



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Kemal Barmaksiz

# **Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Reibungs- und Elastizitätseigenschaften von Materialien auf Basis von Kautschukpolymeren im Tischtennissport**

**Kemal Barmaksiz**

**Entwicklung einer Messmethodik zur  
Bestimmung der Reibungs- und  
Elastizitätseigenschaften von Materialien  
auf Basis von Kautschukpolymeren im  
Tischtennissport**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau Entwicklung und Konstruktion  
am Department Maschinenbau und Produktion  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Erik Kuhn  
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Thomas Rieling

Abgabedatum: 25.07.2019

# **Zusammenfassung**

**Kemal Barmaksiz**

## **Thema der Bachelorthesis**

Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Reibungs- und Elastizitätseigenschaften von Materialien auf Basis von Kautschukpolymeren im Tischtennisport

## **Stichworte**

Tribologie, Rheologie, Tischtennisschläger-Beläge, Rotation, Reibung, Elastizität

## **Kurzzusammenfassung**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit werden die Reibungs- und Elastizitätseigenschaften verschiedener Tischtennisschläger-Beläge am Rheometer systematisch untersucht. Zunächst werden die theoretischen Grundlagen entwickelt, auf denen die experimentellen Untersuchungen basiert. Das Reibungs- und Elastizitätsverhalten der Beläge wird mithilfe von Rotations-, Frequenz- und Druckversuchen beschrieben. Während der Tests werden die Daten aufgezeichnet und miteinander verglichen.

**Kemal Barmaksiz**

## **Title of the paper**

Development of a measurement methodology for the determination of friction and elasticity properties of materials based on rubber polymers in table tennis.

## **Keywords**

tribology, rheology, table tennis racket coverings, rotation, friction, elasticity

## **Abstract**

In the context of this bachelor thesis, the friction and elasticity properties of different table tennis bats are systematically investigated on the rheometer. The first step is to develop the theoretical foundations on which the experimental investigations are based. The friction and elasticity behaviour of the linings is described by means of rotation, frequency and pressure tests. During the tests, the data is recorded and compared.

## **Vorwort**

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mich bei der Erstellung und der Ermöglichung dieser Abschlussarbeit unterstützt haben.

Besonders bedanke ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Kuhn für die interessante Aufgabenstellung und die kompetente Betreuung und Unterstützung.

Ebenfalls bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. T. Rieling, der mir bei den Versuchsdurchführungen geholfen hat und sich für meine Fragen und Anregungen stets Zeit genommen hat. Seine hilfreichen Ratschläge und wertvollen Hinweise während meiner Tätigkeit im Labor für Maschinenelemente und Tribologie der HAW-Hamburg trugen dazu bei, dass diese Abschlussarbeit zustande kommen konnte.

Abschließend kommt ein großer Dank an meine Familie, die mich während meiner Studienzeit sowie der Abschlussarbeit durch ihre Ratschläge und Motivation unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	I
Tabellenverzeichnis.....	III
Symbolverzeichnis .....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Zielsetzung der Arbeit .....	2
3 Grundlagen zum Tischtennis .....	3
3.1 Geschichte.....	3
3.2 Historie.....	4
3.3 Der Tischtennisschläger-Belag .....	5
3.3.1 Die Revolution des Materials .....	5
3.3.2 Aufbau und Unterschied heutiger Beläge.....	6
3.4 Marktübersicht .....	7
4 Grundlagen der Tribologie .....	8
4.1 Definition und Aufgabe der Tribologie.....	8
4.2 Tribologisches System .....	9
4.3 Reibung.....	10
4.3.1 Reibungsarten.....	10
4.3.2 Reibungszustände.....	11
4.3.3 Reibungsmessgrößen .....	13
4.3.4 Reibungsmechanismen.....	14
5 Grundlagen der Rheologie .....	17
5.1 Definition und Aufgabe der Rheologie .....	17
5.2 Rheologische Grundbegriffe.....	17
5.2.1 Schubspannung (Scherspannung) .....	18
5.2.2 Scherdeformation .....	18
5.2.3 Scherrate .....	18
5.2.4 Viskosität .....	18
5.3 Rheologisches Modell .....	19

5.3.1	Ideale Elastizität .....	19
5.3.2	Ideale Viskosität .....	20
5.3.3	Ideale Plastizität .....	21
6	Versuchsaufbau und Versuchsvorbereitung.....	23
6.1	Das Rheometer MCR 300 bzw. MCR 302 .....	23
6.1.1	Spezifikationen .....	24
6.1.2	Messgeometrien.....	25
6.2	Verwendete Tischtennisschläger-Beläge.....	28
7	Versuche .....	30
7.1	Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit) .....	30
7.1.1	Versuchsbeschreibung.....	30
7.1.2	Versuchsparameter .....	30
7.1.3	Durchführung des Rotationsversuchs.....	30
7.1.4	Ergebnisse des Rotationsversuchs .....	33
7.2	Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Temperatur).....	35
7.2.1	Versuchsbeschreibung.....	35
7.2.2	Versuchsparameter .....	35
7.2.3	Durchführung des Rotationsversuchs.....	35
7.2.4	Ergebnisse des Rotationsversuchs .....	38
7.3	Frequenzversuch.....	40
7.3.1	Versuchsbeschreibung.....	40
7.3.2	Vorversuch Amplitudentest .....	40
7.3.3	Versuchsparameter .....	42
7.3.4	Durchführung des Frequenzversuchs.....	42
7.3.5	Ergebnisse des Frequenzversuchs .....	45
7.4	Schubmodul in Abhängigkeit von der Temperatur.....	47
7.4.1	Versuchsbeschreibung.....	47
7.4.2	Versuchsparameter .....	47
7.4.3	Durchführung des Temperaturversuchs .....	47
7.4.4	Ergebnisse des Temperaturversuchs .....	50

7.5	Druckversuch.....	52
7.5.1	Versuchsbeschreibung.....	52
7.5.2	Versuchsparameter.....	52
7.5.3	Durchführung des Druckversuchs.....	52
7.5.4	Ergebnisse des Druckversuchs.....	56
8	Interpretation der durchgeführten Versuche.....	58
9	Fazit / Ausblick.....	61
10	Literaturverzeichnis.....	62
	Anhang: Messschriebe.....	64
A.1.	Messschriebe Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit).....	64
A.2.	Messschriebe Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur).....	73
A.3.	Messschriebe Frequenzversuch.....	76
A.4.	Messschriebe Schubmodul in Abhängigkeit der Temperatur.....	85
A.5.	Messschriebe Druckversuch.....	94
	Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit.....	108

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Tischtennis Geschichte, Linien wie beim Tennis [2] .....	3
Abbildung 4.1: Tribotechnisches System und seine Einflussgrößen [10] .....	9
Abbildung 4.2: Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik („Reibungsdreieck“) [9] ...	11
Abbildung 4.3: Reibungszustände und Reibungsbegriffe eines tribologischen Systems [9]..	13
Abbildung 4.4: Vereinfachte Illustration der grundlegenden Reibungsmechanismen [10].....	15
Abbildung 5.1: Fließeigenschaft einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche [12] .....	18
Abbildung 5.2: Hooke-Element [16] .....	20
Abbildung 5.3: Newton-Element [16] .....	21
Abbildung 5.4: St.-Venant-Modell [16] .....	21
Abbildung 6.1: Rheometer MCR 300 .....	23
Abbildung 6.2: Rheometer MCR 302 .....	23
Abbildung 6.3: Tribologie Messzelle T-PID/44 .....	25
Abbildung 6.4: T-PID/44 Unterseite .....	26
Abbildung 6.5: T-PID/44 Oberseite .....	26
Abbildung 6.6: Platte-Platte Messsystem PP25 .....	27
Abbildung 6.7: Artengo 702 O (alt) .....	28
Abbildung 6.8: Evolution FX-P (alt) .....	28
Abbildung 6.9: Evolution FX-P (neu) .....	29
Abbildung 6.10: Flexxon soft (neu) .....	29
Abbildung 6.11: Proton Neo 325 (alt) .....	29
Abbildung 6.12: Thunderball (neu) .....	29
Abbildung 7.1: Messprofil Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit) .....	31
Abbildung 7.2: Abschnitt 2, Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit) .....	32
Abbildung 7.3: Datenaufzeichnung Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit) .....	33
Abbildung 7.4: Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit) .	34
Abbildung 7.5: Messprofil Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur) .....	36
Abbildung 7.6: Abschnitt 3, Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur) .....	37
Abbildung 7.7: Datenaufzeichnung Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur) .....	38



Abbildung 7.8: Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Temperatur) .....	39
Abbildung 7.9: Frequenztest (mit Deformationsvorgabe) [20].....	40
Abbildung 7.10: Amplitudentest (mit Deformationsvorgabe) [21].....	41
Abbildung 7.11: Amplitudentest Flexxon soft .....	41
Abbildung 7.12: Messprofil Frequenzversuch .....	43
Abbildung 7.13: Abschnitt 2, Frequenzversuch .....	44
Abbildung 7.14: Datenaufzeichnung Frequenzversuch .....	45
Abbildung 7.15: Frequenzversuch .....	46
Abbildung 7.16: Messprofil Temperaturversuch .....	48
Abbildung 7.17: Abschnitt 2, Temperaturversuch .....	49
Abbildung 7.18: Datenaufzeichnung Temperaturversuch .....	50
Abbildung 7.19: Temperaturversuch.....	51
Abbildung 7.20: Messprofil Druckversuch .....	53
Abbildung 7.21: Abschnitt 2, Druckversuch .....	54
Abbildung 7.22: Belastung des Materials .....	55
Abbildung 7.23: Entlastung des Materials .....	55
Abbildung 7.24: Druckversuch bei 20°C .....	56
Abbildung 7.25: Druckversuch bei 20 bzw. 40 °C .....	57
Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Änderung der Struktur eines Elastomers bei Dehnung [22].....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 4.1: Reibungszahlen unterschiedlicher Reibungsarten und -zustände [9].....	14
Tabelle 6.1: Technische Daten des Rheometers MCR 302 [18].....	24
Tabelle 6.2: Verwendete Tischtennisschläger-Beläge mit den dazugehörigen Eigenschaften .....	28

## Symbolverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Bezeichnung
$\mu ; f$	[---]	Reibungszahl
$\eta$	[Pa·s]	dynamische Viskosität
$\nu$	[mm <sup>2</sup> /s]	kinematische Viskosität
$\tau$	[Pa; N/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung
$\gamma$	[---]	Scherdeformation
$\omega$	[rad/s]	Winkelgeschwindigkeit
$\dot{\gamma}$	[1/s]	Scherrate
$\rho$	[kg <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ]	Dichte
$\varepsilon$	[---]	Deformation
$\dot{\varepsilon}$	[1/s]	Deformationsgeschwindigkeit
$\sigma$	[Pa; N/m <sup>2</sup> ]	Spannung
$\sigma_F$	[Pa; N/m <sup>2</sup> ]	Fließgrenze
$E$	[Pa; N/m <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul
$n$	[1/s]	Drehzahl
$T$	[°C]	Temperatur
$v_s$	[mm/s]	Gleitgeschwindigkeit
$F_R$	[N]	Reibungskraft
$F_N$	[N]	Normalkraft
$M_R$	[N·m]	Reibungsmoment
$A_R$	[J; N·m]	Reibungsarbeit
$s_R$	[m]	Reibungsweg
$F$	[N]	Scherkraft
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Scherfläche
$s$	[m]	Auslenkung
$h$	[m]	Spalthöhe
$v$	[m/s]	Geschwindigkeit
$G'$	[MPa]	Speichermodul

$G''$	[MPa]	Verlustmodul
$ G^* $	[kPa]	Schubmodul

## 1 Einleitung

Schon seit Jahrhunderten befasst sich die Menschheit mit dem Thema der Tribologie und weist ihr eine wesentliche wirtschaftliche Bedeutung zu. Sie umfasst die Teilgebiete Reibung, Verschleiß und Schmierung. Die Tribologie beschäftigt sich mit der wissenschaftlichen Beschreibung der Reibung, der Berechnung und Messung von Reibungskoeffizienten, dem Verschleiß und der erforderlichen Schmierung zwischen aufeinander einwirkenden, in Relativbewegung befindlichen Oberflächen.

In der Technik sind Reibungs- und Verschleißphänomene meist unerwünschte Erscheinungsformen, da sie über die Standzeiten von Maschinen und Anlagen bestimmen. Es gibt jedoch auch Anwendungsbereiche, in denen Reibung erwünscht ist. Dazu gehört beispielsweise eine gute Haftung der Reifen auf der Straße oder eine größtmögliche Reibung zwischen Bremsbacken und Bremsscheibe.

Aber nicht nur in der Technik, sondern auch in einigen Sportarten wie dem Tischtennis spielt die Reibung eine entscheidende Rolle. Eines der wichtigsten Produktionsziele in diesem Bereich ist es, Schlägerbeläge mit hohem Grip und damit hohen Reibungseigenschaften zu entwickeln, um den Ball leichter in Rotation zu versetzen. Um diese tribologischen Eigenschaften besser verstehen zu können, ist es oft hilfreich, auch die rheologischen Eigenschaften eines Stoffes zu kennen.

## 2 Zielsetzung der Arbeit

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, die Reibungs- und Elastizitätseigenschaften verschiedener Tischtennisschläger-Beläge am Rheometer systematisch zu untersuchen und die ermittelten Ergebnisse darzustellen.

**Folgende Teilaufgaben sind im Rahmen dieser Bachelorarbeit zu bearbeiten:**

- Marktanalyse zu den Belagmaterialien für Tischtennisschläger
- Einarbeitung in die Tribologie
- Einarbeitung in die Rheologie
- Analyse des Tribosystems
- Festlegung der zu bestimmenden Messgrößen
- Vergleich mit vorhandenen Prüfmethoden
- Korrelationen zu aktuellen Angaben aus Produktinformationen
- Aussicht auf weiterführende Projekte

In den Kapiteln 3 bis 5 werden zunächst die theoretischen Grundlagen behandelt. Zunächst wird auf das Thema Tischtennis, insbesondere auf die Schlägerbeläge, eingegangen, dann werden die Tribologie und die Rheologie näher erläutert. In den Kapiteln 6 und 7 werden der Aufbau des Prüfstandes und die Durchführung der Tests mit den entsprechenden Ergebnissen beschrieben. Schließlich werden die durchgeführten Versuche interpretiert und ein Fazit bzw. ein Ausblick für zukünftige Projekte gegeben.

### 3 Grundlagen zum Tischtennis

#### 3.1 Geschichte

Zur Herkunft des Tischtennissports gibt es unterschiedliche Meinungen. Einige sehen die Anfänge am Ende des 19. Jahrhunderts in Indien, von wo aus sich der Sport nach England ausbreitete, andere bestreiten dies und betrachten die Engländer als Erfinder, da der Sport dort 1874 erstmals schriftlich erwähnt wurde. Das Spiel entwickelte sich aus dem „normalen“ Tennis und wurde zunächst überwiegend vom englischen Adel im Freien gespielt. Wegen des für England bekannten Regenwetters wurde das Tennis-Spiel dann in die Räume verlegt. Dadurch wurde der Begriff Raum-Tennis geboren.

Wie in Abbildung 3.1 zu sehen ist, benutzte man dazu normale Esstische, man verlegte sozusagen das Tennisfeld auf den Tisch. Eine Schnur diente als „Netz“, als Schläger nahm man Federballschläger, Bücher oder sogar Bratpfannen. Gummibälle oder Korkbälle wurden als Tischtennisbälle verwendet. 1875 veröffentlichte der englische Ingenieur James Gibb die ersten Tischtennis-Regeln bzw. legte sie fest.

1891 kam die Zelluloidkugel ins Spiel, die James Gibb angeblich während einer Reise in die USA bei einem Händler entdeckt hatte. Von nun an verdrängte der Begriff Ping Pong, welcher das charakteristische, immer wiederkehrende Aufprallgeräusch des Balles auf Tisch und Schläger bezeichnet, zunehmend die Bezeichnung Raum-Tennis. Verschiedene Hersteller kreierten weitere Namen, wie zum Beispiel Gossima, Whiff Whaff oder Flim Flam, bis man schließlich auf den Namen Table Tennis kam. [1] [2]



Abbildung 3.1: Tischtennis Geschichte, Linien wie beim Tennis [2]

## 3.2 Historie

### Gründung von Verbänden, erste wichtige Veranstaltungen

Nach und nach wurden nationale und internationale Verbände gegründet:

- 1907 wurde die erste deutsche Meisterschaft im Kasino am Nollendorff-Platz in Berlin ausgetragen
- 1921 Gründung der „Table Tennis Association“ in England
- 1925 Gründung des Deutschen Tischtennis Bundes (DTTB) (25. November)
- 1925 Erste offizielle deutsche Meisterschaften im Herren- und Dameneinzel in Berlin
- 1926 Gründung des Österreichischen Tischtennis-Verbandes ÖTTV
- 1926 Internationale Tischtennisföderation ITTF in Berlin, gegründet von England, Schweden, Ungarn, Indien, Dänemark, Deutschland, der Tschechoslowakei, Österreich und Wales
- 1926 wurde die erste Europameisterschaft in London ausgetragen, die allerdings aufgrund der Beteiligung von einigen indischen Sportlern zu einer Weltmeisterschaft aufgewertet wurde. Für das Endspiel qualifizierten sich die beiden Ungarn Roland Jacobi und Zoltan Mechlovits. Jacobi war nach dem 3:0 Sieg der erste Tischtennisweltmeister.
- 1927 „La fédération française de tennis de table“ in Frankreich
- 1928 Erste Meisterschaft in Frankreich
- 1933 Der Kieler TTK wurde erster deutscher Mannschaftsmeister der Herren

### Weitere Entwicklung

Bis zum Zweiten Weltkrieg kamen die besten Tischtennispieler und -spielerinnen aus Ungarn, der Tschechoslowakei und Rumänien. Als der Tischtennisport seinen Einzug in Asien hielt, wurden China, Korea und Japan sehr schnell zur Übermacht im Tischtennis und lösten die Ungarn in den 50er-Jahren an der Weltspitze ab. In den nächsten 30 Jahren kamen fast alle Weltmeister aus Asien. Anfang der 1980er-Jahre konnten die Europäer mit der Hilfe neuer Techniken aufholen.

- 1949 Nach dem Zweiten Weltkrieg wurde am 29./30. Juli der DTTB in Bad Homburg wieder gegründet
- 1951 Am 11. März wurde der DTTB wieder in die ITTF aufgenommen
- 1958 Erste offizielle Europameisterschaft
- 1966/67 Deutsche Bundesliga für Herren
- 1972/73 Deutsche Bundesliga für Damen
- 1988 Tischtennis wurde offiziell olympische Sportart [1] [2]



### 3.3 Der Tischtennisschläger-Belag

Die wesentlichen Bestandteile eines Tischtennisschlägers sind der Griff, der Belag und das Holz des Blattes. Für einen Spieler ist die richtige Wahl des Schlägers von großer Bedeutung, weil er damit seine eigene Spielweise wirkungsvoll unterstützen kann. Der Schlägerbelag hat einen großen Einfluss darauf, mit welcher Geschwindigkeit und welcher Rotation (auch Spin oder Effet genannt) der Tischtennisball gespielt werden kann. [3]

#### 3.3.1 Die Revolution des Materials

Die ersten Schlägerbeläge bestanden aus Schweinehaut, Kork und Schmirgelpapier. 1902 wurde der erste Gummibelag mit Noppen erfunden. [2] Trotz der überzeugenden Spieleigenschaften des neuen Materials – vor allem der neue Katapulteffekt des Noppengummis ermöglichte eine deutlich stärkere Beschleunigung – dauerte es noch zwei Jahrzehnte, bis sich die Noppengummi-Beläge weltweit durchsetzen konnten. [4]

Knapp ein halbes Jahrhundert nach der Einführung des Noppengummis gab es die zweite Schlägerbelag-Revolution, deren Ursprung in Asien lag. Man beklebte die Schläger mit dicken Schaumstoffmatten, was das Spiel erheblich schneller machte. Durch unglaubliche Rotations- und Tempowerte wurden die Ballwechsel immer kürzer. Jedoch wurde der Sport durch das „Atom-Tischtennis“ zunehmend unattraktiver für die Zuschauer. 1959 verbot die ITTF die Verwendung von Schaumstoffgummi als Oberbelag, es darf seitdem nur noch als Unterlage verwendet werden. Darüber hinaus einigten sich die Verbände nach langen Diskussionen auf eine Begrenzung der Gesamtdicke des Schlägerbelags. Die Japaner, die in den 1950er-Jahren die dominierende Nation im Tischtennissport waren, schlugen sechs Millimeter vor, während die Europäer maximal drei Millimeter forderten. Schließlich führte die chinesische Vermittlung zur Festlegung der heute noch gültigen Grenze von vier Millimetern. [4]

In der Folgezeit setzten sich sogenannte „Sandwich-Beläge“ durch, die aus einer Schaumgummi-Unterlage sowie einer Oberschicht mit Noppen innen oder außen bestehen, die dritte und bis heute gültige bedeutende Revolution im Schlägersektor. [4]

### 3.3.2 Aufbau und Unterschied heutiger Beläge

Wie bereits erwähnt, bestehen die heutigen Beläge grundsätzlich aus einer Schwammunterlage sowie einer Oberschicht mit Noppen innen oder außen, wobei Noppen als Innenbeläge die meistgenutzten Schlägerbeläge sind. [3]

Das Obergummi muss laut den Tischtennis-Regeln zwingend rot oder schwarz sein und kann unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. [5] Mit Ausnahme von Anti-Spin-Belägen besitzen alle Beläge mit innenliegenden Noppen eine hohe Griffigkeit, um dem Ball bei verschiedenen Schlagtechniken Rotation zu verleihen. Bei den Belägen mit außenliegenden Noppen unterscheidet man zwischen kurzen und langen Noppen. Während Schläger mit langen Noppen ausschließlich für die Abwehr genutzt werden, werden Beläge mit kurzen Noppen hingegen von schnellen Block- und Kontra-Spielern genutzt. [3]

Die Schlägerbeläge haben einen unterschiedlichen Härtegrad. Dieser ist vor allem abhängig von der Härte und der Noppenausrichtung des Obergummis sowie vom Härtegrad des Schwammes. [6] Der Schwamm, den es in hart, mittel hart, weich und sehr weich gibt, ist in der Regel zwischen 1 und 2,1 mm dick. [7] Dieser beeinflusst immer indirekt das Tempo, die Ball-Kontrolle und den Katapult-Effekt. Je weicher ein Schwamm ist, desto langsamer ist der Schlägerbelag, aber umso mehr Kontrolle bietet er – das tiefere Eindringen des Balles beim Schlagen führt zu einem besseren Ballgefühl. Darüber hinaus ist es wesentlich einfacher, einen Spin zu erzeugen, und der erhöhte Eigenkatapult sorgt für ausreichendes Tempo ohne große Anstrengung. Je härter der Schwamm ist, desto direkter ist der Anschlag beim Treffen des Balles. Dies führt dazu, dass sauber ausgeführte Schläge viel präziser und mit mehr Tempo gespielt werden können. Kurze und schnell ausgeführte Bewegungen können den Ball perfekt beschleunigen, außerdem ist das Spin-Potenzial wesentlich größer. [6]

Um einen Überblick über einen Schlägerbelag zu bekommen, werden ihm normalerweise Werte wie Tempo, Kontrolle und Spin bis maximal 100 (selten auch über 100) zugeordnet. Aus diesen Werten kann sich jeder Tischtennispieler durch eine Grobunterscheidung zwischen Defensiv, Allround und Offensiv die Beläge des Tischtennisschlägers zusammenstellen, die sich für seine Spielweise eignen. [5]

### 3.4 Marktübersicht

Bei ca. 50 Tischtennismarken und 20 bis 50 Belägen für Tischtennisschläger pro Marke haben die Spieler heutzutage eine sehr große Auswahl. Viele Spieler wählen unterschiedliche Beläge für die Vor- und Rückhand. Dies entspricht einer Auswahlmöglichkeit je Seite von 1000 bis 2500 Belägen. Hinzu kommen noch unterschiedliche Schwammdicken. Vor jeder Saison bringt nahezu jede Marke mindestens einen neuen Belag auf den Markt, sodass sich die Auswahl jährlich vergrößert. [5]

Zu den großen Tischtennismarken gehören zum Beispiel Andro, Butterfly, Donic, Gewo, Joola, Stiga und Tibhar. Viele dieser namhaften Marken lassen ihre Beläge hauptsächlich von der Firma ESN produzieren. ESN ist einer der weltweit größten Entwickler und Hersteller von Tischtennisschläger-Belägen für den Vereins- und Wettkampfsport und ausschließlich im B2B-Bereich (Business-to-Business) tätig.

Seit der Gründung Anfang der 1990er-Jahre stieg die Anzahl der Beschäftigten von drei auf heute rund 220 Mitarbeiter aus 15 Nationen. Am Unternehmensstandort in Hofheim in Unterfranken sind alle Abteilungen von der Forschung und Entwicklung über die Produktion bis hin zur Kundenbetreuung unter einem Dach vereint. Das Unternehmen wuchs stetig und eroberte schnell große Marktanteile. Nach eigenen Angaben benutzt weltweit schätzungsweise die Hälfte aller ambitionierten Tischtennisspieler Produkte mit Technologien von ESN. [8]

## 4 Grundlagen der Tribologie

### 4.1 Definition und Aufgabe der Tribologie

Die Tribologie ist nach DIN 50323 wie folgt definiert:

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung. Sie umfasst das Gesamtgebiet von Reibung und Verschleiß einschließlich Schmierung, und schließt entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten und Gasen ein.“

Die Grunddefinition der Tribologie wurde erst Mitte des 20. Jahrhunderts nach einer umfassenden Studie zur volkswirtschaftlichen Bedeutung von Reibung und Verschleiß folgendermaßen formuliert:

„Tribology is the science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices.“ [9]

Ins Deutsche übersetzt:

„Tribologie ist die Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Technologien und Verfahren.“ [9]

In der Ingenieurwissenschaft kann die Tribologie auch wie folgt definiert werden:

„Die Tribologie ist ein interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste.“ [9]

Der Begriff Tribologie leitet sich aus den griechischen Wörtern „tribein“ (reiben) und „logia“ (Lehre) ab und kann wörtlich als Reibungslehre übersetzt werden. Die Tribologie beschäftigt sich mit der wissenschaftlichen Beschreibung von Reibung, Verschleiß und Schmierung sowie der Entwicklung von Technologien zur Optimierung von Reibungsprozessen. Damit trägt die Tribologie zur Steigerung von Leistung und Effizienz, zur Verbesserung von Qualität, zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer, zur Einsparung von Energie und Materialien und damit zur Reduzierung der Umweltbelastung bei. [9]

## 4.2 Tribologisches System

Ein tribologisches System umfasst alle an einer tribologischen Beanspruchung beteiligten stofflichen Komponenten und Größen sowie ihre Eigenschaften.

Die Grundstruktur eines Tribosystems besteht aus den folgenden vier Systemelementen:

- Grundkörper
- Gegenkörper
- Zwischenmedium (Schmierstoff)
- Umgebungsmedium

Die Funktion tribotechnischer Systeme besteht in der Umsetzung von Eingangsgrößen  $\{X\}$  in technisch nutzbare Ausgangsgrößen  $\{Y\}$ . Wie in Abbildung 4.1 zu sehen ist, erfolgt diese Umsetzung über die Systemstruktur, wobei gleichzeitig reibungs- und verschleißbedingte Verlustgrößen  $\{Z\}$  als weitere Ausgangsgrößen auftreten können. [9]

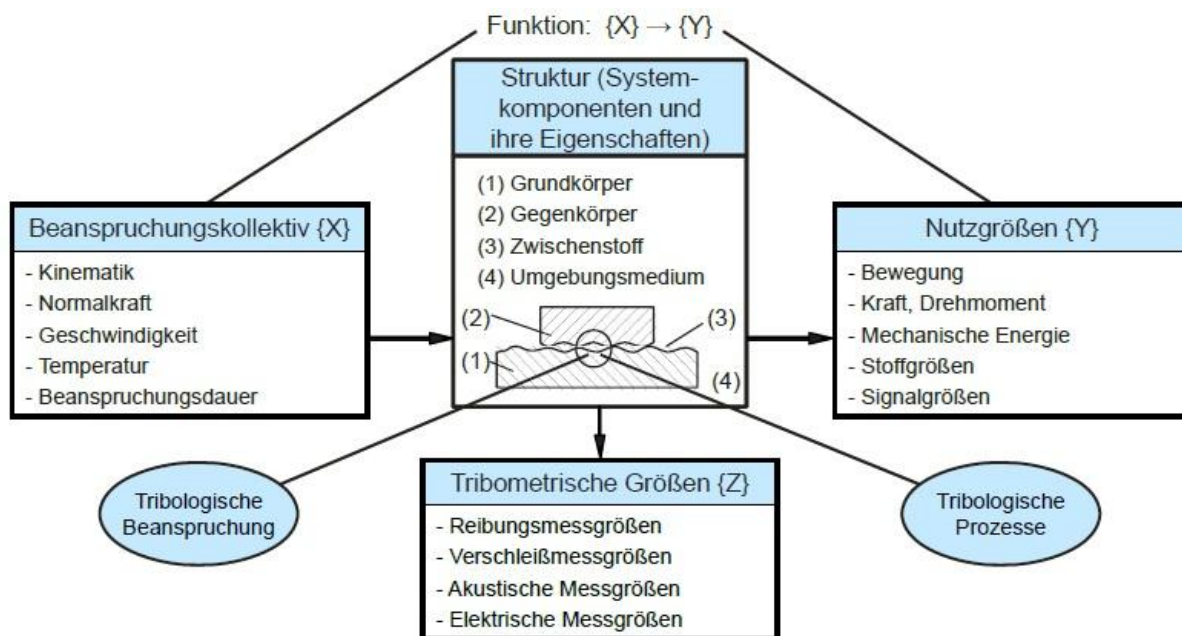


Abbildung 4.1: Tribotechnisches System und seine Einflussgrößen [10]

Die technischen Parameter, die sich aus der geforderten Nutzung des tribotechnischen Systems ergeben, werden als Nutzgrößen bezeichnet.

Das sogenannte Beanspruchungskollektiv der Systemstruktur stellt die Eingangsgröße dar, es wird hauptsächlich von der Kinematik und von Parametern beeinflusst.

Die Verlustgrößen in einem tribotechnischen System sind die zu messenden Reibungs- und Verschleißgrößen, sie zählen zu den wichtigsten Messgrößen tribologischer Systeme. [9]

Da sich diese Bachelorarbeit auf dem Gebiet der Tribologie speziell mit den Reibungseigenschaften von Tischtennisschläger-Belägen beschäftigt, wird im Folgenden nur der Begriff Reibung näher beschrieben.

### 4.3 Reibung

Reibung ist der Widerstand gegen die Bewegung, der eine Relativbewegung einander berührender Körper verhindert. Dieser Vorgang bezeichnet die Ruhereibung oder die sogenannte statische Reibung. Bei der Bewegungsreibung oder der sogenannten dynamischen Reibung kann die Reibung auch einer Relativbewegung entgegenwirken. [9]

Nach Fleischer ist Reibung „der Verlust an mechanischer Energie beim Ablauf, Beginnen oder Beenden einer Relativbewegung sich berührender Stoffbereiche.“ [11]

Grundsätzlich wird zwischen der äußeren und der inneren Reibung unterschieden. Die äußere Reibung ist die Reibung, die zwischen sich berührenden Grenzflächen von Festkörpern auftritt. Die innere Reibung ist der Widerstand eines Körpers gegen eine Relativbewegung seiner inneren Volumenbestandteile. Sie wird durch den Begriff „Viskosität“ gekennzeichnet und von der Rheologie untersucht. [9]

#### 4.3.1 Reibungsarten

Für tribotechnische Anwendungen ist eine Unterteilung der Reibung nach der Kinematik notwendig. Je nach Art der Relativbewegung der Kontaktflächen werden die folgenden Haupt-Reibungsarten unterschieden:

- Gleitreibung
- Rollreibung
- Bohrreibung [9]

#### **Gleitreibung:**

Als Gleitreibung wird die Reibung bezeichnet, bei der eine translatorische Bewegung im Kontaktbereich zweier Körper stattfindet, wobei ihre jeweiligen Einzelgeschwindigkeiten nach Größe oder Richtung unterschiedlich sind. Verglichen mit anderen Reibungsarten ist die Gleitreibung im Kontaktgrenzbereich hinsichtlich des Verschleißes und der thermischen Vorgänge mit den größten tribologischen Beanspruchungen verbunden. Ein typisches Maschinenelement, in dem Gleitreibung vorliegt, ist das in vielen technischen Ausführungen vorhandene Gleitlager. [9]

### Rollreibung:

Mit dem Begriff Rollreibung ist die Reibung eines Drehkörpers gemeint, dessen Drehachsen parallel zur Kontaktfläche angeordnet sind und dessen Bewegungsrichtung senkrecht zur Drehachse verläuft. Da der Rollreibungswiderstand erheblich kleiner als ein Gleitreibungswiderstand ist, sind Rollbewegungen in technischer Hinsicht von besonderer Bedeutung. Zu den wichtigsten technischen Systemen mit Rollreibung gehören Radsysteme und Wälzlager. [9]

### Bohrreibung:

„Bei einem Drehkörper, dessen Drehachse senkrecht zur Kontaktfläche steht, und in dem nur eine Drehung um diese Achse stattfindet, während makroskopisch ein Beharrungszustand der Berührungsfläche in der Bezugsfläche vorliegt, spricht man von Bohren oder Bohrreibung.“ [9]

Neben diesen drei kinematisch definierten Reibungsarten sind auch Überlagerungen in einem tribologischen System möglich. Abbildung 4.2 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Reibungsarten und der sich ergebenden Überlagerungen.



Abbildung 4.2: Einteilung der Reibungsarten nach der Kinematik („Reibungsdreieck“) [9]

### 4.3.2 Reibungszustände

Die Größe der Reibung der einzelnen Reibungsarten wird durch die sogenannte Reibungszahl beschrieben, die durch den Reibungszustand beeinflusst wird. Der Aggregatzustand in der Kontaktfläche ist entscheidend für diesen Reibungszustand. Dies sind die Zustände „fest-flüssig“ oder „gasförmig“. Von Bedeutung ist unter anderem auch, wie dieser Reibungszustand erreicht werden kann. Wird kein Zwischenmedium verwendet, tritt Festkörperreibung auf. Bei einem Zwischenmedium hingegen handelt es sich um eine Flüssigkeits- oder Gasreibung. In technischen Anwendungen wird versucht, eine geringe Reibung zu erzielen, für die geeignete Zwischenmedien verwendet oder die Teile geschmiert werden können. Es gibt aber auch

Fälle, in denen eine hohe Reibung erwünscht ist, z. B. in den Bremssystemen eines Fahrzeugs. [9]

Je nach Kontaktzustand der Reibpartner wird die Reibung in die folgenden Begriffe unterteilt:

- Festkörperreibung
- Grenzreibung
- Flüssigkeitsreibung
- Gasreibung
- Mischreibung [9]

**Festkörperreibung:**

„Reibung beim unmittelbaren Kontakt fester Körper.“ [9]

**Grenzreibung:**

„Festkörperreibung, bei der die Oberflächen der Reibpartner mit einem molekularen Grenzschnittfilm bedeckt sind.“ [9]

**Flüssigkeitsreibung:**

„Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden flüssigen Film, der hydrostatisch oder hydrodynamisch erzeugt werden kann.“ [9]

**Gasreibung:**

„Reibung in einem die Reibpartner lückenlos trennenden gasförmigen Film, der aerostatisch oder aerodynamisch erzeugt werden kann.“ [9]

**Mischreibung:**

„Reibung, bei Koexistenz von Festkörperreibung und Flüssigkeitsreibung.“ [9]

In der folgenden Abbildung sind mithilfe einer Stribeck-Kurve die Reibungszustände und die Reibungsbegriffe eines tribologischen Systems dargestellt:



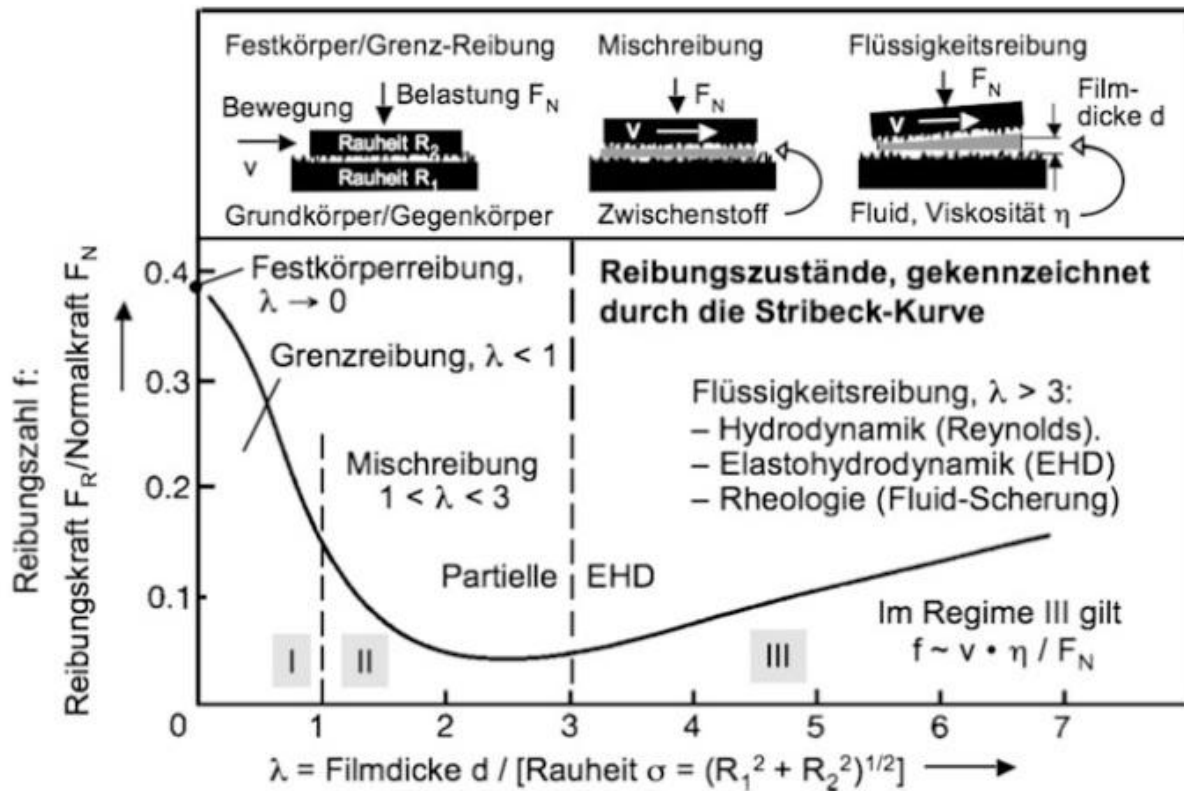


Abbildung 4.3: Reibungszustände und Reibungsbegriffe eines tribologischen Systems [9]

### 4.3.3 Reibungsmessgrößen

Die Reibung kann durch folgende kraftbezogene und energetische Messgrößen charakterisiert werden:

#### Reibungskraft $F_R$ :

Die Reibungskraft ist die Kraft, die infolge der Reibung als mechanischer Widerstand gegen eine translatorische Relativbewegung auftritt und der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist. Man unterscheidet zwischen der statischen Reibungskraft  $F_{Rs}$  (ohne Relativbewegung, z. B. Haftreibung) und der dynamischen Reibungskraft  $F_{Rd}$  (mit Relativbewegung, z. B. Gleitreibung). [9]

$$F_R = \mu \cdot F_N$$

#### Reibungszahl $f$ :

Die Reibungszahl  $f$  ist der Quotient aus der Reibungskraft  $F_R$  und der Normalkraft  $F_N$ . Dabei steht die Reibungskraft parallel und die Normalkraft senkrecht zur Kontaktfläche. [9]

$$f = \frac{F_R}{F_N}$$

Die Reibungszahl ist ein dimensionsloses Maß, welches das Verhältnis zwischen der Reibungskraft und der Normalkraft beschreibt und somit Auskunft über die prozentuale Entlastung einer Reibpaarung gibt. [9] In Tabelle 4.1 sind die Reibungszahlbereiche bei unterschiedlichen Reibungsarten und -zuständen dargestellt.

Tabelle 4.1: Reibungszahlen unterschiedlicher Reibungsarten und -zustände [9]

Reibungsart	Reibungszustand	Reibungszahl
Gleitreibung	Festkörperreibung	0,1 ... > 1
	Grenzreibung	0,01 ... 0,2
	Mischreibung	0,01 ... 0,1
	Flüssigkeitsreibung	0,001 ... 0,01
	Gasreibung	0,0001
Rollreibung	Mischreibung	0,001 ... 0,005

#### Reibungsmoment $M_R$ :

Reibungsmoment ist das Moment, das infolge der Reibung als Widerstand gegen eine rotatorische Relativbewegung auftritt. [9]

#### Reibungsarbeit $A_R$ :

„Die zur Aufrechterhaltung eines Bewegungsvorganges unter Reibung zu verrichtende (Verlust-) Arbeit, bezogen auf die vorliegende Kinematik.“

Man unterscheidet zwischen Gleit-, Roll- und Bohrreibung. Die Reibungsarbeit  $A_R$  setzt sich aus dem Produkt von Reibungskraft  $F_R$  und Reibungsweg  $s_R$  zusammen. [9]

$$A_R = F_R \cdot s_R$$

#### 4.3.4 Reibungsmechanismen

„Als Reibungsmechanismen werden die im Kontaktbereich eines tribologischen Systems auftretenden bewegungshemmenden, energiedissipierenden Elementarprozesse der Reibung bezeichnet. Sie gehen von den im Kontaktbereich örtlich und zeitlich stochastisch verteilten Mikrokontakten aus.“ [9]

„Nach den Ergebnissen der Kontaktmechanik nimmt bei einer Berührung technischer Oberflächen die Anzahl der Mikrokontakte etwa linear mit der Normalkraft  $F_N$  zu. Geht man davon aus, dass jeder Mikrokontakt einen elementaren Bewegungswiderstand darstellt, so

ergibt sich für die makroskopische Reibungskraft näherungsweise der folgende Ansatz:  
Reibungskraft  $F_R \sim$  Anzahl der Mikrokontakte  $\sim$  Normalkraft  $F_N$ .“ [9]

Die grundlegenden Reibungsmechanismen werden eingeteilt in:

- Adhäsion und Scheren
- Plastische Deformation
- Furchung
- Elastische Hysterese und Dämpfung [9]

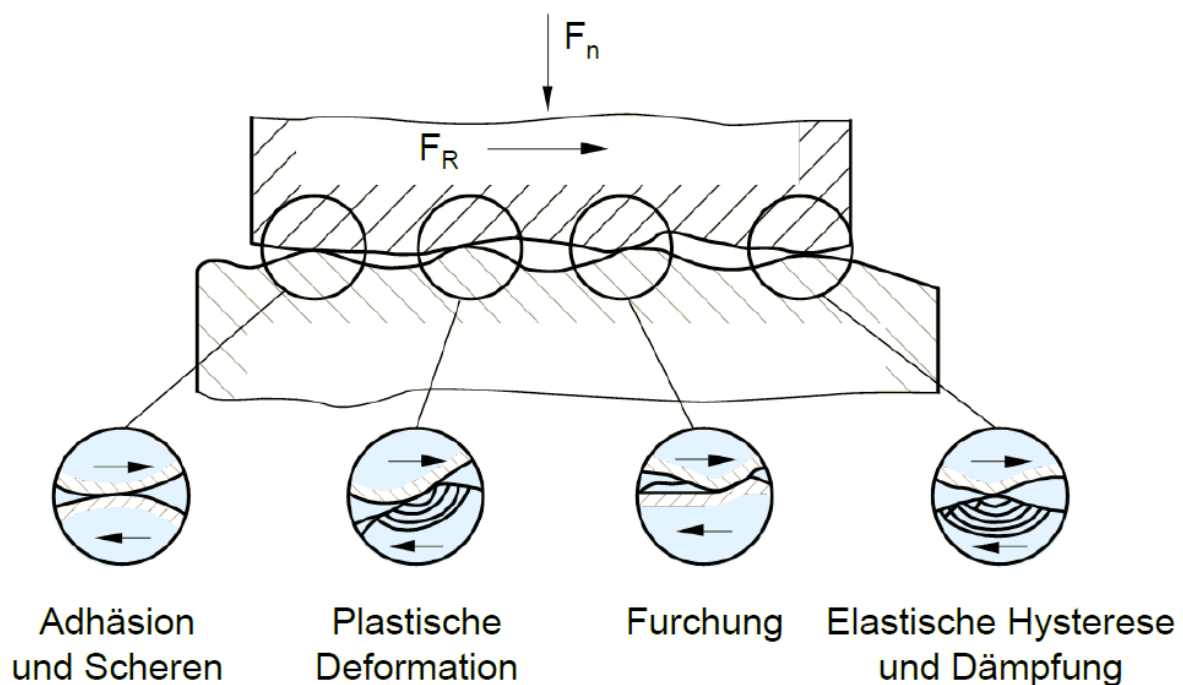


Abbildung 4.4: Vereinfachte Illustration der grundlegenden Reibungsmechanismen [10]

#### **Adhäsion und Scheren:**

Die physikalische Ursache für die Adhäsionskomponente der Reibung ist die Bildung und Zerstörung von Adhäsionsbindungen in der Kontaktfläche. Sie ist auf die Zerstörung der atomaren sowie molekularen Bindungen zurückzuführen, die zu einem Energieverlust führt. Die Adhäsionskomponente der Reibung ist von zahlreichen Faktoren abhängig, wie z. B. dem Einfluss des Formänderungsvermögens der Kontaktpartner, dem Einfluss der Elektronenstruktur, dem Einfluss von Oberflächenschichten und freien Oberflächenenergien sowie dem Einfluss von Zwischenstoffen und Umgebungsmedien. [9]

#### **Plastische Deformation:**

Beim Kontakt und einer tangentialen Relativbewegung sich berührender Körper tritt eine Kontaktdeformation auf. Dies kann zu Energieverlusten durch dissipative Prozesse bei der

plastischen Kontaktdeformation führen. Die Größe der plastischen Deformation hängt von den experimentellen Parametern ab, wie z. B. den Beanspruchungsbedingungen und den Werkstoffkenngößen. [9]

**Furchung:**

Furchung entsteht, wenn zwei Körper unterschiedlicher Härte in Kontakt kommen. Die härteren Oberflächenrauheitshügel dringen in den weicheren Gegenkörper ein. Die tangentielle Verschiebung führt zu einer Reibungskomponente durch den Widerstand des Materials gegen die Furchung. Dieser Reibungsmechanismus unterscheidet zwischen Gegenkörperfurchung durch den Rauheitshügel des Gegenkörpers und Teilchenfurchung durch Verschleißpartikel zwischen den Kontaktflächen. [9]

**Elastische Hysterese und Dämpfung:**

Der Ausdruck der elastischen Hysterese und Dämpfung ist durch eine Reibungskraft oder Reibungsenergie gekennzeichnet. Es handelt sich um eine Umwandlung der mechanischen Bewegungsenergie in andere Energieformen. Die Reibungsenergie geht als Wärme verloren. Darüber hinaus finden Energieabsorption und Energieemission statt. [9]

## 5 Grundlagen der Rheologie

### 5.1 Definition und Aufgabe der Rheologie

Die Rheologie ist die Lehre von der Deformation und vom Fließen der Substanzen, sie ist ein Teilgebiet der Physik. Der Begriff leitet sich aus dem griechischen Wort „rheos“ (Fließen) ab. Die Rheologie beschäftigt sich nicht nur mit dem Fließverhalten von Flüssigkeiten, sondern auch mit dem Deformationsverhalten von Festkörpern. Der Zusammenhang besteht darin, dass durch Scherkräfte verursachte Deformationen bei vielen Substanzen zu deren Fließen führen. Bei rheologischen Untersuchungen finden alle Formen des Scherverhaltens zwischen zwei Extremen statt, dem Fließen von idealviskosen Flüssigkeiten und dem Verformen von idealelastischen Festkörpern. Alle realen Substanzen besitzen sowohl einen viskosen als auch einen elastischen Anteil, man nennt dieses Verhalten viskoelastisch.

