

Methodenentwicklung zur Charakterisierung des Stick-Slip-Verhaltens von TPU-Materialien

Masterarbeit

von

Andreas Hausberger BSc

eingereicht am

**Institut für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe
Montanuniversität Leoben**

mit Unterstützung der

Polymer Competence Center Leoben GmbH



Betreuung: Dipl.-Ing. Dr.mont. Zoltán Major

Begutachtung: Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter

Dezember 2009

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

AFFIDAVIT

I declare in lieu of oath, that I wrote this thesis and performed the associated research myself, using only literature cited in this volume

Datum

Unterschrift

Danksagung

Die vorliegende Masterarbeit wurde im K_{plus}-Projekt „Tribological and fretting fatigue behavior of thermoplastic and elastomeric gaskets and seal-Part II“ (Projekt-Nr. II-3.10) an der Polymer Competence Center Leoben GmbH im Rahmen des Kompetenzzentren-Programms K_{plus} des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie unter Beteiligung der Montanuniversität Leoben und der Firma SKF ECONOMOS Austria GmbH erstellt und mit Mitteln des Bundes und der Länder Steiermark und Oberösterreich gefördert.

Für die Ermöglichung und die Begutachtung der Masterarbeit gilt mein Dank dem interrimistischen Vorstand des Institutes für Werkstoffkunde und Prüfung der Kunststoffe der Montanuniversität Leoben, Herrn Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Gerald Pinter. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Zoltán Major, der mir als Betreuer einen reibungslosen Ablauf meiner Masterarbeit in einer vielleicht nicht so unkomplizierten Zeit ermöglichte und Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. István Gódor der mir in zahlreichen Diskussionen hilfreich zur Seite stand.

Bedanken möchte ich mich zudem bei der SKF ECONOMOS Austria GmbH, insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.mont. Thomas Schwarz sowie Herrn Dipl.-Ing. Manfred Moitzi und Herrn Dipl.-Ing. Mario Mitterhuber für die Bereitstellung der Materialien sowie der Fertigung sämtlicher Bauteile für diese Masterarbeit.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Michael Berer bedanken. Für die Hilfe bei programmier-technischen Fragen möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Daniel Tscharnuter meinen Dank aussprechen. Außerdem gilt allen Mitarbeitern des PCCL für das kollegiale Arbeitsumfeld mein Dank.

Kurzfassung

Das Stick-Slip-Phänomen wie in der Literatur beschrieben spielt bei thermoplastischen und auch elastomeren Werkstoffen bei tribologischen Anwendungen eine außerordentlich wichtige Rolle. Da es sich um einen instabilen Reibungsprozess handelt wird die Performance von Bauteilen negativ beeinflusst. Aufgrund lokal erhöhter Reibung (adhäsiver Verschleiß) kommt es immer wieder zu Schädigungen an Bauteilen wie Dichtungen, Scheibenwischerblättern oder Dämpfungselementen.

Für die Charakterisierung des Stick-Slip-Verhaltens von polymeren Werkstoffen wurde ein neuer Prüfaufbau mit Datenauswertung konzipiert. Für die Vergleichbarkeit zwischen Festkörper und Oberfläche stellte sich ein torsionaler Versuchsaufbau als geeignet heraus. So wurde der neue Prüfaufbau in eine axiale/torsionale Dynamisch-Mechanischen-Analyse Maschine (DMA) (BOSE Electroforce 3230) implementiert. Dadurch konnten Oberflächen- mit Festkörpereigenschaften durch Verwenden eines einheitlichen Prüfsystems verglichen werden.

Zu diesem Zweck wurden aus mehreren Modellwerkstoffen ein ungefülltes und gefülltes thermoplastisches Polyurethansystem ausgewählt. Die aus den Werkstoffen unter kontrollierten Bedingungen hergestellten Prüfkörper wurden sowohl unter monotoner als auch zyklischer Belastung untersucht. Um das Stick-Slip-Verhalten festkörper- und oberflächenbezogen ausführlich zu charakterisieren wurden die Prüfparameter in einem weiten Bereich systematisch variiert (Geschwindigkeit, Belastung und Auslenkung). Das Auftreten von Stick-Slip wurde in Form von Drehmoment-Auslenkungskurven für monotone und zyklische Versuche gemessen. Daraus wurden entsprechende kritische Spannungen und Dehnungen ermittelt und in Form von Abhängigkeitsdiagrammen und einer „Running Condition Stick-Slip Map“ (zeigt die entsprechenden Parametereinflüsse) dargestellt.

Neben den Ergebnissen aus den experimentellen Charakterisierungen, die für eine Werkstoffauswahl von großem Nutzen sind, wurde auch eine neuartige phänomenologische Modellierung durchgeführt. Die Ergebnisse der durchgeführten Festkörperuntersuchungen können als Eingangsdaten für zukünftige FEM-Simulationen verwendet werden und in Kombination mit dem Wissen von phänomenologischen Modellen die Bauteilauslegungen unterstützen.

Abstract

The stick-slip-phenomenon, as described in the literature, plays an extraordinary important role for thermoplastic and elastomer materials in many tribological applications. In a number of practical situations, stick slip behaviour as friction instability phenomenon may negatively influence the sliding performance of various components. Furthermore, due to the strong local adhesion, adhesion wear causing a significant reduction of the life time of the tribological relevant components (e.g., seals, wipers or dampers) was observed. Hence, the objective of this Master Thesis was to characterise the stick-slip behaviour of polymeric materials.

A novel rotation based test set-up was developed and implemented with data evaluation. To compare surface properties with bulk material properties a novel rotational based test set-up was implemented on an axial/torsional dynamic testing machine (DMA, BOSE 3200AT). By using that DMA it was possible to perform surface and bulk tests on the same test configuration.

For these experiments, two (one filled and one unfilled) thermoplastic polyurethane systems were selected out from a variety of material configurations. Test specimens were produced under controlled conditions and were tested applying both, monotonic and cyclic loading. To comprehensively characterise the surface and bulk related stick-slip behaviour of TPUs, the test parameters (e.g., velocity, load and rotation) were systematically varied over a wide range. Torque-rotation curves were measured under monotonic and cyclic conditions and the occurrence of stick-slip was determined based on critical stress and strain values. The load, velocity and amplitude dependences of the results were summarized in form of diagrams and in a "Running Condition Stick-Slip Map".

In addition to the experimental characterisation which can be used for improved material selection, a novel phenomenological modelling was carried out. The results of the bulk experiments can later be used as input data for FEM simulations and in combination with the knowledge of the phenomenological models, it is possible to make a more efficient component design.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung und Zielsetzung	1
2.	Grundlagen	3
2.1	Reibungsinstabilität	3
2.2	Definition des Stick-Slip Phänomens.....	3
2.3	Bedeutung des Stick-Slip Verhaltens bei Kunststoffen.....	4
2.3.1	Einfluss der Temperatur	4
2.3.2	Belastung	7
2.3.3	Geschwindigkeit	10
2.3.4	Oberflächenbeschaffenheit	12
2.4	Modellvorstellungen zur Beschreibung des Stick-Slip Verhaltens	15
2.4.1	Rheologische Modelle	15
2.4.2	Hysteresische phänomenologische Modelle	19
2.5	Beispiele für Stick-Slip Charakterisierungen in der Literatur	21
3.	Experimentelles	24
3.1	Werkstoffe	24
3.2	Oberflächenuntersuchungen	25
3.2.1	Vorteile des „RoD“ Prüfaufbaues.....	26
3.2.2	Integrierung des „RoD“ Prüfaufbaus in eine DMA	26
3.2.3	Der Prüfaufbau	26
3.2.4	„Ring-on-Disc“-Prüfkörper	27
3.2.5	„Ring-on-Disc“ Gegenkörper	28
3.2.6	Herstellung von Prüf- und Gegenkörper	29
3.2.7	Oberflächencharakterisierung	30
3.3	Torsionale Festkörperuntersuchungen.....	31
3.3.1	Hantelprüfkörper für Torsionsversuche	31
3.4	Messtechnik	32

3.4.1	Gemessene Größen.....	33
3.4.2	Berechnete Größen der Oberflächenuntersuchungen.....	33
3.4.3	Berechnete Größen der Torsionsuntersuchungen	36
3.5	Prüfmethodik	37
3.5.1	Monotone Oberflächenuntersuchungen	37
3.5.2	Dynamische Oberflächenuntersuchungen	38
3.5.3	Monotone auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche	38
3.5.4	Dynamische auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche.....	39
3.6	Modellierung.....	39
4.	Ergebnisse und Diskussion	40
4.1	Monotone Oberflächenuntersuchungen	40
4.1.1	Auswertung der kritischen Spannungen bei Stick und Slip	42
4.1.2	Auswertung der kritischen Reibungskoeffizienten bei Stick und Slip.....	44
4.2	Dynamische Oberflächenuntersuchungen	48
4.2.1	Darstellung der kritischen Spannungen.....	50
4.3	Monotone auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche	57
4.4	Dynamische auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche.....	62
4.5	Korrelation zwischen Versuch und Modell.....	65
5.	Zusammenfassung und Ausblick	74
6.	Literatur.....	76
7.	Anhang.....	78
7.1	Abbildungsverzeichnis.....	78
7.2	Tabellenverzeichnis.....	88
7.3	Konstruktionszeichnungen	89
7.4	Monotone Stick-Slip Diagramme	91
7.5	Dynamische Stick-Slip Diagramme	93
7.6	Matlab	104
7.7	Modellauswertung	106

1. Einleitung und Zielsetzung

Befasst man sich in der Forschung mit dem Gebiet der Tribologie, „*der Wissenschaft und Technik aufeinander einwirkenden Oberflächen in Relativbewegung*“ (Jost, 1966), so umfasst dies die Gesamtheit der Reibung. In einem Reibungssystem kommt es immer wieder zu Instabilitäten, die sich unter anderem in Form von reib-erregten Schwingungen zeigen. Diese Schwingungen werden oft als Stick-Slip-Phänomen bezeichnet. Dabei handelt es sich um eine alternierende Ruck- und Gleitbewegung, die einem Sägezahnprofil ähnelt. Bhushan (2000) weist in seinem Werk auf die Wichtigkeit dieses Phänomens für das Verständnis der Tribologie hin. Durch das Auftreten von Stick-Slip wird die Lebensdauer von Bauteilen wie Dichtungen, Scheibenwischerblättern und Dämpfungselementen gravierend beeinflusst.

In dieser Masterarbeit soll eine Methodik entwickelt werden, mit der es ermöglicht, das Stick-Slip-Verhalten von Polymerwerkstoffen zu charakterisieren. Die Identifikation des Phänomens sollte für monotone wie auch dynamische Belastungen durchführbar sein. Außerdem sollten neben oberflächenbezogenen Untersuchungen ebenfalls Versuche am Festkörper durchgeführt werden, um eine Vergleichbarkeit zwischen Festkörper- und Oberflächenversuchen zu schaffen. Somit galt es, einen geeigneten Prüfaufbau zu konstruieren, der in eine axial/torsionale Dynamisch-Mechanische-Analyse (DMA) implementiert werden konnte und dadurch das Untersuchen von Oberflächen- bzw. Festkörpereigenschaften ermöglichte.

Der neu gebaute Prüfaufbau wird dazu verwendet, zwei unterschiedliche thermoplastische Polyurethane bezüglich ihres Stick-Slip-Verhaltens zu charakterisieren. Bei den Werkstoffen handelt es sich um ein ungefülltes System (TPUu) und um ein System mit unbekanntem Füllstoff (TPUg). Mit Hilfe der monotonen Versuche, in denen die Parameter (Belastung, Geschwindigkeit und Amplitude) variiert wurden, sollte das Auftreten von Stick-Slip bewusst hervorgerufen werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse dienen dazu, geeignete Parameter für dynamische Versuche zu gewinnen, um erstmals die Beobachtung des Stick-Slip-Verhalten unter zyklischer Last zu ermöglichen.

Die aus den monotonen Versuchen erlangten Ergebnisse sollten verdeutlichen unter welchen Voraussetzungen Stick-Slip auftritt und in wie weit Festkörper- und Oberflä-

cheneigenschaften miteinander verglichen werden können. Im Rahmen dieser Masterarbeit sollten die Ergebnisse der dynamischen Versuche mit einem phänomenologischen Modell verglichen werden, um zu beurteilen, inwieweit das Stick-Slip-Phänomen mathematisch beschrieben werden kann. Des Weiteren sollten am Festkörper durchgeführte dynamische Versuche dazu dienen eine mögliche Werkstoffmodellierung und damit verbundene Finite Elemente Methode Simulation vorzubereiten. In Abb. 1.1 ist das Gesamtkonzept dieser Masterarbeit grafisch verdeutlicht.

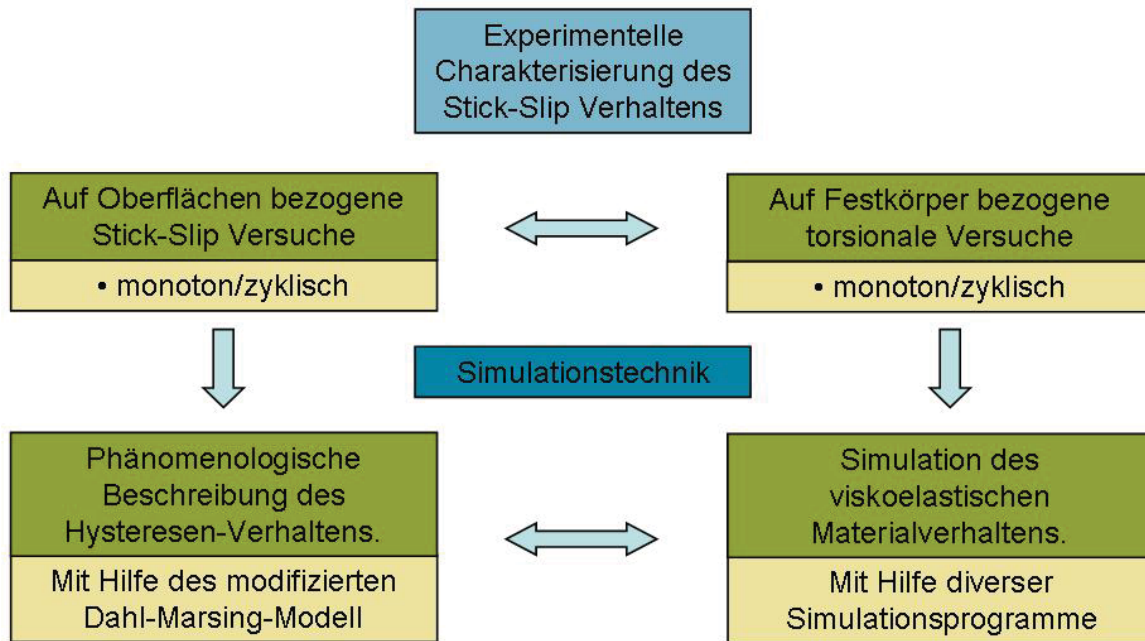


Abb. 1.1: Darstellung des für die Masterarbeit entwickelten Gesamtkonzepts.

2. Grundlagen

2.1 Reibungsinstabilität

Betrachtet man Reibpartner, die in statischer vertikaler Belastung zueinander stehen, so kann man bei den Berührungsverhältnissen von einem Gleichgewichtszustand ausgehen. Bewegen sich die Körper aber relativ zueinander, wird ein neuer, beanspruchungsbedingter, dynamischer Gleichgewichtszustand eingeleitet. Dieser Zustand ist von triboinduzierten Vorgängen sowie damit verbundenen Werkstoffveränderungen geprägt. Inwieweit sich dieser Bereich ausdehnt, hängt von werkstoff-, beanspruchungs- und systemspezifischen Reibungs- und Verschleißvorgängen ab. Dieser Bereich wird in der Reibung als Einlaufbereich bezeichnet. Er unterscheidet sich im Gegensatz zum stationären Zustand dadurch, dass es zu Instabilitäten im Tribologiesystem kommt (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Die oben beschriebene Reibungsinstabilität wird bei Thermoplasten und Elastomeren als das Stick-Slip Phänomen bezeichnet. Stick-Slip führt unter anderem bei Bauteilen (Dichtungen, Reifen und Scheibenwischer) zu reibungsinduzierten Vibrationen, die sich in Form von akustischen Wellen sowie durch Materialschädigungen bemerkbar machen (Nakano, 2009).

2.2 Definition des Stick-Slip Phänomens

Unter dem Stick-Slip Verhalten versteht man den permanenten Übergang von Haft- zu Gleitreibung bei einem Bewegungsvorgang (siehe *Abb. 2.1*). Stick-Slip wird als ein physikalisches Phänomen bezeichnet, welches erstmals von Bowden und Leben zufällig 1939 an der University of Cambridge entdeckt wurde (Sousa, 2007). Durch Stick-Slip wird die Funktionsweise bzw. Lebensdauer von Bauteilen negativ beeinflusst. Des Weiteren kann es bei diesem Übergang zu störenden Geräuschentwicklungen kommen (Scherf, 2007).

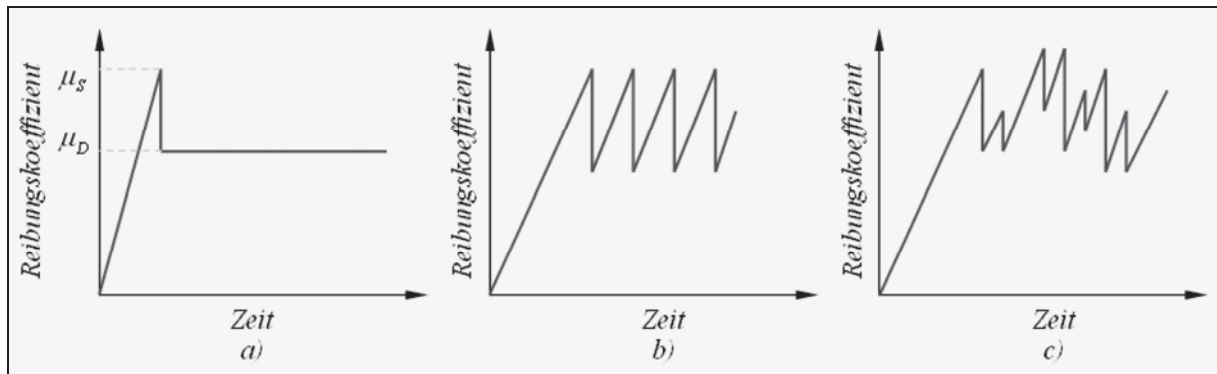


Abb. 2.1: Darstellung der Reibungsverhalten: a) konstantes Gleiten, b) regelmäßiges und c) unregelmäßiges Stick-Slip-Verhalten (Sousa 2007).

Popov (2009) geht bei der Beschreibung von Stick-Slip noch weiter ins Detail und betrachtet technische Systeme mit Reibung als offene dissipative Systeme. Wenn diese Systeme instabil werden, schaukelt sich nach Popovs Annahme das Reibungssystem auf. Das Ergebnis dieser Instabilität wird durch eine wiederkehrende chaotische Schwingung beschrieben. Ist nun die Schwingungsamplitude so groß, dass die relative Geschwindigkeit zur Reiboberfläche zeitweise Null wird, so entstehen unterschiedliche Phasen in der Bewegung. Man unterscheidet dabei zwischen Ruhe- (Stick) und Gleitphasen (Slip), die als Stick-Slip Bewegungen bezeichnet werden.

2.3 Bedeutung des Stick-Slip Verhaltens bei Kunststoffen

Das Auftreten von Stick-Slip wird sowohl bei Thermoplasten als auch bei Elastomeren beobachtet. Die Intensität des Stick-Slip Verhaltens wird stark von den jeweiligen Werkstoffeigenschaften und den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Belastung, Oberflächenrauheit, Geschwindigkeit) beeinflusst (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

2.3.1 Einfluss der Temperatur

2.3.1.1 Thermoplaste

Vor allem bei Thermoplasten spielen die Haupterweichungsgebiete eine entscheidende Rolle beim Stick-Slip Verhalten. Da es in diesen Bereichen zu hoher innerer Dämpfung und unverhältnismäßig großer Kontaktflächenzunahme wegen des fast

sprunghaft fallenden Speichermoduls kommt, ist mit vermehrtem Auftreten von Instabilitäten zu rechnen. In Abb. 2.2 ist für das Material Polyoxymethylen (POM) eine Gegenüberstellung gezeigt, inwieweit der Speichermodul und der Dämpfungsverlauf mit dem Reibungsverhalten des Materials einhergehen (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

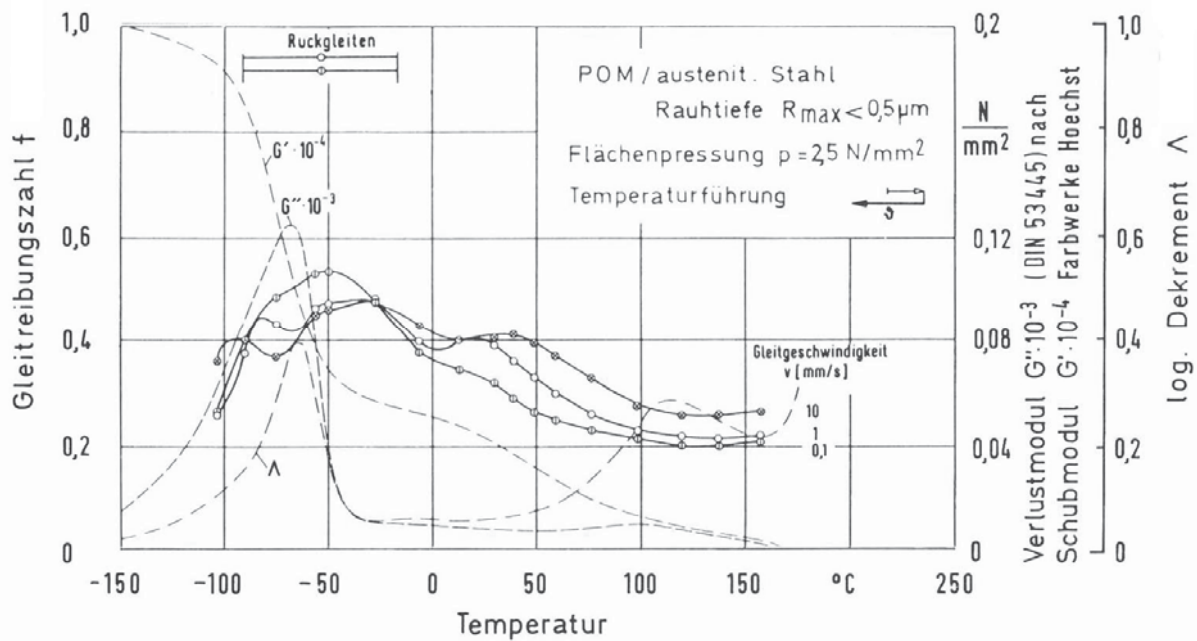


Abb. 2.2: Gegenüberstellung von Dämpfungs-, Speichermodul- und Reibungsverlauf von POM mit einem austenit. Stahl als Reibpartner, bei drei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten. (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Abb. 2.2 zeigt den für Stick-Slip gefährdeten Bereich, der sich vor allem im Haupterweichungsbereich von Thermoplasten befindet. Die Gleitreibungszahl steigt für alle drei Gleitgeschwindigkeiten in diesem kritischen Bereich deutlich an. Dadurch wird offensichtlich, dass die Einsatzgrenze von Thermoplasten überwiegend von der thermischen Beständigkeit bestimmt wird. Diese Erkenntnisse decken sich mit den Beobachtungen von Riesner (2006) in Bezug auf das Reibungsverhalten von Thermoplasten im Haupterweichungsbereich. In Abb. 2.3 wird das Versagensverhalten von einigen Thermoplasten in Abhängigkeit zur Temperatur dargestellt (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

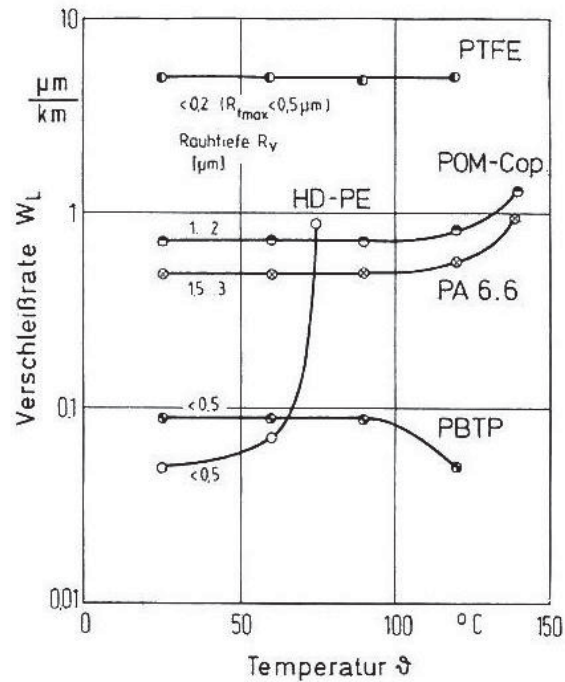


Abb. 2.3: Darstellung der Verschleißrate über die Temperatur für unterschiedliche Thermoplaste (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Aus Abb. 2.3 geht hervor, dass die Verschleißrate in Abhängigkeit der Temperatur unterschiedliche Verläufe annimmt. Der Grund dafür, sind die Unterschiede des molekularen Aufbaus der Polymere und die damit verbundenen Dispersionsgebiete. So kommt es bei Polyethylen beim Versagen des Werkstoffes zu einem enormen Anstieg der Verschleißrate. Hingegen tritt bei Polybutylenterephthalat ein Abfall der Verschleißrate bei Versagen auf. (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

2.3.1.2 Elastomere

Aufgrund des viskoelastischen Stoffverhaltens von Elastomeren, kommt auch hier der Prüftemperatur eine besondere Rolle zu. So entsprechen die grundsätzlichen Abhängigkeiten im weich- und hartelastischen Werkstoffzustand der Elastomere denen von Thermoplasten (vgl. Abb. 2.2). Bei Elastomeren ist das Ruckgleiten aber auf den Bereich der Glasstemperatur beschränkt (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Um diese Instabilität, die im Bereich der Glasstemperatur auftritt, zu verdeutlichen, sind in Abb. 2.4 Ergebnisse eines Versuches graphisch dargestellt, bei dem einige Elastomere mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen über eine Eisfläche gezogen wurden und dabei der Reibungskoeffizient (COF) gemessen wurde (Bhowmick, 2008).

