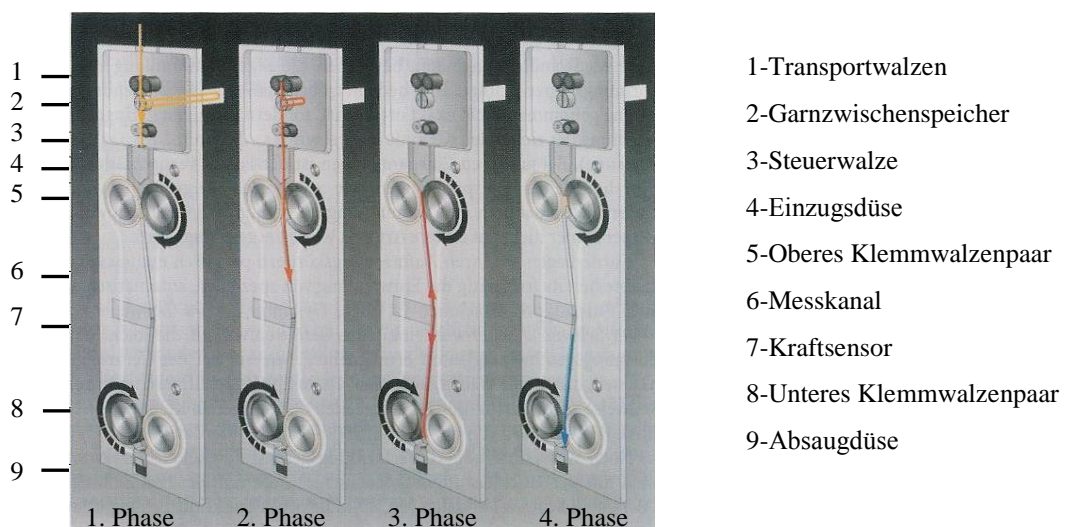


Abbildung 3.8: Arbeitsprinzip des Uster Tensojet [53]

### 3.2.4 Split-Hopkinson-Tensile-Bar-Anlage

Die Split-Hopkinson-Tensile-Bar-Anlage (siehe Abbildung 3.9), oftmals in der Literatur auch als Kolsky-Bar genannt, wird eingesetzt, um das Materialverhalten bei Dehnraten zwischen  $10^2 \text{ s}^{-1}$  und  $10^4 \text{ s}^{-1}$  zu untersuchen. Bei einer Einspannlänge von 20 mm entspricht dies Beanspruchungsgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 200 m/s.

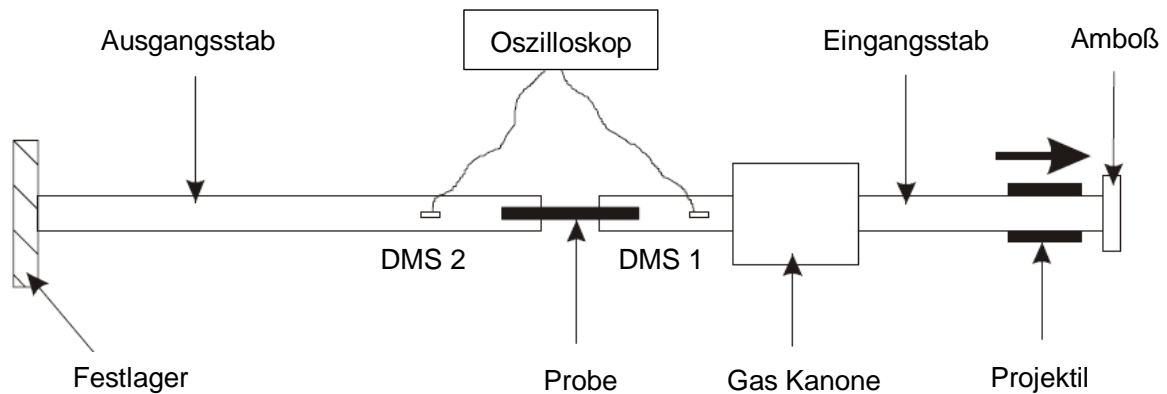


Abbildung 3.9: Skizze eines Versuchsaufbaus des Split-Hopkinson Bars [35]

Bei den Split-Hopkinson-Verfahren wird eine Messprobe mit einem kleineren Querschnitt als dem der beiden Stäbe, zwischen Eingangsstab und Ausgangsstab montiert. Ein mit Druckluft beschleunigtes Projektil schlägt auf einen Amboß am Ende des Eingangsstabes, dadurch wird eine Druckwelle induziert und die Messprobe wird belastet. Die Belastung und Deformation der Messprobe wird indirekt über die Dehnungsmessstreifen 1 (DMS 1) und Dehnungsmessstreifen 2 (DMS 2) bestimmt. Die DMS 1 misst dabei die initiierte und reflektierte Welle und die DMS 2 die transmittierte Welle. Aus der reflektierten Welle kann die Dehngeschwindigkeit berechnet werden. Das Integral über der Zeit ergibt die Dehnung der Messprobe. Aus dem Signal der transmittierten Welle in DMS 2 wird die Spannung innerhalb der Messprobe berechnet. [35, 52, 57]

Die Einspannung der Messprobe verursacht bei dem Verfahren große Schwierigkeiten. Die Spannkraft muss hoch genug sein, um ein Rutschen der Messprobe zu vermeiden, andererseits muss die mechanische Impedanz so klein sein, dass die Wellenausbreitung nicht gestört wird. Für eine homogene Deformation innerhalb der Messprobe, werden kleine und kurze Messproben eingesetzt, da deren Massenträgheit klein ist. [35]



### 3.2.5 Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine

Das Funktionsprinzip der Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine die in der Abbildung 3.10 schematisch dargestellt ist, ist mit dem der quasistatischen Zugprüfmaschine vergleichbar. Auf Grundlage der Gleichung 2.15 werden die für die dynamischen Prüfungen notwendigen hohen Dehnraten durch eine Erhöhung der Abzugsgeschwindigkeit und Variation der Einspannlänge erreicht. Unter Berücksichtigung einer Prüfgeschwindigkeit bis zu 20 m/s [35] und einer praktikablen Einspannlänge von 0,02 m ergeben sich hier Dehnraten bis zu  $1000 \text{ s}^{-1}$ .

Die technische Umsetzung für höhere Abzugsgeschwindigkeiten erfolgt in servohydraulischen Anlagen. 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 zu quasistatischen Zugversuchen 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 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.

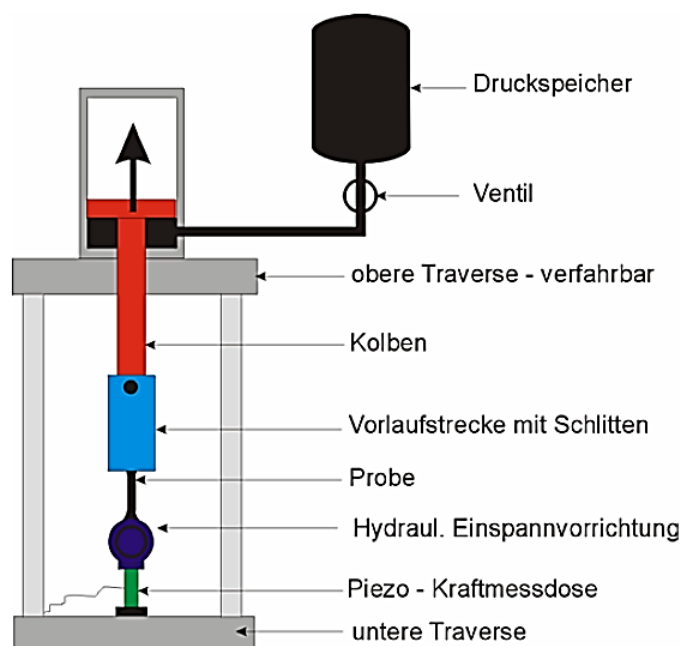


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des Aufbaus einer Hochgeschwindigkeitszugprüfmaschine [35]

## 4 STAND DER FORSCHUNG: PRÜFERGEBNISSE AN DYNAMISCHEN ZUGPRÜFGERÄTEN

Bereits seit der ersten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts bestand das Interesse, das dynamische Werkstoffverhalten von Garnen zu ermitteln, was auf die Interpretationsfähigkeit des Faserverhaltens im Produktionsprozess zurückzuführen ist. Die Vielfältigkeit der Untersuchungen ist jedoch unmittelbar an die Erfassung der Messdaten gebunden, so dass mit der Möglichkeiten der messtechnischen Kennwertspeicherung die Untersuchungszahlen steigen. Im Folgenden wird ein Abriss veröffentlichter Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen, an Einzelfasern, Garnen, Geweben und Bändern aus unterschiedlichen Polymeren gegeben. Die Daten aus den verschiedenen Literaturquellen können nicht unmittelbar mit einander verglichen werden, da unterschiedliche Prüftechniken und Prüfbedingungen zum Einsatz kommen. Es können daher nur allgemeine Trends bezüglich des Einflusses der Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit und Dehnrates abgeleitet werden.

Smith und Mitarbeiter [64, 1956] stellten fest, dass sich die Festigkeit von Nylonfasern, Fortisanfasern und Glasfasern tendenziell mit zunehmender Dehnrates erhöht. Dabei verkleinert sich die Dehnung etwas bei Nylonfasern und Glasfasern. Bei Fortisanfasern ist kein Unterschied zu sehen. Das hat zur Folge, dass sich der Zugmodul mit der Erhöhung der Dehnrates vergrößert. Die Untersuchungen wurden mit einer selbstentwickelten Rotationprüfmaschine, die Dehnrates bis zu  $85 \text{ s}^{-1}$  verwirklicht, gemacht.

Martin H. [42, 1959] untersuchte mit einem Schnellzerreißapparat Garne verschiedener Faserstoffe auf ihre Reißfestigkeit hin mit Dehnrates von  $0,0004 \text{ s}^{-1}$  bis  $16 \text{ s}^{-1}$ . Er stellte fest, dass mit Ausnahme von Flachsgarn, für sämtliche Faserarten (Baumwollgarn, Viskoseseide, Viskosezellwolle) bei höherer Dehngeschwindigkeit, höhere Festigkeiten erzielt werden. Die Festigkeit von Flachs wurde durch steigende Dehngeschwindigkeiten praktisch nicht beeinflusst. Die Bruchdehnungswerte der untersuchten Textilfäden nahmen mit Ausnahme der Baumwolle nicht ab.

Gwin et al. [25, 1994] untersuchte Gewebe und Bänder aus PA 6.6 (Nylon) und Aramid (Kevlar®) bei höheren Dehnrates und fand heraus, dass Nylon eine größere Abhängigkeit von der Dehnrates zeigt als Kevlar®. So nimmt die Zugfestigkeit von Geweben und Bändern aus

Nylon mit Vergrößerung der Dehnrate um durchschnittlich 25 % ab (siehe Tabelle 4.1) während sich die Zugfestigkeit von Kevlar® nur um 8 % verkleinern (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.1: Abhängigkeit der Nylonfestigkeit von der Dehnrate [25]

Dehnrate [ $s^{-1}$ ]	0,012	0,12	1,2	12	Veränderung
Probe	Festigkeit - Mittelwert [lbs]				[%]
2 x 550 Band	746*			486	-35%
1/2 x 550 Gewebe	726*			594	-18%
2 x 1000 Band	1258*			977	-22%
2 x 2200 Band	2970*			1886	-37%
1 x 6000 Gewebe	6068	5321	5389	4528	-25%
MIL-W-27657	7088*				
1 x 6000 Gewebe	7118*			5253	-26%
MIL-W-4088					

\* Umschlingungsklemmen mit einen Durchmesser von 10 cm, sonst mit 5 cm Durchmesser

Tabelle 4.2: Abhängigkeit der Aramidfestigkeit von der Dehnrate [25]

Dehnrate [ $s^{-1}$ ]	0,012	0,12	1,2	12	Veränderung
Probe	Festigkeit - Mittelwert [lbs]				[%]
1 x 5000 Gewebe	5573*			5089	-9%
1 x 6000 Gewebe	6138	6138	6195	6289	2%
2 x 2000 Gewebe	2586*			2373	-8%

\* Umschlingungsklemmen mit einen Durchmesser von 10 cm, sonst mit 5 cm Durchmesser

Wang, Xia und Jiang [68, 2001] haben mit Hilfe einer Rotationsscheibe Polyvinylalkohol (PVA)-Fasern mit eine Einspannlänge von 8 mm geprüft und dabei herausgefunden, dass die Festigkeit von PVA-Fasern wie auch die Dehnung mit Vergrößerung der Dehnrate zunimmt, so dass sich der E-Modul nur geringfügig verändert (vgl. Abbildung 4.1). Dass sich der E-Modul nur geringfügig mit der Dehnraterhöhung verändert, wurde auch in [76, 2000] berichtet.

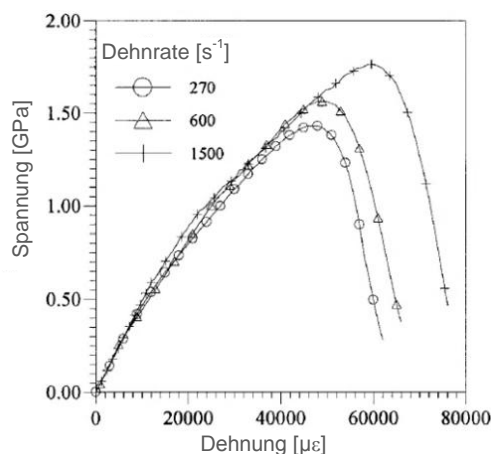


Abbildung 4.1: Spannungs-Dehnungs-Kurven von PVA Fasern bei unterschiedlichen Dehnraten [68]

PVA-Fasern wurden ebenfalls von Xiong, Gu und Wang untersucht [75, 2002]. Sie fanden heraus, dass sich der Anfangsmodul bei einer Erhöhung der Dehnrates von  $0,01 \text{ s}^{-1}$  auf  $270 \text{ s}^{-1}$  vergrößert, bei einer weiteren Steigerung der Dehnrates auf  $1500 \text{ s}^{-1}$  aber unverändert bleibt. Es ist zu sehen, dass die Festigkeit der PVA-Fasern im Bereich der Dehnrates von  $0,01 \text{ s}^{-1}$  bis  $1500 \text{ s}^{-1}$  ansteigt. Die Gesamtdehnung ist im dynamischen Zugversuch deutlich kleiner gegenüber dem quasistatischen Zugversuch.

Xiong, Gu und Wang untersuchten auch Aramidgarne [75, 2002] und fanden heraus, dass sich der Anfangsmodul mit Erhöhung der Dehnrates von  $0,01 \text{ s}^{-1}$  auf  $270 \text{ s}^{-1}$  vergrößert, dann aber unverändert bleibt bis zu einer Dehnrates von  $1000 \text{ s}^{-1}$ . Auch die Festigkeit vergrößert sich bei Aramidfasern im Gegensatz zu quasistatischen Zugversuch, bleibt aber ab einer Dehnrates von  $480 \text{ s}^{-1}$  konstant. Die Dehnung von Aramidfasern steigt mit zunehmender Dehnrates. In Literatur [76, 2000] wurde auf Basis von einem Hopkinson Tensile Bar System berichtet, dass sich die Festigkeit, Dehnung und auch die Steifigkeit von Aramidfasern, mit steigender Dehnrates, vergrößern. Zhu und Mitarbeiter [79, 80] haben Kevlar 49 Gewebe mit einer servohydraulischen Prüfmaschine in einem Dehnratesbereich von  $25 \text{ s}^{-1}$  bis  $170 \text{ s}^{-1}$  geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Festigkeit, der E-Modul und die Dehnung mit zunehmender der Dehnrates vergrößern. Dagegen wurde in der Literaturstelle [60] berichtet, dass das Kevlar 49 Gewebe keine Abhängigkeit von der Dehnrateserhöhung zeigen.

Stegmaier und Schweizerhof [65, 2005] untersuchten Aramidgarne mit zwei verschiedenen dynamischen Prüfmethode. Mittels einer servohydraulischen Zugprüfmaschine konnten sie Dehnrates bis  $55 \text{ s}^{-1}$  und mit einem Rotationsprüfstand Dehnrates bis  $370 \text{ s}^{-1}$  realisieren. Bei den Untersuchungen mit servohydraulische

Zugprüfmaschine zeigen die Ergebnisse, dass die Bruchkraft sowie der Elastizitätsmodul mit der Vergrößerung der Beanspruchungsgeschwindigkeit, ansteigen, wenn auch nur im geringen Maße. Am Rotationprüfstand ermittelten sie einen von der Dehnrage abhängigen E-Modul des Aramidgarnes, welcher von 106 GPa (quasi-statisch) über ca. 156 GPa (bei 200 m/s) auf 165 GPa (bei 260 m/s) ansteigt. Die Versuchsergebnisse unterlagen sehr starken Streuungen.

Lim, Zeng und Chen haben Aramideinzelfasern mit dem Split-Hopkinson-Verfahren untersucht [39, 2010] und konnten Dehnraten von bis zu  $1000 \text{ s}^{-1}$  realisieren, wobei sie die Fasern mit zwei unterschiedlichen Einspannlängen 2,5 mm und 10 mm verankerten. Zur Auswertung wurden die Reißfestigkeiten der dynamischen Prüfung (●) den Ergebnissen der quasistatischen Prüfung (■) mit gleicher Einspannlänge in der Abbildung 4.2 gegenübergestellt. Die Aramid-Einzelfasern zeigen unter dynamischen Belastungsbedingungen eine um 16,6 % höhere Reißfestigkeit. Weiterhin ist eine Abhängigkeit von der Einspannlänge erkennbar. Für kleinere Einspannlängen wurden tendenziell höhere Festigkeiten bestimmt wie in der Abbildung 4.2 in den Diagrammen a) und b) zu sehen ist.

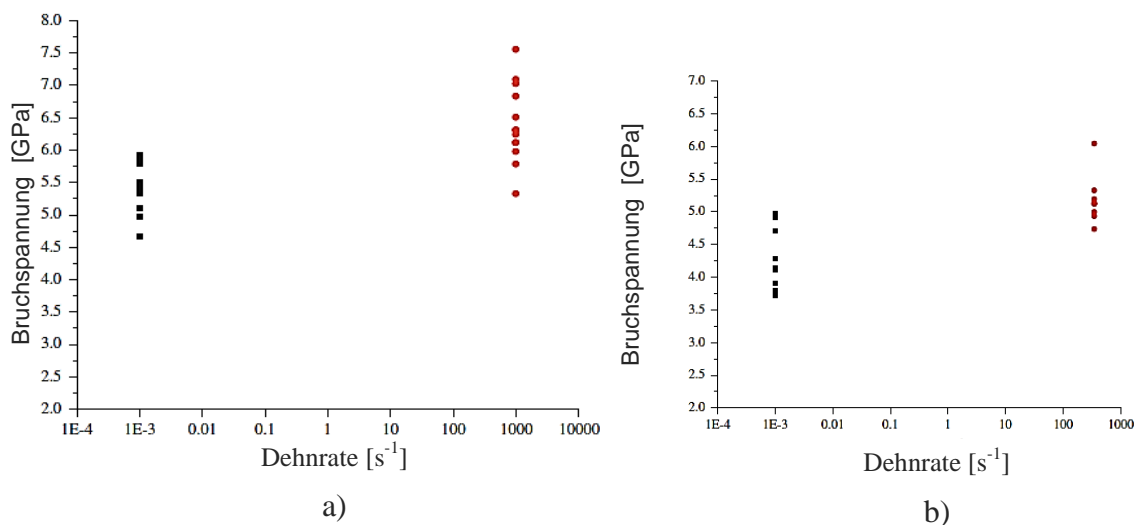


Abbildung 4.2: Prüfungen an Aramideinzelfasern-Einfluss der Dehnrage bei verschiedenen Einspannlängen a)  $l = 2,5 \text{ mm}$  und b)  $l = 10 \text{ mm}$  [39]

In [38, 2011] wurden ebenfalls Prüfungen an Einzelfasern aus Kevlar und Twaron berichtet. Die Resultate zeigen, dass die Zugkraft keine signifikante Dehnrageabhängigkeit aufweist. Die Zugkraft vergrößert sich mit steigender Dehnrage nur um 6 % – 8 %.

Beier und Schollmeyer [4, 1989] erforschten das dynamische Werkstoffverhalten von PET-Multifilamentgarnen mit Hilfe einer Fallschlagapparatur. Das Versuchsmaterial wurde mit unterschiedlichen Dehnraten von  $0,001 \text{ s}^{-1}$  bis  $1000 \text{ s}^{-1}$  untersucht. Die Kraft-Dehnungs-Kurven (K-D-Kurven), die in der Abbildung 4.3 zu sehen sind, zeigen, dass die Höchstzugkraft mit der Dehngeschwindigkeit zunimmt und die Höchstzugkraftdehnung sinkt.

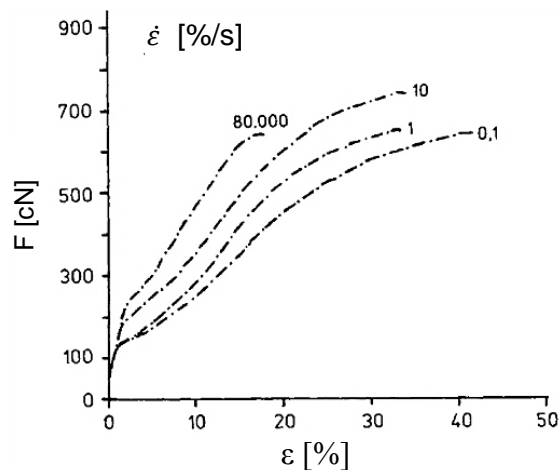


Abbildung 4.3: K-D-Kurven für unterschiedliche Dehngeschwindigkeiten von PET [4]

Zhou, Jiang und Xia [78, 2001] haben Carbonfasernbündel des Typs T300 und M40J bei Dehnraten bis zu  $1300 \text{ s}^{-1}$  getestet und herausgefunden, dass die beiden Fasertypen keine Abhängigkeit mit zunehmender Dehnrate zeigen, siehe Abbildung 4.4.

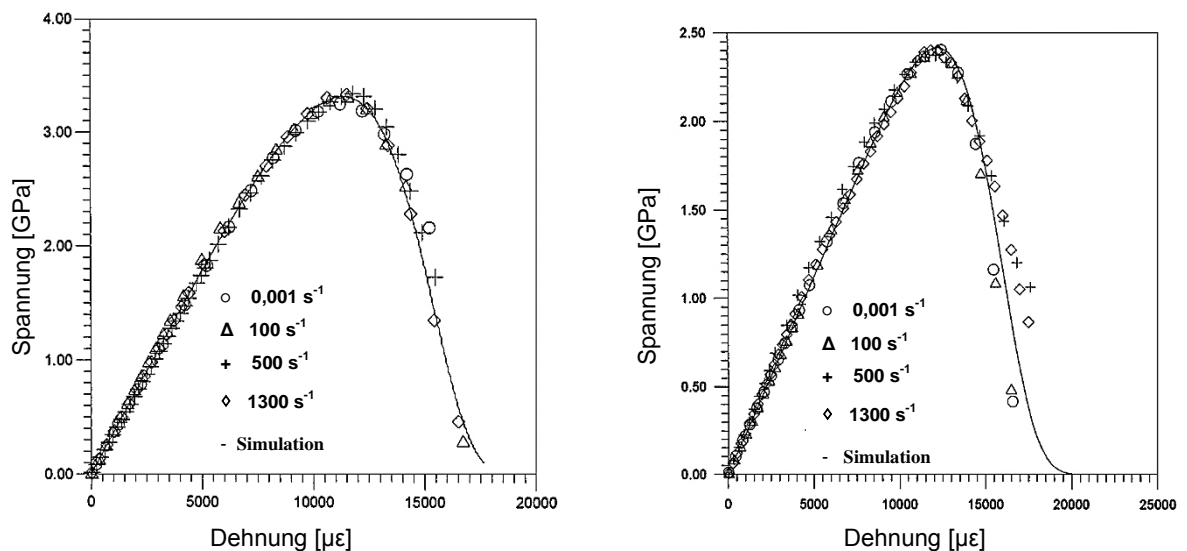


Abbildung 4.4: Spannung-Dehnungs-Kurven von a) M40J und b) T300 Carbonfasern bei unterschiedlichen Dehnrate [78]

Languerand und seine Mitarbeiter [37, 2009] testeten Multifilamentgarne mit verschiedenen Kristallinitäts- und Orientierungsgraden aus Aramid (PPTA, Kevlar®) und Hochmodul - Polyethylen -Faser (HMPE, Spectra®) mit dem Split-Hopkinson-Verfahren und verglichen die Ergebnisse mit denen aus dem quasistatischen Zugversuch. Sie erhielten differenzierte Ergebnisse. Da Kevlar® Typ C den größten Kristallinitätsgrad besitzt, werden bei dieser Faser jeweils die höchsten E-Module gemessen (Tabelle 4.3). Für alle Materialien ist der ermittelte E-Modul bei höheren Dehnraten kleiner als im quasistatischen Zugversuch, wobei keine eindeutige Dehnratenabhängigkeit besteht. Die Bruchdehnungswerte erhöhen sich und die Zugspannungen nehmen mit zunehmender Dehnrates ab (Tabellen 4.3 und 4.4).

Tabelle 4.3: Ergebnisse von Zugversuchen an PPTA Fasern bei unterschiedlichen Dehnraten [37]

Material	PPTA Fasern - A			PPTA Fasern - B			PPTA Fasern - C		
	quasistatisch	500	850	quasistatisch	560	580	quasistatisch	500	540
Dehnrates [s <sup>-1</sup> ]									
E-Modul [Gpa]	77	59 ± 6	48 ± 3	63	41 ± 9	41 ± 7	120	99 ± 15	105 ± 14
Zugspannung [Gpa]	3,4	1,57 ± 0,08	1,89 ± 0,09	3,0	2,9 ± 0,1	2,4 ± 0,1	3,1	3,8 ± 0,2	3,0 ± 0,2
Dehnung bei Zugspannung [%]		4,5	7,0		8,0	8,3		6,2	4,4
Bruchdehnung [%]	3,1	5,0	9,5	3,7	10,0	10,6	2,4	10,0	10,0

Tabelle 4.4: Ergebnisse von Zugversuchen an HMPE Fasern bei unterschiedlichen Dehnraten [37]

Material	HMPE Fasern - A				HMPE Fasern - B		
	quasistatisch	340	530	800	quasistatisch	540	670
Dehnrates [s <sup>-1</sup> ]							
E-Modul [Gpa]	66	25 ± 5	40 ± 7	19 ± 3	113	33 ± 6	36 ± 3
Zugspannung [Gpa]	2,4	0,96 ± 0,05	0,8 ± 0,05	1,07 ± 0,08	3,25	1,82 ± 0,09	2,03 ± 0,08
Dehnung bei Zugspannung [%]		8,9	6,8	11,1		12,0	11,1
Bruchdehnung [%]	4,1	14,0	12,4	19,4	2,9	19,3	19,4

Wang und Xia [70, 1996 und 69, 1997] haben Glasfaserbündel mit einer Einspannlänge von 8 mm bei Dehnraten von bis zu 1700 s<sup>-1</sup> untersucht. Die Werte zeigen, dass die Festigkeit mit zunehmender Dehnrates ansteigt. Auch in Literatur [76, 2000] wurde berichtet, dass sich die Festigkeit, Dehnung und Steifigkeit mit Dehnrateserhöhung vergrößert.

Huang [71, 2005] hat mit seinen Mitarbeitern Fasern aus Siliziumkarbid (SiC) bei quasistatischen ( $0,0001 \text{ s}^{-1}$  bis  $0,001 \text{ s}^{-1}$ ) und dynamischen Dehnraten ( $200 \text{ s}^{-1}$  bis  $1200 \text{ s}^{-1}$ ) untersucht. Sie fanden heraus, dass sich die Eigenschaften von SiC-Faser mit der Dehnrade verändern, wie in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Die mechanischen Eigenschaften zeigen unter quasistatischen Bedingungen praktisch keine Dehnratenabhängigkeit. Unter dynamischen Bedingungen erhöhen sich die mechanischen Kennwerte mit zunehmender Dehnrade.

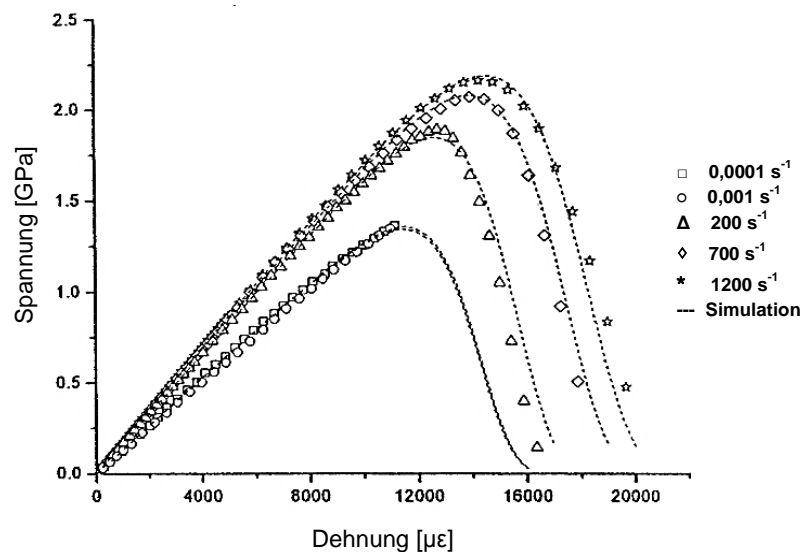


Abbildung 4.5: Spannungs-Dehnungs-Kurve von SiC Faserbündeln bei unterschiedlichen Dehnraten [71]

Hättenschwiler et. al [26, 1984 aus 53, 2000] untersuchten die Festigkeiten von verschiedenen Garnen. Sie stellten fest, dass die Festigkeit von Naturfasergarnen mit zunehmender Dehnrade ansteigt, während die Dehnung weitestgehend konstant bleibt. Demgegenüber steigt die Festigkeit von Chemiefasergarnen mit zunehmender Dehnrade nur geringfügig an, jedoch sinkt die Dehnbarkeit deutlicher als bei Naturfasergarnen.

Von Prevoršek [49, 1998 und 50, 1991] wird berichtet, dass sich bei ballistischen Untersuchungen der E-Modul von Polyethylenfasern (Spectra®) im Vergleich zu quasistatischen Untersuchungen stark vergrößert. Über die Festigkeit konnten keine Angaben gemacht werden, weil die Messproben bei ballistischen Versuchsbedingungen immer in den Klemmen zerrissen.



In der Literatur [21, 1984] ist die Geschwindigkeitsabhängigkeit (bis zu Prüfgeschwindigkeit 5000 mm/min) von Kraft und Dehnung von Polyester, Polyamid 6.6 und Polyamid 6 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich die Prüfgeschwindigkeit unterschiedlich auf Kraft und Dehnung auswirkt. Die Höchstzugkraft sowie Dehnung kann je nach untersuchtem Material mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit steigen oder sinken. Es kann gesagt werden, dass der Geschwindigkeitseinfluss auf Zugkraft und Dehnung vor allem bei Polyester-Filamentgarn gering ist.

In [24] wurde berichtet, dass die Festigkeit und der E-Modul von PBO Einzelfasern sich mit einer Dehnraterhöhung vergrößern, während die Dehnung mit Erhöhung der Dehnraten abnimmt.

### *Fazit aus der Literatur*

Das Ziel dieser Literaturstudie war, einem Überblick über die vorhandene Literatur zum Thema dynamische Untersuchungen an textilen Materialien zu verschaffen. In einem Zeitraum von 1950 bis heute wurden im Rahmen der Recherche 23 relevant erscheinende Quellen identifiziert und die wichtigsten Ergebnisse in diesem Kapitel vorgestellt. Dabei handelte es sich um Ergebnisse von experimentellen Untersuchungen unter dynamischen Belastungen, an Einzelfasern, Garnen, Geweben und Bändern aus unterschiedlichen Werkstoffen (Polymer, Glas, Keramik). Da bis jetzt keine Norm zu Stande gekommen ist, sind die Untersuchungen mit vielen unterschiedlichen Prüftechniken und Prüfbedingungen gemacht worden, weswegen die veröffentlichten Daten aus den verschiedenen Literaturquellen nicht unmittelbar mit einander vergleichbar sind. Es können daher nur allgemeine Trends bezüglich des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit bzw. Dehnrates auf die Festigkeit, Dehnung und den E-Modul abgeleitet werden.

Ein schneller Überblick ist in der Tabelle 4.5 zusammengestellt. Hier findet sich eine Aufstellung der Literatur mit Veröffentlichungsdatum, Autor, untersuchtem Material, Messprinzip, verwendeten Dehnrates und die gewonnenen Ergebnisse der Untersuchungen.