Die Hauptaufgabe der Rheologie ist es, das Stoffverhalten unterschiedlicher Substanzen unter Einwirkung äußerer Kräfte zu messen, zu beschreiben und zu erklären. Dabei lassen sich die Stoffe allgemein in Festkörper, Flüssigkeit und Gas einteilen. Diese weisen unterschiedliche rheologische Eigenschaften auf, die von der Beanspruchungshöhe, der Beanspruchungsdauer und der Temperatur abhängen. Die rheologischen Eigenschaften der Stoffe werden durch die Viskosität, die Elastizität und die Plastizität beschrieben. [12]

### 5.2 Rheologische Grundbegriffe

Die grundlegenden rheologischen Begriffe werden mithilfe eines Zwei-Platten-Modells definiert. Zwischen den beiden Platten befindet sich ein beliebiges Volumenelement, zum Beispiel eine Flüssigkeit. Die untere Platte ist fest. Die obere Platte mit der (Scher-) Fläche  $A$  wird durch die (Scher-) Kraft  $F$  bewegt, wodurch das Volumenelement bzw. die Messflüssigkeit, die sich im Spalt zwischen den beiden Platten befindet, geschert wird. Folgende Scherbedingungen werden dabei vorausgesetzt:

- Die Messprobe hat an beiden Platten Wandhaftung, damit es nicht rutscht bzw. gleitet.
- Es herrschen laminare Fließbedingungen (d. h. Schichtenströmung), es treten keine turbulenten Strömungen auf (d. h. keine Wirbelbildung). [12]

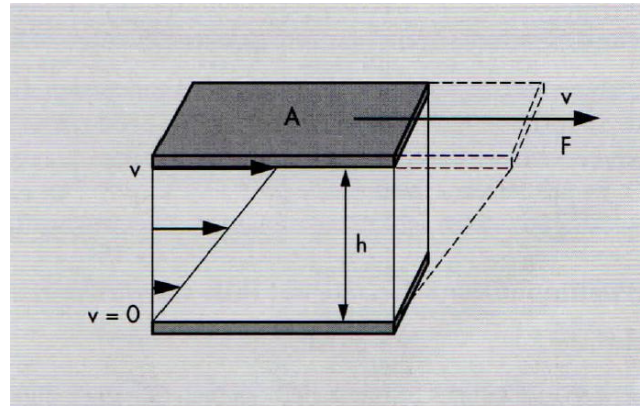


Abbildung 5.1: Fließeigenschaft einer Flüssigkeit im Spalt des Zwei-Platten-Modells für Scherversuche [12]

### 5.2.1 Schubspannung (Scherspannung)

Die Schubspannung oder auch Scherspannung  $\tau$  [ $\text{Pa} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$ ] wird definiert durch die Scherkraft  $F$  [N] und die Scherfläche  $A$  [ $\text{m}^2$ ]: [12]

$$\tau = \frac{F}{A}$$

### 5.2.2 Scherdeformation

Die Scherdeformation  $\gamma$  wird als die Auslenkung  $s$  [m] im Verhältnis zur Spalthöhe  $h$  [m] definiert und ist damit einheitslos: [12]

$$\gamma = \frac{s}{h}$$

### 5.2.3 Scherrate

Die Scherrate  $\dot{\gamma}$ , auch Schergeschwindigkeit, Schergefälle oder Deformationsrate genannt, wird als Geschwindigkeit  $v$  [ $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ ] durch Spalthöhe  $h$  [m] definiert: [12]

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h}$$

### 5.2.4 Viskosität

Die Viskosität ist ein Maß für die innere Reibung eines strömenden Fluids. Sie ist eine wichtige Kenngröße, die das Fließverhalten einer Flüssigkeit beschreibt. Je höher die Viskosität ist, desto dickflüssiger ist das Fluid und desto weniger fließfähig ist es. Bei niedriger Viskosität spricht man dagegen von Dünflüssigkeit, d. h., das Fluid ist deutlich fließfähiger. Die Viskosität ist keine Stoffkonstante und daher von vielen Faktoren abhängig. Sie hängt von der Temperatur, vom Druck und bei bestimmten Ölen vom Schergefälle ab, wobei die Temperatur üblicherweise einen starken Einfluss hat. Die Temperaturabhängigkeit gibt an, wie stark die

Viskosität bei fallenden Temperaturen ansteigt und wie stark sie bei steigenden Temperaturen abfällt. [13]

Man unterscheidet grundsätzlich zwei Arten von Viskosität:

- Die dynamische Viskosität  $\eta$  [Pa·s] wird durch die Scherspannung  $\tau$  und das Schergefälle  $\dot{\gamma}$  definiert: [9]

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

- Die kinematische Viskosität  $\nu$  [mm<sup>2</sup>/s] wird durch die dynamische Viskosität  $\eta$  und die Dichte  $\rho$  [kg<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>] definiert: [9]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

### 5.3 Rheologisches Modell

In der Rheologie beschreiben die rheologischen Modelle den Zusammenhang zwischen der Verformung eines Körpers und der äußeren Belastung, die diese Verformung verursacht. [14]

Da verschiedene Materialien ein deutlich unterschiedliches Verhalten aufweisen, sind unterschiedliche Modellkörper notwendig. Die drei idealisierten Grundeigenschaften Elastizität, Viskosität und Plastizität werden mit den von der Mechanik übernommenen Grundmodellkörpern Feder, Dämpfungszylinder und Reibklotz beschrieben. Die Modelle ermöglichen, unterschiedliches Fließ- und Deformationsverhalten qualitativ und quantitativ zu beschreiben, zu kategorisieren und vorherzusagen. [15]

#### 5.3.1 Ideale Elastizität

Ein ideal elastischer Körper zeichnet sich durch die folgenden Eigenschaften aus:

- Eine einwirkende Spannung  $\sigma$  führt zu einer sofortigen Deformation  $\varepsilon$  ohne zeitliche Verzögerung.
- Das Ausmaß der Deformation ist begrenzt und proportional zur Spannung.
- Wirkt die Spannung nicht mehr ein, bewegt sich der Körper ohne Verzögerung in seine Ausgangslage zurück, die Verformung ist reversibel.
- Es gilt das Hookesche Gesetz  $\sigma = E \cdot \varepsilon$ . Die Konstante  $E$  ist hierbei das Elastizitätsmodul bei Dehnung, das Kompressionsmodul bei Stauchung oder das Schubmodul bei Scherung oder Torsion.

Dies sind die Eigenschaften eines realen Festkörpers, sie können durch eine Feder, das sogenannte Hooke-Element, dargestellt werden. [16]

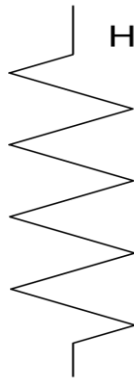


Abbildung 5.2: Hooke-Element [16]

### 5.3.2 Ideale Viskosität

Ein ideal viskoser Körper ist durch folgende Eigenschaften gekennzeichnet:

- Eine einwirkende Spannung  $\sigma$  führt zu einer zeitlich verzögerten Deformation  $\varepsilon$ .
- Das Ausmaß der Deformation ist unbegrenzt, solange die Spannung einwirkt.
- Wirkt die Spannung nicht mehr ein, bleibt die Deformation bestehen, die Verformung ist irreversibel.
- Die Deformationsgeschwindigkeit ist proportional zur einwirkenden Spannung. Es gilt  $\sigma = \eta \cdot \dot{\varepsilon}$ . Die Konstante  $\eta$  ist hierbei die dynamische Viskosität, die üblicherweise in der Scherung, aber auch in der Dehnung (Dehnviskosität) berücksichtigt wird.

Dies beschreibt eine ideale Flüssigkeit, auch Newtonsches Fluid genannt. Sie kann durch einen flüssigkeitsgefüllten Dämpfungszylinder mit einem Kolben darin, ähnlich wie bei einem Stoßdämpfer, dargestellt werden. Der Dämpfungszylinder wird so groß angenommen, dass der Kolben nicht die Grenze seiner Beweglichkeit erreicht. Dieses Modell wird als Newton-Element bezeichnet. [16]



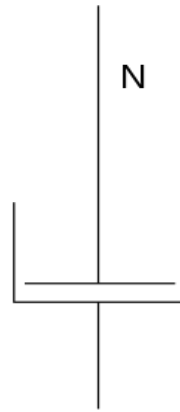


Abbildung 5.3: Newton-Element [16]

### 5.3.3 Ideale Plastizität

Ein ideal plastischer Körper zeigt die folgenden charakteristischen Eigenschaften:

- Es erfolgt keine Deformation, solange die Spannung  $\sigma$  unterhalb der Fließgrenze  $\sigma_F$  liegt.
- Wird die Fließgrenze überschritten, verformt sich der Körper irreversibel mit nicht definierter Geschwindigkeit.
- Es gilt also  $\varepsilon = \begin{cases} 0 & \text{für } \sigma < \sigma_F \\ \varepsilon(t) & \text{für } \sigma \geq \sigma_F \end{cases}$ .

Somit verhält sich ein ideal plastischer Körper unterhalb der Fließgrenze wie ein ideal starrer Körper, oberhalb der Fließgrenze wie eine Flüssigkeit mit unendlich kleiner Viskosität. Dieses nichtlineare Verhalten kann durch einen Klotz, der sich auf einer reibungsbehafteten Oberfläche befindet, dargestellt werden, denn auch dieser kann erst nach Überschreiten der Haftreibungskraft in Bewegung gesetzt werden. Ein solcher Modellkörper wird als St.-Venant-Element bezeichnet. [16]

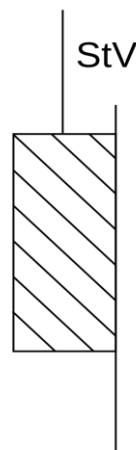


Abbildung 5.4: St.-Venant-Modell [16]

In der Realität zeigen praktisch alle Materialien gleichzeitig elastisches, viskoses und plastisches Verhalten, sie unterscheiden sich lediglich durch die Ausprägung und die Art des Zusammenwirkens der einzelnen Eigenschaften. [17] Dieses realitätsnahe, komplexe Verhalten kann durch Reihen- und Parallelschaltung mehrerer dieser idealisierten Grundelemente modelliert werden, analog zu idealen und realen elektrischen Bauelementen. [15]

## 6 Versuchsaufbau und Versuchsvorbereitung

### 6.1 Das Rheometer MCR 300 bzw. MCR 302



Abbildung 6.1: Rheometer MCR 300



Abbildung 6.2: Rheometer MCR 302

Um die Eigenschaften der verschiedenen Tischtennisschläger-Beläge zu untersuchen, wurden zwei Rheometer vom Typ MCR 300 bzw. MCR 302 des Herstellers Anton Paar im Labor *Maschinenelemente und Tribologie* an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg verwendet. Die Rheometer unterscheiden sich bis auf wenige Spezifikationen kaum voneinander, weshalb im Folgenden nur das MCR 302 näher beschrieben wird.

Das Rheometer MCR 302 arbeitet mit einem stufenlosen permanentmagnetischen Synchronmotor. Es ermöglicht hochdynamische Messungen bei Schubspannungs- oder Schergeschwindigkeitsvorgaben über einen breiten Drehmoment- und Frequenzbereich. Um den höchsten Anforderungen in der Rheologie gerecht zu werden, wurden das EC-Motorenkonzept, das Luftlager und der integrierte Normalkraftsensor im Laufe der Jahre optimiert. Somit können alle rheologischen Experimente sowohl in der Oszillation als auch in der Rotation durchgeführt werden. Die Messeinrichtung des Rheometers ist so konzipiert, dass es bei Bedarf leicht ausgetauscht werden kann. Zur Erweiterung der Funktionen des Rheometers steht ein umfassendes Spektrum von anwendungsbezogenem Zubehör zur Verfügung. Das Rheometer ist direkt mit einem Computer verbunden. Alle während des Versuchs aufgezeichneten Werte werden vom Rechner in auswertbare Kenngrößen wie Schubspannung, Normalspannung, Geschwindigkeitsgefälle und Deformation umgewandelt und dem Anwender über die RheoPlus-Software als Messwerte in Form von Tabellen oder grafisch in Diagrammen zur Auswertung zur Verfügung gestellt. [18]

### 6.1.1 Spezifikationen

Tabelle 6.1: Technische Daten des Rheometers MCR 302 [18]

Motorlagertyp	Luft
Maximales Drehmoment	200 mNm
Min. Moment, Rotation	1 mNm
Min. Moment, Oszillation	0,5 mNm
Winkelauslenkung (Sollwert)	0,05 bis $\infty$ $\mu$ rad
Min. Winkelgeschwindigkeit	$10^{-9}$ rad/s
Max. Winkelgeschwindigkeit	314 rad/s
Max. Drehzahl	3000 1/min
Min. Kreisfrequenz	$10^{-7}$ rad/s
Max. Kreisfrequenz	628 rad/s
Normalkraftbereich	0,005-50 N
Normalkraftauslösung	0,5 mN
Max. Temperaturbereich	-160°C bis +1000°C

### 6.1.2 Messgeometrien

In den folgenden Versuchen wurden zwei Messsysteme eingesetzt:

#### 1. Tribologie Messzelle T-PID/44:

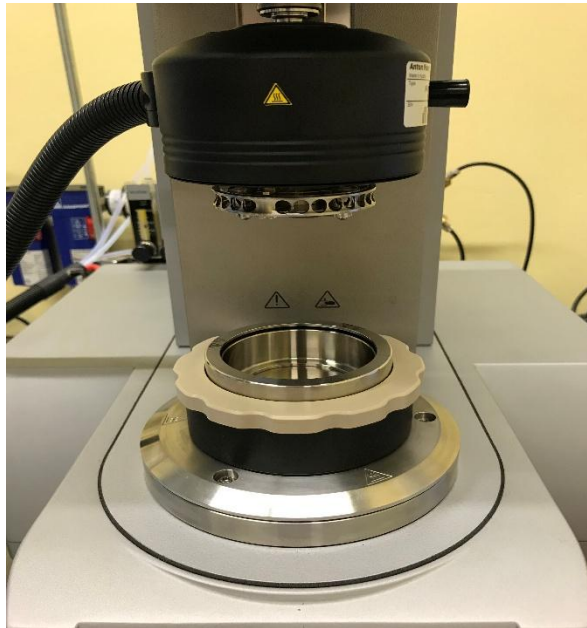


Abbildung 6.3: Tribologie Messzelle T-PID/44

Das Messsystem T-PID/44 wurde beim MCR302 für die Rotationsversuche verwendet.

#### Technische Merkmale

- Selbstzentrierender Pin-on-Disc-Messaufbau
- Präzise Temperierung im Bereich  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $190^{\circ}\text{C}$  in Kombination mit einer Peltier-Temperierkammer
- Tribologische Normalkraft  $F_{N,\text{Tribo}}$ : 0,7 N bis 17 N
- Maximales Drehmoment: 300 mNm
- Gleitgeschwindigkeiten:  $10^{-8}$  bis 2,3 m/s
- Drehzahl  $U$ :  $10^{-6}$  rpm to 1000 rpm
- Auslenkwinkel  $\varphi$ :  $1 \mu\text{rad}$  bis  $\infty \mu\text{rad}$
- Einstellbare Federhärte in z-Richtung
- Kontaktarten: Punkt, Fläche [19]

An der Unterseite des Messsystems können verschiedene Reibungsmaterialien angebracht werden. Im Rahmen der Bachelorarbeit wurden 3 Stahlkugeln mit einem Durchmesser von 6 mm verwendet. Wie in Abbildung 6.4 dargestellt, sind diese an den vorgesehenen Positionen an der Unterseite der Messzelle befestigt. Zusätzlich wurde die Federhärte (Abbildung 6.5) auf 0 gesetzt, um eine möglichst gleichmäßige Reibkraft zu gewährleisten.



Abbildung 6.4: T-PID/44 Unterseite



Abbildung 6.5: T-PID/44 Oberseite

## 2. Platte-Platte-Messsystem PP25:

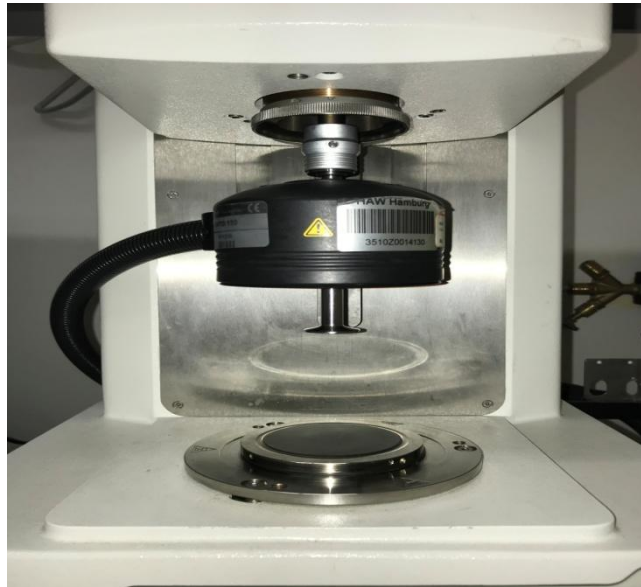


Abbildung 6.6: Platte-Platte Messsystem PP25

Dieses Messsystem wurde beim MCR 300 für Frequenz- und Druckversuche eingesetzt.

Die Platte/Platte-MS besteht aus zwei Platten-Ebenen. Die obere Platte, die „Messplatte“, ist der bewegliche Teil der Messgeometrie (als „Rotor“), die untere Platte dagegen ist unbeweglich am Rheometerstativ (als „Stator“) befestigt. [12]

Einige Testtypen, die mit dem Messsystem durchgeführt werden können, sind nachfolgend aufgeführt.

- Shear Rate Test (CSR)
- Scherbelastungstest (CSS)
- Kriechtest
- Normaler Krafttest
- Stressrelaxationstest
- Klebrigkeitstest
- Oszillationstest
- Amplituden-Sweep
- Frequenzdurchlauf
- Temperaturtest [12]

## 6.2 Verwendete Tischtennisschläger-Beläge

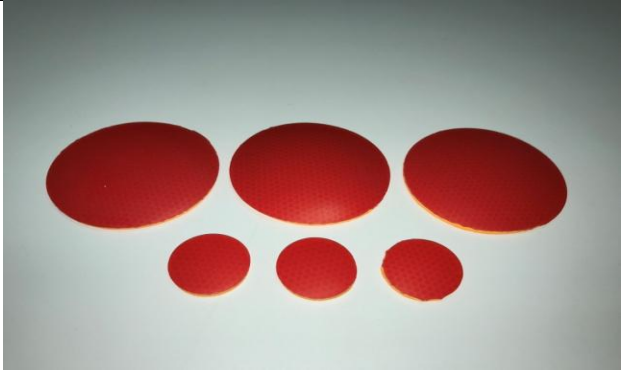
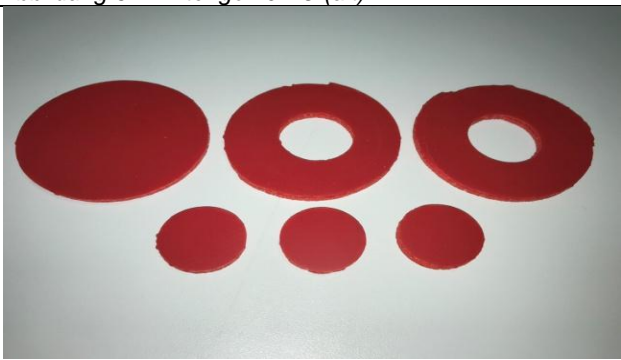
Es wurden 6 verschiedene Beläge mit unterschiedlichen Eigenschaften untersucht. Bei den verwendeten Belägen handelt es sich um:

- Artengo 702 O (alt)
- Evolution FX-P (alt)
- Evolution FX-P (neu)
- Flexxon soft (neu)
- Proton Neo 325 (alt)
- Thunderball (neu)

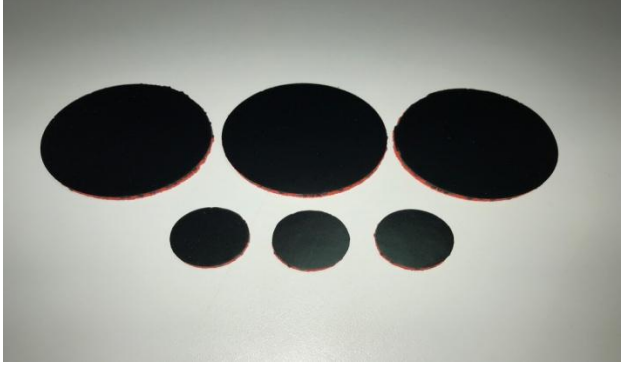
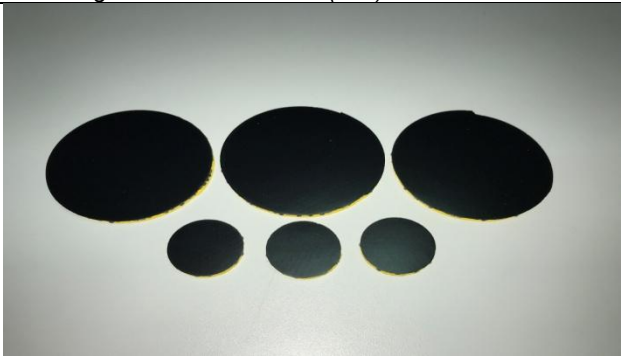

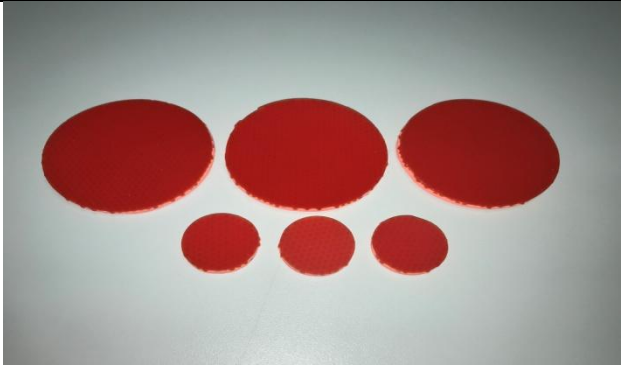
Von diesen wurden für die einzelnen Versuche drei Proben mit Durchmessern von 25 bzw. 60 mm ausgestanzt und nummeriert.

In der folgenden Tabelle sind die Beläge mit ihren dazugehörigen Eigenschaften, die von den jeweiligen Belaganbietern angegeben sind, dargestellt.

Tabelle 6.2: Verwendete Tischtennisschläger-Beläge mit den dazugehörigen Eigenschaften

<p><b>Artengo 702 O (alt)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 70</li> <li>• Kontrolle: 100</li> <li>• Effet (Spin): 40</li> <li>• Schwammdicke: 2,2 mm</li> <li>• Schwammhärte: mittel</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.7: Artengo 702 O (alt)</p>
<p><b>Evolution FX-P (alt)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 115</li> <li>• Kontrolle: 90</li> <li>• Effet (Spin): 120</li> <li>• Schwammdicke: 2,0 mm</li> <li>• Schwammhärte: weich</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.8: Evolution FX-P (alt)</p>



<p><b>Evolution FX-P (neu)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 115</li> <li>• Kontrolle: 90</li> <li>• Effet (Spin): 120</li> <li>• Schwammdicke: 2,0 mm</li> <li>• Schwammhärte: weich</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.9: Evolution FX-P (neu)</p>
<p><b>Flexxon soft (neu)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 105</li> <li>• Kontrolle: 98</li> <li>• Effet (Spin): 114</li> <li>• Schwammdicke: 2,1 mm</li> <li>• Schwammhärte: weich</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.10: Flexxon soft (neu)</p>
<p><b>Proton Neo 325 (alt)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 102</li> <li>• Kontrolle: 103</li> <li>• Effet (Spin): 108</li> <li>• Schwammdicke: 2,2 mm</li> <li>• Schwammhärte: sehr weich</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.11: Proton Neo 325 (alt)</p>
<p><b>Thunderball (neu)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo: 87</li> <li>• Kontrolle: 109</li> <li>• Effet (Spin): 100</li> <li>• Schwammdicke: 1,8 mm</li> <li>• Schwammhärte: keine Angabe</li> </ul>	 <p>Abbildung 6.12: Thunderball (neu)</p>

## 7 Versuche

### 7.1 Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit)

#### 7.1.1 Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch besteht die Aufgabe darin, den Reibungskoeffizienten  $\mu$  der verschiedenen Schlägerbeläge in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit zu bestimmen und zu vergleichen. Dazu werden die ausgestanzten Beläge mit einem Durchmesser von 60 mm nacheinander in eine Peltier-Temperaturkammer eingebracht und mit einem Befestigungsring an der Außenkante befestigt. Die Messzelle T-PID/44 wird in die Messposition gebracht und auf der Oberfläche des Belages rotiert. Während des Versuches wird die Haube der Temperierkammer geschlossen. Normalkraft, Drehzahl und Temperatur werden vom Anwender als Parameter eingegeben, während Normalkraft und Temperatur im Scherprozess konstant bleiben.

#### 7.1.2 Versuchsparameter

Um die zu verwendenden Versuchsparameter zu bestimmen, wurde eine Reihe von Testversuchen durchgeführt. Ziel der Vorversuche war es, einheitliche und reproduzierbare Ergebnisse (Reibungskoeffizienten) zu erhalten, ohne an die Grenzen des Messgerätes zu stoßen. Bei höheren Normalkräften und Drehzahlen traten oft Schwingungen auf, weil das maximale Drehmoment des Rheometers von 200 mNm überschritten wurde. Dadurch wurde das Gerät ständig nachgestellt, was sich negativ auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse auswirkte.

Nach den Testversuchen wurden folgende Versuchsparameter festgelegt:

- Normalkraft: 4,5 N
- Temperatur: 20°C
- Drehzahl:  $0,01-1 \frac{1}{min}$  (logarithmisch)
- Messpunktdauer: 100–10 s (logarithmisch)
- Die 3 Proben der einzelnen Schlägerbeläge werden jeweils einmal gemessen.
- Die Versuche werden mit der Temperaturkammer durchgeführt.

#### 7.1.3 Durchführung des Rotationsversuchs

Bevor der Rotationsversuch durchgeführt werden kann, müssen zunächst verschiedene Einstellungen in den Abschnittseinstellungen der RheoPlus-Software vorgenommen werden.

Wie in Abbildung 7.1 dargestellt, ist der Versuch in 2 Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt dauert 30 Sekunden, dient zur Stabilisierung der Parameter und wird nicht aufgezeichnet. Der

zweite Abschnitt enthält insgesamt 21 Messpunkte. Die Dauer der Messpunkte ist variabel und logarithmisch, beginnend mit 100 s bis 10 s. Die gesamte Abschnittsdauer beträgt somit 837,6 Sekunden und wird während des Versuchs aufgezeichnet.

Einfügen    Anhängen    Löschen...			
<b>MCR302</b> PID44-SN38359		1  5 Pkt. 6 s	2  21 Pkt. 100..10 s
	Rotation $\dot{\gamma}$ , $n$ , $\varphi$ , $\gamma$		$n$ 0,01..1  1/min
	Rotation $\tau$ , M		
	Oszillation $\varphi$ , $\gamma$		
	Oszillation $\tau$ , M		
	$F_N$	$F_N$ 4,5 N	$F_N$ 4,5 N
	$d$ , $v$ , $d/d$		
<b>P-PTD200+H-PTD200-SN</b>	Zusatz1 T	T 20 °C	T 20 °C
<b>Physica VT 2</b>	Zusatz2 T	T 30 °C	T 30 °C

Abbildung 7.1: Messprofil Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit)

Die übrigen Parameter wie Drehzahl, Normalkraft und Temperatur werden in die jeweiligen Abschnittseinstellungen eingetragen. Hierbei ist zu beachten, dass die Drehzahl logarithmisch verläuft.

Zwischen der Temperaturanzeige T1 (Peltier-Temperatureinheit) und T2 (Kälte-Umwälzthermostat) besteht eine Temperaturdifferenz, die im Regelfall ein Delta von 10°C beträgt.

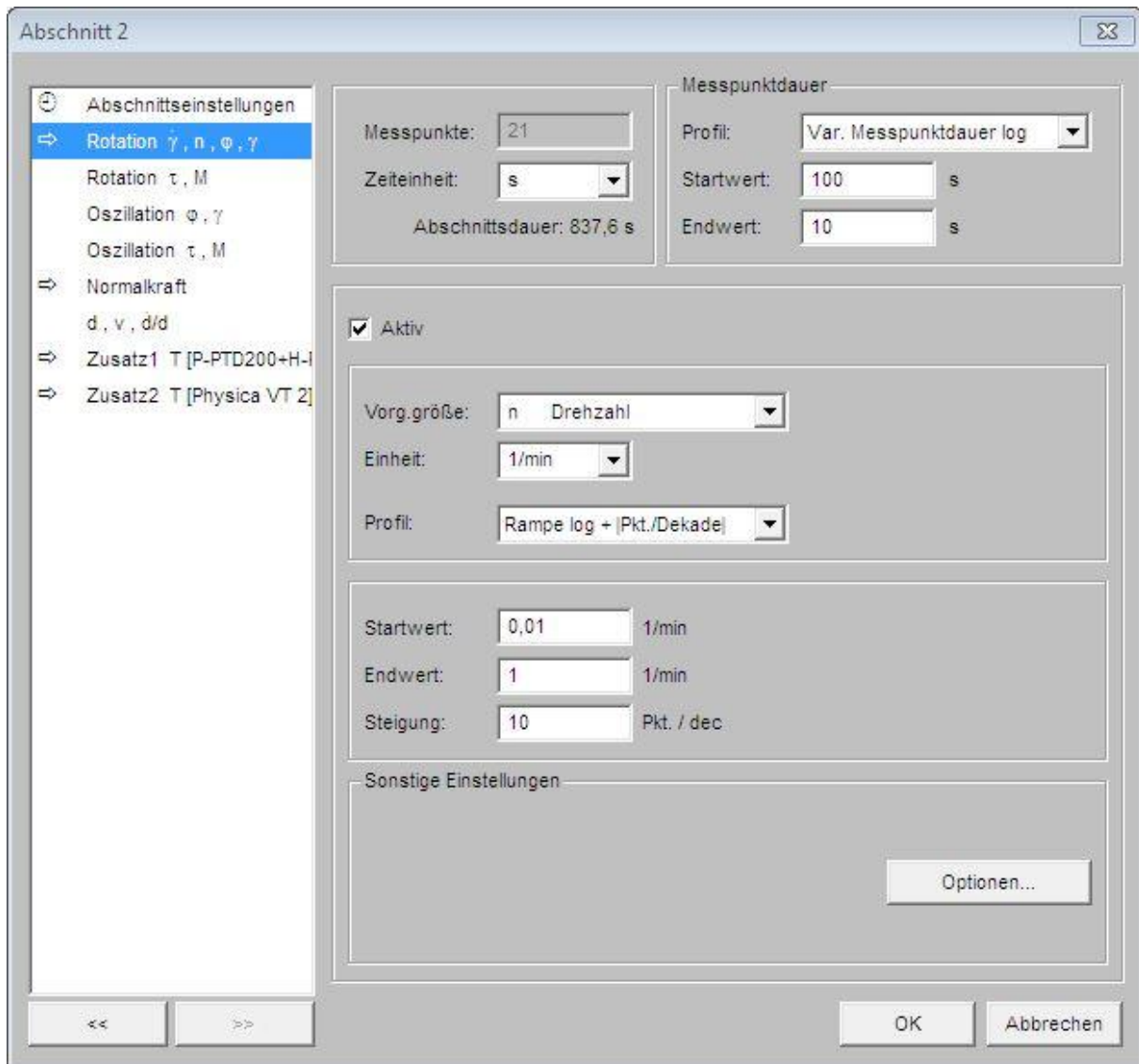


Abbildung 7.2: Abschnitt 2, Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit)

Nach Eingabe der Parameter wird die Messung gestartet und die an der Unterseite der Messzelle T-PID/44 befestigten Stahlkugeln rotieren auf der Oberfläche des Schläger-Belags. Aus der Geometrie der Messanordnung und der Drehzahl des rotierenden Teils ergibt sich die Gleitgeschwindigkeit. Das zur Aufrechterhaltung der Bewegung notwendige Drehmoment wird gemessen, aus dem sich dann die Reibungskraft und damit die Reibungszahl  $\mu$  ermitteln lassen.

Die Datenaufzeichnung und die daraus ermittelten rheologischen Kenngrößen werden von der RheoPlus-Software in Form einer Tabelle ausgegeben.

Messpkt.	Temperatur	Reibungskraft	Moment	Normalkraft	Gleitweg	Gleitgeschwindigkeit	Reibungszahl
	[°C]	[N]	[mNm]	[N]	[m]	[mm/s]	[1]
<u>Datenreihen-Informationen</u>							
Name:	myArtengo 702 O_alt 1 1						
Probe:	1						
Bemerkung:	Kraft: 4,5 N ; Drehzahl: 0,01-1 1/min ; Temperatur: 20°C						
Messpkt.	Temperatur	Reibungskraft	Moment	Normalkraft	Gleitweg	Gleitgeschwindigkeit	Reibungszahl
	[°C]	[N]	[mNm]	[N]	[m]	[mm/s]	[1]
1	20	0,466	30,8	4,4	0,0167	0,023	0,318
2	20	0,41	27,1	4,37	0,0397	0,029	0,282
3	20	0,397	26,2	4,37	0,0709	0,0365	0,273
4	20	0,378	24,9	4,44	0,113	0,046	0,255
5	20	0,361	23,8	4,49	0,168	0,0579	0,241
6	20	0,348	23	4,54	0,242	0,0729	0,23
7	20	0,353	23,3	4,55	0,338	0,0917	0,232
8	20	0,339	22,3	4,58	0,462	0,115	0,222
9	20	0,334	22,1	4,56	0,624	0,145	0,22
10	20	0,323	21,3	4,49	0,832	0,183	0,215
11	20	0,341	22,5	4,45	1,1	0,23	0,23
12	20	0,359	23,7	4,5	1,44	0,29	0,24
13	20	0,346	22,8	4,63	1,89	0,365	0,224
14	20	0,348	23	4,65	2,45	0,46	0,224
15	20	0,339	22,4	4,58	3,17	0,579	0,222
16	20	0,363	23,9	4,5	4,08	0,729	0,242
17	20	0,351	23,1	4,61	5,24	0,917	0,228
18	20	0,349	23	4,53	6,71	1,15	0,231
19	20	0,367	24,2	4,43	8,58	1,45	0,249
20	20	0,36	23,8	4,58	11	1,83	0,236
21	20	0,374	24,7	4,49	14	2,3	0,25

Abbildung 7.3: Datenaufzeichnung Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit)

Nachdem die einzelnen Schlägerbeläge mit den jeweiligen 3 Proben gemessen wurden, wird aus den 3 Proben mithilfe der RheoPlus-Software der Mittelwert berechnet. Anschließend werden die untersuchten Beläge in einem Diagramm dargestellt.

#### 7.1.4 Ergebnisse des Rotationsversuchs

Alle Messschriebe für die jeweiligen Proben der einzelnen Beläge sind in Anhang A1 enthalten.

Die folgende Abbildung 7.4 zeigt die Mittelwertkurven der einzelnen Tischtennisschläger-Beläge. Dargestellt sind die Reibungskoeffizienten  $\mu$  in Abhängigkeit von den Gleitgeschwindigkeiten.

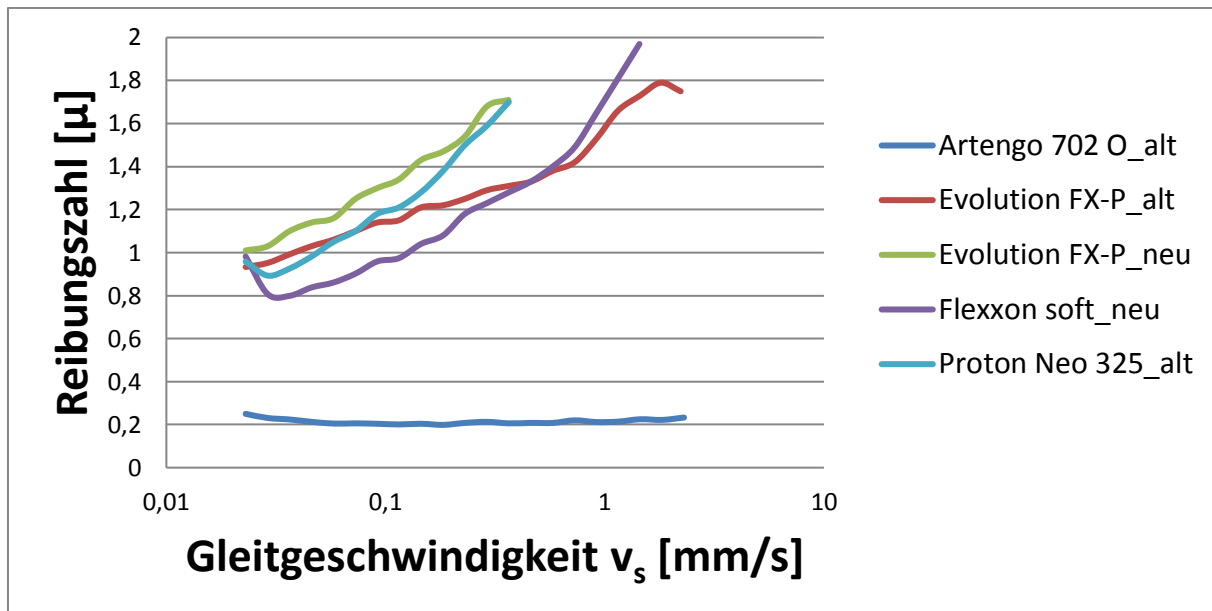


Abbildung 7.4: Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit)

In Abbildung 7.4 ist deutlich zu erkennen, dass der Reibungskoeffizient des Artengo 702 O im Vergleich zu den anderen Belägen deutlich niedriger und über die Geschwindigkeit nahezu konstant ist, was auch den Spinwert von 40 sehr gut widerspiegelt. Eine weitere Erkenntnis aus dieser Versuchsreihe ist, dass die Reibungskoeffizienten mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit bis auf eine Ausnahme deutlich zunehmen. Bei Belägen wie Evolution FX-P neu, Flexxon soft und Proton Neo 325 führt dies zu einem Überschwingen ab einem bestimmten Messpunkt (siehe Anhang A.1), da sich das Rheometer aufgrund übermäßiger Reibung stetig nachstellt. Da dieser Bereich nicht ausgewertet werden kann, wird er nicht in das Diagramm einbezogen. Der Thunderball-Belag hingegen ist kaum mess- bzw. auswertbar (siehe Anhang A.1.16–18) und wird komplett nicht in das Diagramm aufgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Beläge, mit Ausnahme des Proton Neo 325, ihre Effet-Werte gut wiedergeben. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass der neue Evolution FX-P-Belag im Vergleich zum alten Belag einen höheren Reibwert aufweist. Weiterhin ist zu sehen, dass die Beläge Flexxon soft und Proton Neo 325 in ihren anfänglichen Messpunkten ein Gefälle aufweisen. Der alte Evolution FX-P-Belag zeigt ein Gefälle im letzten Messpunkt auf.

## 7.2 Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Temperatur)

### 7.2.1 Versuchsbeschreibung

Ziel dieser Prüfung ist es, das Reibungsverhalten der jeweiligen Beläge bei unterschiedlichen Temperaturen zu vergleichen. Abgesehen von den Parametern ist das Prüfverfahren identisch mit dem ersten Test. Diesmal werden Normalkraft und Drehzahl als konstante Parameter gewählt, während die Temperatur im Laufe der Prüfung kontinuierlich ansteigt.

### 7.2.2 Versuchsparameter

Folgende Versuchsparameter wurden definiert:

- Normalkraft: 4,5 N
- Temperatur: 10–40°C
- Drehzahl:  $0,0007074 \frac{1}{s} \triangleq 0,042444 \frac{1}{min}$   
(berechnet aus  $n = \frac{v_s}{\pi \cdot d_{Messanordnung}}$ ; mit  $v_s = 0,1 \text{ mm/s}$  und  $d_{Messanordnung} \approx 45 \text{ mm}$ )
- Messpunktdauer: 1 min
- Die erste Probe pro Belag wird gemessen.
- Die Versuche werden mit der Temperaturkammer durchgeführt.

### 7.2.3 Durchführung des Rotationsversuchs

Bevor der zweite Versuch durchgeführt werden kann, müssen zunächst erneut verschiedene Einstellungen in den Abschnittseinstellungen der RheoPlus-Software vorgenommen werden.

Wie in Abbildung 7.5 dargestellt, ist der Versuch diesmal in 3 Abschnitte unterteilt. Die ersten beiden Abschnitte dienen zur Stabilisierung der Parameter und werden nicht aufgezeichnet. Der dritte Abschnitt enthält insgesamt 31 Messpunkte. Die Dauer der Messpunkte beträgt 1 Minute. Die gesamte Abschnittsdauer umfasst somit 31 Minuten und wird während des Versuchs aufgezeichnet.




		1  1 Pkt. 10 s	2  5 Pkt. 60 s	3  31 Pkt. 1 min
MCR302 PD44-SN38359	Rotation $\dot{\gamma}$ , $n$ , $\varphi$ , $\gamma$	$\varphi$ 0 °		n 0,0007074 1/s
	Rotation $\tau$ , M			
	Oszillation $\varphi$ , $\gamma$			
	Oszillation $\tau$ , M			
	$F_N$	$F_N$ 0 N	$F_N$ 4,5 N	$F_N$ 4,5 N
	$d$ , $v$ , $d/d$			
P-PTD200+H-PTD200-SN	Zusatz1 T	T 10 °C	T 10 °C	T 10..40 °C
Physica VT 2	Zusatz2 T	T 30 °C	T 30 °C	T 30 °C

Abbildung 7.5: Messprofil Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur)

Abschließend werden die übrigen Parameter wie Drehzahl, Normalkraft und Temperatur in den jeweiligen Abschnittseinstellungen erneut eingegeben. Im Gegensatz zum ersten Versuch wird diesmal die Drehzahl als konstant eingestellt. Diese wird durch die Geometrie der Messanordnung und der Gleitgeschwindigkeit berechnet. Um Schwingungen so weit wie möglich zu vermeiden, wird eine Gleitgeschwindigkeit gewählt, die zu einer niedrigen Drehzahl führt. Die Normalkraft bleibt wie bei der ersten Prüfung unverändert, während die Temperatur linear von 10 auf 40°C ansteigt.



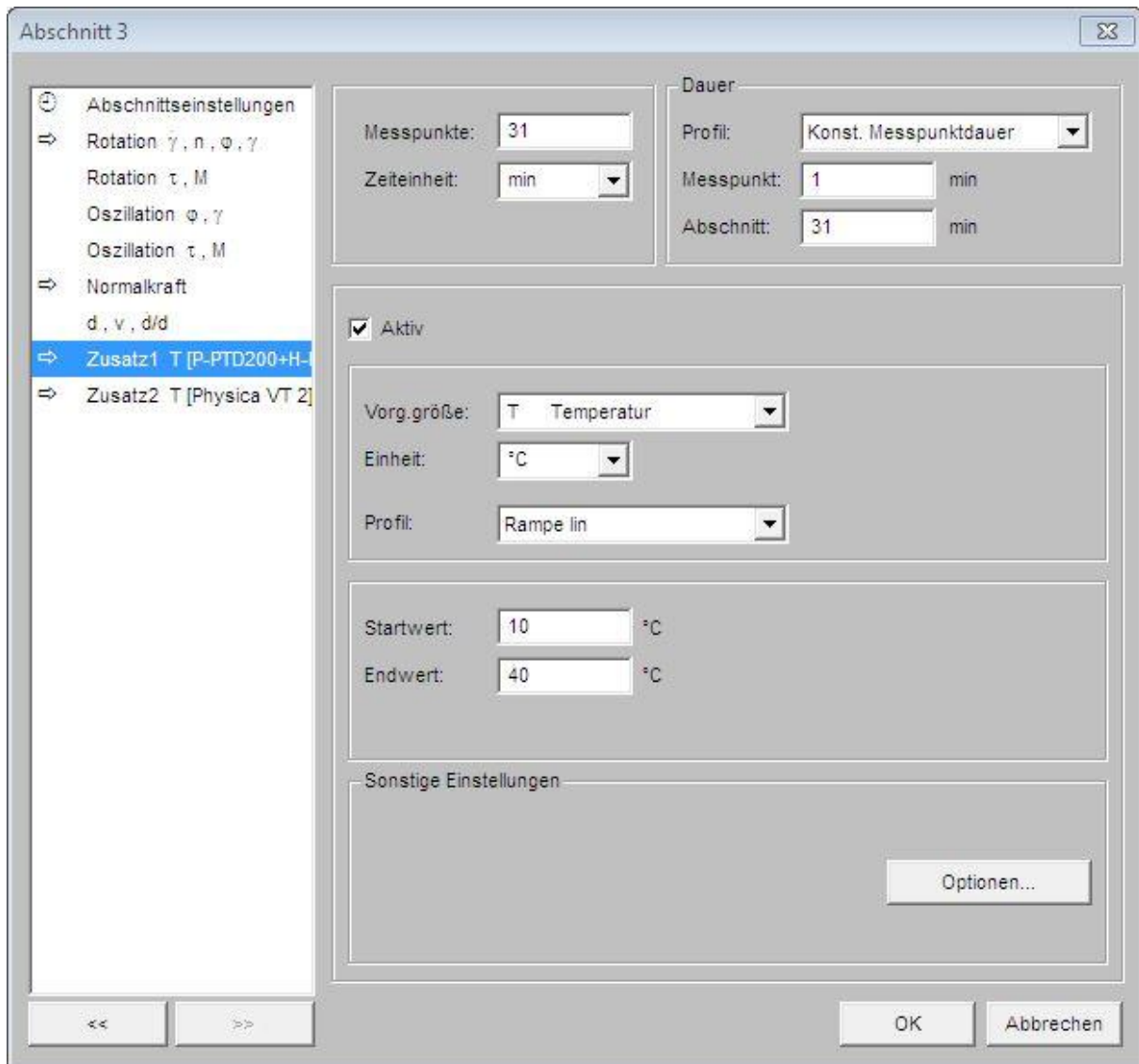


Abbildung 7.6: Abschnitt 3, Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur)

Nach Eingabe der Parameter wird die Messung gestartet. Während der Messung werden die steigende Temperatur und das zur Aufrechterhaltung der Bewegung erforderliche Drehmoment gemessen, aus denen die Reibungskraft und damit die Reibungszahl  $\mu$  in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden kann. Die Datenaufzeichnung und die daraus ermittelten rheologischen Kenngrößen werden von der RheoPlus-Software wieder in Form einer Tabelle ausgegeben.