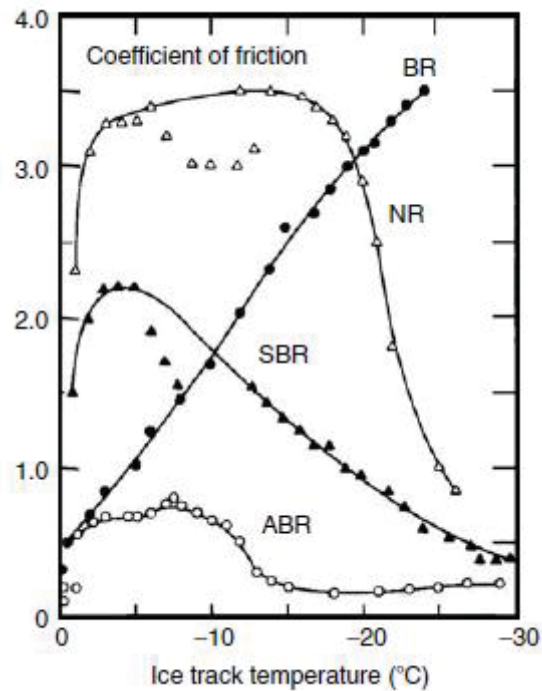


Abb. 2.4: Darstellung des Reibungskoeffizienten für vier Elastomere in Abhängigkeit der Eisflächentemperatur (Bhowmick, 2008).

Aus Abb. 2.4 geht ein klarer Unterschied zwischen den Elastomeren und ihrer Temperaturabhängigkeit hervor. Dies liegt an den verschiedenen Glastemperaturen der Werkstoffe. So zeigt etwa „styrene-butadiene rubber“ (SBR) nur ein schmales Maximum des COF bei ca. -5 °C wobei „natural rubber“ (NR) ein breites Maximum des COF's zeigt (Bhowmick, 2008).

Es gelten auch für Elastomere ähnliche Verschleißmechanismen wie für Thermoplasten. In Abhängigkeit der Temperatur und aufgrund der Vernetzung kommt es zu keinen Abgleitprozessen sondern eher zu Reißprozessen. Die damit verbundenen Zerstörungsprozesse gehen mit Schallemissionen einher (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

2.3.2 Belastung

2.3.2.1 Thermoplaste

Die Belastungsabhängigkeit für den COF bei Thermoplasten zeigt sich nur in werkstoffspezifisch begrenzten Bereichen. Ferner werden unterschiedliche Verläufe beobachtet bei denen oft Minima auftreten. In Abb. 2.5 sind solche Verläufe der Reibungszahl über die Flächenpressung für einige Thermoplaste dargestellt.

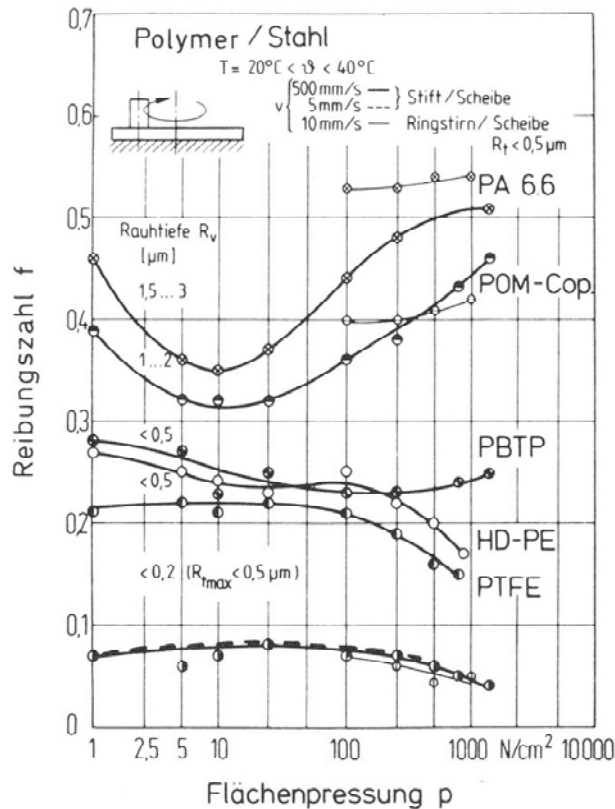


Abb. 2.5: Veranschaulichung des Reibungsverhaltens in Abhängigkeit der Normalspannung für verschiedene Thermoplasten (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

In Abb. 2.5 erkennt man, dass Thermoplaste unterschiedliche Verläufe in Abhängigkeit der Flächenpressung aufweisen. So tritt bei manchen Werkstoffen, wie z.B. bei Polyamid 6.6 (PA 6.6), einem enormen Anstieg der Reibungszahl in Abhängigkeit der Pressung auf. Diese Charakteristik ist mit Sicherheit auf die Überlagerung des Temperatureinflusses zurückzuführen. Hingegen kommt es bei PE zu einem Abfall des Reibungskoeffizienten mit Anstieg der Belastung. Durch die hohen Lasten entsteht verstärkt ein Kriechen des Werkstoffes welches zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche (Abfall der Flächenpressung) führt und damit zu einem Sinken der Reibungszahl (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

In Bezug auf die Flächenpressung und deren Einfluss auf das Stick-Slip-Verhalten stellt Erhard (2006) klar, dass dieser Einfluss noch nicht komplett verstanden wird. Ergebnisse zeigen tendenziell, dass mit Anstieg der Normalspannung die Stick-Slip-Intensität schrumpft. Diese Aussage deckt sich mit den Erkenntnissen von Uetz und Wiedemeyer (1985), die mit Anstieg der Pressung einen linearen Anstieg des Verschleißes beobachten.

Diese Abhängigkeiten wurden auch von Bouissou (1997) beobachtet. Er verdeutlicht, dass der Übergang von Stick-Slip-Verhalten zur kontinuierlichen Bewegung und damit verbundener Verschleiß stark von der Belastung abhängig ist.

2.3.2.2 Elastomere

Die für thermoplastische Werkstoffe abgeleiteten Einflüsse der Normalspannung (Temperatur und Vergrößerung der Kontaktfläche) auf das Reibungsverhalten gelten ebenso für Elastomere. Jedoch muss bei Elastomeren dem Einfluss der Pressung auf die Temperatur und somit auf das Reibungsverhalten besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Die Abhängigkeiten der Reibungszahl in Bezug auf die Pressung mit dem damit verbundenen Temperatureinfluss ist in Abb. 2.6 für Butadienstyrol dargestellt.

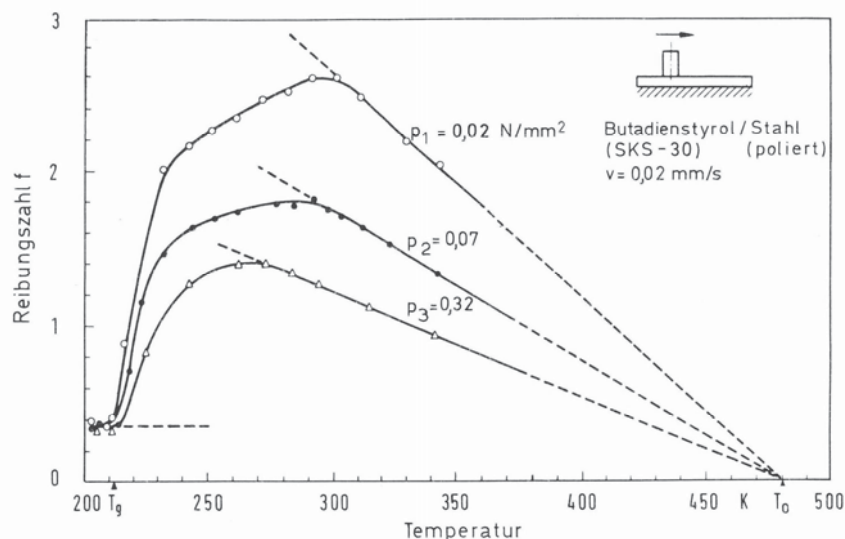


Abb. 2.6: Darstellung der Abhängigkeit des COF von der Belastung und der Temperatur für Butadienstyrol (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Die in Abb. 2.6 gezeigten Verläufe verdeutlichen, dass unterhalb der Glasübergangstemperatur kein Unterschied in Bezug auf die Pressung festzustellen ist. Mit Anstieg der Temperatur wird eine Pressungsabhängigkeit klar deutlich. Denn mit der steigenden Pressung sinkt die Reibungszahl generell ab. Dies steht in Analogie mit den Erkenntnissen über die Zunahme des wahren Kontaktes und der damit verbundenen Reibungssenkung. Die weitere Steigerung der Normalspannung (weitere Erhöhung der Temperatur) führt auch bei Elastomeren zu einer Steigerung des Verschleißes und den wie unter 2.3.1.2 geschilderten Zerstörungsprozessen (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

2.3.3 Geschwindigkeit

2.3.3.1 Thermoplaste

Die Prüfgeschwindigkeit stellt ebenso eine wichtige Einflussgröße auf das Stick-Slip-Verhalten bei Thermoplasten dar. Aus den experimentellen Versuchen von Li (2002) wird deutlich, dass es die Tendenz gibt, dass mit Zunahme der Prüfgeschwindigkeit die Amplitude des Stick-Slip abnimmt (Li, 2002). In Abb. 2.7 ist die Abhängigkeit der Slip-Geschwindigkeit von der Prüfgeschwindigkeit für ein Styrol-Acrylnitril (SAN) Copolymer dargestellt.

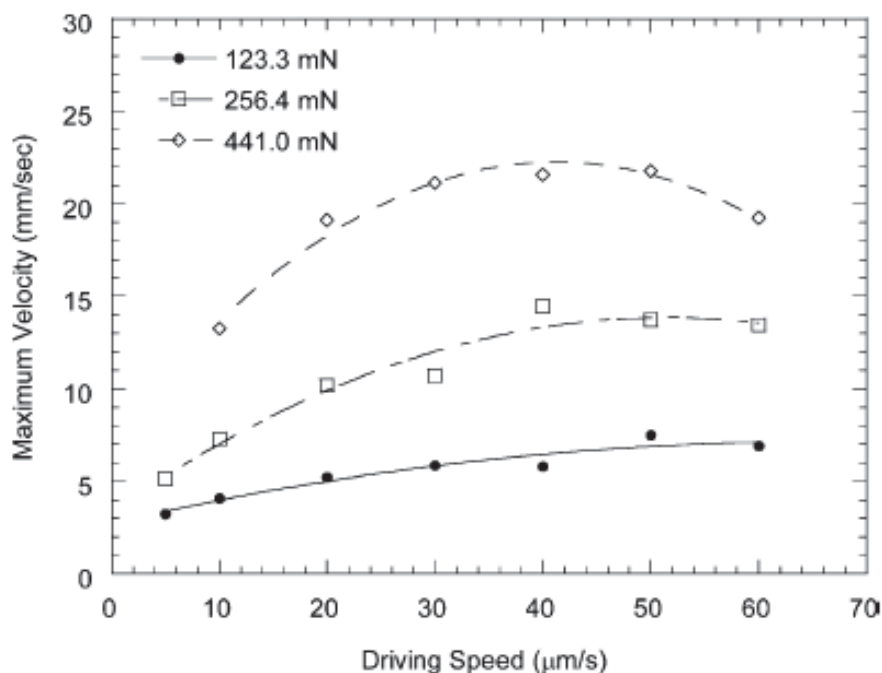


Abb. 2.7: Darstellung der maximal erreichten Slip-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit und der Belastung für ein SAN Copolymer (Li, 2002).

Aus Abb. 2.7 geht hervor, dass ab einer gewissen Prüfgeschwindigkeit die Slip-Geschwindigkeit abnimmt, was auf eine Verringerung der Intensität des Stick-Slip hindeutet.

In ähnlicher Weise beschreibt Erhard (1999) diese Geschwindigkeitsabhängigkeiten. Erhard führt an, dass je steiler der Gradient und je steiler der Anfangswert der Reibung ist, desto eher neigt das System zu Stick-Slip. In Abb. 2.8 ist anhand von Polyoxymethylen (POM) ein Beispiel angeführt.

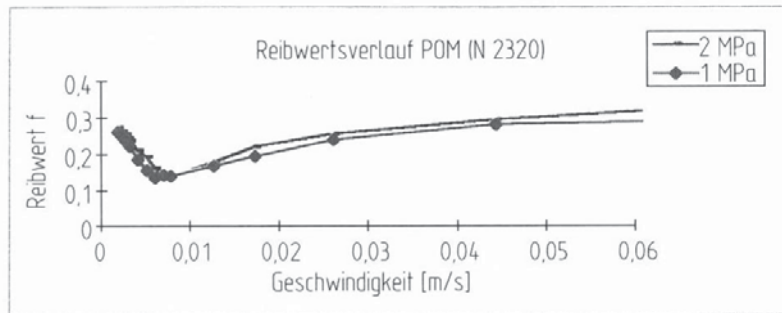


Abb. 2.8: *Abhängigkeit der Reibungszahl von der Geschwindigkeit am Beispiel von POM (Erhard, 1999).*

Der negative Gradient im niedrigen Geschwindigkeitsbereich deutet auf das Auftreten von Stick-Slip hin. Kritisch wird vor allem dies bei reversierenden und schwingenden Bewegungsabläufen (Erhard, 1999)

Mit weiterer Steigerung der Geschwindigkeit tritt Verschleiß auf, da es durch den Geschwindigkeitsanstieg zu einer weiteren Erwärmung in der Kontaktzone kommt. Jedoch kann bei sehr hohen Gleitgeschwindigkeiten nicht mehr klar zwischen dem Einfluss der Geschwindigkeit und der Temperatur auf den Verschleiß unterschieden werden.

2.3.3.2 Elastomere

Elastomere Werkstoffe zeigen wie Thermoplaste eine deutliche Geschwindigkeitsabhängigkeit. In ABB ist der COF für einige Elastomere in Bezug auf die Gleitgeschwindigkeit veranschaulicht.

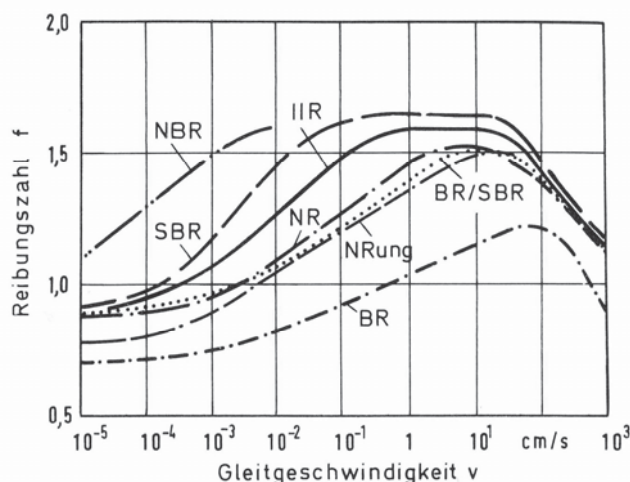


Abb. 2.9: *Darstellung des COF in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für einige Elastomere (Uetz und Wiedemeyer, 1985).*

In Abb. 2.9 wird verdeutlicht, dass der COF in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ein Maximum einnimmt. Je nach Lage der Glastemperatur und den ausgewählten Geschwindigkeitsbereichen kommt es aber zur Messung von Gesamtabhängigkeiten der werkstoffspezifisch charakteristischen Bereiche. Wie schon bei den Thermoplasten beobachtet, spielt auch bei der Geschwindigkeit die Temperatur an der Kontaktfläche eine wichtige Rolle. So ist in Abb. 2.10 die Temperaturerhöhung in Abhängigkeit der Gleitgeschwindigkeit dargestellt.

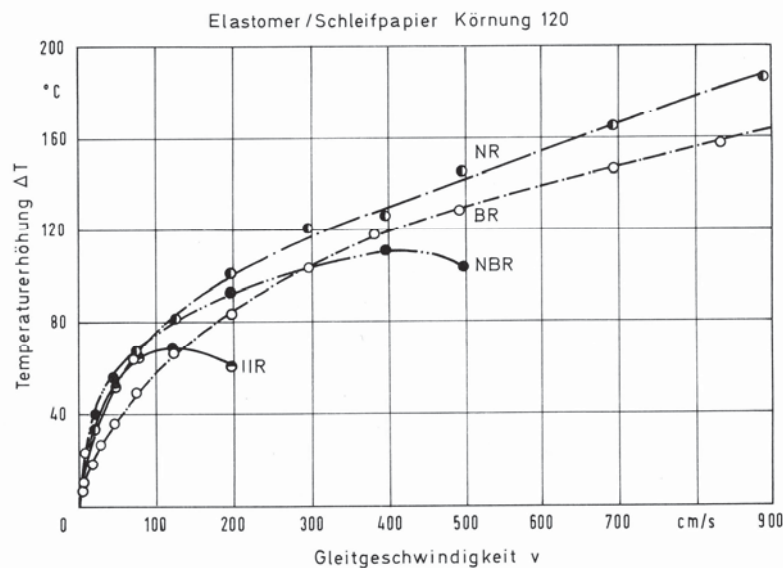


Abb. 2.10: Verdeutlichung des enormen Temperaturanstiegs bei Zunahme der Geschwindigkeit (Uetz und Wiedemeyer, 1985).

Die in Abb. 2.10 gezeigten deutlichen Anstiege der Temperaturen in Abhängigkeit zur Gleitgeschwindigkeit verdeutlichen, dass auch unter dem Einfluss der Geschwindigkeit die lokale Temperatur eine entscheidende Rolle in Bezug auf das Stick-Slip-Verhalten spielt. Denn durch Erhöhung der Geschwindigkeit tritt vermehrt Verschleiß auf, der mit einem deutlichen Anstieg der Schergeschwindigkeiten in der Grenzschicht einhergeht.

2.3.4 Oberflächenbeschaffenheit

2.3.4.1 Thermoplaste und Elastomere

Die Oberflächenrauheit der Gegenfläche übt ebenso wie die Geschwindigkeit und die Belastung einen großen Einfluss auf das Auftreten von Stick-Slip aus. Vor allem wenn polare Werkstoffe mit sehr glatten Stahloberflächen ($R_z < 0,5 \mu\text{m}$) gepaart wer-

den besteht die Gefahr, dass Stick-Slip auftritt. Da unter diesen Voraussetzungen vorwiegend adhäsive Vorgänge auftreten, ist mit hohen Reibungskoeffizienten zu rechnen. Nimmt die Rauheit der Gegenfläche zu, ist mitunter mit höherem Verschleiß zu rechnen, da in diesem Fall abrasive Vorgänge dominierend sind (Erhard, 1999).

Weiter verdeutlicht wird die Beeinflussung der Rauheit durch die Beschreibungen von Sousa (2007). In Sousas Ausführungen wird Bezug genommen auf das Verhaken und das Aufeinanderstapeln der Rauheitsspitzen, die dadurch erzeugten Widerstandskräfte und das daraus resultierende Haften. Sollten diese Hindernisse überwunden werden, bewirken die Rauheitsspitzen eine beschleunigte Gleitbewegung, bis es zum erneuten Aufeinandertreffen weiterer Rauheitsspitzen kommt.

Aus den Ausführungen von Erhard (1999) und Sousa (2007) liest sich die doppelte Natur der Reibungskraft heraus, die besagt:

$$F_f = F_{f.adh} + F_{f.def} \quad (2.1)$$

F_f Reibungskraft

$F_{f.adh}$ Adhäsionstherm der Reibungskraft

$F_{f.def}$ Deformationstherm der Reibungskraft

Durch den Adhäsions- und Deformationstherm lassen sich Reibungs- und Verschleißphänomene bei Polymeren gut erklären. Somit ergeben sich zwei Hauptinflussfaktoren, die bei Festkörperreibung auftreten (Erhard, 1999):

- Adhäsion der Grenzflächenschicht und
- Deformation der Mikrokontaktstellen und Oberflächenschichten.

Beide Mechanismen treten zwar in unterschiedlicher Stärke aber immer gemeinsam auf, können also nicht getrennt werden. Beiden Zuständen liegen aber unterschiedliche Werkstoffeigenschaften zugrunde. In Abb. 2.11 ist ein schematischer Verlauf dargestellt der zeigt, welchen Einfluss die Rauheit auf die Adhäsion bzw. Deformation hat (Erhard, 1999).

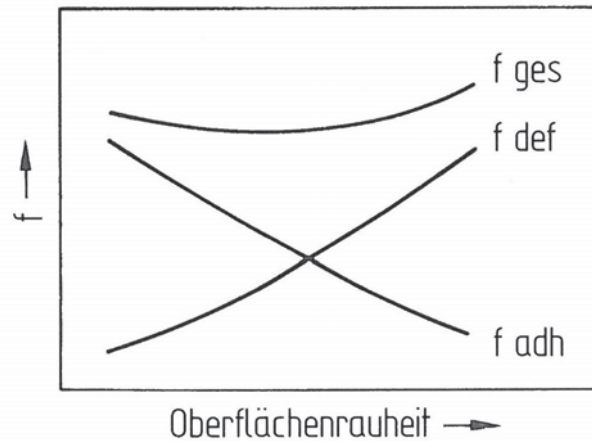


Abb. 2.11: Darstellung des Einflusses der Rauheit auf die Adhäsion bzw. Deformation (Erhard 1999).

Abb. 2.11 zeigt noch einmal graphisch, dass beide Mechanismen nie getrennt werden können und sich in der Realität ein Mischzustand (f_{ges}) bildet (Erhard 1999).

2.3.4.2 Wichtige Aspekte bei adhäsivem Kontakt.

Eine aussagekräftige Kennzahl für die Stärke der Adhäsion ist die Oberflächenenergie. Die Oberflächenenergie wird wie folgt definiert (Erhard, 1999):

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^p \quad (2.2)$$

γ Oberflächenenergie

γ^d Disperser Anteil

γ^p Polarer Anteil

Berühren sich zwei Körper (a und b) mit den entsprechenden Oberflächenenergien dann, gilt die Dupre'sche Gleichung (Erhard, 1999).

$$\gamma_a + \gamma_b = \gamma_{ab} + W_{ab} \quad (2.3)$$

γ_a Oberflächenenergie Körper a

γ_b Oberflächenenergie Körper b

γ_{ab} Grenzflächenenergie

W_{ab} Auf die Grenzfläche bezogene Adhäsionsarbeit

Die Adhäsionsarbeit kann nach Owens und Wendt wie folgt berechnet werden:

$$W_{ab} = 2 \cdot \sqrt{\gamma_a^d \cdot \gamma_b^d} + 2 \cdot \sqrt{\gamma_a^p \cdot \gamma_b^p} \quad (2.4)$$

Somit ist die Oberflächenenergie des Gegenkörpers mit entscheidend dafür, welche Grenzflächenenergie sich bildet, welche Adhäsionsarbeit daraus resultiert. Der adhäsive Kontakt wird begünstigt, wenn der Körper a leicht in die Zwischenräume des Körpers b eindringen kann, was durch eine niedrige Viskosität und lange Verweilzeit erreicht werden kann. Dadurch ist die Rauheit maßgeblich daran beteiligt, in welcher Intensität der Kontakt stattfindet und in welchem Ausmaß die Adhäsionsarbeit vorliegt. Des Weiteren können chemisch aktive Gruppen in die Oberfläche eingearbeitet werden, die ebenfalls die Oberflächenenergie anheben können (Chaudhury, 2002).

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Wahl der Werkstoffpaarung mit den entsprechenden Oberflächenrauheiten entscheidend dafür ist, wie stark der adhäsive Kontakt vorliegt und ob Stick-Slip-Verhalten auftritt. Umso unterschiedlicher die Werkstoffpaarung gewählt wird, desto schwieriger ist eine Definition der Grenzflächenenergie und der damit verbundenen Adhäsionsarbeit. Durch die Wahl ähnlicher bzw. gleicher Werkstoffpaarungen wird es möglich, die Adhäsionsarbeit als unmittelbares Maß für die Wirkung des adhäsiven Kontaktes zu verwenden (Erhard, 1999).

2.4 Modellvorstellungen zur Beschreibung des Stick-Slip Verhaltens

Um ein besseres Verständnis über die Vorgänge während der Stick-Slip-Bewegung zu erhalten, wurden neben den experimentellen Untersuchungen (Bouissou, 1998) zunehmend mathematische Modellierungen zur Beschreibung des Ruckgleitens entwickelt. Dabei werden zwei Bereiche unterschieden (Chatelet, 2008):

- Rheologische und
- Phänomenologische Modelle

2.4.1 Rheologische Modelle

Rheologische Modelle bestehen im Prinzip aus einer Aneinanderreihung unterschiedlicher Komponenten. Diese Komponenten können aus Feder, Dämpfer oder

St.-Venant (Reibung) Systemen bestehen. Mit diesen Elementen und den entsprechenden Bewegungsgleichungen ist es möglich, Reibungsvorgänge und im Speziellen Stick-Slip Vorgänge zu beschreiben (Bastien, 2000).

2.4.1.1 Monotones rheologisches Modell

Für das grundlegende Verständnis der rheologischen Modelle zur Beschreibung von Stick-Slip, wird ein Feder-Dämpfer-System mit einer Masse m bei einer konstanten Geschwindigkeit v über eine starre Ebene gezogen. In der nun folgenden Abb. 2.12 soll dieser Vorgang veranschaulicht und der auftretende Mechanismus genau erklärt werden (Gódor, 2008).

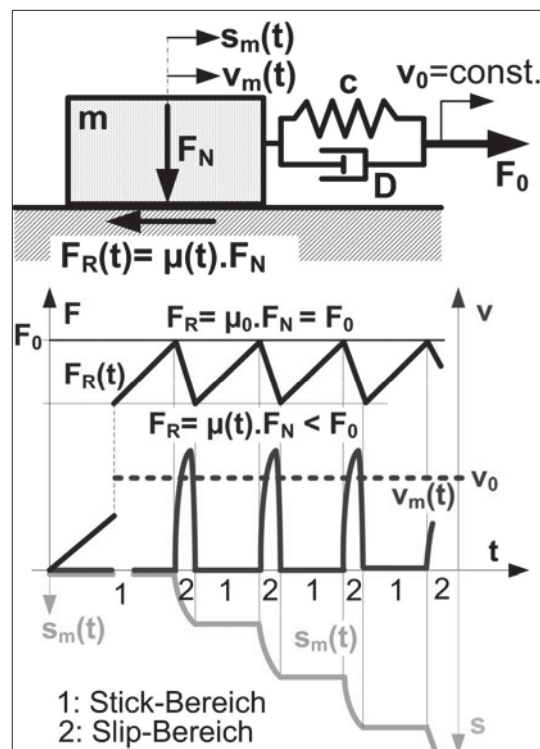


Abb. 2.12: Darstellung der Vorgänge bei Stick-Slip-Verhalten (Gódor, 2008).

Die Masse m wird in Bewegung gesetzt, wenn das Feder-Dämpfer-System durch die Kraft F_0 gespannt wird und so durch die konstante Geschwindigkeit v_0 gezogen wird. Die Bedingung, mit der die Masse m in Bewegung versetzt wird lautet:

$$F_0 = \mu_0 \cdot F_N \quad (2.5)$$

F_0 Kraft bei Bewegungsbeginn

μ_0 Reibung bei Bewegungsbeginn

F_N Normalkraft bei Bewegungsbeginn

Zur gleichen Zeit sinkt der Reibungskoeffizient:

$$\mu_t < \mu_0 \quad (2.6)$$

μ_t zeitabhängige Reibung

Die Ursache für das Sinken des Reibungskoeffizienten wird in einem Stribeck Diagramm veranschaulicht. In diesem Diagramm werden die unterschiedlichen Reibungszustände in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit dargestellt (siehe Abb. 2.13).