Tabelle 4.5: Fazit aus der Literatur

Jahr	Literatur	Autor	Untersuchtes Material	Dehnrate [ $s^{-1}$ ]	Messprinzip	Ergebniss
1953	aus [42]	Schiefer	Nylon	von 1 bis 83	Stoßprüfung	keine Abhängigkeit von der Dehnrate
1956	[64]	Schmit	Nylon	von 0,00016 bis 85	Rotationsprüfstand	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung singt ab
			Fortisan			bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung bleibt konstant
			Glasfasern			bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung sinkt ab
1959	[42]	Martin	Baumwollgarn	von 0,0004 bis 16	Schnellzerreiß- apparat	bei Dehnratenerhöhung erhöht sich die Festigkeit von Baumwolle, Viskose, ausnahme - Flachs
			Viskoseseide			
			Viskosezellwolle			
			Flachsgarn			
1984	[26]	Hättenschwiler	Naturfasergarne			bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung bleibt konstant
			Chemiefasergarne			bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung singt ab
1984	[21]	Furter	Polyester	(bis 5000 mm/min)	Uster Tensorapid	keine Abhängigkeit von der Dehnrate
			Polyamid 6			bei Dehnratenerhöhung etwas höhere Festigkeiten, die Dehnung sinkt ab
			Polyamid 6.6			bei Dehnratenerhöhung etwas niedrigere Festigkeiten, die Dehnung sinkt ab
1989	[4]	Beier, Schollmeyer	PET - Multifilamentgarn	von 0,001 bis 1000	Fallprüfstand	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung nimmt ab
1991, 1998	[49], [50]	Prevoršek	Polyethylenfasern - Spectra®	von 0,016 bis 166	Ballistisch	bei Dehnratenerhöhung steigt der Modul an
1994	[25]	Gwin	Nylon (Gewebe, Band)	von 0,012 bis 12	MTS Maschiene	bei Dehnratenerhöhung nimmt die Festigkeit von Nylon mehr ab als die Festigkeit von Kevlar
			Kevlar (Gewebe)			
1997	[69], [70]	Wang, Xia	Glasfaserbündel	von 90 bis 1700	Stoßprüfung	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung nimmt zu
2001	[68]	Wang, Xia, Jiang	PVA - Fasern	von 270 bis 1500	Stoßprüfung	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung nimmt zu
2001	[78]	Zhou, Jiang, Xia	Carbonfasern	von 0,001 bis 1300	Stoßprüfung	keine Abhängigkeit von der Dehnrate
2002	[75]	Xiong, Gu, Wang	PVA - Multifilamentgarn	von 0,01 bis 1500	MTS und	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung sinkt ab
			Aramid		Stoßprüfung	mit höheren Dehnraten höhere Festigkeit, die Dehnung nimmt zu
2005	[71]	Huang	Siliziumkarbid - Multifilamentfasern	von 0,0001 bis 1200	Split - Hopkinson - Verfahren	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, die Dehnung nimmt zu
2005	[65]	Stegmaier	Aramid (Garne und Gewebe)	von 3 bis 60	servo- hydraulische Zugprüfmaschine	bei Dehnratenerhöhung etwas höhere Festigkeiten sowie auch niedrige Festigkeiten
				von 13 bis 370	Rotationsprüfstand	bei Dehnratenerhöhung steigt der E-Modul an
2009	[37]	Languerand	Aramid	von 0,001 bis 800	Split - Hopkinson -	bei Dehnratenerhöhung niedrige Festigkeiten, die Dehnung nimmt zu
			Spectra®		Verfahren	bei Dehnratenerhöhung niedrigere Festigkeiten, die Dehnung nimmt zu
2010	[39]	Lim, Zeng, Chen	Aramid Einzelfasern	von 0,001 bis 1000	Split - Hopkinson - Verfahren	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten
2011	[38]	Lim, Zeng, Chen	Aramid Einzelfasern Ketrichtung	von 0,001 bis 1500	Split - Hopkinson - Verfahren	bei Dehnratenerhöhung etwas höhere Festigkeiten
2011, 2008	[79], [80]	Zhu	Aramid Gewebe	von 20 bis 170	Servohydraulische Prüfmaschine	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten, Dehnung und Modulwerte
2011	[60]	Seidt	Aramid Gewebe	von 0,0001 bis 1500	Split - Hopkinson - Verfahren	keine Abhängigkeit von der Dehnrate
2011	[24]	Gunnarsson	PBO (Zylon) Einzelfasern	von 0,001 bis 1000	Split - Hopkinson - Verfahren	bei Dehnratenerhöhung höhere Festigkeiten und Modulwerte, die Dehnung verkleinert sich geringfügig

Faßt man die in diesem Kapitel vorgestellten Ergebnisse zusammen, da kann man sowohl eine Abhängigkeit der Festigkeit und der Dehnung von der Dehnrage feststellen, als auch ein unabhängiges Verhalten der Werkstoffkennwerte von der Dehnrage. Was die Häufigkeit angeht, so kann man eher von einer Zunahme der Festigkeit bei gleichzeitiger Abnahme der Dehnung von der Dehnrage ausgehen. Dies ist jedoch keine generelle Aussage, da z.B. bei den untersuchten Aramidgarnen in den Literaturstellen [38, 39, 75] eine Erhöhung der Zugfestigkeit mit zunehmender Dehnrage festgestellt wurden, wohingegen in den Literaturstellen [25, 37] mit steigender Dehnrage niedrigere Festigkeiten gemessen wurden.

Über die Abhängigkeit der Zugfestigkeit und Dehnung von der Prüfgeschwindigkeit bei PA- und PET-Filamentgarnen, wurden nur zwei Veröffentlichungen gefunden. Diese wurden im Zeitraum von 1960 bis 1990 gemacht, wobei es sich bei den untersuchten Garnen nicht um Hochleistungsgarne, sondern um klassische Filamentgarne, die in der Bekleidungsindustrie Anwendung finden, handelte.

## 5 EXPERIMENTELLER TEIL

In Kapitel 2 wurden Notwendigkeit, Prüfmethode und Probleme bei der Prüfung der mechanischen Kenngrößen, im speziellen der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von textilen Werkstoffen, ausführlich diskutiert. Es konnte nachgewiesen werden, dass für diese Prüfungen bereits eine Vielzahl verschiedener Versuchsanordnungen und Prüfgeräte auf dem Markt existieren. Seit den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts sind aber auch zahlreiche Veröffentlichungen bekannt, die sich speziell mit dem Kraft-Dehnungs-Verhalten bei dynamischer und hochdynamischer Beanspruchung beschäftigen. Normiert ist aber nur die Prüfung des Kraft-Dehnungs-Verhaltens für quasistatische Beanspruchung. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag liefern, Potentiale und Grenzen einer dynamisch-textilen Werkstoffprüfung mit Hilfe der Hochgeschwindigkeitszugprüfung aufzuzeigen. Nach Modifizierung der Probehalterung und Prüftechnologie wurden diverse Zugversuche an drei Filamentgarnen durchgeführt, und verschiedene Einflussgrößen näher untersucht. Im Folgenden werden die praktischen Arbeiten detailliert beschrieben sowie mögliche Fehler- und Einflussgrößen auf die Prüfergebnisse diskutiert.

### 5.1 Versuchsmaterial

Vor 100 Jahren wurden Naturfasern nicht nur in der Bekleidungsindustrie, sondern auch für technische Anwendungen eingesetzt. Diese Fasern nannte man technische Fasern. Mit der Einführung industriell hergestellter Fasern (wie Rayon, Acetate, Nylon und Polyester) in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, sind nicht nur neue Fasern für die Bekleidungsindustrie, sondern auch Fasern mit höheren technischen Eigenschaften entstanden. [73] In der Nachfolgezeit konzentrierten sich Forschung und Entwicklung auf die Optimierung dieser technischen Fasern. Speziell für technische Anwendungen werden immer häufiger sogenannte Hochleistungsfasern eingesetzt. Unter Hochleistungsfasern versteht man Faserstoffe, die hinsichtlich spezifischer Eigenschaften, insbesondere Festigkeit bzw. E-Modul oder auch Temperatur- bzw. Flammbeständigkeit, extreme Eigenschaften aufweisen [40, 45, 73].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Hochleistungsgarne aus Polyamid (PA 6.6 und PA 4.6) und Polyethylenterephthalat (PET) getestet. Bei diesen Versuchsgarnen handelt es sich auf Grund ihrer chemischen Struktur und der mechanischen Eigenschaften um hochfeste Garnarten, die vorrangig für Sicherheitstextilien (Luftsäcke, Transportbänder,

Sicherheitsgurte, Reifencord etc.) eingesetzt werden. Diese hochfesten Eigenschaften verdanken sie u.a. ihrer Polymerstruktur (langgestreckte Polymermolekülen, die parallel zur Fadenachse liegen).

Die Versuchsgarne stellte die Polyamid High Performance GmbH (PHP) zur Verfügung. Es handelte sich um folgende Garne:

- PA 6.6; Enka Nylon<sup>®</sup>, 140HRT 940 dtex f 140
- PA 4.6; Stanylenka<sup>®</sup>, 460HRT 940 dtex f 140
- PET; Diolen<sup>®</sup>, 61 ST 550 dtex f 105

Die textilen Eigenschaften des Ausgangsmaterials wurden aus den Herstellerangaben (Datenblättern) entnommen und sind in Tabelle 5.1 zusammengestellt.

Tabelle 5.1: Charakterisierung der Versuchsgarne

Polymerart	Einheit	PA 6.6	PA 4.6	PET
Garnfeinheit	tex	94,2	94,8	55,6
Filamentenzahl		140	140	105
Dichte	g/cm <sup>3</sup>	1,14	1,18	1,38
Feuchtigkeitsabsorption	%	2,5 - 3,1	3,4 - 4,2	0,2 - 0,4
Glasübergangstemperatur	°C	74	82	80
Schmelztemperatur	°C	258	285	256

### 5.1.1 Feinheit

Die Feinheit  $T_t$  eines Garnes oder Zwirns nach dem Tex-System ist der Quotient aus der ermittelte Masse ( $m$ ) und der Länge ( $l$ ) des zu bestimmenden Materials. Die Einheit wird in tex angegeben, wobei 1 tex einer Garnmasse von 1g bezogen auf eine Garmlänge von 1000 m entspricht. Größere Zahlenwerte kennzeichnen gröbere Garne, kleinere Werte kennzeichnen feine Garne.

$$T_t = \frac{m}{l} \quad (5.1)$$

Hierbei bedeutet:

- $T_t$  [tex]      - Feinheit  
 $m$  [g]        - Garngewicht  
 $l$  [1000 m]   - Garmlänge

Aufgrund unterschiedlicher Maßsysteme in verschiedenen Ländern sind auch zahlreiche andere Feinheitsbezeichnungen bekannt. In den nachfolgenden Versuchsreihen werden ausschließlich die Feinheitsbezeichnung Titer tex verwendet.

Die Feinheitsbestimmung (Tabelle 5.2) erfolgt nach DIN EN ISO 2060 [14]. Nach einer 24-stündigen Lagerung des Prüfmateri als im Normalklima [13] wird eine definierte Länge (100 m) des Materials mit Hilfe einer Weife unter Einwirkung einer vorgegebene Vorspannkraft von  $0,5 \text{ cN/tex} \pm 0,1 \text{ cN/tex}$  abgemessen, herausgeschnitten und gewogen. Die zur Gewichtsbestimmung verwendete elektronische Digitalwaage besitzt einen geeichten Messbereich und überschreitet nicht die Fehlergrenze von 0,1 %. Aus der Länge  $l$  und der Masse  $m$  wird dann die Feinheit nach Gleichung 5.1 berechnet.

Tabelle 5.2: Prüfergebnisse von Feinheitsbestimmung des Prüfmateri als nach DIN EN ISO 2060

Nr.	PA 6.6		PA 4.6		PET	
	Gewicht [g]	Feinheit [tex]	Gewicht [g]	Feinheit [tex]	Gewicht [g]	Feinheit [tex]
1	9,48	94,8	9,56	95,6	5,61	56,1
2	9,50	95,0	9,55	95,5	5,60	56,0
3	9,49	94,9	9,57	95,7	5,63	56,3
4	9,48	94,8	9,56	95,6	5,59	55,9
5	9,48	94,8	9,54	95,4	5,62	56,2
6	9,49	94,9	9,57	95,7	5,62	56,2
7	9,75	97,5	9,55	95,5	5,59	55,9
8	9,78	97,8	9,56	95,6	5,64	56,4
9	9,48	94,8	9,55	95,5	5,60	56,0
10	9,50	95,0	9,58	95,8	5,61	56,1
11	9,49	94,9	9,57	95,7	5,57	55,7
12	9,49	94,9	9,56	95,6	5,61	56,1
13	9,48	94,8	9,57	95,7	5,60	56,0
14	9,48	94,8	9,57	95,7	5,60	56,0
15	9,50	95,0	9,57	95,7	5,62	56,2
16	9,48	94,8	9,57	95,7	5,59	55,9
17	9,48	94,8	9,57	95,7	5,61	56,1
18	9,49	94,9	9,56	95,6	5,61	56,1
19	9,49	94,9	9,57	95,7	5,62	56,2
20	9,48	94,8	9,56	95,6	5,65	56,5
<b>MW</b>		<b>95,1</b>		<b>95,6</b>		<b>56,1</b>
s		0,863		0,086		0,185
v (%)		0,907		0,090		0,330

Die Ergebnisse der Feinheitsbestimmung sind in der Tabelle 5.5 (Seite 62) mit den Herstellerangaben vergleichend angegeben. Man sieht, dass die gemessenen Feinheiten der Prüfmateri als mit den Herstellerangaben gut übereinstimmen. Die Feinheiten der Filamentgarne sind Grundlage zur Berechnung der feinheitsbezogene Zugkräfte.

## 5.2 Quasistatischer Zugversuch

Zunächst galt es, die Ausgangsmaterialien bezüglich ihres Kraft-Dehnungsverhalten nach dem klassischen quasistatischen Zugversuch zu charakterisieren. So wurden alle drei Versuchsmaterialien nach DIN EN ISO 2062 mechanisch bis zum Bruch geprüft. Zur Durchführung der Versuche wurde die Tischprüfmaschine Z 010 der Firma Zwick GmbH & Co.KG. verwendet, die in Abbildung 5.1a zu sehen ist. Es handelt sich um eine elektromechanische Universal-Prüfmaschine zur Durchführung von Zug-, Druck- und Biegeversuchen. Als Versuchsergebnis erhält man Kraft-Dehnungs-Kurven, aus denen die Ergebnisse berechnet werden.

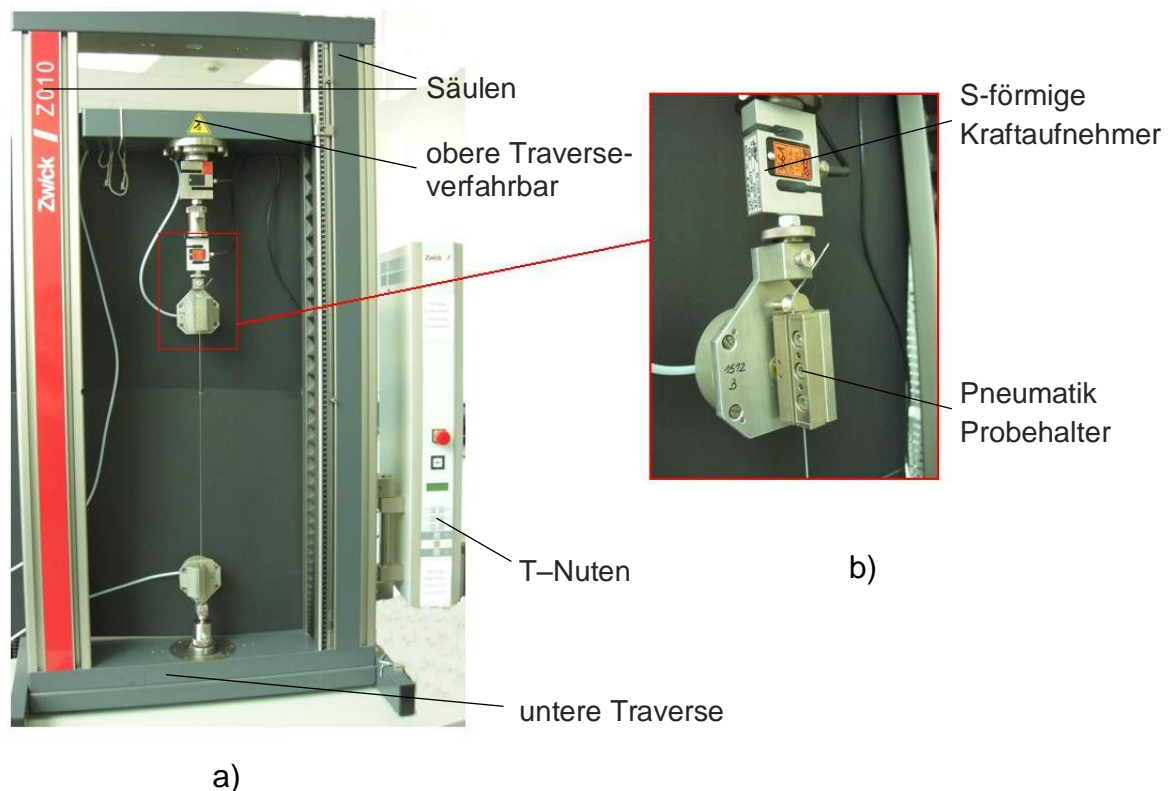


Abbildung 5.1: Prüfmaschine Zwick Z 010: a) Gesamtdarstellung b) Pneumatische Flachklemme

Die Maschine besteht aus einem Lastrahmen, der zusammen mit der elektronischen Mess- und Regeleinheit die Grundeinheit darstellt. Der Lastrahmen besteht aus zwei Führungsprofilen mit integrierten, spindelfreien Kugelgewindetrieben, einer festen unteren und fahrbaren mittleren Traverse sowie einem Kopfblech. Der mechanische Antrieb befindet sich im Sockel. Zum Anschluss von Prüfwerkzeugen und Kraftaufnehmern dient eine

einheitliche Zentralbefestigung an der Traverse. Der in Abbildung 5.2a zu sehende Kraftaufnehmer wandelt die physikalische Größe Kraft in eine elektrisch messbare Spannung um. Er besteht aus einem mechanischen Verformungskörper mit aufgeklebten Dehnungsmessstreifen (DMS). Die DMS sind dehnungsabhängige, elektrische Widerstände welche zu einer Messbrücke, wie in Abbildung 5.2b abgebildet, zusammengeschaltet sind. Die Messbrücke stellt eine Wheatstone'sche Brückenschaltung mit Vollbrücke dar. Damit ist die höchst mögliche Genauigkeit für dieses Messprinzip gewährleistet. Der Wert der Messspannung am Ausgang der Brückenschaltung ist analog der zu messenden Kraft, die auf den Verformungskörper und das ganze Aufnehmersystem wirkt. Ein abgeschirmtes Messkabel stellt die Verbindung zum Messverstärker der Messelektronik her. Die vorliegende Prüfmaschine hat eine maximale Prüfkraft von 10 kN. Die Maschine hat eine Traversengeschwindigkeit von 0,001 mm/min bis 2000 mm/min mit einer Genauigkeit von 1 % der eingestellten Geschwindigkeit. Die Wegmessung erfolgt über einen digitalen Traversenwegaufnehmer. Mit diesem wird der Fahrweg der Traverse direkt gemessen. Zusätzlich wird dieser zur Positions- und Geschwindigkeitsregelung des Antriebes genutzt. Die Wegauflösung beträgt 0,0272  $\mu\text{m}$ . Diese Genauigkeit der Wegmessung wird jedoch im Prüfbetrieb bei der Messung des Weges über den Traversenwegaufnehmer nicht erreicht. Grund hierfür ist die bei jeder Prüfung vorhandene Verwindung der Traverse, die abhängig von der Prüfkraft auftritt. [81]

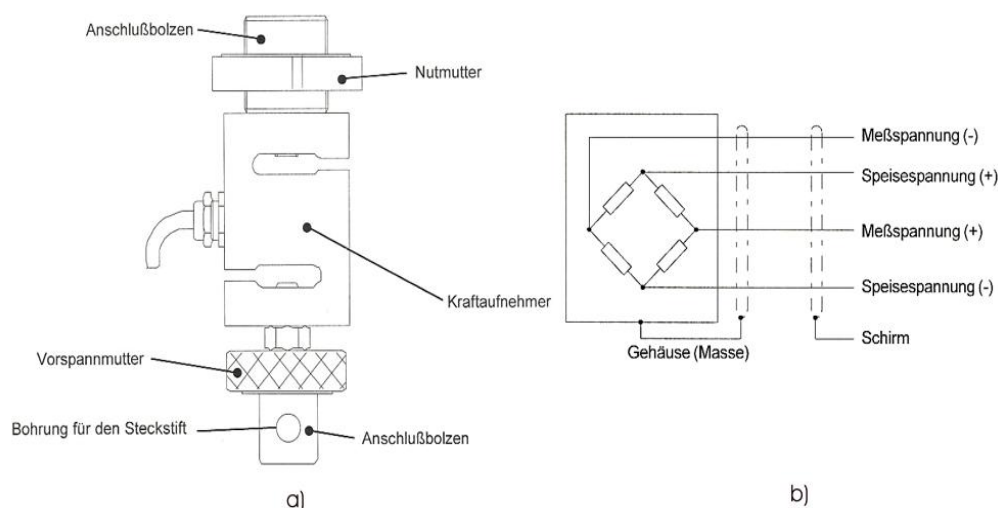


Abbildung 5.2: Kraftaufnehmer Zwick Z 010: a) Prinzipskizze Anordnung b) DMS-Messbrücke [81]



### ***Klemmen und Versuchparameter***

Für die Untersuchungen mit der Zwick Z 010 Zugprüfmaschine haben wir geeignete pneumatische Aluminium-Klemmen ausgewählt, die in Abbildung 5.1b zu sehen sind, mit einer Klemmfläche 60 mm x 7 mm. Der Spanndruck der Klemmen wurde auf Grund der pneumatischen Regelung, während der gesamten Prüfung konstant gehalten.

Für die ersten Versuche wurde die Filamentgarnfestigkeit nach einer 24-stündigen Lagerung des Prüfmaterials im Normklima (DIN EN 139) [13] nach Normprüfbedingungen [15], die in der Tabelle 3.1 (S. 33) zusammengestellt sind, ermittelt.

Die maximale Prüfgeschwindigkeit der eingesetzten Universalprüfmaschine Zwick Z 010 liegt bei 2000 mm/min. Wie schon in Kapitel 2.2.7 ausführlich diskutiert wurde, beschreibt die Dehnrates die Verhältnisse in der Messprobe besser, als die Angabe der Prüfgeschwindigkeit. Auf Grundlage der Gleichung 2.15 wurden daher durch Variation der Abzugsgeschwindigkeiten und Einspannlängen verschiedene Dehnrates realisiert. Die untersuchten Dehnrates können der Versuchsmatrix aus Tabelle 5.3 entnommen werden. Die jeweils gleichen Dehnrates sind mit einer Farbe gekennzeichnet. In der Tabelle 5.4 sind die unter Normprüfbedingungen ermittelten Prüfwerte (TITK) und die Herstellerdaten (PHP) vergleichend angegeben.

Tabelle 5.3: Matrixtabelle für Dehnrates

	50 mm/min	250 mm/min	500 mm/min	1000 mm/min	1800 mm/min
25 mm	0,033	0,167	0,33	0,67	1,2
50 mm	0,0167	0,083	0,167	0,33	0,6
500 mm	0,00167	0,0083	0,0167	0,033	0,06

Tabelle 5.4: Gegenüberstellung Prüfwerte TITK und Herstellerangaben PHP

Eigenschaft	Einheit	PA 6.6		PA 4.6		PET	
		PHP*	TITK	PHP*	TITK	PHP*	TITK
Garnfeinheit	[Tex]	94,2	95,1	94,8	95,6	55,6	56,1
Bruchkraft	[N]	79,5	73,85	66,4	61,72	36,0	33,82
Bruchdehnung	[%]	17,9	18,51	19,5	21,4	22,0	23,48

\*Sollwerte Datenblatt

### 5.3 Dynamischer Zugversuch

Gegenüber dem quasistatischen Zugversuch wird der dynamische Zugversuch bei wesentlich höheren Dehnraten durchgeführt. Prüfmethodik und Messtechnik haben beim dynamischen Zugversuch einen weit höheren Einfluss auf die Ergebnisse. Die Ursachen liegen zum einen in den sehr kleinen Versuchszeiten und zum anderen im verstärkten 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. Man kann, mit Hilfe digitaler Filter die Schwingung reduzieren, allerdings birgt dieses Vorgehen die Gefahr einer Verzerrung und damit einer Verfälschung des gesamten Messsignals. [3, 55, 85] Nach Smith [63] soll der Effekt der Fehlerfortpflanzung, bei den Zugversuchen, die eine Prüfgeschwindigkeit von 10 m/s überschreiten, berücksichtigt werden.

Die in der Messprobe entstehende Dehnung wird durch die Kraft der ziehenden Klemmen angeregt. Sie bewegt sich bis zum festen Einspannende, wo sie reflektiert wird, und die reflektierte Dehnung wandert wieder zurück. Die Dehnung und die Spannung werden durch die Reflektion ungefähr verdoppelt [3, 42, 43, 54, 66, 74]. Im Normalfall geschieht der Spannungsablauf sehr schnell im Verhältnis zur Beanspruchungsgeschwindigkeit, so dass sich die Dehnung fast sofort über die gesamte Messlänge ausbreitet. Nach Angaben aus der Literatur sind der Spannungsablauf und ein ihm annähernd proportionaler Dehnungsablauf bei höherer Beanspruchungsgeschwindigkeit nicht mehr durch die ganze Messprobe gleichmäßig verteilt. Die Dehnung kann im Extremfall in einem Moment und in einem Punkt der Messprobe sehr groß werden und im nächsten Moment dagegen gleich Null sein. Deswegen werden bei den Schnellzugversuchen an Kunststoffen bevorzugt verkürzte Probekörper eingesetzt [43], damit sich quasihomogene Spannungszustände möglichst schnell einstellen. Das widerspricht jedoch den Normprüfbedingungen von Garnen.

Aufgrund der schwierigen messtechnischen Signalerfassung in dynamischen Zugversuchen sind die Versuchsparameter, wie z.B. die Prüfgeschwindigkeit, und das zu erwartende Werkstoffverhalten ergebnisorientiert zu gestalten. Ergebnisorientiert bedeutet dabei, in Abhängigkeit von der Art der zu erarbeitenden Ergebnisse - Kennwerte des Zugversuches oder/und die Fließkurve - sowie deren gewünschte Aussagekraft im Sinne ihrer Genauigkeit zu erfassen. Gerade letzteres bestimmt den Aufwand an Technik, Zeit und Personal bei der Durchführung und Auswertung derartiger Versuchen in großem Maße.

Hydraulische Prüfmaschinen erreichen nicht ganz die hohen Geschwindigkeiten, die z.B. mit Rotationsprüfmaschinen möglich sind, können dagegen aber auch im Bereich niedrigerer Geschwindigkeiten betrieben werden. Daneben sind die Dehnraten in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit und der Einspannlänge einstellbar.

Für die Durchführung der dynamischen Zugversuche stand eine Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine zur Verfügung. Die Wirkungsweise der Maschine wurde in Kapitel 2.3.1 (Zugprüfmaschine mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit) beschrieben. Da solche Maschinen erst seit wenigen Jahren für Materialuntersuchungen zur Verfügung stehen und die Prüfung von Textilien auf solchen Geräten in den Kinderschuhen steckt, existieren noch keine verbindlichen Prüfvorschriften. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden übertragbare Bedingungen aus bekannten Regelwerken (z.B. DIN EN ISO 2062) übernommen.

### **5.3.1 Maschinenparameter**

Zur Durchführung der dynamischen Zugversuche wurde die Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine HTM 2008 der Firma Zwick GmbH & Co.KG. verwendet, die in Abbildung 5.3 zu sehen ist. Es handelt sich um eine servohydraulische Universal-Prüfmaschine zur Durchführung von Zug-, Druck- und Biegeversuchen.

An dieser Stelle ist noch eine Anmerkung zur Wegmessung der HTM 2008 angebracht. Die Dehnungsmessung erfolgt mit inkrementaler Messmethode [85], wobei die Wegsensoren den Weg nicht direkt messen, sondern dieser in kleine Einheiten (Inkrement) aufgeteilt ist und über eine Zählschaltung die Inkremente als Funktion der Zeit erfasst werden. Mit dieser Methode werden immerhin Genauigkeiten  $< 1 \mu\text{m}$  erreicht. 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. [29]

Zur experimentellen Ermittlung der Zugfestigkeit werden Messproben mit einer näherungsweise konstanten Verformungsgeschwindigkeit bis zum Bruch belastet. Die Versuchsergebnisse sind Kraft-Dehnungs-Kurven, die in der Abbildung 5.4 dargestellt sind. Aus ihnen können dann die feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven berechnet werden.

In Tabelle 5.5 werden die Maschinenparameter der quasistatischen (Zwick Z 010) und dynamischen (Zwick HTM 2008) Prüfmaschine gegenübergestellt.

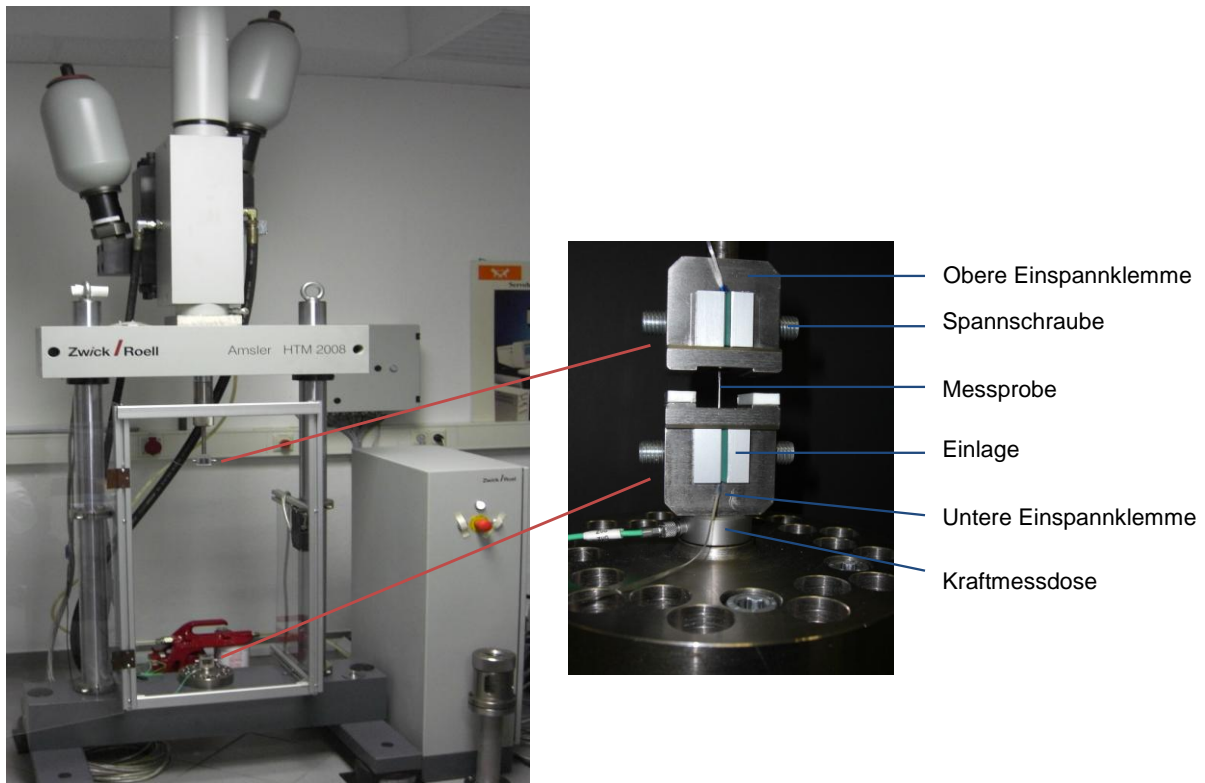


Abbildung 5.3: Hochgeschwindigkeitsprüfmaschine HTM 2008

Für die Prüfung kann man die Prüfgeschwindigkeit im einem weiten Bereich auswählen, und zwar von sehr langsam (0,5 m/s) bis zur maximalen Geschwindigkeit (10 m/s). Die gewünschte Prüfgeschwindigkeit wird über eine Vorlaufstrecke bzw. Beschleunigungsstrecke erreicht, welche durch die Maschinensteuerung in Abhängigkeit von der zu realisierenden Prüfgeschwindigkeit ermittelt wird. Während der Beschleunigungsstrecke erfolgt noch keine Belastung der eingespannten Messprobe. Diese erfolgt erst bei Anlegen der Prüfgeschwindigkeit, welche dann über den gesamten Versuchsablauf nahezu konstant gehalten wird. [85] Dies ist in Abbildung 5.5 dargestellt.

Hochgeschwindigkeitszugprüfung ist wesentlich komplexer als die quasistatische Zugprüfung. Mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit nehmen die verschiedenen, nachfolgend erläuterten Probleme zu [20]:

- Zuverlässige Realisierung der Zugbelastung mit konstanter Prüfgeschwindigkeit,
- Geringstmögliche Klemmenmasse,
- Schonende Krafteinleitung,
- Klemmenrutsch und Klemmenbruch,
- Ausgeprägte Schwingungsvorgänge in Garnprobe und Messsystem durch schlagartige Belastung.

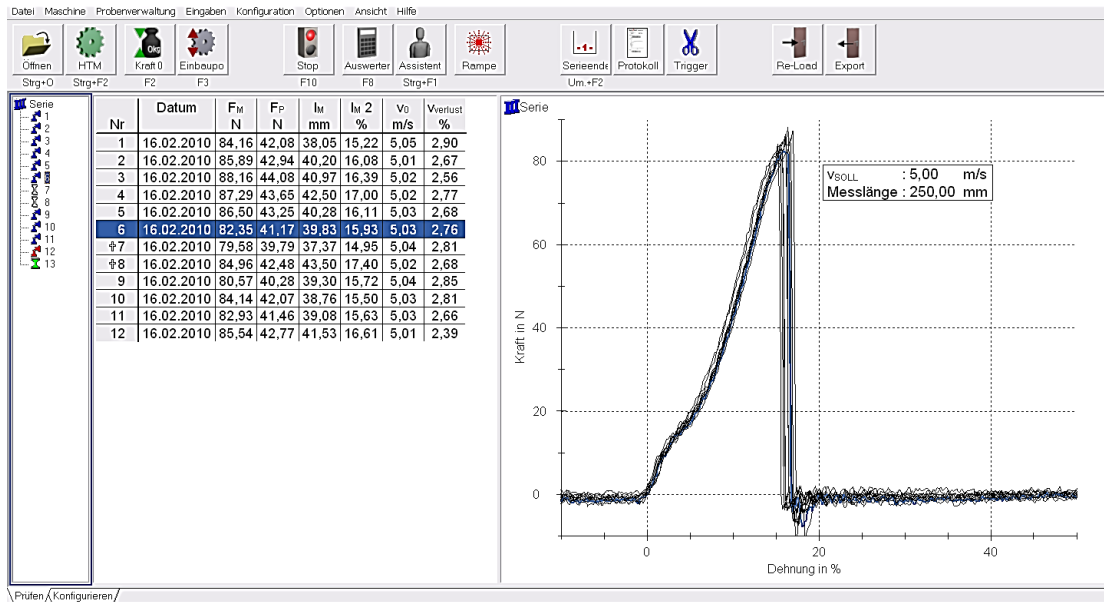


Abbildung 5.4: HTM 2008 - Darstellung von Kraft-Dehnungs-Kurven

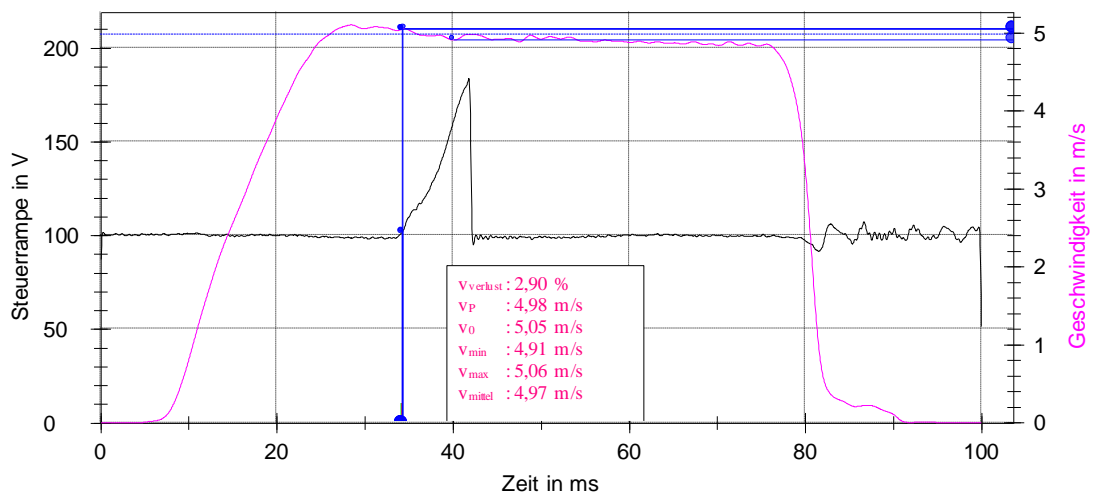


Abbildung 5.5: HTM 2008 - Näherungsweise konstante Abzugsgeschwindigkeit durch die Prüfung

Tabelle 5.5: Vergleich der Maschinenparameter von Zwick Z 010 und Zwick HTM 2008

Daten	Zwick Z010	Zwick HTM 2008
Abzugsgeschwindigkeit	~ 0 m/s bis 0,03 m/s	0,5 m/s bis 10 m/s
Einspannlänge	20 mm bis 500 mm	20 mm bis 500 mm
Maximalkraft	10 kN	20 kN
Kraftmessung	DMS	Piezoelektrischer Kraftaufnehmer
Dehnungsmessung	digitale Messmethode	inkrementale Messmethode
Software, Steuerung, Auswertung	testXpert®	testXpert®

### 5.3.2 Optimierung der Klemmen

Problematisch hinsichtlich einer sicheren Klemmung sind vor allem glatte Filamentgarne und hochfeste Garne. Zum sicheren, rutschfreien Einspannen glatter und hochfester Materialien ist ein hoher Klemmndruck erforderlich, der aber andererseits durch Quetschen an der Einspannstelle die Probe vorschädigen und damit das Ergebnis verfälschen kann. [53]

Unabhängig von der Art der Beschleunigung ist die Ankopplung der beschleunigten Masse an die Messprobe von großer Bedeutung. Bei den Hochgeschwindigkeitsprüfungen muss die Klemmenmasse so gering wie möglich sein, deshalb können bei der Zugprüfmaschine keine pneumatischen Klemmen verwendet werden. Von dem Hersteller wurden die Schraub-Probehalter, die in der Abbildung 5.3 rechts zu sehen sind, mit den Spannbacken mit profilierter Oberfläche (Abbildung 5.6) mitgeliefert. Es sind verschiedene Klemmenarten aus verschiedenen Materialien auf dem Markt. Aus der Produktpalette wurden nachfolgende Spannbacken, die in der Abbildung 5.6 zu sehen sind, für die Untersuchungen ausgewählt.