Messpkt.	Temperatur	Reibungskraft	Moment	Normalkraft	Gleitweg	Gleitgeschwindigkeit	Reibungszahl
	[°C]	[N]	[mNm]	[N]	[m]	[mm/s]	[1]
<u>Datenreihen-Informationen</u>							
Name:	myArtengo 702 O_alt 1 1						
Probe:	1						
Bemerkung:	Kraft: 4,5 N ; Drehzahl: +-0,0007074 1/s ; Temperatur: 10-40 °C						
Messpkt.	Temperatur	Reibungskraft	Moment	Normalkraft	Gleitweg	Gleitgeschwindigkeit	Reibungszahl
	[°C]	[N]	[mNm]	[N]	[m]	[mm/s]	[1]
1	9,98	0,34	22,4	4,36	0,0424	0,1	0,234
2	10,9	0,299	19,8	4,34	0,0849	0,1	0,207
3	12	0,295	19,5	4,47	0,127	0,1	0,198
4	13,1	0,276	18,2	4,45	0,17	0,1	0,186
5	14,1	0,269	17,7	4,41	0,212	0,1	0,183
6	15,1	0,252	16,7	4,4	0,255	0,1	0,172
7	16,1	0,242	16	4,39	0,297	0,1	0,165
8	17,1	0,242	16	4,38	0,34	0,1	0,166
9	18,1	0,257	16,9	4,39	0,382	0,1	0,175
10	19,1	0,253	16,7	4,35	0,424	0,1	0,174
11	20,1	0,253	16,7	4,49	0,467	0,1	0,169
12	21,1	0,253	16,7	4,52	0,509	0,1	0,168
13	22,1	0,251	16,6	4,5	0,552	0,1	0,168
14	23,1	0,238	15,7	4,44	0,594	0,1	0,161
15	24,1	0,231	15,2	4,38	0,637	0,1	0,158
16	25,1	0,237	15,7	4,37	0,679	0,1	0,163
17	26,1	0,241	15,9	4,41	0,722	0,1	0,164
18	27,1	0,241	15,9	4,38	0,764	0,1	0,165
19	28,1	0,234	15,4	4,45	0,806	0,1	0,157
20	29,1	0,231	15,3	4,5	0,849	0,1	0,154
21	30,1	0,237	15,6	4,48	0,891	0,1	0,160

Abbildung 7.7: Datenaufzeichnung Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur)

Nach Durchführung der Versuche werden die untersuchten Beläge erneut in einem Diagramm dargestellt.

## 7.2.4 Ergebnisse des Rotationsversuchs

Alle Messschriebe für die Probe 1 der jeweiligen Beläge sind in Anhang A2 enthalten.

Abbildung 7.8 zeigt den Kurvenverlauf der einzelnen Schlägerbeläge. Dargestellt sind die Reibungskoeffizienten  $\mu$  in Abhängigkeit von der Temperatur.

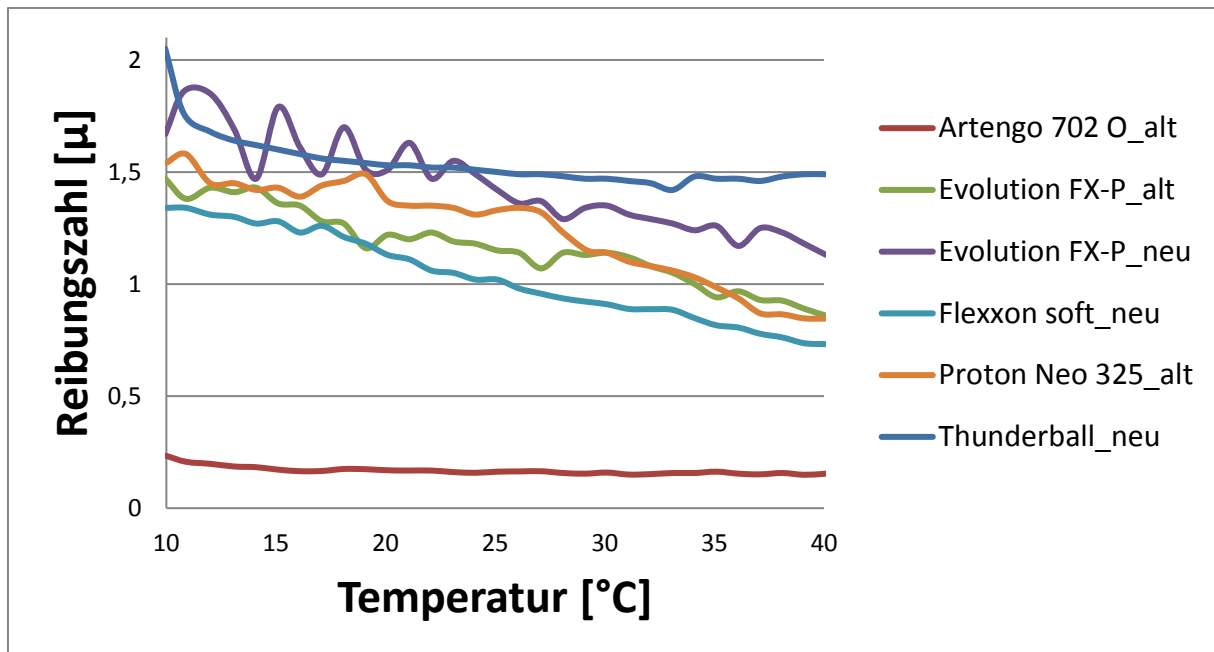


Abbildung 7.8: Rotationsversuch (Reibwert in Abhängigkeit von der Temperatur)

Dieser Test zeigt deutlich, dass die Reibungskoeffizienten der jeweiligen Beläge mit steigender Temperatur bis auf eine Ausnahme deutlich abnehmen. Die Größenanordnung der Reibungskoeffizienten zwischen den Belägen ist mit dem vorherigen Versuch identisch. Auch hier hat der Artengo 702 O einen deutlich niedrigeren Reibungskoeffizienten als die anderen Beläge und ist über die Temperatur nahezu konstant. Beim neuen Evolution FX-P-Belag hingegen ist zu erkennen, dass es bei niedrigen Temperaturen zum Überschwingen kommt, da sich das Rheometer aufgrund übermäßiger Reibung stetig anpasst. Eine weitere Erkenntnis aus dieser Versuchsreihe ist, dass der Belag Thunderball im Vergleich zu den anderen Belägen bei den anfänglichen Messpunkten ein deutlich höheres Reibungsverhalten aufweist, dieses jedoch bei steigender Temperatur verliert, aber im Durchschnitt gegenüber den anderen Belägen immer noch am höchsten ist.

## 7.3 Frequenzversuch

### 7.3.1 Versuchsbeschreibung

„Frequenztests sind Oszillationsversuche, bei denen die Frequenz variiert und die Amplitude (und ebenso die Messtemperatur) auf einem konstanten Wert gehalten wird. Oft wird diese Versuchsart – auch im deutschen Sprachgebiet – als Frequenz-Sweep bezeichnet (englisch: frequency sweep); Sweep bedeutet hier Schwingungsfunktion mit variablem Parameter.“ [12]

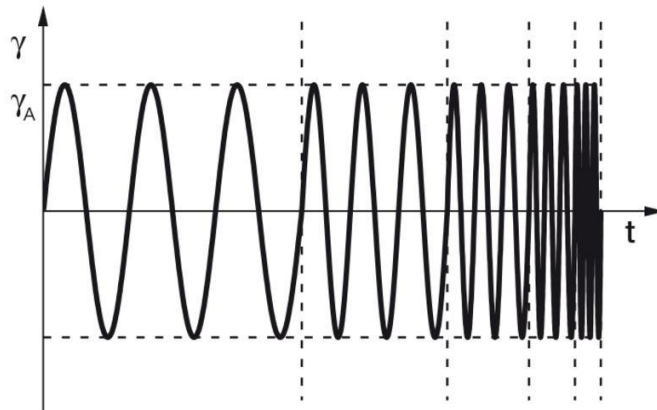


Abbildung 7.9: Frequenztest (mit Deformationsvorgabe) [20]

Ziel dieses Versuchs ist es, das Verhältnis zwischen Schubspannung  $\tau$  und Deformation  $\gamma$  des sogenannten Schubmoduls  $G$  im linear elastischen Bereich zu messen. Dieses liefert eine Aussage über die Steifigkeit der Messprobe. [12]

Dazu werden die ausgestanzten Beläge mit einem Durchmesser von 25 mm nacheinander auf eine feststehende ebene Platte gelegt. Das Messsystem PP25 wird in die Messposition gebracht und führt eine oszillierende Bewegung auf der Oberfläche des Belags aus. Während des Versuchs ist die Haube der Peltier-Temperatureinheit geschlossen. Normalkraft, Deformation, Kreisfrequenz und Temperatur werden vom Anwender als Parameter eingegeben, während Normalkraft, Deformation und Temperatur beim Scherprozess konstant bleiben.

### 7.3.2 Vorversuch Amplitudentest

Vor Beginn des Frequenztests wird zunächst ein Amplitudentest an einem beliebigen Tischtennisschläger-Belag durchgeführt. Ziel des Amplitudentests ist es, den linearen viskoelastischen (LVE-) Bereich zu bestimmen. Abgesehen von den Parametern ist das Prüfverfahren identisch mit dem Frequenztest.

Wie in Abbildung 7.10 dargestellt, wird die Probe mit zunehmender Amplitude belastet. Die Frequenz wird während des Versuchs konstant gehalten. Die maximale Auslenkung oder die

maximale Schubspannung kann als Amplitude am Rheometer gewählt werden. Als Deformation wird der Bereich von  $\gamma = 0,01\%$ ...  $\gamma = 100\%$  durchlaufen.

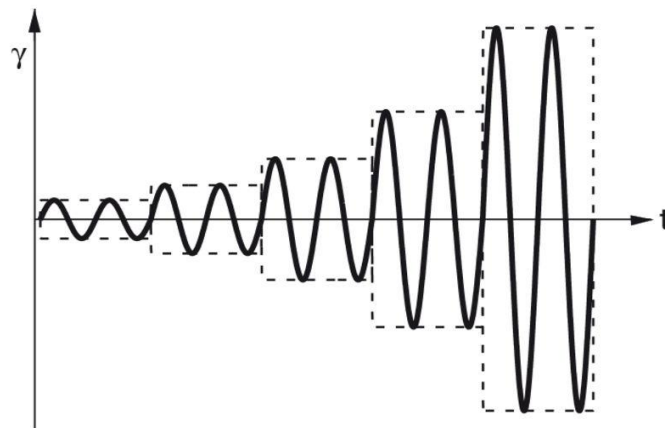


Abbildung 7.10: Amplitudentest (mit Deformationsvorgabe) [21]

Sowohl die LVE als auch die nachfolgende Änderung der Struktur der Probe werden aufgezeichnet. Während des Versuchs werden das Speichermodul  $G'$  und das Verlustmodul  $G''$  gemessen und in einem Diagramm über die Deformation aufgezeichnet. Im Bereich der geringen Verformungen sind  $G'$  und  $G''$  zunächst konstant, dies ist die LVE. Das Ende der LVE ist erreicht, sobald die Graphen für  $G'$  und  $G''$  fallen bzw. steigen.

Für den Amplitudentest wird der Belag Flexxon soft verwendet. Jede der 3 Proben wird einmal gemessen. Das Ergebnis ist in Abbildung 7.11 dargestellt:

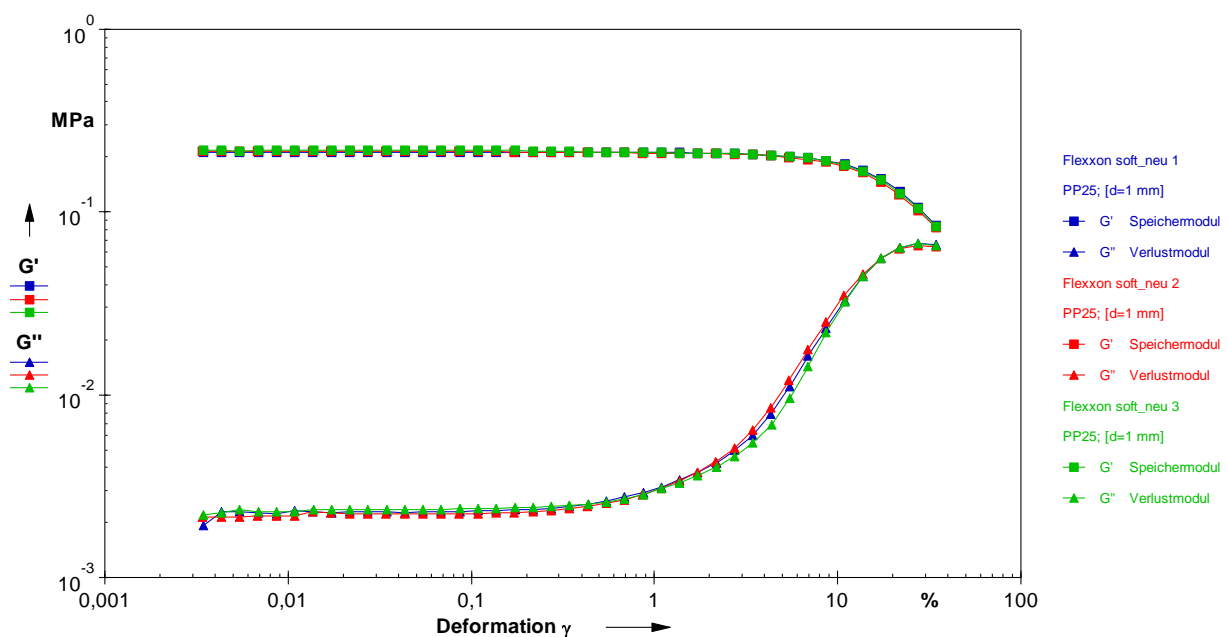


Abbildung 7.11: Amplitudentest Flexxon soft

In Abbildung 7.11 ist deutlich zu sehen, dass das Speichermodul  $G'$  und das Verlustmodul  $G''$  bei sehr kleinen Amplituden, im LVE-Bereich, jeweils einen konstanten Plateauwert aufweisen. Ab einem Deformationswert von 0,2 % wird der LVE-Bereich überschritten und die Graphen für  $G'$  und  $G''$  beginnen zu fallen bzw. zu steigen.

Betrachtet man das Material nach dem Test, lassen sich jedoch keine signifikanten Veränderungen in der Struktur der Probe feststellen. Ein möglicher Grund für die fallenden oder steigenden Graphen ist, dass das Material ab einem Deformationswert von 0,2 % zu rutschen beginnt.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wird für den Frequenzversuch ein Deformationswert von 0,1 % gewählt.

### 7.3.3 Versuchsparameter

Für den Frequenzversuch wurden folgende Versuchsparameter definiert:

- Normalkraft: 10 N
- Temperatur: 20°C
- Deformation:  $\gamma = 0,1$  % (aus Amplitudentest)
- Kreisfrequenz  $\omega$ : 100–0,1 rad/s (logarithmisch)
- Die 3 Proben der einzelnen Schlägerbeläge werden jeweils einmal gemessen.
- Die Versuche werden mit der Temperaturkammer durchgeführt.

### 7.3.4 Durchführung des Frequenzversuchs

Der Frequenzversuch wird zunächst, wie in Abbildung 7.12 dargestellt, in 2 Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt dient zur Stabilisierung der Parameter und wird nicht aufgezeichnet. Die Abschnittsdauer beträgt 5 Minuten. Der zweite Abschnitt enthält 31 Messpunkte ohne Zeitvorgabe und wird während des Versuchs aufgezeichnet.

Einfügen    Anhängen    Löschen...			
<b>MCR300</b> PP25		1  10 Pkt. 30 s	2  31 Pkt.
	Rotation $\dot{\gamma}, n, \varphi, \gamma$		
	Rotation $\tau, M$		
	Oszillation $\varphi, \gamma$		$\gamma$ 0,1 % $\omega$ 100..0,1 rad/s
	Oszillation $\tau, M$		
	$F_N$	$F_N$ 10 N	
	$d, v, d/d$		
<b>H-PTD 150</b>	Zusatz1 T	T 20 °C	T 20 °C
<b>Julabo FP50</b>	Zusatz2 T	T 25 °C	T 25 °C

Abbildung 7.12: Messprofil Frequenzversuch

Nach Festlegung des Messprofils werden die Parameter für Normalkraft, Temperatur, Deformation und Kreisfrequenz in den jeweiligen Abschnittseinstellungen eingegeben. Hierbei ist zu beachten, dass die Kreisfrequenz logarithmisch verläuft.

Zwischen der Temperaturanzeige T1 (Peltier-Temperatureinheit) und T2 (Kälte-Umwälzthermostat) besteht eine Temperaturdifferenz mit einem Delta von 5°C.

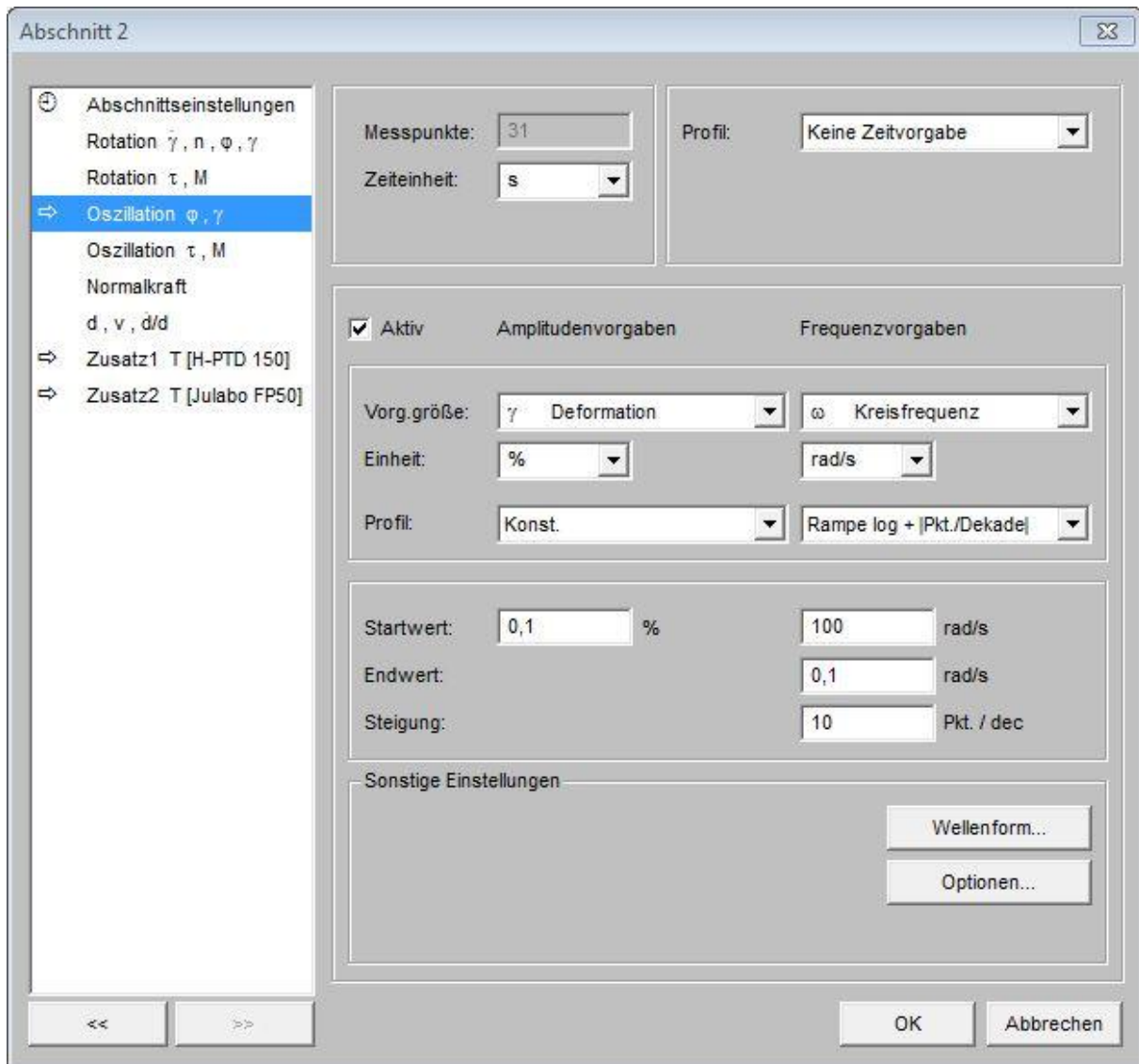


Abbildung 7.13: Abschnitt 2, Frequenzversuch

Nach Eingabe der Parameter wird die Messung gestartet. Während der Messung werden die Kreisfrequenz und die Schubspannung gemessen, aus denen das Schubmodul in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz bestimmt werden kann. Die Datenaufzeichnung und die daraus ermittelten rheologischen Kenngrößen werden von der RheoPlus-Software in Form einer Tabelle ausgegeben.



Messpkt.	Normalkraft	Kreisfrequenz	Deformation	Schubspannung	Speichermodul	Verlustmodul	Betrag(Schubmodul)	Verlustfaktor	Auslenkwinkel	Moment
	[N]	[rad/s]	[%]	[Pa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[t]	[mrad]	[µNm]
1	9,64	100	0,09764	571	583	39,3	584	0,0673	0,2451	1.810
2	9,63	79,4	0,09743	563	577	38	578	0,0658	0,2445	1.780
3	9,63	63,1	0,09728	557	571	36,8	572	0,0644	0,2442	1.760
4	9,63	50,1	0,09749	554	567	35,6	568	0,0629	0,2447	1.750
5	9,62	39,8	0,09764	550	562	34,6	563	0,0614	0,2451	1.740
6	9,61	31,6	0,09772	546	558	33,5	559	0,0601	0,2453	1.730
7	9,61	25,1	0,09777	542	554	32,5	554	0,0588	0,2454	1.710
8	9,61	20	0,09779	538	549	31,6	550	0,0576	0,2454	1.700
9	9,6	15,8	0,0978	534	545	30,8	546	0,0564	0,2455	1.690
10	9,59	12,6	0,09781	530	541	30	542	0,0554	0,2455	1.680
11	9,58	10	0,09782	526	537	29,2	538	0,0543	0,2455	1.660
12	9,58	7,94	0,09783	523	534	28,5	534	0,0533	0,2455	1.650
13	9,57	6,31	0,09784	519	530	27,8	531	0,0525	0,2456	1.640
14	9,55	5,01	0,09786	516	526	27,2	527	0,0516	0,2456	1.630
15	9,55	3,98	0,09787	513	523	26,5	524	0,0507	0,2456	1.620
16	9,53	3,16	0,09788	509	520	26	520	0,05	0,2457	1.610
17	9,51	2,51	0,0979	506	517	25,4	517	0,0492	0,2457	1.600
18	9,5	2	0,09791	503	514	24,9	514	0,0485	0,2457	1.590
19	9,48	1,58	0,09792	501	511	24,4	511	0,0478	0,2458	1.580
20	9,46	1,26	0,09793	498	508	24	508	0,0472	0,2458	1.580
21	9,44	1	0,09794	495	505	23,6	506	0,0467	0,2458	1.570
22	9,41	0,794	0,09795	493	503	23,2	503	0,0461	0,2458	1.560
23	9,38	0,631	0,09796	490	500	22,9	501	0,0457	0,2459	1.550
24	9,36	0,501	0,09797	488	498	22,5	498	0,0453	0,2459	1.540
25	9,32	0,398	0,09798	486	495	22,2	496	0,0448	0,2459	1.540
26	9,27	0,316	0,09799	484	493	21,9	494	0,0443	0,2459	1.530
27	9,23	0,251	0,098	482	491	21,7	492	0,0441	0,246	1.520
28	9,17	0,2	0,098	480	489	21,3	490	0,0436	0,246	1.520
29	9,11	0,158	0,09801	478	488	21,1	488	0,0432	0,246	1.510
30	9,03	0,126	0,09802	477	486	20,7	486	0,0427	0,246	1.510
31	8,96	0,1	0,09802	475	484	20,5	485	0,0424	0,246	1.500

Abbildung 7.14: Datenaufzeichnung Frequenzversuch

Nachdem die einzelnen Schlägerbeläge mit den jeweiligen 3 Proben gemessen wurden, wird aus den 3 Proben mithilfe der RheoPlus-Software der Mittelwert berechnet. Anschließend werden die untersuchten Beläge in einem Diagramm dargestellt.

### 7.3.5 Ergebnisse des Frequenzversuchs

Alle Messschriebe für die jeweiligen Proben der einzelnen Beläge sind in Anhang A3 enthalten.

Abbildung 7.15 zeigt die Mittelwertkurven der einzelnen Schlägerbeläge. Dargestellt sind die Schubmodule in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz.

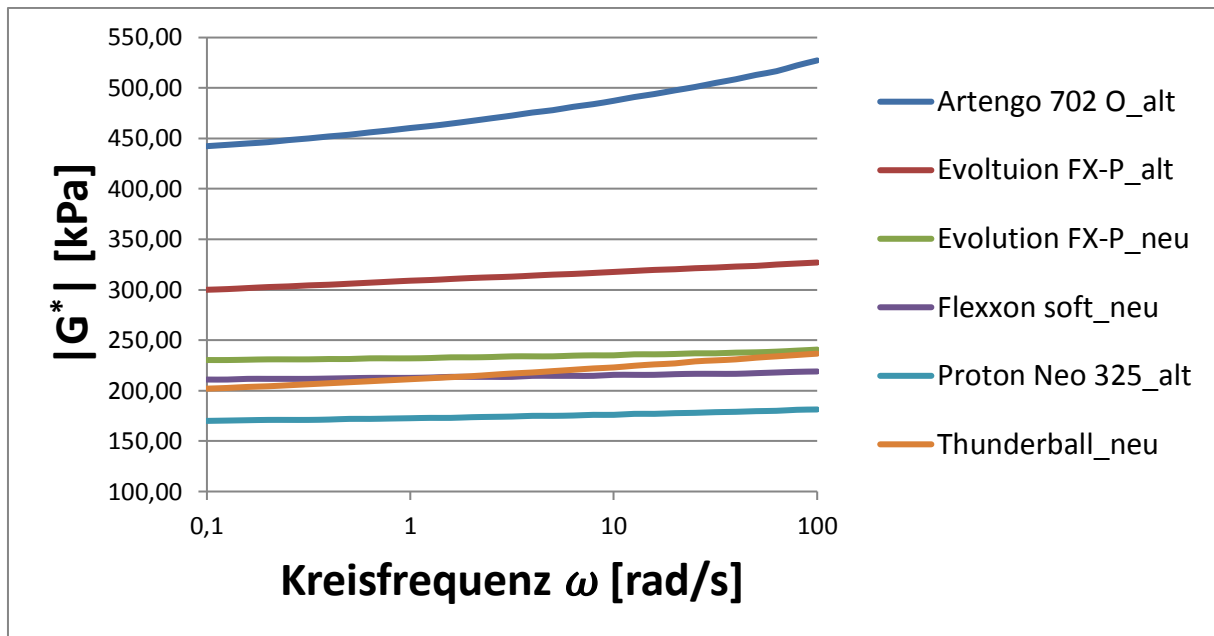


Abbildung 7.15: Frequenzversuch

Aus dieser Testreihe ist ersichtlich, dass alle Steifigkeitswerte der Beläge mit Ausnahme von Flexxon soft einen Anstieg bei Erhöhung der Kreisfrequenz zeigen. Ein schneller Anstieg ist insbesondere bei Artengo 702 O, Evolution FX-P alt und Thunderball gut zu sehen. Weiterhin ist erkennbar, dass bei Artengo im Vergleich zu den anderen Belägen die Steifigkeit deutlich höher ist, was sich mit der vom Belaganbieter angegebenen Härte deckt. Darüber hinaus weist der alte Evolution FX-P-Belag höhere Steifigkeitswerte auf als der neue.

## **7.4 Schubmodul in Abhängigkeit von der Temperatur**

### **7.4.1 Versuchsbeschreibung**

In diesem Versuch geht es darum, die Steifigkeit der jeweiligen Beläge bei unterschiedlichen Temperaturen miteinander zu vergleichen. Abgesehen von den Parametern ist das Prüfverfahren identisch mit dem Frequenztest. Diesmal werden Normalkraft, Deformation und Kreisfrequenz als konstante Parameter gewählt, während die Temperatur im Laufe der Prüfung kontinuierlich ansteigt.

### **7.4.2 Versuchsparameter**

Folgende Versuchsparameter wurden festgelegt:

- Normalkraft: 10 N
- Temperatur: 10–40°C
- Deformation:  $\gamma = 0,1 \%$  (aus Amplitudentest)
- Kreisfrequenz  $\omega$ : 10 rad/s (logarithmisch)
- Die 3 Proben der einzelnen Schlägerbeläge werden jeweils einmal gemessen.
- Die Versuche werden mit der Temperaturkammer durchgeführt.

### **7.4.3 Durchführung des Temperaturversuchs**

Wie in Abbildung 7.16 dargestellt, ist der Temperaturversuch ebenfalls in 2 Abschnitte unterteilt. Der erste Abschnitt wird wie bei den vorherigen Tests zur Stabilisierung der Parameter verwendet und nicht aufgezeichnet. Der zweite Abschnitt enthält insgesamt 31 Messpunkte mit einer Messdauer von 1 Minute. Die gesamte Abschnittsdauer beträgt 31 Minuten und wird während des Versuchs aufgezeichnet.

Einfügen    Anhängen    Löschen...			
<b>MCR300</b> PP25		1  5 Pkt. 15 s	2  31 Pkt. 1 min
	Rotation $\dot{\gamma}, n, \varphi, \gamma$		
	Rotation $\tau, M$		
	Oszillation $\varphi, \gamma$		$\gamma$ 0,1 % $\omega$ 10 rad/s
	Oszillation $\tau, M$		
	$F_N$	$F_N$ 10 N	
	$d, v, d/d$		
<b>H-PTD 150</b>	Zusatz1 T	T 10 °C	T 10..40 °C
<b>Julabo FP50</b>	Zusatz2 T	T 25 °C	T 25 °C

Abbildung 7.16: Messprofil Temperaturversuch

Im Gegensatz zum Frequenzversuch wird diesmal die Kreisfrequenz als konstant eingestellt. Die Normalkraft bleibt wie bei der ersten Prüfung unverändert, während die Temperatur linear von 10 auf 40°C ansteigt.

The screenshot shows the 'Abschnitt 2' configuration window. On the left is a tree view with the following items: 'Abschnittseinstellungen', 'Rotation  $\dot{\gamma}$ ,  $n$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$ ', 'Rotation  $\tau$ ,  $M$ ', 'Oszillation  $\phi$ ,  $\gamma$ ', 'Oszillation  $\tau$ ,  $M$ ', 'Normalkraft', 'd, v, d/d', 'Zusatz1 T [H-PTD 150]' (highlighted), and 'Zusatz2 T [Julabo FP50]'. The main area is divided into sections: 'Dauer' (Duration) with 'Messpunkte: 31', 'Zeiteinheit: min', 'Profil: Konst. Messpunktdauer', 'Messpunkt: 1 min', and 'Abschnitt: 31 min'; a section with a checked 'Aktiv' checkbox and 'Vorg.größe: T Temperatur', 'Einheit: °C', and 'Profil: Rampe lin'; a section with 'Startwert: 10 °C' and 'Endwert: 40 °C'; and a 'Sonstige Einstellungen' section with an 'Optionen...' button. Navigation buttons '<<' and '>>' are at the bottom left, and 'OK' and 'Abbrechen' are at the bottom right.

Abbildung 7.17: Abschnitt 2, Temperaturversuch

Nach Eingabe der Parameter wird die Messung gestartet. Während der Messung werden die Temperatur und die Schubspannung gemessen, aus diesen Messwerten kann das Schubmodul in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden. Die Datenaufzeichnung und die daraus ermittelten rheologischen Kenngrößen werden von der RheoPlus-Software in Form einer Tabelle ausgegeben.

Messpkt.	Temperatur	Kreisfrequenz	Deformation	Schubspannung	Speichermodul	Verlustmodul	Betrag(Schubmodul)	Verlustfaktor	Auslenkwinkel	Moment
	[°C]	[rad/s]	[%]	[Pa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[1]	[mrad]	[µNm]
1	9,99	10	0,0977	521	533	32	534	0,0601	0,2442	1.650
2	11	10	0,0977	522	533	31,7	534	0,0595	0,2442	1.650
3	12	10	0,0977	521	532	31,3	533	0,0589	0,2442	1.650
4	13	10	0,09771	520	531	30,9	532	0,0581	0,2442	1.640
5	14	10	0,09771	518	529	30,5	530	0,0576	0,2442	1.640
6	15	10	0,09772	516	527	30	528	0,057	0,2442	1.630
7	16	10	0,09773	514	526	29,6	526	0,0563	0,2443	1.630
8	17	10	0,09773	513	524	29,2	524	0,0558	0,2443	1.620
9	18	10	0,09774	511	522	28,8	522	0,0553	0,2443	1.620
10	19	10	0,09775	509	519	28,4	520	0,0548	0,2443	1.610
11	20	10	0,09775	507	517	28,1	518	0,0543	0,2443	1.600
12	21	10	0,09776	505	515	27,7	516	0,0538	0,2444	1.600
13	22	10	0,09776	503	513	27,4	514	0,0534	0,2444	1.590
14	23	10	0,09776	501	512	27,1	512	0,053	0,2444	1.580
15	24	10	0,09777	499	510	26,7	511	0,0524	0,2444	1.580
16	25	10	0,09777	498	509	26,5	510	0,052	0,2444	1.580
17	26	10	0,09777	497	508	26,1	509	0,0514	0,2444	1.570
18	27	10	0,09777	496	507	25,8	508	0,0509	0,2444	1.570
19	28	10	0,09778	495	506	25,5	506	0,0503	0,2445	1.570
20	29	10	0,09778	494	505	25,3	506	0,05	0,2445	1.560
21	30	10	0,09778	494	504	24,9	505	0,0494	0,2445	1.560
22	31	10	0,09778	493	504	24,6	504	0,0488	0,2445	1.560
23	32	10	0,09778	492	503	24,3	503	0,0483	0,2445	1.560
24	33	10	0,09778	491	502	23,9	502	0,0477	0,2445	1.550
25	34	10	0,09778	490	501	23,6	502	0,0472	0,2445	1.550
26	35	10	0,09779	490	500	23,4	501	0,0468	0,2445	1.550
27	36	10	0,09778	489	500	23,1	500	0,0462	0,2445	1.550
28	37	10	0,09778	488	499	22,8	499	0,0457	0,2445	1.540
29	38	10	0,09779	487	498	22,5	499	0,0452	0,2445	1.540
30	39	10	0,09779	487	497	22,2	498	0,0447	0,2445	1.540
31	40	10	0,09779	486	496	22	497	0,0443	0,2445	1.540

Abbildung 7.18: Datenaufzeichnung Temperaturversuch

Nach der Messung der einzelnen Tischtennisschläger-Beläge mit den jeweiligen 3 Proben wird der Mittelwert mithilfe der RheoPlus-Software berechnet. Anschließend werden die Werte der untersuchten Beläge in einem Diagramm dargestellt.

#### 7.4.4 Ergebnisse des Temperaturversuchs

Alle Messschriebe für die jeweiligen Proben der einzelnen Beläge sind in Anhang A4 enthalten.

Abbildung 7.19 zeigt die Mittelwertkurven der einzelnen Schlägerbeläge. Die Schubmodule werden in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

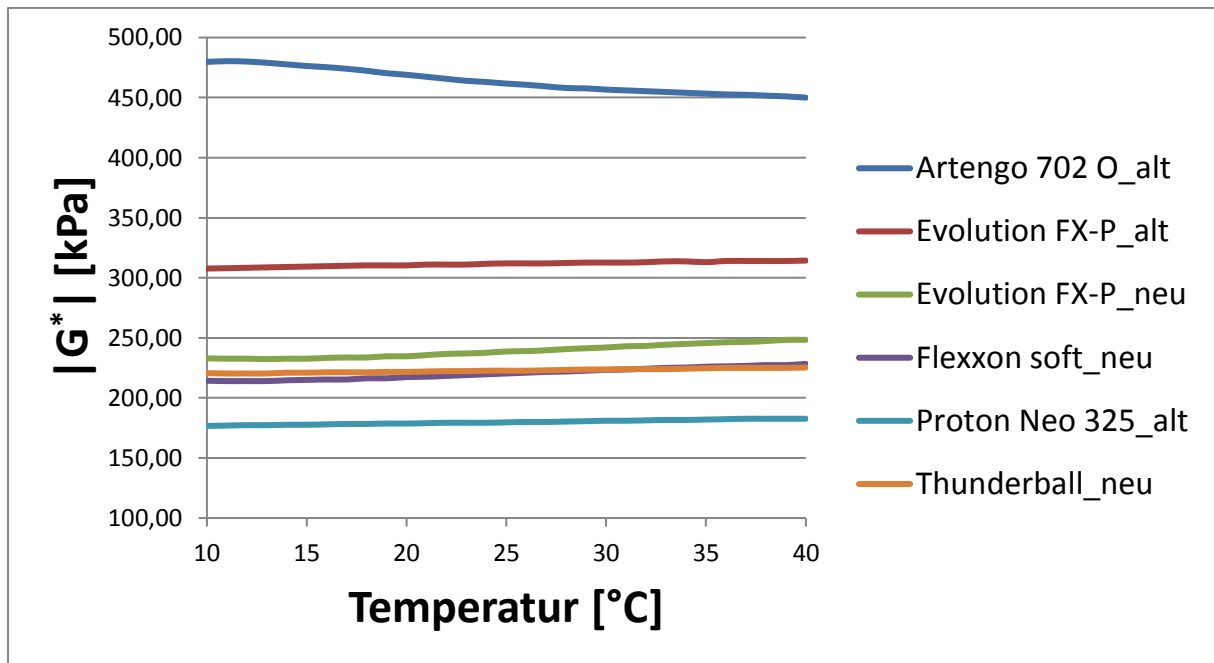


Abbildung 7.19: Temperaturversuch

Wie in Abbildung 7.15 sind auch hier ähnliche Größenordnungen der Schubmodule und somit der Steifigkeit zu sehen. Insbesondere bei Artengo 702 O ist bei zunehmender Temperatur ein Gefälle des Schubmoduls auffallend. Bei den anderen Belägen ist dagegen ein nahezu konstantes Steifigkeitsverhalten zu erkennen.

## 7.5 Druckversuch

### 7.5.1 Versuchsbeschreibung

In diesem Versuch besteht die Aufgabe darin, die verschiedenen Schlägerbeläge auf ihre Festigkeit hin zu untersuchen und miteinander zu vergleichen. Wie in den beiden vorangegangenen Tests wird zu diesem Zweck das Platte/Platte-Messsystem PP25 eingesetzt.

Auch hier werden die ausgestanzten Beläge mit einem Durchmesser von 25 mm nacheinander auf eine feststehende ebene Platte gelegt und das Messsystem PP25 wird in die Messposition gebracht. Das Material wird dann mit zunehmender Normalkraft belastet. Nach Erreichen der eingestellten Maximalkraft wird das Messsystem mit konstanter Geschwindigkeit wieder hochgefahren. Sowohl beim Be- als auch beim Entlasten des Materials wird gleichzeitig der Spaltabstand zwischen den beiden Platten gemessen.

Während des Versuchs ist die Haube der Peltier-Temperatureinheit geschlossen. Normalkraft, Temperatur und Geschwindigkeit werden vom Anwender als Parameter eingegeben, während Temperatur und Geschwindigkeit beim Druckversuch konstant bleiben.

### 7.5.2 Versuchsparameter

Folgende Versuchsparameter wurden definiert:

- Normalkraft: 1–20 N
- Temperatur: 20 bzw. 40°C
- Nach Erreichen der Maximalkraft wird das Messsystem mit konstanter Geschwindigkeit  $v = -0,1 \frac{mm}{s}$  hochgefahren
- Die 3 Proben der einzelnen Schlägerbeläge werden jeweils einmal bei 20°C gemessen, anschließend wird der Test bei 40°C für 3 Beläge wiederholt.
- Die Versuche werden mit der Temperaturkammer durchgeführt.

### 7.5.3 Durchführung des Druckversuchs

Um den Druckversuch durchführen zu können, wird der Test zunächst in 3 Abschnitte unterteilt, wie in Abbildung 7.20 dargestellt.

Der erste Abschnitt enthält 300 Messpunkte mit einer Messpunktdauer von 1 Sekunde. Wie in der Abbildung zu sehen ist, wird dieser Abschnitt zur Stabilisierung der Parameter verwendet und nicht aufgezeichnet. Im zweiten Abschnitt wird das Material belastet. Für diesen Prozess werden 200 Messpunkte ausgewählt, die Messpunktdauer beträgt wie im vorherigen Abschnitt ebenfalls 1 Sekunde. Im letzten Abschnitt wird das Material entlastet. Für die Entlastung



werden insgesamt 100 Messpunkte mit einer Messpunktdauer von 0,1 Sekunden ausgewählt. Die Abschnitte zwei und drei werden mit dem Rheometer aufgezeichnet.

Einfügen    Anhängen    Löschen...				
		1  300 Pkt. 1 s	2  200 Pkt. 1 s	3  100 Pkt. E  0,1 s
MCR300 PP25	Rotation $\gamma, n, \varphi, \gamma$			
	Rotation $\tau, M$			
	Oszillation $\varphi, \gamma$			
	Oszillation $\tau, M$			
	$F_N$	$F_N$ 1 <input type="text"/> N	$F_N$ 1..20 <input type="text"/> N	
	$d, v, \dot{d}$			$v$ -0,1 <input type="text"/> mm/s
	H-PTD 150	Zusatz1 T	T 20 <input type="text"/> °C	T 20 <input type="text"/> °C
Julabo FP50	Zusatz2 T	T 30 <input type="text"/> °C	T 30 <input type="text"/> °C	T 30 <input type="text"/> °C

Abbildung 7.20: Messprofil Druckversuch

Die Parameter Normalkraft, Temperatur und Geschwindigkeit werden anschließend in die jeweiligen Abschnittseinstellungen eingetragen. Für eine kontinuierliche Belastung des Materials wird in Abschnitt 2 die Normalkraft so eingestellt, dass sie linear von 1 bis 20 N ansteigt.

Abschnitt 2

Abschnitteinstellungen

- Rotation  $\dot{\gamma}$ ,  $n$ ,  $\phi$ ,  $\gamma$
- Rotation  $\tau$ ,  $M$
- Oszillation  $\phi$ ,  $\gamma$
- Oszillation  $\tau$ ,  $M$
- ⇒ Normalkraft**
- d, v, d/d
- ⇒ Zusatz1 T [H-PTD 150]
- ⇒ Zusatz2 T [Julabo FP50]

Messpunkte: 200

Zeiteinheit: s

Dauer

Profil: Konst. Messpunktdauer

Messpunkt: 1 s

Abschnitt: 200 s

Aktiv

Vorg.größe:  $F_N$  Normalkraft

Einheit: N

Profil: Rampe lin

Startwert: 1 N

Endwert: 20 N

Sonstige Einstellungen

Optionen...

<< >> OK Abbrechen

Abbildung 7.21: Abschnitt 2, Druckversuch

Nach Eingabe der Parameter kann die Messung gestartet werden. Wie bereits in der Versuchsbeschreibung erwähnt, wird der Spaltabstand zwischen den beiden Platten in Abhängigkeit von der Normalkraft während der Messung beim Be- und Entlasten des Materials gemessen. Die Messwerte werden von der RheoPlus-Software erfasst und in Form einer Tabelle ausgegeben.

Messpkt.	Normalkraft [N]	Geschwindigkeit [µm/s]	Spaltabstand [mm]
1	0,938	0	3,448
2	0,937	0	3,448
3	0,938	0	3,448
4	0,937	0	3,448
5	0,937	0	3,448
6	0,937	0	3,448
7	0,937	0	3,448
8	0,937	0	3,448
9	0,938	0	3,448
10	0,938	0	3,448
11	0,937	0	3,448
12	0,938	0	3,448
13	0,938	0	3,448
14	0,938	0	3,448
15	0,938	0	3,448
16	1,1	10	3,441
17	1,3	10	3,431
18	1,53	10	3,421
19	1,84	10	3,411
20	2,28	9,96	3,401
21	2,75	3,83	3,394
22	2,8	0	3,392
23	2,76	0	3,392
24	2,74	0	3,392
25	2,73	0	3,392
26	2,71	0	3,392
27	2,71	0	3,392
28	2,7	0	3,392
29	2,68	0	3,392
30	2,68	0	3,392
31	2,67	0	3,392
32	2,67	0	3,392

Abbildung 7.22: Belastung des Materials

Messpkt.	Normalkraft [N]	Geschwindigkeit [µm/s]	Spaltabstand [mm]
1	18,1	-100	3,243
2	16,5	-100	3,252
3	15,2	-100	3,261
4	13,8	-100	3,271
5	12,5	-100	3,28
6	11,3	-100	3,29
7	10	-100	3,299
8	8,81	-100	3,309
9	7,58	-100	3,318
10	6,4	-100	3,328
11	5,22	-100	3,337
12	4,01	-100	3,347
13	2,84	-100	3,356
14	1,66	-100	3,366
15	0,605	-100	3,375
16	-0,399	-100	3,385
17	-1	-100	3,394
18	-1,22	-100	3,404
19	-1,11	-100	3,414
20	-0,765	-100	3,425
21	-0,563	-100	3,434
22	-0,428	-100	3,445
23	-0,376	-100	3,454
24	-0,209	-100	3,464
25	-0,0441	-100	3,474
26	-0,0359	-100	3,485
27	-0,037	-100	3,494
28	-0,0355	-100	3,504
29	-0,032	-100	3,514
30	-0,0335	-100	3,525
31	-0,0371	-100	3,534
32	-0,0369	-100	3,545

Abbildung 7.23: Entlastung des Materials

Nach der Messung der einzelnen Schlägerbeläge mit jeweils 3 Proben werden für diese die Steigungen zwischen Spaltabstand und Normalkraft berechnet, um eine Aussage über die Festigkeit machen zu können. Um möglichst eine gerade Kurve auswerten zu können, wird die Entlastungskurve der jeweiligen Proben berücksichtigt. Weiterhin wird die Gerade mithilfe der RheoPlus-Software, wie in Abbildung 7.23 dargestellt, auf den Bereich 3 bis 16N begrenzt. Nach Abgrenzung der Geraden wird aus den Proben der jeweiligen Beläge der Mittelwert

gebildet und daraus die Steigung berechnet. Anschließend werden die Steigungen zwischen Spaltabstand und Normalkraft für die jeweiligen Beläge in einem Balkendiagramm dargestellt.