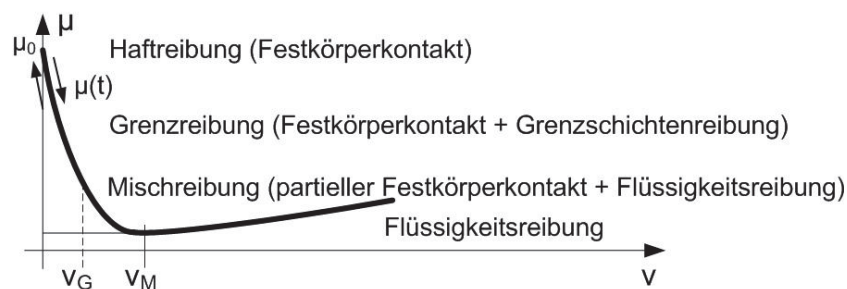


Abb. 2.13: Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit (Gódor, 2008).

Die nun vorhandene Kraftdifferenz:

$$F_0 - \mu_0 \cdot F_N = \Delta F \quad (2.7)$$

ΔF Kraftdifferenz

beschleunigt die Masse auf:

$$v_{m,\max} > v_0 \quad (2.8)$$

$v_{m,\max}$ Maximalgeschwindigkeit der Masse m

Dabei lautet die momentane Energiebilanz wie folgt:

$$\frac{1}{2} c \cdot s_m^2(t) = \frac{1}{2} m \cdot v_m^2(t) \quad (2.9)$$

c Federkonstante

$s_m(t)$ zurückgelegter Weg zum Zeitpunkt t

Bewegt sich nun der Körper schneller als v_0 :

$$v_m(t) > v_0 \quad (2.10)$$

bedeutet dies:

$$c \cdot s_m(t) < \mu(t) \cdot F_N \quad (2.11)$$

und somit wird die Masse m wieder gebremst und der Vorgang beginnt wieder von Neuem (Gódor, 2008).

Bei diesem grundlegenden Ersatzmodell wird die gesamte Elastizität des Systems durch eine Feder mit der Steifigkeit c beschrieben und somit ein viskoelastisches Materialverhalten modelliert.

2.4.1.2 Dynamisches rheologisches Modell

Für Modelle zur Darstellung von Reibungsphänomenen, die unter wechselnder Last auftreten, werden häufig Prandtl-Körper verwendet. Dieses Prandtl Modell berücksichtigt plastische Vorgänge und dient als Ausgangspunkt der Modellentwicklung von Bastien (2000).

Aus den Ergebnissen der Arbeit von Bastien (2000) geht hervor, dass die gestalteten Modelle sehr gut in der Simulation dynamischer Systeme funktionieren. In Gleichung (2.12) ist die Differentialgleichung dargestellt, die sämtliche Modelle in Bastiens Paper beschreibt.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) + M\delta\phi(X(t)) + C \cdot X(t) \ni H(t) \\ X(0) = \xi \end{cases} \quad \text{im Bereich von }]0, T[\quad (2.12)$$

C	Matrix (dient zur Berechnung der abstoßenden Kraft)
M	Matrix (wird zur Berechnung des plastischen Teils des Modells verwendet. Ist symmetrisch und positiv definit)
$X(t)$	verallgemeinerte Koordinaten des studierten rheologischen Modells
$H(t)$	externe Kraft
$C \cdot X(t)$	abstoßende Kraft (beschreibt den linearen Teil des Modells; Feder-Körper)

ϕ	konvexes Potential (beschreibt den plastischen Teil des Modells; St-Venant Körper)
T	zwingend positive Zahl
ξ	Startwert

Bastien (2000) weist jedoch auf die mathematische Komplexität hin und aufgrund des in seiner Arbeit angewandten vereinfachten Lösungsverfahrens, gestaltet es sich als schwierig Stick-Slip-Bewegungen exakt zu beschreiben.

2.4.2 Hysteresische phänomenologische Modelle

Mit Hilfe von phänomenologischen Modellen ist es prinzipiell möglich, komplexe Systeme zu beschreiben, darunter eben auch das Stick-Slip-Verhalten. Bei dieser Art von Modellvorstellung zur Beschreibung hysteresischen Verhaltens wird bewusst auf die wahre Natur des Kontaktes sowie der dissipativen Vorgänge verzichtet. Somit wird das Problem rein mathematisch betrachtet und physikalische Zusammenhänge werden nicht berücksichtigt (Chatelet, 2008).

Die bekanntesten und am häufigsten angewandten Modelle sind das Bouc-Wen- sowie das Dahl-Modell (Vestroni, 2002). Bei diesen Modellen werden die aus Experimenten ermittelten Daten als Eingangswerte für das Modell verwendet. Für diese Arbeit wurde das modifizierte Dahl-Modell (MDM) genauer betrachtet. Der Grund für die Entscheidung für das MDM lag an der schwierigen mathematischen Lösbarkeit des Bouc-Wen-Modells, wie in der Arbeit von Dufour (2004) verdeutlicht wird.

Das nun vorgestellte modifizierte Dahl-Modell ist der Arbeit von Chatelet (2008) entnommen und beruht auf der exzellenten Vorarbeit (Herleitungen) in den Arbeiten von Dufour (2004) und Al Majid (2002). Das modifizierte Dahl-Modell basiert auf einer Differentialgleichung 1. Ordnung, welche die zeitliche Ableitung der „restoring force“ F in Abhängigkeit des Weges u und der Hüllkurve der Hysterese darstellt (Chatelet 2008).

$$\frac{dF}{dt} = \beta \frac{du}{dt} \cdot \left(h - F \operatorname{sgn} \left(\frac{du}{dt} \right) \right)^{\mu} \quad (2.13)$$

$$h = \frac{1}{2} \left((h_u + h_l) \operatorname{sgn} \left(\frac{du}{dt} \right) + (h_u + h_l) \right) \quad (2.14)$$

Der Parameter β beschreibt die transiente Geschwindigkeit (Steigung der Hysterese) zwischen den Funktionen h_u und h_l . Die beiden Funktionen h_u und h_l stellen die obere bzw. untere asymptotische Berechnung des Modells dar (siehe Abb. 2.14) und entsprechen den Steigungen. Für die Form der Schleife (Ecken) nimmt der Exponent μ eine hervorzuhebende Rolle ein.

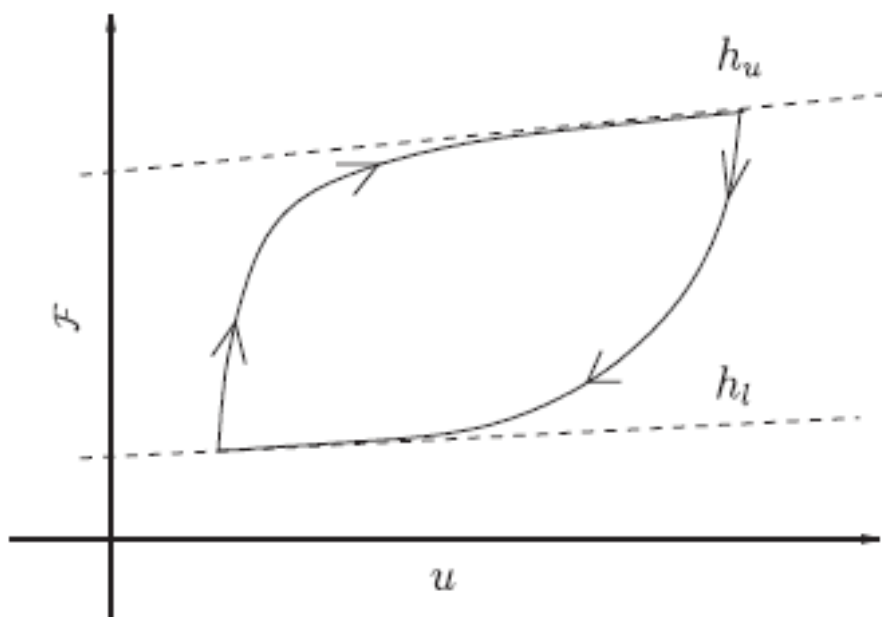


Abb. 2.14: Illustration einer Kraft-Weg Hysterese mit den beiden Funktionen h_u und h_l (Bastien 2007).

Die in Abb. 2.14 dargestellte Hystereseform für das MDM entspricht einer Mischung von zwei Hysteresen. Denn für die Modellierung ist entscheidend wie gut sich das Modell der Realität annähert. Da ein Reibungskontakt angenommen wird, überlagert sich die Hystereseform des linear-viskoelastischen Materialverhaltens mit der einer Reibungshysterese. In Abb. 2.15 sind beide Hystereseformen dargestellt (Ottl, 1993).

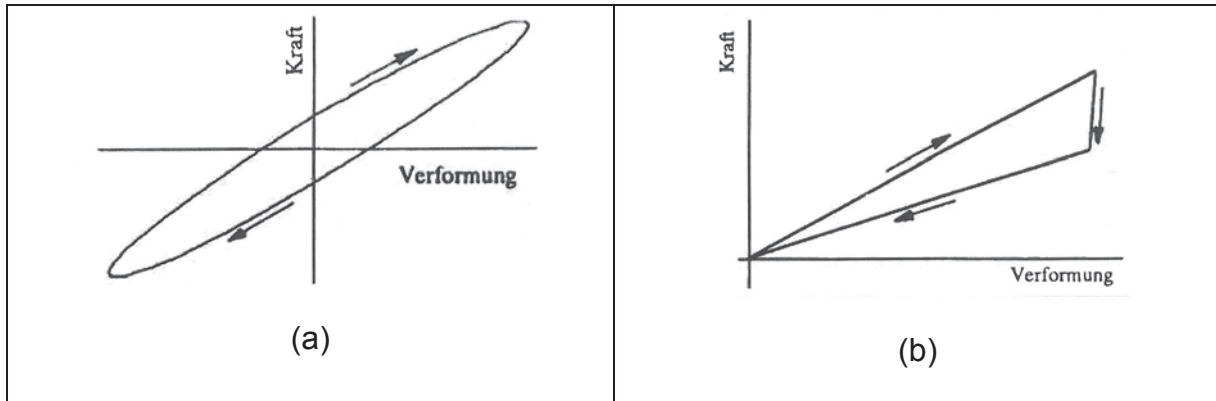


Abb. 2.15: (a) Hysterese für ein linear-viskoelastisches Material und (b) Hystereseform eines Reibungskontaktes (Ottl, 1993).

Durch diese Annahmen ist es möglich mit Hilfe von experimentell ermittelten Daten und dem Gleichungssystem des modifizierten Dahl-Modells durch Versuche ermittelte Hysteresen zu modellieren. Der plötzliche Abfall oder Anstieg in den Ecken der Hysteresen, wie im MDM Modell (siehe Abb. 2.14) dargestellt, kann jedoch in der Realität nicht so scharf wiedergegeben werden. Es kommt aufgrund des viskoelastischen Materialverhaltens zu einem nicht so scharfen Übergang in den Ecken (Ottl, 1993).

Die Parameter und die damit verbundene Beschreibung durch das MDM sind vor allem dann möglich, wenn man von einfach zugänglichen Oberflächen sprechen kann. Gehen die Anwendungen in Richtung komplexere „realere“ Strukturen wie Turbomaschinen, ist das MDM nicht mehr geeignet und muss durch ein höher entwickeltes Modell ersetzt werden. Diese Art von Modellen ist in der Lage, die wahre Natur sowie das physikalische Verhalten der Kontaktzone zu beschreiben (Chatelet, 2008).

2.5 Beispiele für Stick-Slip Charakterisierungen in der Literatur

Für die meisten Untersuchungen zur Charakterisierung des Stick-Slip-Verhaltens spielen die Faktoren, welche unter 2.3 diskutiert wurden, eine wichtige Rolle. Durch Variation von Belastung, Geschwindigkeit, Oberflächenrauheit usw. kann das Auftreten von Stick-Slip genau bestimmt werden.

In den Arbeiten von Bouissou (1998) wurden die Belastungs-, Geschwindigkeits- und Oberflächerauheitseinflüsse auf den Übergang zwischen stabilen Gleiten und Stick-Slip für das Material Polymethylmetacrylat (PMMA) hin untersucht. In Abb. 2.16 ist die entsprechende Prüfkongfiguration dargestellt.

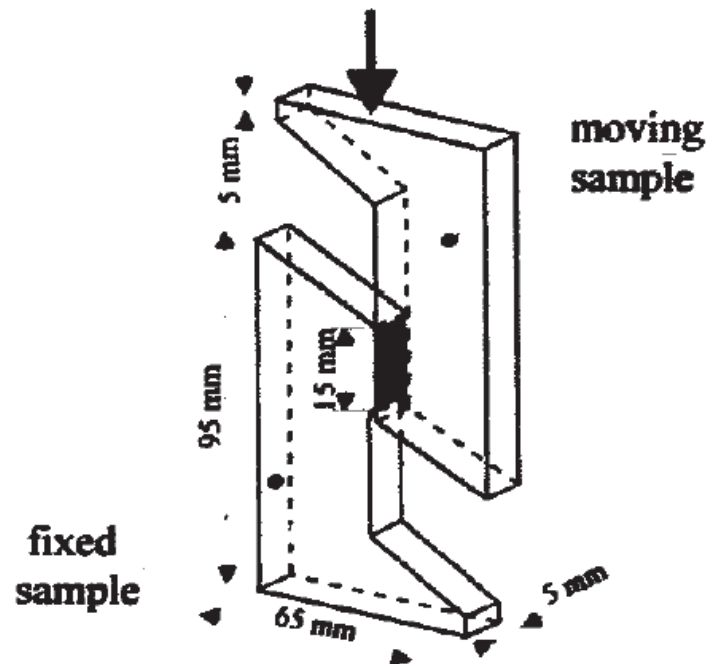


Abb. 2.16: Veranschaulichung der Kontaktsituation der Reibpartner (Bouissou, 1998).

Durch die Gegenüberstellung der Stick- bzw. Slipdauer (zurückgelegte Wege) in Abhängigkeit der Belastung, Geschwindigkeit und Oberflächenrauheit konnte das Stick-Slip-Phänomen genau beschrieben werden. Bei den Untersuchungen zeigte sich, dass die Belastung den größten Einfluss auf die Intensität des Stick-Slip-Phänomens hat.

Für die Charakterisierung des Stick-Slip-Verhaltens in der Arbeit von Summer (2009) wurde durch die Kombination von unterschiedlich definierten Kennwerten das Stick-Slip-Phänomen für unterschiedliche thermoplastische Polyurethane beschrieben. In *Abb. 2.17* sind der Prüfaufbau und die dazugehörige Prüfkfiguration dargestellt. Für diese Arbeit wurde ein neuer Kennwert eingeführt (der η -Faktor), der eine Aussage treffen soll, wie stark das Auftreten von Stick-Slip in Abhängigkeit zu Belastung und Frequenz erfolgt. Unter weiterer Zuhilfenahme einer Histogrammauswertung, bei der die Anzahl der wiederkehrenden Stick-Slip-Amplituden zahlenmäßig erfasst wurde, konnte das Stick-Slip-Verhalten charakterisiert werden.

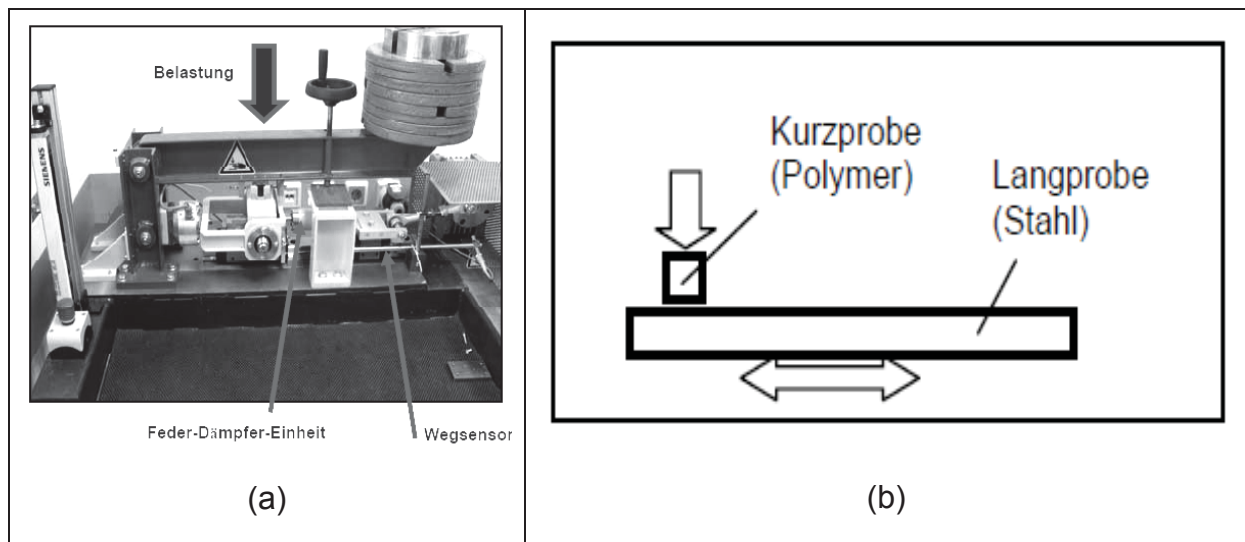


Abb. 2.17: Veranschaulichung des Prüfaufbaues (a) und der verwendeten Prüfkonfiguration (b) (Summer, 2009)

Außerdem verdeutlichte die Arbeit von Summer (2009), dass bei adhäsiven Kontaktbedingungen anders als bei abrasiven Kontakten, Stick-Slip stärker ausgeprägt ist.

Für die in dieser Masterarbeit durchgeführten und im folgenden Teil erklärten Versuchen wurde kein linearer Versuchsaufbau gewählt. Es wurde ein rotatorischer Aufbau verwendet bei dem ein kontinuierlicher Kontakt zwischen Prüf- und Gegenkörper gegeben war.

3. Experimentelles

3.1 Werkstoffe

Im Zuge der am PCCL durchgeführten Masterarbeit wurden das monotone und dynamische Verhalten von fünf unterschiedlichen TPU-Werkstoffe der Firma SKF ECONOMOS Austria GmbH charakterisiert. Bei den TPU Werkstoffen handelte es sich um zwei gefüllte und 3 ungefüllte. Für die Aufgabenstellung wurden aus dem gesamten Werkstoffpool 2 Typen Materialien ausgewählt. In Abb. 3.1 ist ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm dargestellt, in dem alle fünf Materialien veranschaulicht sind.

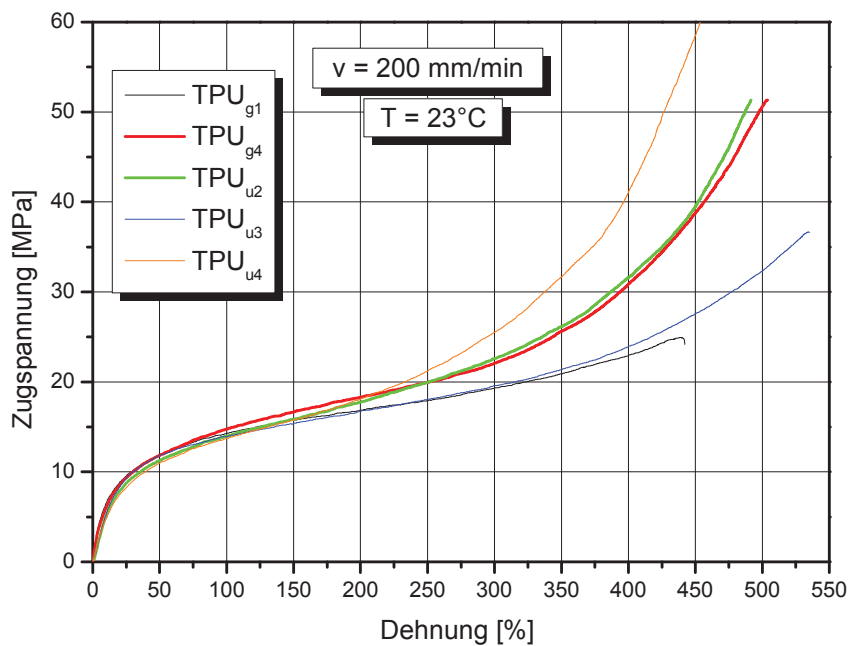


Abb. 3.1: Darstellung eines Zugversuches bei Raumtemperatur für alle fünf Werkstoffe.

Für die Untersuchungen wurden der gefüllte Werkstoff TPU_{g4} sowie der ungefüllte Werkstoff TPU_{u2} verwendet. Betrachtet man Abb. 3.1 wird deutlich, dass diese beiden Werkstoffe im monotonen Verhalten fast idente Festkörperdeformationen aufweisen und dadurch beste Voraussetzungen für die Versuche gegeben waren. In der restlichen Arbeit wird der Vereinfachung halber der ausgewählte gefüllte Werkstoff als TPU_g und der ungefüllte Werkstoff als TPU_u bezeichnet. Abb. 3.2 stellt ei-

nen Dynamisch-Mechanischen-Analyse (DMA) Versuch dar, wobei die Temperaturabhängigkeit der beiden Versuchswerkstoffe veranschaulicht werden soll.

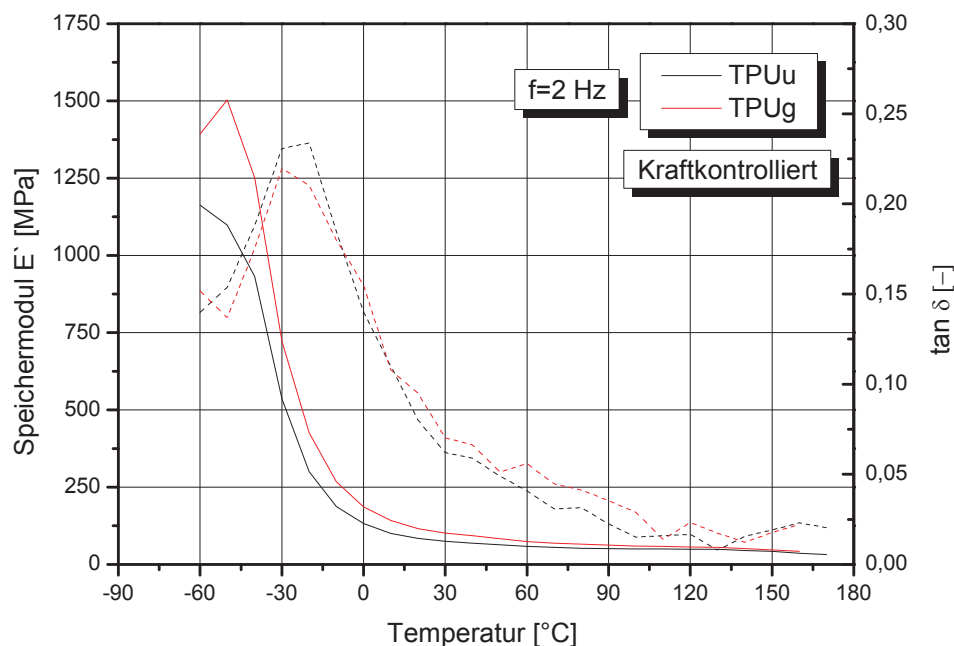


Abb. 3.2: Veranschaulichung eines DMA Versuches mit „Temperatursweep“ durchgeführt an TPUu und TPUG.

Betrachtet man die Ergebnisse in Abb. 3.2 zeigt sich anders als im monotonen Versuch, dass der gefüllte bzw. der ungefüllte Werkstoff in Bezug auf das dynamische Verhalten Unterschiede aufweisen. TPUG weist generell einen höheren Speichermodul als TPUu auf. Dies kann mit Sicherheit auf das Vorhandensein des Füllstoffs zurückgeführt werden.

3.2 Oberflächenuntersuchungen

Wie schon in der Einleitung erwähnt spielt das Stick-Slip-Verhalten von Kunststoffen eine wichtige Rolle bei tribologischen Anwendungen. Um Werkstoffe charakterisieren zu können sind unter anderem Versuche mit Tribometern notwendig. Für diese Versuche können, unterschiedlichste Prüfkongfigurationen gewählt werden, unter anderem die so genannte „Ring-on-Disc“ (RoD) Konfiguration. Dieser Aufbau eignet sich besonders gut zur Untersuchung elastomerer Werkstoffe. In meiner vorangegangenen Bakkalaureatsarbeit (Hausberger, 2008) wurde dieser Prüfaufbau für einen Tribometer implementiert. Aufgrund der guten Ergebnisse und Stabilität des Tribologiesystems (Hausberger, 2008), wurde nun für diese Arbeit derselbe Prüfaufbau neu

konstruiert und in eine DMA integriert. Die Verwendung der DMA bot sich aus dem Grund an, dass die unter 3.3 erklärten torsionalen Untersuchungen mit der gleichen Maschine durchgeführt werden konnten und somit ein einheitliches und ergänzendes Prüfsystem zur Verfügung stand.

3.2.1 Vorteile des „RoD“ Prüfaufbaues

In Bezug auf das gesamte Prüfkonzept und unterstützend zu den tribologischen Aspekten, galt es einen Aufbau zu wählen, der in erster Linie einen kontinuierlichen Kontakt zwischen Prüf- und Gegenkörper herstellt. Die Belastung des Prüfkörpers musste in rotatorischer Form vorliegen und die Stabilität des Prüfkörpers sollte ausreichend gegeben sein. Diese Vorgaben waren auch Voraussetzung für die durchgeführten torsionalen Untersuchungen (siehe 3.3), um eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

3.2.2 Integrierung des „RoD“ Prüfaufbaus in eine DMA

Für die Implementierung des RoD Prüfaufbaues wurden neue Prüf- und Gegenkörperhalterungen eigenständig konzipiert und konstruiert. Die entsprechende Fertigung der Bestandteile wurde im Werkzeugbau des Partnerunternehmens der SKF ECONOMOS Austria GmbH durchgeführt. Die dazugehörigen Zeichnungen befinden sich im Anhang unter dem Kapitel „Konstruktionszeichnungen“.

3.2.3 Der Prüfaufbau

Zur genauen Veranschaulichung wird der neu entwickelte Aufbau in Abb. 3.3 genau beschrieben.



Abb. 3.3: Darstellung der Prüf- und Gegenkörperhalterung.

In Abb. 3.4 wird das gesamte Prüfsystem dargestellt.