- 1) Umschlingungsklemmen,
- 2) Spannbacken mit profilierter Oberfläche,
- 3) Spannbacken aus Aluminium mit Vulkollan-Belägen.

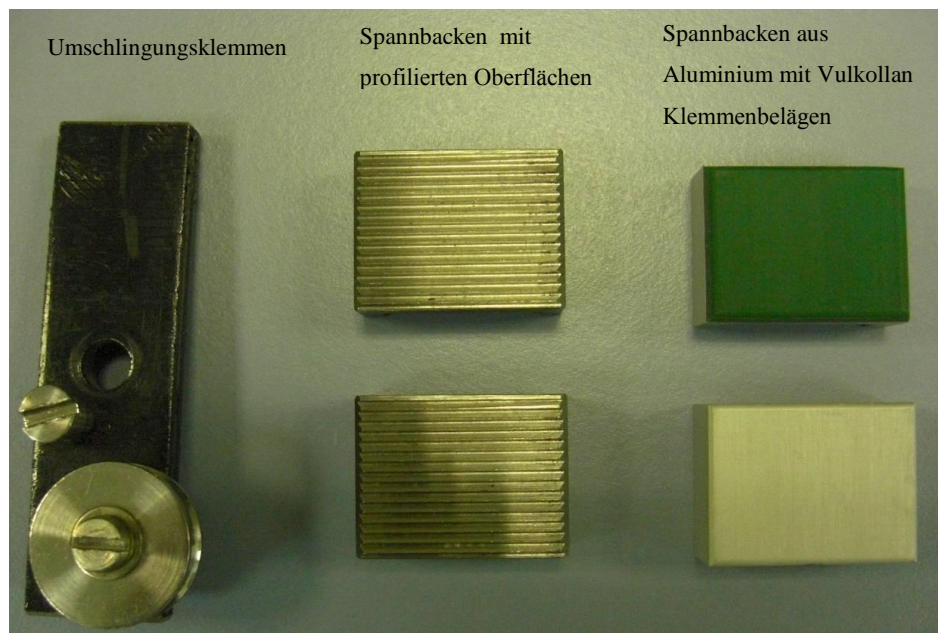


Abbildung 5.6: Getestete Klemmen und Backenbeläge

### 5.3.3 Versuchparameter und Ergebnisdarstellung

Die Art der Probenahme übt ebenso einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis aus. Untersuchungen mit Hilfe standardisierter Prüfverfahren sind daher an repräsentativen<sup>4</sup> Proben durchzuführen, so dass die Probenahme in einer bestimmten Art und Weise zu erfolgen hat. Für die Zugprüfung an Fäden wird empfohlen, die Proben einer Filamentart aus möglichst vielen Spulen zu entnehmen. Für die Untersuchungen stand jedoch für jedes Material nur eine Spule zur Verfügung, so dass zum Erhalt von repräsentativen Probenmaterialien zwischen einzelnen Entnahmen mehrere Meter heruntergewickelt und verworfen wurden. Die Multifilamentgarne 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 Art und Weiße der Befestigung des Prüflings beeinflusst das Messergebnis entscheidend. Die Messprobe darf beim Einspannen nicht beschädigt werden, ebenso müssen hohe Vorkräfte vermieden werden. Die Variation der Dehnraten erfolgte auf Grundlage der Gleichung 2.15 über veränderte Abzugsgeschwindigkeiten und Einspannlängen. Die realisierten Dehnraten können aus der Versuchsmatrix in der Tabelle 5.6 entnommen werden. Die Variantenreihen mit jeweils der gleichen Dehnraten sind mit einer Farbe gekennzeichnet.

Tabelle 5.6: Versuchsmatrix

	0,5 m/s	0,8 m/s	1 m/s	1,2 m/s	2 m/s	2,5 m/s	5 m/s	8 m/s	10 m/s
20 mm	25 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	50 s <sup>-1</sup>	60 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	125 s <sup>-1</sup>	250 s <sup>-1</sup>	400 s <sup>-1</sup>	500 s <sup>-1</sup>
30 mm	16,7 s <sup>-1</sup>	26,7 s <sup>-1</sup>	33,3 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	66, s <sup>-1</sup>	83,3 s <sup>-1</sup>	166,7 s <sup>-1</sup>	267 s <sup>-1</sup>	333,3 s <sup>-1</sup>
50 mm	10 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	24 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	50 s <sup>-1</sup>	100 s <sup>-1</sup>	160 s <sup>-1</sup>	200 s <sup>-1</sup>
125 mm	4 s <sup>-1</sup>	6,4 s <sup>-1</sup>	8 s <sup>-1</sup>	9,6 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>	64 s <sup>-1</sup>	80 s <sup>-1</sup>
250 mm	2 s <sup>-1</sup>	3,2 s <sup>-1</sup>	4 s <sup>-1</sup>	4,8 s <sup>-1</sup>	8 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>	32 s <sup>-1</sup>	40 s <sup>-1</sup>
500 mm	1 s <sup>-1</sup>	1,6 s <sup>-1</sup>	2 s <sup>-1</sup>	2,4 s <sup>-1</sup>	4 s <sup>-1</sup>	5 s <sup>-1</sup>	10 s <sup>-1</sup>	16 s <sup>-1</sup>	20 s <sup>-1</sup>

Textilien sind keine ideal gleichmäßigen Körper, deshalb unterliegen die Eigenschaften textiler Stoffe 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 entnommenen Proben muss so groß sein, dass die an das

<sup>4</sup> Probe, die infolge ihrer Zusammensetzung den Merkmalen und zugehörigen Streuungen (Merkmalschwankungen) des zu beurteilenden Prüflinges nahe kommt.

Messergebnis gestellten Genauigkeitsansprüche erfüllt werden [48]. Da für dynamische Prüfungen keine Kenntnisse zu den Werteverteilungen bekannt waren, wurde in Vorversuchen mittels einer Streuungsbestimmung die notwendige Anzahl der Einzelprüfungen von 10 bzw. 12 Messproben ermittelt. Jede Versuchsreihe wurde an 12 Messproben durchgeführt, und am Ende der Versuchsreihe wurden 2 Extreme Werte verworfen. In der Statistikauswertung wurden nur die 10 gültigen Messwerte berücksichtigt. Entsprechend der Abbildung 5.7 wurde aus diesen 10 Einzelkurven (graue Kurven) jeweils die Mittelwertkurve (blaue Kurve) ermittelt. Die Mittelwertkurven werden für die nachfolgende Ergebnisdiskussion benötigt, wobei hierbei die gemessenen Zugkräfte feinheitsbezogen in cN/tex angegeben sind.

Die Abbildung 5.8 zeigt, dass die Messkurven beim dynamischen Zugversuch aufgrund der schlagartigen Belastung mit Schwingungen überlagert sind (schwarze Kurve). Deswegen werden die Kurven durch ein mathematisches Verfahren, mit Hilfe des Programms Origin 8.5 geglättet (rote Kurve). Origin 8.5 ist eine Software, die aus gegebenen Messwerten Funktionen zur Datenanalysen und Erstellung von publikationsreifen Grafiken entwickelt. Das Programm bietet eine Vielzahl von Hilfsmitteln, die auf die jeweiligen Anforderungen von Wissenschaftlern und Ingenieuren in Bereich der Signalverarbeitung zugeschnitten sind. Es ist jedoch darauf zu achten, dass das Messsignal nicht zu stark beeinträchtigt wird, indem man die Filterbreite kleiner wählt.

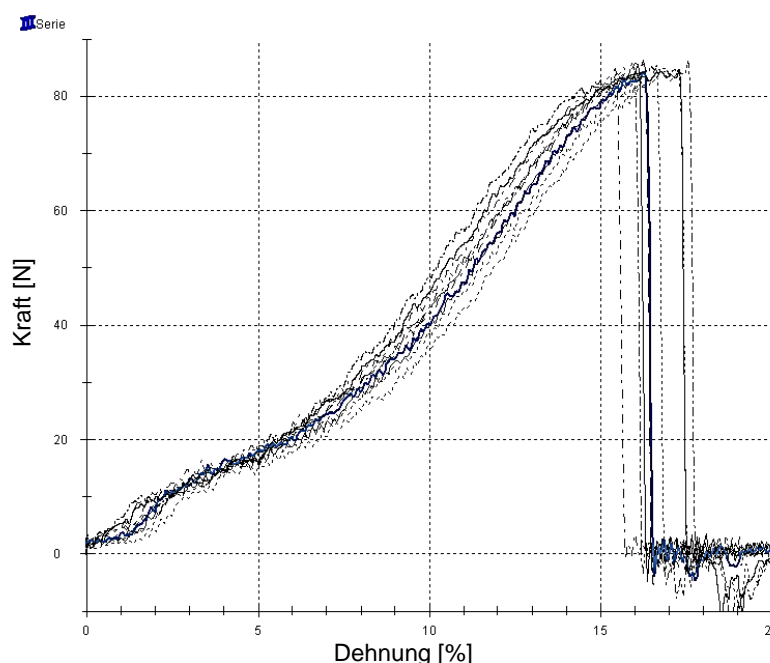


Abbildung 5.7: Beispiel zur Ermittlung der Mittelwertkurve aus einer Versuchsreihe



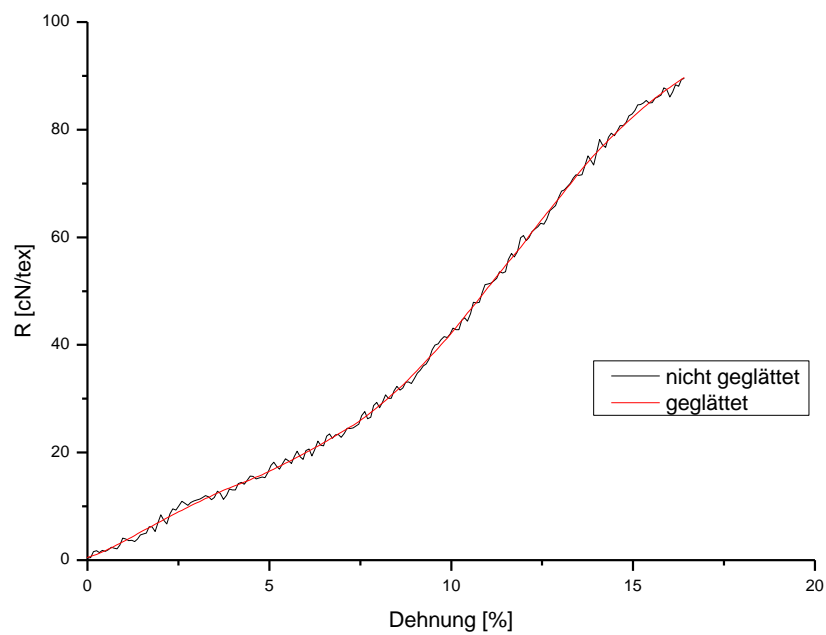


Abbildung 5.8: Glättung des feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven

## 6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Grundlage der Ergebnisdiskussion ist das Kraft-Dehnungs-Verhalten, gemessen unter statischen Beanspruchungen (vgl. Tabelle 3.1 und 5.3). Die dazu vergleichende Auswertung der Versuchsreihen bei dynamischer Beanspruchung (vgl. Versuchsmatrix 5.6) bildet jedoch den Schwerpunkt der experimentellen Untersuchungen und Betrachtungen.

Zunächst werden die Versuchsergebnisse bezüglich der ausgewählten Einflussgrößen; Klemmen (Kapitel 6.1) und Prüfmaschinentyp (Kapitel 6.2) diskutiert. Diese Ergebnisse sollen Hinweise zum Einsatz der geeigneten Prüfmethodik für die dynamischen Zugversuche liefern. In den Kapitel 6.3 und 6.4 werden dann die Ergebnisse des Kraft-Dehnungs-Verhaltens der ausgewählten Versuchsgarne bei verschiedenen Geschwindigkeiten und in Abhängigkeit von Einspannlänge und Dehnrates wertend gegenübergestellt. Die daraus abgeleiteten Kenngrößen liefern bisher nicht bekannte Materialkennwerte von Hochleistungsgarnen aus Polyamid und Polyethylenterephthalat (vgl. Kapitel 5.1) bei dynamischer Beanspruchung.

Wie schon im Kapitel 5.3.3 erwähnt, wurden alle dargestellten dynamischen Kraft-Dehnungs-Kurven mit dem Programm Origin 8.5 geglättet.

### 6.1 Untersuchungen zum Klemmeneinfluss

Es wurden die in Abbildung 5.3 und 5.6 gezeigten Klemmen und Backenbeläge getestet. Tabelle 6.1 zeigt die dabei angewendeten Prüfbedingungen.

Tabelle 6.1: Dynamischer Zugversuch-Prüfbedingungen zur Ermittlung der geeigneten Klemmen und Klemmenbeläge

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

### 1. Unterschied der Oberfläche Profil/Vulkollan

Die Spannbacken mit profilierter Oberfläche stellen die Standardklammen für kompakte Proben dar und wurden als erstes für die Prüfungen der Multifilamentgarne genutzt. Es zeigte sich jedoch, dass diese profilierte Oberfläche für die Garnprüfung nicht geeignet ist. Durch die scharfen Oberflächenkanten wird das Garn in der Klemme so geschädigt, dass vermehrt Klemmbrüche erfolgen und man keine repräsentativen Messwerte erhält.

### 2. Unterschied Backen/Umschlingungsklappen

Als weitere Backenklappenführung standen die mit Vulkollan beschichteten Aluminiumspannbacken zur Verfügung. Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungsreihen durchgeprüft mit diesen Spannbacken und mit den Umschlingungsklappen, wurden vergleichend betrachtet. Die geglätteten feinheitenbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven von PA 6.6 940 f 140 wurden für beide Klappentypen mit Dehnraten von  $10 \text{ s}^{-1}$ ,  $40 \text{ s}^{-1}$  und  $80 \text{ s}^{-1}$  erfasst und in der Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3 dargestellt.

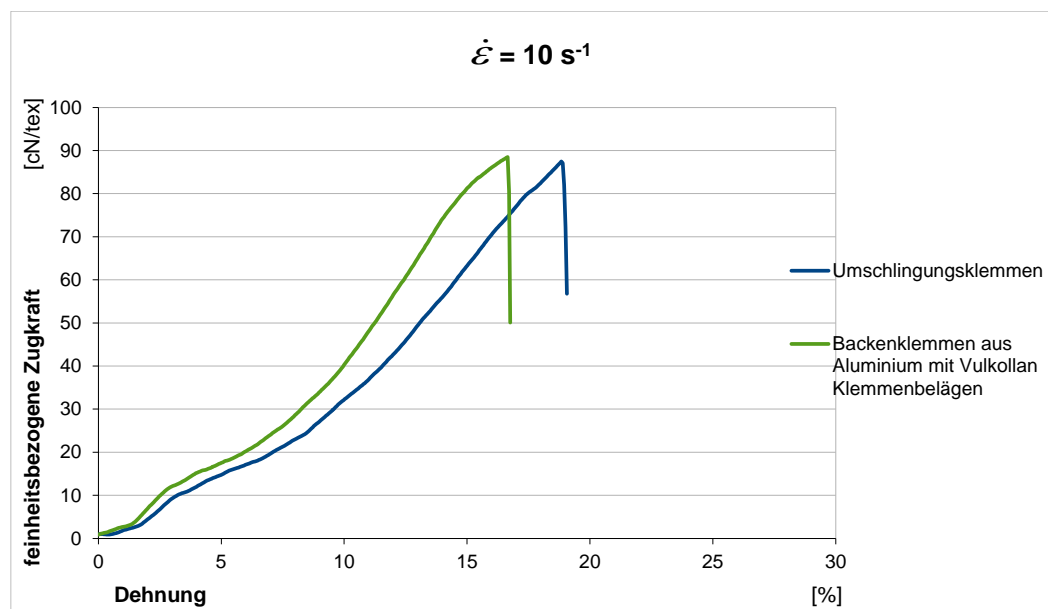


Abbildung 6.1: Dynamischer Zugversuch-Klappenvergleich bei Einspannlänge 500 mm

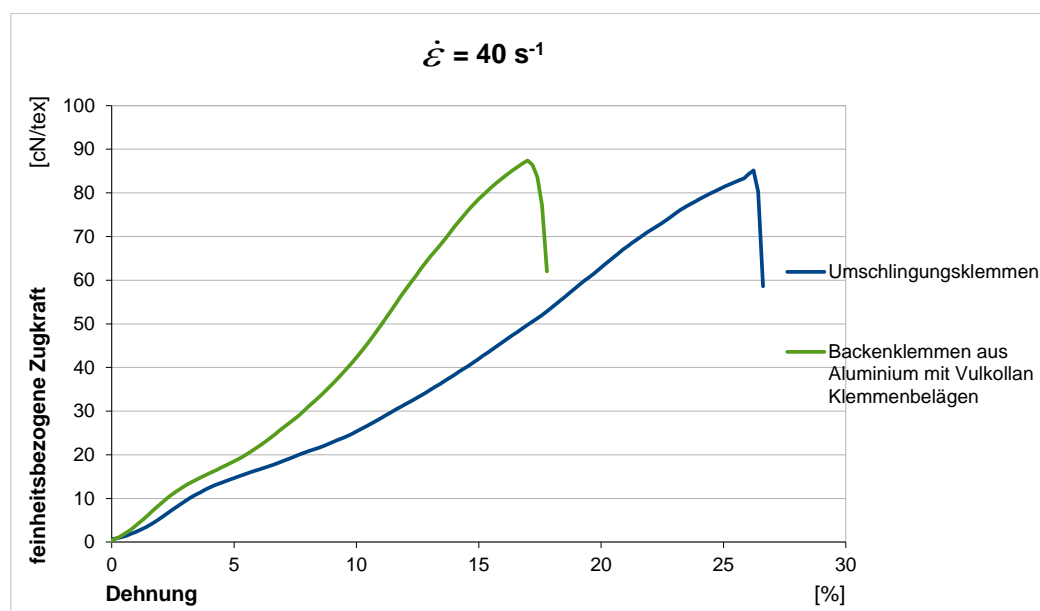


Abbildung 6.2: Dynamische Zugversuch-Klemmenvergleich bei Einspannlänge 125 mm

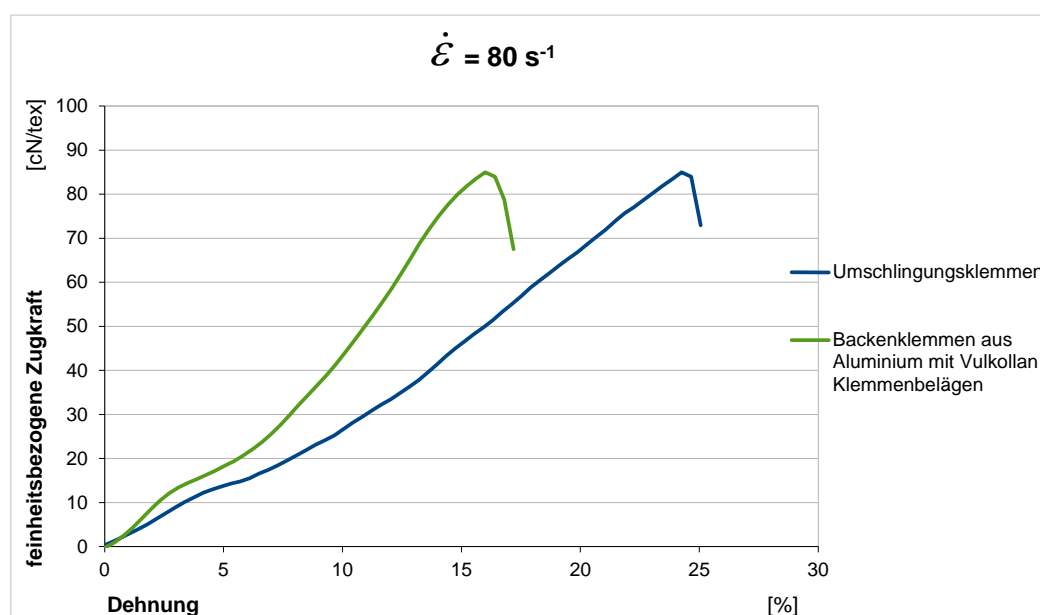


Abbildung 6.3: Dynamischer Zugversuch-Klemmenvergleich bei Einspannlänge 125 mm

Der Vergleich der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurven verdeutlicht, dass die maximalen Zugkräfte beider Klemmentypen auf dem gleichem Wertenniveau liegen. Das beweist, dass die Messproben bei den Messungen durch die Backenklemmen nicht durch Quetschen an den Einspannstellen beschädigt werden, ansonsten müssten die Zugkräfte mittels Backenklemmen niedriger sein gegenüber denen bei Einsatz von Umschlingungsklemmen. Deutliche Unterschiede sind allerdings bei der Dehnung zu sehen. Die Ursache für die höheren Dehnungen mit den Umschlingungsklemmen liegt an einer

unzureichenden Begrenzung der Einspannlänge  $l_0$ , weil die Längenänderung in den Klemmen mit erfasst wird. Dieser Dehnungsfehler ist bei allen Versuchen vorhanden. Dabei wirkt sich die Dehnung in der Umschlingungsklemme bei Einsatz kurzen Proben stärker auf die prozentuale Gesamtdehnung der Messung aus. Die Dehnung kann bei Verwendung von Umschlingungsklemmen nur dann korrekt erfasst werden, wenn an der Probe Messmarken angebracht werden und die Längenänderung mit speziellen optischen Längenänderungsmesseinrichtungen gemessen wird, was mit einem zusätzlichen Aufwand verbunden ist. Aus diesem Grund wurden für alle weiteren Prüfungen Spannbacken aus Aluminium mit Vulkollan-Klemmenbelägen eingesetzt.

### 3. Alterung des Klemmenbelages

Es ist zu vermuten, dass die Vulkollan-Klemmenbeläge nach einer entsprechenden Anzahl von Prüfvorgängen geschädigt werden. Das kann zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen. Um den Einfluss einer Alterung oder Beschädigung der Vulkollan-Klemmenbeläge auszuschließen, wurde nach ca. 1300 Prüfungen eine Wiederholungsmessung bei einer Dehnrage von  $1 \text{ s}^{-1}$  (Einspannlänge  $l_0 = 500 \text{ mm}$ , Prüfgeschwindigkeit  $v = 0,5 \text{ m/s}$ ) durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.4 zu sehen. Für Spannbacken mit Vulkollan-Beschichtung wurden keine Veränderungen der Messergebnisse nach ca. 200 Betriebsstunden festgestellt. Das bedeutet, die Spannbacken mit Vulkollan-Beschichtung sind mindestens für 1300 dynamische Prüfungen einsetzbar.

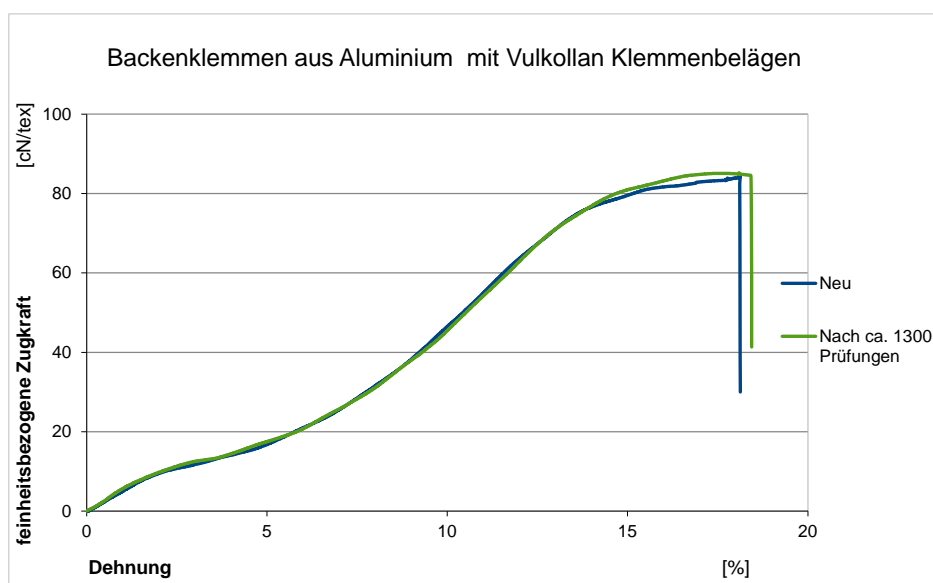


Abbildung 6.4: Dynamischer Zugversuch-Einfluss der Alterung und/oder Beschädigungen von Klemmenbelägen aus Vulkollan

## 6.2 Maschineneinfluss

### 6.2.1 Vergleich der Prüfmethode

Da der dynamische Zugversuch nicht normiert ist, stellt sich bei Messungen mit höheren Dehnraten die Frage, ob sich die Kraft-Dehnung-Eigenschaften nur durch einen andersartigen Zerreimechanismus oder auch durch Einsatz unterschiedlicher Prüfmaschinen ndern.

Um den Einfluss der Prüfmaschine auf die Ergebnisse zu untersuchen, haben wir an beiden verwendeten Zugprüfmaschinen vergleichende Zugversuche mit nahezu identischer Dehngeschwindigkeit durchgeführt. Dabei wurde an der klassische Prüfmaschine Zwick Z 010 eine Versuchsreihe mit der kleinsten Einspannlänge (25 mm) und der größten Prüfgeschwindigkeit (1800 mm/min), d.h. mit höchster Dehnrates ( $1,2 \text{ s}^{-1}$ ), die die Maschine prüfen kann, getestet. Bei der Prüfmaschine HTM 2008 haben wir im Gegenzug die Versuchsreihe mit der kleinsten Dehnrates ( $1 \text{ s}^{-1}$ ), die die Maschine realisieren kann, durchgeführt (d.h. Einspannlänge 500 mm und Prüfgeschwindigkeit 0,5 m/s).

In der Abbildung 6.5 sind die Versuchsergebnisse in einem Diagramm als feinheitenbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven dargestellt. Es zeigt sich, dass der Maschinentyp keinen Einfluss auf die Zugkraft hat, da die Zugkräfte von beiden Prüfmaschinen auf gleichem Wertenniveau (ca. 83 cN/tex) liegen. Die Dehnungswerte dagegen unterscheiden sich stark. Der Grund hierfür ist in den unterschiedlichen Einspannlängen zu sehen. Bei der geringen Einspannlänge von 25 mm wirken sich Fehler in der Klemmung prozentual wesentlich stärker auf die Dehnung aus, als bei den Proben mit einer Einspannlänge von 500 mm. Eine unmittelbare Vergleichbarkeit ist damit nicht gegeben.

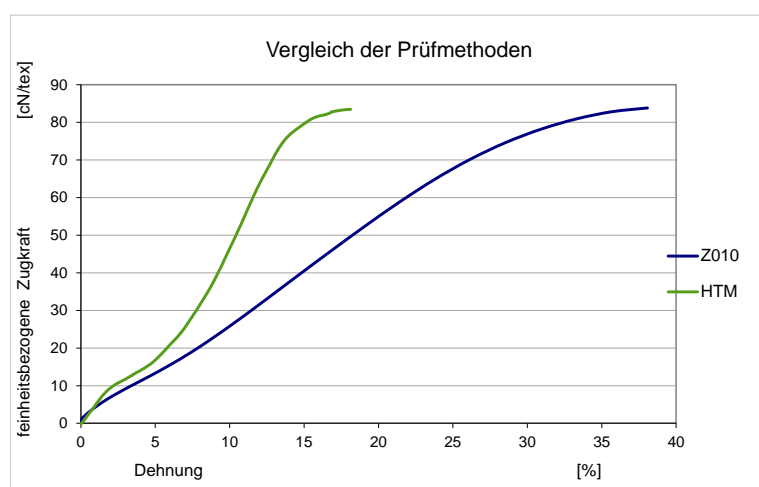


Abbildung 6.5: Daten Vergleich der beiden Prüfmethoden

Die Norm DIN EN ISO 2062 zur Zugprüfung schreibt, wie schon in den Kapitel 3.1.2 angedeutet wurde, eine Prüfzeit von 20 Sekunden vor, d.h. die Dauer eines Zugversuchs bis zum Erreichen der Höchstzugkraft soll 20 s nicht überschreiten. In der Tabelle 6.2 ist die Prüfzeit von einigen Dehnraten dargestellt. Die Prüfzeit wurde aus den Kraft-Zeit-Diagrammen abgelesen und zwar von der Kraft 0 bis zu Höchstzugkraft. Da die Prüfzeiten bei höheren Dehnraten sehr klein sind, wurde als Einheit Milisekunde (ms) gewählt. Man sieht wie sehr sich die Prüfdauer einer Messung mit einer Dehnrates von  $500 \text{ s}^{-1}$  im Gegensatz zum Normzugversuch reduziert, was zu Folge hat, dass der Deformationsvorgang in außergewöhnlich kurzer Zeit abläuft. Die Prüfung mit kleinster Dehnrates dauert 110.000 ms (bzw. 110 s), was deutlich die Normprüfzeit überschreitet.

Tabelle 6.2: Prüfzeit

Maschine	Dehnrates [ $\text{s}^{-1}$ ]	Einspannlänge [m]	Geschwindigkeit	Prüfzeit [ms]
Z010	0,00167	0,5	50 mm/min	110.000
	0,0167	0,5	500 mm/min	11.000
	1,2	0,25	1800 mm/min	400
HTM	1	0,5	0,5 m/s	200
	40	0,05	2 m/s	5
	40	0,125	5 m/s	4
	200	0,05	10 m/s	0,7
	500	0,02	10 m/s	0,3

### 6.2.2 Einfluss der Beweglichkeit der mechanische Vorlaufeinrichtung

Wie schon in Kapitel 2.2.7 und 5.3.3 erläutert, wurden die verschiedenen Dehnrates einerseits durch Variation der Prüfgeschwindigkeit, andererseits durch Änderung der Einspannlänge erreicht. Bei größeren Einspannlängen (500 mm, 250 mm und 125 mm) wurde die notwendige Vorlaufstrecke bei HTM 2008 innerhalb der Prüflänge gefahren. Bei kleineren Einspannlängen (50 mm, 30 mm und 20 mm) wurde die mechanische Vorlaufeinrichtung der Prüfmaschine genutzt. Die Beweglichkeit der mechanischen Vorlaufeinrichtung kann das Messergebnis beeinflussen, da die Probenführung von der Prüfachse abweichen kann. Eine Schädigung der Messprobe an der Klemme ist möglich, was zu kleineren Zugkraft- und Dehnungswerten führt. Deshalb wurden Messungen zum Einfluss der Vorlaufstrecke auf das Prüfergebnis durchgeführt. In der Tabelle 6.3 sind die Versuchsergebnisse dargestellt. Es zeigte sich, dass die Beweglichkeit der mechanischen Vorlaufeinrichtung keinen messbaren Einfluss auf das Prüfergebnis hat.

Tabelle 6.3: Einfluss der Beweglichkeit der mechanische Vorlaufeinrichtung

Prüfbedingungen		Kraft [N] bei		Dehnung [%] bei	
Einspannlänge	Geschwindigkeit	Mechanik der Vorlaufeinrichtung fest	Mechanik der Vorlaufeinrichtung gelöst	Mechanik der Vorlaufeinrichtung fest	Mechanik der Vorlaufeinrichtung gelöst
[m]	[m/s]				
0,5	0,5	79,6	79,9	17,73	17,89
0,5	10	83,14	83,44	15,41	15,64
0,125	10	81,18	80,6	15,64	15,57

### 6.3 Einfluss der Prüfbedingungen im quasistatischen Zugversuch

Unter quasistatischen Zugprüfungen werden die Prüfungen mit klassischer Zugprüfmaschine Z 010 (Prüfgeschwindigkeit max. 1800 mm/min) verstanden.

#### 6.3.1 Einfluss der Einspannlänge auf das Kraft-Dehnungsverhalten

Der Schwerpunkt der hier in diesem Unterkapitel dargestellten Untersuchungen liegt bei der Deutung und Beschreibung des Einflusses der Einspannlänge auf die Kraft-Dehnungseigenschaften. Die Versuchsergebnisse sind in den Abbildungen 6.8 und 6.9 zu sehen. Die Diagramme zeigen, dass die feinheitsbezogene Zugkraft und die Dehnung bei unterschiedlicher Einspannlänge aber gleicher Dehnrates voneinander abweichen.