#### 7.5.4 Ergebnisse des Druckversuchs

Alle Messschriebe für die jeweiligen Proben der einzelnen Beläge sind in Anhang A5 enthalten.

Die Abbildungen 7.24 und 7.25 zeigen die Festigkeiten der verschiedenen Tischtennisschläger-Beläge. In der ersten Abbildung sind die Steigungen zwischen dem Spaltabstand und der Normalkraft bei 20°C dargestellt, in der darauf folgenden Abbildung 3 Beläge einmal bei 20 und einmal bei 40°C.

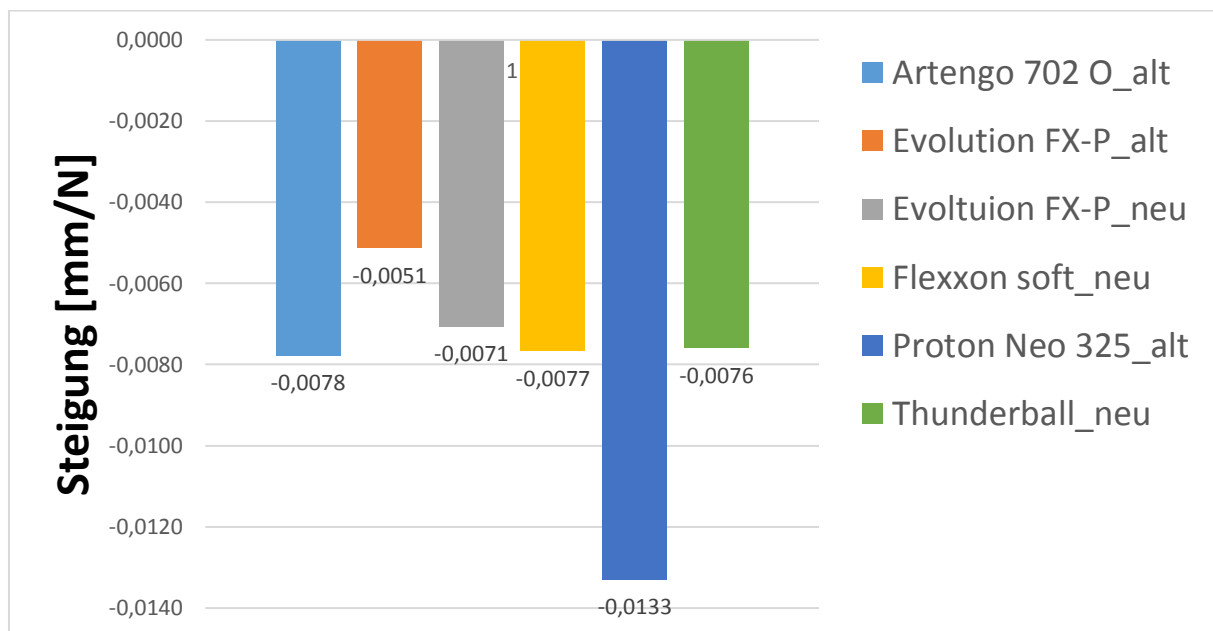


Abbildung 7.24: Druckversuch bei 20°C

In dem Diagramm ist zu sehen, dass eine Stauchung aller Beläge auftritt. Es ist erkennbar, dass die Stauchung beim Proton Neo 325 im Vergleich zu den anderen Belägen deutlich höher ist und beim Evolution FX-P alt am niedrigsten. Die übrigen Beläge weisen nahezu ein ähnliches Druckverhalten auf.

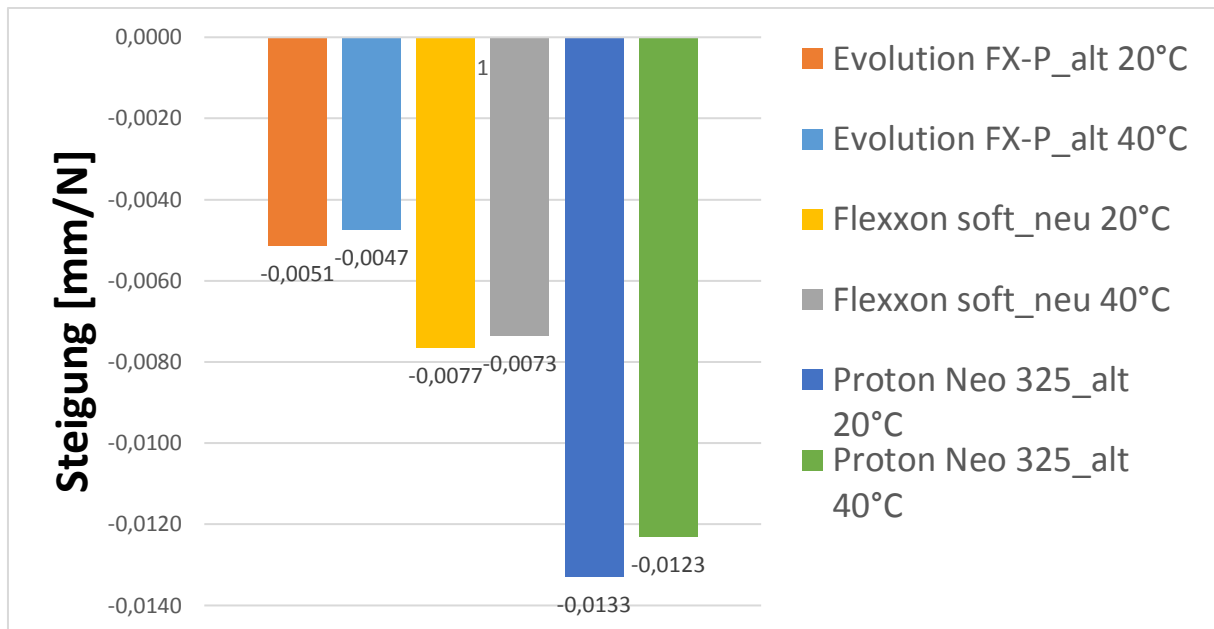


Abbildung 7.25: Druckversuch bei 20 bzw. 40 °C

Neben dem Druckversuch bei 20°C wurden als Bezug auch Versuche für ausgewählte Beläge bei 40°C durchgeführt. Schnell auffallend ist eine leichte Abnahme der Steigung bei 40°C.

## 8 Interpretation der durchgeführten Versuche

Im Allgemeinen waren die Ergebnisse der durchgeführten Versuche für die verschiedenen Tischtennisschläger-Beläge sehr aufschlussreich und haben wichtige Erkenntnisse und Aussagen für weitere Versuche geliefert.

Im Rotationsversuch, bei dem der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Gleitgeschwindigkeit untersucht wurde, zeigte sich sehr schnell, dass die Reibungskoeffizienten der Beläge mit zunehmender Gleitgeschwindigkeit bis auf eine Ausnahme deutlich anstiegen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die rheologische Eigenschaft des Obergummis sein.

Diese formfesten, aber elastisch verformbaren Kunststoffe werden als Elastomere bezeichnet. Die beiden wichtigsten Eigenschaften von Elastomeren sind ein extrem niedriges Elastizitätsmodul und eine extrem hohe Verformbarkeit. Elastomere bestehen aus Polymermolekülen. Dabei handelt es sich um sehr lange Polymerketten. Entlang dieser Ketten sind die einzelnen Kettenelemente gegeneinander drehbar. [22] „Im thermodynamischen Gleichgewichtszustand befinden sie sich in einem statistisch bevorzugten verknäulten Zustand. Wird an das Elastomer eine mechanische Spannung angelegt, so beginnen sich die Polymerketten zu entflechten. Wird das Elastomer entlastet, so relaxieren die Polymerketten wieder in den knäulartigen Zustand zurück. Um ein vollständiges Auseinanderlaufen der Ketten unter der Zugbelastung zu vermeiden, werden die Ketten bei Gummi durch Schwefelbrücken untereinander verbunden – diese Behandlung ist als Vulkanisation bekannt. Beim Zusatz von viel Schwefel bei der Vulkanisation entsteht Hartgummi, bei der Zugabe von wenig Schwefel Weichgummi.“ [22]

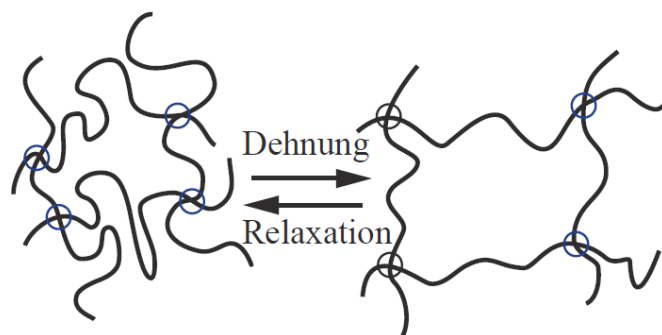


Abbildung 8.1: Schematische Darstellung der Änderung der Struktur eines Elastomers bei Dehnung [22]

Aus diesem Wissen lässt sich interpretieren, dass sich die Polymerketten zu lösen beginnen, sobald das Reibmaterial mit einer bestimmten Normalkraft in den Gummi eindringt und mit zunehmender Geschwindigkeit gleitet. Je schneller das Reibmaterial gleitet, desto größer ist dabei die innere Reibung. Die physikalische Ursache ist, dass die Polymerketten weniger Zeit

zum Entflechten haben und der Gummi wie ein „normaler Feststoff“ reagiert. [22] Dies könnte zu einer Erhöhung der Gummireibung führen.

Beim Artengo-Belag hingegen ist es möglich, dass der Obergummi durch die Zugabe eines hohen Schwefelanteils bei der Vulkanisation so hart ist, dass das Reibmaterial nicht wirklich in den Gummi eindringt und somit die Polymerketten nicht entflechten kann.

Die Arbeit von Grosch (1962) macht deutlich, dass die Gummireibung sehr eng mit der inneren Reibung im Gummi verbunden ist. Es wird angenommen, dass die Reibungseigenschaften von Elastomeren im Wesentlichen nicht durch ihre Oberflächeneigenschaften, sondern durch ihre Volumeneigenschaften bestimmt werden. [22]

Im Rotationsversuch, bei dem der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Gleitgeschwindigkeit untersucht wurde, zeigte sich dagegen, dass die Reibungskoeffizienten der Beläge mit steigender Temperatur bis auf eine Ausnahme deutlich abnahmen. Eine mögliche Erklärung hierfür könnten wieder die rheologischen Eigenschaften des Obergummis sein.

Elastomere zeichnen sich durch eine außerordentlich hohe Temperaturabhängigkeit aus und können sowohl elastisches als auch viskoses Verhalten aufweisen. [23] Bei niedrigen Temperaturen verlieren die Polymermoleküle ihre Flexibilität und sind weniger beweglich. [24] Dies könnte dazu führen, dass sich die innere Reibung und somit auch die Gummireibung erhöhen. Je wärmer aber das Material wird, desto höher wird die Beweglichkeit der Polymerketten. [24] Dies könnte das Entflechten der Kettenmoleküle erleichtern, was wiederum die Gummireibung beeinflusst.

Im Frequenzversuch, bei dem die Steifigkeit der verschiedenen Beläge in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz untersucht wurde, war deutlich erkennbar, dass alle Steifigkeitswerte bis auf eine Ausnahme einen Anstieg mit Erhöhung der Kreisfrequenz zeigten.

Auch hier könnten die vernetzten Polymerketten eine entscheidende Rolle spielen. Bei Elastomeren ist neben der Temperaturabhängigkeit die Frequenzabhängigkeit eine kennzeichnende Eigenschaft. [23] Bei niedrigen Frequenzen verhält sich das Material elastisch, je höher die Frequenz wird, desto fester wird das Material. [22]

Im Temperaturversuch, bei dem die Steifigkeit der jeweiligen Beläge bei unterschiedlichen Temperaturen und konstanter Kreisfrequenz verglichen wurde, zeigte sich, dass die Beläge mit Ausnahme des Artengo ein nahezu konstantes Steifigkeitsverhalten aufwiesen.

Dies steht im Widerspruch zu der Annahme, dass das Material mit steigender Temperatur weicher wird. Der Grund hierfür könnte sein, dass der Temperaturbereich für die jeweiligen Beläge zu niedrig gewählt wurde und sich daher in diesem Bereich keine Änderung zeigte.

Im Druckversuch, bei dem die Festigkeit der verschiedenen Schlägerbeläge getestet wurde, stellte sich schnell heraus, dass bei allen Belägen eine Stauchung auftrat. Eine weitere Erkenntnis war, dass bei hohen Temperaturen eine leichte Abnahme der Steigung und damit auch der Stauchung erfolgte, der Belag wurde fester.

Im Gegensatz zu den bisherigen Versuchen, bei denen die Eigenschaften des Obergummis wahrscheinlich der Hauptgrund für die Ergebnisse waren, könnte hier die Schwammunterlage des Belags eine entscheidende Rolle spielen. Die Schwämme haben alle einen unterschiedlichen Härtegrad, was zu unterschiedlichen Stauchungen der Beläge unter Krafteinwirkung führen kann. Darüber hinaus könnten die Schwämme bei hohen Temperaturen durch thermische Ausdehnung fester werden, was wiederum die Stauchung beeinträchtigen würde.



## 9 Fazit / Ausblick

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurden die Reibungs- und Elastizitätseigenschaften verschiedener Tischtennisschläger-Beläge am Rheometer systematisch untersucht. Zunächst wurden die theoretischen Grundlagen entwickelt, auf denen die experimentellen Untersuchungen basierten. Das Reibungs- und Elastizitätsverhalten der Beläge wurde mithilfe von Rotations-, Frequenz- und Druckversuchen beschrieben.

Als Untersuchungsgegenstand dienten 6 verschiedene Schlägerbeläge mit unterschiedlichen Eigenschaften, die von den jeweiligen Belaganbietern vorgegeben waren. Während der Tests wurden die Daten aufgezeichnet und miteinander verglichen.

Nach Auswertung der Messergebnisse kann gesagt werden, dass die Eigenschaften der Schlägerbeläge überwiegend bestätigt werden konnten. Jedoch gab es auch einige Unstimmigkeiten.

Darüber hinaus traten bei einigen Versuchen Probleme bei der Durchführung auf. So konnten beispielsweise bei den Reibungsversuchen einige Beläge nicht oder nur bis zu einem bestimmten Messpunkt gemessen bzw. ausgewertet werden. Grund hierfür war ein Überschwingen der Reibungskurve, da sich das Rheometer aufgrund übermäßiger Reibung ständig nachstellen musste. Eine mögliche Maßnahme wäre hier die Verwendung eines Reibmaterials mit einem geringeren Elastizitätsmodul, was eine geringere Flächenpressung bewirkt. Dadurch könnten bei gleicher Normalkraft niedrigere Reibungsverläufe erreicht werden.

Ein weiteres Problem war, dass bei einigen Belägen Messergebnisse mit einer relativen Standardabweichung von knapp 10% zwischen den einzelnen Proben erzielt wurden. Um dem entgegenzuwirken, könnten die Proben mehrmals gemessen werden, um eine Abweichung deutlich unter 10% sowie Reproduzierbarkeit zu erreichen. Eine weitere Möglichkeit wäre, in einigen Versuchen die Versuchsdauer oder die Messpunktdauer zu erhöhen, um genauere Ergebnisse zu ermitteln.

Abschließend ist zu erwähnen, dass die untersuchten Beläge als Ganzes betrachtet wurden, bestehend aus Obergummi, Noppen und Schaumstoff. Daher ist es nicht immer möglich, genau zu beurteilen, welche dieser Komponenten für die Messergebnisse ausschlaggebend sind. Hier wäre eine Möglichkeit, die Komponenten, aus denen ein Tischtennisschläger-Belag besteht, einzeln zu untersuchen.

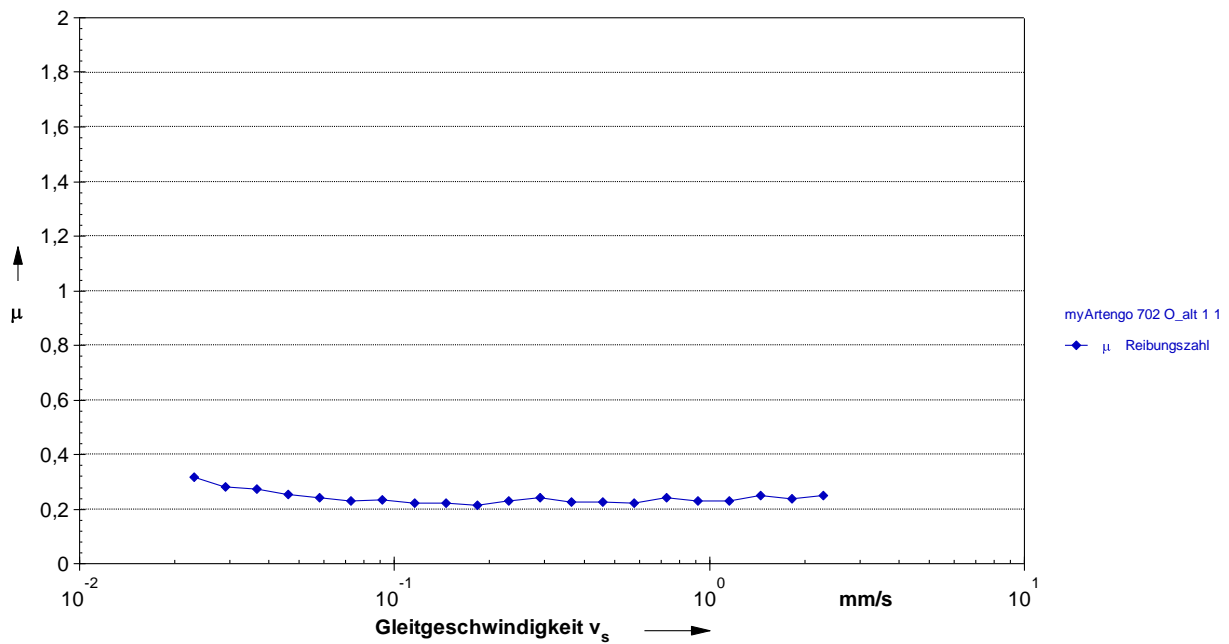
## 10 Literaturverzeichnis

- [1] „bttv-kreis-hassberge,“ [Online]. Available: <http://www.bttv-kreis-hassberge.de/tischtennis/historie-geschichte/>.
- [2] „tt-tipps,“ [Online]. Available: <http://www.tt-tipps.de/tischtennis-sport-geschichte>.
- [3] M. Arnold, In 13 Schritten zum eigenen Tischtennisschläger.
- [4] T. Matzke, „*Auswirkungen der Regeländerungen im Tischtennis unter besonderer Berücksichtigung der medialen Wirksamkeit des Sports*“, Magisterarbeit an der Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald, 2008.
- [5] „tischtennis-weblog,“ [Online]. Available: <http://tischtennis-weblog.de/der-tischtennisschlaeger-aufbau-und-grundlagen/>.
- [6] „tt-spin,“ [Online]. Available: <https://www.tt-spin.de/der-tischtennisbelag-hart-vs-weich/>.
- [7] „tt-ratgeber,“ [Online]. Available: <https://tt-ratgeber.de/tischtennis-belaege/>.
- [8] „esn-tt,“ [Online]. Available: <https://www.esn-tt.de/>.
- [9] K.-H. H. Horst Czichos, Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik 4. Auflage, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015.
- [10] P. D. h. c. D.-I. E. Uhlmann, „iwf.tu-berlin,“ [Online]. Available: [http://www.iwf.tu-berlin.de/uploads/media/WZM\\_II\\_VL\\_05\\_-\\_Tribologisches\\_Verhalten\\_von\\_Werkzeugmaschinen.pdf](http://www.iwf.tu-berlin.de/uploads/media/WZM_II_VL_05_-_Tribologisches_Verhalten_von_Werkzeugmaschinen.pdf).
- [11] E. Kuhn, Zur Tribologie der Schmierfette: Eine energetische Betrachtungsweise des Reibungs- und Verschleißprozesses 2. Auflage, Renningen: Expert Verlag, 2009.
- [12] T. G. Mezger, Das Rheologie Handbuch: Für Anwender von Rotations- und Oszillations-Rheometern 2. Auflage, Hannover: Vincentz Network, 2006.
- [13] W. J. Bartz, Einführung in die Tribologie und Schmierungstechnik, Renningen: Expert Verlag, 2010.
- [14] W. Rust, Nichtlineare Finite-Elemente-Berechnungen. Kontakt, Geometrie, Material. 2. Auflage, Vieweg+Teubner, 2011.
- [15] H.-D. T. (Hrsg.), Grundzüge der Lebensmitteltechnik. 3. Auflage, Hamburg: Behr's Verlag, 2004.

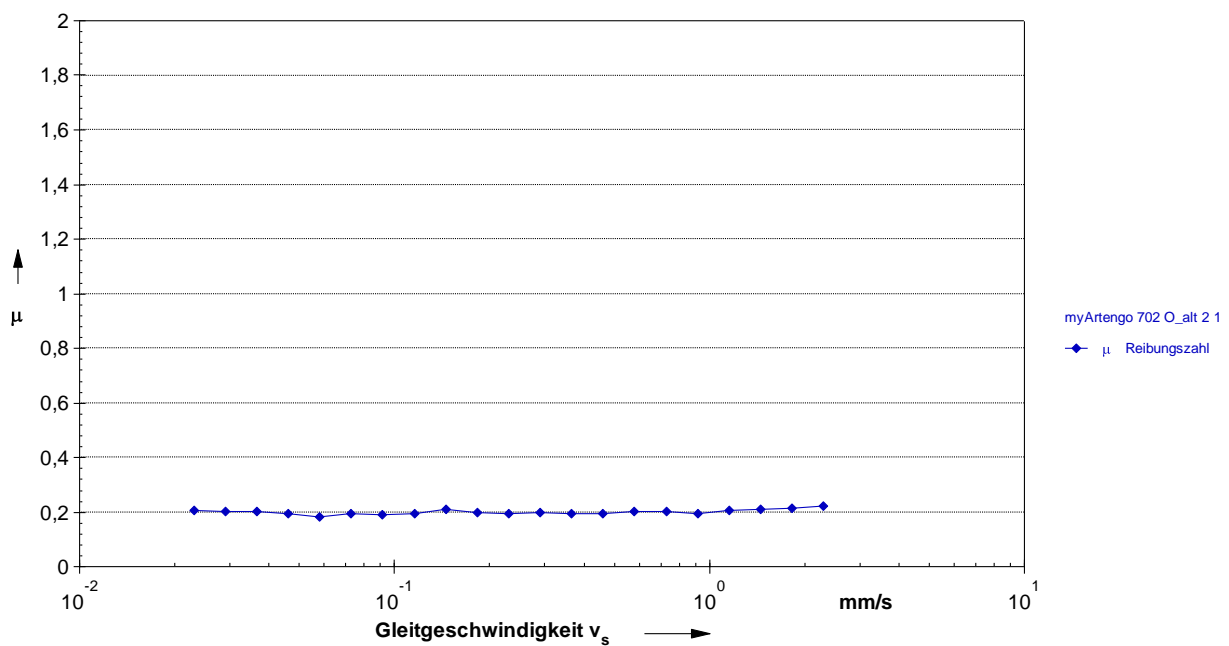
- [16] W. G. H.-M. L. Manfred Pahl, *Praktische Rheologie der Kunststoffe und Elastomere*. 4. Auflage, VDI-Verlag, 1995.
- [17] H. Meinhard, *Rheologische Untersuchungen zu Härteeindruckexperimenten im Nanometerbereich*, Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, 1999.
- [18] „anton-paar,“ [Online]. Available: <https://www.anton-paar.com/de/de/produkte/details/rheometer-mcr-102-302-502/>.
- [19] „anton-paar,“ [Online]. Available: <https://www.anton-paar.com/de/de/produkte/details/tribologie-messzelle-t-pid44/>.
- [20] „world-of-rheology,“ [Online]. Available: <http://www.world-of-rheology.com/de/glossar/entries/definition/frequenztests/>.
- [21] „world-of-rheology,“ [Online]. Available: <http://www.world-of-rheology.com/de/glossar/entries/definition/amplitudentests/>.
- [22] V. L. Popov, *Kontaktmechanik und Reibung, Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*, 3. Auflage, Springer Vieweg, 2015.
- [23] D.-I. M. Lindner, *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur Gummireibung an Profilklotzen und Dichtungen*, Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Universität Hannover, 2005.
- [24] „maschinenbau-wissen,“ [Online]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/werkstofftechnik/kunststoffe/84-elastomere>.

## Anhang: Messschriebe

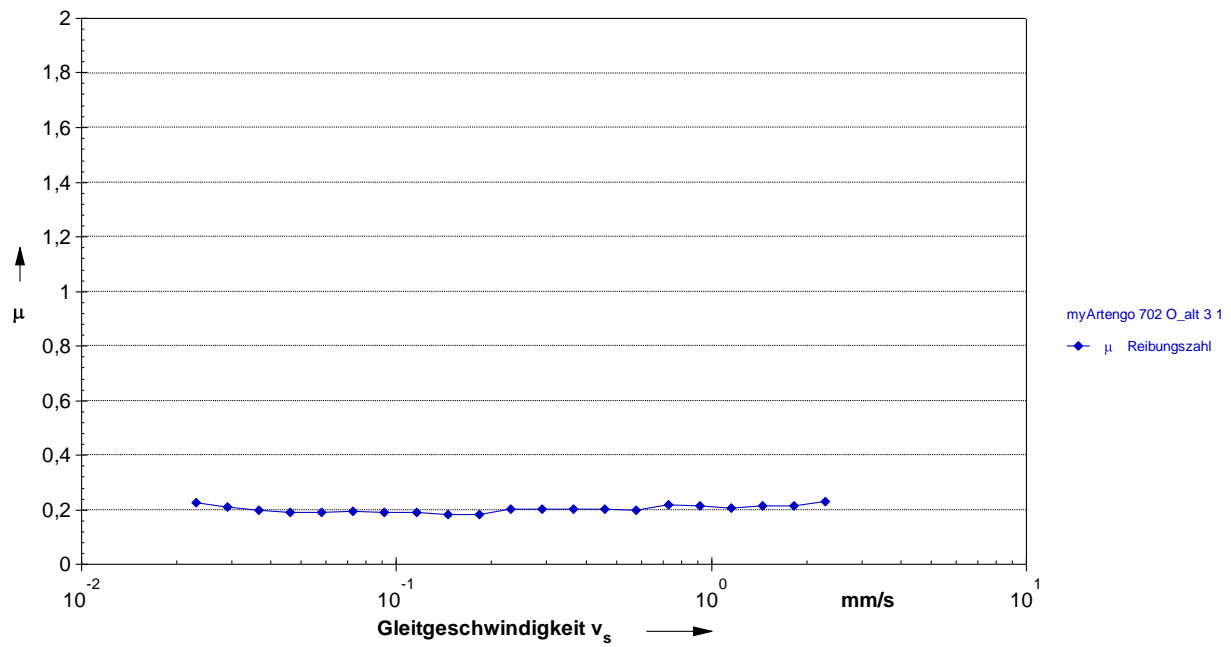
### A.1. Messschriebe Rotationsversuch (Reibwert-Gleitgeschwindigkeit)