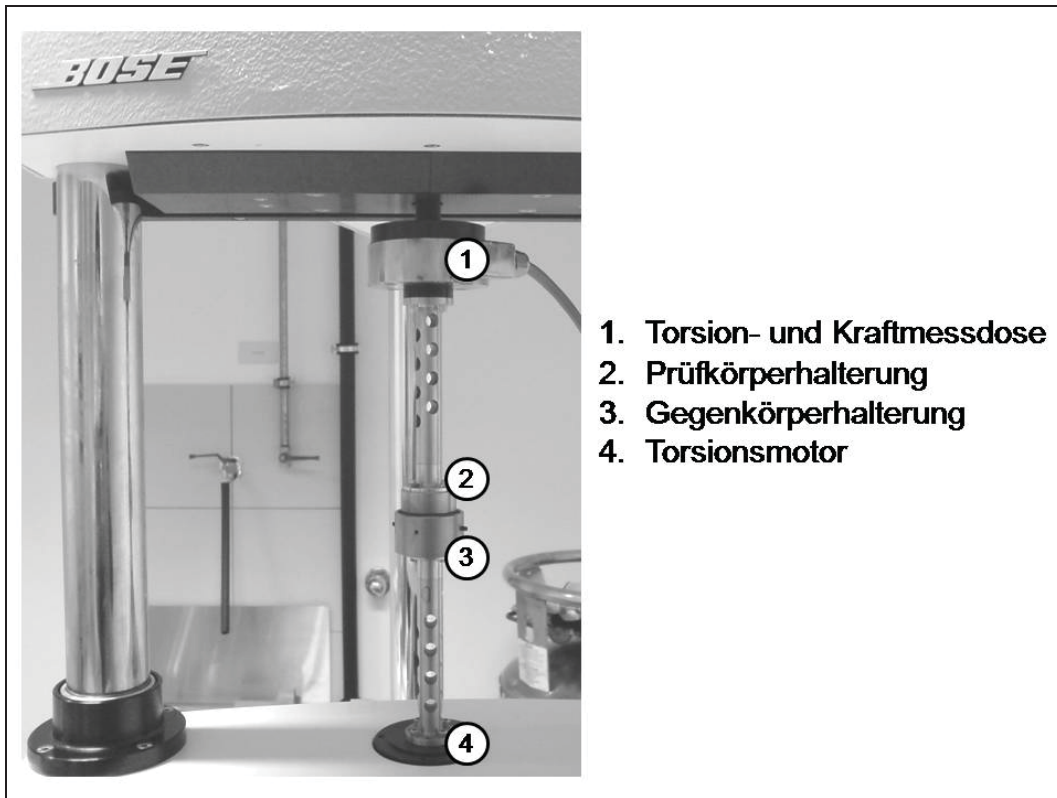


Abb. 3.4: Darstellung des Prüfsystems.

Für die durchgeführten Untersuchungen wurden die Prüf- bzw. Gegenkörpergeometrien aus denselben Werkstoffen hergestellt. Der Grund dafür lag in den unter 2.3.4.2 angeführten Vorteilen bezüglich der Einfachheit der daraus resultierenden Kontaktsituation. Dabei wurden in der Literatur (Erhard, 2006) vorliegende Oberflächenenergiewerte für TPU verwendet und die Adhäsionsarbeit konnte nach (2.4) berechnet werden und nimmt den Wert 78 mJ ein. Dieser Wert ist repräsentativ für alle in dieser Arbeit durchgeführten Oberflächenuntersuchungen.

3.2.4 „Ring-on-Disc“-Prüfkörper

In Abb. 3.5 ist ein hergestellter Prüfkörper dargestellt. Die Prüfkörpergeometrie (Abb. 3.6) ist an die ASTM Norm D3702 angelehnt. Für die Berechnung der Spannungen wird von einer Kreisringfläche mit $134,8 \text{ mm}^2$ ausgegangen. Diese Fläche entspricht der nominellen Fläche. Wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben spielt jedoch die wahre Kontaktfläche eine entscheidende Rolle in Bezug auf das Stick-Slip-Verhalten. Die Ermittlung dieser Fläche ist äußerst aufwendig und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Trotzdem wurde vom Prüfkörper eine gründliche Oberflächencha-

rakterisierung (siehe 2.3.4) durchgeführt, um zumindest einen Einblick in die wahre Kontaktfläche zu erhalten.

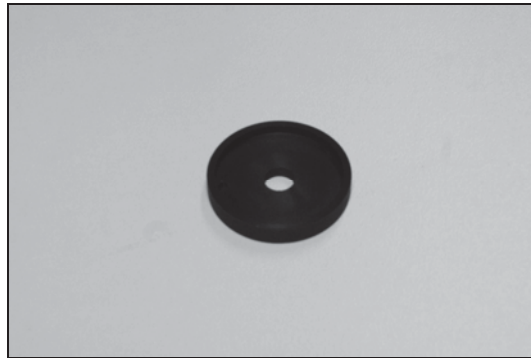


Abb. 3.5: „Ring-on-Disk“-Prüfkörper.

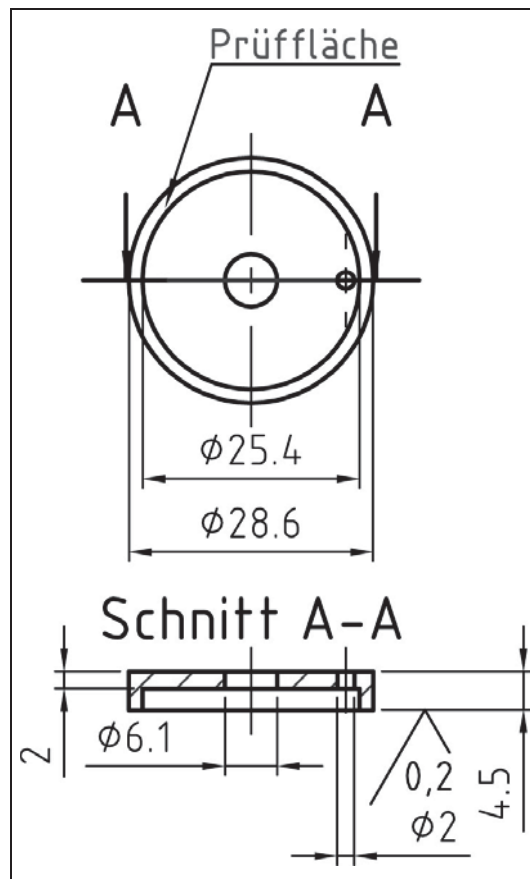


Abb. 3.6: Prüfkörpergeometrie für „Ring-on-Disk“-Versuche.

3.2.5 „Ring-on-Disk“ Gegenkörper

Der zu dem Prüfkörper passende Gegenkörper ist in Abb. 3.7 dargestellt. Die entsprechende Prüfkörpergeometrie ist in Abb. 3.8 veranschaulicht.

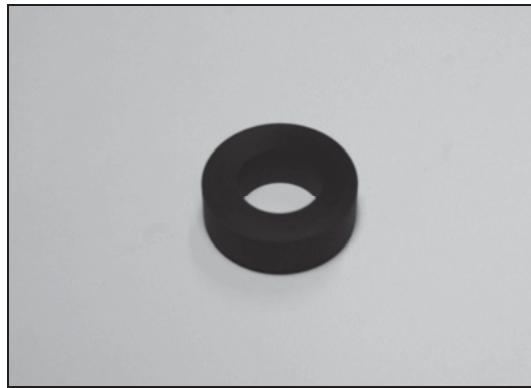


Abb. 3.7: „Ring-on-Disc“ Gegenkörper.

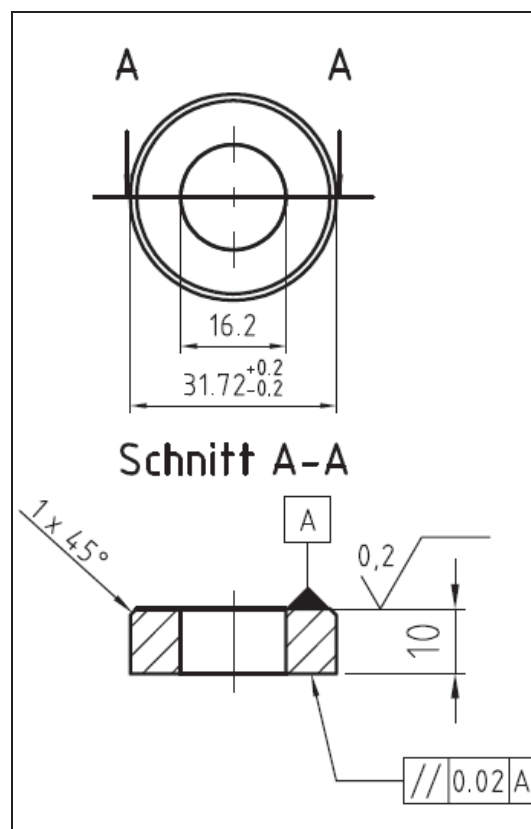


Abb. 3.8: Gegenkörpergeometrie für „Ring-on-Disc“ Versuche.

3.2.6 Herstellung von Prüf- und Gegenkörper

Die Herstellung der Prüf- und Gegenkörper erfolgte bei der SKF ECONOMOS Austria GmbH. Die im Spritzgussprozess gefertigten Halbzeuge wurden anschließend einem Sinterprozess unterzogen, um etwaige Eigenspannungen zu minimieren. Danach wurden die Prüf- und Gegenkörper auf einer Dichtungs-Drehmaschine (Seal-Jet® NG 040, SKF ECONOMOS Austria GmbH, A) mittels „Feindreihen“ gefertigt.

3.2.7 Oberflächencharakterisierung

Aus den Ausführungen unter 2.3.4 geht hervor, dass die Oberflächentopographie eine wichtige Rolle für das Auftreten des Stick-Slip-Verhaltens spielt. Aus diesem Grund wurde die Oberflächencharakterisierung von dem Prüf- und Gegenkörper durch topographische Aufnahmen mit einem Konfokalmikroskop (FRT MicroProf®, FRIES RESEARCH AND TECHNOLOGY GmbH, D) durchgeführt. Für beide Körper wurden sowohl ein Oberflächenprofil als auch unterschiedliche Rauheitswerte (DIN 4768) ermittelt. In Abb. 3.9 sind die entsprechenden Abbildungen dargestellt.

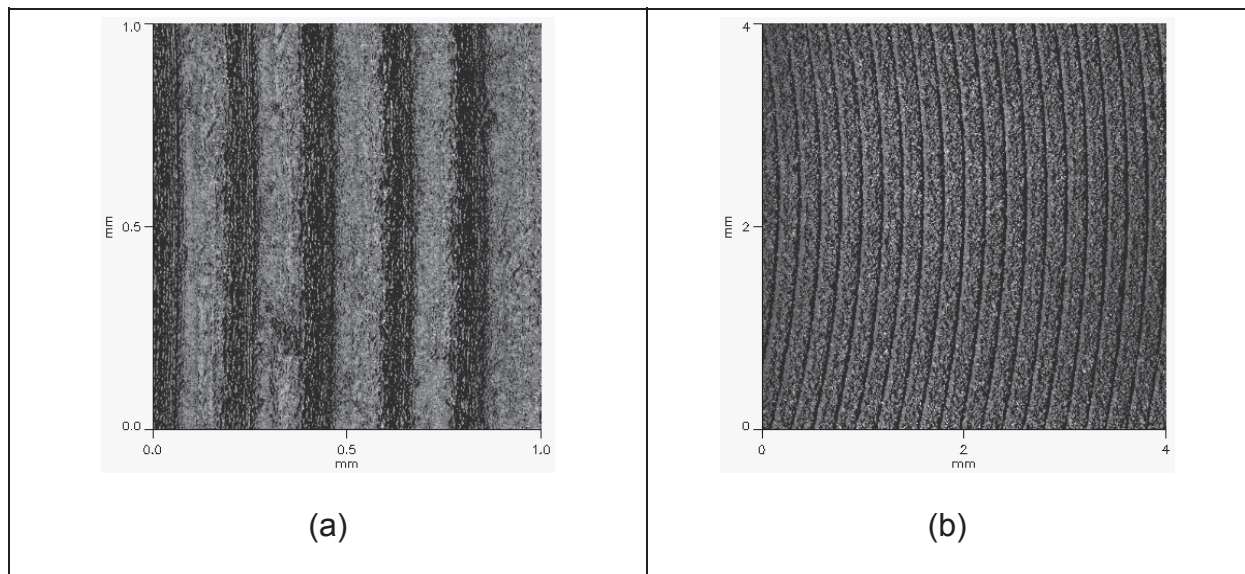


Abb. 3.9: Oberflächentopographische Aufnahmen des (a) Prüfkörpers und (b) des Gegenkörpers.

Die entsprechenden Rauheitswerte sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1: Auflistung der Rauheitswerte angelehnt an die DIN 4768 bestimmt wurden.

Rauheitswert	Prüfkörper TPUu	Prüfkörper TPUg	Gegenkörper TPUu	Gegenkörper TPUg
R _q [μm]	2,71	2,54	0,71	0,70
R _a [μm]	3,89	3,31	0,90	0,89

R_q Quadratischer Mittenrauwert

R_a Arithmetischer Mittenrauwert

Beide Werte verdeutlichen, dass die Gegenkörper fast idente Rauheitswerte aufweisen. Bei den Prüfkörpern liegen die Rauheitswerte des ungefüllten Materials etwas über denen des gefüllten Materials.

3.3 Torsionale Festkörperuntersuchungen

Für die Untersuchung der Festkörpereigenschaften der TPU-Werkstoffe sollten monotone und zyklische Versuche an Hantelprüfkörper durchgeführt werden. Der Prüfaufbau ist in Abb. 3.10 dargestellt und unterscheidet sich von dem der Oberflächenuntersuchungen nur durch die Prüfkörperhalterung.

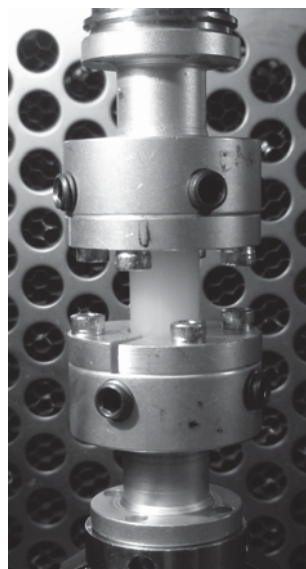


Abb. 3.10: Prüfkörperhalterung mit eingespanntem Prüfkörper.

Die Befestigung der in Abb. 3.4 dargestellten Halterung in der DMA konnte auf diese Weise unkompliziert erfolgen und ermöglichte die Durchführung monotone und dynamische Torsionsversuche unter völlig gleichen Voraussetzungen.

3.3.1 Hantelprüfkörper für Torsionsversuche

Der Hantelprüfkörper ist in Abb. 3.11 (a) dargestellt und wurde bei der SKF ECONOMOS Austria GmbH im Spritzgussverfahren hergestellt. Für diese Untersuchungen sollte jedoch nicht der gesamte Querschnitt zur Verfügung stehen, sondern sollte durch eine Durchgangsbohrung verkleinert werden. Dadurch konnte für die Torsionsberechnungen von einem dünnwandigen Rohr ausgegangen werden. Außerdem sollte durch diese Vorbedingung versucht werden sich den auf die Oberfläche bezogenen Eigenschaften zu nähern und dadurch eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die notwendigen Bohrungen wurden selbstständig an einer Drehbank durchgeführt. Die entsprechende Prüfkörpergeometrie befindet sich in Abb. 3.11 (b).

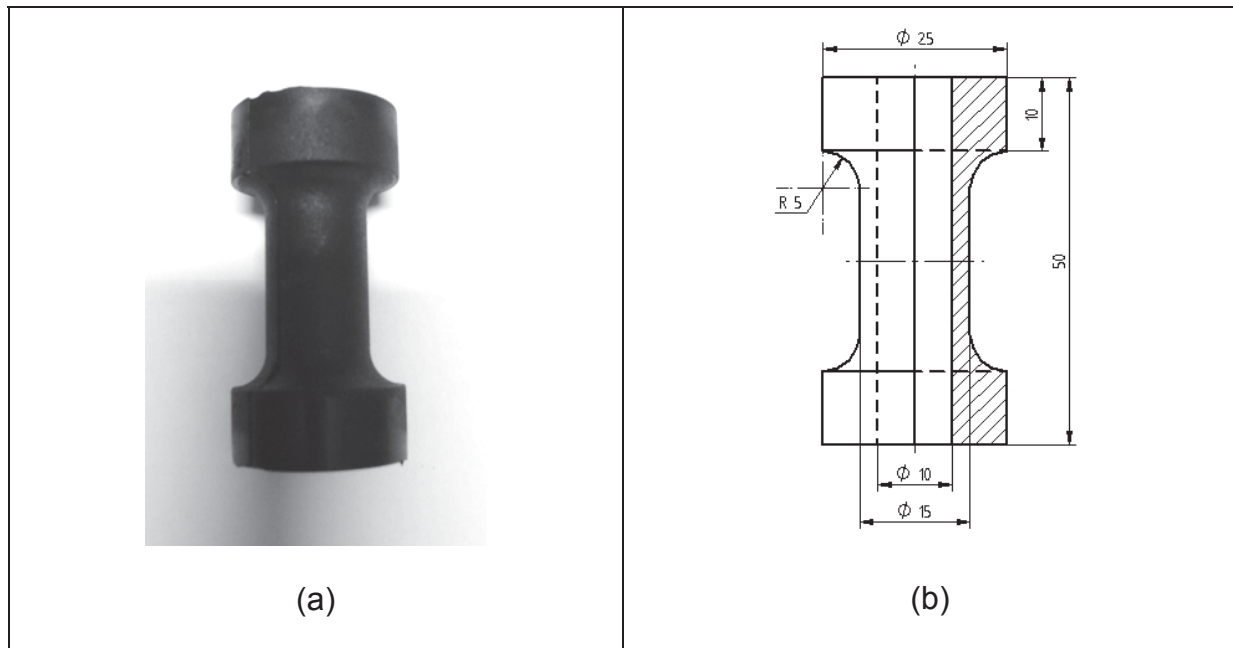


Abb. 3.11: Darstellung des Torsionsprüfkörpers (a) und der Prüfkörpergeometrie (b).

3.4 Messtechnik

Für die Untersuchungen wurde eine BOSE Elektroforce 3230 (Eden Prairie, Minnesota, USA) verwendet. In Abb. 3.12 sind alle Gerätschaften die für die Prüfungen notwendig waren, veranschaulicht.

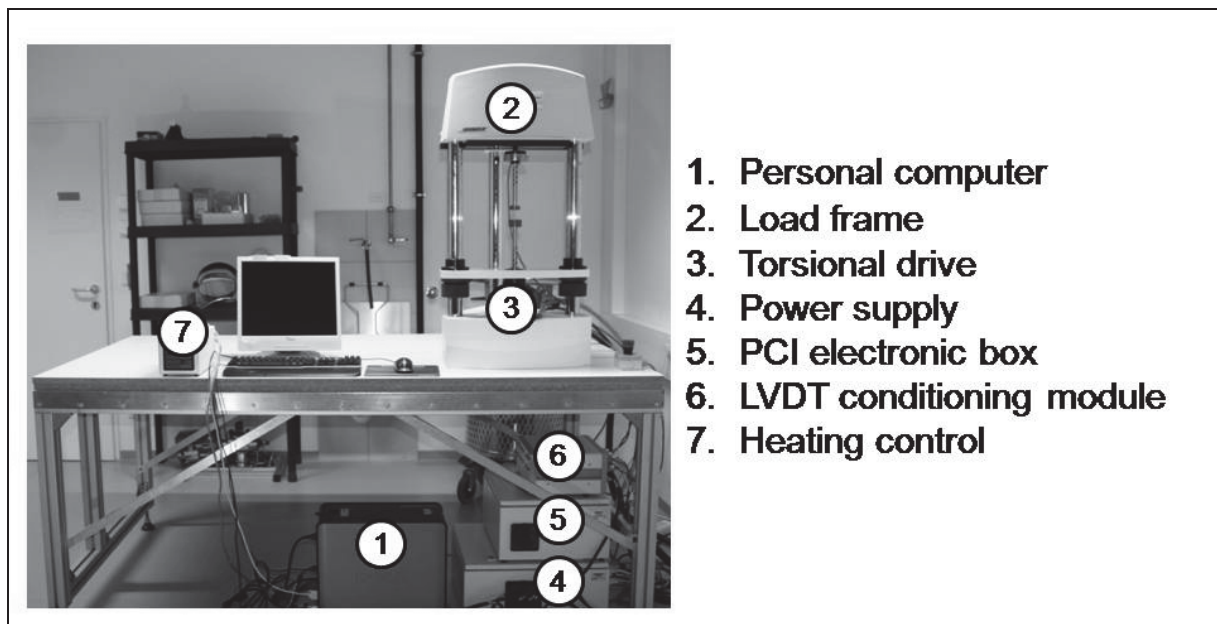


Abb. 3.12: Darstellung des Messaufbaus mit den notwendigen Gerätschaften.

3.4.1 Gemessene Größen

Die Messung des Torsionsmomentes erfolgte mit einer kombinierten Torsions- und Kraftmessdose wobei eine Linearität von 0,1 bis 2,5 Nm gegeben war. Die Rotation wurde direkt über den Torsionsmotor aufgezeichnet. Der Motor weist eine Linearität im Bereich von 0,5 bis 100 °/s auf.

3.4.2 Berechnete Größen der Oberflächenuntersuchungen

3.4.2.1 Bestimmung der Torsionsspannung

Die Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Torsionsspannung wurde dem Taschenbuch für den Maschinenbau (Beitz, 2001) entnommen. Die maximale Torsionsspannung τ_{\max} setzt sich aus dem Drehmoment M_d und dem polaren Widerstandsmoment W_p zusammen und wird wie folgt beschrieben.

$$\tau_{\max} = \frac{M_d}{W_p} \quad (3.1)$$

Das polare Widerstandsmoment wird über die Geometrie des Prüfkörpers berechnet. Dazu wurde ebenfalls das Taschenbuch für den Maschinenbau (Beitz, 2001) als Grundlage verwendet. W_p setzt sich wiederum aus dem Außendurchmesser d_a und dem Innendurchmesser d_i des Prüfkörpers zusammen und wird in Gleichung (3.2) dargestellt.

$$W_p = \frac{\pi \cdot (d_a^4 - d_i^4)}{16 \cdot d_a} \quad (3.2)$$

3.4.2.2 Bestimmung der Torsionsdehnung

Für die Berechnung der Torsionsdehnung γ sind der Außenradius r_a , der Verdrehwinkel φ , sowie die Höhe der Kreisringfläche h notwendig. Die Formel zur Bestimmung ist unten dargestellt.

$$\gamma = \frac{\varphi \cdot r_a}{h} \quad (3.3)$$

3.4.2.3 Bestimmung des Reibungskoeffizienten

Das während der Versuche direkt gemessene Drehmoment wird zur Berechnung des Reibungskoeffizienten (COF „coefficient of friction“) verwendet. Der Reibungskoeffizient setzt sich aus dem Drehmoment M_d , der Normalkraft F_N und dem Radius R wie folgt zusammen.

$$COF = \frac{M_d}{F_N \cdot R} \quad (3.4)$$

3.4.2.4 Bestimmung der kritischen Spannungen bei monotonen Versuchen

Um das Stick-Slip-Verhalten charakterisieren zu können, war es notwendig, aus den Messdaten diejenigen Datenpunkte zu markieren, die typisch für das Auftreten von Stick-Slip sind. Zur besseren Veranschaulichung ist in Abb. 3.13 ein Moment-Rotations Verlauf dargestellt, in dem wichtige Auswertungspunkte für die späteren Berechnungen gekennzeichnet wurden.

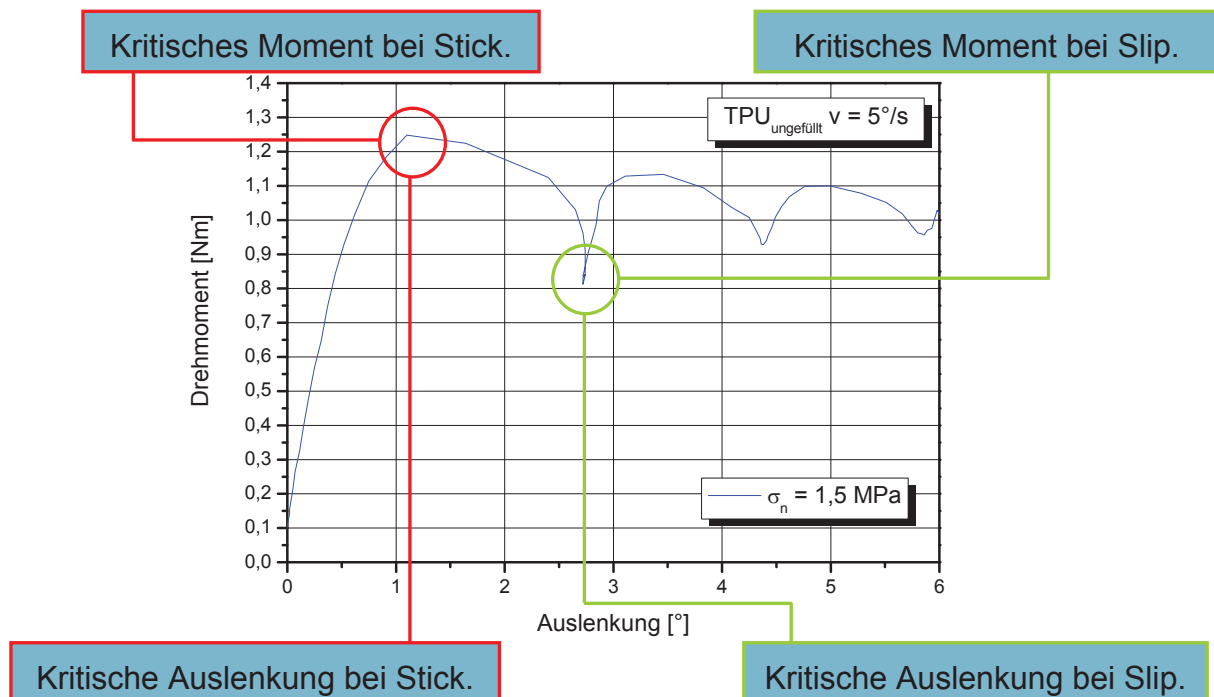


Abb. 3.13: Darstellung eines Drehmoment-Auslenkungsverlaufs mit Markierung der für die Auswertung des Stick-Slip relevanten Punkte.

In Abb. 2.13 sind rot, die kritischen Auslenkungen bzw. Momente bei Stick dargestellt. Bei diesem Punkt kommt es unmittelbar danach zu Auftreten von Slip. Der

Grüne Bereich stellt die kritische Auslenkung bzw. Moment bei Slip dar. Nach diesem Punkt tritt wieder Haften auf.

3.4.2.5 Bestimmung der kritische Spannung bei zyklischen Versuchen

Nach dem gleichen Schema wie bei den monotonen Versuchen wurden auch bei den zyklischen Versuchen das kritische Moment und in weiterer Folge die kritische Spannung ausgewertet. Dabei wurde wie in Abb. 3.14 dargestellt bei allen Auswertungen vorgegangen.