Die Abweichung der feinheitsbezogenen Zugkraft wird damit begründet, dass die Filamentgarne eine Abhängigkeit der Zugkraft von der Größe der beanspruchten Oberfläche haben - gleichzusetzen mit der freien Einspannlänge bei der Ermittlung der Zugkraft an Filamentgarnen was schon im Kapitel 2.3.2 dargestellt wurde. Nach der „weakest-link-theory“ führen Risse, die an kleinen Oberflächendefekten entstehen, zu Spannungskonzentrationen, die unter bestimmten Bedingungen weiter zunehmen können (Abbildung 6.6). Solche Defekte sind unvermeidlich und zufällig auf der Oberfläche verteilt. Die wachsende Wahrscheinlichkeit des Auftretens solch eines kritischen Fehlers mit zunehmender Einspannlänge zeigt sich auch bei den untersuchten Filamentgarnen, bei denen die Einspannlänge variiert wurde. Nach Morton [45] zeigt sich folgendes: Vorausgesetzt, es wird die feinheitsbezogene Zugkraft ( $R$ ) an jedem Punkt entlang der Einspannlänge bestimmt, dann stellt sich heraus, dass sich  $R$  von Punkt zu Punkt verändert. Wenn sich die schrittweise



steigende Belastung durch die ganze Messprobe fortsetzt, würde der Bruch an der größten Schwachstelle passieren, und man erhält die feinheitsbezogene Zugkraft  $R_1$ . Wenn aber die Messprobe in der Länge halbiert ( $2 \times \frac{1}{2}$ ) wird und die einzelnen Hälften jeweils geprüft werden, zerreißen die Proben jeweils an der schwächsten Stelle innerhalb seiner Hälfte. Ein Teil der Messprobe ergibt die feinheitsbezogene Zugkraft  $R_1$  und der andere Teil die feinheitsbezogene Zugkraft  $R_2$ , die auf jeden Fall größer als die feinheitsbezogene Zugkraft  $R_1$  ist. Das bedeutet, dass der Mittelwert von  $R_1$  und  $R_2$  größer als die feinheitsbezogene Zugkraft, die über die gesamte Einspannlänge gemessen wurde, ist. Das gleiche gilt auch für die feinheitsbezogene Zugkraft, jeweils an einem Viertel der Einspannlänge ( $4 \times \frac{1}{4}$ ). Der Mittelwert von allen vier Zugkräften, ist wieder größer. Dieser Anstieg würde sich fortsetzen, bis sich bei einer sehr kurzen Länge der Wert der Mittelzugkraft zu einer feinheitsbezogene Zugkraft  $R_0$  annähert, wie auch in der Abbildung 6.7 zu sehen ist.

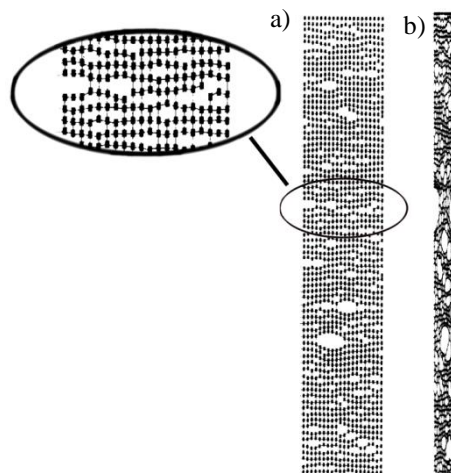


Abbildung 6.6: Schwachstellenverhalten bei a) niedriger Belastung b) großer Belastung [2]

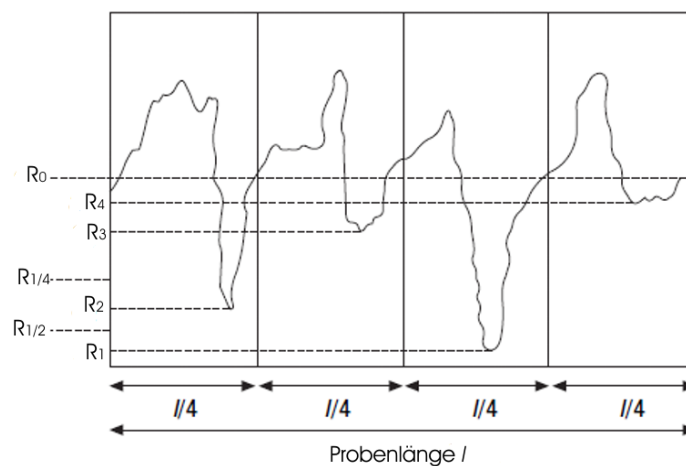


Abbildung 6.7: Weakest-link-theory [45]

Bei den feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnung-Kurven für das PA 6.6 940 f 140 Filamentgarn, die in den Abbildungen 6.8 und 6.9 dargestellt sind, zeigt sich, dass die feinheitsbezogene Zugkraft mit Zunahme der Einspannlänge abnimmt; wobei die Abnahme umso größer ist, je größer ist der Unterschied zwischen den beiden gemessenen Einspannlängen. So wurde z.B. bei einer Dehnrage von  $0,03 \text{ s}^{-1}$  bei einer Einspannlänge von 25 mm 85 cN/tex gemessen, bei einer Einspannlänge von 500 mm dagegen nur noch ca. 80 cN/tex ermittelt. Die gleichen Effekte zeigen sich beim Filamentgarn PA 4.6 940 f 140 und PET 550 f 105 Filamentgarn.

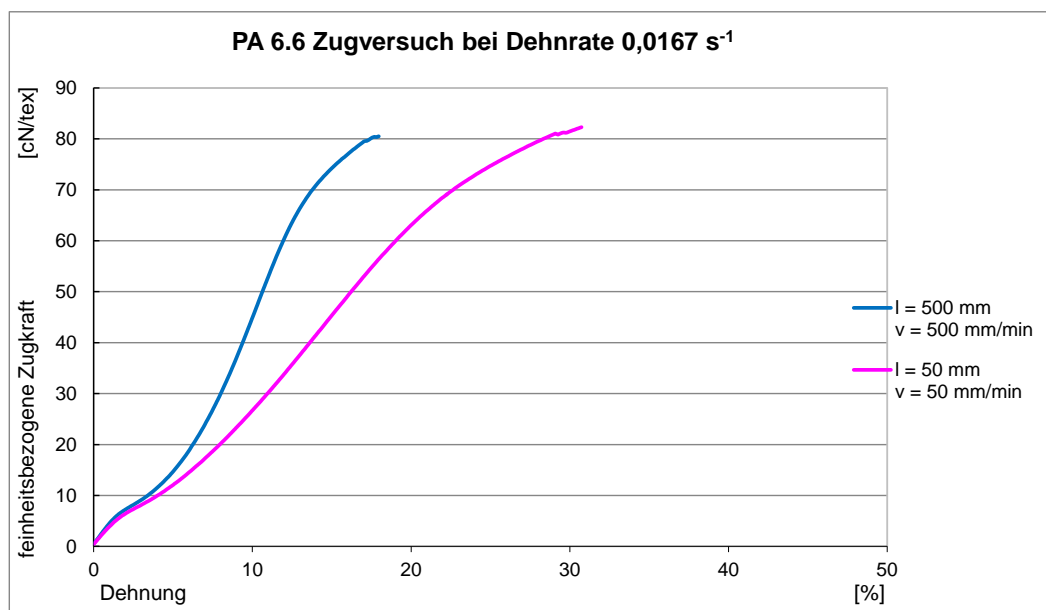


Abbildung 6.8: Quasistatische Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Prüflänge am Beispiel PA 6.6 940 f 140 Filamentgarn bei einer Dehnrage von  $0,0167 \text{ s}^{-1}$

Für die ausgeprägten Dehnungsunterschiede ist einerseits die wachsende Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Fehlers mit zunehmender Einspannlänge, aber zum größten Teil der Klemmenfehler verantwortlich. Nach Literatur [31, 45, 53] beeinflusst die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Fehlers auch die Dehnung. Je kleiner die Einspannlänge der Messprobe ist, desto höher ist die Zugfestigkeit und damit auch die Dehnung der Probe. Bei sehr kleinen Einspannlängen überwiegt jedoch der Einfluss „Klemmfehler“. Das wurde bereits in Kapitel 2.3.1 ausführlich dargelegt.

Den Einfluss „Ausrutschen des Filamentgarnes“ auf Grund nicht ausreichenden Klemmdrucks ist vermeidbar durch eine richtige Auswahl der pneumatischen Aluminium

Klemmen mit einer Klemmfläche von 60 mm x 7 mm und Vulkollanbeschichtung. Um zu kontrollieren, dass die Klemmung ein Durchrutschen der Filamente verhindert, wurden die Garnenden außerhalb der Einspannung farbig markiert. Nach der Durchführung des Zugversuchs konnte anhand dieser Markierung festgestellt werden, dass die Garne nicht in die Klemmbanken hineingezogen wurden. -D.h. der Klemmdruck war ausreichend groß. Auch aus dem Kurvenverlauf sind keine Verschiebungen oder andere Änderungen zu erkennen. Daher ist davon auszugehen, dass die Klemmendehnung bei der Zugprüfung die Ursache für den Klemmenfehler ist. Dieser ist auch bei intensivster Klemmung nicht zu vermeiden.

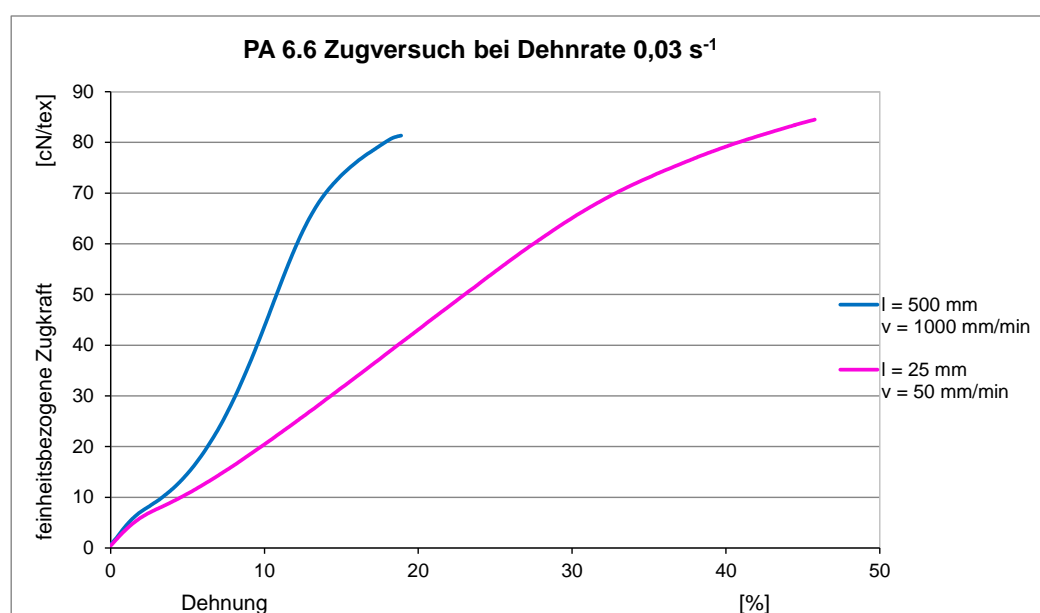


Abbildung 6.9: Quasistatische Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Prüflänge an Beispiel PA 6.6 940 f 140 Filamentgarn bei einer Dehnrade von  $0,03 \text{ s}^{-1}$

Das beweist, dass eine Dehnungskorrektur notwendig ist. In [22, 16, 46, 53] wird eine grafische Methode vorgeschlagen, mit der man grafisch ohne größeren Aufwand die Dehnungskorrektur durchführen kann, wie in der Abbildung 6.10 zu sehen ist. Dazu wird mit mindestens zwei verschiedenen Einspannlängen der Zugversuch durchgeführt. Die erhaltene Längsänderung in mm, wird dann über der Einspannlänge aufgetragen. Die einzelnen Punkte werden mit einer Geraden verbunden. Die Gerade wird bis zur Ordinate verlängert und wo diese die Ordinate schneidet, ergibt sich die aus der Klemme herausgezogene Länge, um die die gemessene Längsänderung korrigiert werden muss.

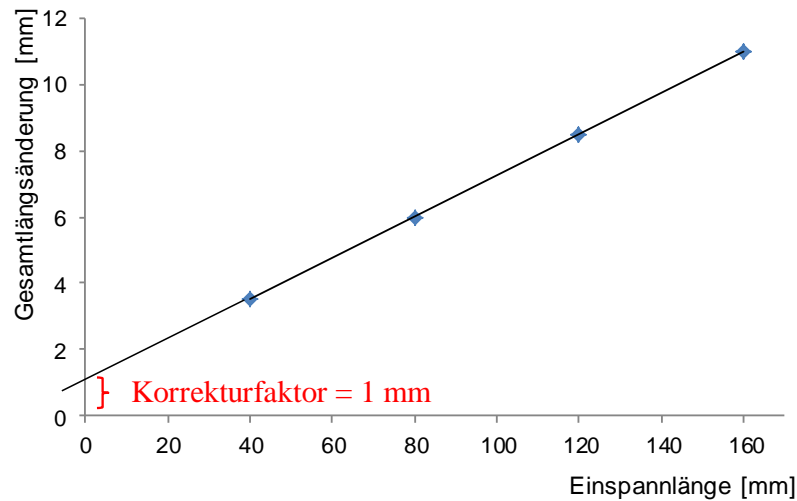


Abbildung 6.10: Ermittlung des Klemmfehlers [22, 46, 53]

### 6.3.2 Einfluss der Dehnrates auf das Kraft-Dehnungsverhalten

In diesem Unterkapitel wird der Einfluss der Dehnrates auf die feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven betrachtet. Allgemein bekannt ist, dass man höhere Festigkeiten und geringere Dehnungswerte bei höheren Dehnrates erhält (Kapitel 4). Aus den Abbildungen 6.11 bis 6.13 ist zu sehen, dass sich beim quasistatischen Zugversuch mit Erhöhung der Dehnrates die Zugkraft leicht erhöht, und die Dehnung abnimmt. Die Variationskoeffizienten liegen bei Zugkraft unter 2 % und bei der Dehnung unter 5 %, was eine gute Reproduzierbarkeit aufzeigt.

Bei PA 6.6 ist in Abbildung 6.11 mit Zunahme der Dehnrates ein leichter Anstieg der feinheitsbezogenen Zugkraft von ca. 80 cN/tex (gemessen unter Standardbedingungen des quasistatischen Zugversuchs = rote Linie) auf etwa 84 cN/tex bei einer Einspannlänge von 25 mm und einer Zuggeschwindigkeit von 50 mm/min erkennbar. Erklärt werden kann der Anstieg der Zugfestigkeit vor allem durch die Verwendung kleinerer Einspannlängen bei höheren Dehnrates. Mit Reduzierung der Einspannlänge verringert sich auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines kritischen Fehlers, was zu einem Anstieg der Zugfestigkeit führt. Beim Dehnungsverhalten der untersuchten Messproben lassen sich zwei unterschiedliche Effekte feststellen. Zum einen erhöht sich die prozentuale Dehnung mit kleiner werdenden Einspannlängen. Während bei einer Einspannlänge von 500 mm eine Dehnung im Bereich von ca. 17 % erreicht wird, zeigen Proben mit einer Einspannlänge von 50 mm bereits eine Dehnung bis zu 30 % und die Proben mit der kleinsten Einspannlänge von 25 mm erreichen sogar Dehnungen bis zu 45 %. Diese Beobachtung kann mit dem

zunehmenden Einfluss der Klemmdehnung bei kleineren Einspannlängen erklärt werden (vgl. dazu Kapitel 6.3.1). Zum anderen nehmen innerhalb der Prüfserien mit gleicher Einspannlänge die Dehnungen mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit, bzw. Dehnrates ab. So verringert sich beispielsweise in Abbildung 6.11 bei der kürzesten Einspannlänge von 25 mm die Dehnung von 45 % auf 37 % wenn die Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min auf 1800 mm/min erhöht wird. Ursache für dieses Verhalten ist die Viskoelastizität der geprüften Filamentgarnen. Besonders anschaulich werden die Auswirkungen der Einspannlänge und Dehnrates auf die Dehnung in Abbildung 6.12 dargestellt. Hier ist die prozentuale Änderung der Dehnung über der Dehnrates aufgetragen. Als Ausgangswert dient die Dehnung, die unter Standardbedingungen beim quasistatischen Zugversuch ermittelt wurde (roter Datenpunkt). Mit abnehmender Einspannlänge von 500 mm über 50 mm auf 25 mm nimmt die Dehnung im Vergleich zum standardisierten quasistatischen Zugversuch trotz nahezu gleicher Dehnrates deutlich zu. Bei einer Einspannlänge von 50 mm (blaue Datenpunkte) hat sich die Dehnung nahezu verdoppelt (+ 90 %) und bei einer Einspannlänge von 25 mm (orange Datenpunkte) ist die Dehnung beinahe um 160 % im Vergleich zur Standardprüfung angewachsen. Mit zunehmender Dehnrates, verringert sich jedoch bei gleichbleibender Einspannlänge die Dehnung. So wird bei der höchsten Dehnrates von  $1,2 \text{ s}^{-1}$  (Einspannlänge 25 mm) nur noch eine Dehnung ermittelt, die um etwa 100 % höher liegt, als beim standardisierten quasistatischen Zugversuch.

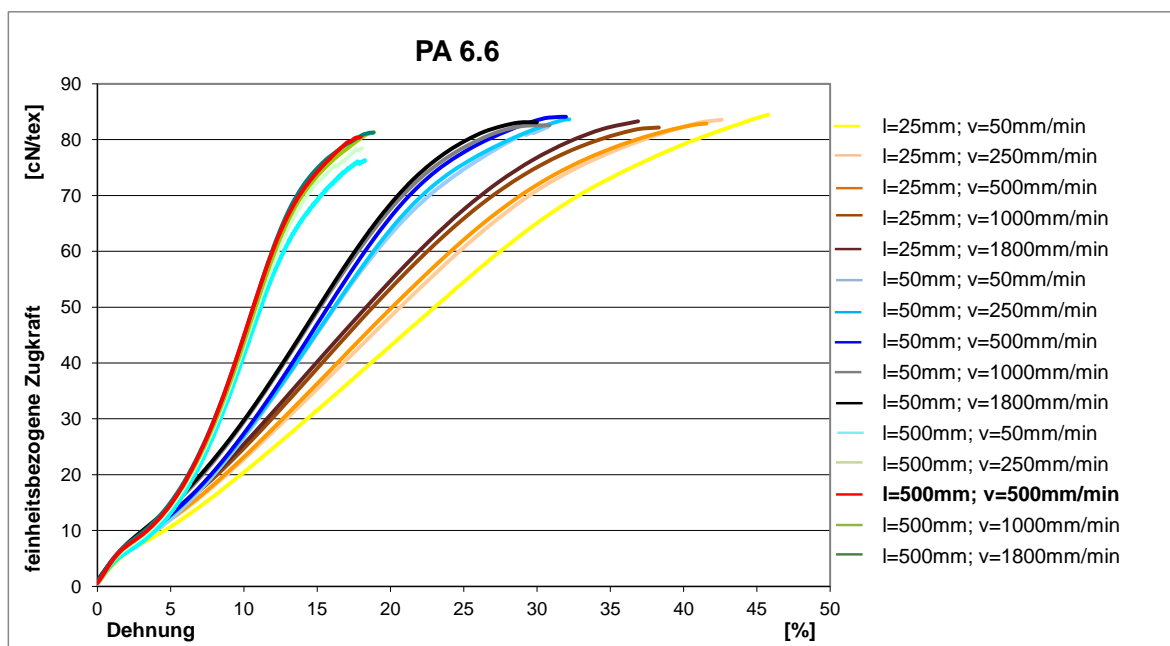


Abbildung 6.11: Quasistatischer Zugversuch-Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrates am Beispiel PA 6.6 940 f 140 Filamentgarn

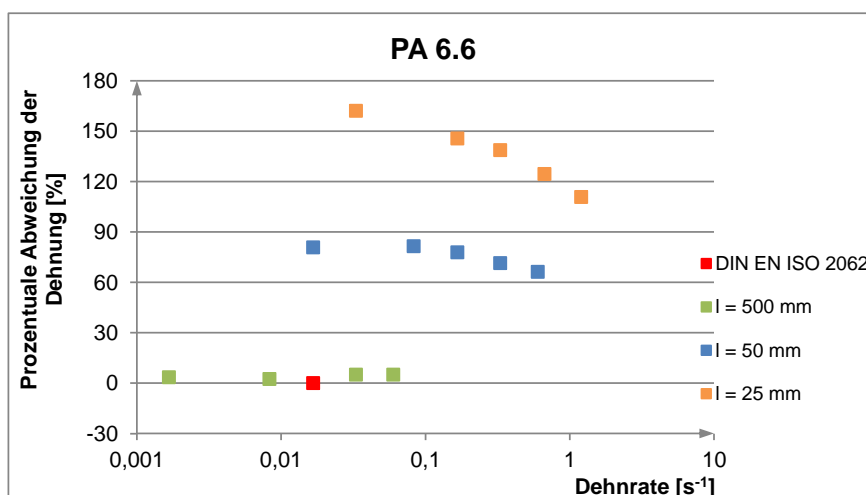


Abbildung 6.12: Prozentuale Abweichung der Dehnung von PA 6.6 940 f 140 im Vergleich zum quasistatischen Zugversuch unter Standardprüfbedingungen

Ein ähnliches Verhalten zeigen die ebenfalls untersuchten Filamentgarne aus PA 4.6 (Abbildung 6.13) und PET (Abbildung 6.15). Bei beiden Filamentgarnen kann mit Zunahme der Dehnrate kaum eine Änderung der feinheitsbezogenen Zugfestigkeit festgestellt werden. Für PA 4.6 940 f 140 beträgt die feinheitsbezogene Zugfestigkeit ca. 67 cN/tex und für PET 550 f 105 ca. 63 cN/tex.

Wie bereits für das Filamentengarn PA 6.6 940 f 140 diskutiert, erhöhen sich die Dehnungen der geprüften PA 4.6 940 f 140 und PET 550 f 105 Filamentgarne mit Verringerung der Einspannlänge von jeweils ca. 20 % bei 500 mm Einspannlänge auf über 40 % bei 25 mm Einspannlänge (vgl. Abbildungen 6.13 und 6.15). Darüberhinaus reduzieren sich auch bei diesen Proben die Dehnungen bei den jeweiligen Einspannlängen mit Zunahme der Dehnrate, wobei die Tendenz bei größeren Einspannlängen weniger ausgeprägt ist (vgl. Abbildungen 6.14 und 6.16). Als Ursache für die beinahe gleichbleibende Dehnung bei Proben mit 500 mm Einspannlänge (0 % Dehnungsänderung im Vergleich zur Standardprüfung) ist weniger in der Geometrie der Messproben zusehen, als viel mehr in den geringen Dehnraten, die durch die große Einspannlänge verwirklicht werden. Bei diesen Prüfgeschwindigkeiten und Messzeiten, verhalten sich die Filamentgarne in ihren viskoelastischen Eigenschaften ähnlich. Erst höhere Prüfgeschwindigkeiten erfassen die viskosen Anteile der Garne im geringeren Maße, so dass sich die Dehnungen mit Zunahme der Dehnrate reduzieren. Bei PA 4.6. verringert sich die Dehnungsänderung im Vergleich

zum Standardzugversuch von 130 % (Dehnrade = 0,03 s<sup>-1</sup>) auf 90 % (Dehnrade = 1,2 s<sup>-1</sup>). Bei PET unter einer Einspannlänge von 25 mm ist eine Reduzierung von 110 % (Dehnrade = 0,03 s<sup>-1</sup>) auf 60 % (Dehnrade = 1,2 s<sup>-1</sup>) festzustellen.

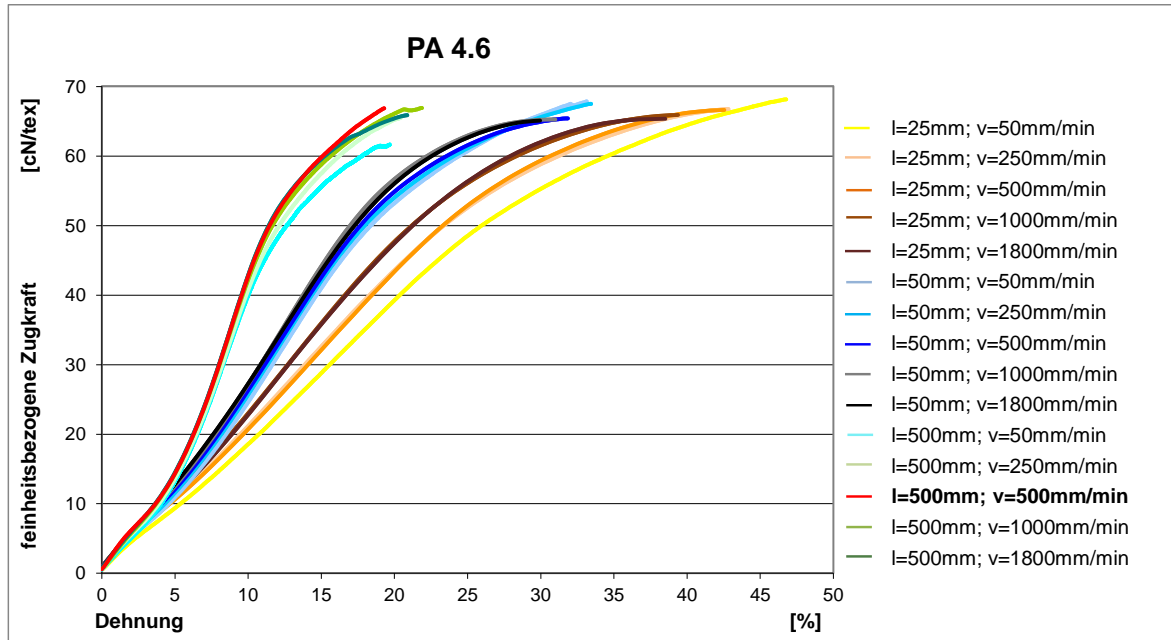


Abbildung 6.13: Quasistatischer Zugversuch-Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrade am Beispiel PA 4.6 940 f 140 Filamentgarn

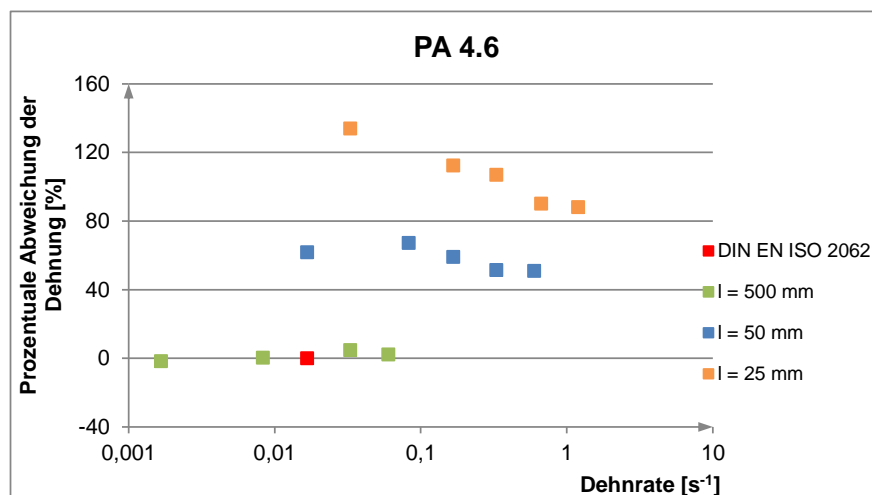


Abbildung 6.14: Prozentuale Abweichung der Dehnung von PA 4.6 940 f 140 im Vergleich zum quasistatischen Zugversuch unter Standardprüfbedingungen

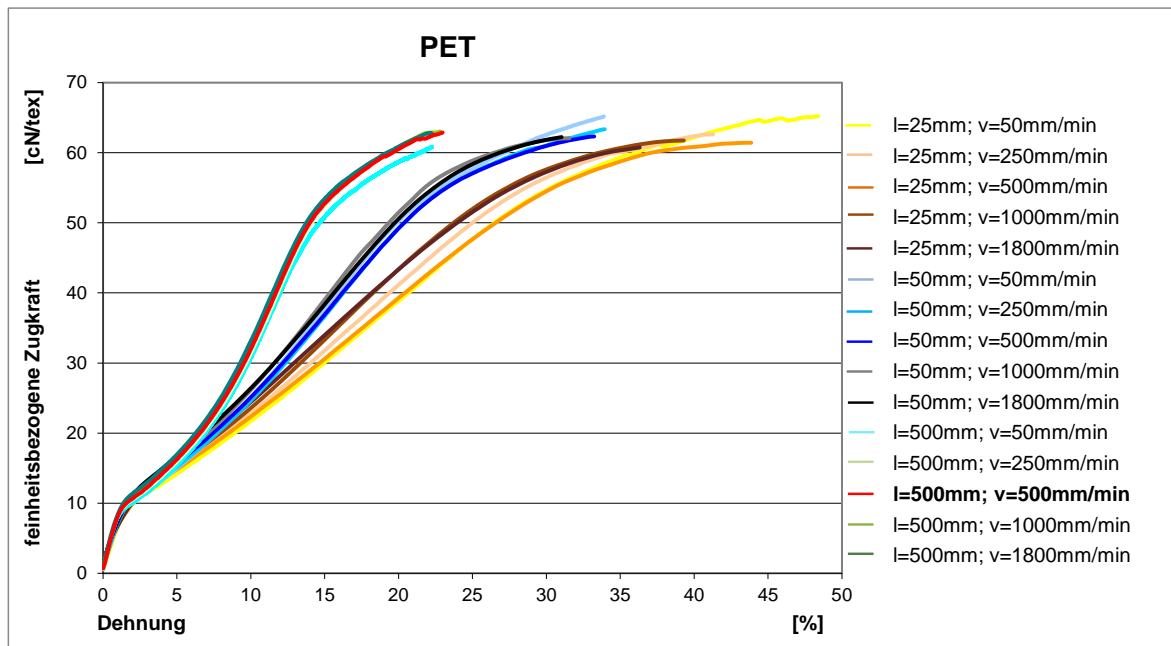


Abbildung 6.15: Quasistatischer Zugversuch-Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrage am Beispiel PET 550 f 105 Filamentgarn

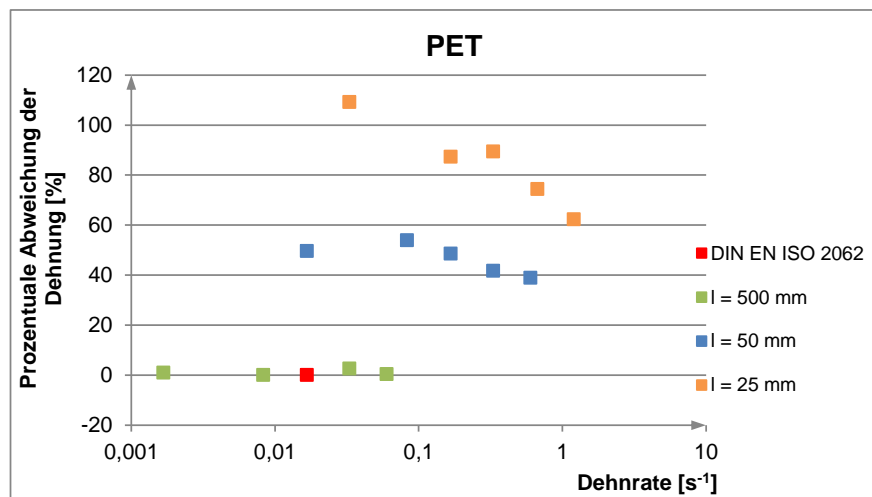


Abbildung 6.16: Prozentuale Abweichung der Dehnung von PET 550 f 105 im Vergleich zum quasistatischen Zugversuch unter Standardprüfbedingungen



## 6.4 Einfluss der Prüfbedingungen im dynamischen Zugversuch

Unter dynamischen Zugprüfungen werden die Prüfungen mit Hilfe der servohydraulische Zugprüfmaschine HTM 2008 mit Prüfgeschwindigkeiten bis zu 10 m/s verstanden.

### 6.4.1 Einfluss der Einspannlänge auf das Kraft-Dehnungsverhalten

Der Schwerpunkt der hier in diesem Unterkapitel dargestellten Untersuchungen liegt in der Deutung und Beschreibung des Einflusses der Einspannlänge auf die feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Eigenschaften bei dynamischer Beanspruchung. Die Ergebnisse der dynamischen Untersuchungen, die in den Abbildungen 6.17 bis 6.22 dargestellt sind, zeigen analog zu den quasistatischen Untersuchungen eine Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Zugkraft und Dehnung von der Einspannlänge bei gleicher Dehnrage ( $20 \text{ s}^{-1}$  bzw.  $40 \text{ s}^{-1}$ ).

Wie auch bei den quasistatischen Untersuchungen steigt mit der Einspannlänge die Wahrscheinlichkeit eines bruchauslösenden Fehlers im Prüfvolumen (weakest-link theory).

Daher beweisen die Untersuchungsergebnisse an PA 6.6 940 f 140, die in Abbildung 6.17 für die Dehnrage  $20 \text{ s}^{-1}$  und in Abbildung 6.18 für die Dehnrage  $40 \text{ s}^{-1}$  dargestellt sind, dass die feinheitsbezogene Zugkraft mit Zunahme der Einspannlänge geringfügig sinkt.