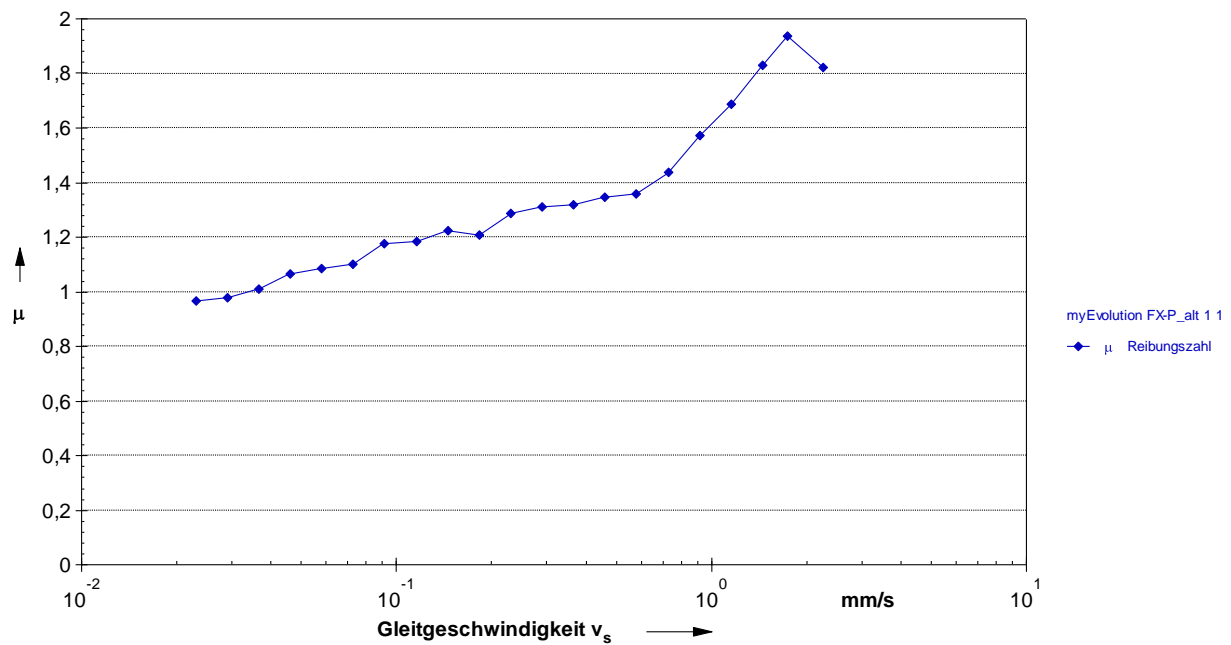
A.1. 1: Artengo 702 O\_alt - Probe 1



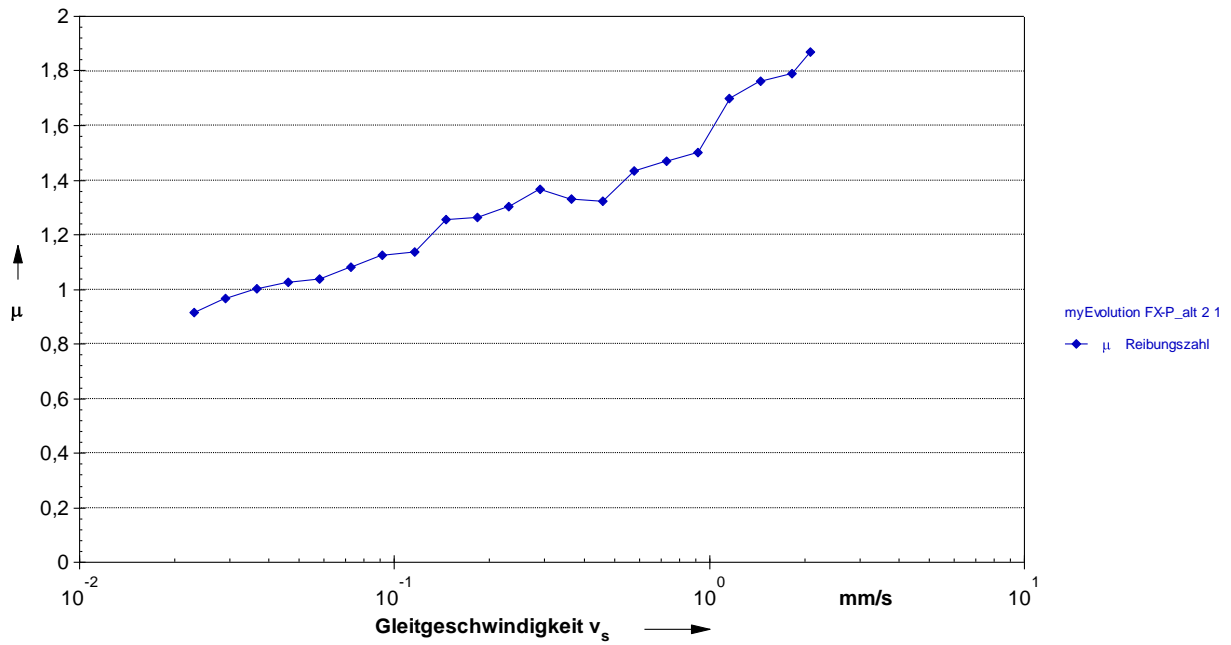
A.1. 2: Artengo 702 O\_alt - Probe 2



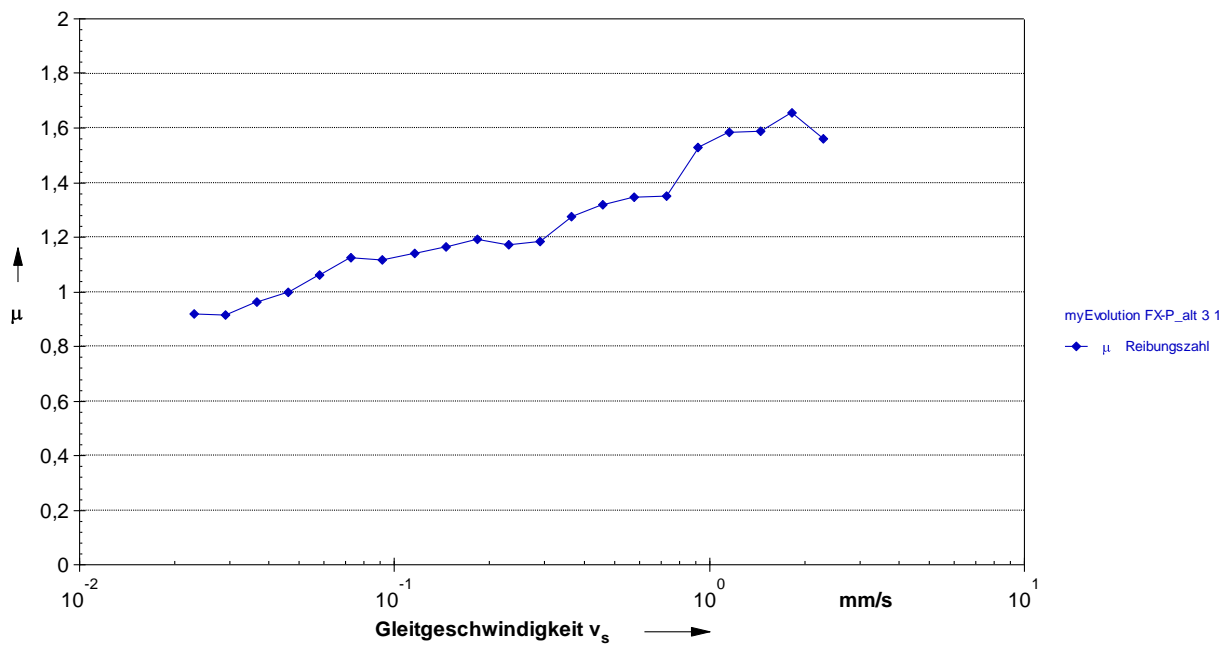
A.1. 3: Artengo 702 O\_alt - Probe 3



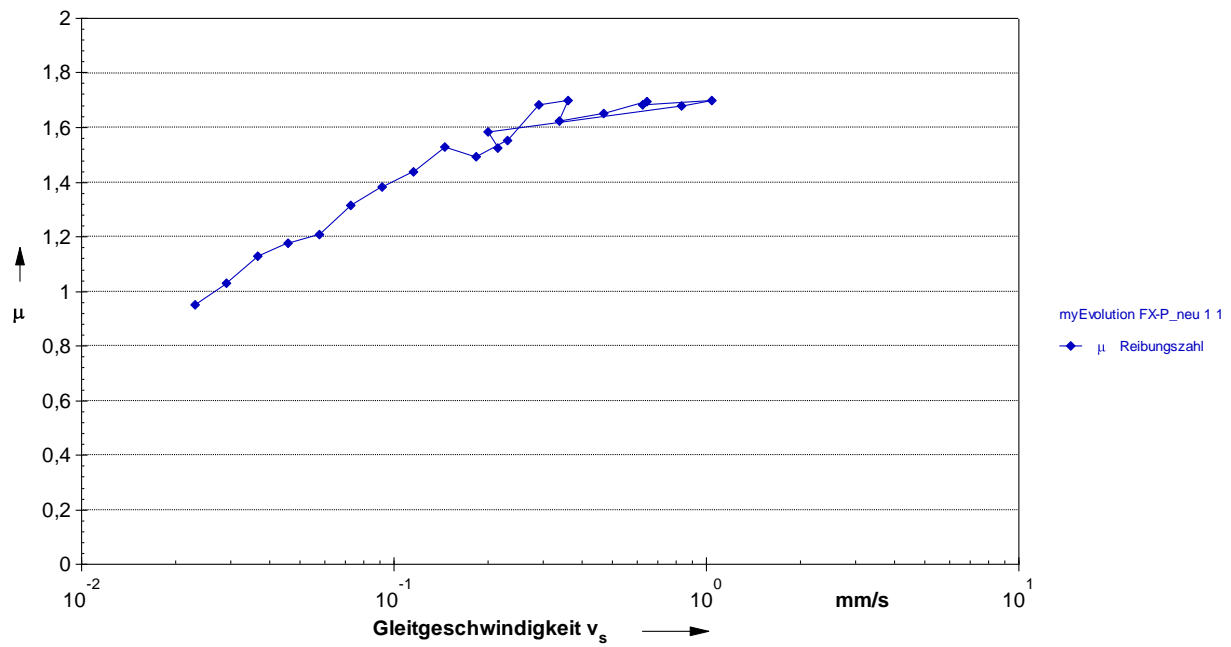
A.1. 4: Evolution FX-P\_alt - Probe 1



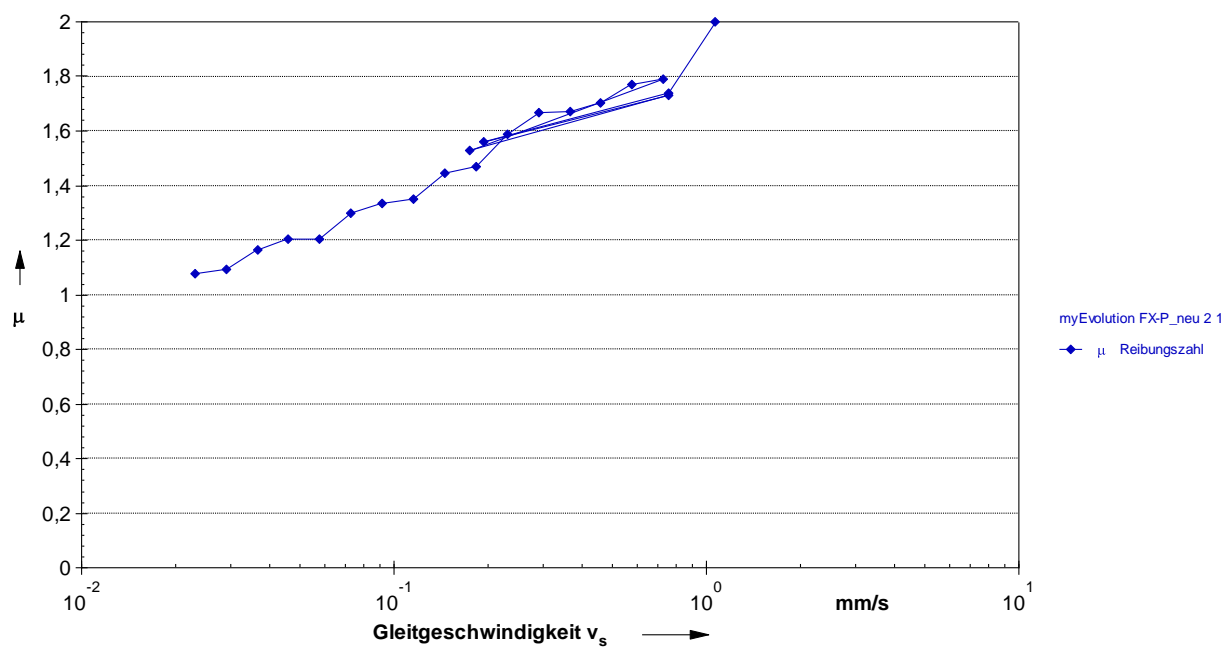
A.1. 5: Evolution FX-P\_alt – Probe 2



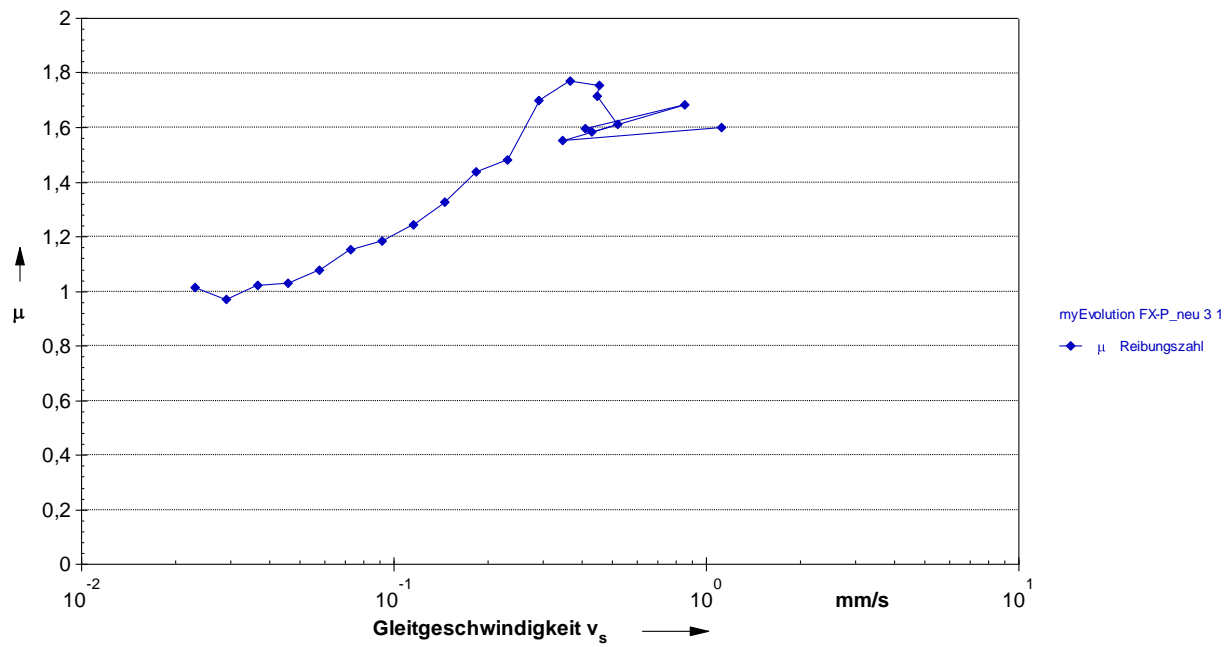
A.1. 6: Evolution FX-P\_alt – Probe 3



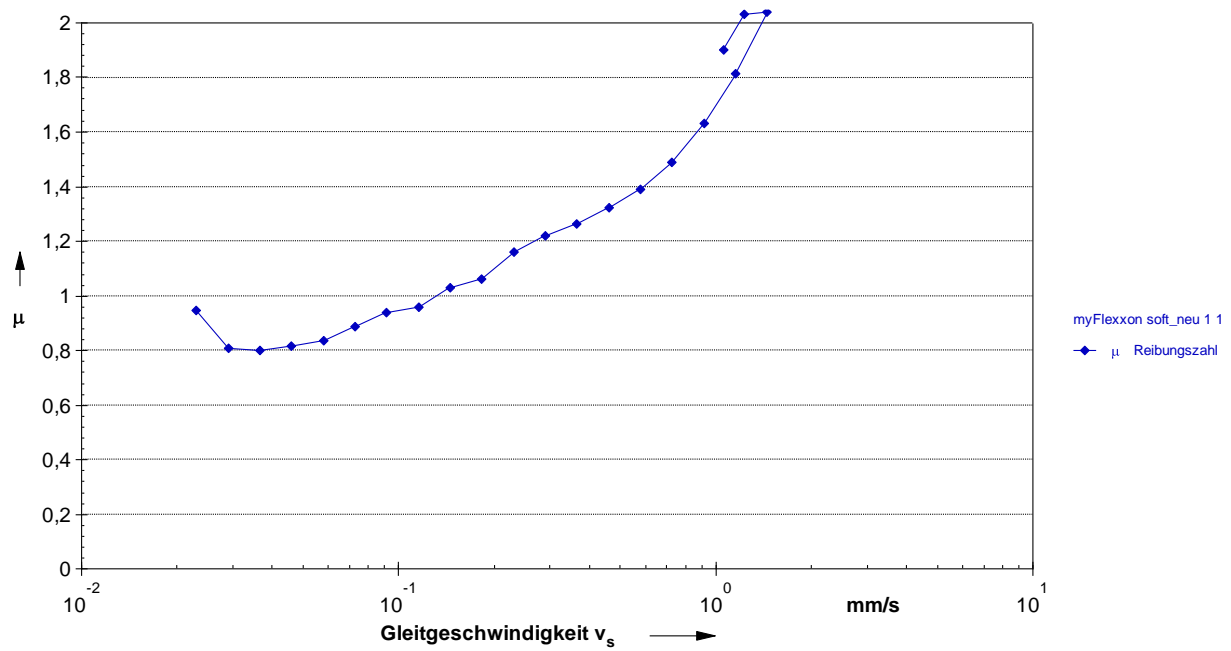
A.1. 7: Evolution FX-P\_neu – Probe 1



A.1. 8: Evolution FX-P\_neu – Probe 2

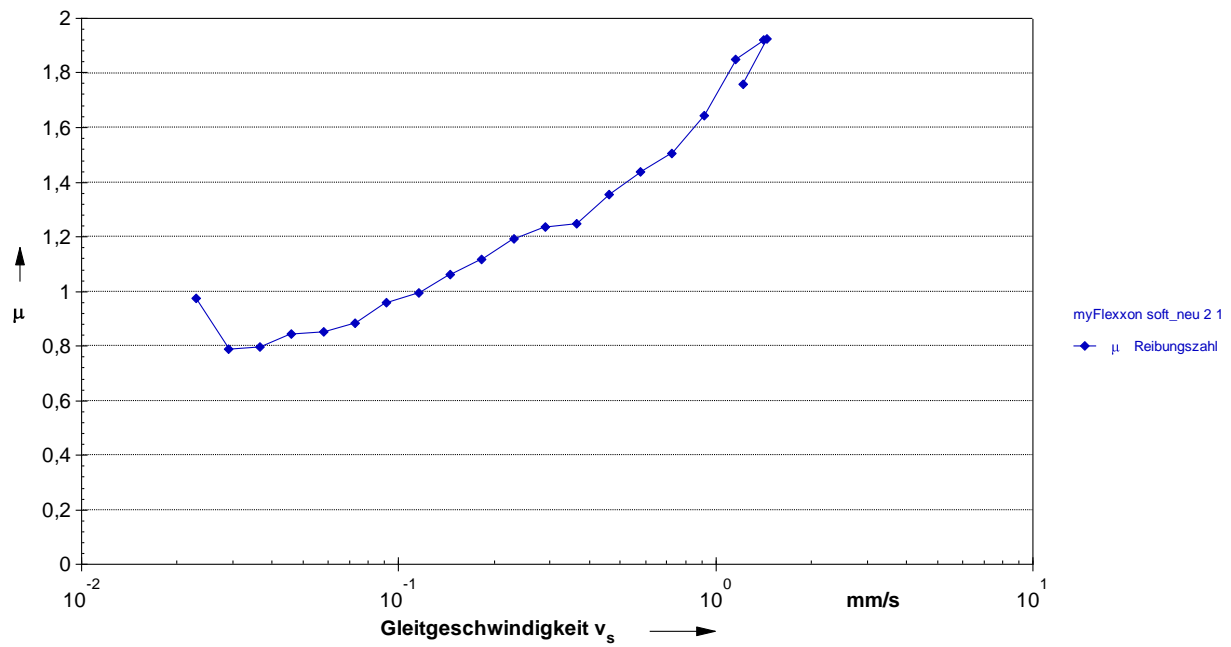


A.1. 9: Evolution FX-P\_neu – Probe 3

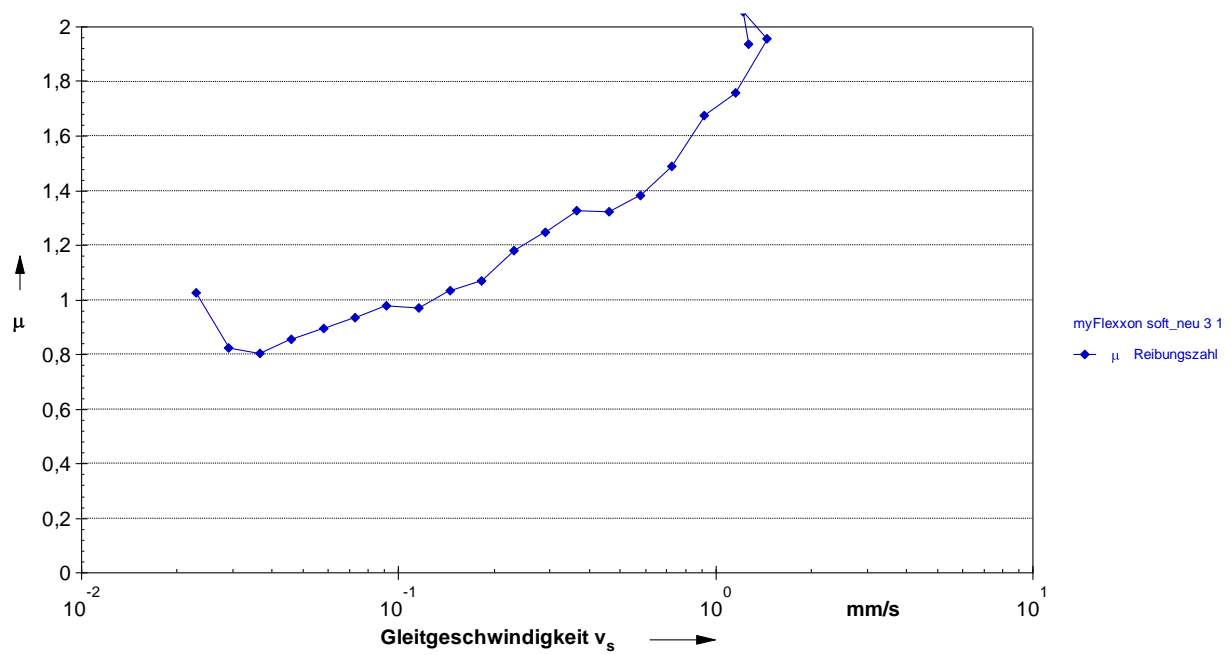


A.1. 10: Flexxon soft\_neu – Probe 1

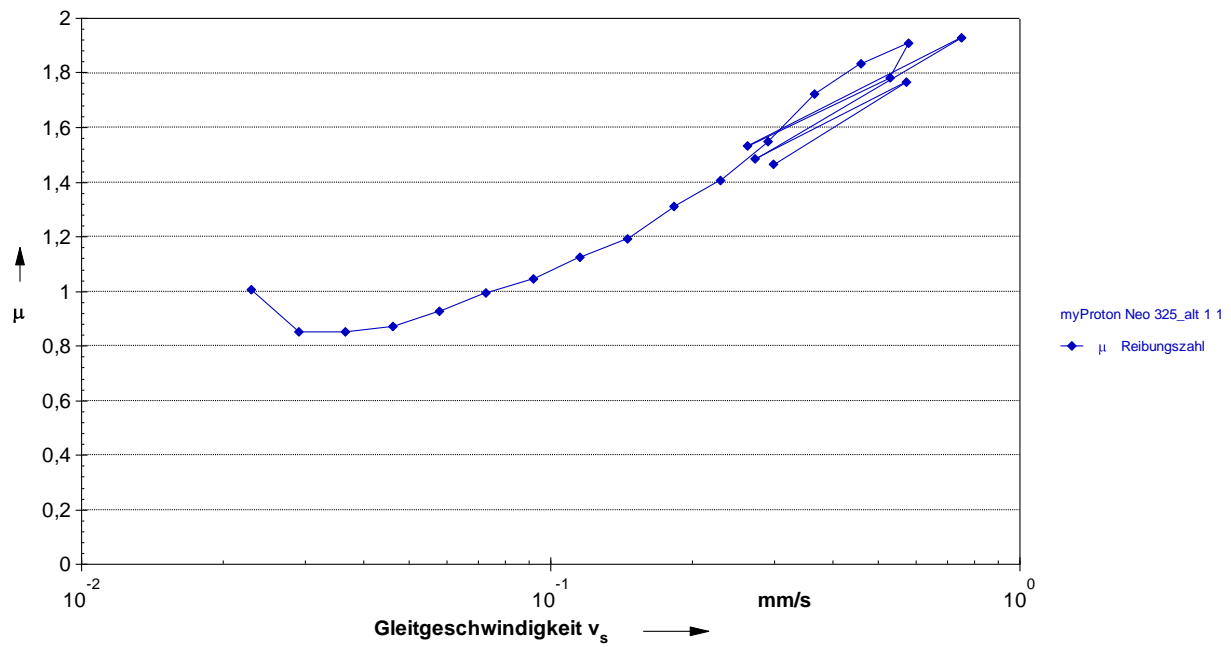




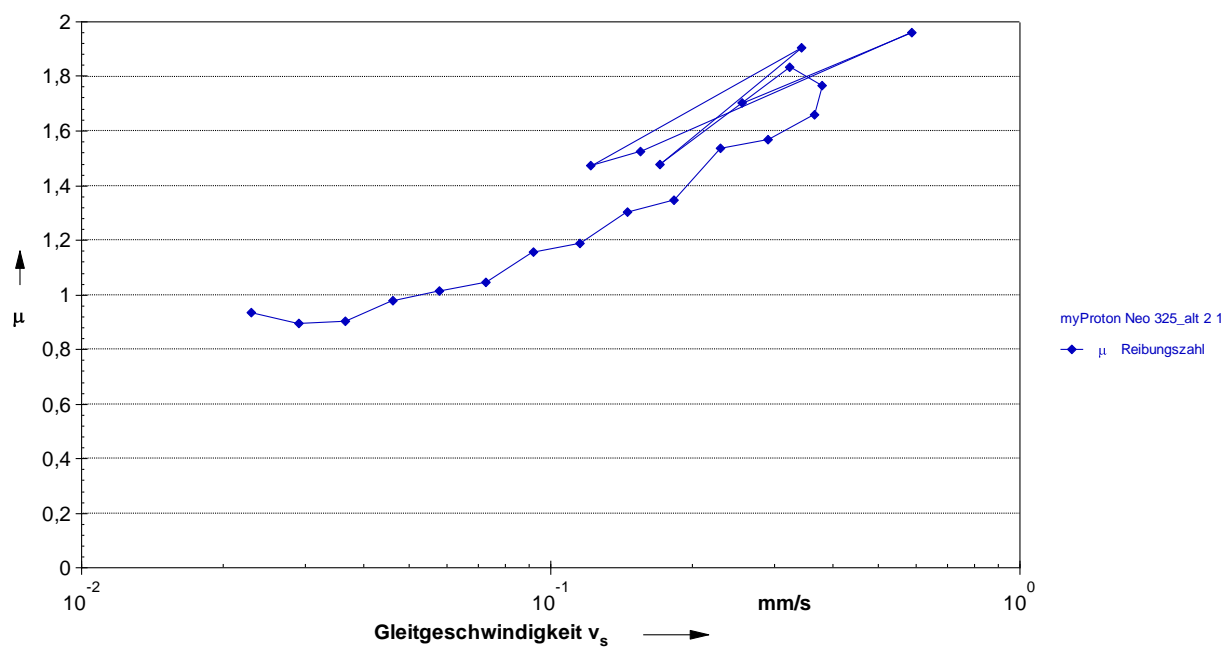
A.1. 11: Flexxon soft\_neu – Probe 2



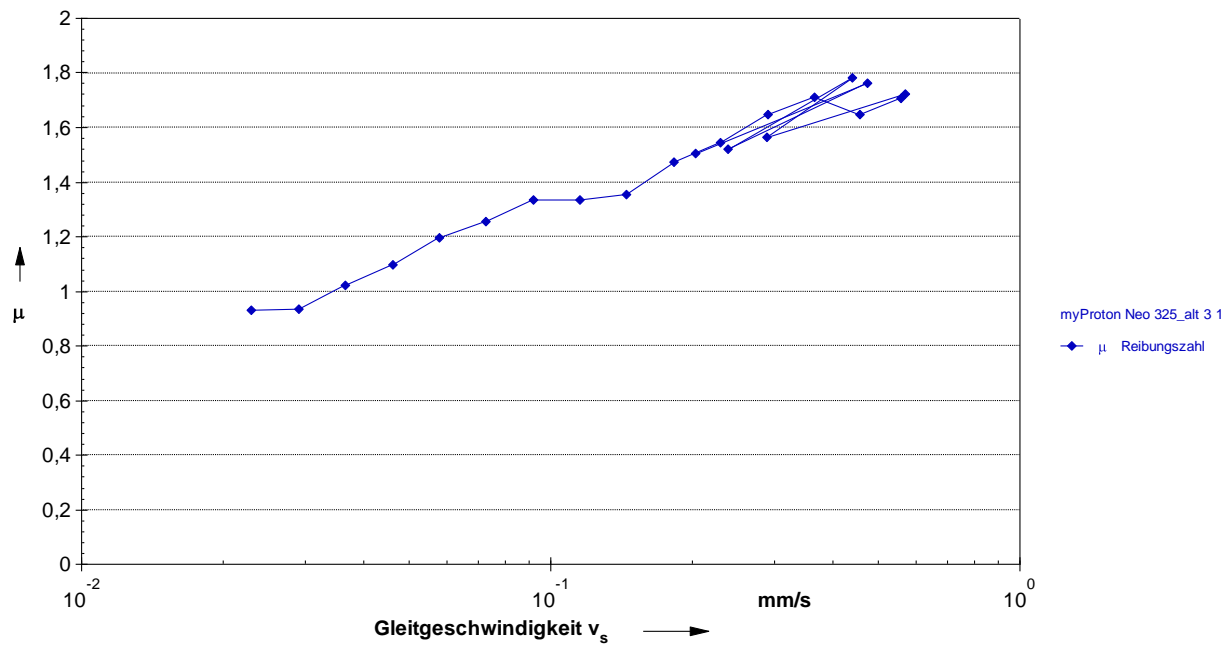
A.1. 12: Flexxon soft\_neu – Probe 3



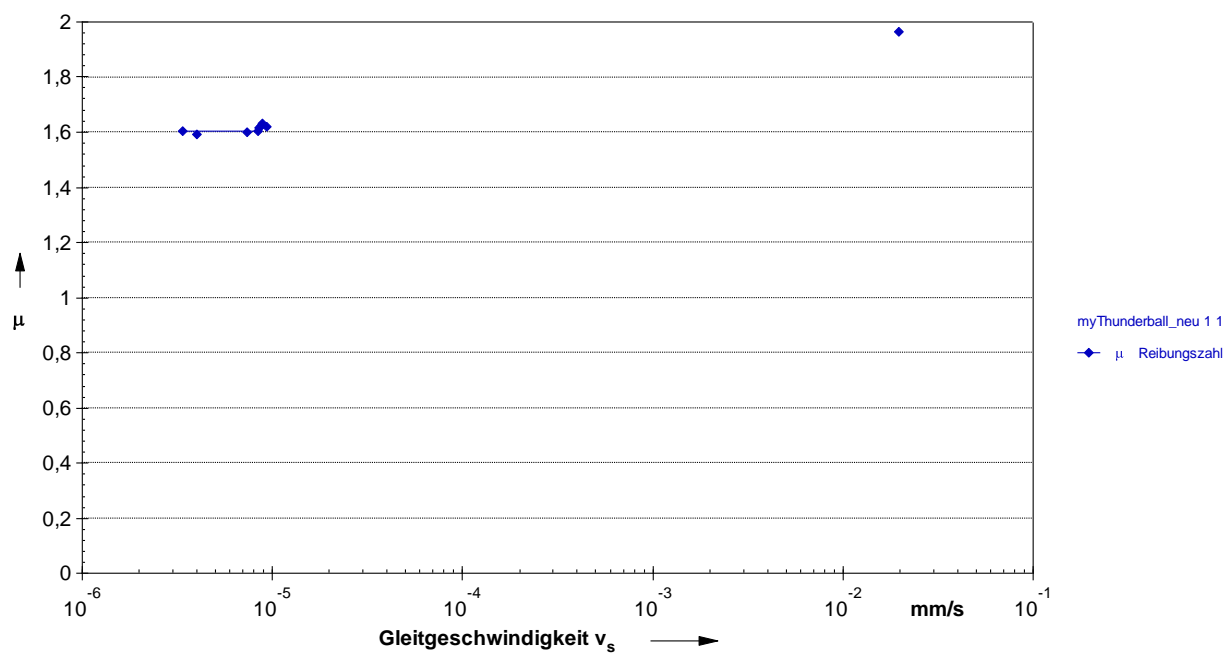
A.1. 13: Proton Neo 325\_alt – Probe 1



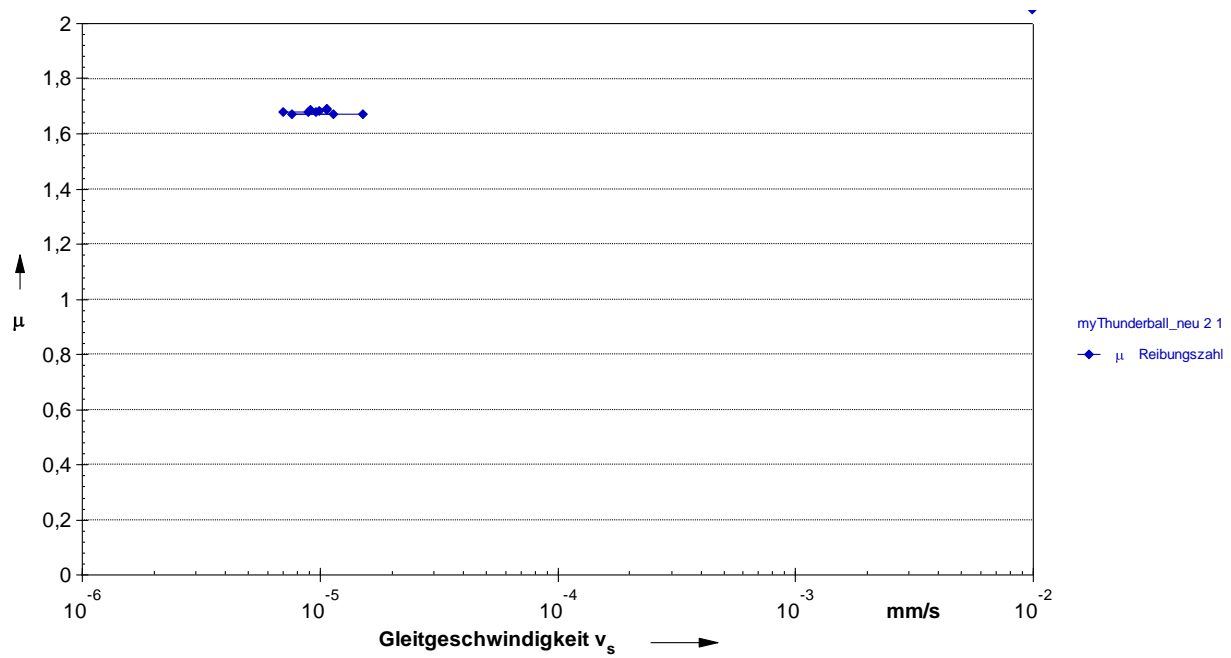
A.1. 14: Proton Neo 325\_alt – Probe 2



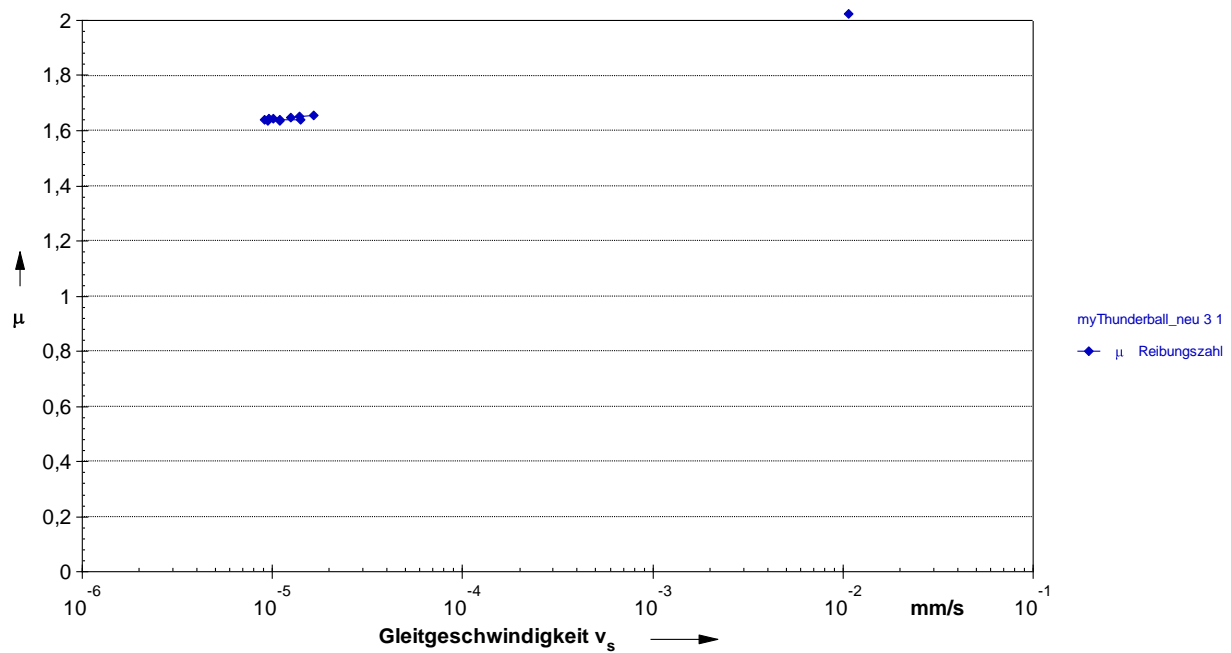
A.1. 15: Proton Neo 325\_alt – Probe 3



A.1. 16: Thunderball\_neu – Probe 1

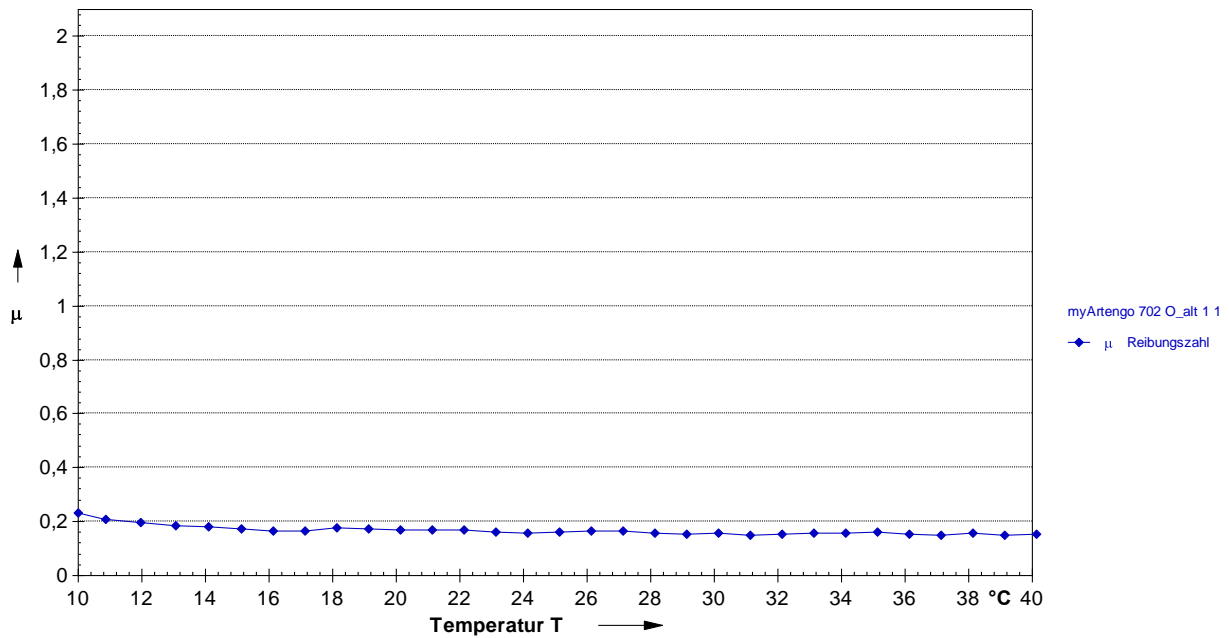


A.1. 17: Thunderball\_neu – Probe 2

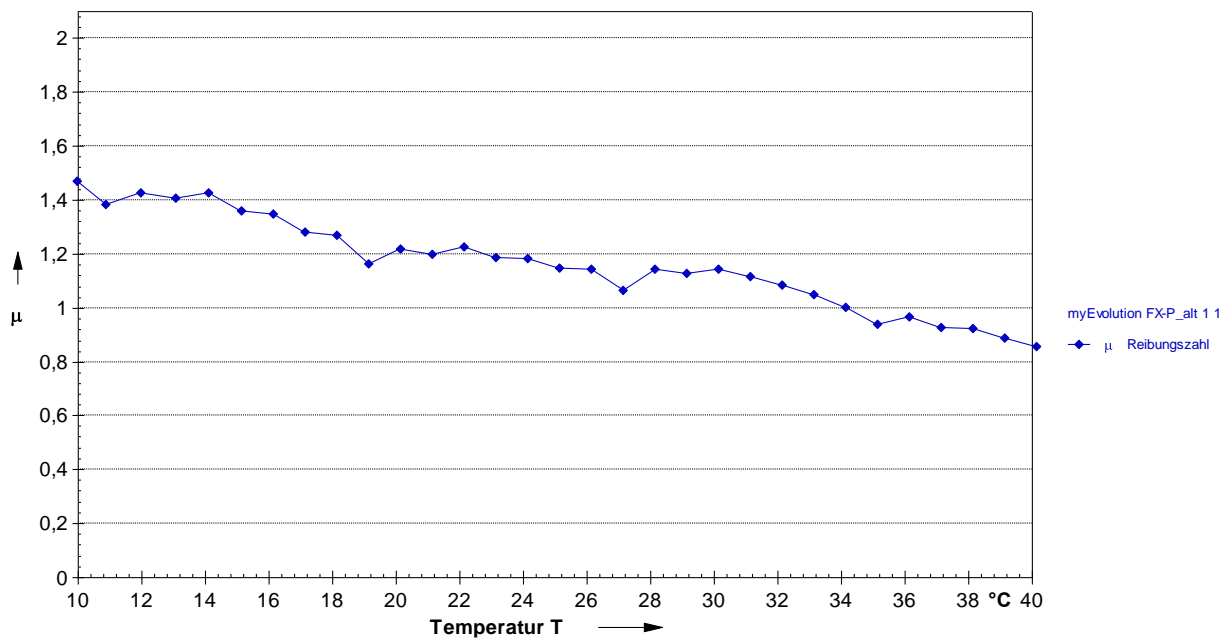


A.1. 18: Thunderball\_neu – Probe 3

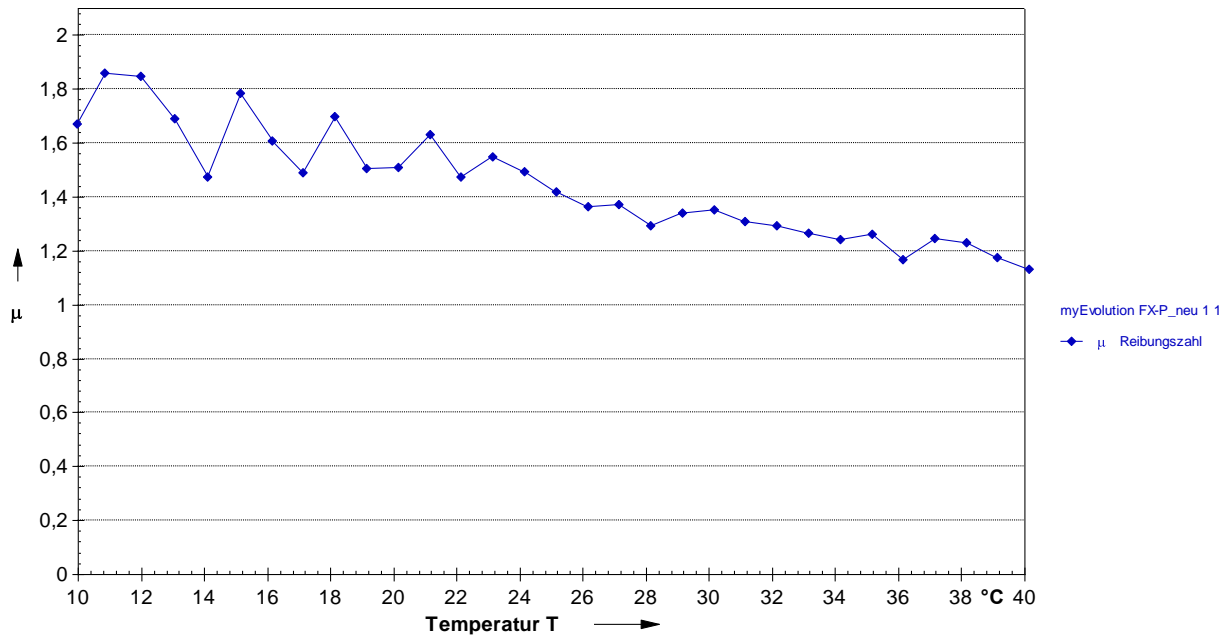
## A.2. Messschriebe Rotationsversuch (Reibwert-Temperatur)