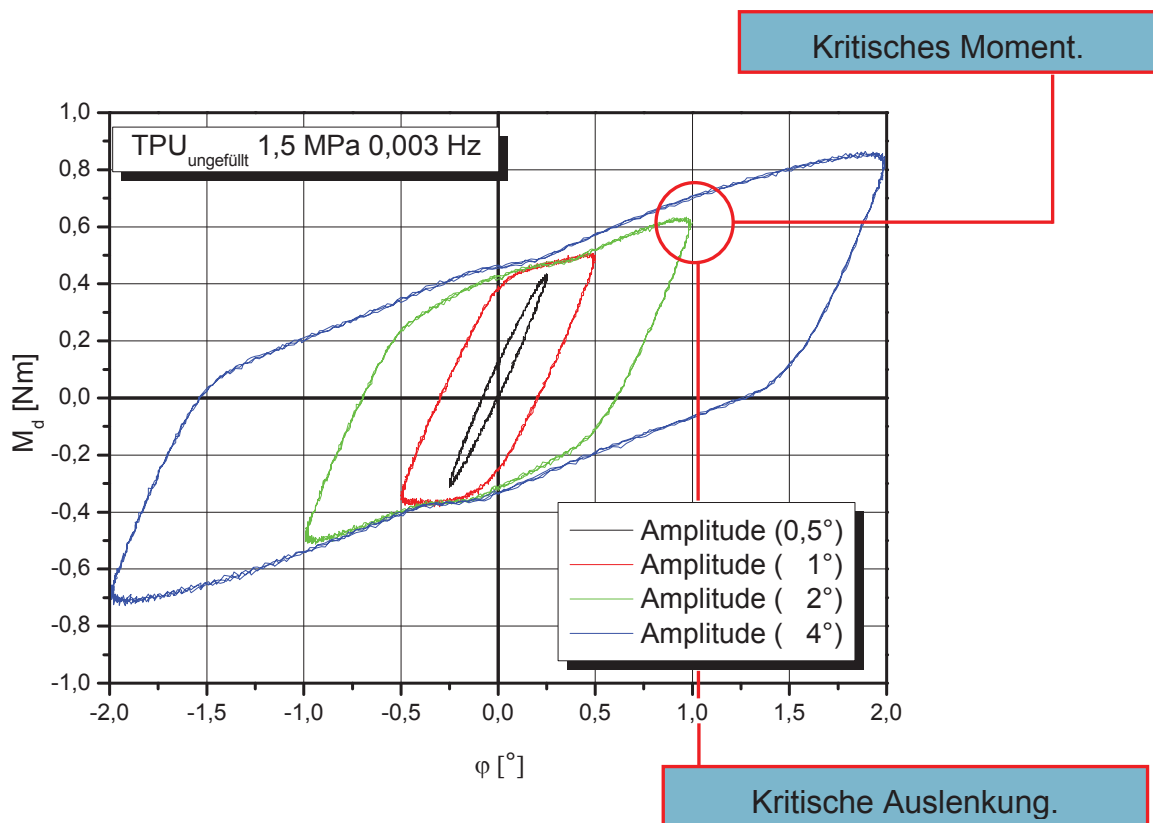


Abb. 3.14: Darstellung eines Drehmoment-Auslenkungsverlaufs mit Markierung der für die Auswertung des Stick-Slip relevanten Punktes.

Dieser ausgewertete Punkt wurde unter anderem zur Erstellung einer „Running Condition Stick-Slip Map“ (RCSSM) verwendet. Hierbei werden die unterschiedlichen Formen der Hysteresen begutachtet und in drei Bereiche unterteilt (Zhou 1995, Fouvry 1996).

- Linearer- (Festkörper),
- Nicht linearer- (Stick-Slip) und
- „Gross Slip“ (Gleiten)-Bereich.

Dies ermöglicht, eine genaue Aussage darüber zu treffen, in welchem Bereich sich der Werkstoff mit den jeweiligen Parametern befindet.

3.4.3 Berechnete Größen der Torsionsuntersuchungen

Die Auswertung der monotonen Torsionsversuche erfolgte Analog zu 3.4.2.1 und 3.4.2.2. Der Unterschied hierbei lag nur in der Prüfkörpergeometrie.

Bei der Auswertung der dynamischen Torsionsversuche musste berücksichtigt werden, dass die mitgelieferte Software der Firma Bose (Wintest[®]) dynamische Versuche nur nach Zug/Druck oder 3-Punkt-Biegung auswertet. Dieses Problem konnte jedoch durch Integrierung eines Formfaktors gelöst werden:

- Berechnung des Formfaktors aus:

$$K = \frac{l}{I_p} \quad \text{mit} \quad I_p = \frac{\pi \cdot (d_a^4 - d_i^4)}{32} \quad (3.5)$$

K	Formfaktor
I_p	polares Trägheitsmoment
l	effektive Prüfkörperlänge
d_a	Außendurchmesser des Torsionsprüfkörpers
d_i	Innendurchmesser des Torsionsprüfkörpers

- Multiplikation der aus der Software berechneten Steifigkeiten mit K .

Diese Umrechnung ermöglicht es, entsprechende Schubmodule (Komplex, Speicher, Verlust) zu berechnen, die nun für weitere Auswertungen verwendet werden können.

3.5 Prüfmethodik

3.5.1 Monotone Oberflächenuntersuchungen

Für die monotonen Versuche wurden folgende Parameter variiert:

- Normalspannung (0,25; 0,5; 1; 1,5 und 2 MPa),
- Auslenkung (von 5; 10 und 20 °) und
- Geschwindigkeit (0,05; 0,1; 0,25; 0,5; 1; 2; 5; 10 °/s).

Bei den monotonen Versuchen war das Hauptziel, durch Variation der Parameter den Bereich des Stick-Slips zu lokalisieren. Hierbei wurde ein umfassender Prüfplan erstellt (siehe Tabelle 2). Mit diesem Plan war es möglich, sich sukzessive an den Stick-Slip-Bereich anzunähern.

Tabelle 2: Übersicht über den Prüfplan der monotonen Stick-Slip-Versuche.

Normalspannung [MPa]	Geschwindigkeit [°/s]	Normalspannung [MPa]	Geschwindigkeit [°/s]
0,25	0,05	1	0,05
0,25	0,1	1	0,1
0,25	0,25	1	0,25
0,25	0,5	1	0,5
0,25	1	1	1
0,25	2	1	2
0,25	5	1	5
0,25	10	1	10
0,5	0,05	1,5	0,05
0,5	0,1	1,5	0,1
0,5	0,25	1,5	0,25
0,5	0,5	1,5	0,5
0,5	1	1,5	1
0,5	2	1,5	2
0,5	5	1,5	5
0,5	10	1,5	10
2	0,05	2	1
2	0,1	2	2
2	0,25	2	5
2	0,5	2	10

Bei den in Tabelle 2 dargestellten Versuchsparametern, bei denen Stick-Slip auftrat, wurden für die zyklischen Oberflächenuntersuchungen weiterverwendet. Dies war die beste Voraussetzung, um auch unter zyklischen Bedingungen Stick-Slip beobachten zu können.

3.5.2 Dynamische Oberflächenuntersuchungen

Bei den zyklischen Versuchen wurden die im Folgenden dargestellten Parameter variiert:

- Normalspannung (0,5; 1; 1,5 MPa),
- Amplitude (0,5; 1; 2; 4°) und
- Frequenz (0,003; 0,01; 0,05; 0,1 Hz).

Die aus den monotonen Versuchen eingeschränkten Parameter zur Lokalisierung des Stick-Slip-Phänomens wurden nun auf die zyklischen Parameter umgewandelt und durchgeführt (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten dynamischen Stick-Slip Versuche.

Normalspannung [MPa]	Amplitude [°]	Frequenz[Hz]
0,5	0,5 - 4	0,003
1	0,5 - 4	0,003
1,5	0,5 - 4	0,003
0,5	0,5 - 4	0,01
1	0,5 - 4	0,01
1,5	0,5 - 4	0,01
0,5	0,5 - 4	0,05
1	0,5 - 4	0,05
1,5	0,5 - 4	0,05
0,5	0,5 - 4	0,1
1	0,5 - 4	0,1
1,5	0,5 - 4	0,1

Durch die in Tabelle 3 aufgezeichneten Untersuchungen war es möglich, erstmals Auskunft über die Form der Spannungs-Dehnungshysterese, die bei Stick-Slip entstehen, zu erhalten.

3.5.3 Monotone auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche

Bei den monotonen Versuchen wurden folgende Parameter variiert:

- Geschwindigkeit (1; 10; 100 °/s),
- Temperatur (23; 80; 120 °/s) und
- Auslenkung (bis maximal 30 °).

3.5.4 Dynamische auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche

Bei den dynamischen Versuchen wurde eingangs ein „Amplitudenscan“ durchgeführt, bei dem die Amplitude (0,003 bis 8 ° bei 1 Hz) variiert wurde, um die linear viskoelastische Grenze zu bestimmen. Die viskoelastische Grenze lag für beide Materialien bei 2 °, deshalb erfolgten „Frequenzscans“ mit folgenden Parametern:

- Amplitude (1,25 °),
- Frequenz (0,01 bis 100 Hz) und
- Temperatur (23; 80 und 120 °C).

3.6 Modellierung

Die Lösung der für das modifizierte Dahl-Modell notwendigen Differentialgleichung (siehe Gleichung (2.13)) erfolgte im Programm Matlab[®]. Als experimentelle Eingangsgröße für das MDM wurde die Verdrehung (Rotation) u gewählt. Da es bei Messdaten grundsätzlich systembedingt zu einem Rauschen kommt und aus diesem Grund eine numerische Ableitung erschwert wird, wurde die Verdrehung durch einen „cubic spline fit“ ersetzt und machte solcherart eine analytische Ableitung möglich. Diese Ableitung konnte für das Lösen der Differentialgleichung verwendet werden. Weitere wichtige Eingangsgrößen für die Lösung der Differentialgleichung waren die obere bzw. untere Steigung. (h_u und h_l). Zur Berechnung der Steigungen wurden graphisch Tangenten an die Kurven angelegt und ausgewertet. Der Parameter β wird nach dem Lösen der Differentialgleichung mit Hilfe der „least square method“ so angepasst, dass das Modell bestmöglich zu den experimentellen Daten approximiert. Der Exponent μ wird in der Arbeit von Chatelet (2008) mit dem Zahlenwert 1 angenommen. In dieser Arbeit wird μ ebenfalls mit 1 angenommen und bewusst darauf verzichtet, μ als Parameter zu berechnen, da ansonsten die Lösung einer nichtlinearen Differentialgleichung 1. Ordnung notwendig wäre und dies mathematisch zu aufwendig wird. Der dafür notwendige Programmcode kann im Anhang unter Kapitel „Matlab“ entnommen werden.

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Monotone Oberflächenuntersuchungen

An dieser Stelle sind die Ergebnisse der im Abschnitt 3.5.1 durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Stick-Slip-Verhaltens unter monotonen Bedingungen für ein ungefülltes System (TPUu) und ein gefülltes System (TPUg) dargestellt. Im folgenden Abschnitt soll das Auftreten und die Stärke des Stick-Slip-Phänomens in Bezug auf die Variation der Belastung und der Geschwindigkeit untersucht werden.

Zu Beginn wurden Reproduzierbarkeitskontrollen durchgeführt um zu garantieren, dass sämtliche durchgeführte Versuche stabil waren und ein Messfehler ausgeschlossen werden konnte. In Abb. 4.1 ist eine Kontrolle dargestellt. Hierbei wurde Schritt für Schritt die Auslenkung angehoben, um mögliche Instabilitäten zu erkennen.

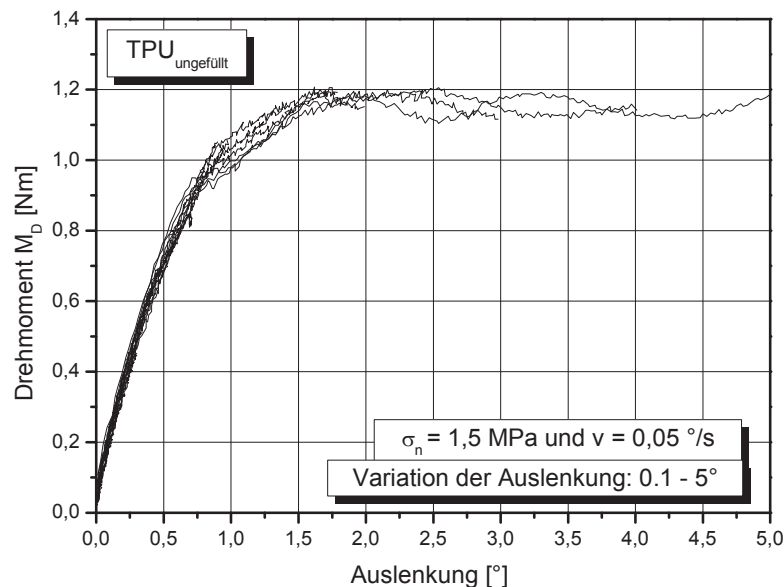


Abb. 4.1: Darstellung der Variation der Auslenkungen bei einer Normalspannung von 1,5 MPa und einer Geschwindigkeit von 0,05 °/s für TPUu.

Die in Abb. 4.1 dargestellte Variation der Auslenkungen zeigt, dass die Reproduzierbarkeit für sämtliche Versuche gegeben ist. Außerdem stellt dieses Diagramm den Fortschritt bzw. die Entwicklung des Drehmoments über die Rotation gut dar und veranschaulicht, wie sich das Stick-Slip-Phänomen Schritt für Schritt aufbaut.

In Abb. 4.2 und Abb. 2.1 sind für eine Geschwindigkeit von $1^\circ/\text{s}$ die Stick-Slip-Bewegungen der Materialien TPUn und TPUG dargestellt. Die restlichen Diagramme befinden sich im Anhang unter 7.4.

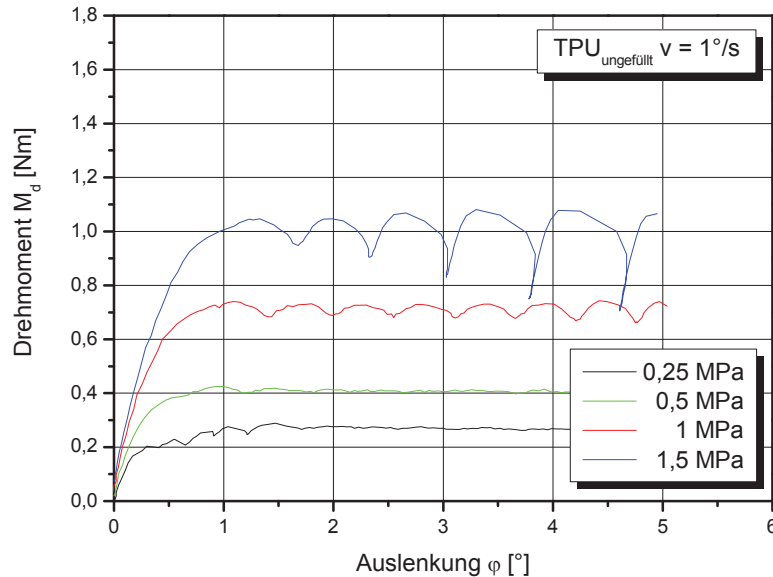


Abb. 4.2: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $1^\circ/\text{s}$ und 4 Belastungen für TPUn.

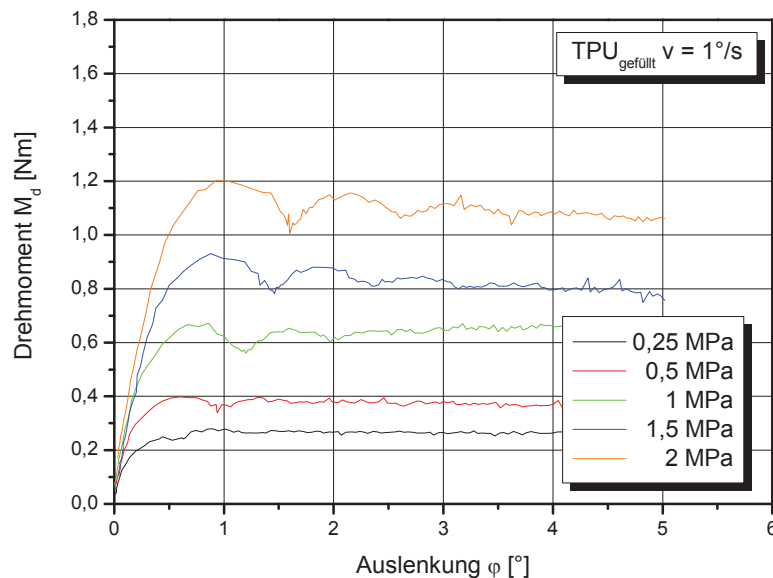


Abb. 4.3: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $1^\circ/\text{s}$ und 5 Belastungen für TPUG.

Aus den Abb. 4.2 und Abb. 2.1 geht grundsätzlich hervor, dass die TPUn und TPUG unterschiedliche Stick-Slip-Charakteristika aufweisen. Zur besseren Erklärung sind in Abb. 4.4 bei einem Versuch beide Materialien gegenübergestellt.

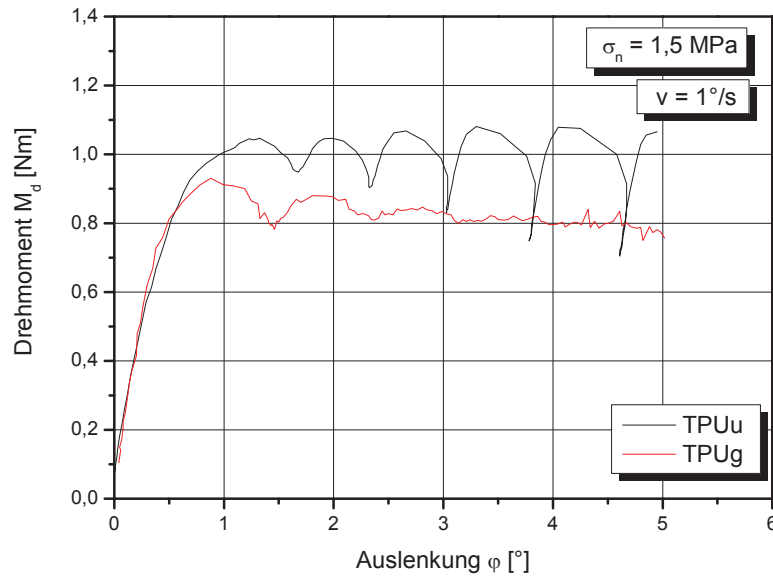


Abb. 4.4: Gegenüberstellung von TPUu und TPUG bei einer Prüfgeschwindigkeit von $1^\circ/\text{s}$ und einer Normalspannung von $1,5 \text{ MPa}$.

Aus Abb. 4.4 geht hervor, dass es bei TPUu mit dem Anstieg der Auslenkung zu einer Zunahme der Stick-Slip-Intensität kommt. Hingegen nimmt diese Intensität bei TPUG ab. Dies kann das erste Indiz dafür sein, dass der Füllstoff einen Einfluss auf das Stick-Slip-Verhalten hat.

4.1.1 Auswertung der kritischen Spannungen bei Stick und Slip

In Abb. 4.5 und Abb. 4.6 sind die Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeiten des Materials TPUu für die kritischen Spannungen bei Stick und Slip dargestellt.

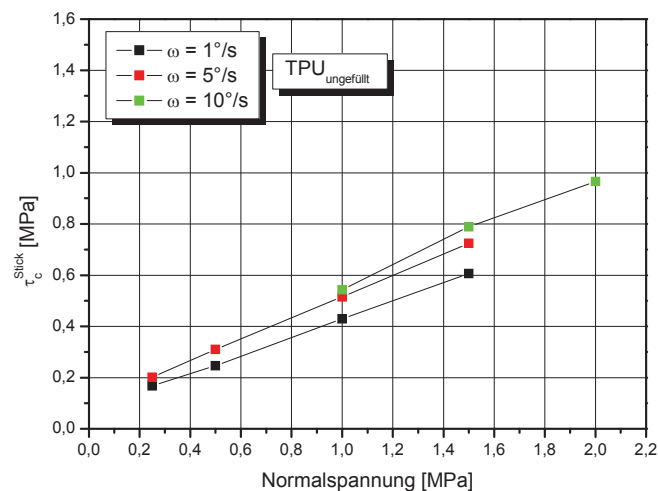


Abb. 4.5: Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Stick für das Material TPUu.

Aus Abb. 4.5 geht hervor, dass bei Stick eine annähernd lineare Abhängigkeit gegenüber der Normalspannung besteht. Ebenso wird die Geschwindigkeitsabhängigkeit deutlich, da mit steigender Geschwindigkeit der gesamte Verlauf der kritischen Spannungen nach oben versetzt wird.

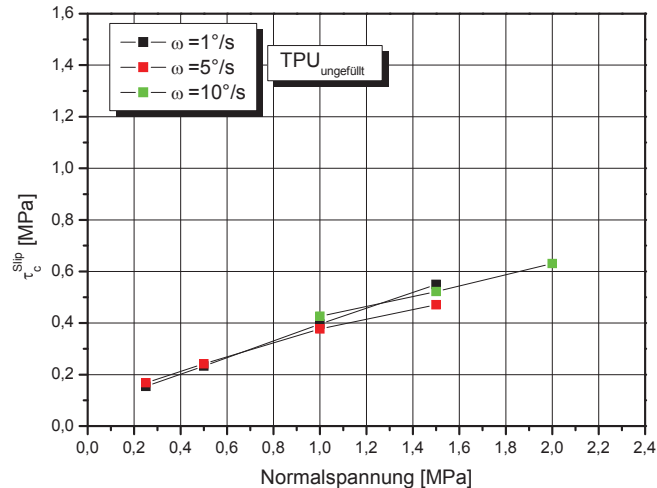


Abb. 4.6: Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Slip für das Material TPUu.

Aus der Darstellung in Abb. 4.6 erkennt man eine annähernd lineare Abhängigkeit der Normalspannung von der kritischen Torsionsspannung bei Slip. Jedoch ist keine Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannung bei Stick zu erkennen.

Für das Material TPUg sind in Abb. 4.7 und Abb. 4.8 die Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Stick und Slip veranschaulicht.

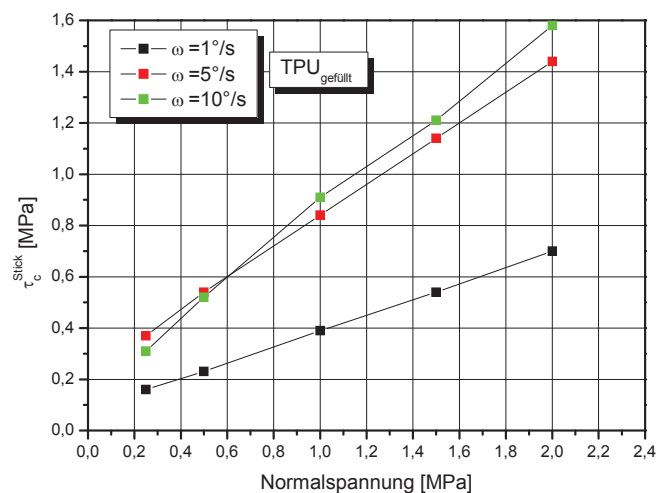


Abb. 4.7: Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Stick für das Material TPUg.

Abb. 4.7 lässt erkennen, dass es eine lineare Abhängigkeit der kritischen Spannung von der Belastung gibt. Außerdem erkennt man einen deutlichen Anstieg der Spannungen bei der Veränderung der Geschwindigkeit von $1^\circ/\text{s}$ auf $5^\circ/\text{s}$. Dieser Sprung zeigt sich beim gefüllten Material bei Stick deutlicher als beim ungefüllten Material.

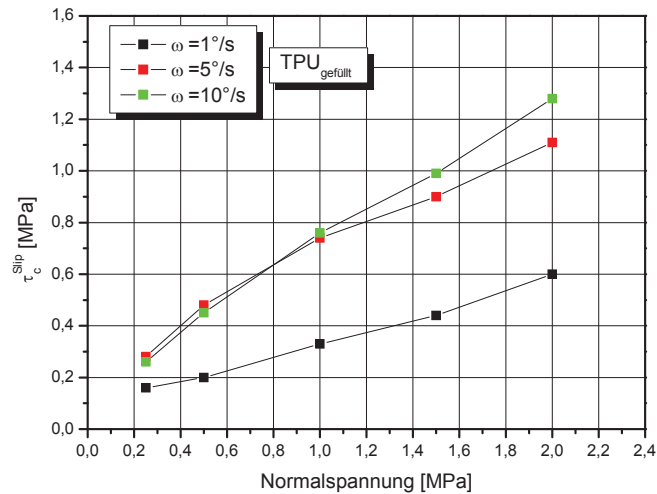


Abb. 4.8: Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Slip für das Material TPUg.

Abb. 4.8 zeigt, dass auch bei Slip ein eindeutiger linearer Zusammenhang zwischen der kritischen Spannung und der Normalspannung besteht. Die bei TPUu (siehe Abb. 4.6) bei Slip nicht erkennbare Abhängigkeit der Geschwindigkeit ist jedoch bei TPUg deutlich zu erkennen. Ebenso wie bei Stick (siehe Abb. 4.7) kommt es bei Slip zu einem deutlichen Anstieg der kritischen Spannung zwischen den Geschwindigkeiten 1 und $5^\circ/\text{s}$.

4.1.2 Auswertung der kritischen Reibungskoeffizienten bei Stick und Slip

Damit die monotonen Ergebnisse vervollständigt werden, wurden die Reibungskoeffizienten an den kritischen Stick-Slip-Stellen untersucht, um mögliche Einflüsse auf den COF zu zeigen. In Abb. 4.9 und Abb. 4.10 ist der Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der Belastung und Geschwindigkeit dargestellt.

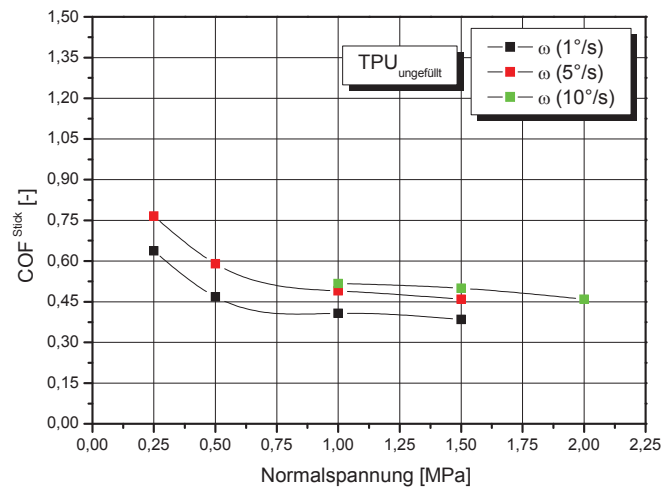


Abb. 4.9: Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Stick für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUu.

Abb. 4.9 spiegelt die grundsätzliche Beobachtung wieder, dass mit steigender Normalspannung der Reibungskoeffizient bei Stick absinkt. Dieser Verlauf wird ebenso in der Theorie (Uetz und Wiedmeyer 1985) erfasst. Es zeigt sich, dass der COF ab einer gewissen Normalspannung ein Plateau einnimmt.