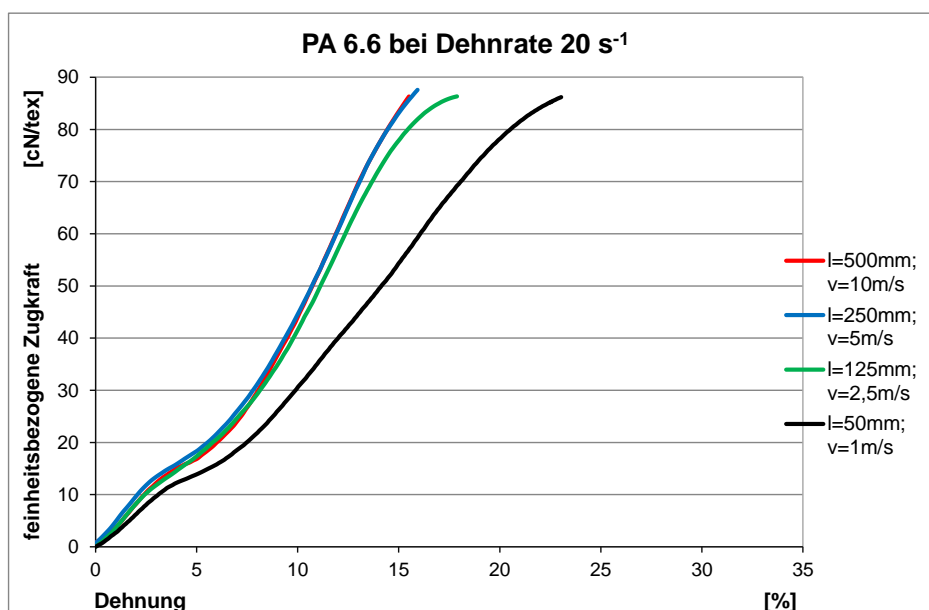


Abbildung 6.17: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PA 6.6 940 f 140 bei einer Dehnrage von  $20 \text{ s}^{-1}$

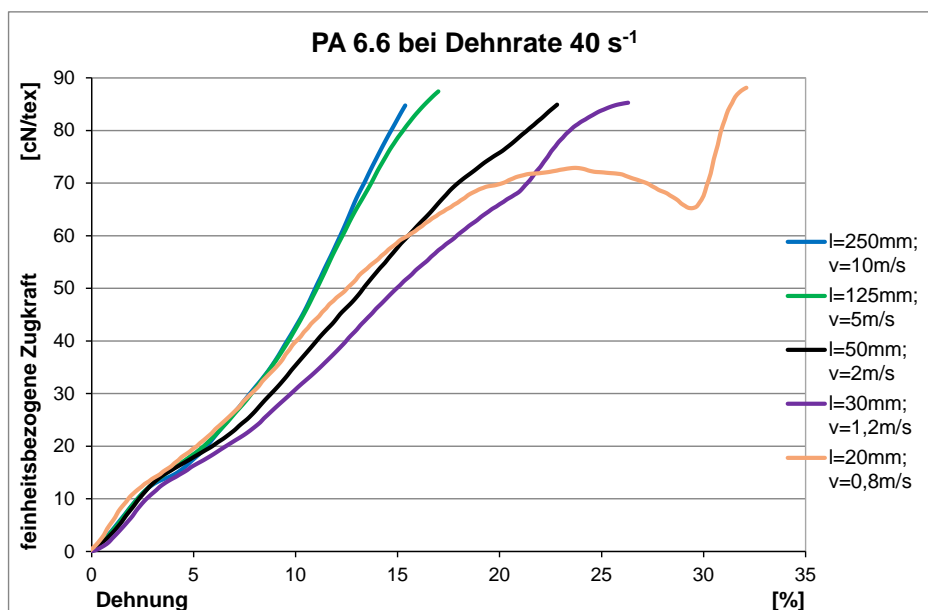


Abbildung 6.18: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PA 6.6 940 f 140 bei einer Dehnrate von  $40 \text{ s}^{-1}$

Analog dem quasistatischen Zugversuch beeinflusst die Einspannlänge die Dehnung stark. Die beiden oben genannten Abbildungen zeigen, dass bei den Einspannlängen 500 mm, 250 mm und 125 mm das Dehnungswertniveau fast identisch ist. Jedoch nimmt die Dehnung mit der Verkleinerung der Einspannlänge auf 50 mm und darunter (s. Abb. 6.18) merklich zu. Das heißt die Reduzierung der Einspannlänge bewirkt eine Dehnungszunahme. Auch hier können als Ursachen die Reduzierung des Prüfvolumens und damit die Reduzierung bruchauslösender Schwachstellen sowie Fehler, die durch das Einspannen der Garne in die Prüfmaschine entstehen, genannt werden. So können die Garne zum einen bei zu niedrig gewähltem Klemmdruck durch die Klemmbacken herausrutschen oder aber auch sich innerhalb der Klemmbacken weiter ausdehnen. Die Verfälschung der Dehnwerte durch ein Herausziehen des Filamentgarnes auf Grund unzureichenden Klemmdrucks konnte durch die Wahl entsprechender Klemmbacken vermieden werden. Umfangreiche Untersuchungen (Kapitel 6.1) haben gezeigt, dass Aluminium-Klemmbacken mit Vulkollan Beschichtung, die eine Spannfläche von 20 mm x 25 mm haben, für diesen Fall am besten geeignet sind. Der ausreichende Klemmdruck wird dabei durch den Einsatz eines Akkuschraubers mit Momentbegrenzung erzeugt. Damit wird bei allen Messungen ein konstanter Klemmdruck gewährleistet. Um zu kontrollieren, dass die Klemmung ein Durchrutschen der Filamente verhindert, wurden die Garnenden außerhalb der Einspannung farbig markiert (vgl. in

Kapitel 6.3.1). Nach der Durchführung des Zugversuchs konnte anhand dieser Markierung festgestellt werden, dass die Garne nicht in die Klemmbacken hineingezogen wurden. D.h. der Klemmdruck war ausreichend groß. Aus dem Kurvenverlauf ist eine Kurvenverschiebung nicht auszuschließen, da wie schon im Kapitel 5.3 beschrieben wurde, die schlagartige Beschleunigung von Messprobe und Probenhalterung Wellen bzw. Nachschläge verursacht, die man als sägezahnartige Schwingungen im Kraftsignal bzw. in den Kurven erkennen kann.

Daher kann als eine Ursache für den Dehnungsunterschied die Klemmendehnung vermutet werden (vgl. Kapitel 2.3.1). Je kleiner die Einspannlänge des geprüften Garnes ist, desto größer wirkt sich dieser Fehler prozentual auf die gemessenen Dehnungen aus. Ebenso könnte die Prüfgeschwindigkeit ein Einfluss auf die Stärke der Klemmendehnung haben. Dabei gilt nach Gleichung 2.15, dass je kleiner die Einspannlänge war, desto geringer waren auch die Prüfgeschwindigkeiten. Mit langsamerer Prüfgeschwindigkeit hat das Filamentgarn mehr Zeit, um sich in den Klemmen zu dehnen. Das heißt, je kleiner die Prüfgeschwindigkeit, desto größer ist die Klemmendehnung.

Alle dargestellten feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven der geprüften Filamentgarne PA 6.6 940 f 140 (Abbildungen 6.17 und 6.18), PA 4.6 940 f 140 (Abbildungen 6.19 und 6.20), und PET 550 f 105 (Abbildungen 6.21 und 6.22) zeigen, dass bei der größten eingestellten Einspannlänge geringfügig kleinere Zugkräfte gemessen werden (ca. 5 cN/tex). D.h. mit Verkleinerung der Einspannlänge erhält man nur eine geringe Erhöhung der Zugkraftwerte. Schlussfolgend kann somit für alle drei Versuchsgarne davon ausgegangen werden, dass bei Hochgeschwindigkeitszugversuchen die Höchstzugkraft nur geringfügig von der Einspannlänge beeinflusst wird. Daraus resultiert, dass Hochgeschwindigkeitszugprüfungen bezüglich ihrer Aussage zur Zugfestigkeit durchaus auch bei kleineren Einspannlängen durchgeführt werden können.

Deutlicher zeigt sich dagegen die Abhängigkeit der Dehnung von der Einspannlänge und der Prüfgeschwindigkeit; mit Verringerung der Einspannlänge und der Prüfgeschwindigkeit nimmt die Dehnung zu um ca. 10 %. Auf Grund der Vermutung, dass vor allem bei kleinen Einspannlängen eine geringe Prüfgeschwindigkeit die Dehnmessung verfälscht, wurden in den nächsten Kapiteln 6.4.2 und 6.5 die feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven von Proben mit kleinen Einspannlängen bei geringer Prüfgeschwindigkeit nicht berücksichtigt. Bei hohen Prüfgeschwindigkeiten dagegen konnte durch die Wahl von kurzen Einspannlängen hohe Dehnraten verwirklicht werden.

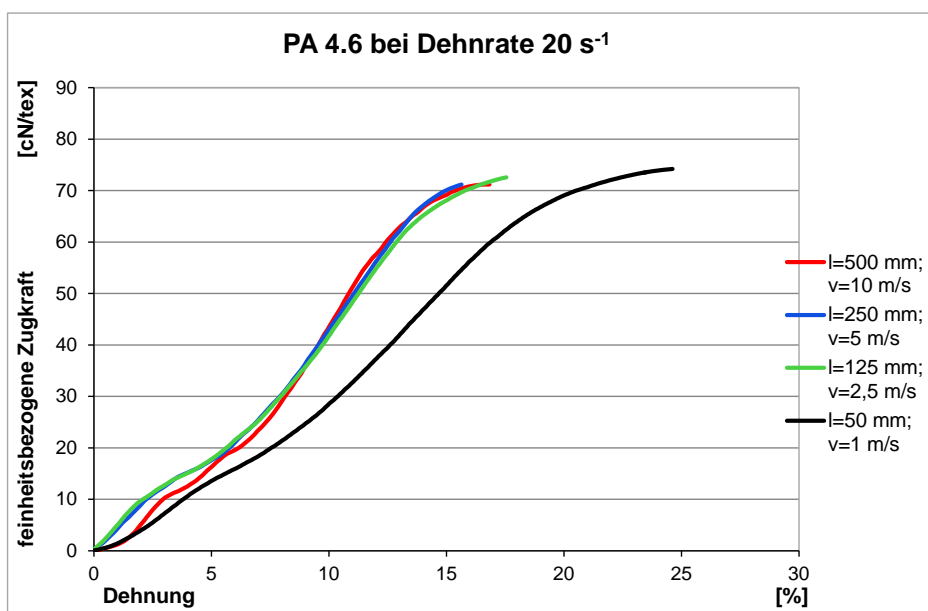


Abbildung 6.19: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PA 4.6 940 f 140 bei einer Dehnrage von  $20 \text{ s}^{-1}$

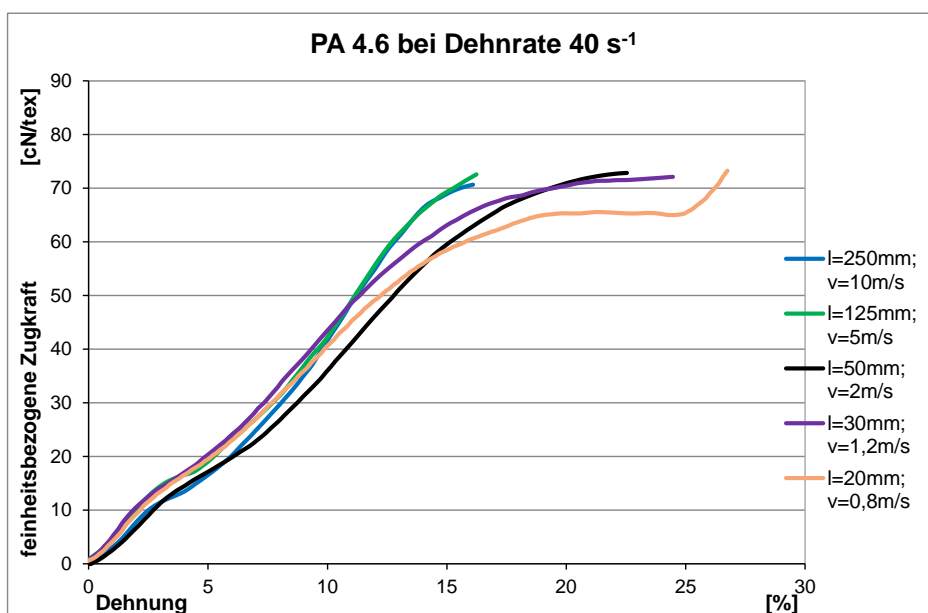


Abbildung 6.20: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PA 4.6 940 f 140 bei einer Dehnrage von  $40 \text{ s}^{-1}$

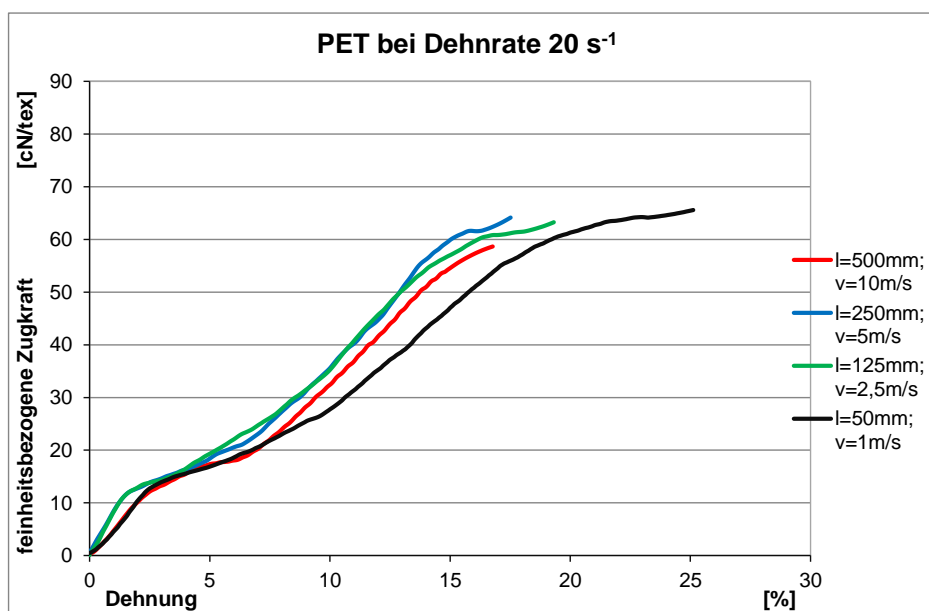


Abbildung 6.21: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PET 550 f 105 bei einer Dehnrade von 20 s<sup>-1</sup>

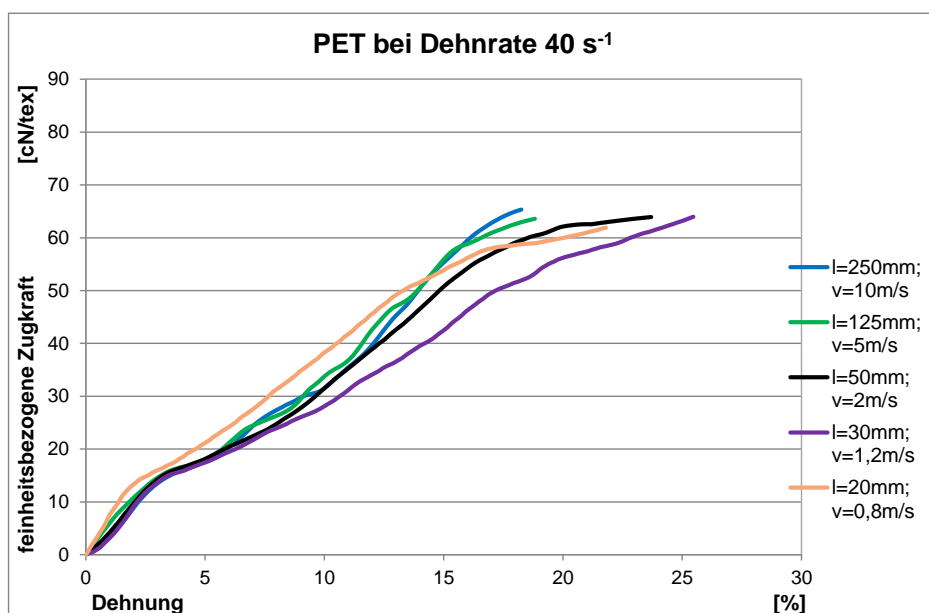


Abbildung 6.22: Dynamischer Zugversuch-Abhängigkeit der Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von der Einspannlänge am Beispiel PET 550 f 105 bei einer Dehnrade von 40 s<sup>-1</sup>

### 6.4.2 Einfluss der Dehnrates auf das Kraft-Dehnungsverhalten

Das folgende Unterkapitel zeigt die Versuchsergebnisse der Zugprüfung unter dynamischer Beanspruchung. Die Ergebnisse von allen drei Versuchsgarnen, mit Dehnraten zwischen  $1 \text{ s}^{-1}$  bis  $500 \text{ s}^{-1}$ , sind in Diagrammen zusammengefasst und in den Abbildungen 6.23 bis 6.25 graphisch dargestellt. Dabei werden nicht alle aufgenommenen feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven in den Diagrammen gezeigt. Bei Dehnraten, die durch Variation von Einspannlänge und Prüfgeschwindigkeit mehrfach vorkamen (vgl. Tabelle 5.6) wurde nur eine feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve stellvertretend in die Grafiken aufgenommen. Wie bereits in Kapitel 6.4.1 diskutiert, verfälschen kleine Einspannlängen bei niedrigen Prüfgeschwindigkeiten, auf Grund des Klemmfehlers, die Ergebnisse der feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven. Aus diesem Grund wurden zur Auswertung die feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven herangezogen, bei denen die Einspannlänge am größten war.

In den Abbildungen 6.23 bis 6.25 sind kleinere Dehnraten mit gestrichelten Linien und die höheren Dehnraten mit durchgezogenen Linien dargestellt und in der Legende beschriftet. Neben der Dehnrates sind in der Legende die Einspannlänge in mm und die Prüfgeschwindigkeit in m/s in Klammern angegeben. Zum Beispiel bedeutet: 1 (500-0,5), dass die Prüfung bei einer Dehnrates von  $1 \text{ s}^{-1}$ , einer Einspannlänge von 500 mm und einer Prüfgeschwindigkeit von 0,5 m/s durchgeführt wurde.

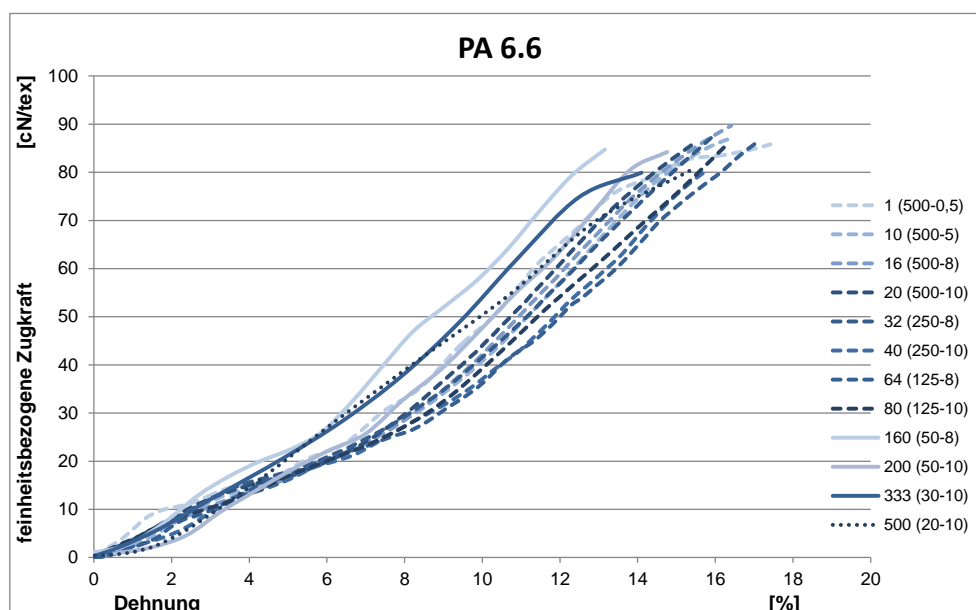


Abbildung 6.23: Dynamischer Zugversuch - Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrates am Beispiel PA 6.6 940 f 140

Die Zugkraft von PA 6.6 940 f 140 bleibt bis zu einer Dehnrade von  $80 \text{ s}^{-1}$  konstant bei ca.  $87 \text{ cN/tex}$ . Bei höheren Dehnraten reduziert sich die Zugkraft leicht auf etwa  $84 \text{ cN/tex}$ . Die Dehnung zeigt bis zu einer Dehnrade von  $80 \text{ s}^{-1}$  ebenfalls keine eindeutige Abhängigkeit von der Dehnrade. Wird die Dehnrade über  $80 \text{ s}^{-1}$  erhöht, nimmt die Dehnung von etwa  $16 \%$  auf  $13 \%$  ab.

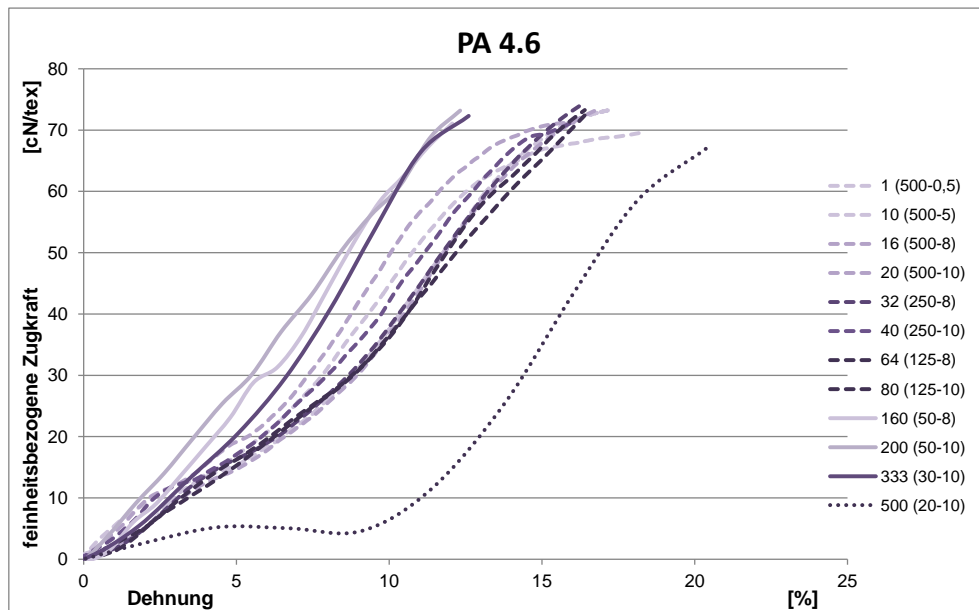


Abbildung 6.24: Dynamischer Zugversuch - Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrade am Beispiel PA 4.6 940 f 140

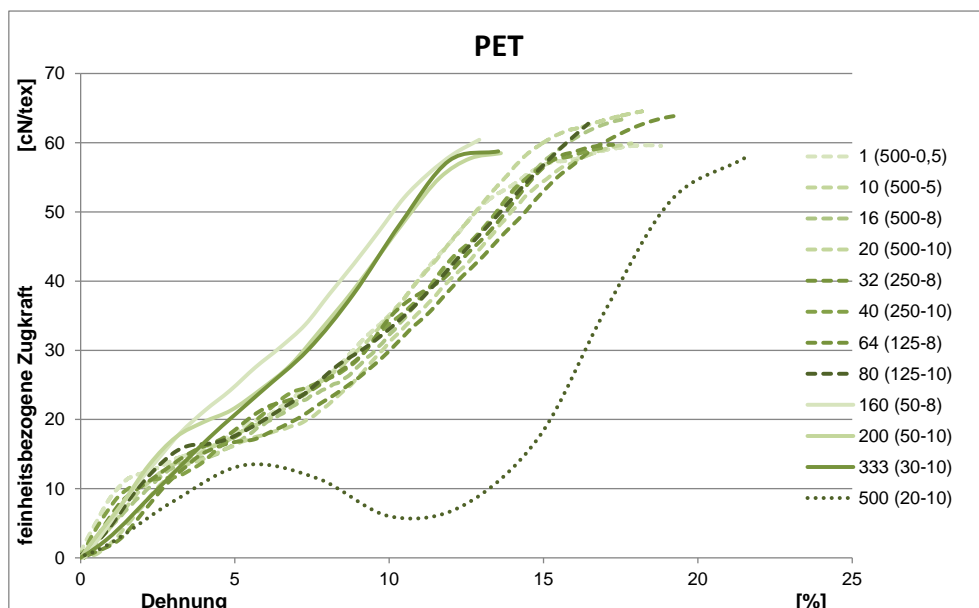


Abbildung 6.25: Dynamischer Zugversuch - Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrade am Beispiel PET 550 f 105

Bei dem Filamentgarn PA 4.6 940 f 140 kann für die Zugkraft aus dem Diagramm in der Abbildung 6.24 keine eindeutige Abhängigkeit der Zugkraft von der Dehnrates festgestellt werden. Bis auf die Dehnrates  $1 \text{ s}^{-1}$  und  $500 \text{ s}^{-1}$  die geringeren Zugkräfte aufweisen, liegt die Zugkraft der anderen Proben bei ca.  $75 \text{ cN/tex}$ . Eine eindeutige Tendenz zeigt sich dagegen bei der Dehnung. Die Dehnung von PA 4.6 940 f 140, verkleinert sich mit zunehmender Dehnrates von  $18 \%$  auf  $12 \%$ . Die Messung der starken Dehnung von  $20 \%$  bei der Probe mit einer Dehnrates von  $500 \text{ s}^{-1}$  ist auf einen Messfehler (Klemmendehnung) zurückzuführen.

Bei PET 550 f 105 (Abbildung 6.25) stellen sich ebenfalls zwei Zugkraftniveaus ein. Bei kleinen Dehnrates bis  $80 \text{ s}^{-1}$  werden Zugkräfte von  $> 60 \text{ cN/tex}$  gemessen. Bei höheren Dehnrates bleiben die Zugkräfte unter dem Wert von  $60 \text{ cN/tex}$ . Wie bei den anderen zwei Versuchsmaterialien, verringert sich die Dehnung von PET 550 f 105 mit Dehnrateserhöhung von etwa  $18 \%$  bei  $1 \text{ s}^{-1}$  auf  $12 \%$  bei  $333 \text{ s}^{-1}$ . Die feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve bei einer Dehnrates von  $500 \text{ s}^{-1}$  kann wiederum auf Grund des Klemmfehlers nicht ausgewertet werden.

Die Reproduzierbarkeit von den Messkurven ist ausreichend, da die Variationskoeffizienten zwischen  $1 \%$  und  $5,5 \%$  liegen. Bei den Dehnungen liegen die Variationskoeffizienten zwischen  $2 \%$  und  $10 \%$ , wobei einige Dehnungsvariationskoeffizienten bei kleineren Einspannlängen und kleineren Prüfgeschwindigkeiten auch höhere Variationskoeffizienten von  $4 \%$  bis zu  $15 \%$  aufweisen. Dies ist auf die Wahrscheinlichkeit von Klemmfehler zurückzuführen.

## 6.5 Vergleich der dynamischen Prüfergebnisse zum Normzugversuch

Die Ergebnisse, die in diesem Unterkapitel diskutiert werden, bilden den Schwerpunkt dieser Arbeit. Im Folgenden werden die gemessenen feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven unter dynamischer und quasistatischer Beanspruchungen gegenübergestellt. Um eine gute Übersichtlichkeit in den Grafiken zu gewährleisten, wurden nicht alle zuvor gemessenen Dehnrates mit in die Diagramme aufgenommen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen bei quasistatischer Belastung wurden bereits im Kapitel 6.3.2 und die Ergebnisse der Versuchsreihen bei dynamischen Belastungen im Kapitel 6.4.2, ausführlich diskutiert. Nachfolgend wird deshalb nur ein Vergleich der dynamischen Prüfergebnisse zum Normzugversuch durchgeführt. Aufgrund des großen Klemmfehlers bleibt die Dehnrates von



500 s<sup>-1</sup> unberücksichtigt. Damit werden in den Abbildungen 6.26, 6.28 und 6.30 die nach dem Normzugversuch ermittelten feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven jeder Garnvariante mit den dynamischen feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven bei Dehnraten von 1 s<sup>-1</sup> bis 333 s<sup>-1</sup> verglichen.

Wie aus den Diagrammen 6.26 bis 6.31 ersichtlich ist, wirkt sich die Dehnrage unterschiedlich auf die Zugkraft aus. Bei PA 6.6 940 f 140 erhöht sich die Zugkraft im Vergleich zum Normzugversuch (rote Linie) mit zunehmender Dehnrage leicht von 80 cN/tex auf 85 cN/tex (Abbildung 6.26). Für PA 6.6 940 f 140 wurde auch die prozentuale Abweichung der Zugkraft von den Ergebnissen des Normzugversuchs in Abhängigkeit der Dehnrage berechnet und grafisch in der Abbildung 6.27 dargestellt. Hier wird die Abhängigkeit der Zugkraft von der Dehnrage deutlicher aufgelöst. Der prozentuale Zugewinn der Zugkraft liegt dabei maximal bei 10 % bei einer Dehnrage von 40 s<sup>-1</sup>. Einen größeren Einfluss besitzt die Dehnrage auf die Dehnung der untersuchten Garne. Mit zunehmender Dehnrage nimmt die Dehnung bis zu 25 % im Vergleich zum Normzugversuch ab.

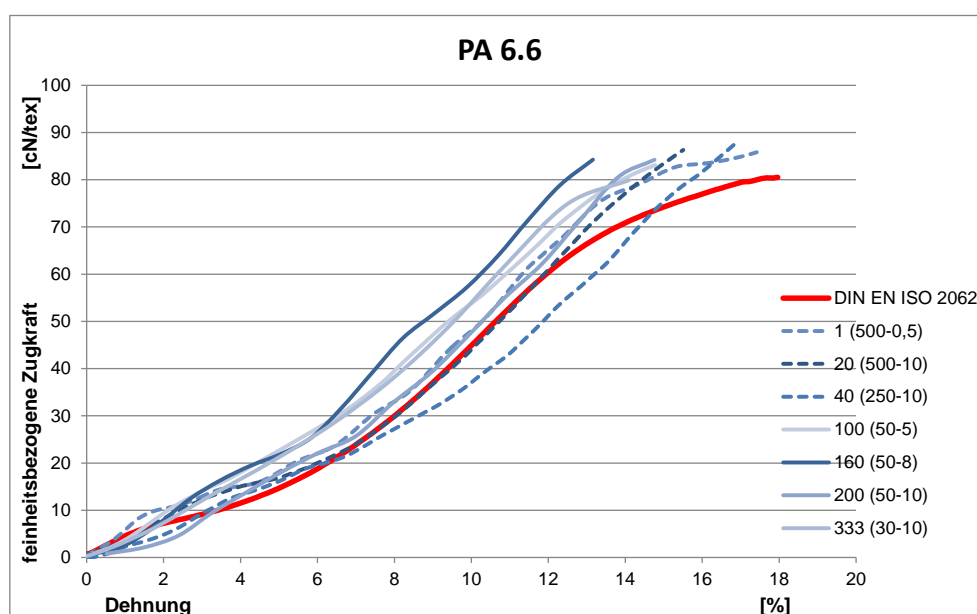


Abbildung 6.26: Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrage am Beispiel PA 6.6 940 f 140

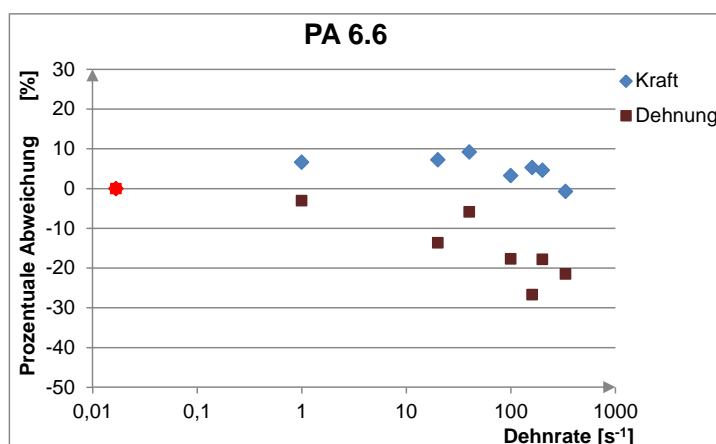


Abbildung 6.27: Prozentuale Abweichung der Kraft- und Dehnungswerte von der Dehnrade am Beispiel PA 6.6 940 f 140

Ein ähnliches Verhalten ist bei den Messproben aus PA 4.6 940 f 140 zu beobachten (vgl. Abbildung 6.28 und 6.29). Mit zunehmender Dehnrade erhöht sich die Zugkraft von etwa 68 cN/tex beim Normzugversuch um bis zu 10 % auf 75 cN/tex. Bei der Dehnung kann mit steigender Dehnrade sogar eine Abnahme der Dehnung von beinahe 40 % festgestellt werden. Damit sinkt die Dehnung von etwa 20 % beim Normzugversuch auf ca. 11 % bei einer Dehnrade von 333 s<sup>-1</sup>. Auch beim dem Garn aus PET 550 f 105 zeigt sich in Abbildungen 6.30 und 6.31 eindeutiger Einfluss der Dehnrade auf die Dehnung. Die Dehnung der Proben nimmt im Vergleich zu Prüfungen gemäß DIN EN ISO 2062 mit steigender Dehnrade von etwa 23 % auf ca. 12 % bei 333 s<sup>-1</sup> ab. Dies entspricht einer prozentualen Abnahme der Dehnung von 45 %. Wie bei allen drei untersuchten Granen ist die Erklärung für dieses Verhalten in den viskoelastischen Eigenschaften der Filamente zu finden. Mit zunehmender Dehnrade verkürzt sich die Prüfdauer (Tabelle 6.2, S. 73), so dass der viskose Anteil der Garne kaum zum Tragen kommt. Im Gegensatz zu den Garnen aus Polyamid kann bei den Proben aus PET durch die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit eine Reduzierung der Zugkraft im Vergleich zum Normzugversuch festgestellt werden (vgl. Abbildungen 6.30 und 6.31). Hierbei sinkt die Zugkraft von ca. 63 cN/tex beim Normzugversuch auf etwa 59 cN/tex bei einer Dehnrade von 333 s<sup>-1</sup>. Das entspricht einer relativen Abnahme von ca. 8 %. Als Grund für dieses Verhalten können Kristallisationsprozesse durch die Verstreckung während der Zugprüfung genannt werden. Die Erhöhung der Kristallisation durch das Verstrecken der Filamente ist temperatur- und zeitabhängig, so dass bei Raumtemperatur durch längere Prüfzeiten eine günstigere Anordnung der Polymerketten in Zugrichtung erreicht werden kann. Diese Ausrichtung der Makromoleküle in Zugrichtung führen zu höheren Zugfestigkeiten. D.h. wie schon in einigen

Literaturstellen [17, 33, 59] angesprochen, verlaufen strukturelle Umordnungsprozesse der polymeren Garne bei höheren Prüfgeschwindigkeiten anders als bei niedrigen Prüfgeschwindigkeiten ab.