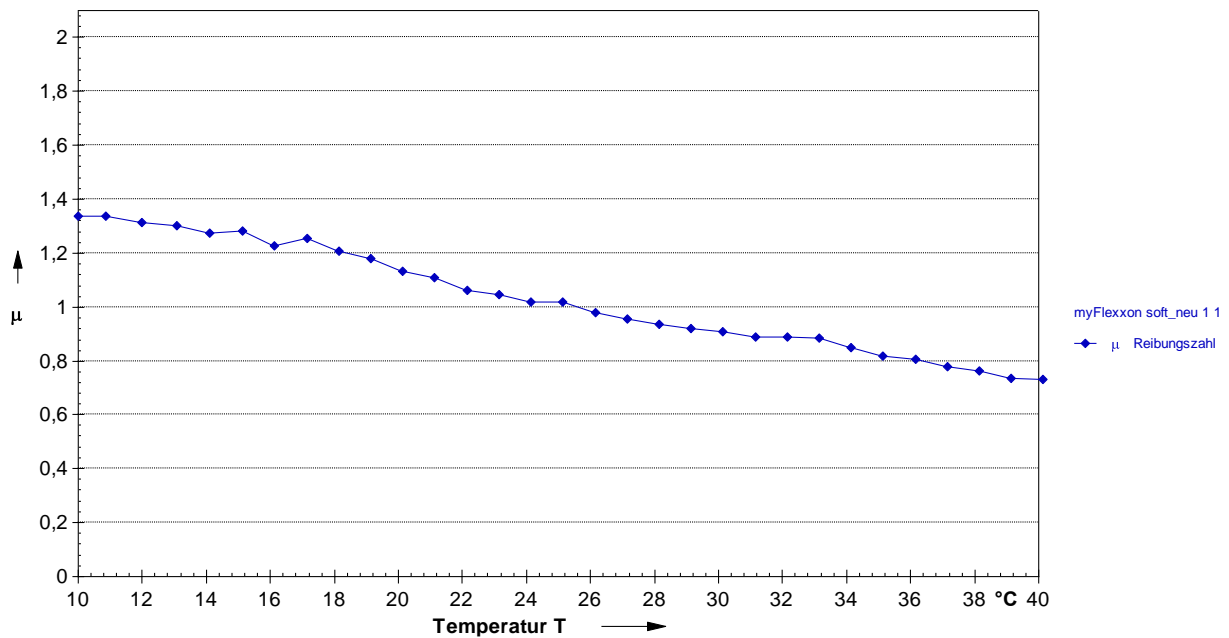
A.2. 1: Artengo 702 O\_alt - Probe 1



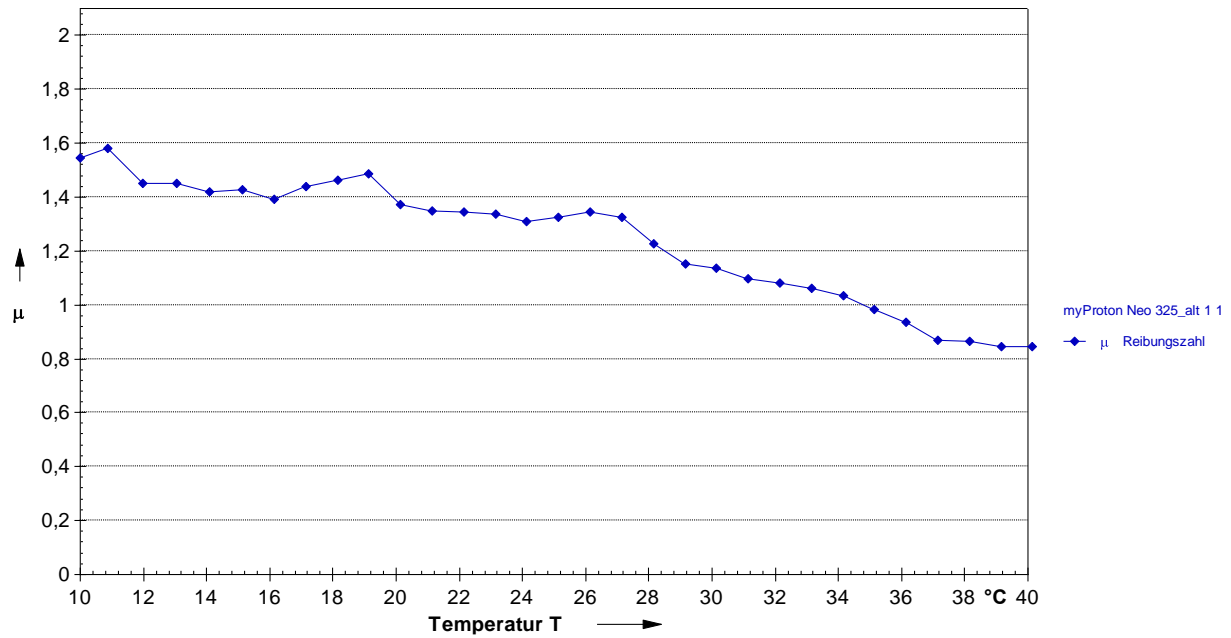
A.2. 2: Evolution FX-P\_alt - Probe 1



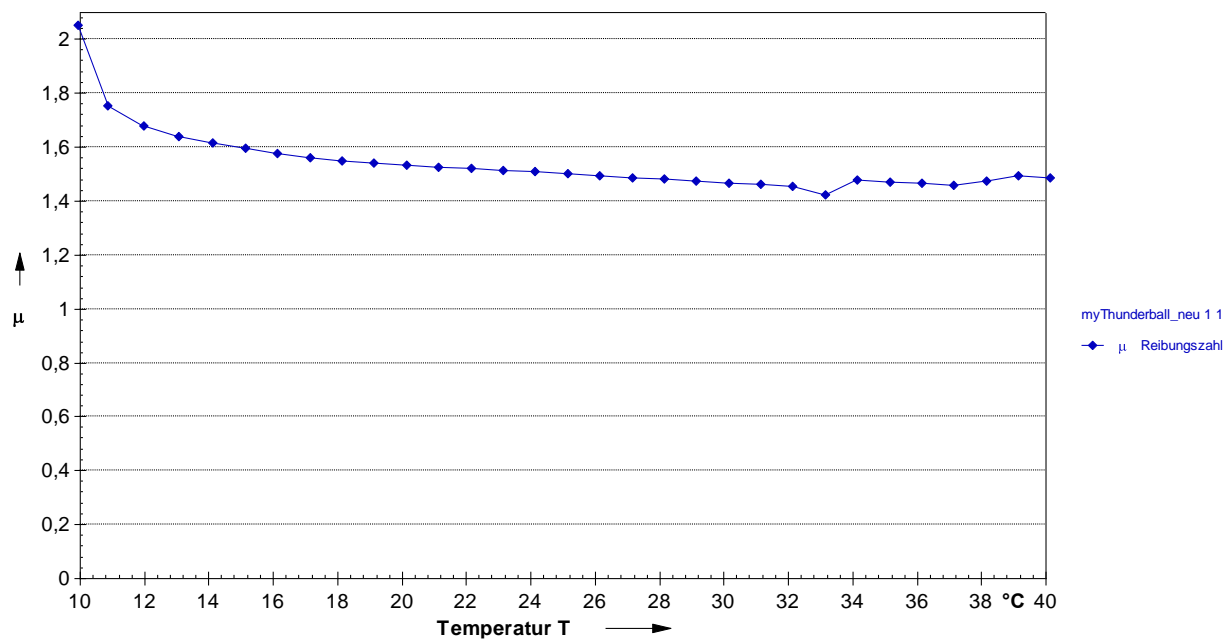
A.2. 3: Evolution FX-P\_neu – Probe 1



A.2. 4: Flexxon soft\_neu – Probe 1

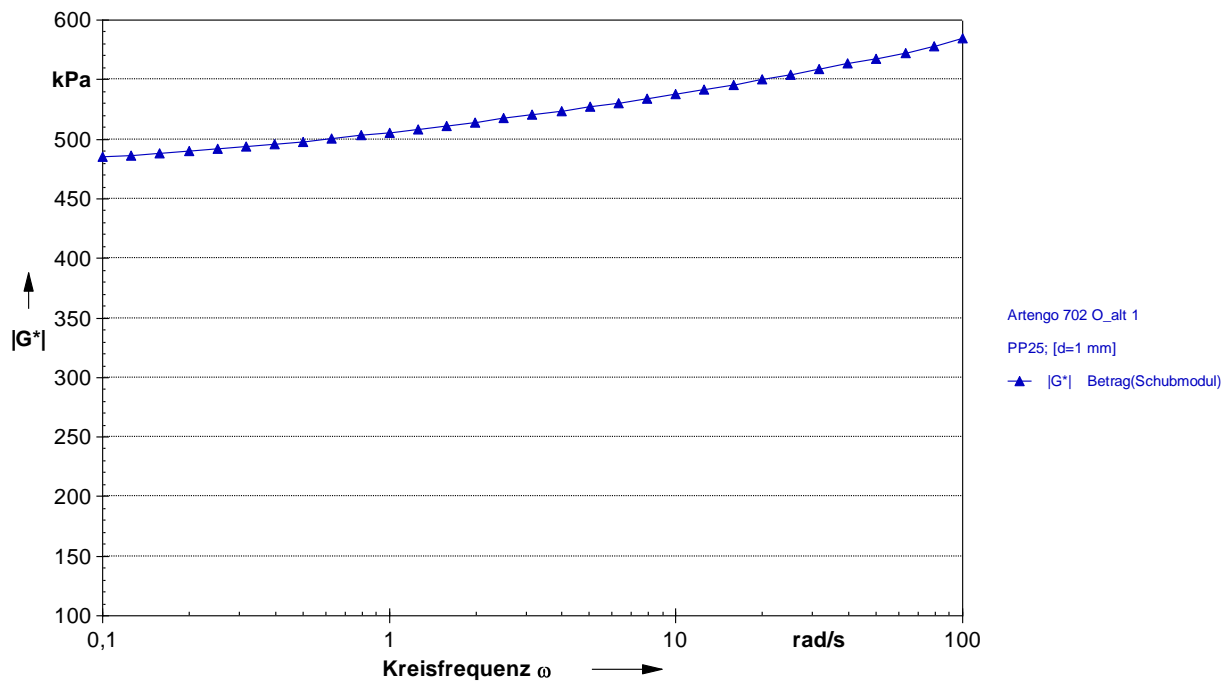


A.2. 5: Proton Neo 325\_alt – Probe 1

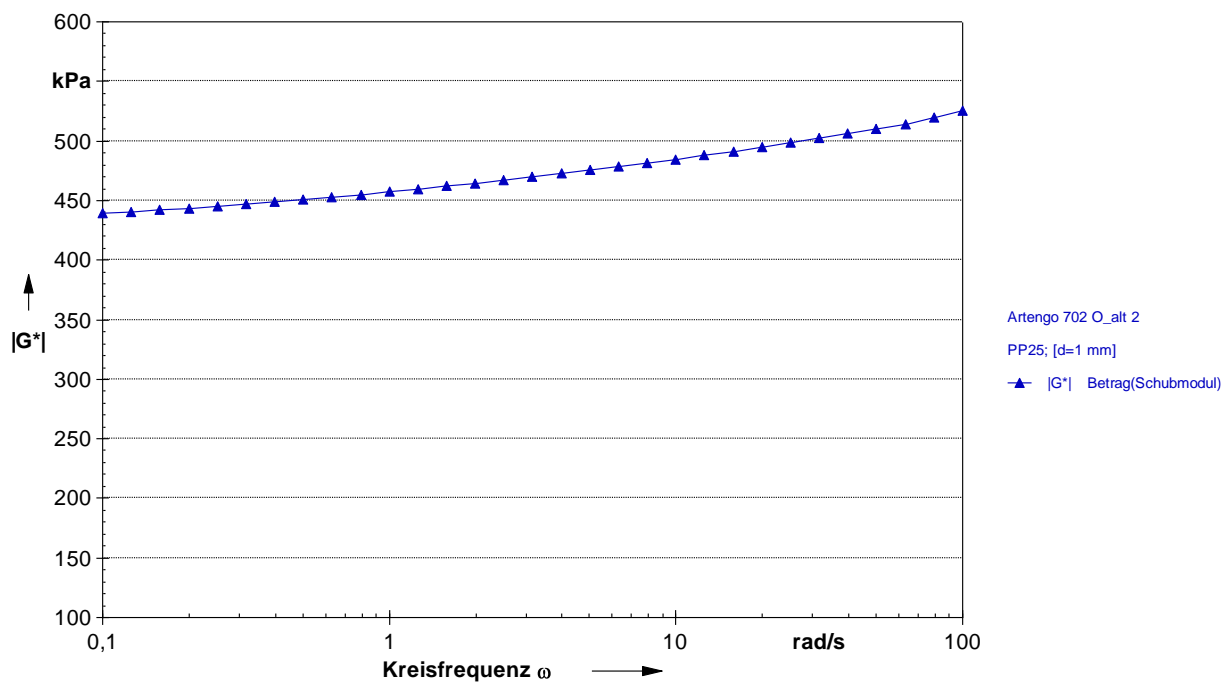


A.2. 6: Thunderball\_neu – Probe 1

### A.3. Messschriebe Frequenzversuch

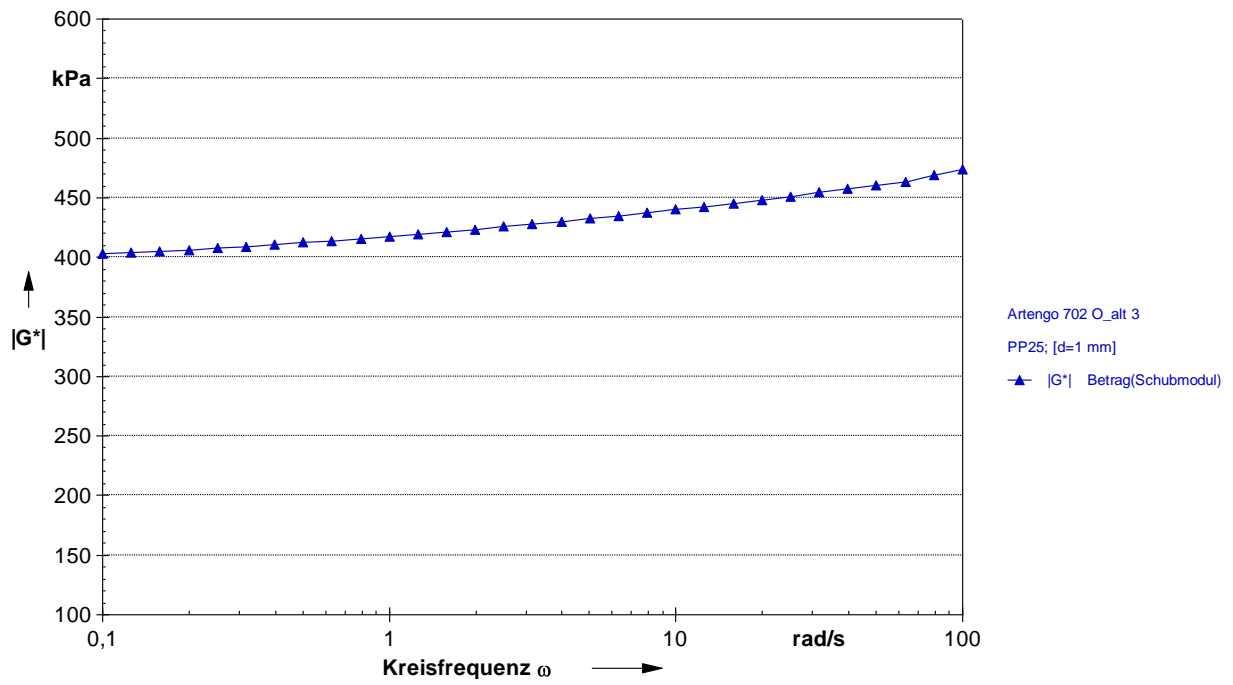


A.3. 1: Artengo 702 O\_alt – Probe 1

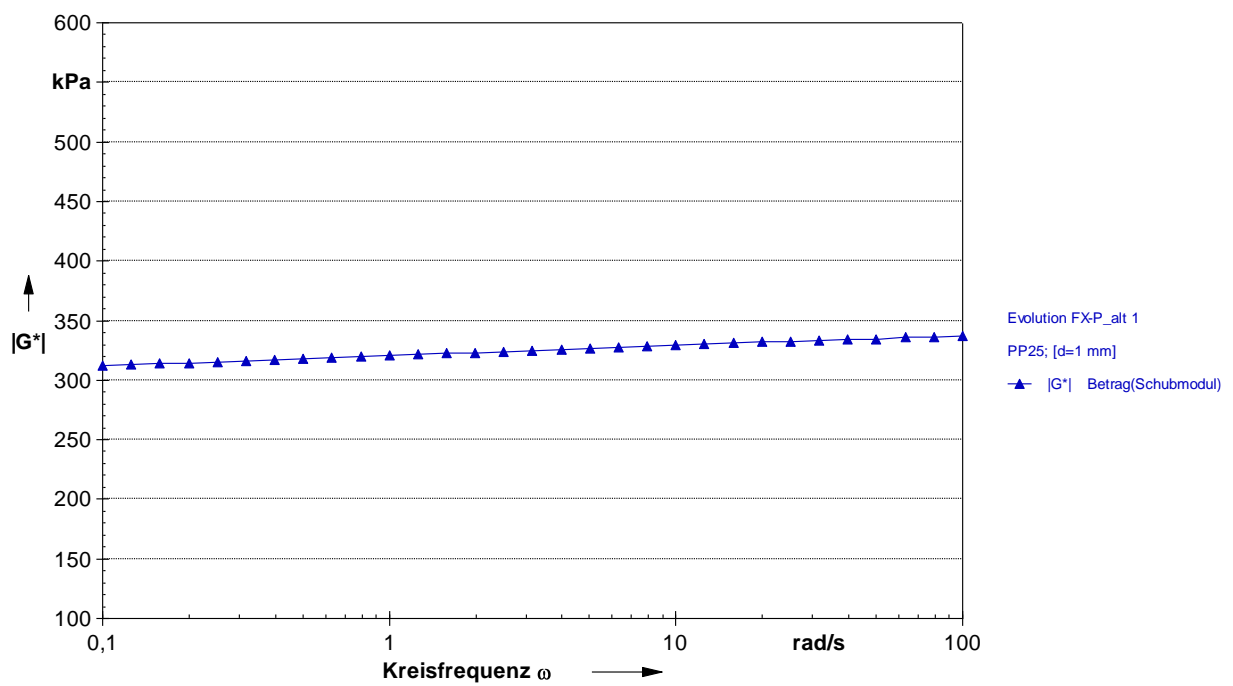


A.3. 2: Artengo 702 O\_alt – Probe 2

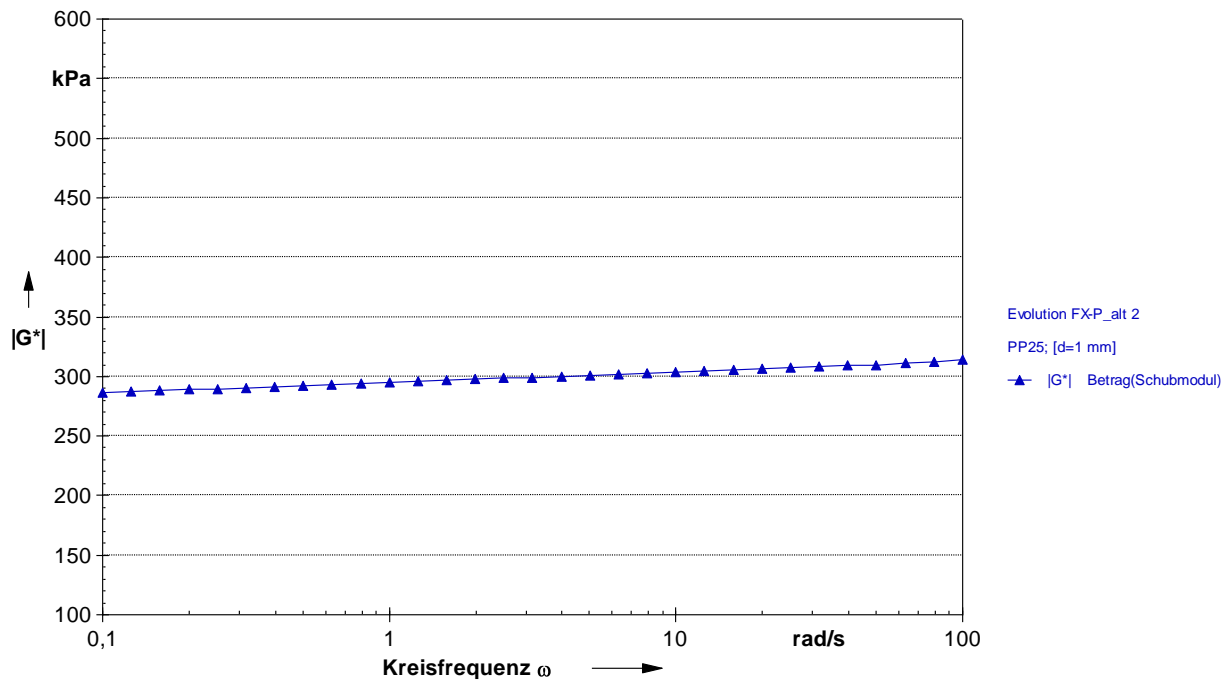




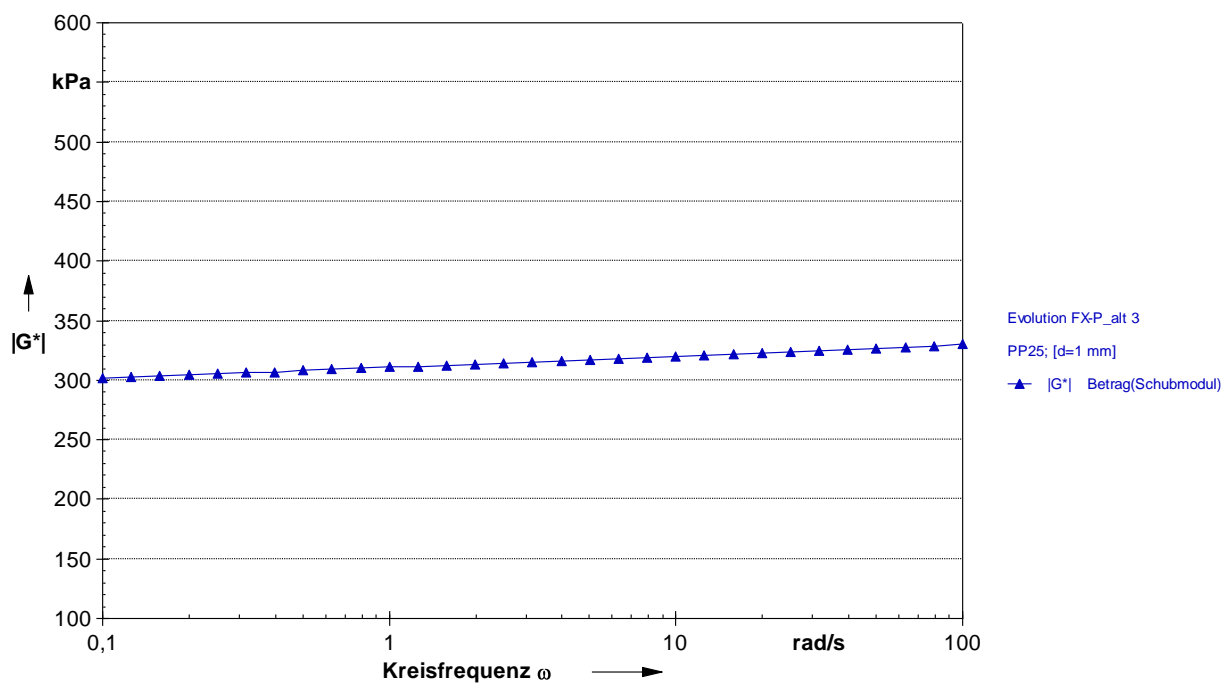
A.3. 3: Artengo 702 O\_alt – Probe 3



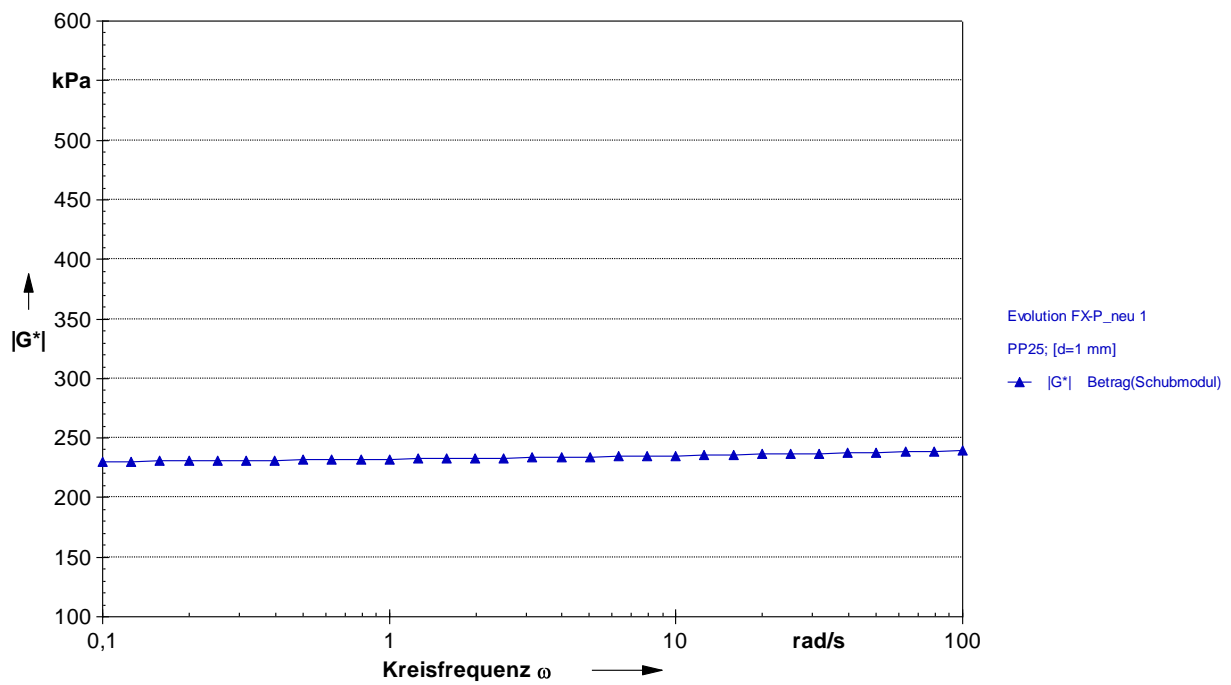
A.3. 4: Evolution FX-P\_alt – Probe 1



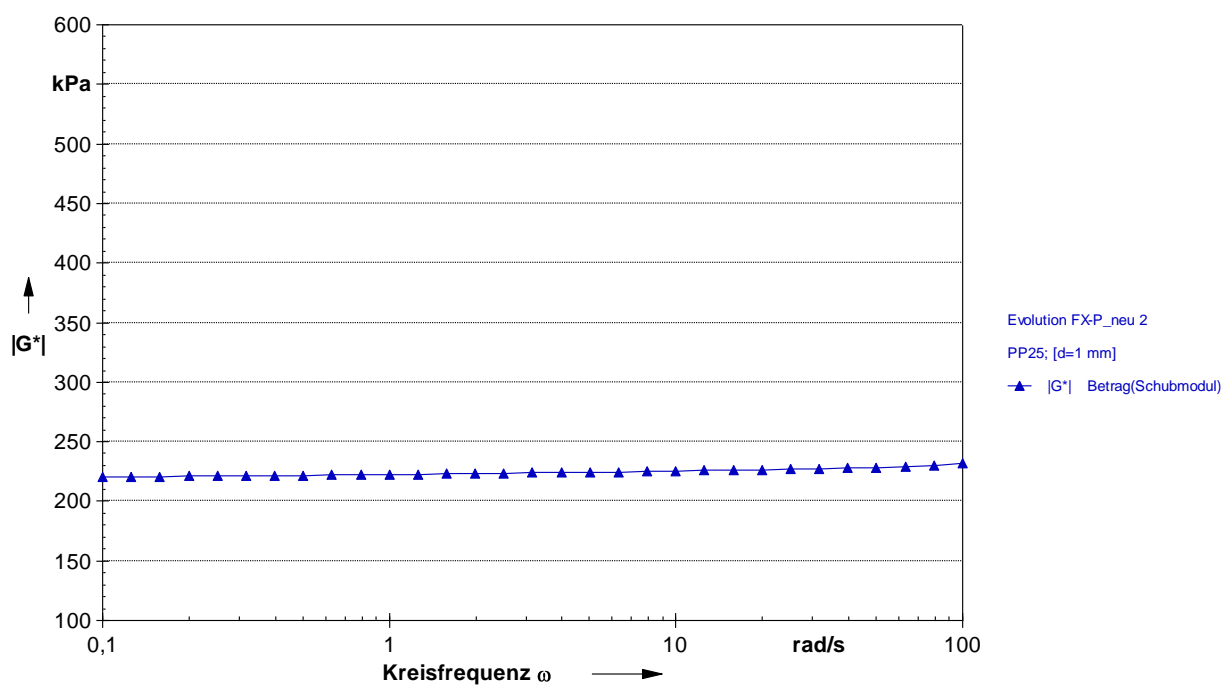
A.3. 5: Evolution FX-P\_alt – Probe 2



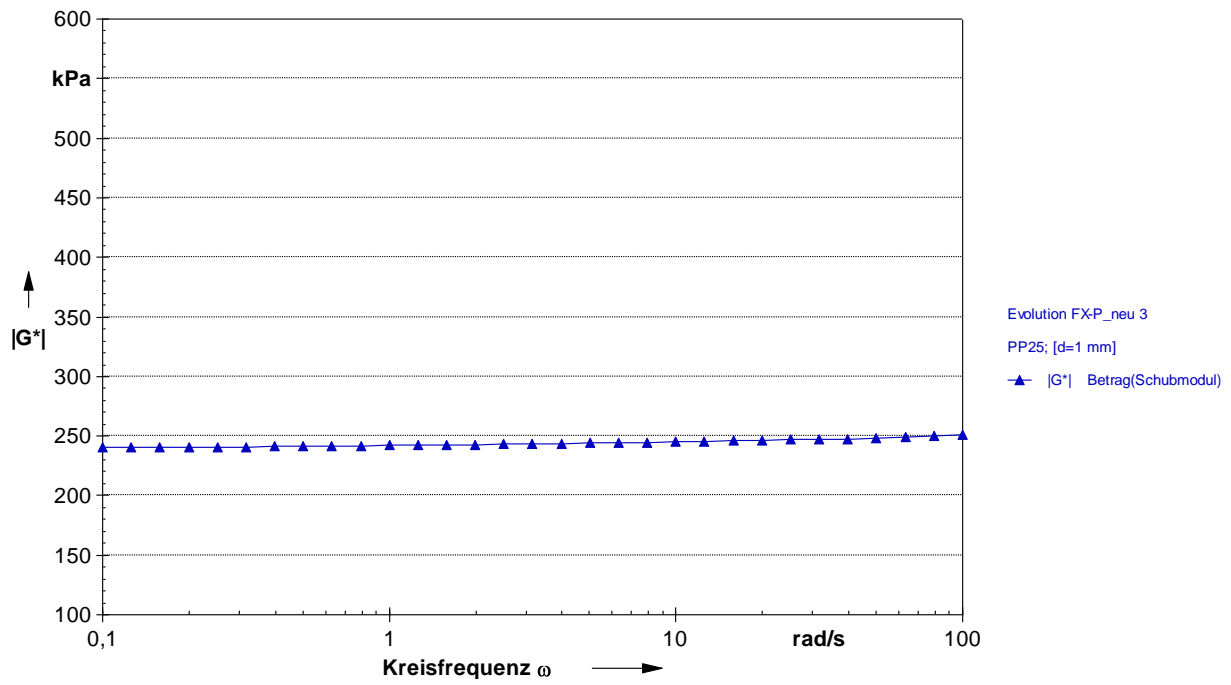
A.3. 6: Evolution FX-P\_alt – Probe 3



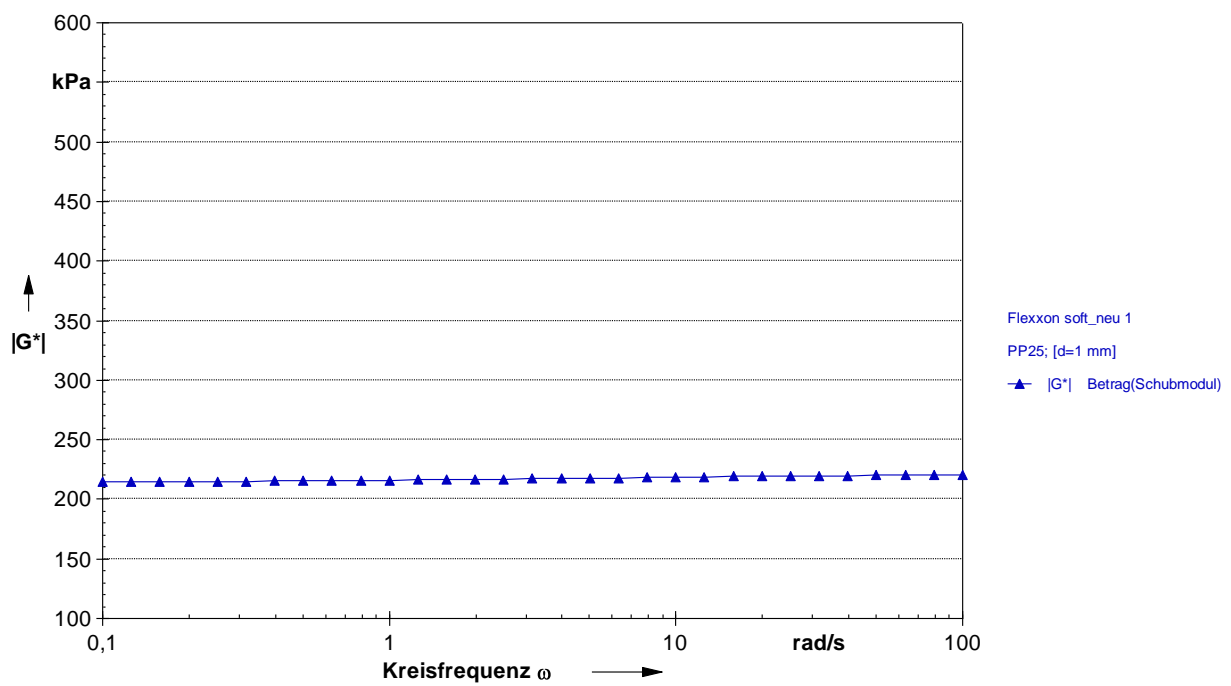
A.3. 7: Evolution FX-P\_neu – Probe 1



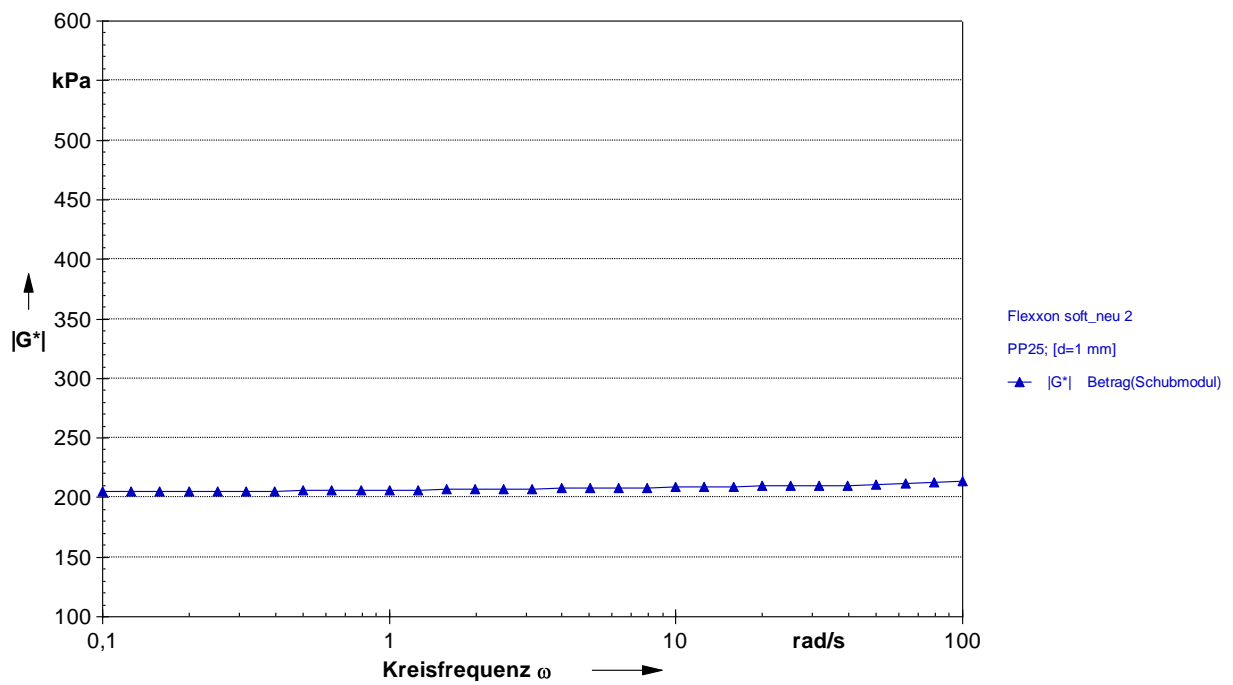
A.3. 8: Evolution FX-P\_neu – Probe 2



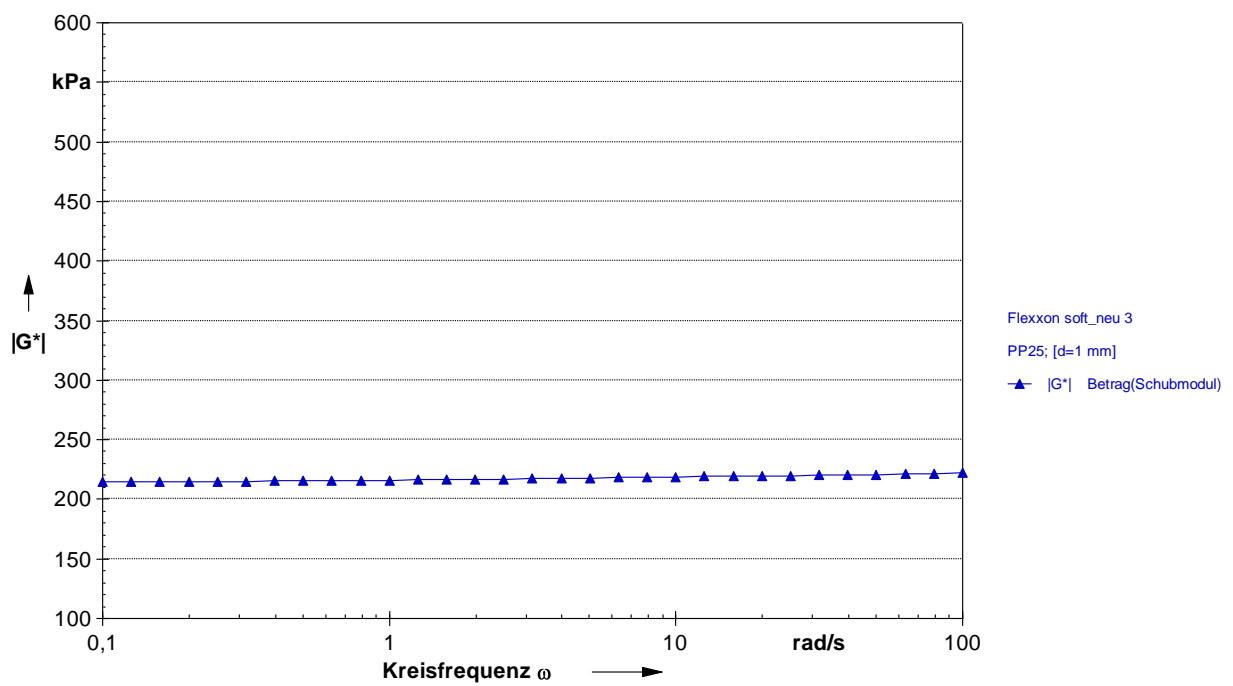
A.3. 9: Evolution FX-P\_neu – Probe 3



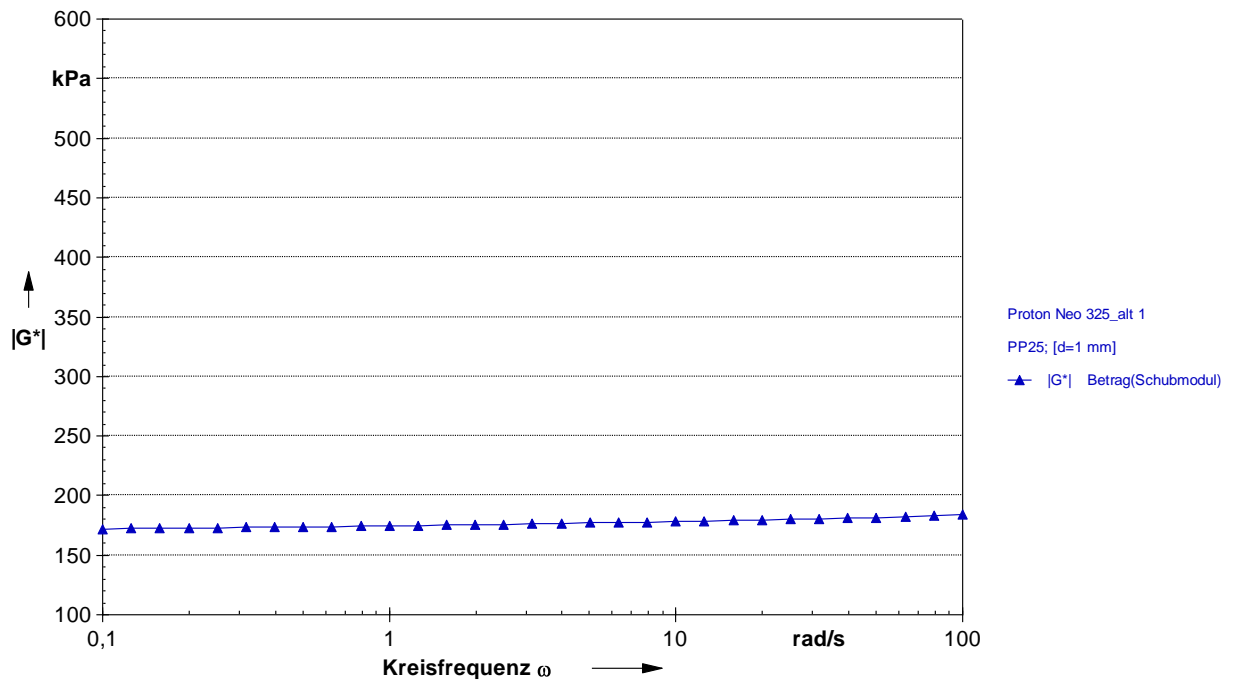
A.3. 10: Flexxon soft\_neu – Probe 1



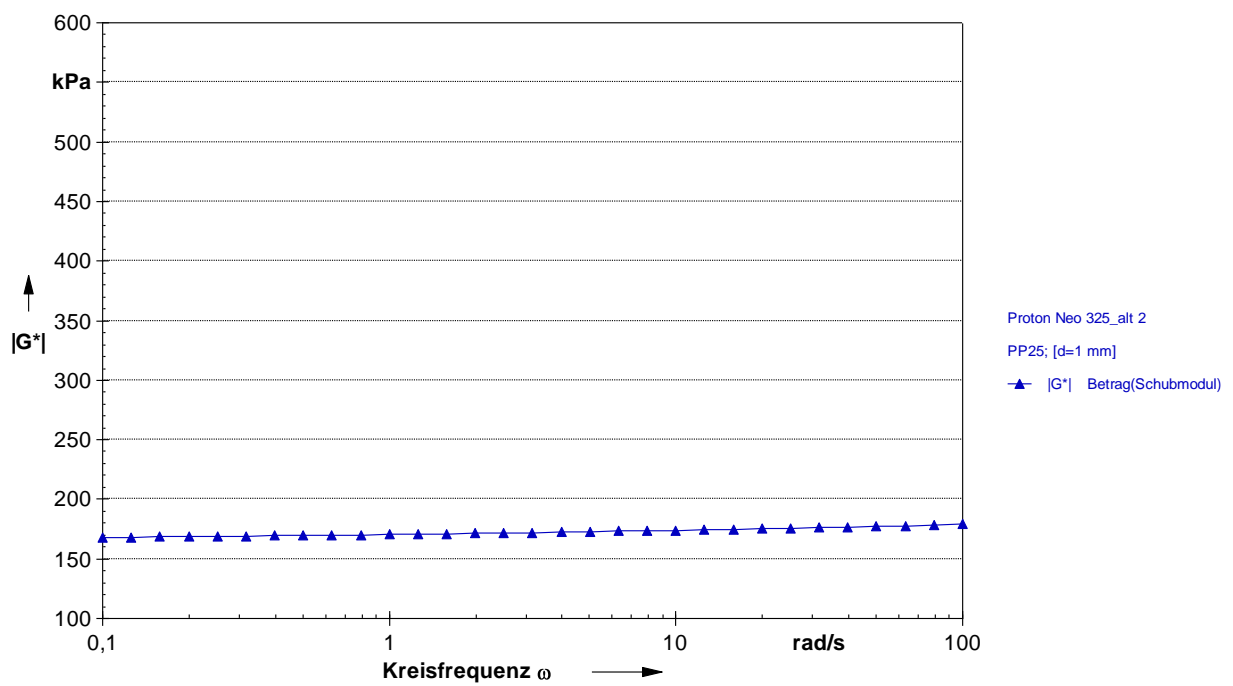
A.3. 11: Flexxon soft\_neu – Probe 2



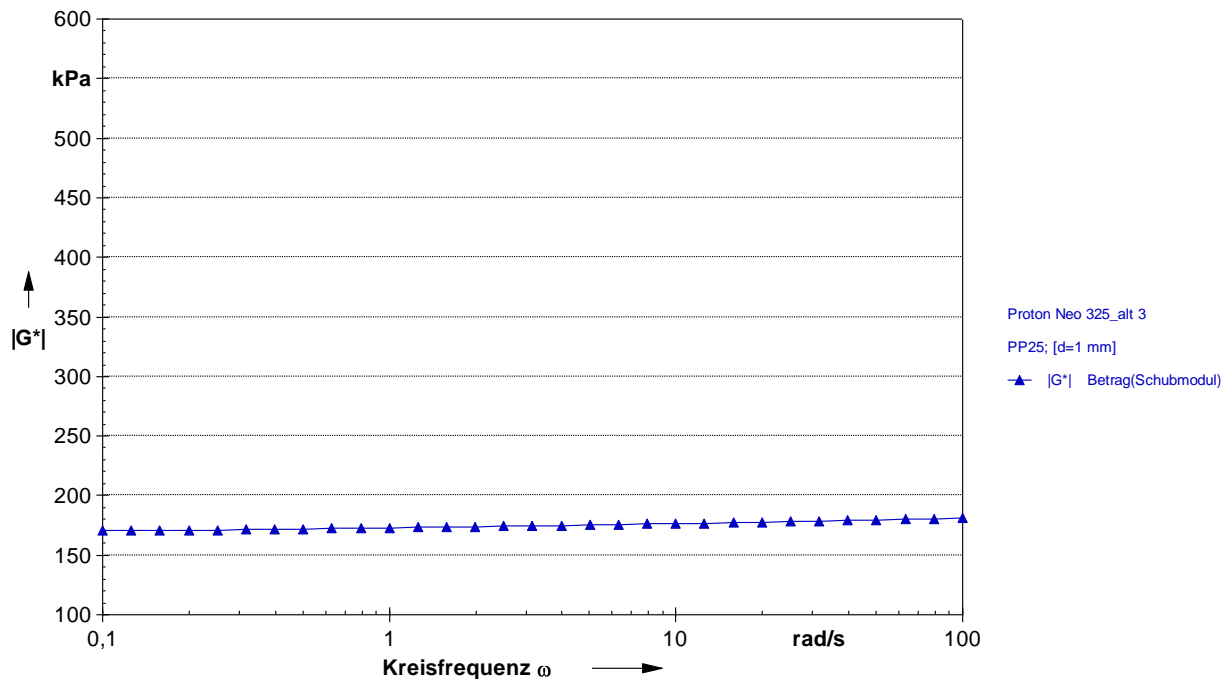
A.3. 12: Flexxon soft\_neu – Probe 3



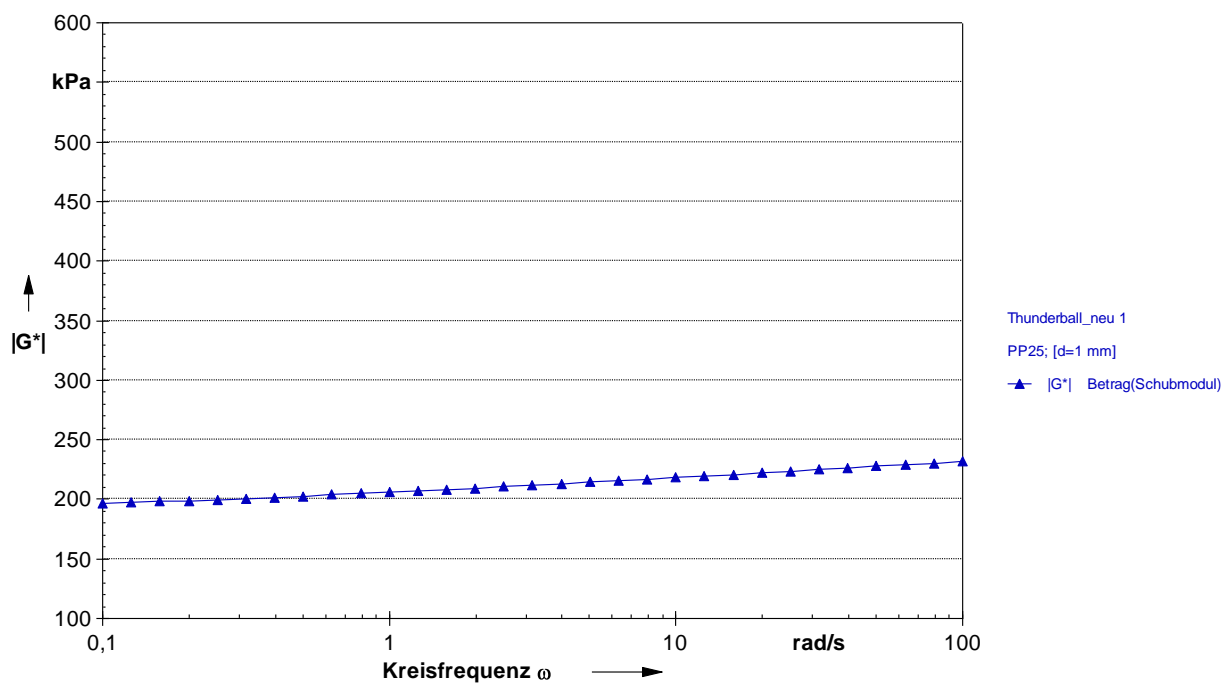
A.3. 13: Proton Neo 325\_alt – Probe 1



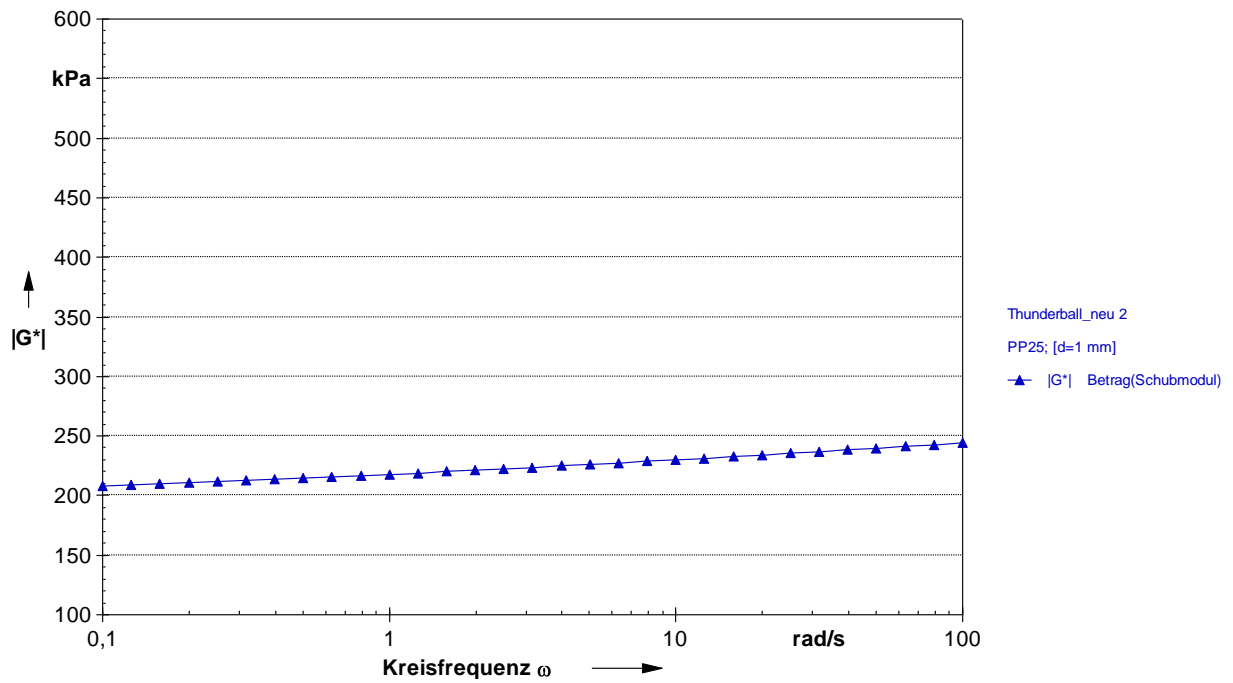
A.3. 14: Proton Neo 325\_alt – Probe 2



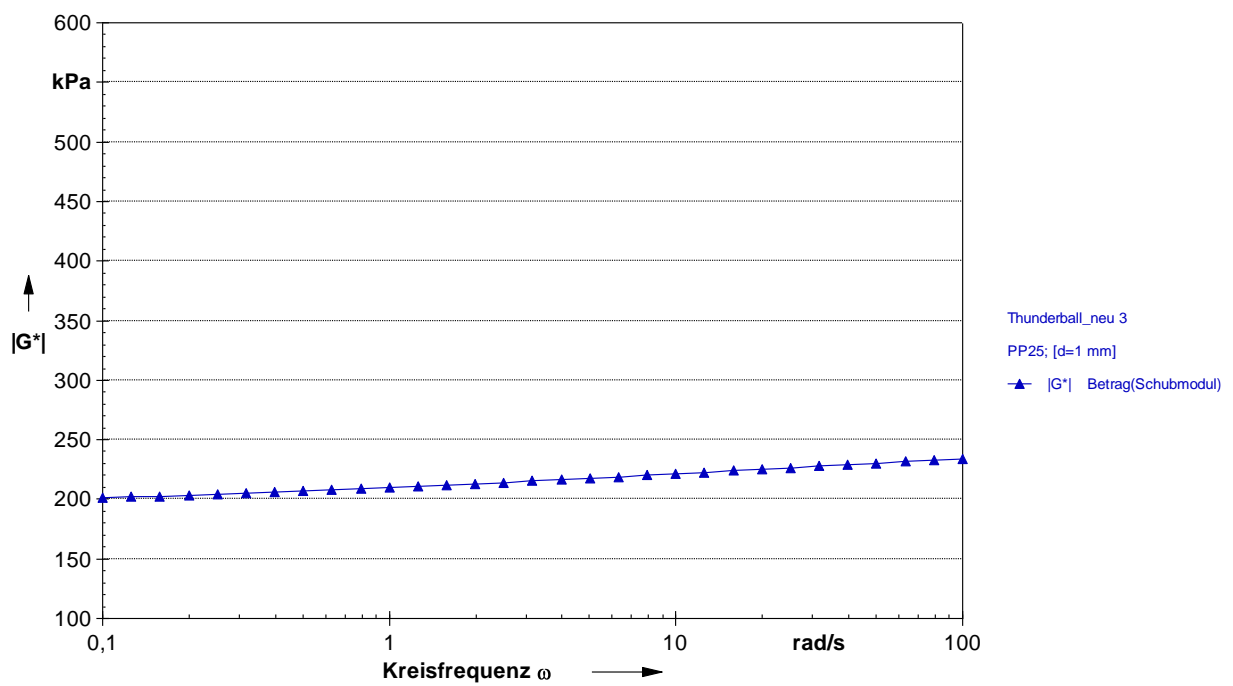
A.3. 15: Proton Neo 325\_alt – Probe 3



A.3. 16: Thunderball\_neu – Probe 1



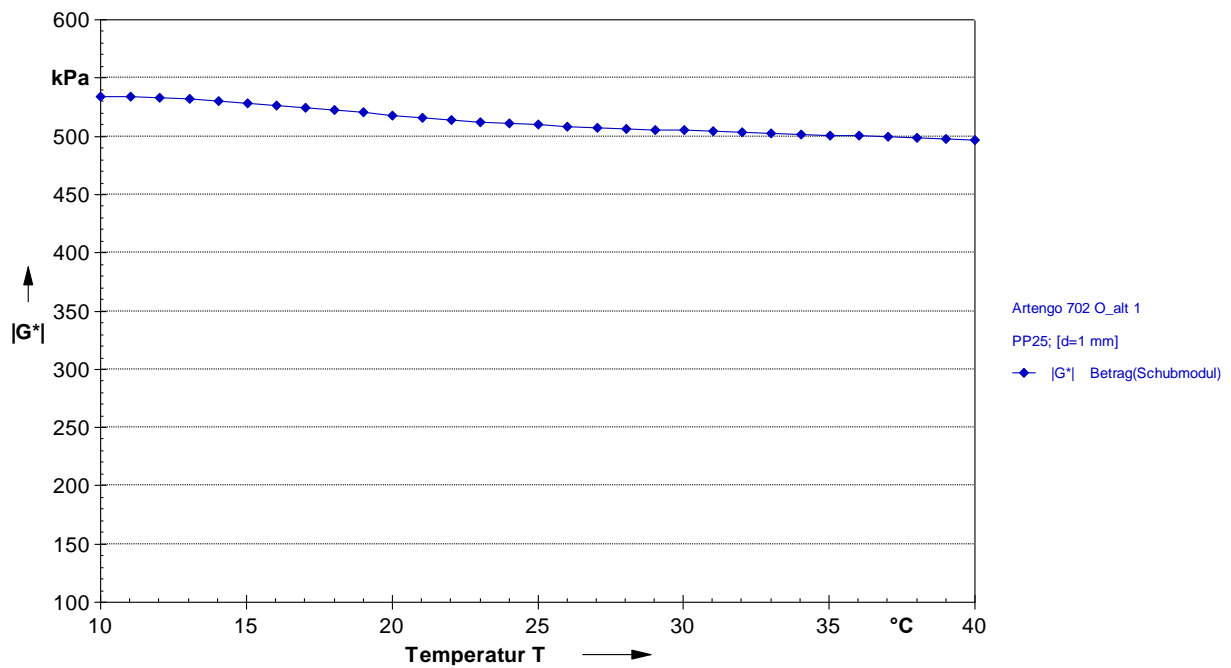
A.3. 17: Thunderball\_neu – Probe 2



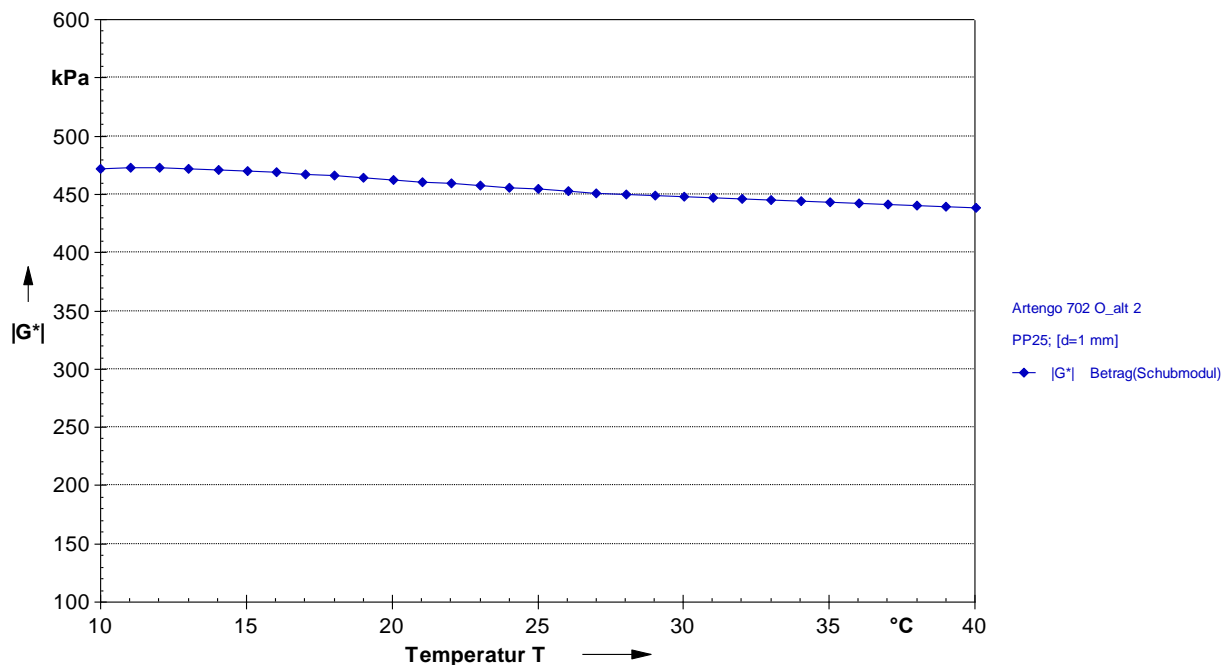
A.3. 18: Thunderball\_neu – Probe 3



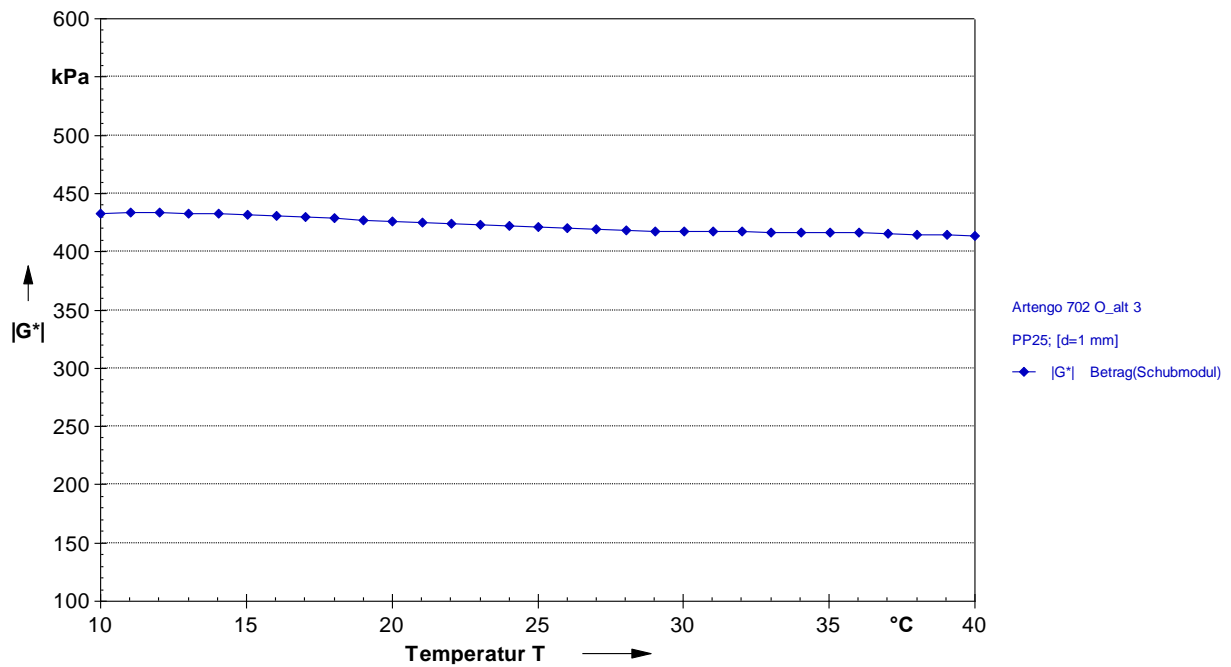
#### A.4. Messschriebe Schubmodul in Abhängigkeit der Temperatur