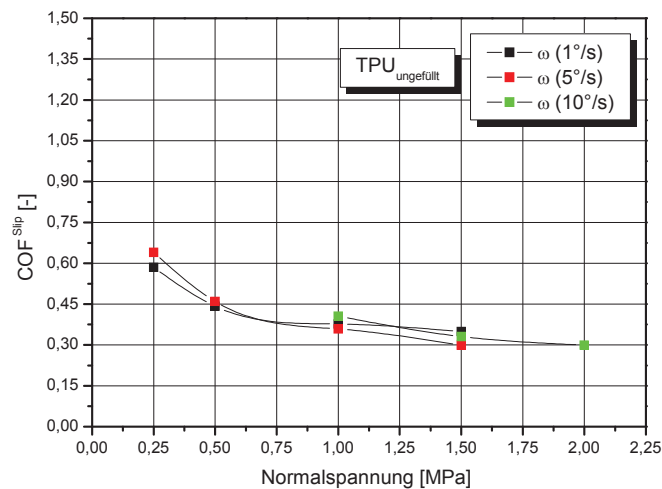


Abb. 4.10: Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Slip für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUu.

In der Darstellung (siehe Abb. 4.10) zeigt sich, dass es bei Slip zu einem Absinken des COF bei gleichzeitigem Anstieg der Normalspannung kommt. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit ist auch hier nicht erkennbar.

Für das Material TPUg sind in Abb. 4.11 und Abb. 4.12 der COF bei Stick und Slip in Abhängigkeit zur Geschwindigkeit sowie zur Normalspannung veranschaulicht.

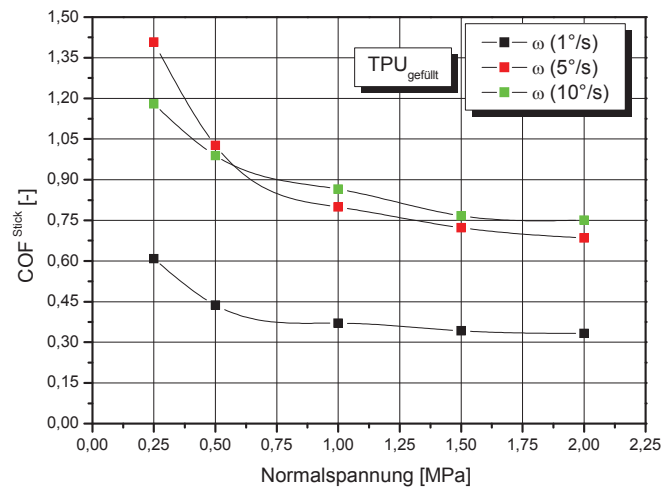


Abb. 4.11: Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Stick für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUg.

Abb. 4.11 zeigt eine deutlichere Abhängigkeit des COF's von der Geschwindigkeit (vgl. Abb. 4.7) als dies bei TPUu der Fall ist.

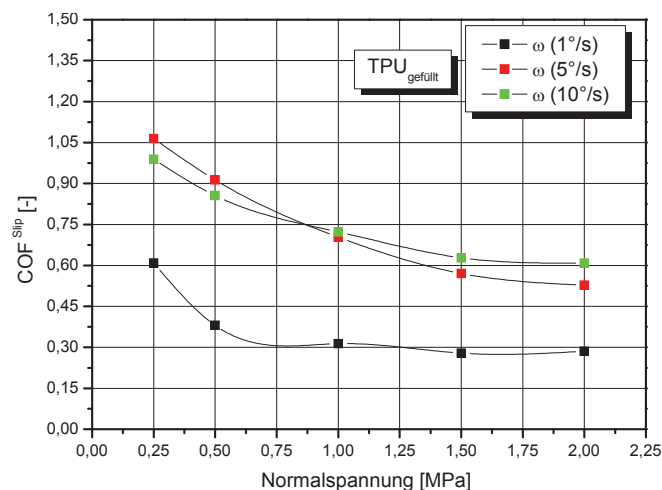


Abb. 4.12: Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Slip für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUg.

Es zeigt sich, dass bei Slip (wie in Abb. 4.12 dargestellt) eine eindeutige Abhängigkeit des COF's von der Belastung besteht. Des Weiteren tritt hier (vgl. Abb. 4.11) derselbe Abfall des COF's zwischen den Geschwindigkeiten 1 und 5 °/s auf wobei der COF ab einer Normalspannung von 1,5 MPA einen annähernd konstanten Wert annimmt.

Nachdem nun alle Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeiten verdeutlicht wurden, erfolgt in Abb. 4.13 die Darstellung des Verhaltens des ungefüllten Materials anhand eines Diagramms, das die Differenzen der Spannungen von Stick zu Slip

den Auslenkungsdifferenzen von Stick zu Slip gegenüberstellt. Dadurch soll die Intensität des Stick-Slip-Phänomens in Abhängigkeit der Belastung und der Geschwindigkeit veranschaulicht werden.

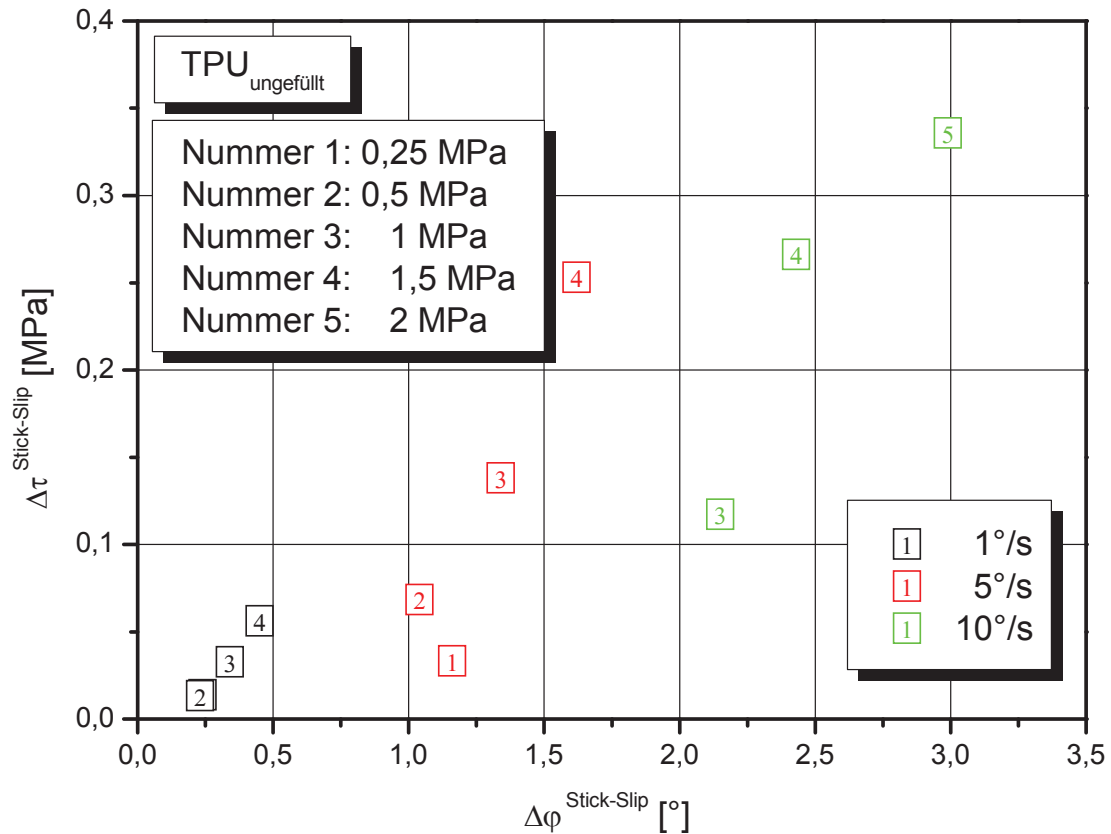


Abb. 4.13: Diagramm zur Darstellung der Stick-Slip-Intensität in Abhängigkeit zur Belastung und Geschwindigkeit für TPUu.

Aus Abb. 3.14 geht hervor, dass die Intensität der Amplituden des Stick-Slip maßgeblich von der Belastung und Geschwindigkeit abhängen. Die Darstellung zeigt auch eine klare Trennung der Geschwindigkeitsbereiche sowie Normalspannungsbereiche. In Abb. 4.14 wird ebenfalls ein Diagramm von TPUg in Abhängigkeit der Spannungs- und Auslenkungsdifferenz bei Stick und Slip gezeigt.

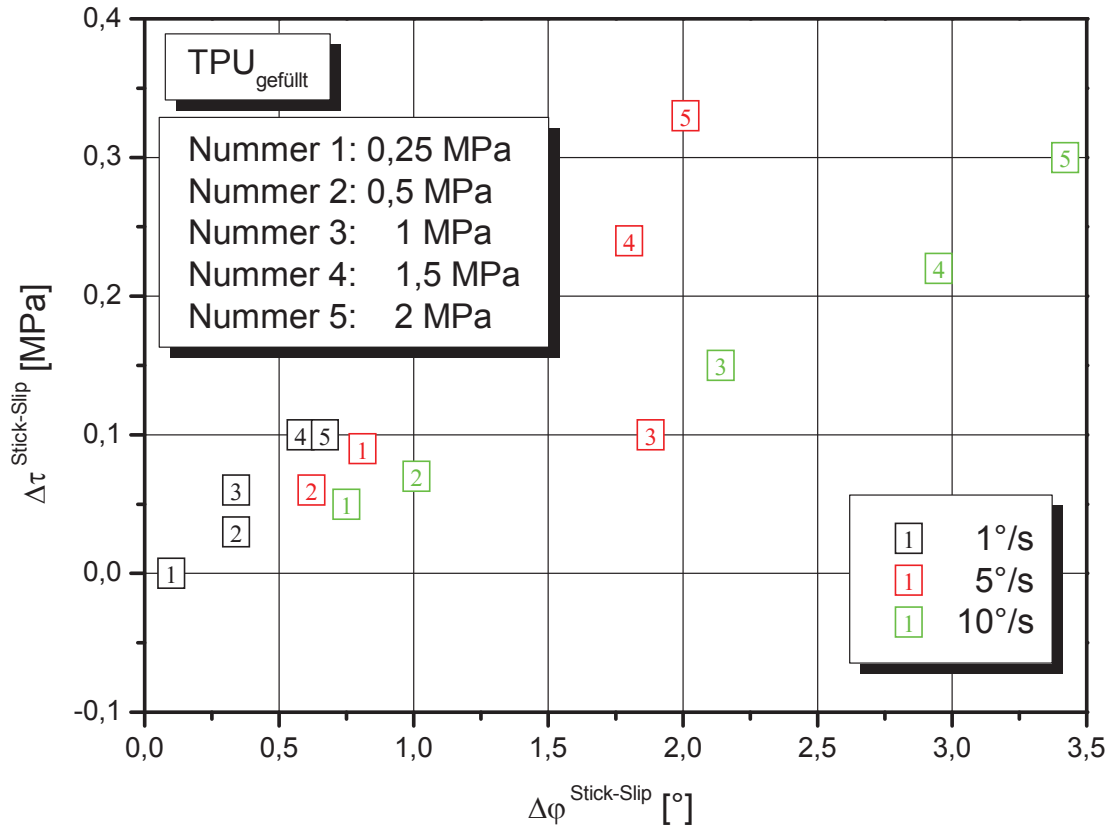


Abb. 4.14: Diagramm zur Darstellung der Stick-Slip-Intensität in Abhängigkeit der Belastung und Geschwindigkeit für TPUg.

Die Ergebnisse in Abb. 4.14 zeigen, dass bei dem gefüllten Material die Geschwindigkeits- und Belastungsabhängigkeit nicht so deutlich hervortritt wie bei TPUu (vgl. Abb. 4.13). Die beiden höheren Geschwindigkeiten 5 und 10 °/s zeigen bis zu einer Normalspannung von 0,5 MPa keine deutliche Trennung, im Gegensatz zum Verhalten von TPUu (vgl. Abb. 4.13). Für den Bereich von einer Auslenkungsdifferenz von bis zu 1 ° sowie einer Spannungsdifferenz von 0,1 MPa kann keine klare Differenzierung der Stick-Slip-Intensität getroffen werden. Dies kann vor allem auf das Vorhandensein des Füllstoffes zurückgeführt werden, der aufgrund seiner Schmierwirkung bei geringer Belastung unabhängig von der Geschwindigkeit zu einer Minderung der Spannungs- bzw. Auslenkungsdifferenz beiträgt.

4.2 Dynamische Oberflächenuntersuchungen

An dieser Stelle sind die Ergebnisse der im Abschnitt 3.5.2 durchgeführten Versuche zur Bestimmung des Stick-Slip-Verhaltens unter dynamischen Bedingungen für das gefüllte und ungefüllte Material dargestellt. Zu Beginn werden in den Abb. 4.15 und

Abb. 4.16 Beispiele der gemessenen Kurven dargestellt. Die restlichen Diagramme der durchgeführten Versuche sind gesammelt im Anhang unter 7.5 zu finden.

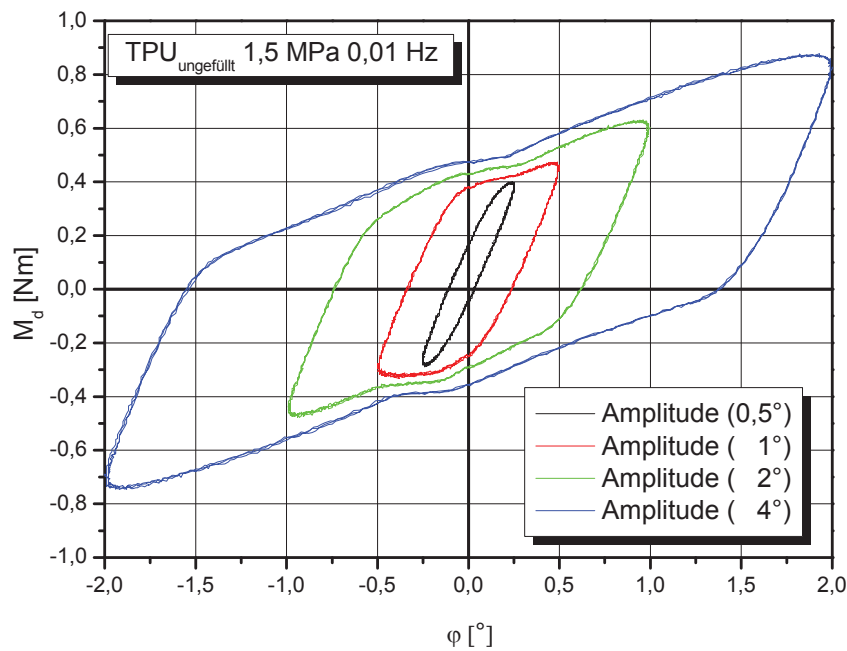


Abb. 4.15: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.

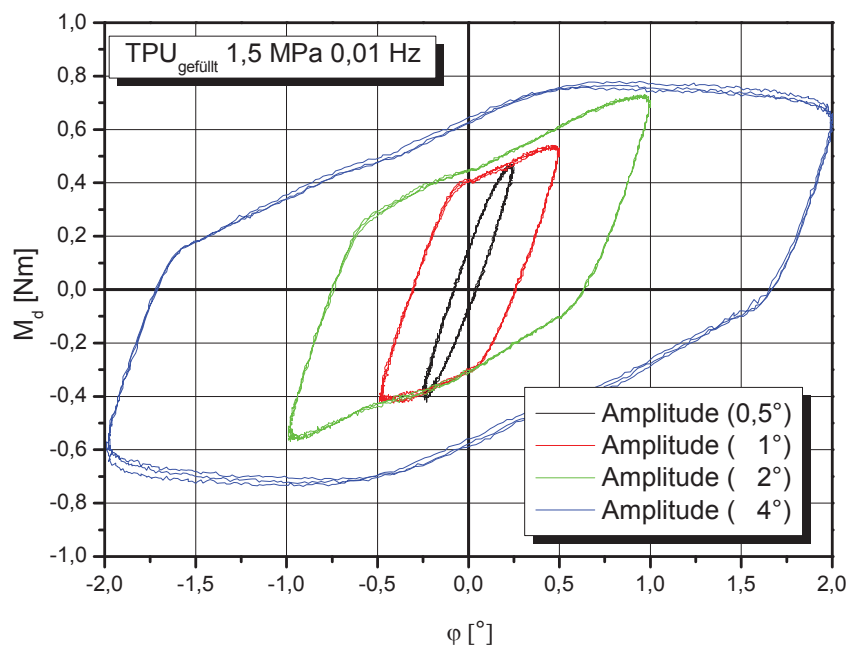


Abb. 4.16: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.

Die in Abb. 4.15 und Abb. 4.16 dargestellten Hysteresen ähneln sich über einen weiten Bereich (0,5 bis 2 °). Vergleicht man jedoch beide Materialien bei maximaler Amplitude, wie unter Abb. 4.17 veranschaulicht, ist ein deutlicher Unterschied zu erkennen.

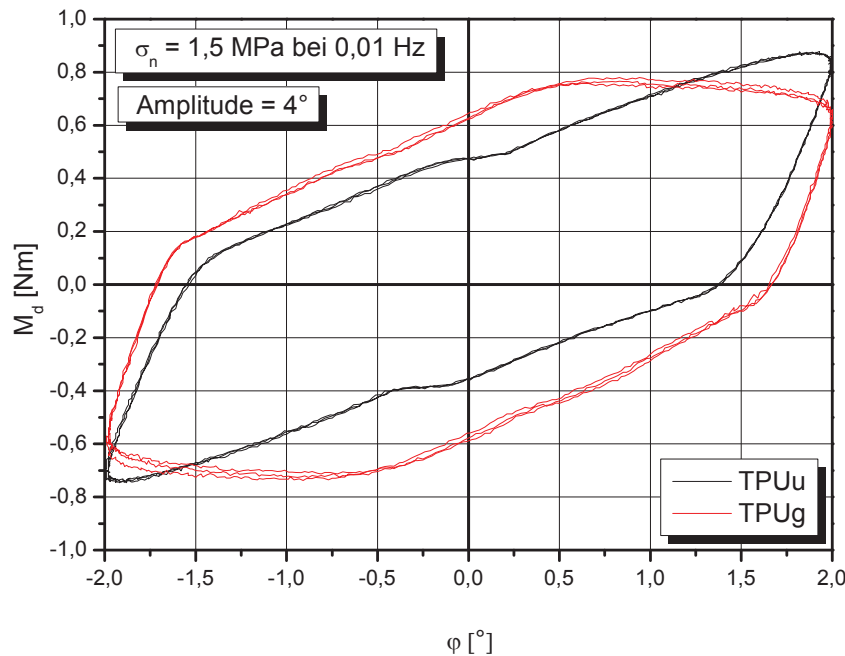


Abb. 4.17: Vergleich der Hysteresen von TPUu mit TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz einer Normalspannung von 1,5 MPa und Amplitude von 4 °.

Wie schon in den monotonen Versuchen erkennbar (vgl. Abb. 4.4), gibt es auch bei den gemessenen Hysteresen (wie unter Abb. 4.17 dargestellt) deutliche Unterschiede im Verlauf. Beide Hysteresen befinden sich bei maximaler Amplitude (4 °) im wie unter 3.4.2.5 erklärten „Gross Slip“ Bereich. Bei erster Begutachtung der Ergebnisse scheint es, als ob TPUu einen stabilen und TPUg einen instabilen Verlauf einnimmt. Inwieweit der Füllstoff von TPUg einen Einfluss auf diesen instabilen Verlauf hat wird im folgenden Kapitel durchleuchtet.

4.2.1 Darstellung der kritischen Spannungen

In den Abb. 4.18 bis Abb. 4.25 sind die kritischen Torsionsspannungen bei Stick dargestellt. Die kritischen Spannungen wurden in Bezug auf die Variation der Amplitude, der Normalspannung und der Frequenzen untersucht.

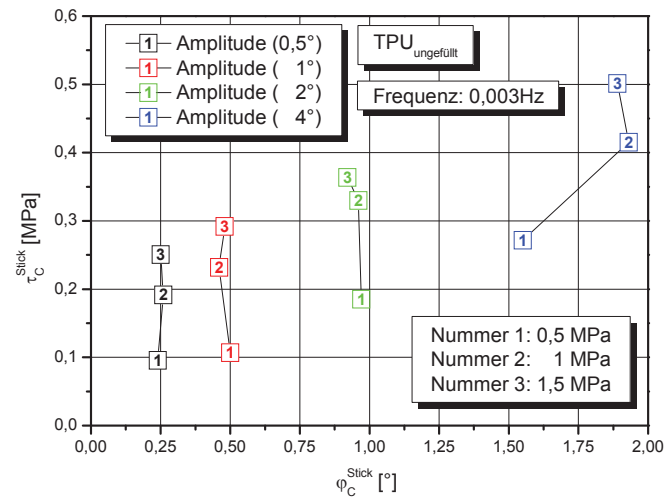


Abb. 4.18: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,003 Hz.

Aus Abb. 4.18 geht hervor, dass die Variation der Amplitude einen eindeutigen Einfluss auf die kritische Rotation (φ_c^{Krit}) hat. Kommt es bei geringen Amplituden wie etwa $0,5^\circ$ beinahe zu einer Übereinstimmung mit der Prüfamplitude, weicht die kritische Rotation bei einer Prüfamplitude von 2° bei einer Normalspannung um bis zu einem halben Grad von $0,5$ MPa ab. Dies weist auf „Gross Slip“ hin, da es sofort zu einem Durchrutschen des Körpers kommt.

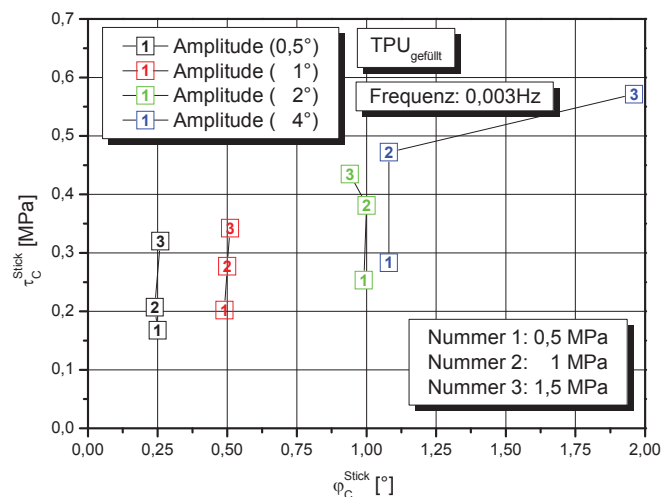


Abb. 4.19: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,003 Hz.

Für TPUg zeigt Abb. 4.19, dass es bei einer Prüfamplitude von 4° ebenfalls zum Auftreten von „Gross Slip“ bei Normalspannungen von $0,5$ MPa und 1 MPa kommt.

Diese Erkenntnis deckt sich mit dem in Abb. 4.14 dargestellten Einfluss des Füllstoffes auf die Stick-Slip-Neigung bei geringer Belastung und niedriger Geschwindigkeit (monotone Versuche) bzw. Frequenz (dynamische Versuche).

Abb. 4.20 und Abb. 4.21 veranschaulichen die kritische Torsionsspannung in Abhängigkeit der Normalspannung und Amplitude bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz.

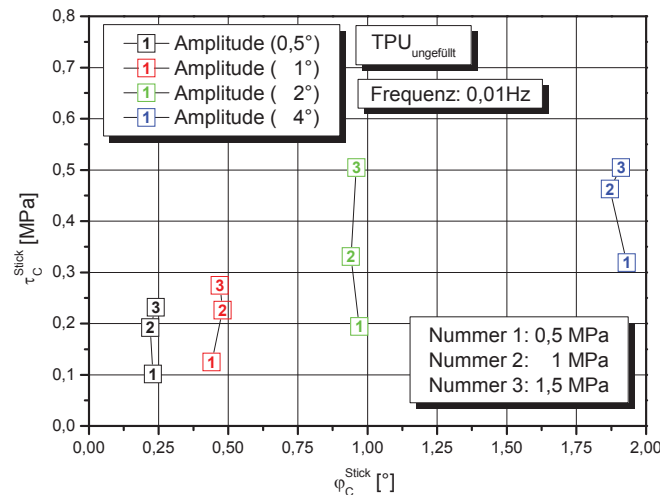


Abb. 4.20: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz.

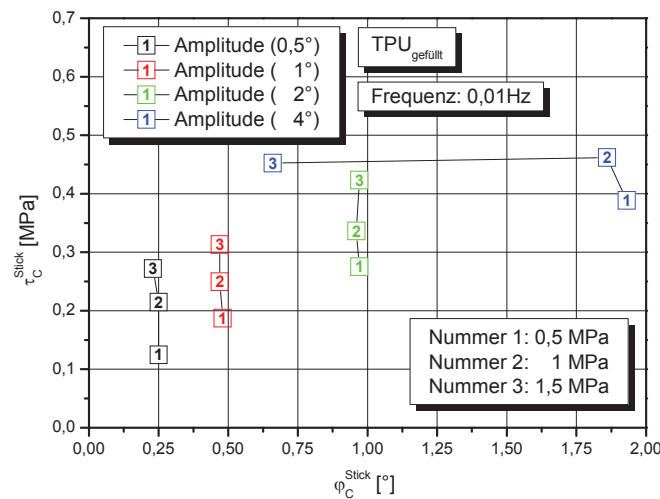


Abb. 4.21: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz.

Aus Abb. 4.20 geht hervor, dass die Erhöhung der Prüffrequenz bei TPUu keinen unmittelbaren Einfluss auf das Eintreten der kritischen Rotation hat. Jedoch erreichen sämtliche Versuche die maximal erreichbare Prüffrequenz nicht, sondern neigen

bereits vor dieser zu Slip. Der gefüllte Werkstofftyp weist, wie in Abb. 4.21 dargestellt, ähnliche Stabilität wie TPUu auf. Jedoch kommt es bei der größten Amplitude und größten Belastung zu einem verfrühten Slip was ein eindeutiger Hinweis auf „Gross Slip“ ist.

In Abb. 4.22 und Abb. 4.23 wird die kritische Torsionsspannung in Abhängigkeit zur Normalspannung und Amplitude bei einer Prüffrequenz von 0,05 Hz veranschaulicht.

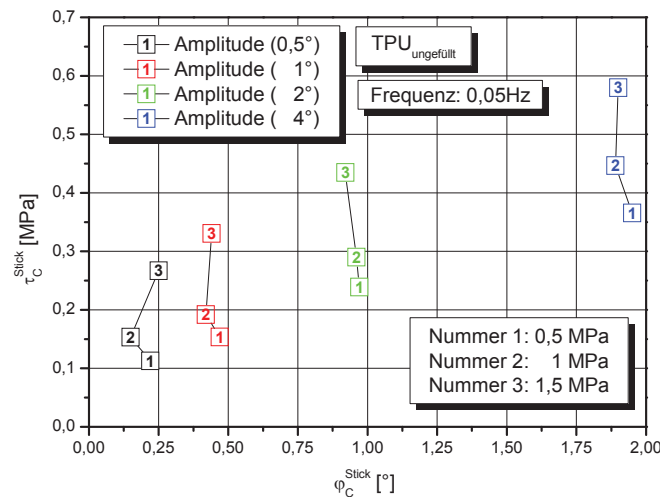


Abb. 4.22: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,05 Hz.