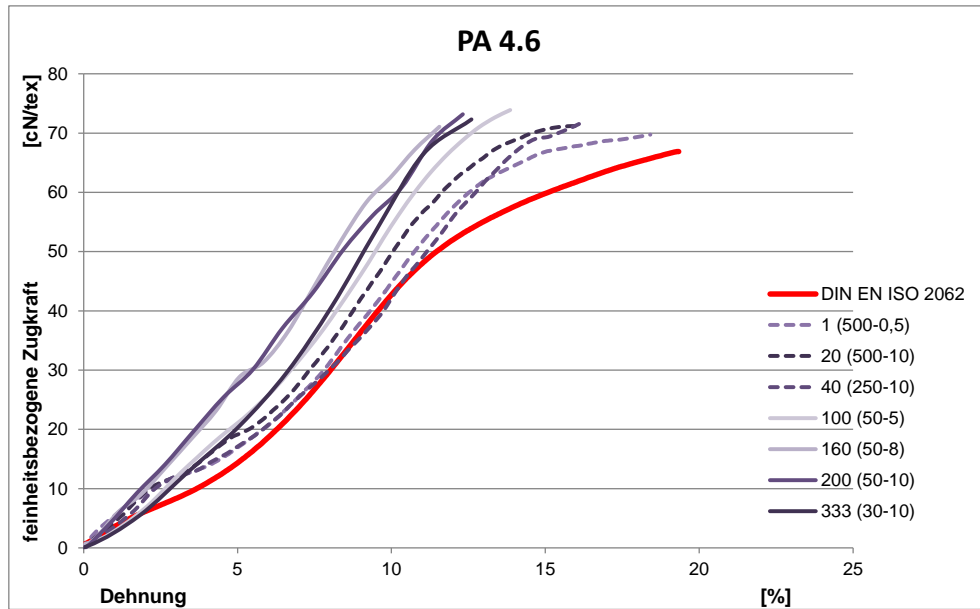


Abbildung 6.28: Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrate am Beispiel PA 4.6 940 f 140

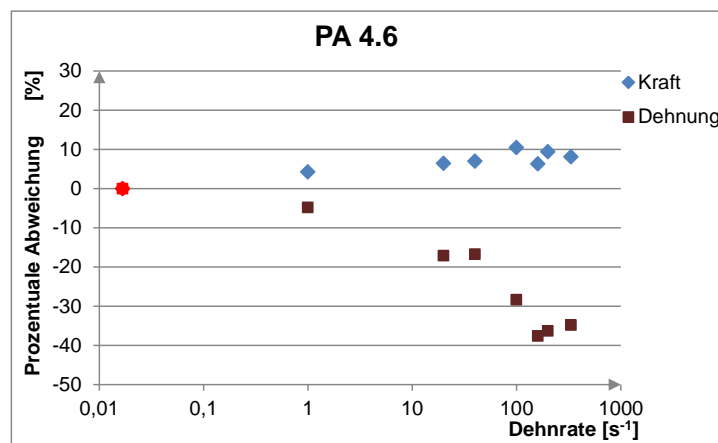


Abbildung 6.29: Prozentuale Abweichung der Kraft- und Dehnungswerte von der Dehnrate am Beispiel PA 4.6 940 f 140

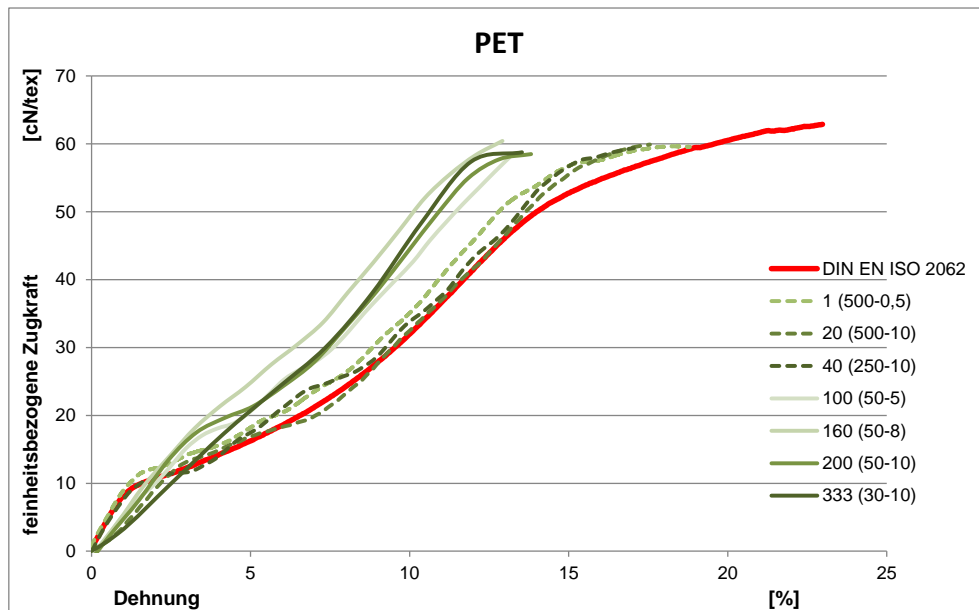


Abbildung 6.30: Abhängigkeit der feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven von der Dehnrate am Beispiel PET 550 f 105

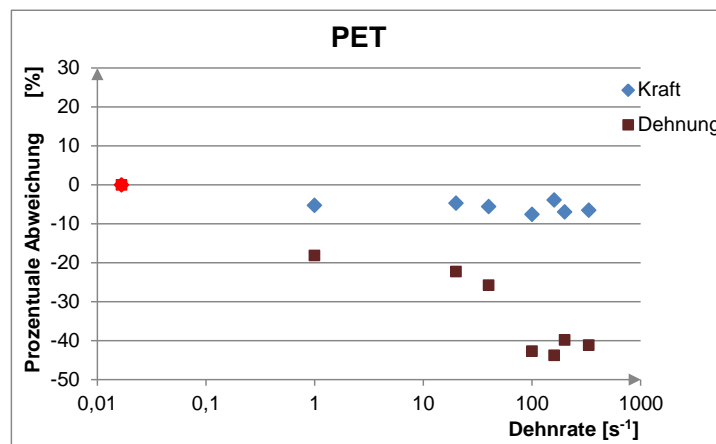


Abbildung 6.31: Prozentuale Abweichung der Kraft- und Dehnungswerte von der Dehnrate am Beispiel PET 550 f 105

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Unterschiede in den feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Diagrammen bzw. Zugkräften und Dehnungen aus den Veränderungen des Deformationsmechanismus bei dynamischen Beanspruchungen resultieren.

## 6.6 Aussagen über Anfangsmodul und Streckgrenze

In den vorangegangenen Kapiteln wurden anhand der Kraft-Dehnungs-Messung vor allem Aussagen über die Zugkraft und Zugdehnung der getesteten Garntypen getroffen. Auf Grundlage der ermittelten Werte, die als Funktion der Zugkraft über der Dehnung verstanden werden kann, lassen sich jedoch weitere Aussagen über das mechanische bzw. viskoelastische Verhalten der geprüften Garne treffen. Daher wurden die Kurven durch die Anwendung des Programms Origin 8.5 graphisch abgeleitet. Mit dem Programm werden die Werte von der feinheitsbezogene Kraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  differenziert und aus den Ergebnissen werden die Ableitungs-Kurven ersten  $R'(\epsilon)$  und höheren Grades  $R''(\epsilon)$  bzw.  $R'''(\epsilon)$  punktweise entwickelt. Mit Hilfe der ersten Ableitung kann z.B. die Steifigkeit des geprüften Materials bestimmt werden. Da es sich bei den untersuchten Garnen um viskoelastisches Material handelt, ist die erste Ableitung, die die Steigung der Kurve und damit den E-Modul des Materials beschreibt, über der Dehnung nicht konstant. Um nun die Steifigkeit der untersuchten Garne im linearelastischen Anfangsbereich und in den Bereichen plastischer Verformung der feinheitsbezogene Kraft-Dehnungs-Kurve zu bestimmen, wurden der Anfangsmodul  $m_i$ , sowie die Module  $m_1$  und  $m_2$  bestimmt. Dafür sind zwei Bedingungen notwendig [10, 23, 53, 67, 86]

1. die erste Ableitung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve ist maximal ( $R'(\epsilon) = \max$ ) oder minimal ( $R'(\epsilon) = \min$ ) und
2. die zweite Ableitung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve ist Null ( $R''(\epsilon) = 0$ ).

Ebenfalls lässt sich durch höhere Ableitungen die Streckgrenze der einzelnen Garne bestimmen. Die Streckgrenze stellt die Grenze des elastischen Bereiches dar [67], bis welcher das Material beim Zugversuch keine sichtbare plastische Verformung aufweist und entspricht der Maximalkraft im elastischen Bereich. Überschreitet man die Streckgrenze, kehrt das Material nach Entlastung nicht mehr in die ursprüngliche Form zurück, sondern es verblieb eine dauerhafte Probenverlängerung. Für die Festlegung der Streckgrenze sind folgende zwei Bedingungen notwendig [10, 23, 67, 86]:

1. die zweite Ableitung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve ist minimal ( $R''(\epsilon) = \min$ ) und
2. die dritte Ableitung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve ist Null ( $R'''(\epsilon) = 0$ ).

Für die rechnerische Bestimmung des Anfangsmoduls und der Streckgrenze wurden die untersuchten feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven zuerst geglättet (Kapitel 5.3.3), um den Einfluss der Schwingungen zu verringern. Die feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven, die mit größeren Dehnraten geprüft wurden, hatten eine sehr geringe Anzahl von Datenpunkte. Deswegen wurde auf Basis der experimentell aufgenommenen Kurve mit Hilfe des Programms Origin 8.5 eine polynomiale Kurve ermittelt. Zur Anpassung der gemessenen Daten wurden in der Regel polynomiale Ordnungen 9 Grades benutzt (Abbildung 6. 32), je nach dem welche Ordnung die ermittelte Kurve besser beschreibt. Wie aus dem Beispiel in Abbildung 6.32 zu sehen ist, wurde die theoretische Kurve ausgewählt, die fast den gleichen Kurvenverlauf wie die experimentell gemessene Kurve zeigt.

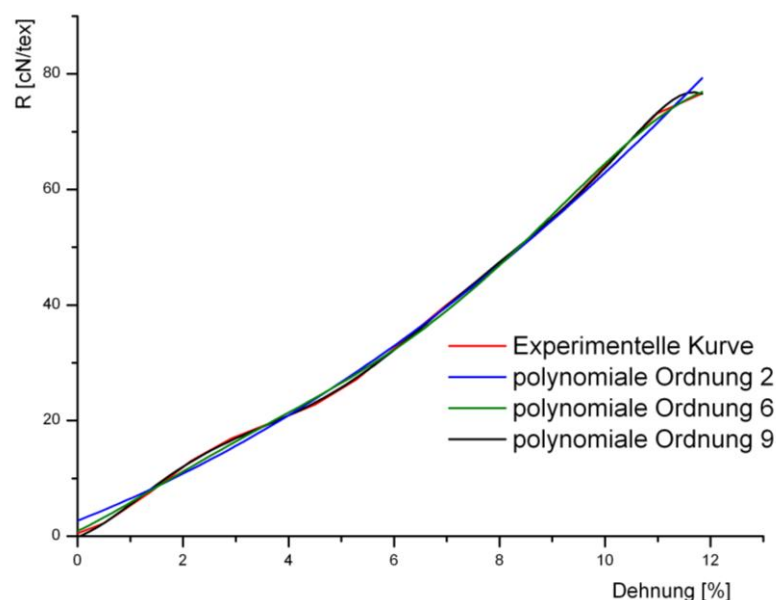


Abbildung 6.32: Verschiedene polynomiale Ordnungen zur Anpassung an die gemessene feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurve

Die theoretischen feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven wurden dann mit Hilfe der Differentialrechnung mehrfach abgeleitet, um den Anfangsmodul und die Streckgrenze der einzelnen Garne abhängig von ihrer Dehnrates zu ermitteln. Am Beispiel eines theoretischen Kurvenverlaufs in Abbildung 6.33 sind der Anfangsmodul  $m_i$ , die Module  $m_1$ ,  $m_2$  und die Streckgrenze mit Hilfe der ersten, zweiten und dritten Ableitung festgestellt worden. Der Punkt  $m_i$  stellt den Anfangsmodul dar und wird mit Hilfe der ersten und zweiten Ableitung ermittelt, d.h. die erste Ableitung erreicht das erste Maximum ( $R'(\epsilon) = \max.$ ) und die zweite Ableitung schneidet die X Achse,  $R''(\epsilon) = 0$ . Nach diesem Punkt verringert sich die

Steigung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve. Die Probensteifigkeit nimmt ab, da es in den Garnen zu ersten strukturellen Umlagerungen kommt. [23] Von dem Moment an vergrößert sich die Zugkraft nicht mehr proportional mit der Dehnung [67], d.h. die Garne verhalten sich nicht mehr rein linearelastisch. Viskoses Fliesen tritt auf. Aus dem Kurvenverlauf der höheren Ableitungen kann man die Streckgrenze (eng. yield point) bestimmen. Das ist der Punkt an dem die zweite Ableitung ein Minimum erreicht ( $R''(\epsilon) = \min$ ) und die dritte Ableitung die X Achse schneidet ( $R'''(\epsilon) = 0$ ). Die Streckgrenze markiert das Ende des elastischen Bereichs, d.h. bei Dehnungen über die Streckgrenze hinaus verformen sich die Garne plastisch und irreversibel. Die Steifigkeit des Materials nimmt weiter ab, bis zu einem Punkt  $m_1$ , wo er ein Minimum erreicht. In diesem Punkt sind der Fließprozess, d.h. die strukturellen Umwandlungen in den Garnen am größten [67]. Nach dem Wert  $m_1$  steigt die Steifigkeit der Garne wieder an, da sich die Makromoleküle der Fasern in Zugrichtung orientieren und gestreckt werden. Damit ist eine größere Zugkraft für eine weitere Streckung notwendig. Die Steifigkeit steigt, bis zu einem maximalen Wert  $m_2$  an, der den höchsten Wert in dem zweiten Teil der Kurve der ersten Ableitung darstellt.

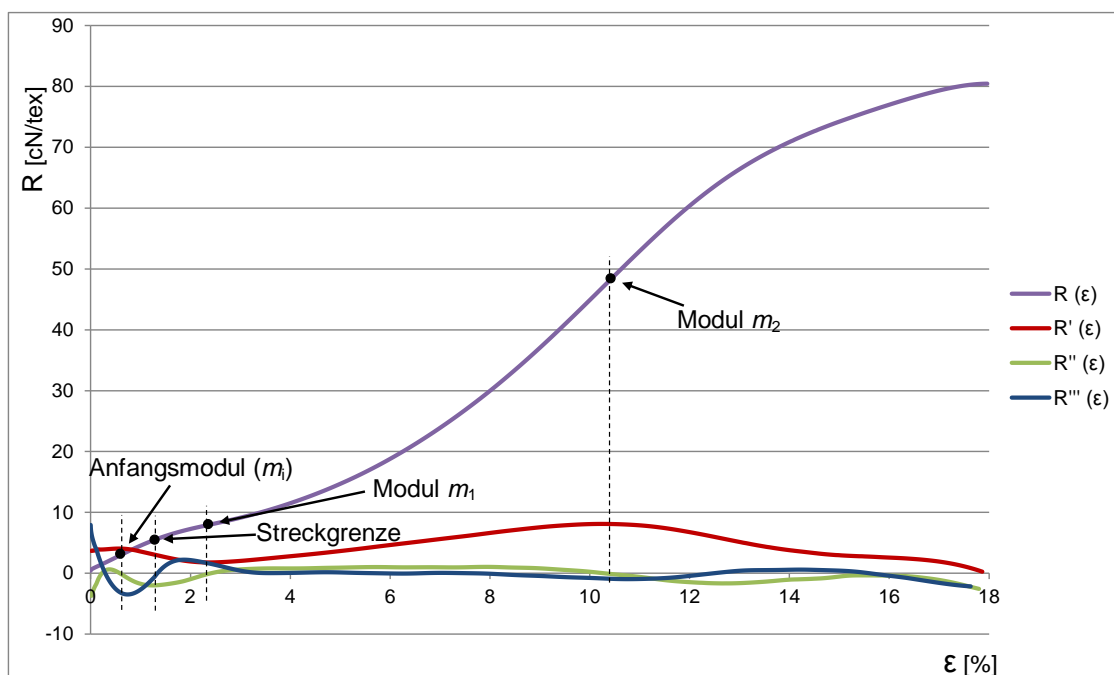


Abbildung 6.33: Grafische Darstellung einer beispielhaften feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$ , deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$

Für jede untersuchte Garnvariante wurden feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurven ausgewählt, die bei Dehnraten von  $0,017 \text{ s}^{-1}$  (=DIN EN ISO 2062),  $100 \text{ s}^{-1}$ ,  $160 \text{ s}^{-1}$ ,  $200 \text{ s}^{-1}$  und  $333 \text{ s}^{-1}$  geprüft wurden. Diese Kurven wurden mehrfach differenziert und nach Anfangsmodul bzw. Streckgrenze hin, untersucht und miteinander verglichen.

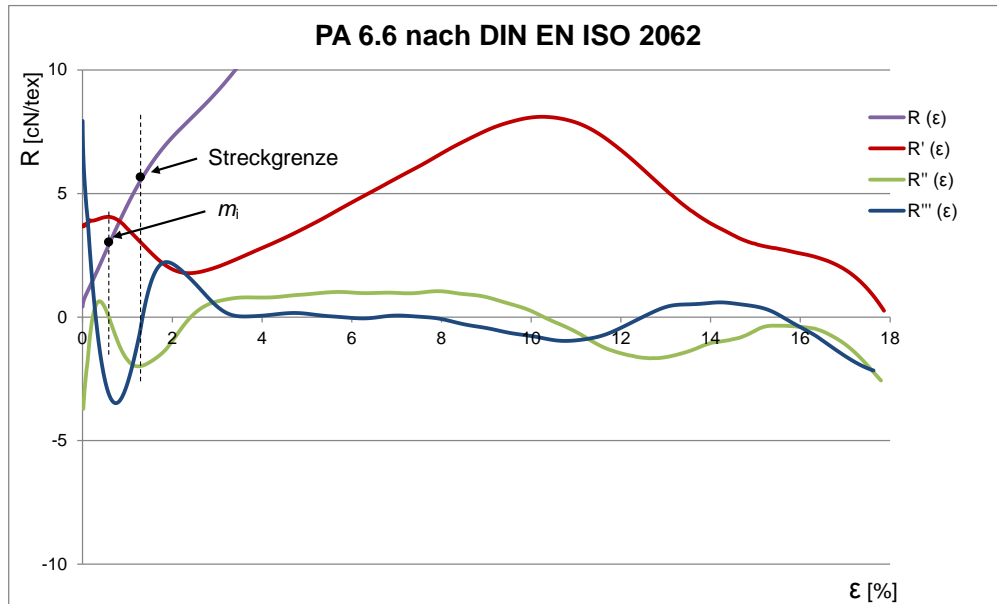


Abbildung 6.34: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 6.6 940 f 140, geprüft nach DIN EN ISO 2062

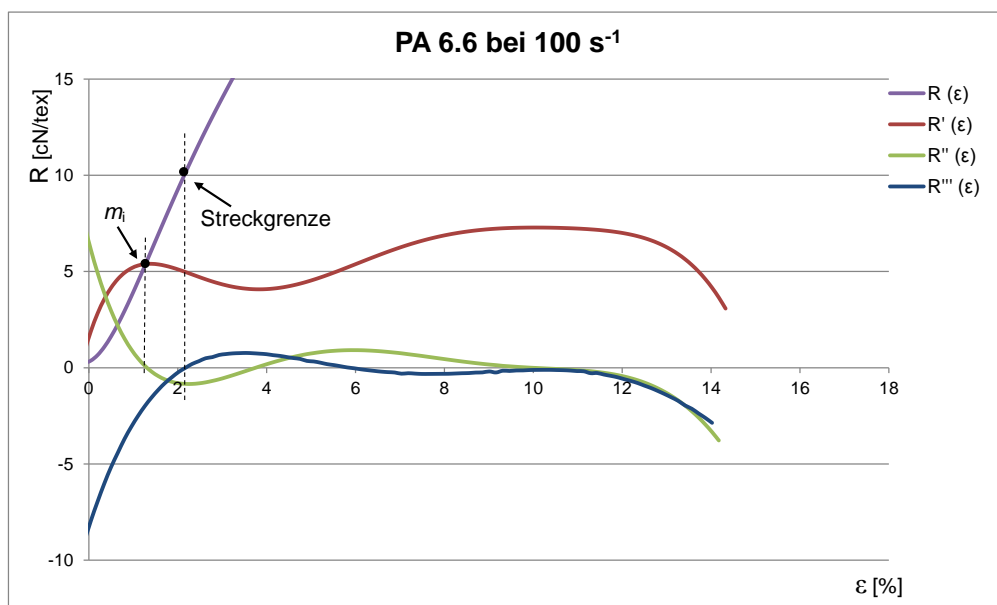


Abbildung 6.35: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 6.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrade von  $100 \text{ s}^{-1}$



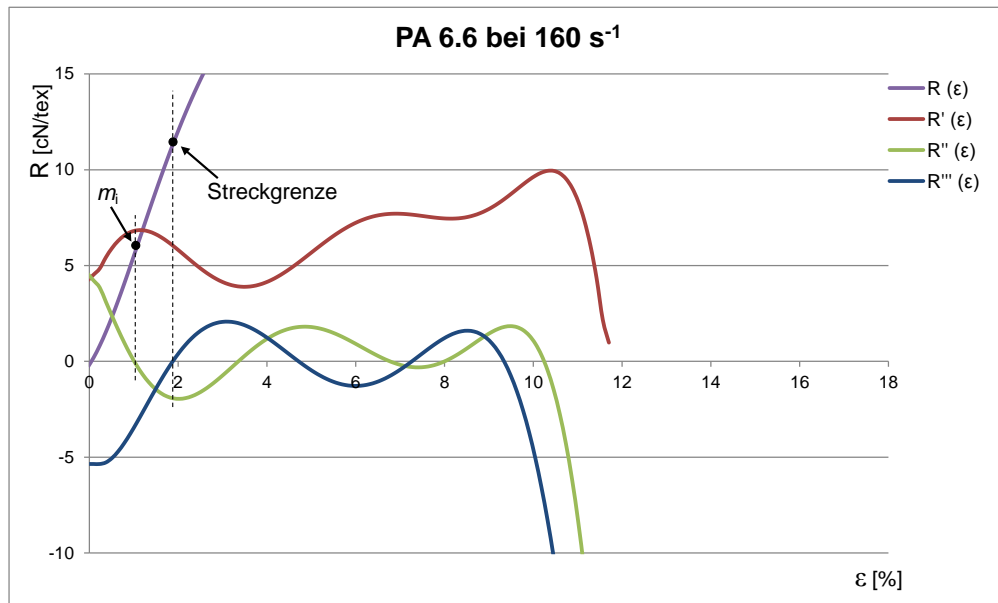


Abbildung 6.36: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 6.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrate von  $160 \text{ s}^{-1}$

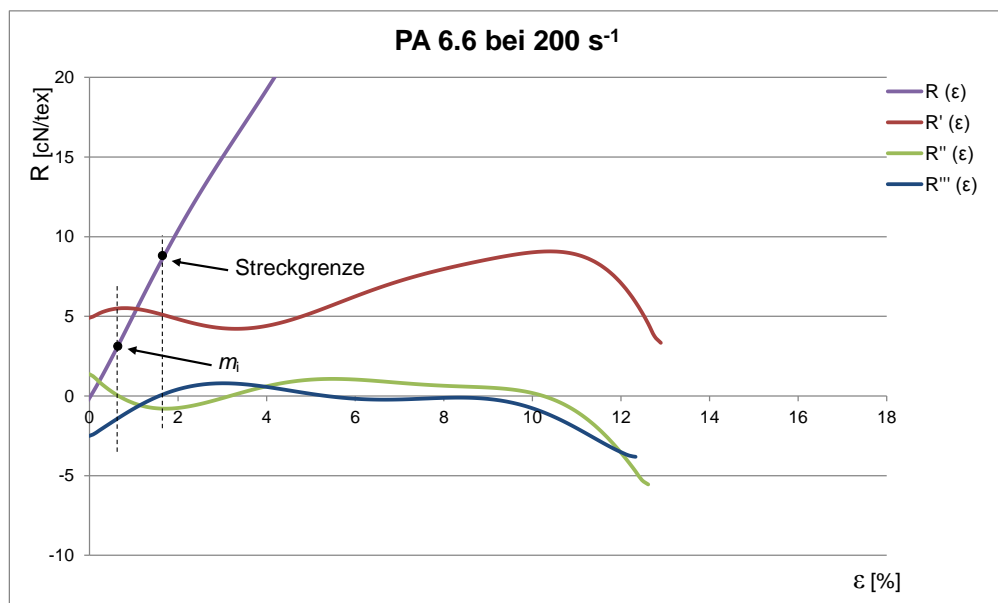


Abbildung 6.37: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 6.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrate von  $200 \text{ s}^{-1}$

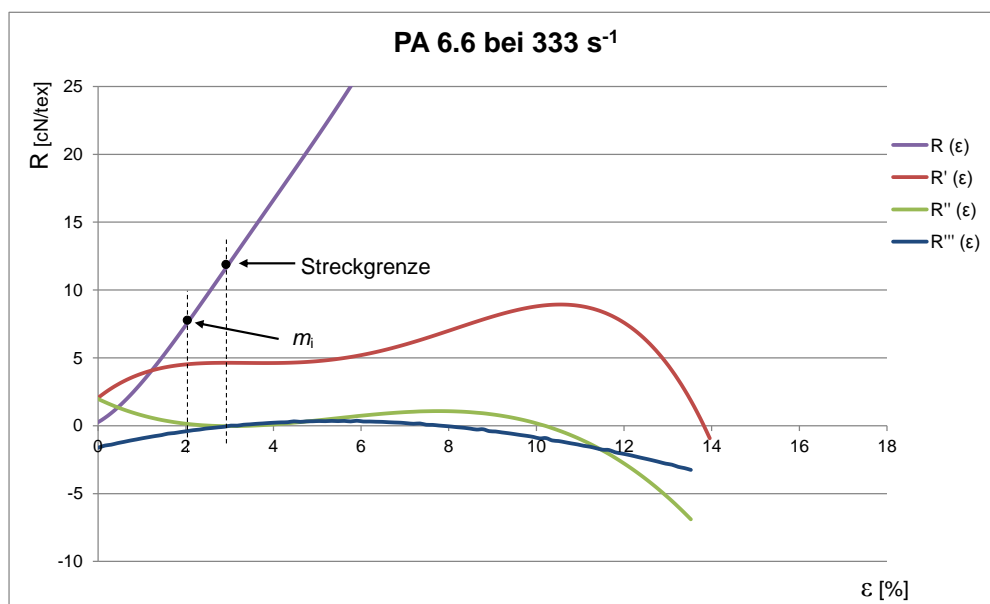


Abbildung 6.38: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 6.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrate von  $333 \text{ s}^{-1}$

Die in den Abbildungen 6.34 bis 6.38 gewonnen Ergebnisse für den Anfangsmodul  $m_i$  wurden in Tabelle 6.4 (S. 106) gegenübergestellt. Dabei zeigt sich, dass  $m_i$  von PA 6.6 940 f 140, mit zunehmender Dehnrate sowohl bei höheren Dehnungen als auch bei höheren Zugkräften ermittelt wird. D.h. je größer die Dehnrate ist, desto kürzer ist auch die Zugprüfung und desto weniger Zeit haben die viskosen Anteile der PA 6.6 940 f 140 Garne zum Tragen zu kommen. Verdeutlicht wird das ebenfalls durch die Erhöhung der Streckgrenze, die sich mit zunehmender Dehnrate erhöht. D.h. mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit setzt plastische Verformung erst bei höherer Dehnung ein.

Auch bei PA 4.6 940 f 140 wurden für die feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven die erste, zweite und die dritte Ableitung gebildet. Hier ergab sich aus den Abbildungen 6.39 bis 6.43 ebenfalls, dass die Dehnung von  $m_i$  mit zunehmender Dehnrate ansteigt. Gleichzeitig erhöht sich auch die Streckgrenze mit Vergrößerung der Dehnrate. Damit reduzieren sich bei dynamischer Belastung sowohl die viskosen als auch plastischen Verformungsmechanismen.

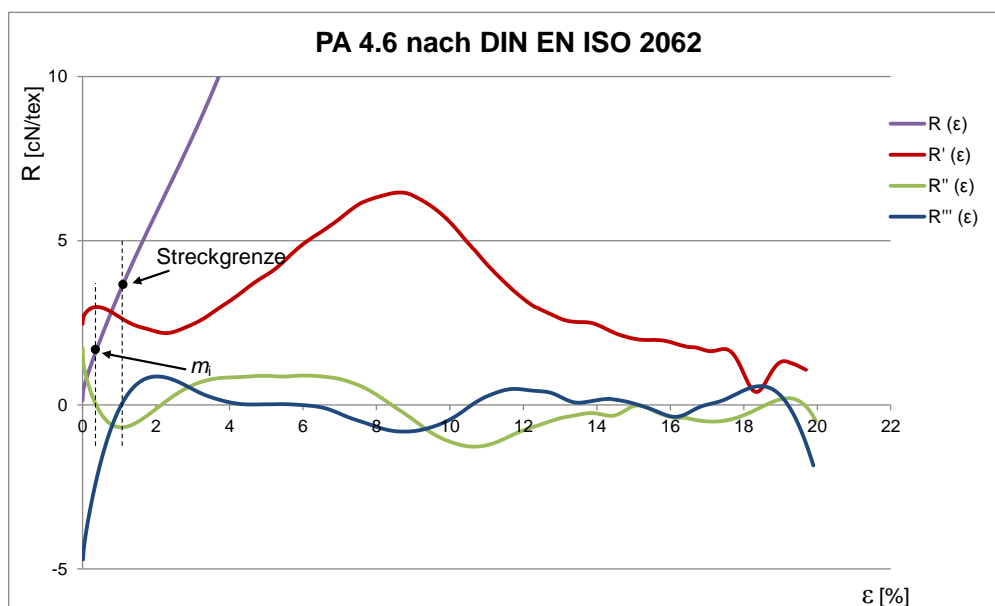


Abbildung 6.39: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 4.6 940 f 140, geprüft nach DIN EN ISO 2062

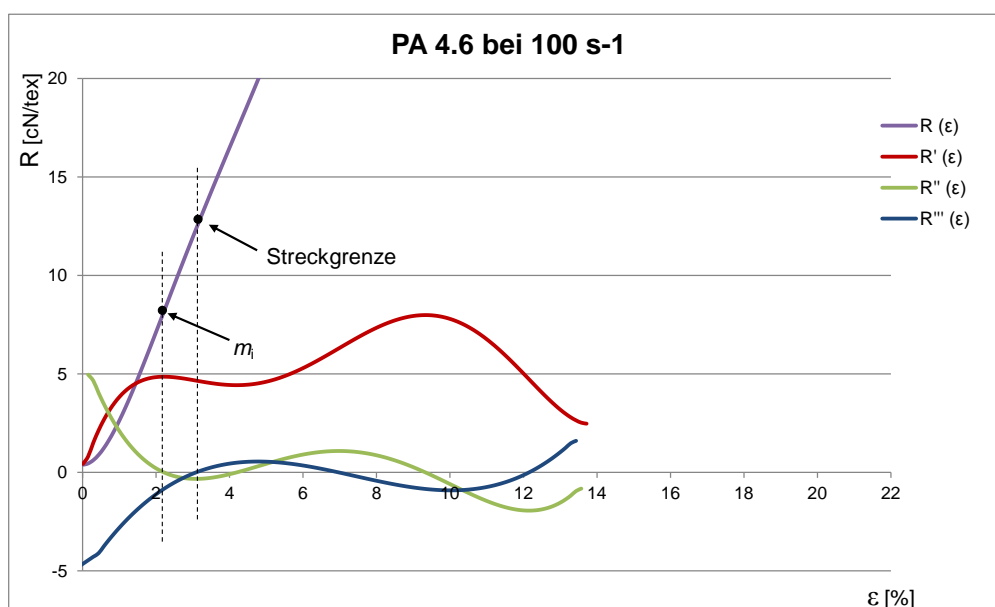


Abbildung 6.40: Grafische Darstellung der feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 4.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrage von 100 s<sup>-1</sup>

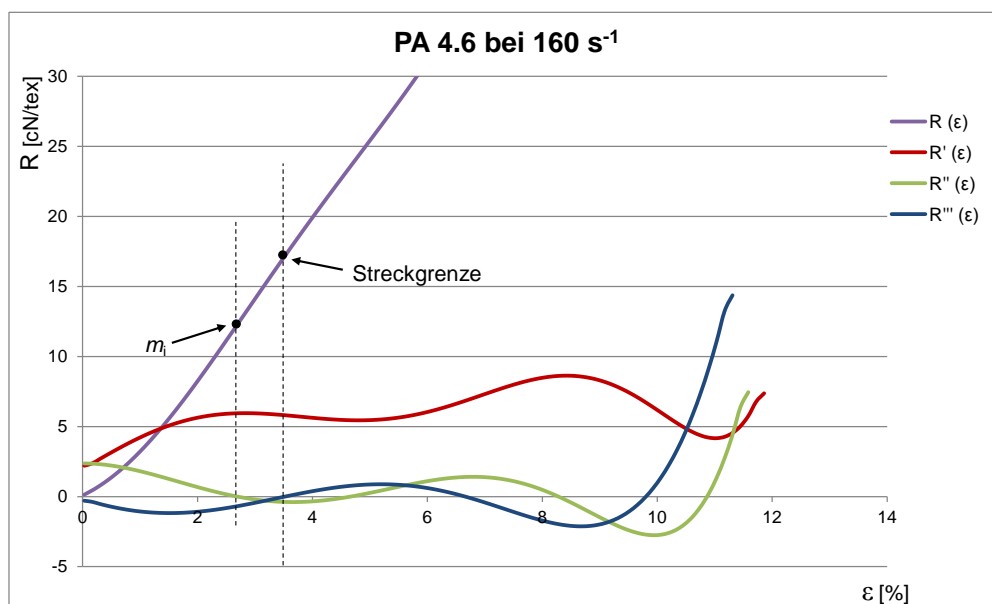


Abbildung 6.41: Grafische Darstellung der feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 4.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrate von 160 s<sup>-1</sup>

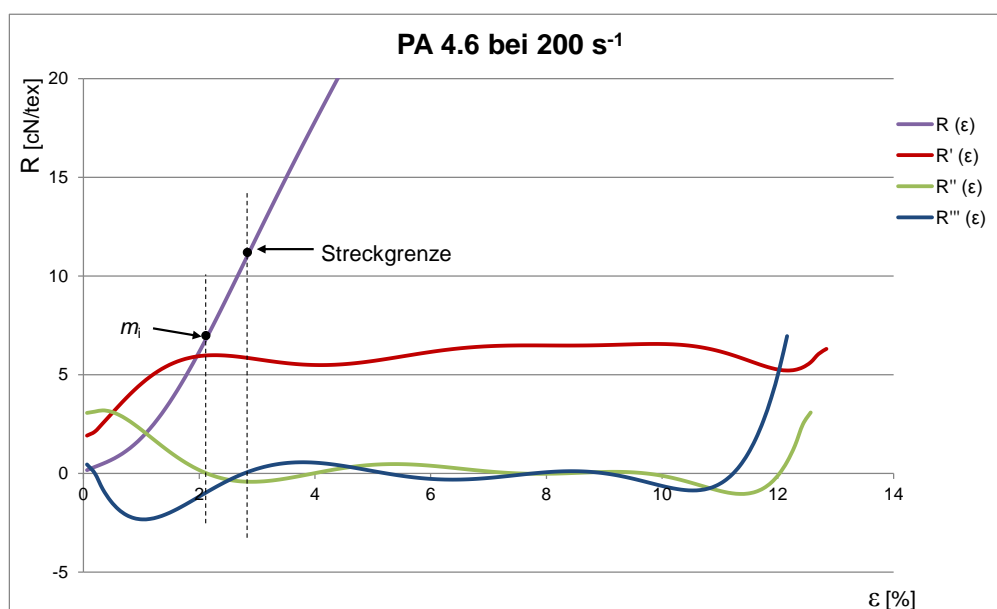


Abbildung 6.42: Grafische Darstellung der feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 4.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrate von 200 s<sup>-1</sup>

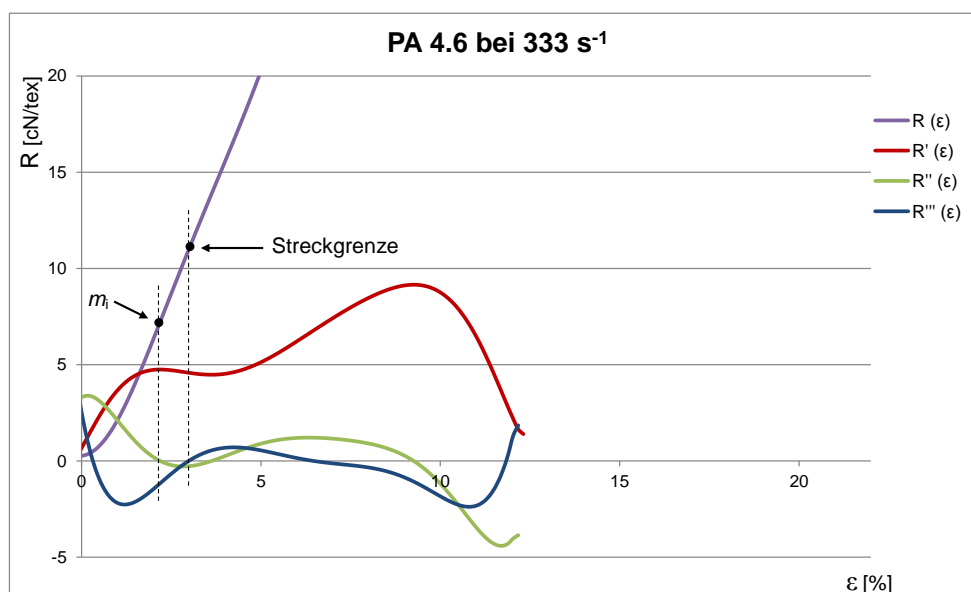


Abbildung 6.43: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PA 4.6 940 f 140, geprüft bei einer Dehnrage von  $333 \text{ s}^{-1}$

Zuletzt zeigen ebenfalls die feinheitsbezogenen Kraft-Dehnungs-Kurven und die daraus gebildeten Ableitungen von PET 550 f 105 (Abbildungen 6.44 bis 6.48), dass durch eine Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit die Garne mit einem stärker elastischen Verhalten auf die aufgebrachten Zugkräfte reagieren. Vergleicht man nun Betrag der Zugkraft in Abhängigkeit von der Dehnrage, können keine generellen Aussagen getroffen werden.