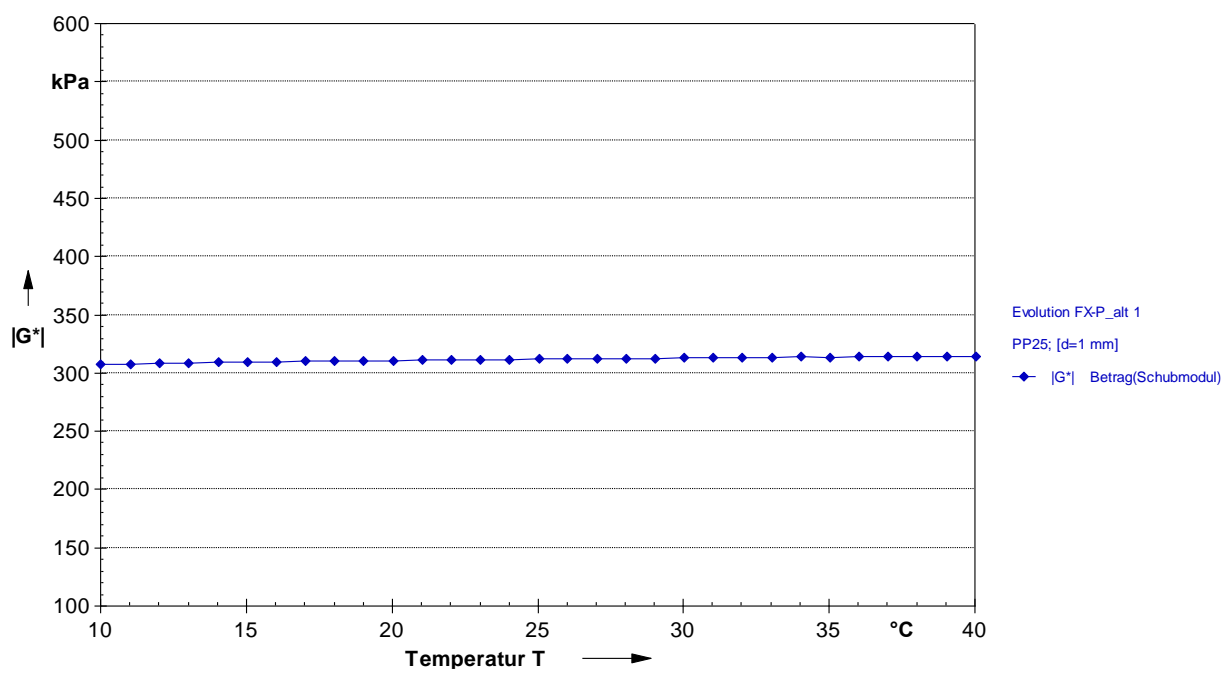
A.4. 1: Artengo 702 O\_alt – Probe 1



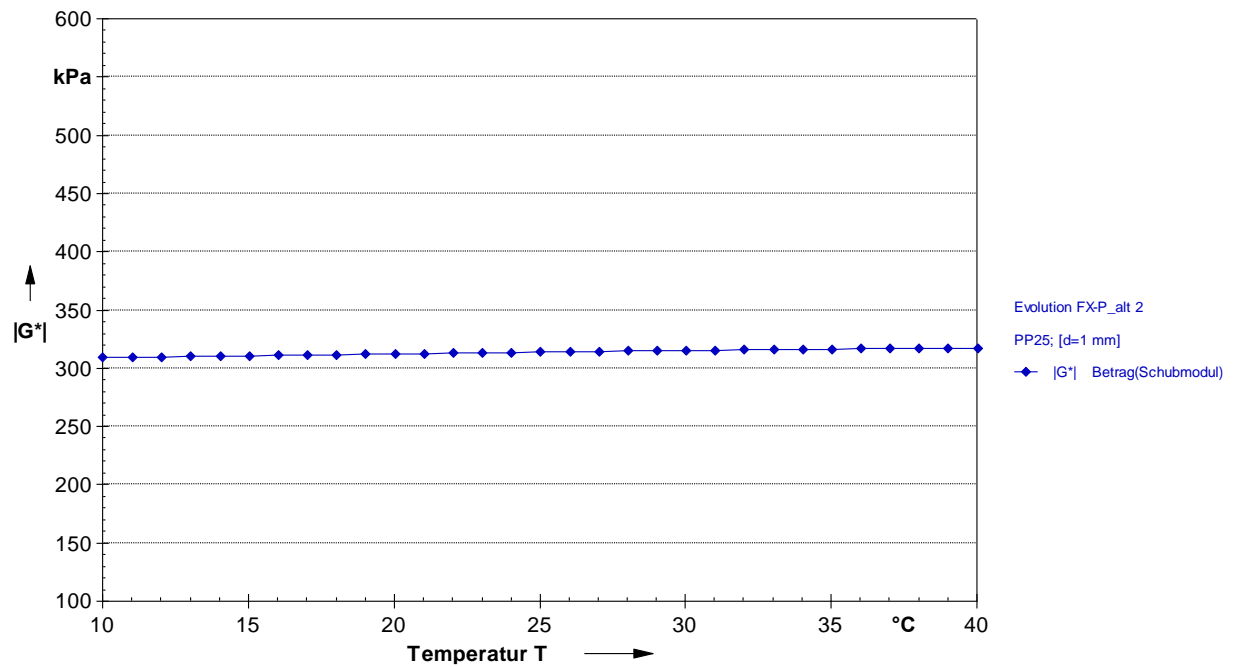
A.4. 2: Artengo 702 O\_alt – Probe 2



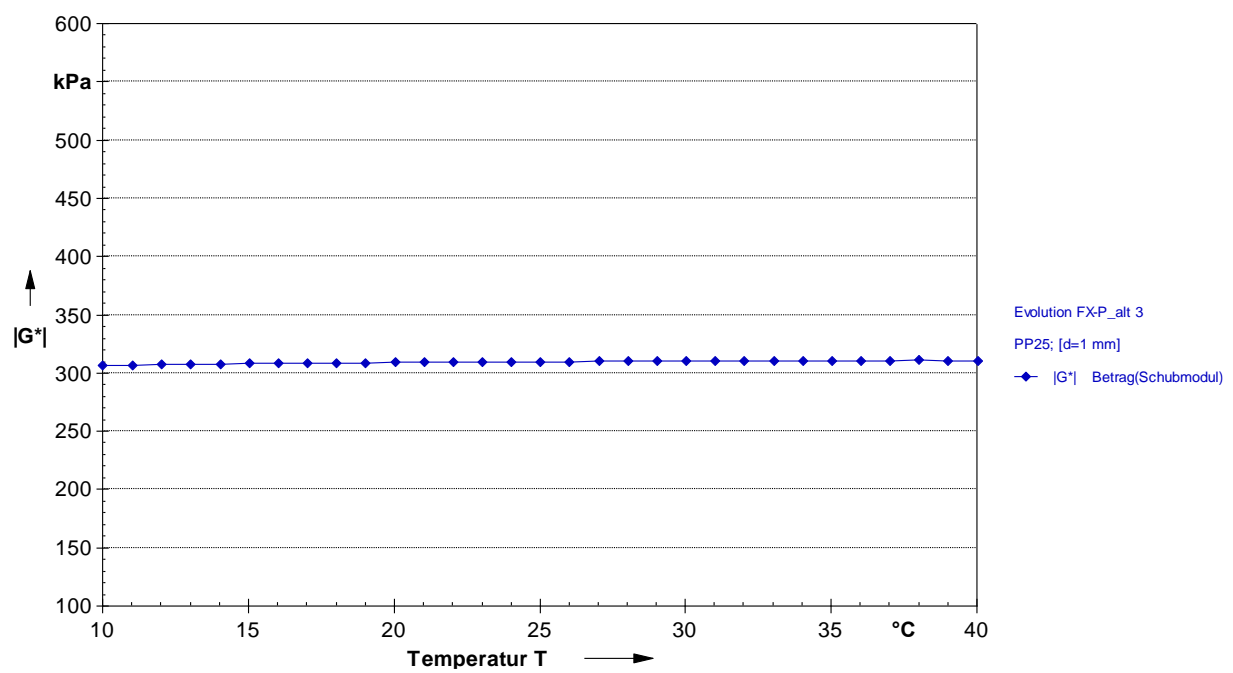
A.4. 3: Artengo 702 O\_alt – Probe 3



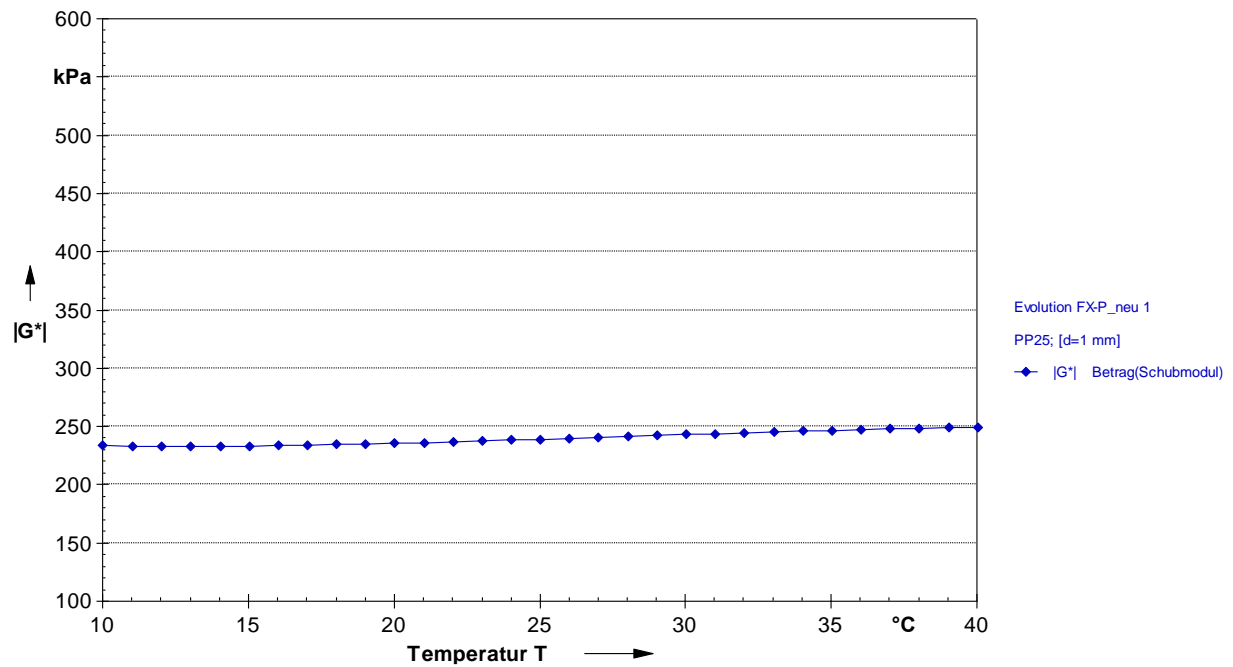
A.4. 4: Evolution FX-P\_alt – Probe 1



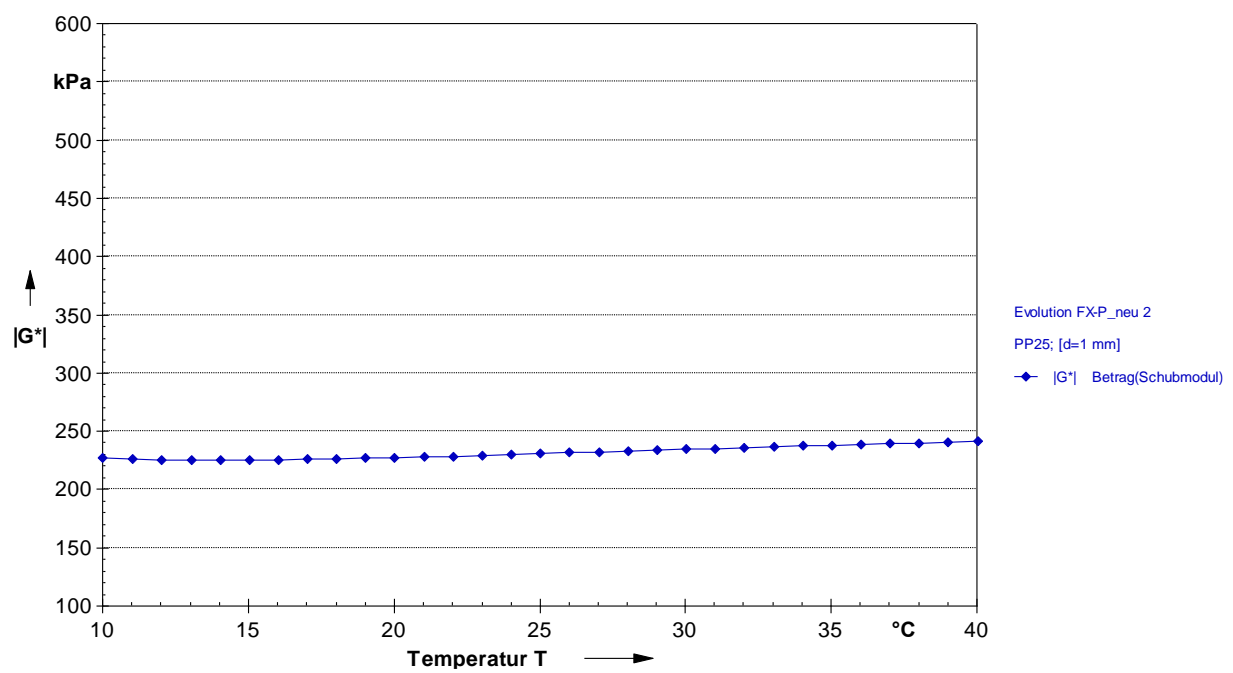
A.4. 5: Evolution FX-P\_alt – Probe 2



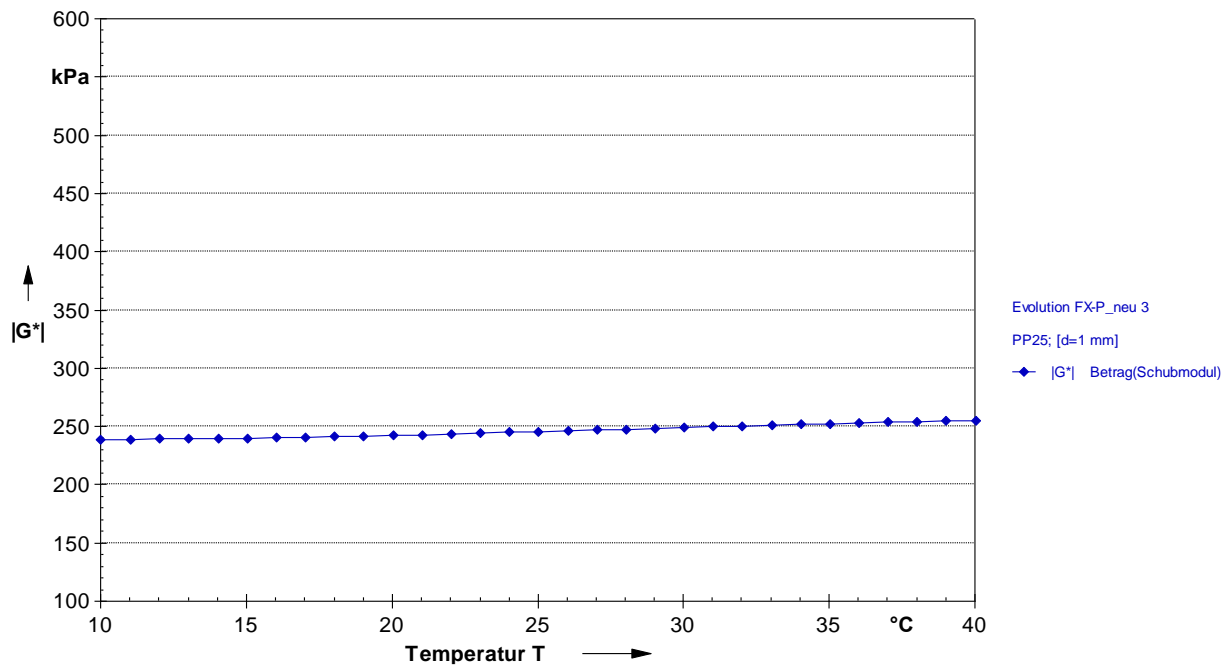
A.4. 6: Evolution FX-P\_alt – Probe 3



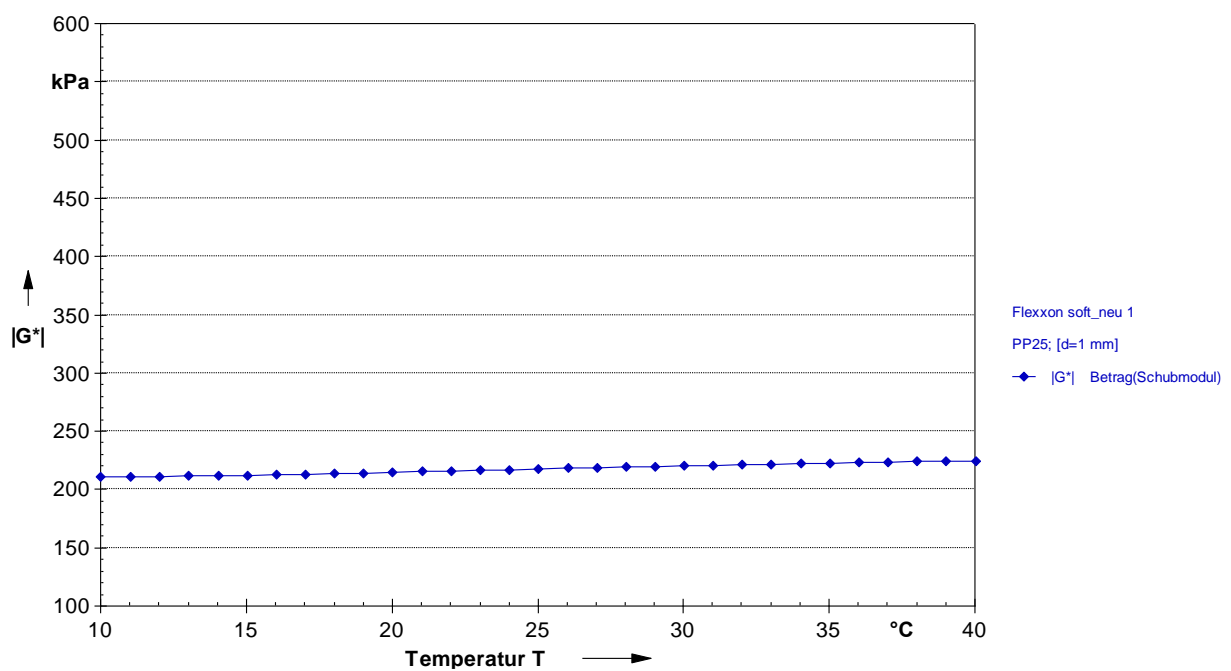
A.4. 7: Evolution FX-P\_neu – Probe 1



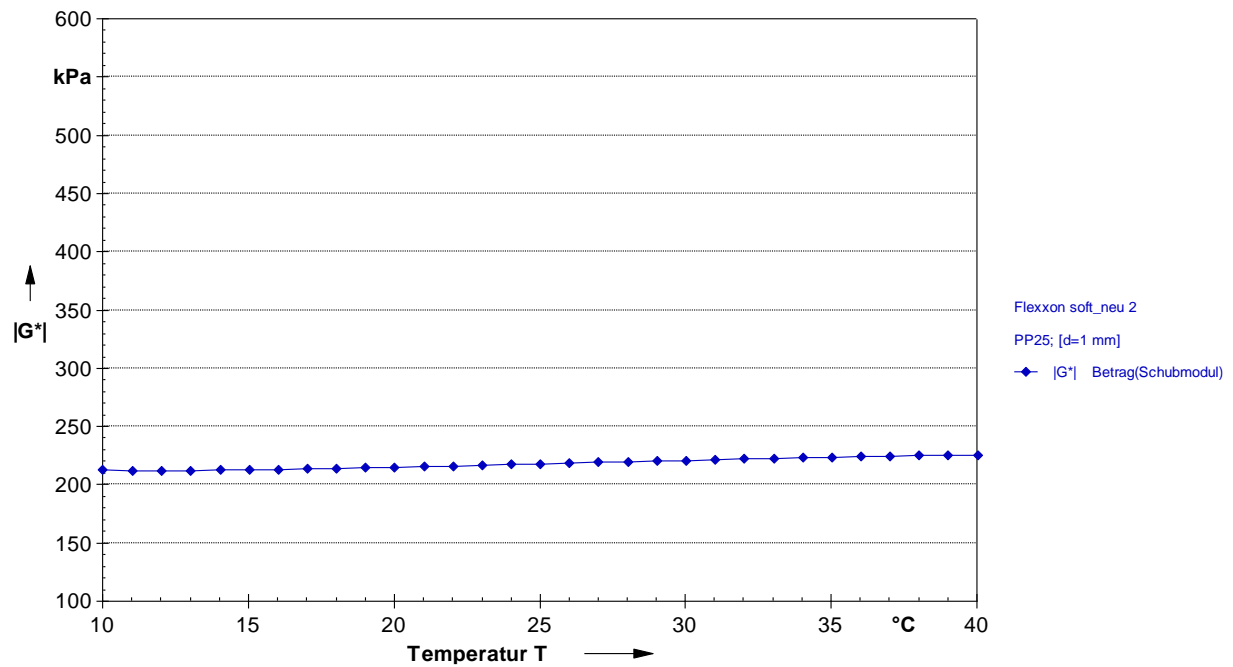
A.4. 8: Evolution FX-P\_neu – Probe 2



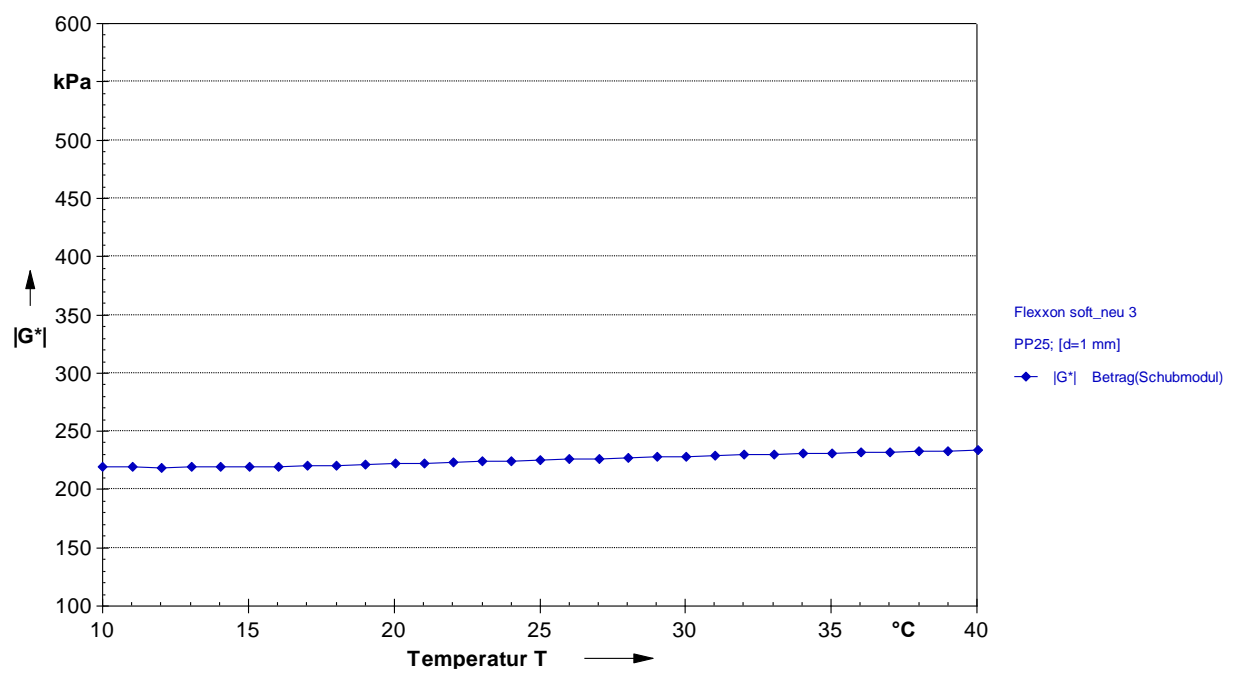
A.4. 9: Evolution FX-P\_neu – Probe 3



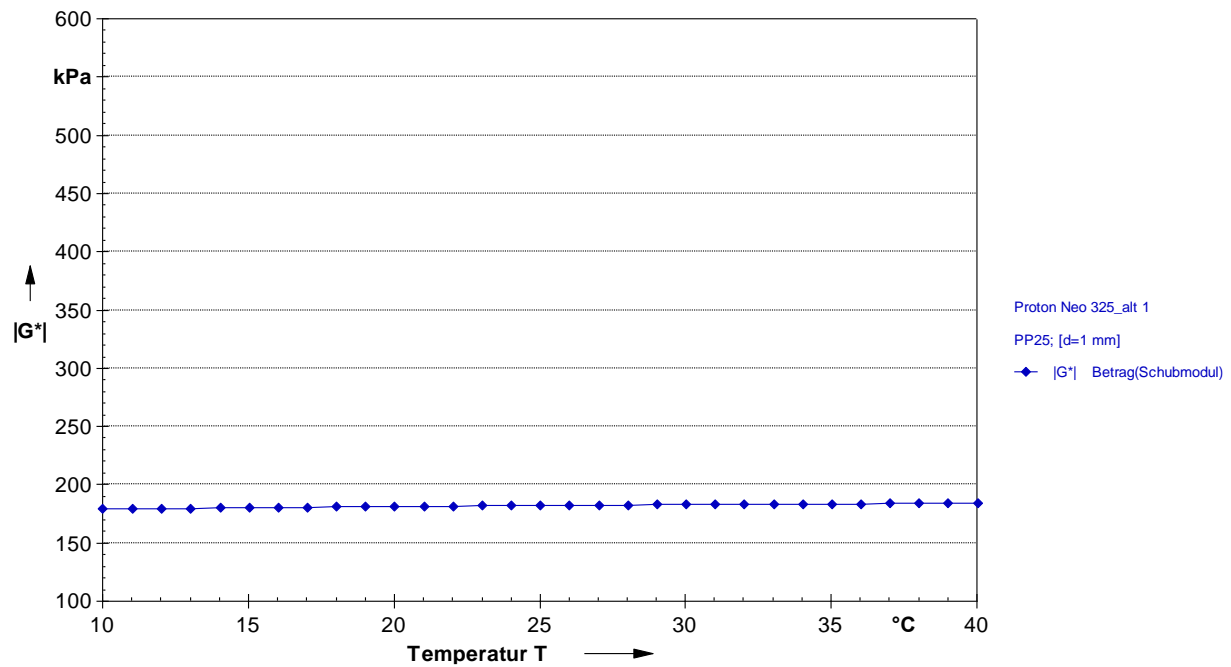
A.4. 10: Flexxon soft\_neu – Probe 1



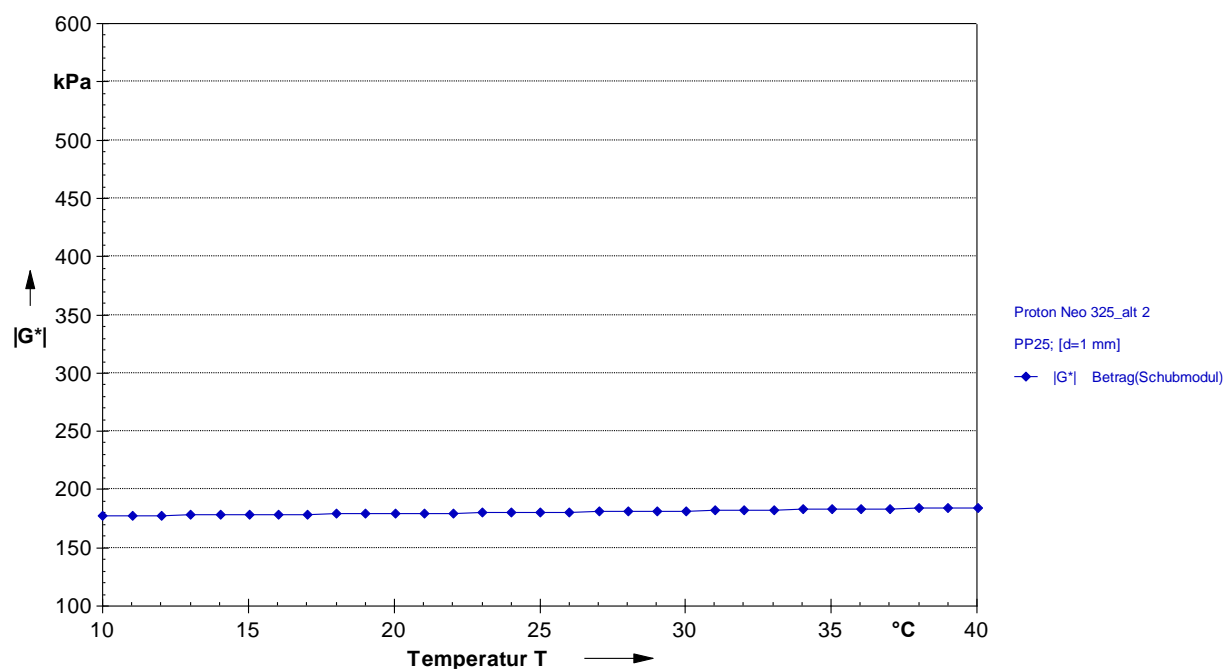
A.4. 11: Flexxon soft\_neu – Probe 2



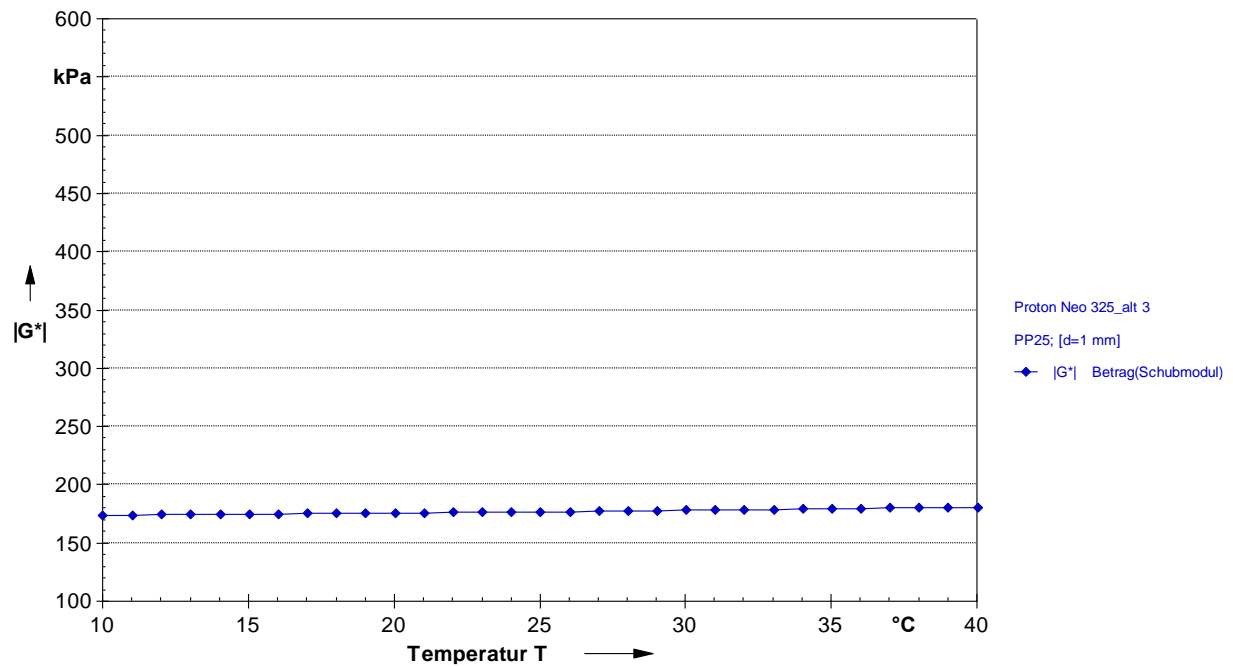
A.4. 12: Flexxon soft\_neu – Probe 3



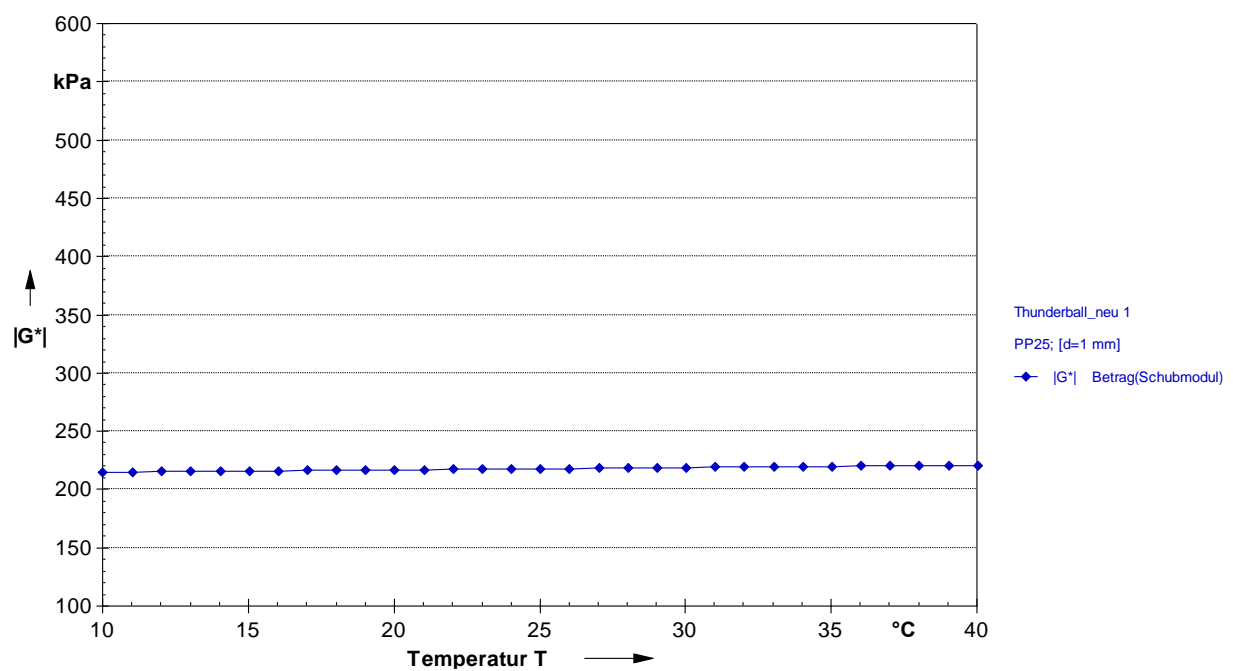
A.4. 13: Proton Neo 325\_alt – Probe 1



A.4. 14: Proton Neo 325\_alt – Probe 2

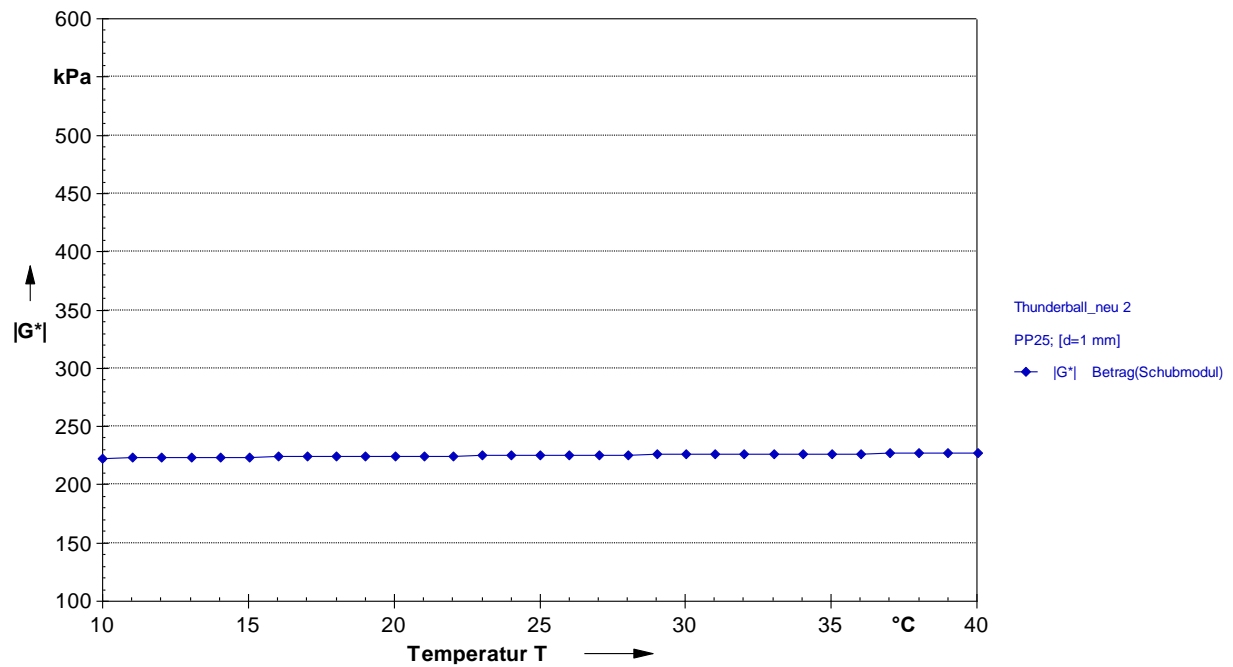


A.4. 15: Proton Neo 325\_alt – Probe 3

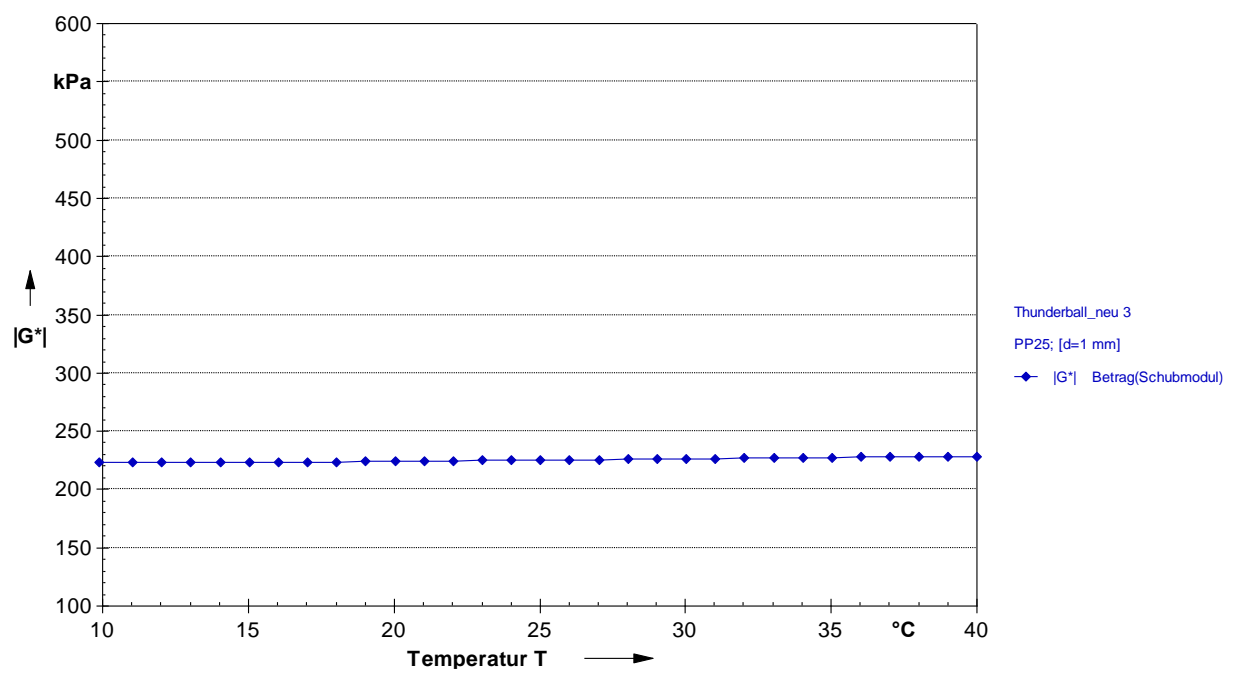


A.4. 16: Thunderball\_neu – Probe 1



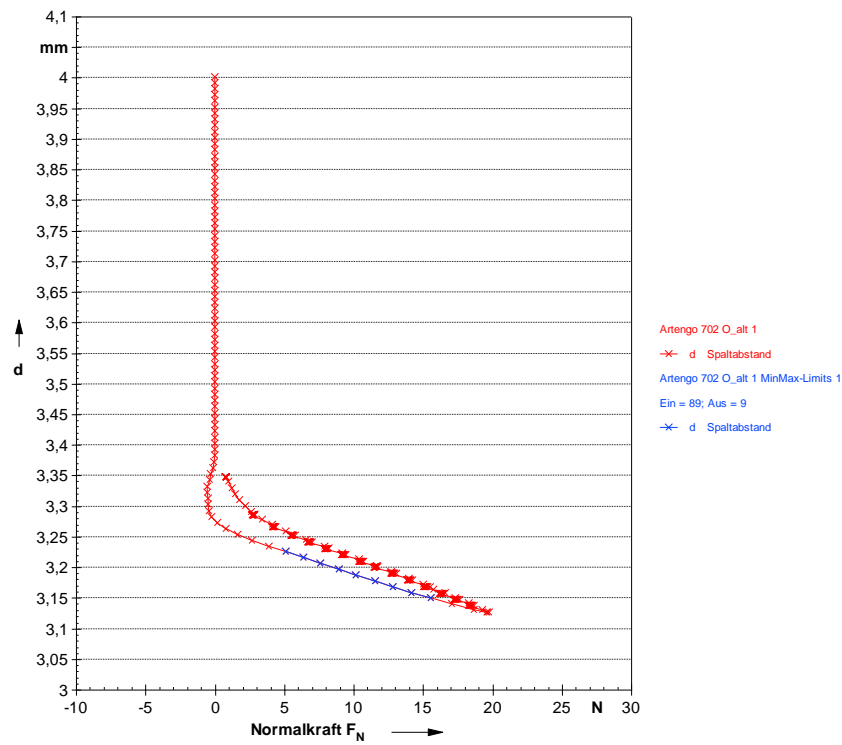


A.4. 17: Thunderball\_neu – Probe 2

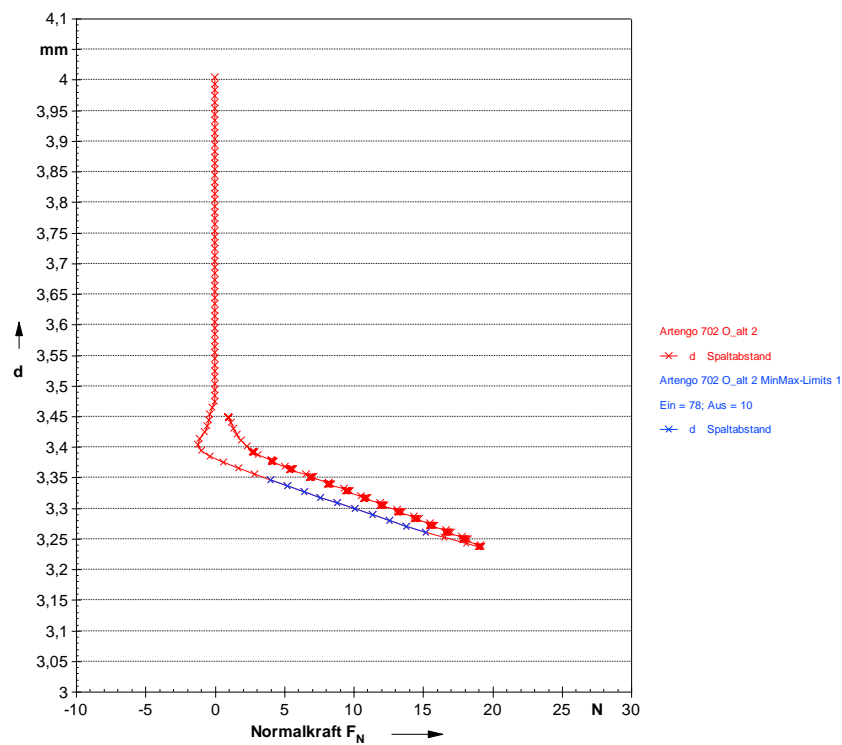


A.4. 18: Thunderball\_neu – Probe 3

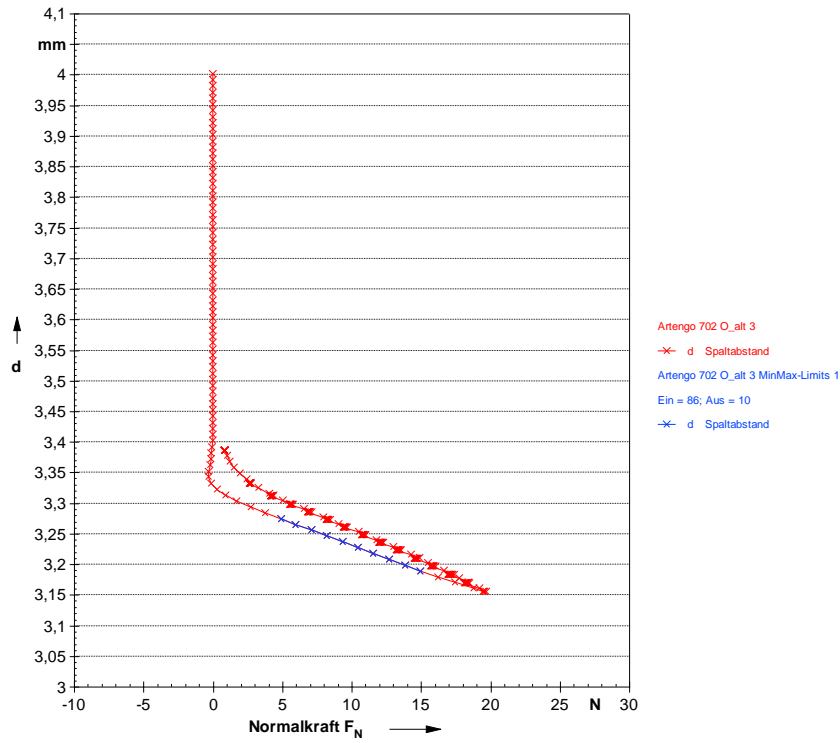
## A.5. Messschriebe Druckversuch



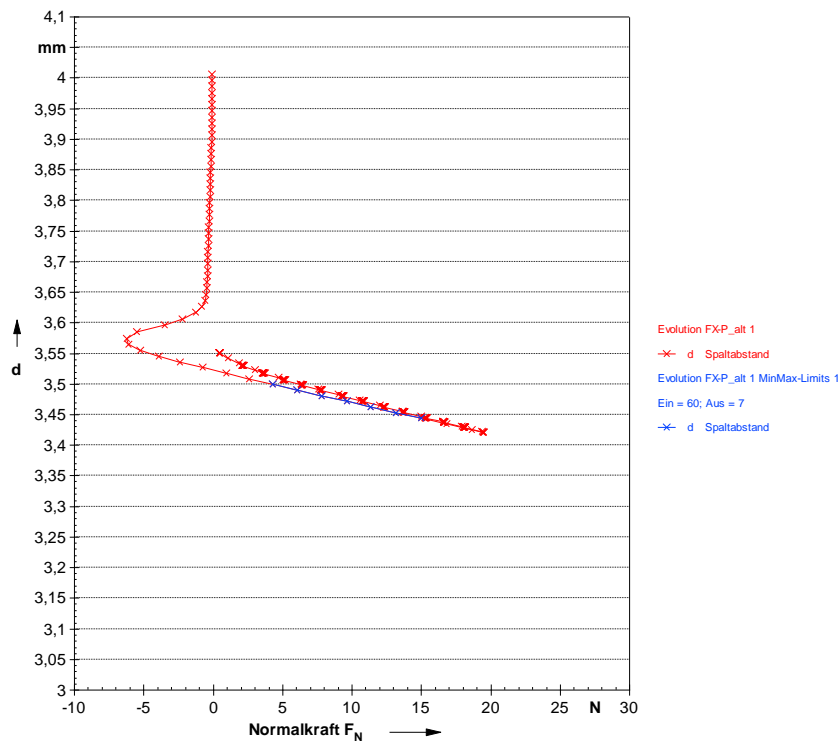
A.5. 1: Artengo 702 O\_alt – Probe 1 bei 20°C



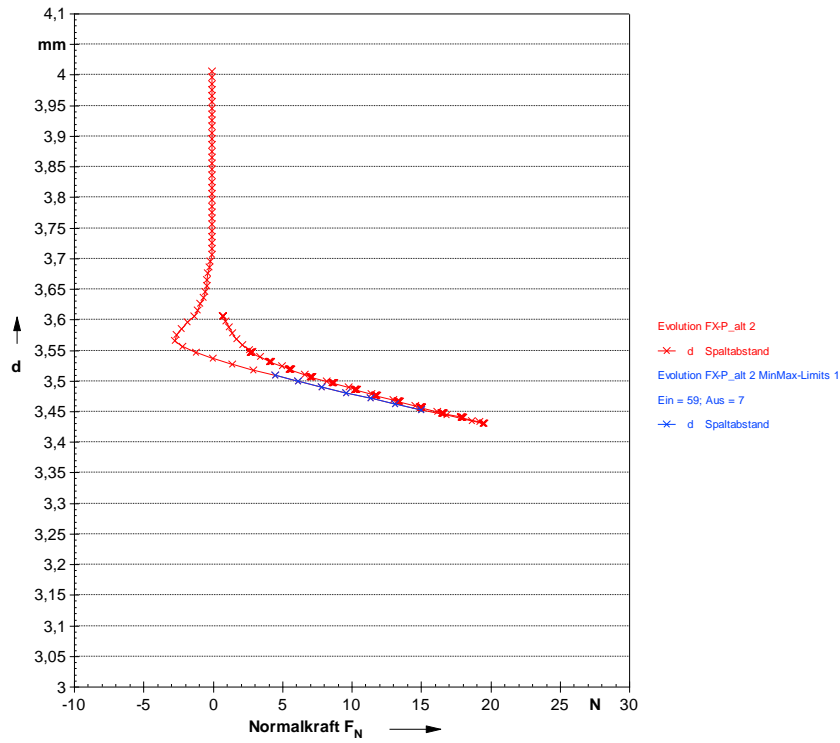
A.5. 2: Artengo 702 O\_alt – Probe 2 bei 20°C