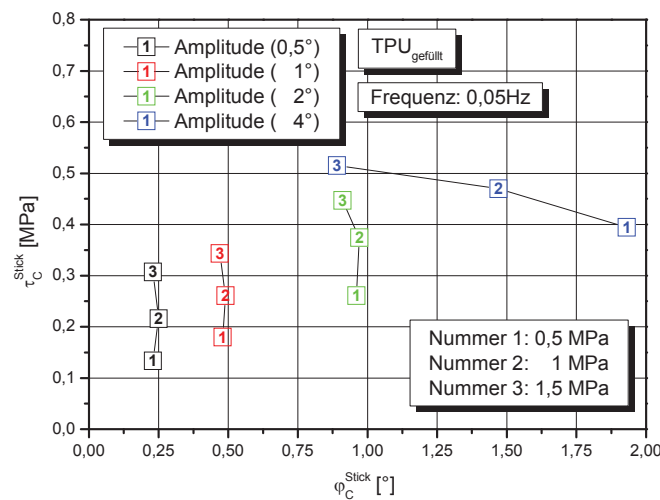


Abb. 4.23: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,05 Hz.

Generell kann auch von den in Abb. 4.22 dargestellten Ergebnissen abgeleitet werden, dass die Erhöhung der Prüffrequenz auf 0,05 Hz bei TPUu das Auftreten von

Slip verfrühter eintreten lässt. Im Gegensatz zu dem ungefüllten Material zeigt das gefüllte Material (siehe dazu Abb. 4.23) bei der größten Belastung und der maximalen Prüfamplitude ein stark verfrühtes Auftreten von Slip, das ein Indiz für „Gross Slip“ ist.

Die kritische Torsionsspannung in Abhängigkeit der Normalspannung und Amplitude bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz ist in Abb. 4.24 und Abb. 4.25 veranschaulicht.

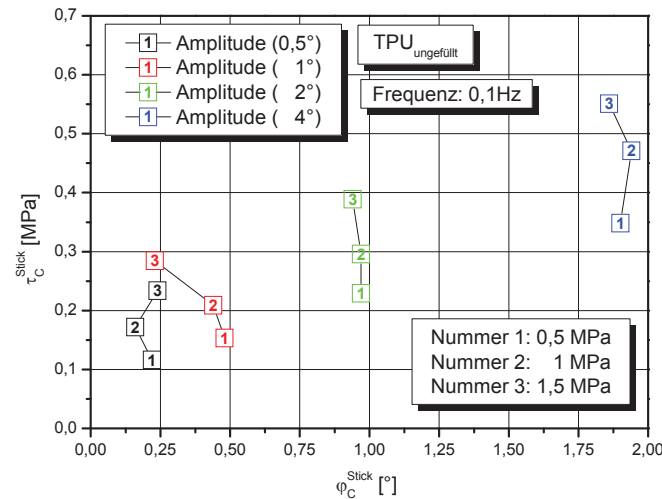


Abb. 4.24: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz.

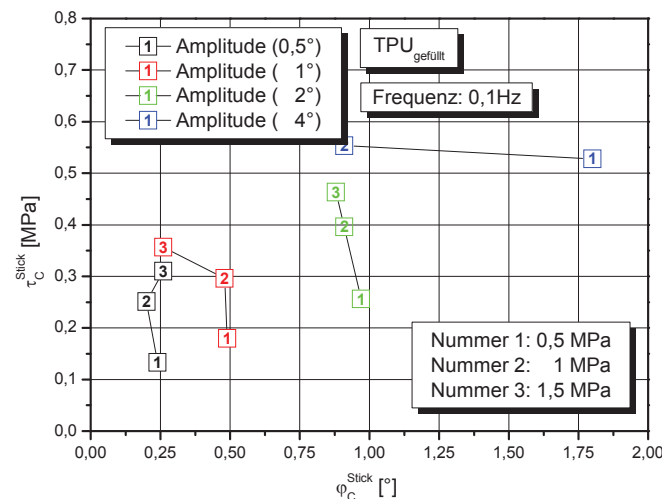


Abb. 4.25: Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz.

Abb. 4.24 verdeutlicht, dass es durch weiteres Anheben der Prüffrequenz zu keinen erheblichen Veränderungen in der Charakteristik des Slip-Auftretens für TPUu mehr

kommt (vgl. Abb. 4.22). Die Auswertung der letzten Prüffrequenz (0,1 Hz) von TPUg zeigt in Abb. 4.25, dass es bei maximaler Amplitude und maximaler Belastung zu einem deutlich verfrühten Gleiten kommt. An dieser Stelle sei außerdem darauf hingewiesen, dass der Versuch bei maximaler Amplitude von 4° und einer Normalspannung von 1,5 MPa keine sinnvollen Ergebnisse mehr liefert und aus diesem Grund nicht angeführt wird. Dies untermauert die Annahme, dass es bei dem gefüllten Material durch Steigerung der Frequenz auch bei maximalen Normalspannungen zu einem verfrühten Slip („Gross Slip“) kommt.

In Abb. 4.26 sind sämtliche kritischen Auslenkungen über die Prüfamplituden für beide Materialien gegenübergestellt. Dabei wurden pro Prüffrequenz die jeweiligen φ_c^{Stick} zusammengefasst und arithmetische Mittelwerte in Abhängigkeit der Normalspannungen erstellt um mögliche Trends zu vergleichen.

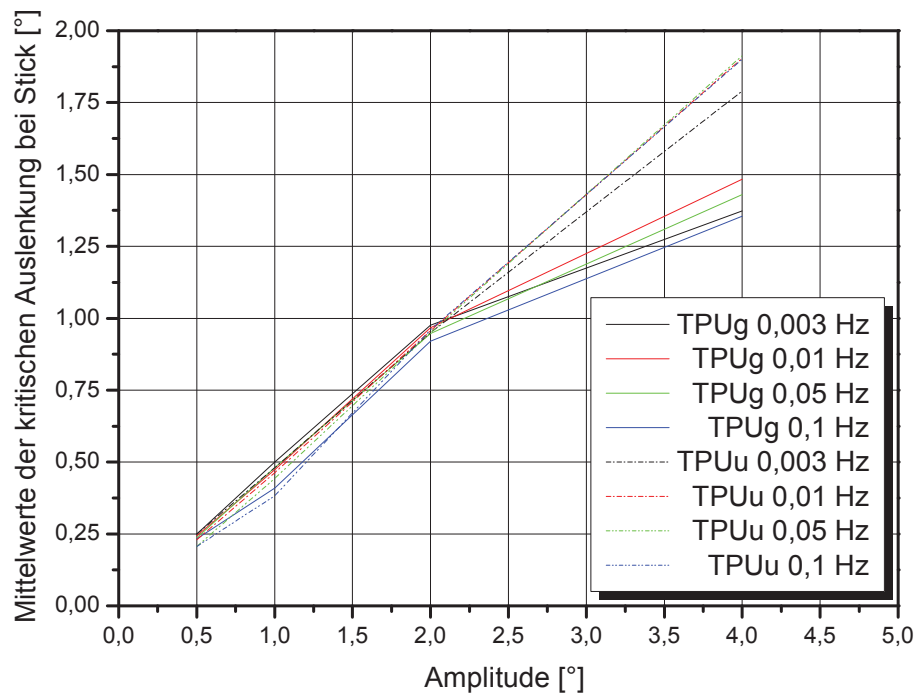


Abb. 4.26: Darstellung der arithmetischen Mittelwerte von φ_c^{Stick} über die Amplitude für TPUu und TPUg.

Betrachtet man die Verläufe in Abb. 4.26 zeigt sich, dass die arithmetischen Mittelwerte von φ_c^{Stick} eine lineare Abhängigkeit von der Amplitude für TPUu aufweisen. Vergleicht man diesen linearen Verlauf mit den Hysteresenformen (siehe 7.5) wird deutlich, dass sämtliche Hysteresen einen stabilen Verlauf zeigen. Diese Linearitäten decken sich auch mit dem gefüllten Material, jedoch nur bis zu einer Amplitude von 2° . Ab dieser Amplitude ändert sich der Kurvenverlauf. Es kommt zu einem Knicken

der Kurve welcher im Vergleich mit den dazugehörigen Hysteresen (siehe 7.5) eindeutig auf die Instabilität des Hysteresenverlaufs hindeutet. Dies deckt sich auch mit der These, dass der „Gross Slip“ Bereich instabil (für TPUg) bzw. stabil (für TPUu) ausgeprägt sein kann. Mit Sicherheit ist der Füllstoff von TPUg für diese Instabilität verantwortlich.

Nach dieser Betrachtung der Einflüsse von Amplitude, Belastung und Frequenz auf das dynamische Stick-Slip-Verhalten konnte eine „Running Condition Sick-Slip Map“ (RCSSM) erstellt werden. In Abb. 4.27 sind die unterschiedlichen Bereiche für TPUu dargestellt. Diese zeigen, welche Belastung sich bei entsprechender Amplitude und Frequenz in welcher Stick-Slip-Region befindet.

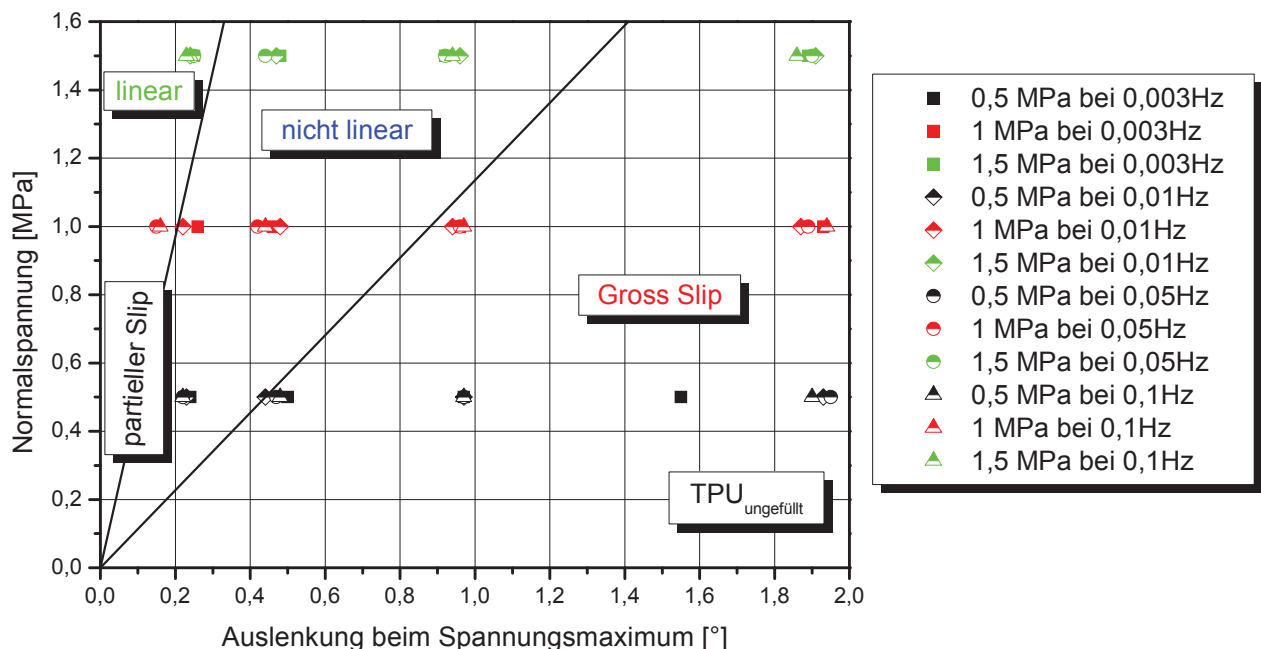


Abb. 4.27: Darstellung der RCSSM für das ungefüllte Material TPUu.

Die in Abb. 4.27 dargestellte RCSSM, veranschaulicht alle drei Bereiche (linear, nicht linear und „Gross Slip“) gut. Vor allem der nicht-lineare Bereich ist durch eine Vielzahl an Datenpunkten vertreten. Für kleine Amplituden sind sämtliche Ergebnisse im nicht- bzw. linearen Bereich angesiedelt. Bei großen Amplituden kommt es unvermeidlich zu „Gross Slip“.

In Abb. 4.28 ist nun die RCSSM für das gefüllte Material gezeigt und stellt alle drei Bereiche des Stick-Slips in Abhängigkeit der Frequenz, Amplitude und Normalspannung dar.

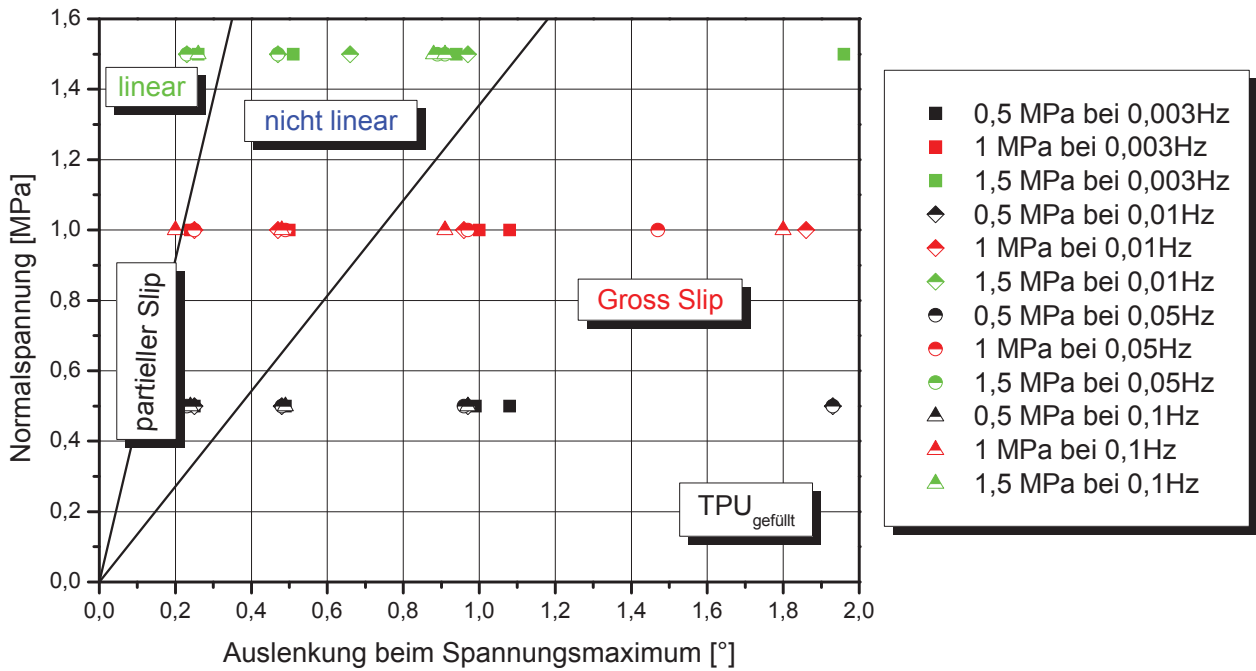


Abb. 4.28: Darstellung der RCSSM für das ungefüllte Material TPUg.

Abb. 4.28 veranschaulicht ebenfalls alle drei Bereiche des Stick-Slips und zeigt, in welchen sich die durchgeführten Versuche befinden. Wenn man Abb. 4.27 direkt mit Abb. 4.28 vergleicht, so liegen die linearen Bereiche in einem Gebiet von 0° bis $0,33^\circ$ (TPUu) und 0° bis $0,35^\circ$ (TPUg). Deutlichere Unterschiede zwischen den Materialien kristallisieren sich an der Grenze des nicht linearen zum „Gross Slip“ Bereich heraus. Hier nimmt das Maximum bei TPUu den Wert $1,41^\circ$ ein, TPUg den Wert $1,18^\circ$. Aus der RCSSM von TPUg zeigt sich, dass der Füllstoff mit seiner Schmierfunktion zu einem früheren Zeitpunkt „Gross Slip“ und damit kontinuierliches Gleiten hervorruft.

4.3 Monotone auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche

Die Geschwindigkeits- sowie die Temperaturabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen sind in diesem Abschnitt sowohl für das ungefüllte als auch das gefüllte Material dargestellt.

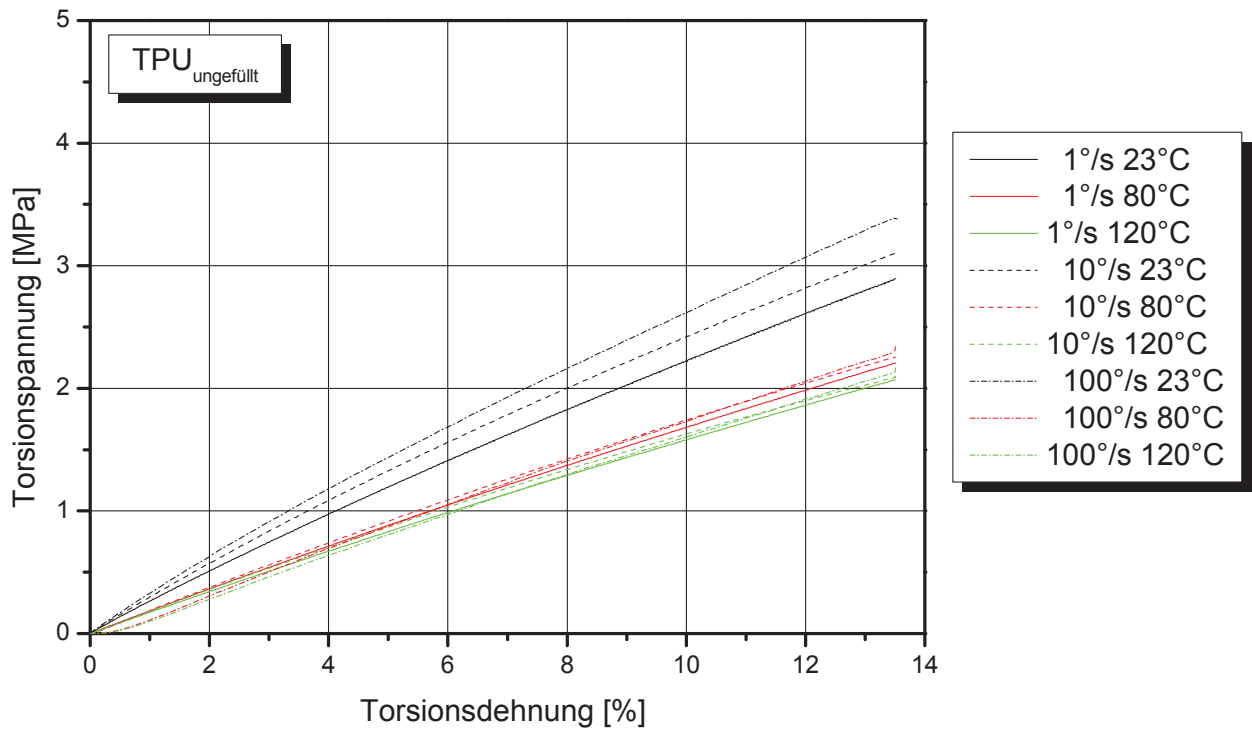


Abb. 4.29: Veranschaulichung der Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen des Materials TPUs.

Aus Abb. 4.29 geht die prinzipielle Abhängigkeit der Torsionsspannung von der Temperatur hervor. Mit steigender Temperatur kommt es zu einem Abfall der Torsionsspannung, unabhängig von der Prüfgeschwindigkeit. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit ist nur eindeutig bei 23 °C zu beobachten und lässt sich bei höheren Temperaturen nicht mehr klar ablesen.

Die in Abb. 4.29 dargestellten Torsionsspannungen über die Torsionsdehnungen werden bei Raumtemperatur als auch bei 1 bzw. 10 ° mit den monotonen Oberflächenuntersuchungen verglichen. Dabei wurden für Stick die kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Dehnungen zusammen mit den Torsionsverläufen in Abb. 4.30 veranschaulicht.

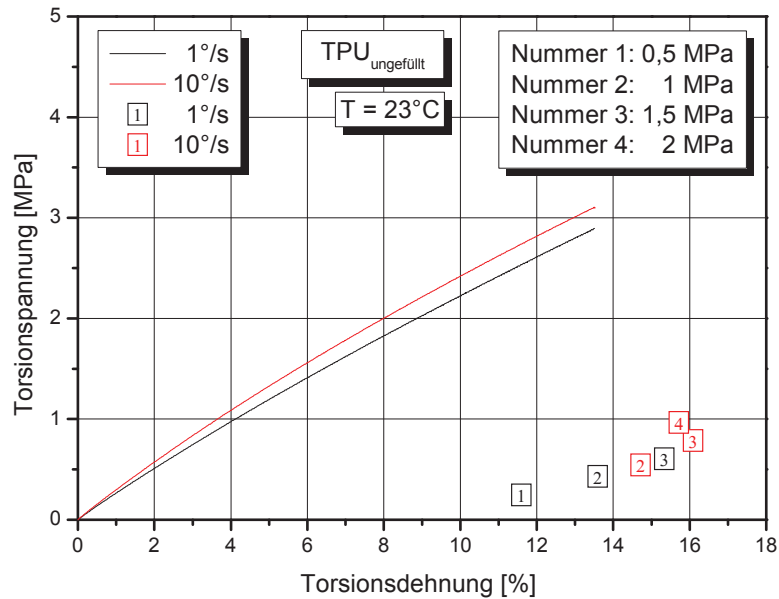


Abb. 4.30: Vergleich der monotonen Festkörper- und Oberflächenuntersuchungen für TPUu.

In Abb. 4.30 wird der deutliche Spannungsunterschied zwischen Festkörper und Oberfläche klar veranschaulicht. Selbst wenn bei maximaler Normalspannung von 2 MPa die Torsionsspannung 0,96 MPa annimmt, liegt der Spannungswert des Festkörper-Torsionsversuches bei einem Wert von 3,1 MPa.

Für das ungefüllte TPU Material wurde der Schubmodul in Abhängigkeit der Geschwindigkeit und Prüftemperatur dargestellt (siehe Abb. 4.31).

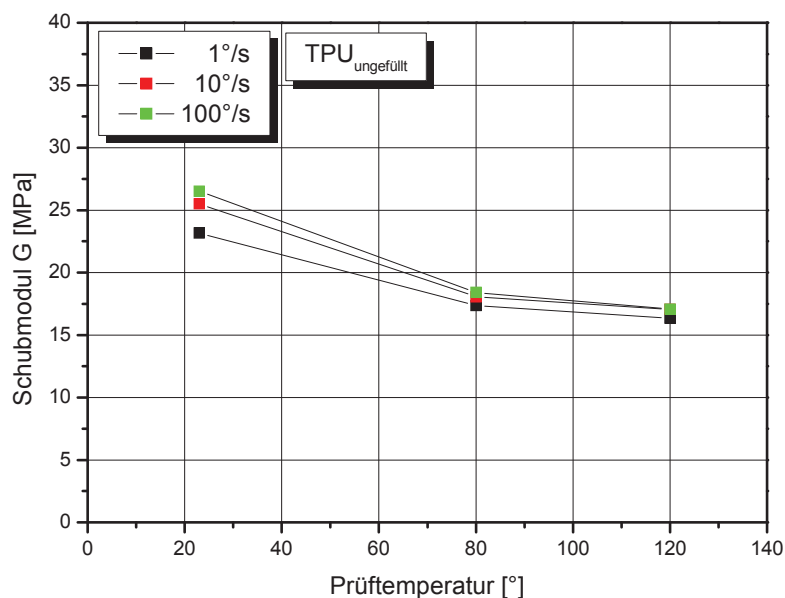


Abb. 4.31: Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls von der Geschwindigkeit und der Temperatur für das ungefüllte TPU Material.

Aus Abb. 4.31 geht hervor, dass mit Anstieg der Temperatur der Schubmodul abnimmt. Außerdem lässt sich bei Raumtemperatur die Abhängigkeit der Geschwindigkeit klar erkennen im Gegensatz zu den Messungen, bei 80 und 120 °C.

In Abb. 4.32 ist die Temperatur- und Geschwindigkeitsabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen für TPUg veranschaulicht.

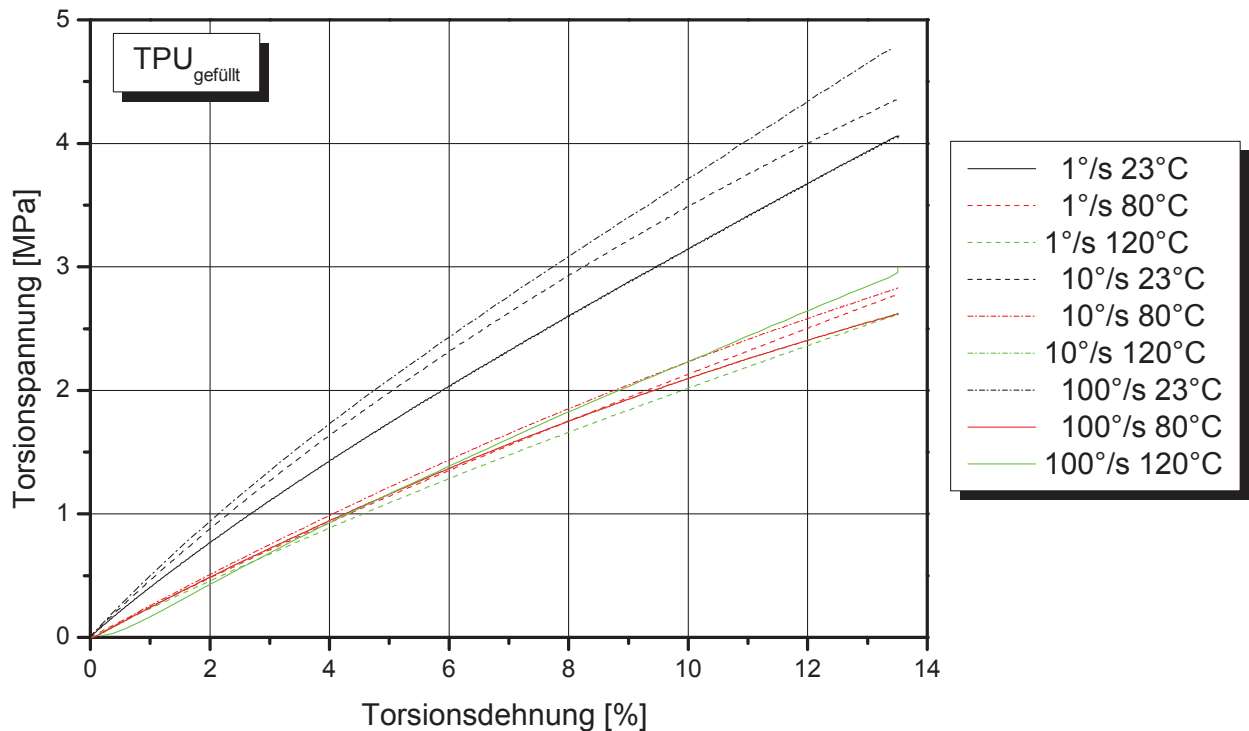


Abb. 4.32: Veranschaulichung der Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen des Materials TPUg.