Der Anfangsmodul  $m_i$  der getesteten Garne bei unterschiedlicher Dehnrage ist in der Tabelle 6.4 (S. 106) dargestellt. Dabei zeigt sich für die beiden PA-Garnvarianten, dass der Anfangsmodul keine eindeutige Tendenz bezüglich der gezeigten Dehnraten zeigt. So nimmt der Anfangsmodul zunächst mit steigender Dehnrage leicht zu, um dann wieder auf das Ausgangsniveau abzufallen. Z.B steigt der Anfangsmodul von PA 6.6 von  $417 \text{ cN/tex}$  beim Normzugversuch auf ca.  $500 \text{ cN/tex}$  bei  $200 \text{ s}^{-1}$  an und sinkt bei einer Dehnrage von  $333 \text{ s}^{-1}$  wieder auf  $384 \text{ cN/tex}$  ab. D.h. es kann keine eindeutige Abhängigkeit der Garnsteifigkeit von der Dehnrage festgestellt werden. Dagegen nimmt bei PET der Anfangsmodul mit der Erhöhung der Dehnrage deutlich ab (von  $900 \text{ cN/tex}$  beim Normzugversuch auf  $400 \text{ cN/tex}$  bei einer Dehnrage von  $333 \text{ s}^{-1}$ ). Grund für dieses abweichende Verhalten von PET sind die strukturellen Umordnungsprozesse durch Verstreckung, die bereits für die Reduzierung der Zugfestigkeit mit zunehmender Dehnrage (Kapitel 6.5) verantwortlich waren.

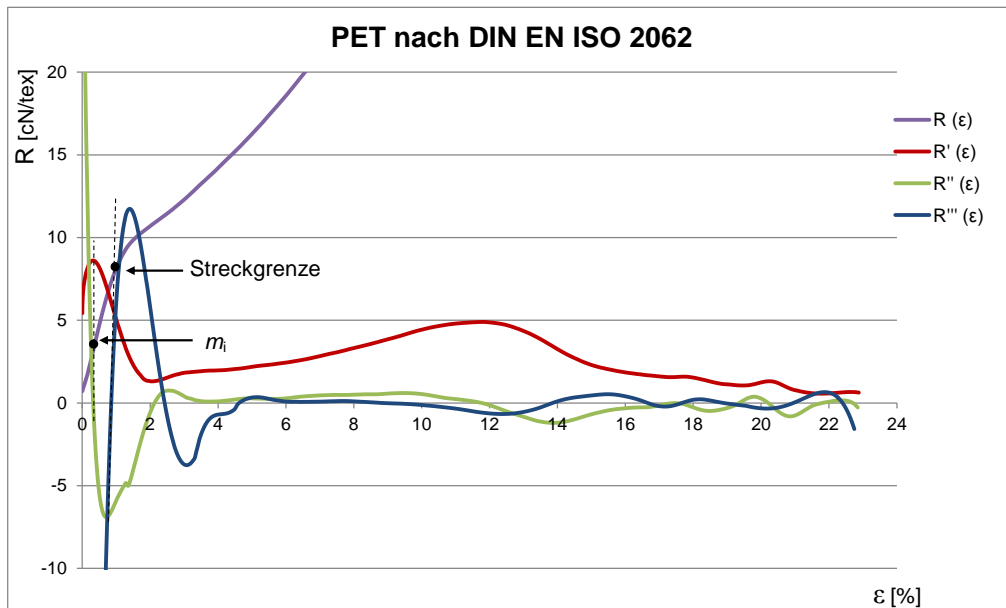


Abbildung 6.44: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PET 550 f 105, geprüft nach DIN EN ISO 2062

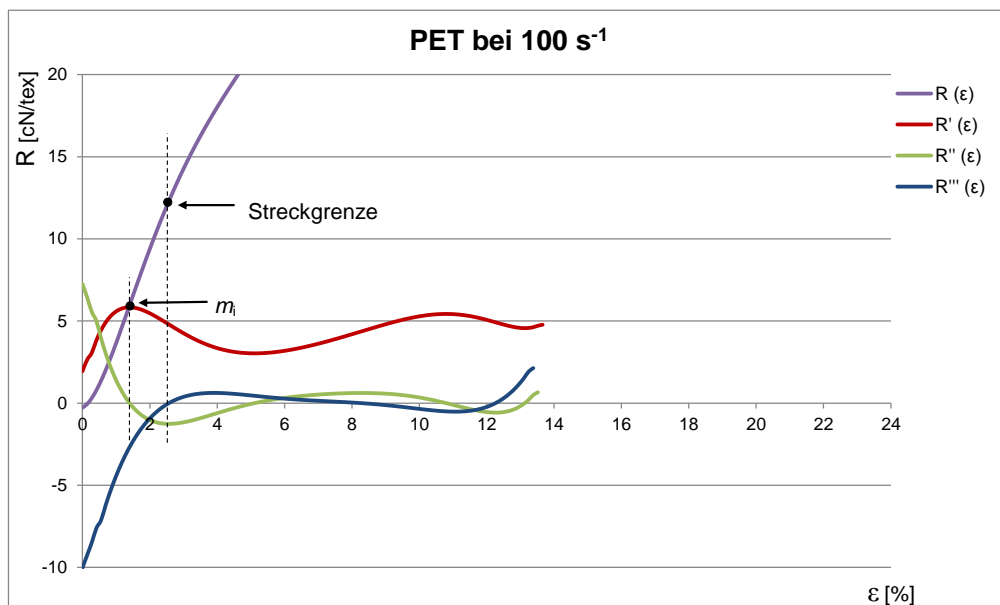


Abbildung 6.45: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PET 550 f 105, geprüft bei einer Dehnrates von  $100 \text{ s}^{-1}$

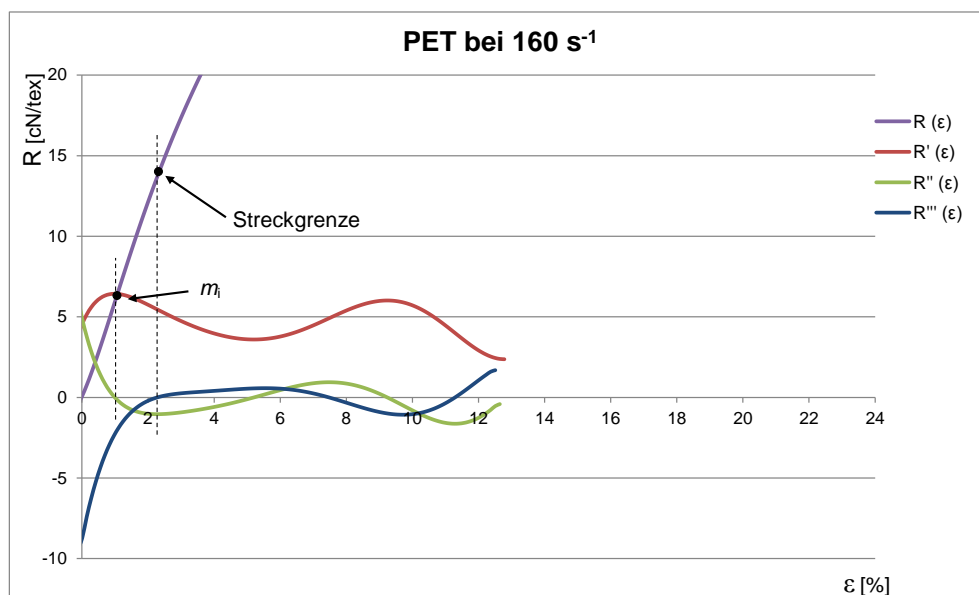


Abbildung 6.46: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PET 550 f 105, geprüft bei einer Dehnrage von  $160 \text{ s}^{-1}$

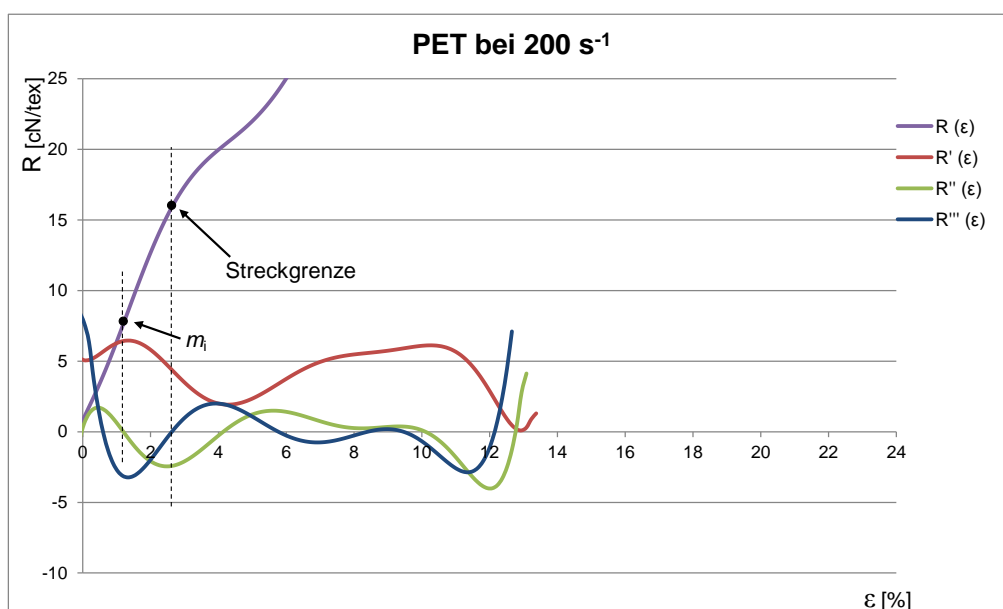


Abbildung 6.47: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PET 550 f 105, geprüft bei einer Dehnrage von  $200 \text{ s}^{-1}$

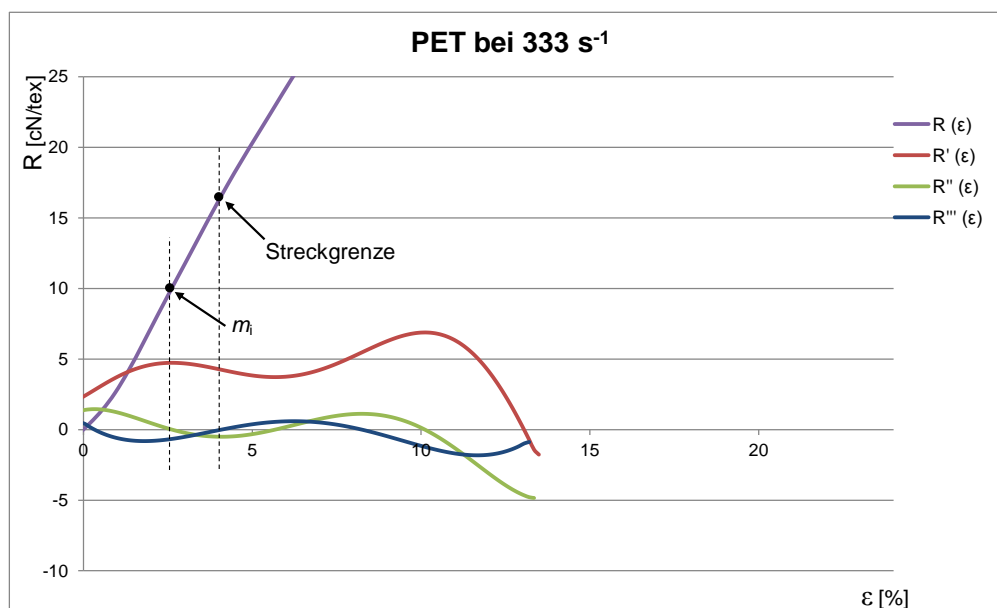


Abbildung 6.48: Grafische Darstellung der feinheitsbezogene Zugkraft-Dehnungs-Kurve  $R(\epsilon)$  und deren erster Ableitung  $R'(\epsilon)$ , zweiter Ableitung  $R''(\epsilon)$  und dritter Ableitung  $R'''(\epsilon)$  von PET 550 f 105, geprüft bei einer Dehnrage von  $333 \text{ s}^{-1}$

Tabelle 6.4: Einfluss der Dehnrage auf den Anfangsmodul  $m_i$

Material	Dehnrage [ $\text{s}^{-1}$ ]	$\epsilon_{mi}$ [%]	$R_{mi}$ [cN/tex]	$m_i$ [cN/tex]
PA 6.6	333	2,5	9,9	384
	200	0,65	3,2	492
	160	1,1	5,6	509
	100	1,3	5,4	392
	DIN EN ISO	0,6	3	417
PA 4.6	333	2,3	7,5	313
	200	1,5	7,5	487
	160	2,5	12	472
	100	2,3	8,5	352
	DIN EN ISO	0,3	1,5	333
PET	333	2,5	10	400
	200	1,6	8,5	500
	160	0,9	6,4	711
	100	1,6	6,7	438
	DIN EN ISO	0,3	3,2	900



## 6.7 Versagensmechanismen

### *Fadenbruchstatistik beim quasistatischen Zugversuch*

Fadenbrüche an den Klemmen, die schon im Unterkapitel 3.1.2 beschrieben wurden, wurden bei den quasistatischen Messungen mit den Einspannlängen 500 mm und 50 mm ausgeschlossen. Bei der kleinen Einspannlänge von 25 mm waren ziemlich viele Brüche im Abstand kleiner als 5 mm von den Klemmbacken zu verzeichnen. Da jedoch alle Messproben ein sehr ähnlichen Verlauf der Kraft-Dehnung-Kurve aufweisen, und sich die Höchstzugkraftwerte nicht unterscheiden, wurden bei allen Versuchsreihen mit einer Einspannlänge von 25 mm, alle Messproben, bei denen der Bruch nicht direkt am Übergang der Messprobe in die Klemmung auftrat, als gültige Messprobe bezeichnet und in die Statistikberechnung mit aufgenommen.

Die in der Abbildung 6.49 dargestellten statistischen Ergebnisse zeigen, dass grundsätzlich bei den quasistatischen Zugversuchen durch Einsatz der geeigneten Klemmen keine Klemmenbrüche auftraten. Deshalb beziehen sich alle in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten und diskutierten feinheitsbezogenen Zugkraft-Dehnungs-Mittelkurven nur auf Messproben, bei denen kein Bruch direkt an der Klemme aufgetreten ist.

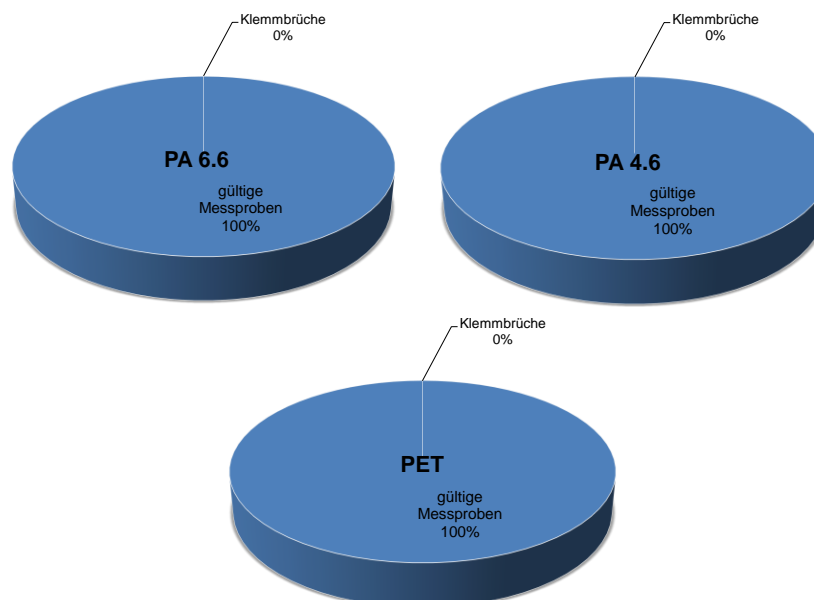


Abbildung 6.49: Fadenbruchstatistik bei quasistatischem Zugversuch - Vergleich der drei Versuchsgarne

### ***Fadenbruchstatistik beim dynamischen Zugversuch***

Bei allen Versuchsreihen wurden die Fadenbruchstellen dokumentiert und statistisch ausgewertet. Es wurde nach folgenden Fadenbruchstellen unterschieden:

- Oben; Fadenbruchstelle in der Nähe der ziehenden Klemme,
- Mitte und
- Unten; Fadenbruchstelle in der Nähe der ruhenden Klemme.

Auch bei den dynamischen Zugversuchen waren bei kleinen Einspannlängen und hohen Prüfgeschwindigkeiten viele Brüche im Abstand kleiner als 5 mm von den Klemmbacken zu verzeichnen. Aus den notierten Fadenbruchstellen und Messwerten in den Messprotokollen ist zu erkennen, dass die Probenbrüche nahe an den Klemmbacken keine kleineren Zugkräfte nach sich ziehen. Das lässt vermuten, dass die Brüche nicht direkt am Übergang der Messprobe in die Klemme auftreten. Aus diesem Grund wurden die Fadenbrüche, die in der Nähe der Klemmbacken auftraten als gültige Messprobe bezeichnet und in die Statistikberechnung mit aufgenommen.

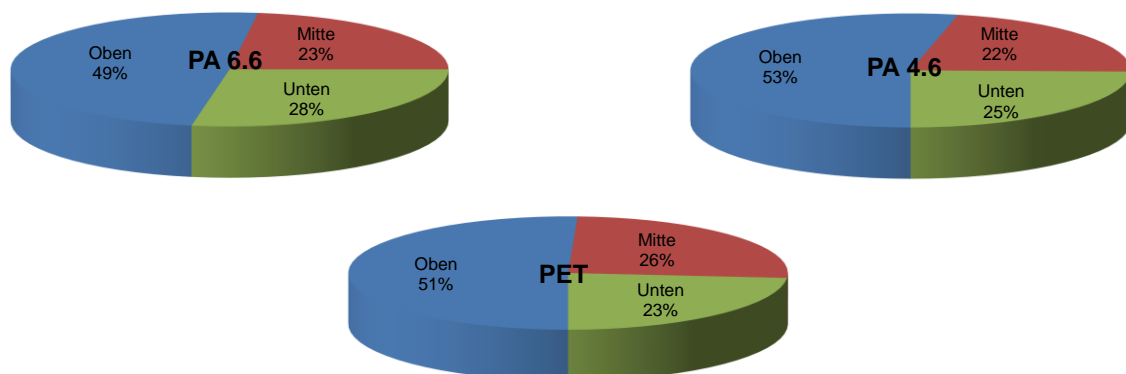


Abbildung 6.50: Fadenbruchstatistik bei dynamischem Zugversuch - Vergleich der drei Versuchsgarne

Nach Literatur [54] kann ein Fadenbruch nahe der Klemme auftreten, ohne ein Klemmenbruch im eigentlichen Sinn zu sein. Es wird vermutet, dass die Wahrscheinlichkeit eines Fadenbruchs in der Nähe der Abzugsklemmen mit steigender Dehnrage zunimmt. Ursache dafür ist die Art des Spannungsaufbaus innerhalb der Messprobe. An der ziehenden Klemme kommt es zu einer Spannungskonzentration, die sich mit zunehmender Dehnrage erhöht und lokal zu Brüchen in den Messproben führt.

Die Fadenbruchstatistik für alle drei Versuchsgarne, die in Abbildung 6.50 dargestellt ist, weist darauf hin, dass bei allen drei Versuchsgarnen nur 20 % bis 25 % der Fadenbrüche in der Mitte der Einspannlänge liegen. Alle anderen Brüche konzentrieren sich in der Nähe der Klemmen. Aus den Diagrammen in Abbildung 6.50 ist zu sehen, dass sich ca. 50 % der Fadenbrüche an der oberen bzw. ziehenden Klemme konzentrieren und nur ungefähr 25 % an der unteren bzw. ruhenden Klemme stattfinden. Diese Werte bestätigen die in der Literatur [54] beschriebenden Effekte der Spannungskonzentration an der oberen ziehenden Klemme.

Zusammenfassend kann aus der Fadenbruchstatistik gefolgert werden, dass die Anzahl der Brüche an den Klemmen mit Verkleinerung der Einspannlänge und Vergrößerung der Prüfgeschwindigkeit zunimmt. Für die Auswertung der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Kurven spielt dieses Verhalten jedoch keine Rolle, da es sich nicht um Brüche handelt, die durch die Einklemmung selber entstehen, d.h. keine Klemmenbrüche im eigentlichen Sinne sind.

### ***Bruchendenuntersuchungen***

Unter dem Wort Bruch [30, 36] versteht man die Trennung des Materialzusammenhaltes in einem festen Körper, wobei es sich hier um einen Vorgang handelt, der den Körper entweder teilweise oder auch vollständig zerstört. Der Bruch ist mit der Ausbreitung eines oder mehrere Risse verbunden, was am Ende zur vollständigen Zertrennung führen kann. Am Anfang besitzt ein Riss eine bestimmte Größe und Form und verändert sich nicht, bis zu dem Moment, wo aufgrund einer kritischen Beanspruchung die Rissausbreitung beginnt.

Der Bruchvorgang bei Fasern ist sowohl von der Natur der Faser abhängig, als auch von der Beanspruchung [18, 45, 66]. Deswegen sollte bei Zugversuchen neben den mechanischen Eigenschaften auch die Faserbruchenden, also wie die Faser unter der Belastung zerreißen, untersucht werden. Wenn die Beanspruchung einen kritischer Wert erreicht, beginnt in den Schwachstellen, meistens in den weniger geordneten Bereichen (amorphen Bereichen) des Fadens, Fehler zum Riss anzuwachsen, der sich dann wiederum sehr schnell durch das Material bewegt und schließlich zum Bruch der gesamten Probe führt. Anhand des Bruchbildes, lassen sich Aussagen über die Versagensmechanismen treffen.

Nach Literatur [27, 28, 45] ist der typische Bruch von Polyamid und Polyester unter kleineren Belastungsgeschwindigkeiten ein Versagen mit V-Kerb-Bruch, der in Abbildung 6.51a bzw. schematisch in Abbildung 6.51b dargestellt ist. Auf der REM

(engl. SEM) Aufnahme sowie an der schematischen Darstellung sind der Anfangspunkt des Bruches (A), ein kontrolliertes, duktiles Fortlaufen des Risses (B), ein anschließendes Ruckgleiten des Risses (C), sowie ein schnelles Risswachstum (D) und schließlich der vollständige Bruch der Faser in Punkt (E) gut zu erkennen. Mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit verringert sich die Größe der V-Kerbe und der Bereich der schnellen Rissausbreitung wird größer und die Bruchfläche zum Teil glatter.

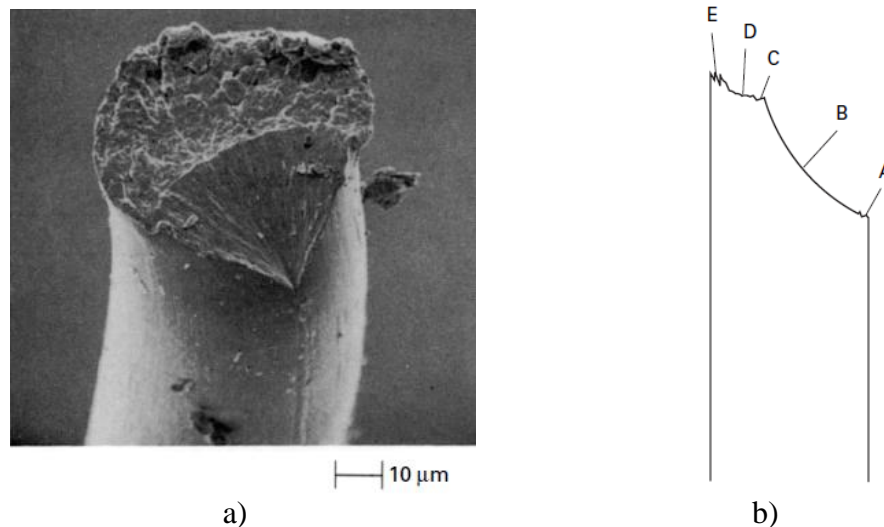


Abbildung 6.51: a) REM Aufnahme; b) schematische Darstellung eines V-Kerb-Bruches [45]

Nimmt die Belastungsgeschwindigkeit weiter zu, wie es beispielsweise bei einem ballistischen Beschuss der Fall ist, ändert der Versagensmechanismus der Fasern völlig. Nach Literatur [1, 28, 45, 66] soll das typische Bruchbild von Faserenden, die unter dynamischen Belastungen bis zum Bruch geprüft wurden, die sogenannte „mushroom“ Form sein. Dieses Bruchbild, das auch als pilzartig bezeichnet wird, ist in Abbildung 6.52 dargestellt. Es wird vermutet, dass die geschmolzenen Faserenden das Ergebnis der Veränderung von isothermischen zu adiabatischen Versuchsbedingungen ist. Genauer gesagt, kann bei niedrigen Beanspruchungsgeschwindigkeiten ein Temperatenausgleich mit der Umgebung stattfinden. Die Temperatur in der Faser bleibt gleich, d.h. isotherm. Dagegen kommt es bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten zu kaum einem Temperatenausgleich mit der Umgebung (= adiabatisch). Durch die hohe elastische Dehnung und dem Zerreißen der ersten Molekülverbindungen (Bruchanfang) entwickelt sich im Material eine hohe Erwärmung, die kaum an die Umgebung abgeleitet werden kann. Diese hohe örtliche Energie führt zum Aufweichen und Schmelzen des Materials in der Nähe des Bruchs. Nach dem Bruch fallen die

geschmolzenen und herausgezogenen Fibrillen zusammen und formen die sogenannten Schmelzzonen.

In der Literatur [1] wird vermutet, dass bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten die resultierende Deformation nicht gleichmäßig über die Einspannlänge verteilt ist. Diese wiederum kann die Ursache dafür sein, dass sich die eingetragene mechanische Energie punktuell, d.h. auf ein eingegrenztes Volumenelement konzentriert. Nach dem mechanischen Wärmeäquivalent, kann es zum Aufschmelzen des Materials kommen, wenn die Energiedichte in diesem eingegrenzten Volumenelement hoch genug ist.

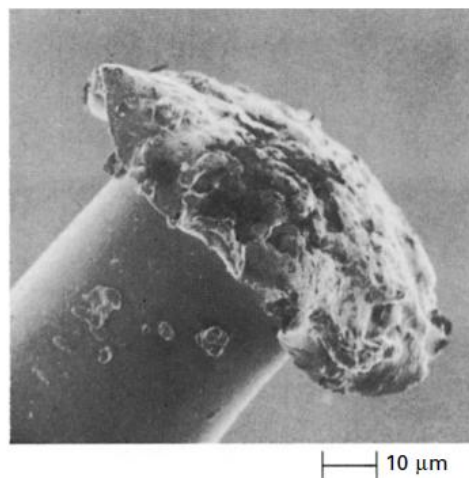


Abbildung 6.52: Hochgeschwindigkeit-Bruchende von PA 6.6 [45]

Die Abbildungen 6.53 bis 6.55 zeigen rasterelektronmikroskopische Aufnahmen von Bruchenden der selbst untersuchten Messproben, die unter niedrigen und höheren Dehnraten geprüft waren. Die jeweils mit a bezeichneten Aufnahmen stammen aus dem Normzugversuch, b sind die Aufnahmen, die bei einer Dehnrates von  $300 \text{ s}^{-1}$  und c sind die Aufnahmen, die bei einer Dehnrates von  $500 \text{ s}^{-1}$  geprüft wurden.

Bei allen untersuchten Garnproben, die unter niedrigeren Dehnraten geprüft wurden (= a und b), sind durch die gemachten REM Aufnahmen keine eindeutige Faserbruchformen zu erkennen. Auf Abbildung 6.55b ist der Bruchvorgang vermutlich in zwei Schritten abgelaufen, da zwei Querrisse zu sehen sind, die durch einen axialen Spalt abgetrennt sind. Die vorher erwähnte typische pilzartige Bruchfläche, die bei hohen Prüfgeschwindigkeiten vorkommen soll (Abbildung 6.52), konnte bei den selbst untersuchten Messproben nicht beobachtet werden. In der Literatur [28] wird die Faserbruchform, die in der Abbildung 6.53c zu sehen ist, als umgekehrte pilzartige Faserbruchform genannt. Auf der Aufnahme in der

Abbildung 6.54c sind zwar gewisse Verschmelzungen auf der Bruchfläche zu erkennen, dennoch kann nicht von einer pilzartigen Bruchform gesprochen werden. Dies läßt die Vermutung zu, dass die bei uns verwendeten Prüfgeschwindigkeiten zwar bereits zu einer gewissen Aufweichung der Fasern führt, die entstehenden Energien jedoch für die Ausbildung einer pilzartigen Bruchfläche zu gering sind.

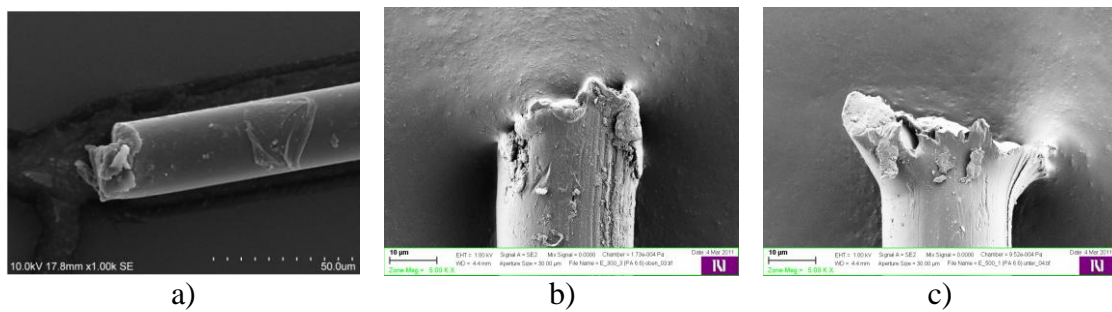


Abbildung 6.53: REM Untersuchungen der Bruchflächen von PA 6.6 940 f 140 bei ausgewählten Dehnraten

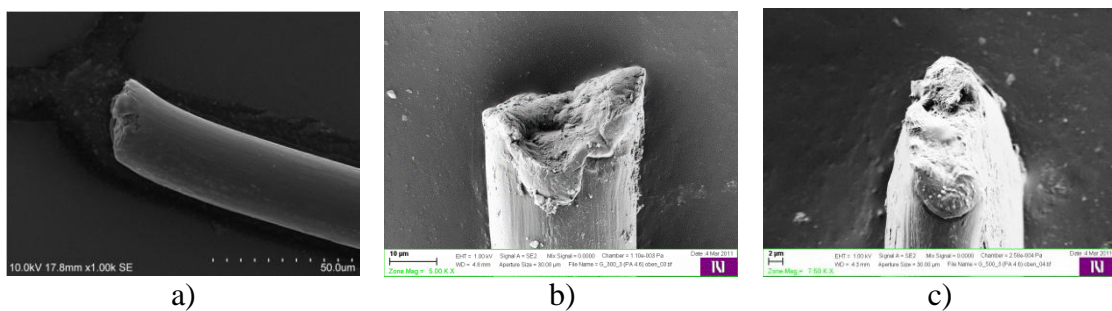


Abbildung 6.54: REM Untersuchungen der Bruchflächen von PA 4.6 940 f 140 bei ausgewählten Dehnraten

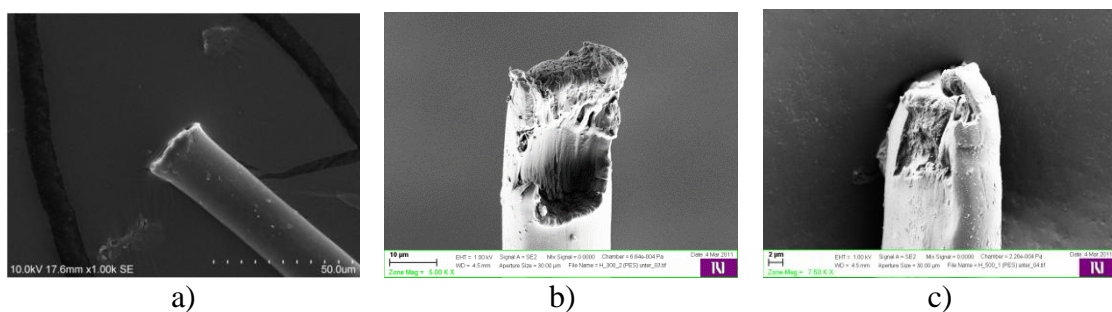


Abbildung 6.55: REM Untersuchungen der Bruchflächen von PET 550 f 150 bei ausgewählten Dehnraten

## 7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Klassisch werden Kraft-Dehnungs-Eigenschaften von Garnen unter quasistatischen Bedingungen ermittelt. Schon ziemlich früh erkannte man, dass die statischen Kennwerte nicht ausreichen, wenn Garne dynamischen Belastungen ausgesetzt werden. Im Textilbereich bestand zunehmend das Interesse, das dynamische Verhalten von Garnen zu ermitteln. Seit der Hälfte des vergangenen Jahrhunderts und mit dem Einsatz textiler Materialien für ballistische Anwendungen nahm dieses Interesse noch zu. Die ersten Prüfungen an Textilien unter dynamischen Belastungen sind aus dem Jahre 1950 bekannt.

Das Ziel der Literaturstudie war es, einen Überblick über die veröffentlichte Literatur zum Thema dynamische Untersuchungen an textilen Materialien zu erarbeiten. Da für dynamische Kraft-Dehnungs-Prüfungen keine einheitliche Prüfnorm existiert, sind die Untersuchungen mit vielen unterschiedlichen Prüftechniken und Prüfbedingungen gemacht worden. Daher sind die veröffentlichten Daten aus den verschiedenen Literaturquellen nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Es können nur allgemeine Trends bezüglich des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit bzw. Dehnrates auf die Festigkeit, Dehnung und Modul abgeleitet werden. Als Resümee der durchgeführten Literaturrecherche kann festgehalten werden, dass mit zunehmender Dehnrates die Zugkraft steigt und die Dehnung abnimmt.