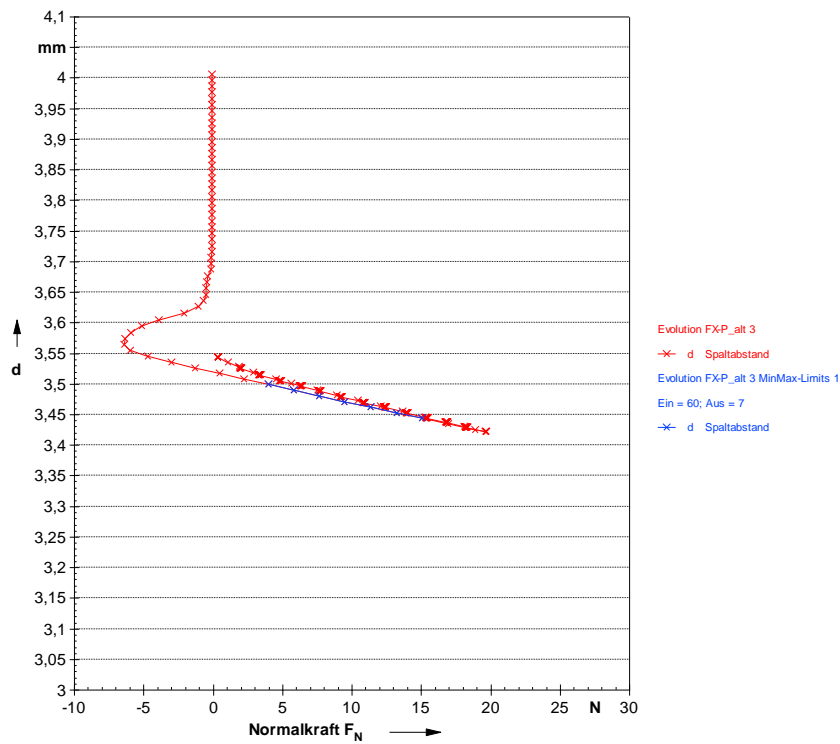
A.5. 3: Artengo 702 O\_alt – Probe 3 bei 20°C



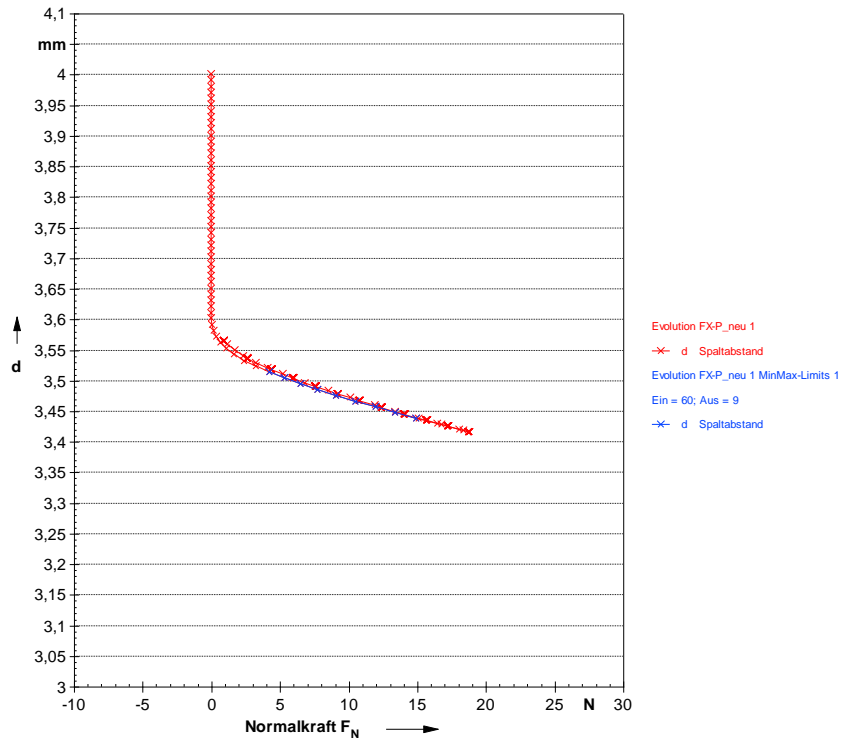
A.5. 4: Evolution FX-P\_alt – Probe 1 bei 20°C



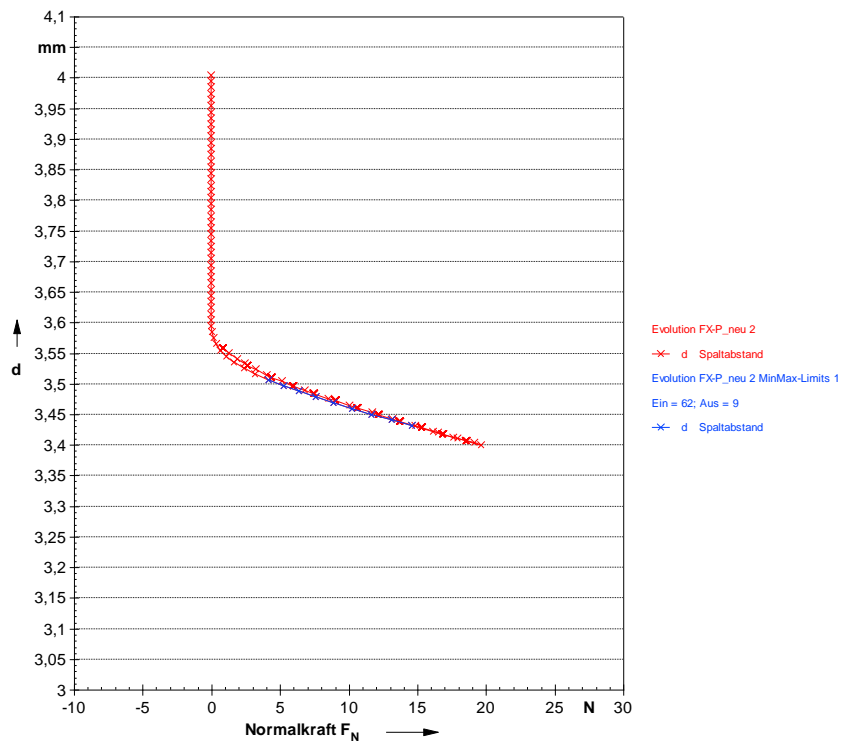
A.5. 5: Evolution FX-P\_alt – Probe 2 bei 20°C



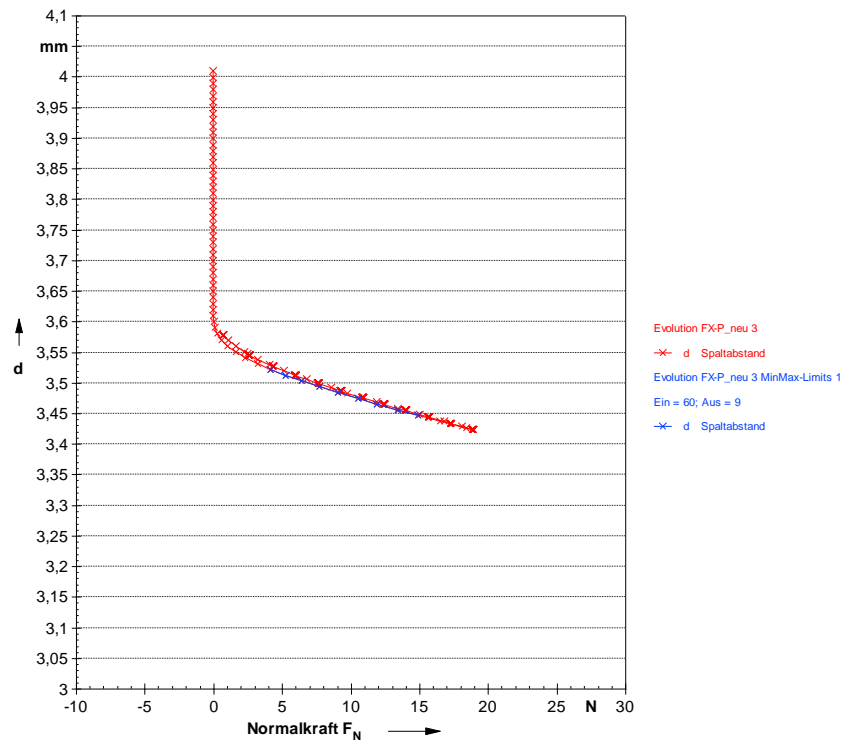
A.5. 6: Evolution FX-P\_alt – Probe 3 bei 20°C



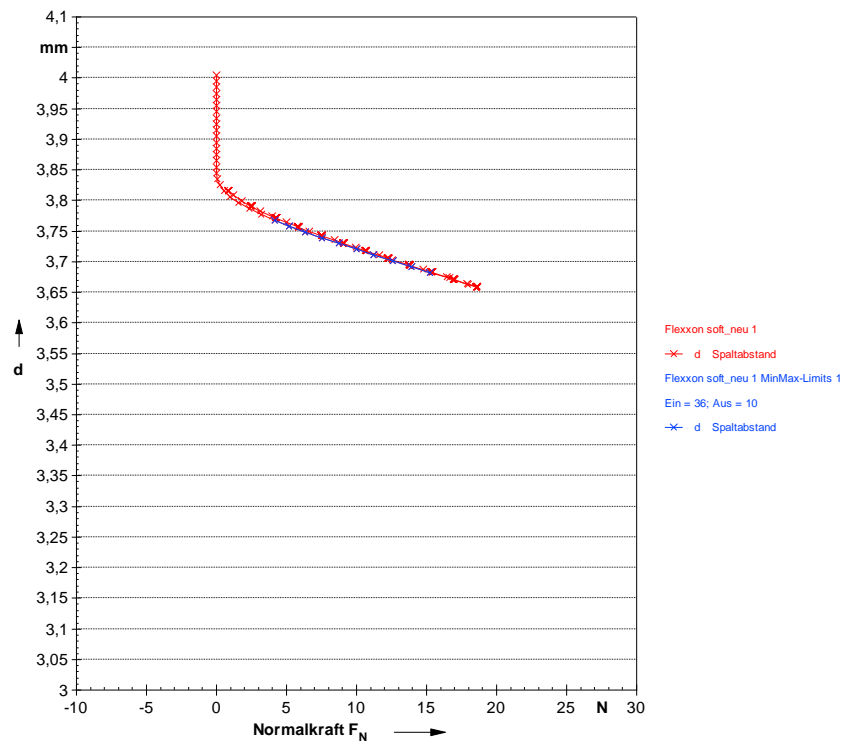
A.5. 7: Evolution FX-P\_neu – Probe 1 bei 20°C



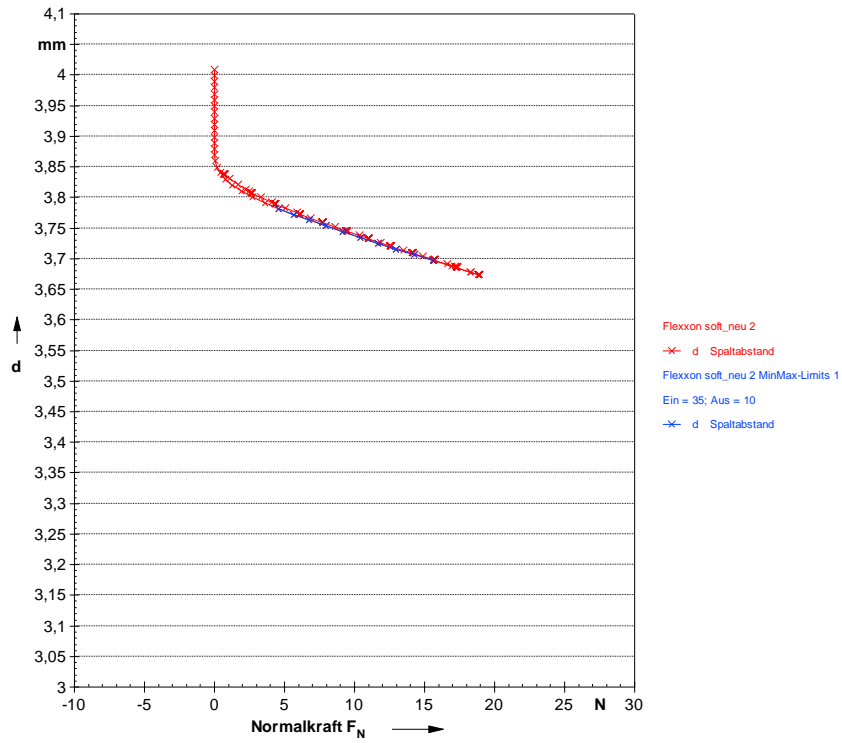
A.5. 8: Evolution FX-P\_neu – Probe 2 bei 20°C



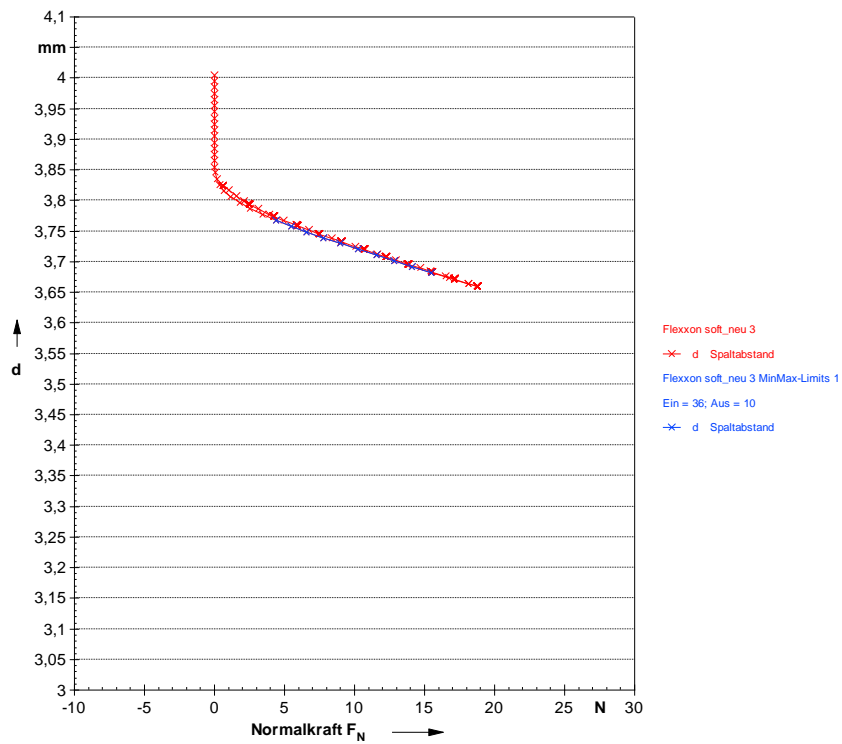
A.5. 9: Evolution FX-P\_neu – Probe 3 bei 20°C



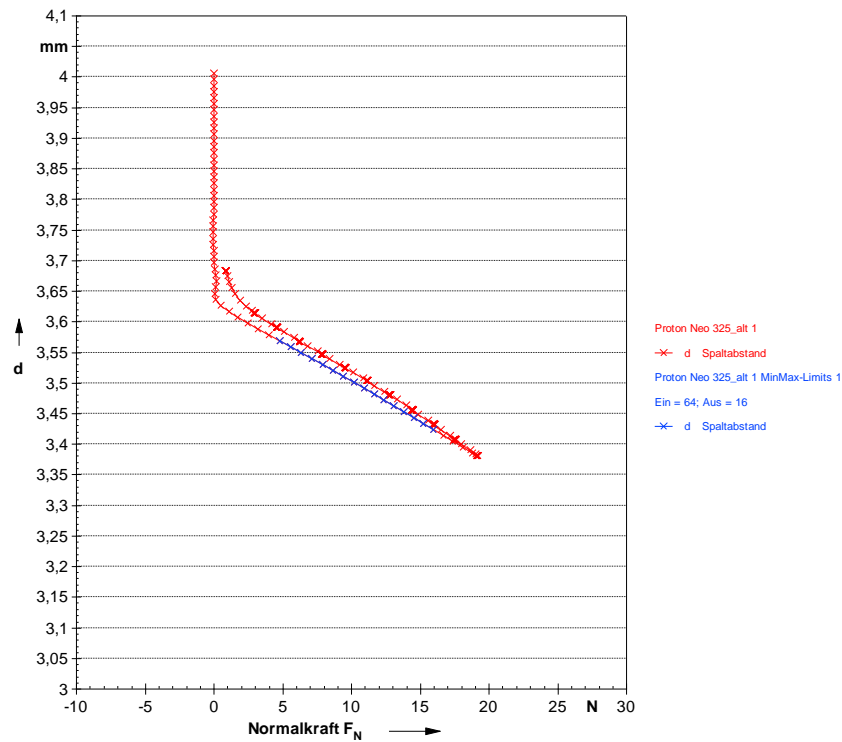
A.5. 10: Flexxon soft\_neu – Probe 1 bei 20°C



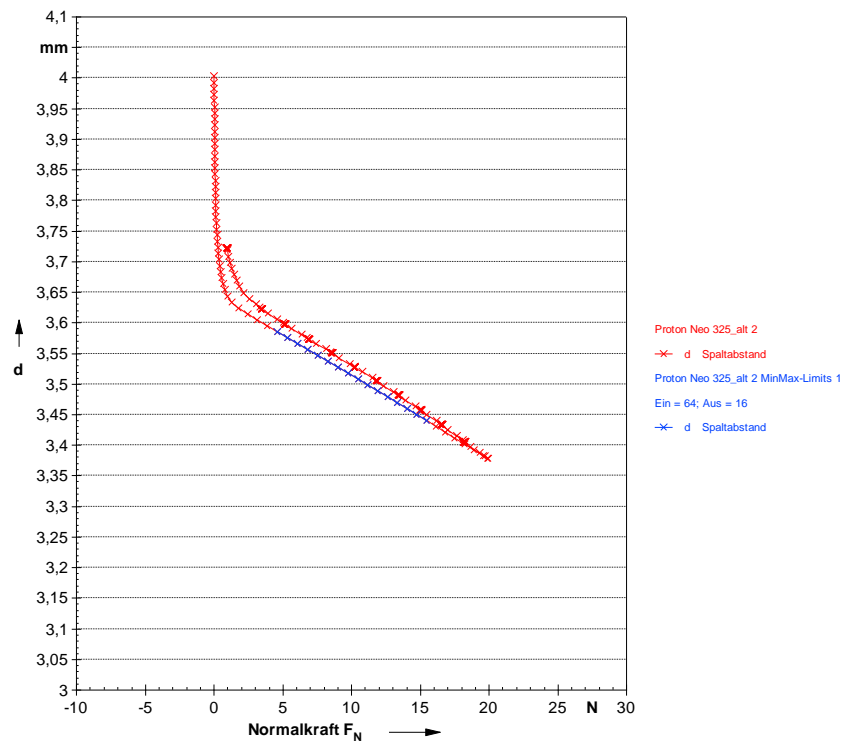
A.5. 11: Flexxon soft\_neu – Probe 2 bei 20°C



A.5. 12: Flexxon soft\_neu – Probe 3 bei 20°C

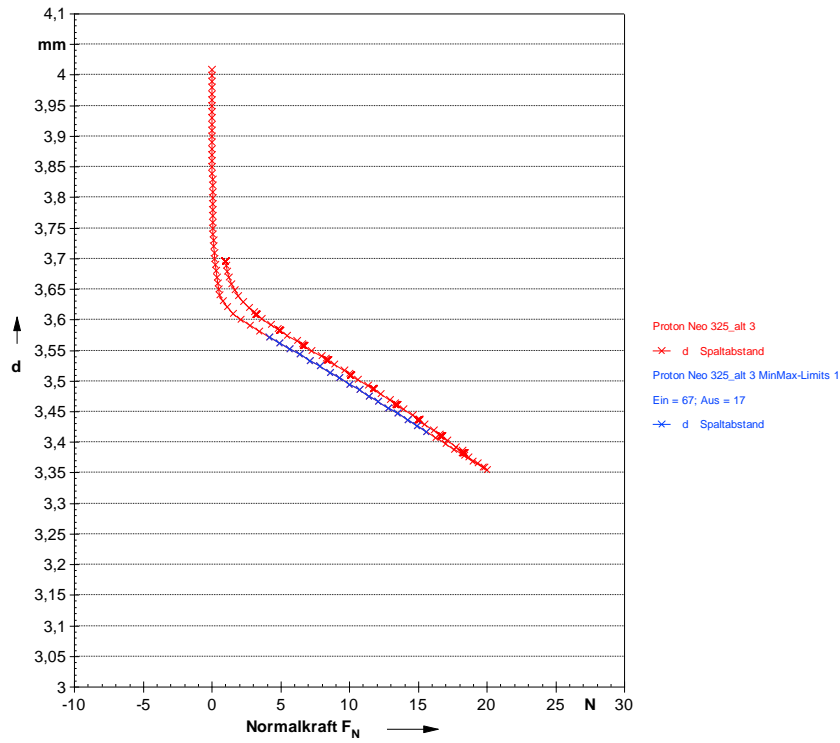


A.5.13: Proton Neo 325\_alt – Probe 1 bei 20°C

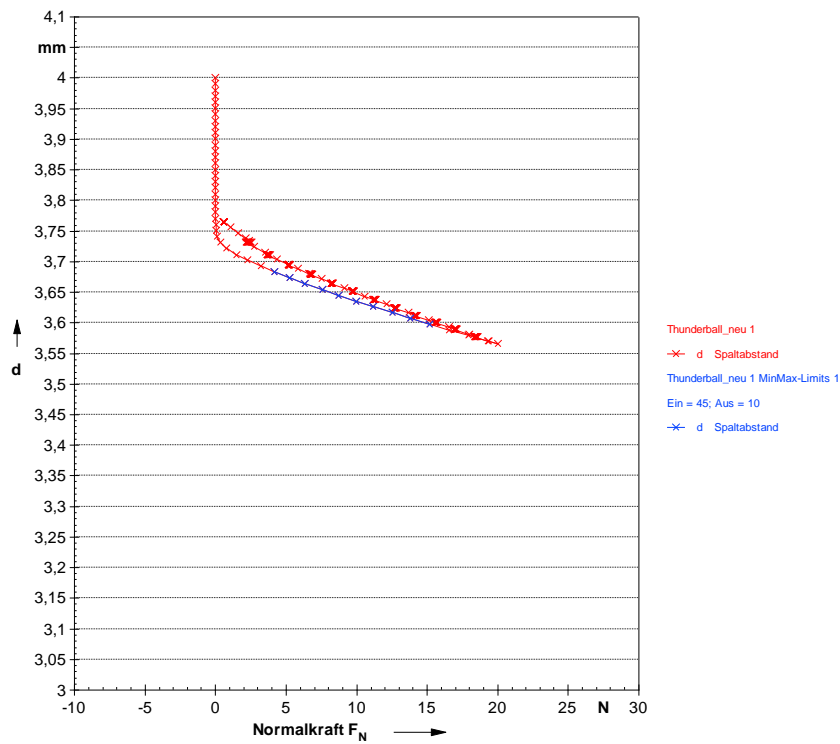


A.5.14: Proton Neo 325\_alt – Probe 2 bei 20°C

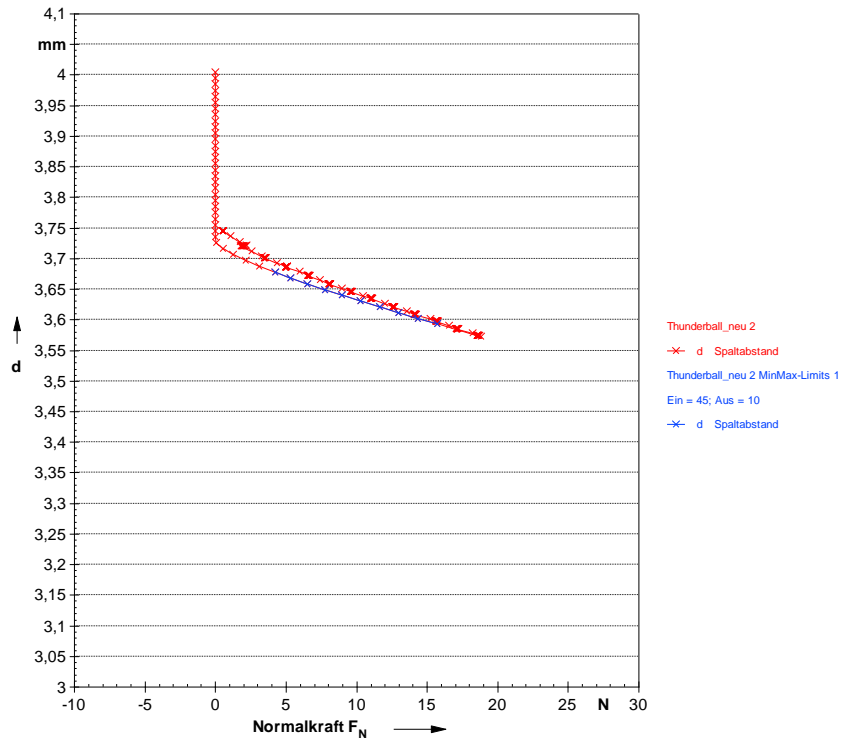




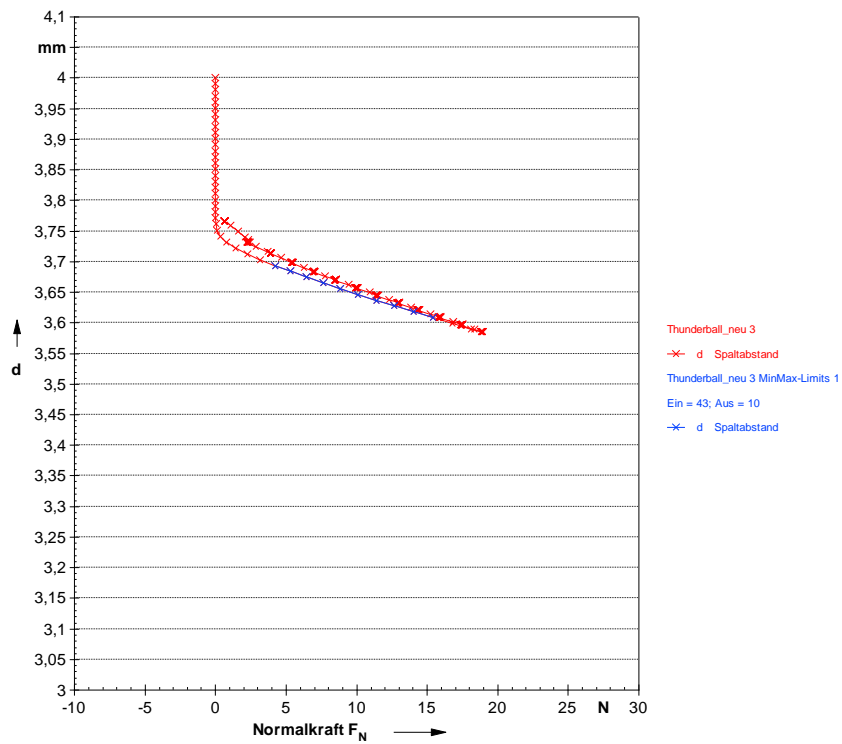
A.5. 15: Proton Neo 325\_alt – Probe 3 bei 20°C



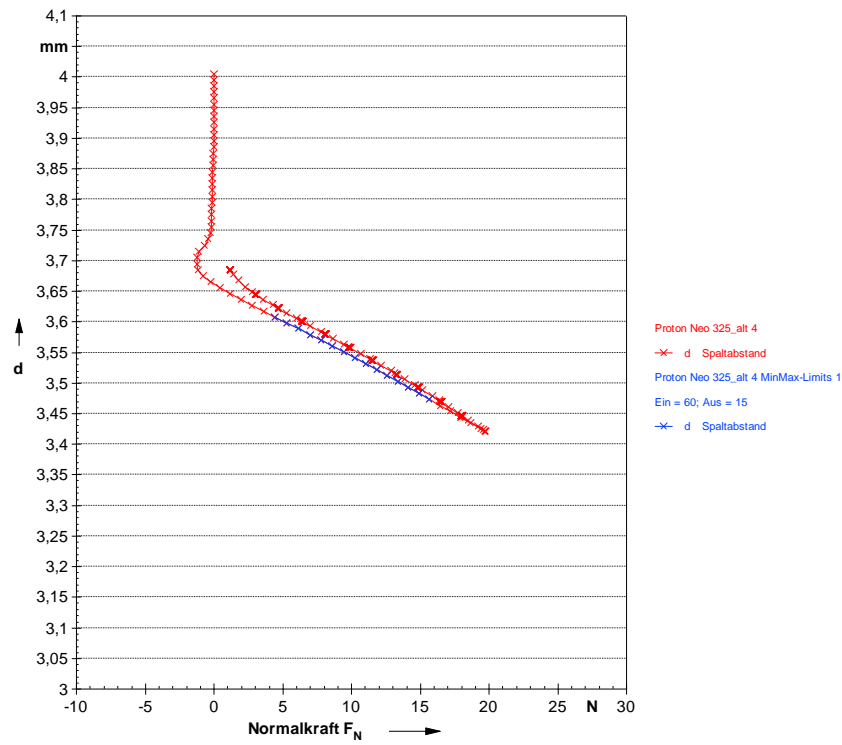
A.5. 16: Thunderball\_neu – Probe 1 bei 20°C



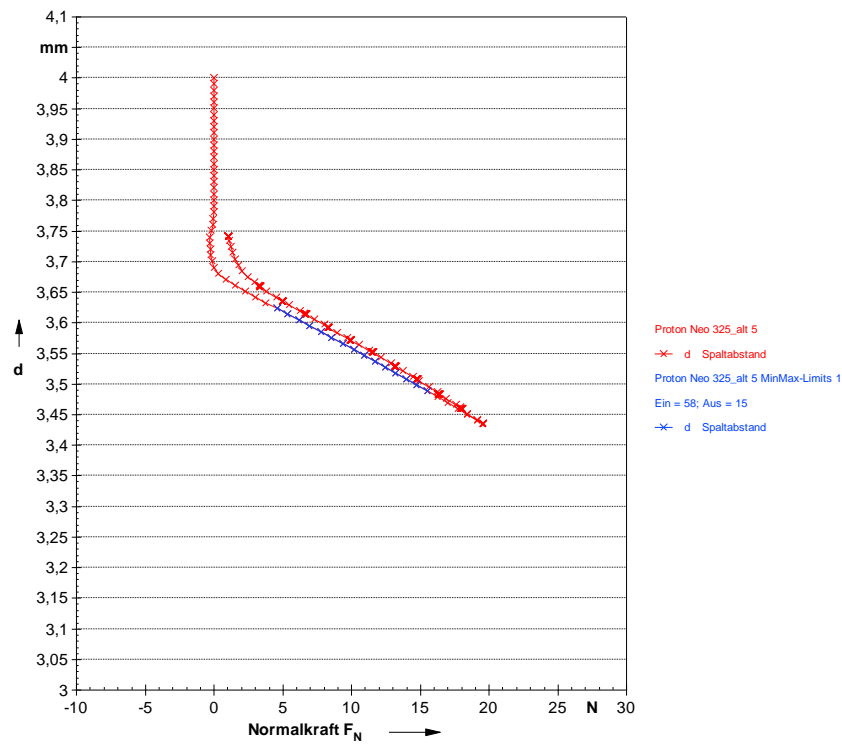
A.5. 17: Thunderball\_neu – Probe 2 bei 20°C



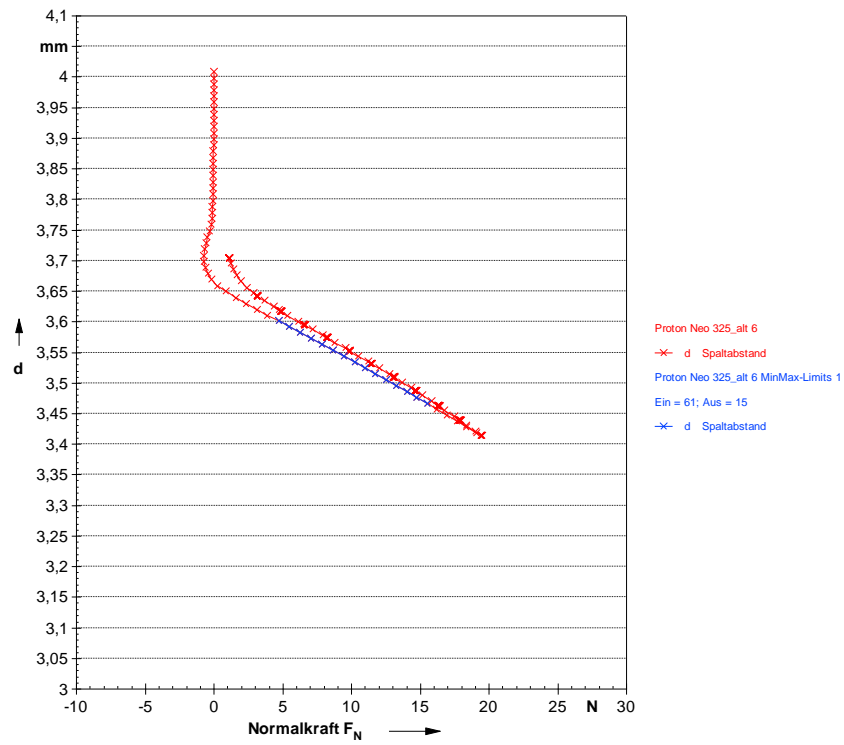
A.5. 18: Thunderball\_neu – Probe 3 bei 20°C



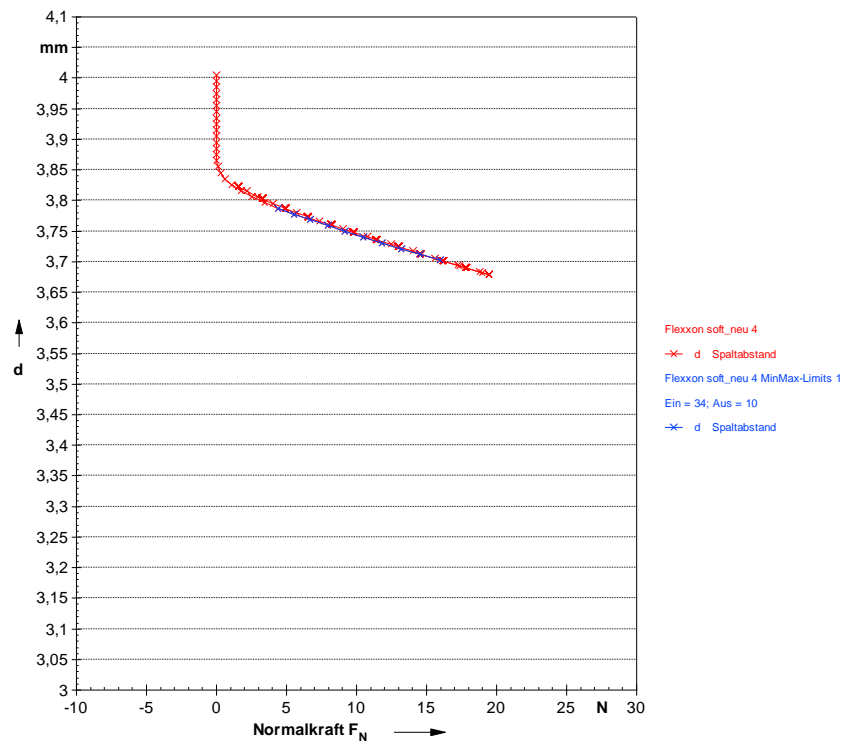
A.5. 19: Proton Neo 325\_alt – Probe 1 bei 40°C



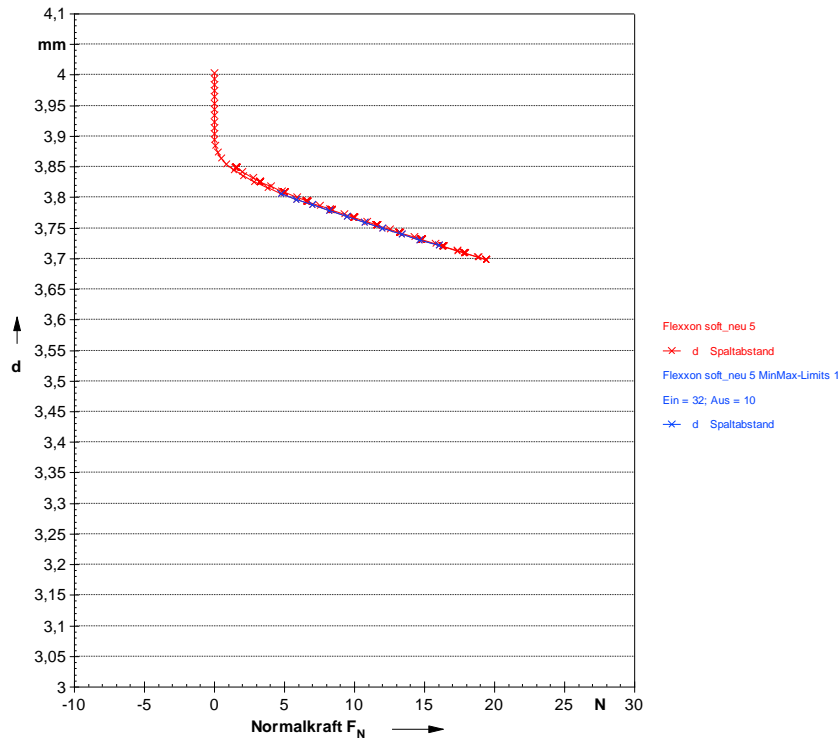
A.5. 20: Proton Neo 325\_alt – Probe 2 bei 40°C



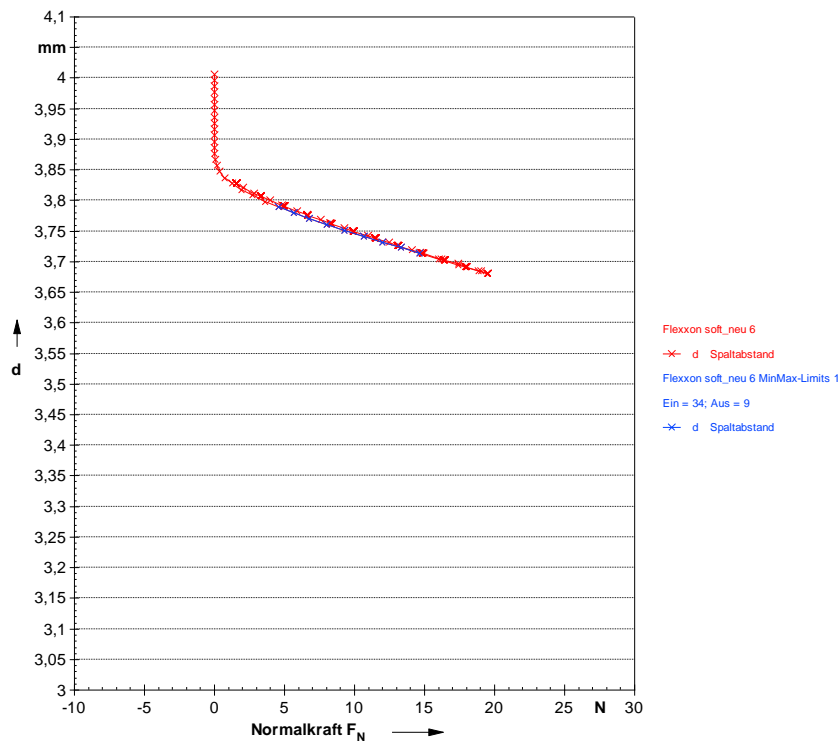
A.5. 21: Proton Neo 325\_alt – Probe 3 bei 40°C



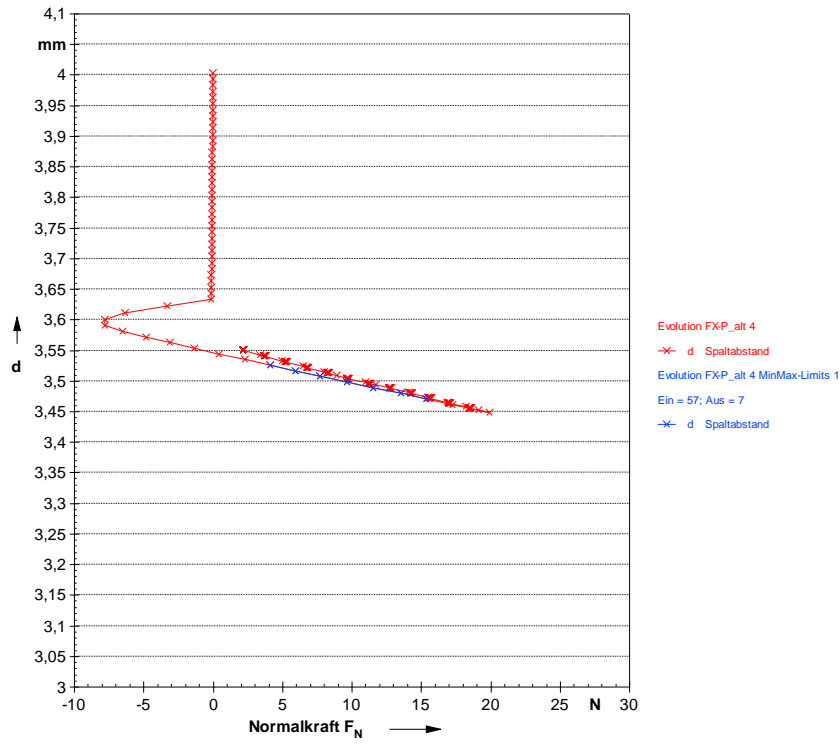
A.5. 22: Flexxon soft\_neu – Probe 1 bei 40°C



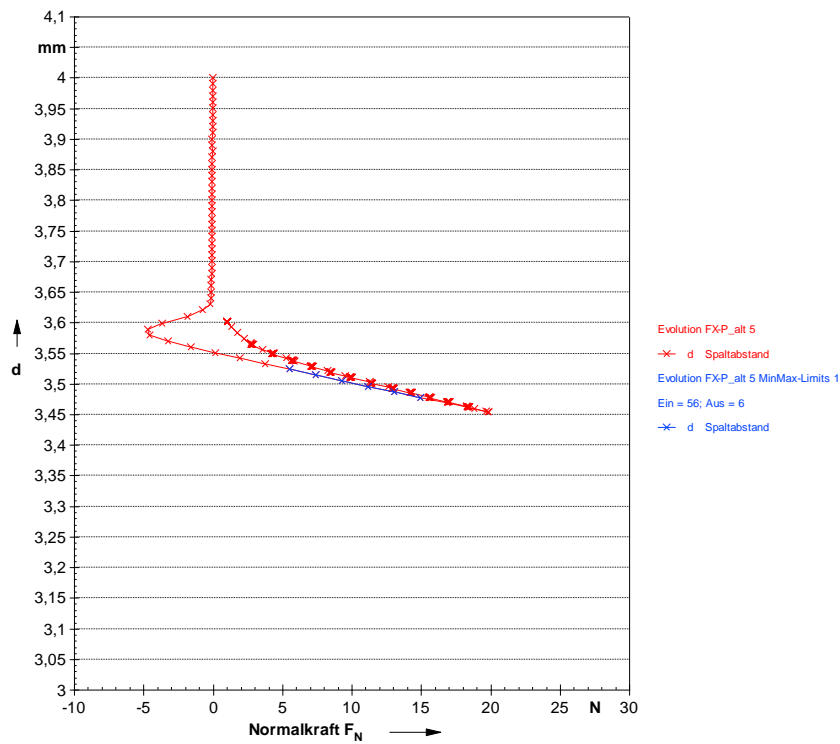
A.5. 23: Flexxon soft\_neu – Probe 2 bei 40°C



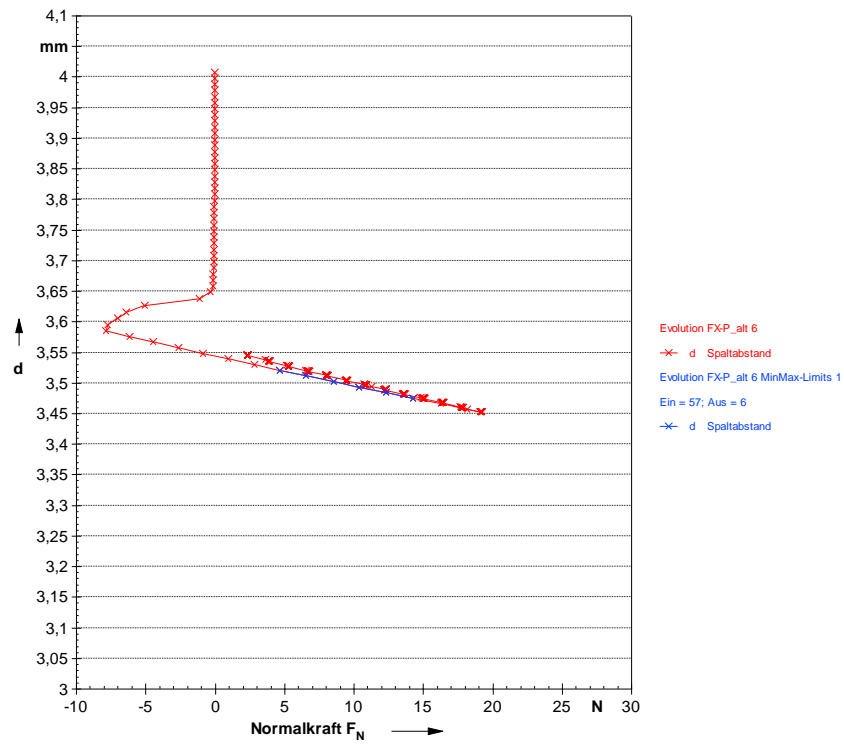
A.5. 24: Flexxon soft\_neu – Probe 3 bei 40°C



A.5.25: Evolution FX-P\_alt – Probe 1 bei 40°C



A.5.26: Evolution FX-P\_alt – Probe 2 bei 40°C



A.5. 27: Evolution FX-P\_alt – Probe 3 bei 40°C

## Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
Hamburg University of Applied Sciences

### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

#### Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name: Barmaksiz

Vorname: Kemal

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung einer Messmethodik zur Bestimmung der Reibungs- und Elastizitätseigenschaften von Materialien auf Basis von Kautschukpolymeren im Tischtennisport

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

*- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -*

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der Bachelorarbeit ist erfolgt durch:

Hamburg

25.07.2019

Ort

Datum

Unterschrift im Original