In der Literatur finden sich jedoch praktisch keine Arbeiten, die das Verhalten von Hochleistungsgarnen aus PA 6.6, PA 4.6 und PET bei höheren Dehnrates untersuchen, daher war es Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf das Verhalten von Hochleistungsgarnen aus diesen Materialien im einaxialen Zugversuch zu ermitteln. Für die Untersuchung des Kraft-Dehnung-Verhaltens wurden technische Garne aus drei verschiedenen Polymeren PA 6.6, PA 4.6 und PET ausgewählt. Bei dem hochfesten Garn aus PA 6.6 handelte es sich um ein Multifilamentgarn aus 140 Einzelfasern, mit einem Titer von 94,4 tex. Das PA 4.6 Versuchsgarn bestand aus 140 Einzelfilamenten mit einem Titer von 94,8 tex und das PET Versuchsgarn bestand aus 105 Einzelfilamenten mit einem Titer von 55,8 tex.

Die experimentellen Untersuchungen wurden an zwei Universal-Prüfmaschinen durchgeführt. Für die Zugprüfungen bei niedrigen Dehnrates zwischen  $0,0017 \text{ s}^{-1}$  und  $1,2 \text{ s}^{-1}$ , wurde die Universal - Tischprüfmaschine (Z 010) der Firma Zwick GmbH & Co.KG verwendet. Die dynamischen Untersuchungen (Dehnrates zwischen  $1 \text{ s}^{-1}$  und  $500 \text{ s}^{-1}$ ), fanden an der servohydraulischen Prüfmaschine (HTM 2008) der Firma Zwick GmbH & Co.KG

statt, die speziell für die Garnzugprüfung modifiziert (Probehalterung, Prüftechnologie) wurde. Beide Prüfgeräte ermöglichen eine numerische sowie grafische Auswertung der Abhängigkeit der Zugkraft von der Dehnung.

Im Vorfeld zu den eigentlichen Untersuchungen wurde der Einfluss verschiedener Größen dahingehend untersucht, eine einheitliche Grundlage für die quasistatischen und dynamischen Messungen zu gewährleisten. Zahlreiche Einflussgrößen (vor allem die Wahl der Prüfmaschinen, der Prüfbedingungen und des Prüfklimas) wirken sich entscheidend auf das Messergebnis aus. Um daher eine Vergleichbarkeit der gemessenen Daten zu erreichen, wurde das Prüfklima nach ISO 139 und die Vorspannkraft nach Norm DIN EN ISO 2062 eingestellt und nicht variiert. Dagegen wurde der Einfluss der Einspannklemmen, der Einspannlänge, der Prüfgeschwindigkeit und das Arbeitsprinzip der Zugprüfmaschinen genauer untersucht. Die Ergebnisse dieser experimentellen Arbeiten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Ein negativer Einfluss der Klemmung durch schlechte Krafteinleitung in die Proben kann mit der richtigen Auswahl der Einspannklemmen bzw. Spannbacken beseitigt werden. Für die Tischprüfmaschine Z 010 wurden pneumatische Probehalter mit Backenbelägen aus Aluminium verwendet, die eine ausreichende Klemmung gewährleisten. Bei der servohydraulischen Zugprüfmaschine wurden leichte Schraubklemmen eingesetzt. Es wurden drei verschiedene Spannbacken getestet. Es zeigte sich, dass die Spannbacken mit profilierter Oberfläche nicht geeignet sind, da durch die scharfen Oberflächenkanten das Garn während der Prüfung so geschädigt wird, dass man keine repräsentativen Messwerte mehr erhält. Mit Umschlingungsklemmen erhält man zu hohe Dehnungen. Das liegt an einer unzureichenden Begrenzung der Einspannlänge  $l_0$  und weil die Längenänderung in den Klemmen mit erfasst wird. Hier wirkt sich der Fehler in der Messung der Gesamtdehnung bei kurzen Messproben stärker aus als bei längeren Messproben. Die experimentellen Untersuchungen zeigten, dass die Spannbacken aus Aluminium mit Vulkollan-Beschichtung für die untersuchten Garne am besten geeignet sind. Die Messprobe wird bei den Zugversuchen durch diese Backenklemmen nicht durch Quetschen an den Einspannstellen beschädigt.
- Der Maschinentyp hat keinen Einfluss auf die Zugkraft. Im Fall der Dehnung ist eine unmittelbare Vergleichbarkeit nicht gegeben, da bei beiden verwendeten Prüfmaschinen zur Realisierung der gleichen Dehnrates unterschiedliche Einspannlängen verwendet werden mussten.



- Die Einspannlänge wirkt sich stark auf die Messergebnisse aus. Durch zahlreiche Untersuchungen mit verschiedenen Einspannlängen konnte die „weakest-link-theory“, d.h. die Zunahme der Zugkraft und der Dehnung mit geringer Einspannlänge bestätigt werden. Der Einfluss der Einspannlänge auf die Zugkraft nimmt mit zunehmender Dehnrate allerdings ab. D.h. die Abhängigkeit der Zugkraft von der Einspannlänge, ist bei den Hochgeschwindigkeitsprüfungen geringer als bei den quasistatischen Untersuchungen. Darüber hinaus wurde eine deutliche Zunahme der Dehnung bei Reduzierung der Einspannlänge festgestellt. Diese kann vor allem durch die Dehnung der Garne in den Klemmen erklärt werden. Diese Dehnung ist bei allen Einspannlängen gleich und fällt damit prozentual bei kleinen Einspannlängen stärker ins Gewicht. Dieser Kemmenfehler ist betragsmäßig deutlich größer, als die Erhöhung der Dehnung nach der „weakest-link-theory“ und überdeckt daher diesen Effekt vollständig.

Nach diesen Voruntersuchungen, die zur richtigen Beurteilung aller weiteren Messergebnisse dienten, lag der Schwerpunkt der Arbeit in der Untersuchung des Einflusses der Prüfgeschwindigkeit auf das Kraft-Dehnungs-Verhalten von PA 6.6, PA 4.6 und PET Garnen. Daher wurden Zugprüfungen sowohl unter quasistatischen als auch dynamischen Belastungen durchgeführt und die Ergebnisse wertend mit einander verglichen. Für die verschiedenen Messreihen wurden die zu untersuchenden Garne an beiden oben genannten Prüfmaschinen bei unterschiedlichen Dehnraten bis zum Bruch auf Zug geprüft. Um dabei die jeweiligen Dehnraten im Bereich von  $0,0017 \text{ s}^{-1}$  bis  $500 \text{ s}^{-1}$  zu realisieren, wurden Einspannlänge und Prüfgeschwindigkeit variiert. Somit haben wir einen Dehnratenbereich der oftmals bei Herstellung wie auch im Gebrauch vorkommt, realisiert. Für die anschließende Beurteilung der Messreihen sind jedoch nur Kraft-Dehnungs-Kurven bei Dehnraten zwischen  $0,017 \text{ s}^{-1}$  und  $333 \text{ s}^{-1}$  berücksichtigt worden. Bei den übrigen Dehnraten, verfälscht ein zu starker Einfluss des Kemmenfehlers das Messergebnis, was aus den Voruntersuchungen deutlich wird. Für die Ermittlung des Kraft-Dehnungs-Verhaltens der Garne unter quasistatischer Belastung, wurden Zugprüfungen gemäß DIN EN ISO 2062 durchgeführt. Die jeweiligen Messkurven aus beiden Belastungsfällen (quasistatisch und dynamisch) wurden nun einander gegenübergestellt und führten zu folgenden Ergebnissen.

Die Zugkraft der untersuchten PA-Garnvarianten erhöht sich im Vergleich zum quasistatischen Zugversuch leicht mit zunehmender Dehnrate. Als Hauptursache für dieses Verhalten ist nach der weakest-link-theory die kleinere Einspannlänge zu nennen, die zur Verwirklichung der höheren Dehnraten genutzt werden musste. Im Gegensatz dazu wird bei

den Proben aus PET durch die Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit eine 8 %-ige Reduzierung der Zugkraft im Vergleich zum Normzugversuch festgestellt. Bei diesem Garntyp finden starke molekulare Umordnungsprozesse durch die Verstreckung im Zugversuch statt. Diese sind zeitabhängig und führen bei längeren Prüfzeiten, d.h. geringeren Dehnraten zu einer höheren Orientierung der Makromoleküle und damit verbunden zu höheren Festigkeitswerten. Aus diesen erhaltenen Ergebnissen ableitend kann man bei den untersuchten polymeren Hochleistungsgarnen keine allgemein gültige Aussage bezüglich der Abhängigkeit der Zugkraft von der Dehnrade treffen. Diese hängt von den individuellen Eigenschaften des verwendeten polymeren Materials ab.

Auf das Dehnungsverhalten der in dieser Arbeit untersuchten Messproben wirken sich vor allem zwei unterschiedliche Effekte aus. Zum einen erhöht sich die prozentuale Dehnung auf Grund der Klemmendehnung mit kleiner werdenden Einspannlängen. Zum anderen nehmen bei gleicher Einspannlänge die Dehnungen mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit, bzw. Dehnrade ab. Grund hierfür ist die Viskoelastizität der geprüften Kunststofffasern. Beide Effekte wirken sich stark auf die relative Dehnung der geprüften Garne aus und führen bei Dehnraten von  $333 \text{ s}^{-1}$  und einer Einspannlänge von 30 mm zu Dehnungen, die nur etwa halb so groß sind wie unter quasistatischen Normbedingungen.

Das zeitabhängige Verhalten der polymeren Garne wurde besonders anschaulich durch die Ableitungen der ermittelten Kraft-Dehnungs-Kurven und der daraus möglichen Bestimmung des Anfangsmoduls  $m_i$  und der Streckgrenze. Bei den PA-Garnvarianten kann dabei keine signifikante Abhängigkeit des Anfangsmoduls, d.h. der Steifigkeit von der Dehnrade festgestellt werden. Lediglich die Lage des Anfangsmoduls und der Streckgrenze in den Kraft-Dehnungs-Kurven sind bei höheren Dehnungen und höheren Zugkräften definiert. D.h. je größer die Dehnrade ist, desto kürzer ist auch die Dauer der Zugprüfung und desto weniger Zeit haben die viskosen Anteile der PA-Garne um zum Tragen zu kommen. Bzw. anders ausgedrückt heißt das, dass der elastische Teil der Deformation bei dynamischen Beanspruchungen größer ist als bei quasistatischen. Eine Ausnahme stellt hierbei wieder das PET-Garn dar, wo der Anfangsmodul mit der Erhöhung der Dehnrade deutlich abnimmt (von  $900 \text{ cN/tex}$  beim Normzugversuch auf  $400 \text{ cN/tex}$  bei einer Dehnrade von  $333 \text{ s}^{-1}$ ). Grund für dieses abweichende Verhalten sind wiederum die strukturellen Umordnungsprozesse während der Verstreckung, die bereits für die Reduzierung der Zugfestigkeit mit zunehmender Dehnrade verantwortlich waren.

Bei allen Versuchsreihen wurden die Fadenbruchstellen dokumentiert und statistisch ausgewertet. Bei den Hochgeschwindigkeitszugprüfungen zeigte sich ein verstärktes

Auftreten von Brüchen nahe der Klemmen. Fast 70 % der aufgetretenen Fadenbrüche sind vorrangig an der oberen bzw. ziehenden Klemme aufgetreten, wobei die Wahrscheinlichkeit eines Faserbruchs an der Klemme mit zunehmender Dehnrates steigt. Diese Brüche resultieren aus Spannungskonzentrationen an der oberen Klemme, die jedoch nicht durch die Einklemmung selber entstehen. Es handelt sich also nicht um Klemmenbrüche im eigentlichen Sinne und daher müssen bei der Auswertung der einzelnen Spannungs-Dehnungs-Kurven diese Brüche nicht gesondert behandelt werden.

Bruchenden, die bei ausgewählten Dehnrates entstanden sind, wurden elektromikroskopisch untersucht. Dabei konnte die pilzarige Bruchfläche, die in der Literatur als typisch für dynamische Belastung beschrieben wird, bei unseren Untersuchungen nicht beobachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Studie den starken Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf das mechanische Verhalten von technischen Garnen im Zugversuch bestätigt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass PA 6.6 940 f 140, PA 4.6 940 f 140 und PET 550 f 105 auf dynamische Beanspruchungen anders reagieren als auf quasistatische Belastungen. Deswegen sind für Anwendungen, die mit hohen Belastungsgeschwindigkeiten verbunden sind, Materialkennwerte notwendig, die aus Untersuchungen im Hochgeschwindigkeitsbereich stammen, um eine korrekte Auslegung zu ermöglichen.

Die Studie hat auch gezeigt, dass die eingesetzte Prüfmaschine (HTM 2008 von Zwick) und das entwickelte Prüfkonzept (Hochgeschwindigkeitszugversuch, Aluklemmbacken mit Vulkolanbeschichtung, Dehnrates von bis zu  $333 \text{ s}^{-1}$ ) für dynamische Prüfungen an Garnmaterialien gut geeignet sind. Da jedoch vor allem die relative Dehnung von der Einspannlänge abhängt, sollten für weitere Untersuchungen ein Standard analog zum quasistatischen Normzugversuch definiert werden, um die erhaltenen Materialkennwerte besser mit einander vergleichen zu können.

Da eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nur dann möglich ist wenn die Prüfbedingungen genau definiert sind, sind hier die wichtigsten Parameter, wie Prüfklima, Vorspannkraft, Einspannlänge, Prüfgeschwindigkeit und verwendete Einspannklemmen, festgelegt worden. Die unten vorgeschlagenen Prüfbedingungen zu Prüfklima, Lagerung und Vorspannkraft beruhen auf den in der Norm DIN EN ISO 2062 bzw. ISO 139 vorliegenden Angaben und die vorgeschlagenen Prüfbedingungen bezüglich Prüfgeschwindigkeit und Einspannlänge sind Ergebnis der Versuchsvorliegenden Arbeit:

- Prüfklima; Temperatur:  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , relative Luftfeuchte:  $65\% \pm 2\%$ ,
- Lagerzeit und Lagerklima; 24-stündige Lagerung bei Temperatur  $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  und relative Luftfeuchte  $65\% \pm 2\%$ ,
- Vorspannkraft:  $0,5\text{ cN/tex} \pm 0,1\text{ cN/tex}$ ,
- Einspannlänge: 500 mm bis 125 mm,
- Prüfgeschwindigkeit: beliebig, je nach Realisierung der gewünschten Dehnrates,
- Einspannklemmen; sehr leichte Klemmen, die einen genügenden Spanndruck, während der gesamten Prüfung konstant halten und bei denen die Messproben durch Quetschen an den Einspannstellen nicht beschädigt werden.

Des Weiteren wurden in dieser Arbeit drei Garnvarianten untersucht. Grundsätzlich muss aber davon ausgegangen werden, dass sich Garne aus unterschiedlichen Materialien und Feinheiten anders verhalten. Daher sind zum Aufbau einer Datenbank weitere Untersuchungen notwendig, die den Einfluss des Materials und der Herstellung (Garnfeinheit, Filamentzahl, Vorbehandlungen mit Temperatur, Veredlung...) mit einschließen.

Diese unter dynamischen Bedingungen ermittelte Materialkennwerte sind gute Ausgangswerte für:

- die Simulation des dynamischen Verhaltens von Fasern bzw. Garnen bei der Herstellung von Textilien (z.B. 3D Textilien),
- die Auslegung von Textilien für technische Anwendungen (Airbag, Sicherheitsgurt, Schutzkleidung),
- die Auslegung von Verbundmaterialien und
- die Untersuchung von Strukturverhalten- und Strukturversagen unter Crashbelastung.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Bahners Thomas. *Untersuchung des visko-elastischen Verhaltens technischer Garne bei Kurzzeitbeanspruchungen mit hoher Dehnungsgeschwindigkeit*, Schlussbericht. Krefeld, 2011.
- [2] Bauer Albrecht, Schulze R. D., Bodor G. Zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften von Polymeren. *Acta Polymerica* (1984), Vol. 35, No. 3, S. 231-236.
- [3] Beier Manfred, Schollmeyer Eckhard. Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern bei kurzzeitiger Zugbeanspruchung, 1. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* (1989), Vol. 168, No. 2720, S. 37-52.
- [4] Beier Manfred, Schollmeyer Eckhard. Mechanische Eigenschaften von Polyesterfasern bei kurzzeitigen Zugbeanspruchung, 2. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie* (1989), Vol. 168, No. 2721, S. 53-79.
- [5] Berg Hans. Leistungsfähigkeit von Fasern und die dafür verantwortlichen Strukturelemente. *Lenzinger Berichte* (1987), No. 62, S. 13-28.
- [6] Blazynski Tadeusz Zdzislaw. *Materials at high strain Rates*. London: Elsevier, 1987.
- [7] Blumenauer Horst. *Werkstoffprüfung. 6., stark überarbeitete und erweiterte Auflage*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig; Stuttgart, 1994.
- [8] Bobeth Wolfgang. *Textilprüfung*, 4. Lehrbrief-Unveränderter Nachdruck. Berlin: VEB Verlag Technik Berlin, 1967.
- [9] Brameshuber Wolfgang, Banholzer Björn, Gries Thomas, Al-Masri Ali. Methode zur Untersuchung des Versagensmechanismus unter Zugbelastung von Multifilament-Garnen für Betonbewehrung. *Technische Textilien* (2002), Vol. 45, No. 2, S. 98-99.
- [10] Brauch Wolfgang, Dreyer Hans-Joachim, Haacke Wolfhart. *Mathematik für Ingenieure*, 11. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2006.
- [11] Chawla Krishan Kumar. *Fibrous materials*. Cambridge: Cambridge university press, 1998.
- [12] DE 690 31 559 T2. *Fasertestverfahren*. Deutsches Patentamt, 1998.

- [13] DIN EN 139. Textilien - Normalklimate für die Probenvorbereitung und Prüfung DIN (ISO 139:2005). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 2005.
- [14] DIN EN ISO 2060. Textilien – Garne von Aufmachungseinheiten, Bestimmung DIN (ISO 2060:1994). Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1995.
- [15] DIN EN ISO 2062. Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1995.
- [16] DIN 53 816. Einfacher Zugversuch an einzelnen Fasern in klimatisiertem oder nassem Zustand. Deutsches Institut für Normung e. V., Berlin, 1976.
- [17] Dong Joo Kim. Strain rate effect on high performance fiber reinforced cementitious composites using slip hardening high strength deformed steel fibers: Dissertation. Michigan: The University of Michigan, 2009. URL: [http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/62226/1/kdjoo\\_1.pdf](http://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/2027.42/62226/1/kdjoo_1.pdf) [12.8.2010].
- [18] Elices Manuel, Llorca Javier. *Fiber fracture*. Gulf professional publishing, 2002.
- [19] EP 0 899 555 B1. *Verfahren zur Bestimmung der Festigkeitseigenschaften von langgestrecktem, textilem Prüfgut und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens*. Europäisches Patentamt, Paris, 1998.
- [20] Finckh Hermann. Hochgeschwindigkeits- Zugprüfung an technischen Garnen. Zwick/Roell, 1. Textil Symposium. Ulm, 2011.
- [21] Furter Richard. Heutige Möglichkeiten der Qualitätssicherung mittels Gleichmäßigkeits- und Zugprüfungen. *Lenzinger Berichte* (1984), No. 56, S. 8-15.
- [22] Geitel Karlheinz. Beitrag zur Dehnungsermittlung bei kleinen Einspannlängen. *Faserforschung und Textiltechnik* (1959), Vol. 10, No. 5, S. 204-208.
- [23] Geršak Jelka. Study of the yield point of the thread. *International journal of clothing science and technology* (1998), Vol.10, No. ¾, S. 244-251.
- [24] Gunnarsson Allan C., Weerasooriya Tusit, Moy Paul. The Effect of Loading Rate on the Tensile Behavior of Single Zylon Fiber. Tom Proulx (Ed). *Dynamic Behavior of Materials, Volume 1*. Proceedings of the 2011 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. Berlin: Springer New York, 2011, S. 195-204.
- [25] Gwinn Kenneth W., Totten John J., Wayne Donald E. High strain-rate testing of parachute materials [Word Wide Web]. Conference: 13. Aerodynamics decelerator

- systems technology conference, Clearwater, FL (United States), 1995.  
URL: <http://www.osti.gov/bridge/purl.cover.jsp?purl=/52821-wOrvAj/webviewable/>  
[10.5.2010].
- [26] Hättenschwiler P., Pfeiffer R., Schaufelberger J. *Melliand Textilberichte* (1984).
- [27] Hearle J. W. S. *High-performance fibres*. Cambridge: Woodhead publishing, 2001.
- [28] Hearle J.W.S., Lomas B., Cook W.D. *Atlas of fibre fracture and damage to textiles*. Cambridge: Woodhead & The Textile Institute, 1998.
- [29] Hoffmann Jörg. *Taschenbuch der Messtechnik, 6. Auflage*. Fachbuchverlag Leipzig, 2010.
- [30] Jaap Schijve. *Fatigue of structures and materials*, Second edition. Springer Netherlands, 2008.
- [31] Jaeyoung Lim, Weinong W. Chen. Dynamic small strain measurements of Kevlar® 129 single fibers with a miniaturized tension Kolsky bar. *Polymer testing* (2010), Vol. 29, No. 6, S. 701-705.
- [32] Jesse Frank, Curbach Manfred. Strength of continuous AR-glass fibre reinforcement of cementitious composites. *High Performance Fibre Reinforced Cement Composites (HPRCC4)*, Workshop, Ann Arbor, USA, 2003, S. 337-348.
- [33] Jianwen Liu. Untersuchung von Verbundwerkstoffen mit Basalt- und PBO-Fasern-Verstärkung: Dissertation. Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden, 2008.
- [34] Juilfs J. Zur Bestimmung der Reißlast (Zugfestigkeit) von Fasern, Fäden und Garnen. *Melliand* (1956), Vol. 37, S. 1376-1380.
- [35] Keuerleber Martin. Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Kunststoffen bei hohen Dehnraten am Beispiel von PP: Dissertation. Stuttgart: Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart, 2006.
- [36] Kuna Meinhard. *Numerische Beanspruchungsanalyse von Rissen: Finite Elemente in der Bruchmechanik*, 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2010.
- [37] Languerand D. L., Zhang Haitao. Murthy N. S., Ramesh T. Kaliat, Sansoz Frederic. Inelastic behavior and fracture of high modulus polymeric fiber bundles at high strain-rates. *Materials Science and Engineering A* 500, (2009), S. 216-224.

- [38] Lim Jaeyoung, Zheng Q. James, Masters Karl, Chen W. Weinong. Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers. *International journal of impact engineering* (2011), Vol. 38, No. 4, S. 219-227.
- [39] Lim Jaeyoung, Zheng Q. James, Masters Karl, Chen W. Weinong. Mechanical behavior of A265 single fibers. *Journal of Materials Science* (2010), Vol. 45, S. 652-661.
- [40] Loy Walter. *Chemiefasern für technische Textilprodukte*. Frankfurt am Main: Deutscher Fachverlag GmbH, 2001.
- [41] Lund R. Jay, Byrne P. Joseph. Leonardo da Vinci's tensile strength tests: Implications for the discovery of engineering mechanics. *Civil Engineering and Environmental Systems*, June 2001, Vol. 18, S. 243-250.
- [42] Martin Heino. Die Reißfestigkeit von Textilfäden bei verschiedenen Dehnungsgeschwindigkeiten. *Faserforschung und Textiltechnik* (1959), Vol. 10, No. 8, S. 371-376.
- [43] Maurer Gerhard. Schnellzugversuche an Kunststoffen. Zwick/Roell: 14. Fachmesse für Prüftechnik, 2005.
- [44] Meyers Marc A. *Dynamic behavior of materials*. Wiley-IEEE, 1994.
- [45] Morton William Ernst, Hearle W.S. John. *Physical properties of textile fibres*, Fourth edition. Cambridge: Woodhead publishing limited, 2008.
- [46] Nechwatal Axel, Mieck Klaus-Peter, Reußmann Thomas. Developments in the characterization of natural fibre properties and in the use of natural fibres for composites. *Composites science and technology* (2003), Vol. 63, No.9, S. 1273-1279.
- [47] Nechwatal Axel, Reußmann Thomas, Mieck Klaus Peter, Nicolai Monika. Möglichkeiten zur Erhöhung des Elastizitätsmoduls von Lyocellfasern durch die Kombination von Vernetzungs- und Verstreckungsprozessen. *Lenzinger Berichte* (2001), No. 80, S. 22-27.
- [48] Pospischil Himmelreich Otto. *Prüfmethoden für die Labors der Textilindustrie: 3. überarb. und erw. Auflage*. Leipzig: fv VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1975.
- [49] Prevorsek Dušan Ciril. *Visokozmogljiva vlakna iz gibkih polimerov: teorija in tehnologija*. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, 1998.
- [50] Prevorsek Dušan Ciril, J. E. Field. Strain rate effects in ultrastrong polyethylene fibers and composites. *Applied polymer symposium* (1991), Vol. 47, S. 45-66.



- [51] Produktkatalog von Uster URL: <http://www.uster.com/UI/textile-TENSOJET-4-2-313.aspx> [29.11.2010].
- [52] Ramesh K. T. High strain rate and impact experiments. W. N. Sharpe (Ed.), *Springer handbook of experimental solid mechanics*, 2008, Part D/33, S. 929-959.
- [53] Reumann Ralf-Dieter. *Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik*. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [54] 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.
- [55] Schael I. Ermittlung von mechanischen Eigenschaften aus dem Hochgeschwindigkeitszugversuch unter Verwendung der Auswerte-Software „Hyper-Speed<sup>®</sup>“. *Roell Amsler Symposium 2000: Word of dynamic testing, Gottmadingen, 15-19.5.2000*. Aachen: Verlag Mainz, 2000, S. 153-160.
- [56] Schoßig M., Bierögel C., Grellmann W., Bardenheier R., Mecklenburg T. Effect of Strain Rate on Mechanical Properties of Reinforced Polyolefins. In: *E. E. Gdoutos (Ed.): Fracture of Nano and Engineering Materials and Structures. Proceedings of European Conference of Fracture (ECF 16)*, Alexandroupolis, Greece, July 3-7, 2006, S. 507-508.
- [57] Schuler Harald. *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Schädigung von stoßbeanspruchtem Beton*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag, 2004. URL: <http://137.193.200.177/ediss/schuler-harald/inhalt.pdf> [07.04.2011].
- [58] Schulze F. Gebhardt. Zur Dehnungsabhängigkeit des E-Moduls verstreckter Polyamid-6-Fäden. *Kolloid Zeitschrift und Zeitschrift für Polymere* (1970), Vol. 236, No. 1, S. 19-30.
- [59] Schürmann Helmut. *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden: 2.*, bearbeitete und erweiterte Auflage. Leipzig: Springer-verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [60] Seidt Jeremy D., Matrka Thomas A., Gilat Amos, McDonald Gabriel B. S. Tensile Behavior of Kevlar 49 Woven Fabrics over a Wide Range of Strain Rates. Tom Proulx (Ed). *Dynamic Behavior of Materials, Volume I*. Proceedings of the 2011 Annual Conference on Experimental and Applied Mechanics. Berlin: Springer New York, 2011, S. 187-194.

- [61] Sippel Arnulf. Zur Abhängigkeit der Reißfestigkeit von Fäden von der Einspannlänge. *Faserforschung und Textiltechnik* (1959), Vol. 10, No. 8, S. 369-371.
- [62] Sirichaisit Jutarat, Young J. Robert. Tensile and compressive deformation of polypyridobisimidazole (PIPD)- based 'M5' rigid-rod polymer fibres. *Polymer* (1999), Vol. 40, S. 3421-3431.
- [63] Smith Jack C., McCrackin Frank L., Schiefer Herbert F. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. *Textile research journal* (1955), Vol. 25, No. 8, S. 701-708.
- [64] Smith Jack C., McCrackin Frank L., Schiefer Herbert F., Stone Walter K., Towne Kathryn M. Stress-strain relationships in yarns subjected to rapid impact loading. *Textile research journal* (1956), Vol. 26, No.11, S. 821-828.
- [65] Stegmaier Thomas, Finckh Hermann, Schweizerhof Karl. Entwicklung extrem leichter durchstichfester bzw. schussfester Schutzkleidung mit Hilfe der rechnergestützten Simulation: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben AiF 12813 N. Denkendorf: Institut für Textil- und Verfahrenstechnik Denkendorf, 2005.
- [66] 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.
- [67] Šajn Gorjanc Dunja, Bukošek Vili. The behavior of fabric with elastane yarn during stretching. *Fibre & textiles in Eastern Europe* (2008), Vol. 16, No. 3, S. 63-68.
- [68] Wang Yang, Yuanming Xia, Jiang Yuxi. Tensile behaviour and strength distribution of polyvinyl-alcohol fibre at high strain rates. *Applied Composite Materials* (2001), Vol. 8, No. 5, S. 297-306.
- [69] Wang Zhen, Yuanming Xia. Experimental evaluation of the strength distribution of fibers under high strain rates by bimodal Weibull distribution. *Composites Science and Technology* 57 (1997), S. 1599-1607.
- [70] Wang Zhen, Yuanming Xia, Yang Baochang. A statistical model and experimental study of the strain rate and temperature dependence of the strength of fibers. *Applied composite materials* 3 (1996), S. 89-101.
- [71] Wen Huang, Wei Xu, Yuanming Xia. Effect of strain rate on the mechanical behaviors of SiC fiber. *Journal of Materials Science* (2005), Vol. 40, S. 465-468.

- [72] Werner Dietrich. Vom Ski zur Tragfläche Technische Hochleistungsfasern im Einsatz. *Physik in unserer Zeit* (1995), Vol. 26, No. 1, S. 35-40.
- [73] Winkler Friedrich, Bauer Albrecht. Dynamische Zugprüfung von Fäden. *Faserforschung und Textiltechnik* (1968), Vol. 19, No. 6, S. 278-284.
- [74] Xiao Xinran, Leach Matt. *Intermediate and high strain rate tensile testing of plastic materials*. URL: <http://sem-proceedings.com/05s/sem.org-2005-SEM-Ann-Conf-s021p5-Intermediate-High-Strain-Rate-Tensile-Testing-Plastic-Materials.pdf> [15.04.2011].
- [75] Xiong Jie, Gu Bo-hong, Wang Shan-yuan. Tensile properties of fiber materials under different strain rates. *Journal of Dong Hua University, 2002 (Eng. Ed.)*, Vol. 19, No. 2, S. 54-58.
- [76] Yang Wang, Yuanming Xia. Dynamic tensile properties of E-glass, Kevlar49 and polyvinyl alcohol fiber bundles. *Journal of materials science letters* (2000), Vol. 19, No.7, S. 583-586.
- [77] Yves Termonia, Paul Meakin, Paul Smith. Theoretical study of the influence of the molecular weight on the maximum tensile strength of polymer fibres. *Macromolecules* (1985), Vol. 18, No. 11, S. 2246-2252.
- [78] Zhou Yuanxin, Jiang Dazhi, Xia Yuanming. Tensile mechanical behaviour of T300 and M40J fiber bundles at different strain rate. *Journal of materials science* 36 (2001), S. 919-922.
- [79] Zhu Deju, Mobasher Barzin, Rajan Subramanian D. Dynamic tensile testing of Kevlar 49 fabrics. *Journal of materials in civil engineering* (2011), Vol. 23, No. 3, S 230-239.
- [80] Zhu Deju, Mobasher Barzin, Rajan Subramanian D. High strain rate testing of Kevlar 49. *Society for experimental mechanics, 11th international congress and exposition on experimental and applied mechanics* (2008), Orlando, 2-5 Juni 2008, S. 34-35.
- [81] Zwick GmbH & Co KG. Betriebsanleitung, *Bediener-Handbuch für die Materialprüfmaschine Z 010* (1999).
- [82] Zwick GmbH & Co KG. *Prüfmaschine und Prüfsysteme für Kunststoffe und Gummi*.
- [83] Zwick GmbH & Co KG. URL: <http://www.zwick.de/de/produkte.html> [31.03.2011].
- [84] Zwick GmbH & Co KG. *Zwick Materialprüfung*.

- [85] Zwick GmbH & Co KG. Zwick Technische Dokumentation, *Betriebsanleitung HTM 2020*, 2008.
- [86] Žiberna Šujica Milena, Sfiligoj Smole Majda. Structure – mechanical properties relationship of poly(ethylene terephthalate) fibres. *Journal of applied polymer science* (2003), Vol. 89, No. 12, S. 3383-3389.

## ŽIVLJENJEPIS

Ime, priimek: Lidija Gomboc  
Naziv: univ. dipl. inž.teks.  
Datum rojstva: 07. januar 1980  
Nacionalnost: Slovenska  
Kontakt: E-Mail: [gomboc.lidija@gmail.com](mailto:gomboc.lidija@gmail.com)

### ŠOLANJE

- 2006 Podiplomski magisterski študij  
*Študijski program tekstilna tehnologija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo*
- 2003 – 2006 Diplomsko delo univerzitetnega študija: Razvoj oblačilnih izdelkov za individualno proizvodnjo  
*Študijski program tekstilstvo, smer inženirski management, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo*
- 1999 – 2003 Diplomsko delo visokošolskega študija: Krojilni avtomat Bullmer PROCUT  
*Visokošolski študijski program tekstilstvo, smer konfekcijska tehnologija, Univerza v Mariboru, Fakulteta za strojništvo*
- 1997 – 1999 Konfekcijski tehnik  
*SSTŠ Murska Sobota*

## DELOVNE IZKUŠNJE

- 2002 – 2003      6 mesečna strokovna praksa v podjetju Mura, European Fashion Design, Proizvodnja oblačil d.d., Murska Sobota
- 2008              znanstveni sodelavec na inštitutu TITK (Thüringisches Institut für Textil- und Kunststoff –Forschung), Rudolstadt, Nemčija

## RAZISKOVALNO DELO - SODELOVANJE V PROJEKTIH

- *Untersuchung des visko-elastischen Verhaltens technischer Garne bei Kurzzeitbeanspruchungen mit hoher Dehnungsgeschwindigkeit*, čas trajanja projekta: 01.12.2008 – 29.2.2011.
- *Versagensverhalten dynamisch belasteter Nahtsysteme bei Hochgeschwindigkeitbeanspruchung*, čas trajanja projekta: 01.01.2011 – 31.12.2012.
- *Werkstoff- und Verfahrensentwicklung zur Herstellung von Leder-Verbundteilen in One Step Prozess*, čas trajanja projekta: 01.01.2010 – 31.12.2011.

## DODATNA IZOBRAŽEVANJA

- 16.03.2011      udeležba na šolanju za program TestXpert II v Dresdnu
- 27.01.2011      udeležba na tekstilnem simpoziju podjetja Zwick GmbH & Co. KG v Ulm-u, z delavnicami
05. – 16.03.2008      Univerza v Budimpešti; The Research of Asymmetric Behaviour of Complex Textile Structures, slovensko-madžarski bilaterarni znanstveno-raziskovalni project