Aus Abb. 4.32 lässt sich bei Raumtemperatur eine klare Geschwindigkeitsabhängigkeit ablesen. Außerdem kommt es zu einem generellen Abfall der Spannung von 23 °C auf 80 °C und 120 °C. Wie für das ungefüllte Material wurde ein Vergleich der Spannungen und Dehnungen bei 23 °C und 1 bzw. 10 °/s durchgeführt. In Abb. 4.33 sind die Ergebnisse der Festkörper- bzw. Oberflächenversuche dargestellt.

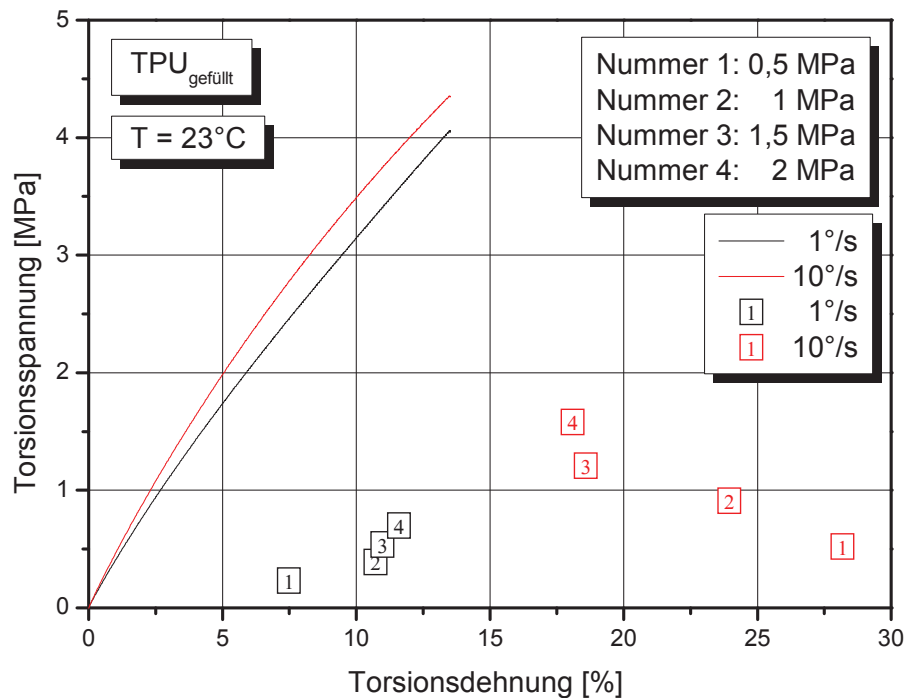


Abb. 4.33: Vergleich der monotonen Festkörper- und Oberflächenuntersuchungen für TPUg.

Betrachtet man in Abb. 4.33 die Punktauswertungen der Oberflächenuntersuchungen fällt auf, dass die Geschwindigkeiten 1 bzw. 10 °/s einen gegenläufigen Verlauf aufweisen. Hier zeigt sich wieder die Geschwindigkeitsabhängigkeit durch den Füllstoff, der erst bei höheren Normalspannungen (1,5 und 2 MPa) eine geringere Schmierwirkung zeigt und sich so höhere Torsionsspannungen an der Oberfläche bilden können. Ebenfalls zeigt der Vergleich der Festkörper- und der auf die Oberfläche bezogenen Torsionsspannungen, dass die Werte erneut um das bis zu fünffache differieren. Bei der Normalspannung 2 MPa und 1 °/s nimmt die Torsionsspannung den Wert 0,7 MPa ein. Im Vergleich dazu ist die Torsionsspannung im Festkörperversuch bei gleicher Dehnung 3,5 MPa. Ein deutlicherer Unterschied zwischen Festkörper und Oberfläche zeigt sich bei TPUg, da der Füllstoff bei den Festkörperuntersuchungen eine Festigkeitssteigerung hervorruft (vgl. Abb. 4.29 mit Abb. 4.32). Zudem mindert der Füllstoff das Haften durch die Schmierfunktion.

Die Abhängigkeit des Schubmoduls von der Prüfgeschwindigkeit und der Temperatur ist in Abb. 4.34 veranschaulicht.

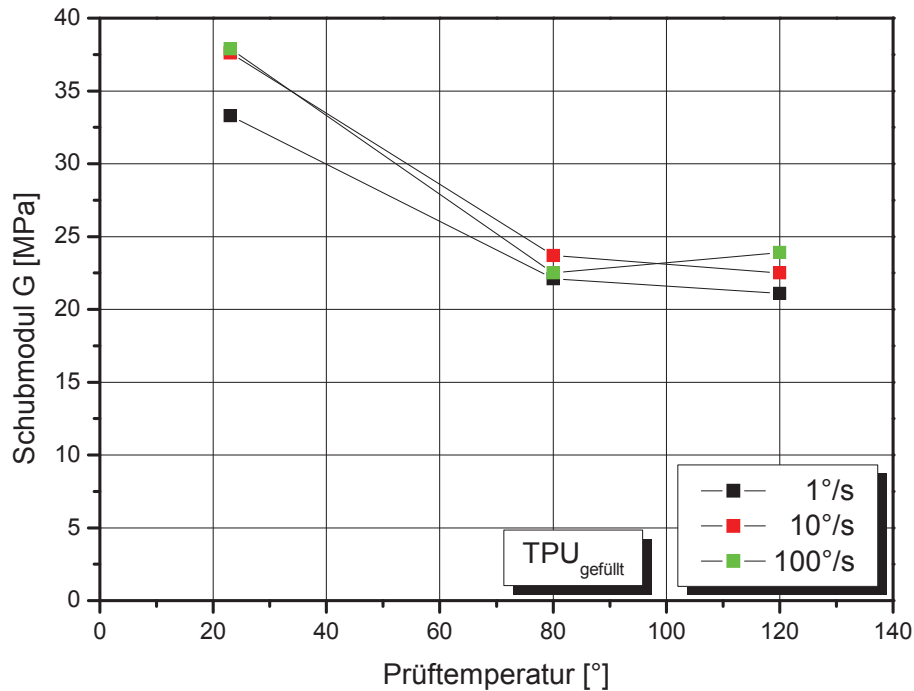


Abb. 4.34: Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls von der Geschwindigkeit und der Temperatur für das gefüllte TPU Material.

Ein genereller Abfall des Schubmoduls über die Temperatur ist auch aus Abb. 4.34 klar ersichtlich. Jedoch zeigt sich nicht wie beim ungefüllten TPU Material (vgl. Abb. 4.31) bei den gewonnenen Daten ein eindeutiger Unterschied zwischen den Messungen bei den Geschwindigkeiten 10 und 100 °/s bei Raumtemperatur.

4.4 Dynamische auf den Festkörper bezogene Torsionsversuche

In diesem Abschnitt sind die Ergebnisse der dynamischen Torsionsversuche dargestellt. Dabei wurden Frequenzuntersuchungen bei 23, 80 und 120 °C durchgeführt. Abb. 4.35 und Abb. 4.36 stellen für die Frequenz- und Temperaturabhängigkeit das gefüllte und ungefüllte Material dar.

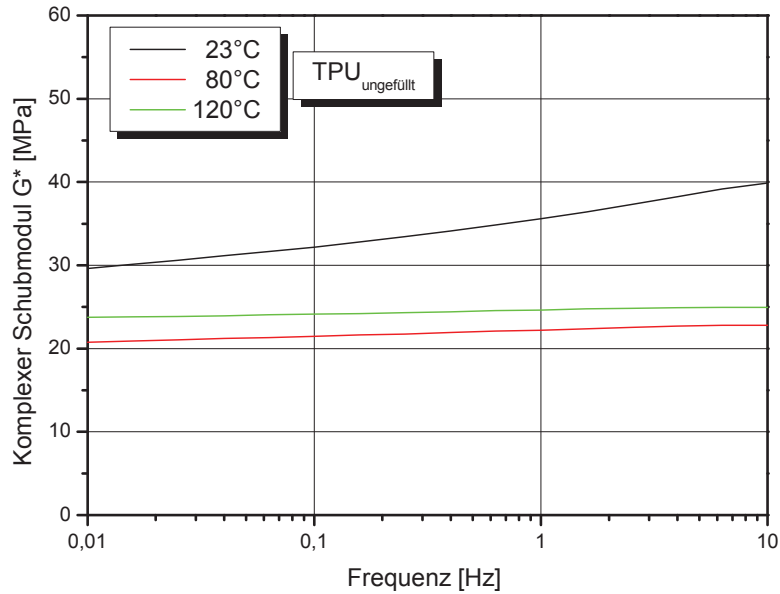


Abb. 4.35: Darstellung der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit von TPUu bei dynamischen Torsionsversuchen.

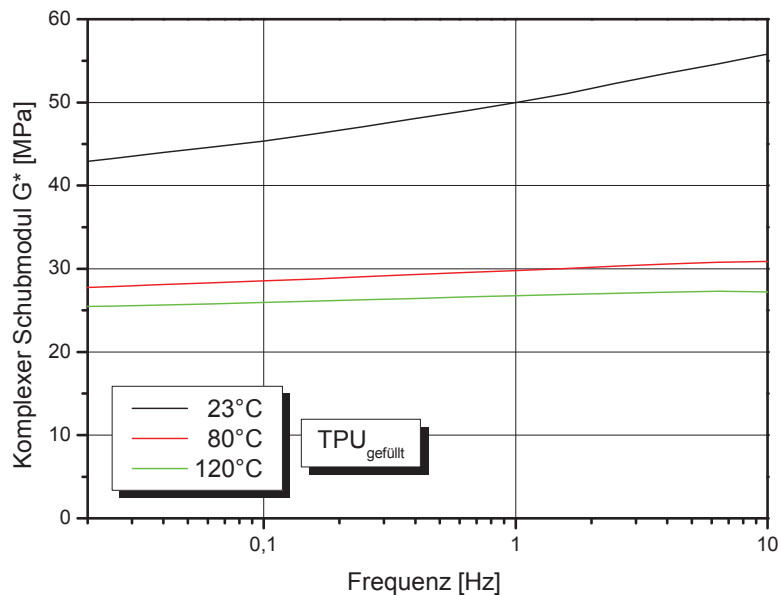


Abb. 4.36: Darstellung der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit von TPUg bei dynamischen Torsionsversuchen.

Aus den in Abb. 4.35 und Abb. 4.36 dargestellten Untersuchungen wurden Temperaturverschiebungen durchgeführt, um eine mögliche Erstellung von „Mastercurves“ vorzubereiten. Die dabei verwendeten Grundlagen sind der Literatur zum Thema Zeit- und Temperaturverschiebung zu entnehmen (Tschoegl, 1989; Schwarzl, 1990).

In Abb. 4.37 und Abb. 4.38 sind die durchgeführten Temperaturverschiebungen dargestellt.

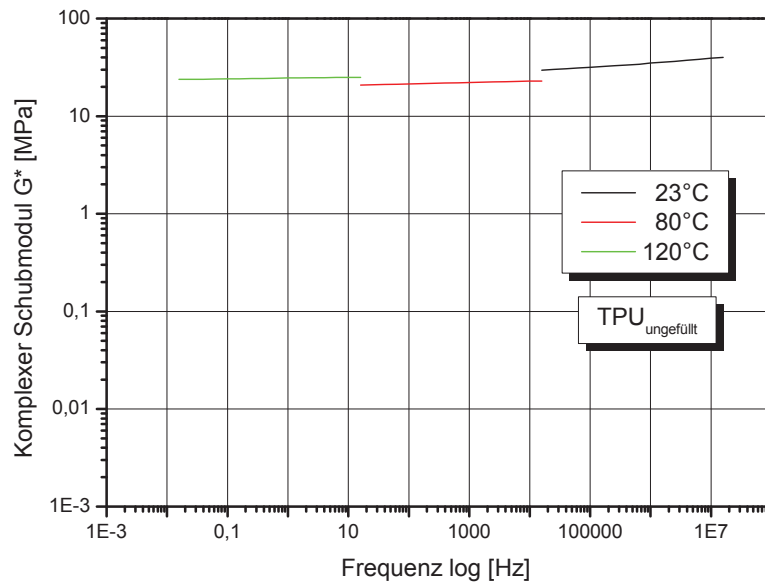


Abb. 4.37: Darstellung der aus den dynamischen Torsionsversuchen durchgeführten Temperaturverschiebung für TPUu.

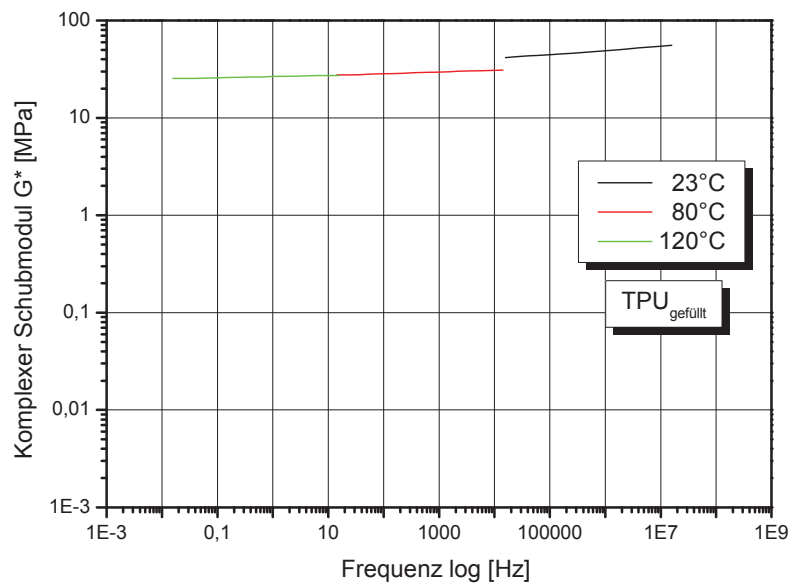


Abb. 4.38: Darstellung der aus den dynamischen Torsionsversuchen durchgeführten Temperaturverschiebung für TPUg.

Die in Abb. 4.37 und Abb. 4.38 dargestellten Temperaturverschiebungen können für weitere Modellierungen, wie z.B. der Erstellung eines viskoelastischen Materialmodells, verwendet werden und in weiterer Folge für FEM-Simulationen genutzt werden (Tschögl, 1989; Schwarzl, 1990).

4.5 Korrelation zwischen Versuch und Modell

Die aus den Versuchen erhaltenen Hysteresen sollten nun als experimentelle Eingangsdaten für das phänomenologische modifizierte Dahl-Modell dienen. Dabei sollte untersucht werden, wie gut das Modell die unterschiedlichen Bereiche des Stick-Slip beschreiben kann. Außerdem sollten die aus dem Modell erlangten Parameter in Abhängigkeit zur Belastung, Frequenz und Amplitude untersucht werden.

Aufgrund der Menge der gemessenen Hysteresen seien hier für das gefüllte und auch das ungefüllte Material nur die Variation der Belastung und Amplitude bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz dargestellt. Der Vollständigkeit halber sind die restlichen Hysteresen im Anhang unter Kapitel „7.7“ abgelegt.

In den Abb. 4.39 bis Abb. 4.41 sind die experimentellen Daten denen der Modellberechnung gegenübergestellt und stellen die Genauigkeit des Modells in Bezug auf Belastung und Amplitude dar.

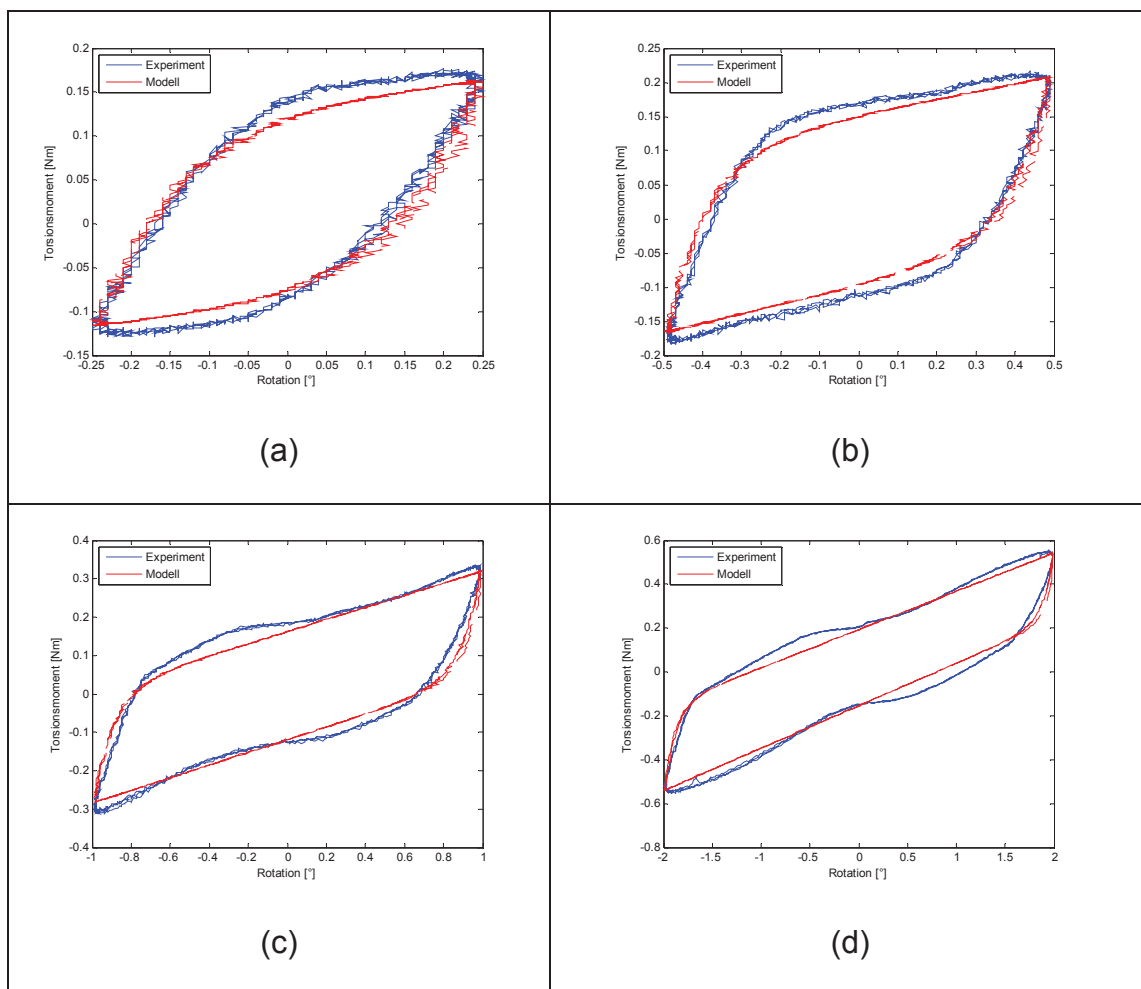


Abb. 4.39: TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Die Serie an Hysteresen in Abb. 4.39 zeigt, dass bei geringer Belastung und niedriger Frequenz das Modell sehr gut in der Lage ist, sich an die experimentellen Daten anzunähern.

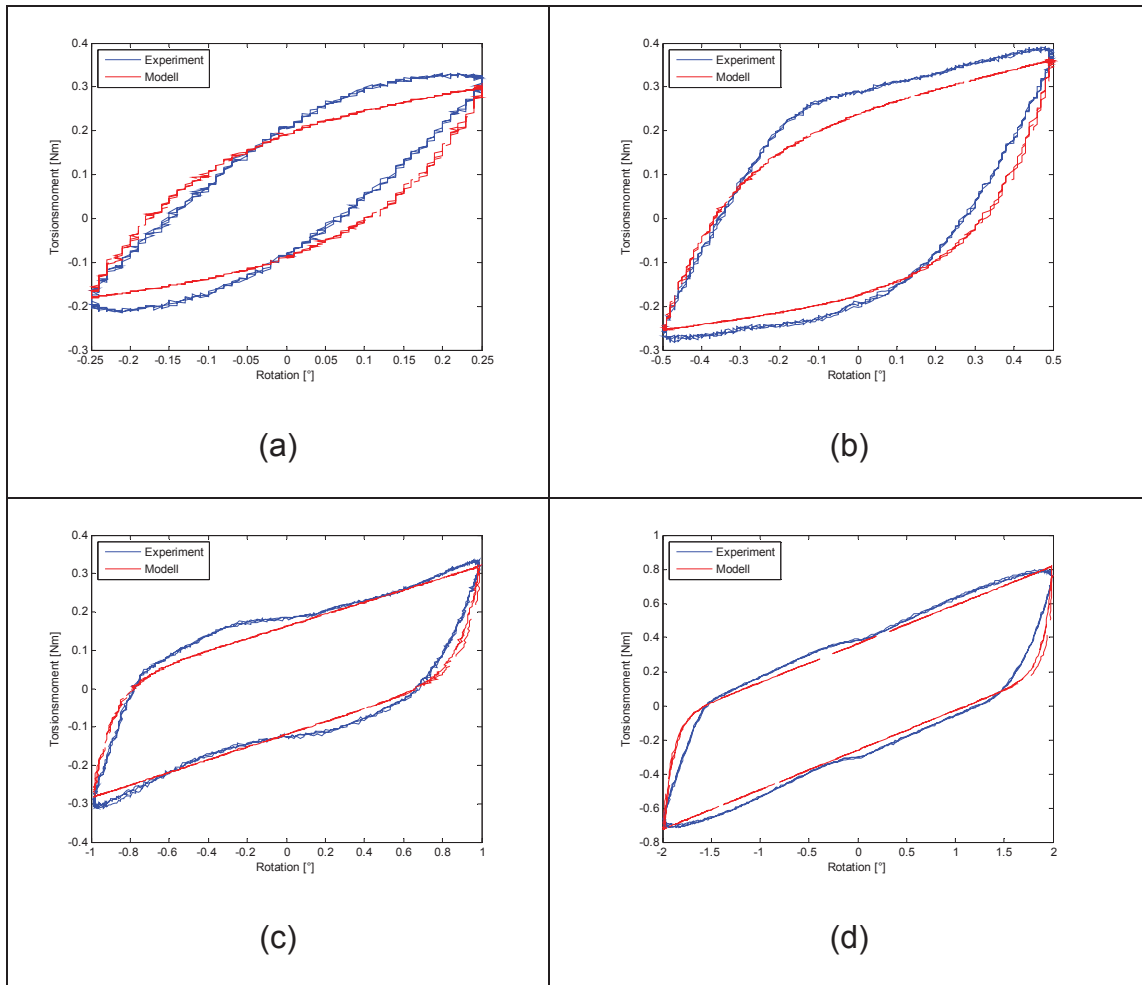


Abb. 4.40: TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Durch den Anstieg der Belastung auf 1 MPa kommt es wie aus Abb. 4.40 (a) hervor- geht zu einer Änderung der Hysteresencharakteristik. Aufgrund der hohen Normal- spannung kommt es nur mehr zu Deformationen an der Oberfläche und zu keinem Stick-Slip. Durch Erhöhung der Amplitude liefert auch hier das Modell eine sehr gute Approximation zu den Experimenten.

In Abb. 4.41 sind für das ungefüllte Material TPUu die Abhängigkeiten der Auslenkungen bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa dargestellt.

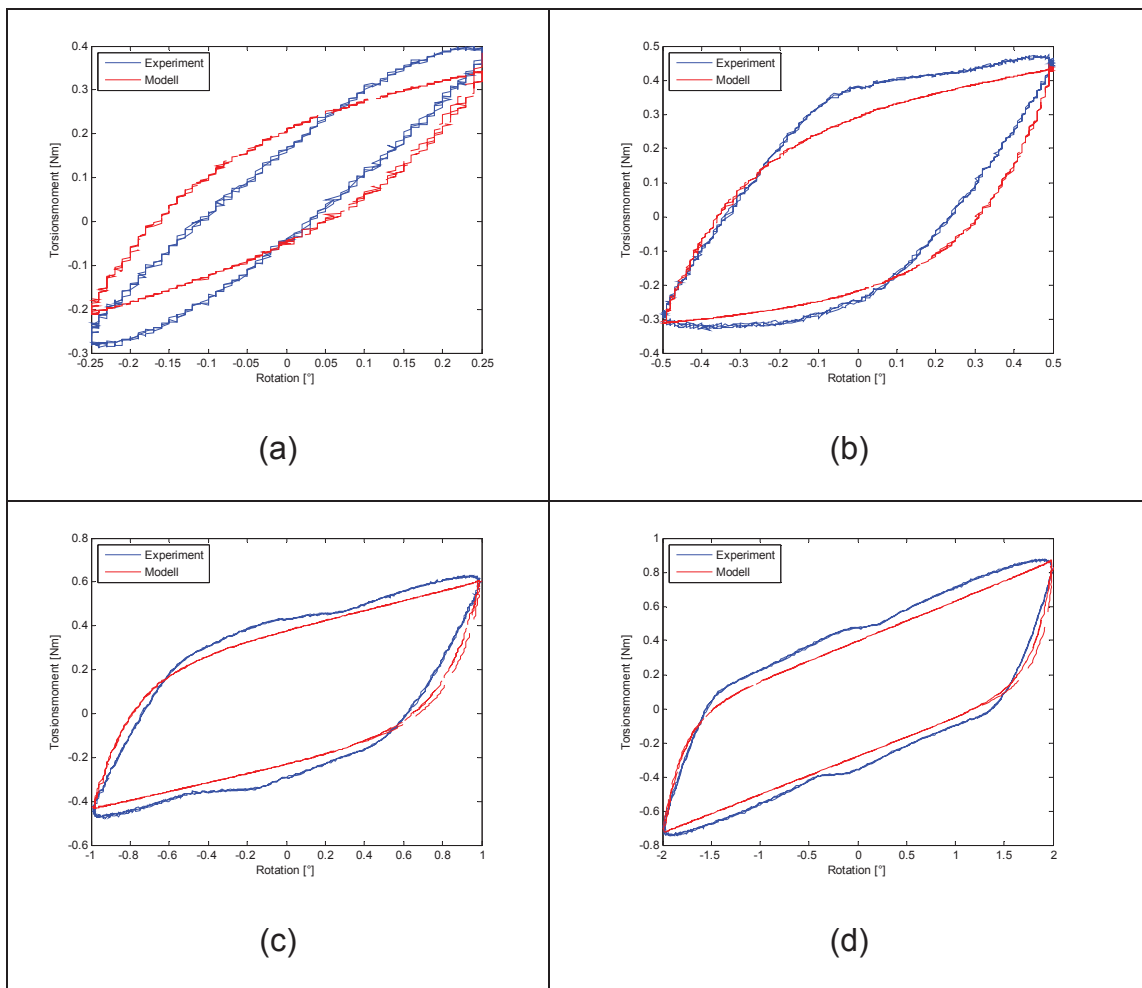


Abb. 4.41: TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Für die höchste Normalspannung von 1,5 MPa zeigt Abb. 4.41 (a), dass dieses Deformationsverhalten noch stärker ausgeprägt ist und das Modell nicht in der Lage ist, sich den experimentellen Hysterese anzu nähern und somit nicht funktioniert.

In Abb. 4.42 ist der erste wichtige aus dem modifizierten Dahl-Modell (MDM) bestimmte Parameter h_u in Abhängigkeit der Belastung, Frequenz und Amplitude untersucht.

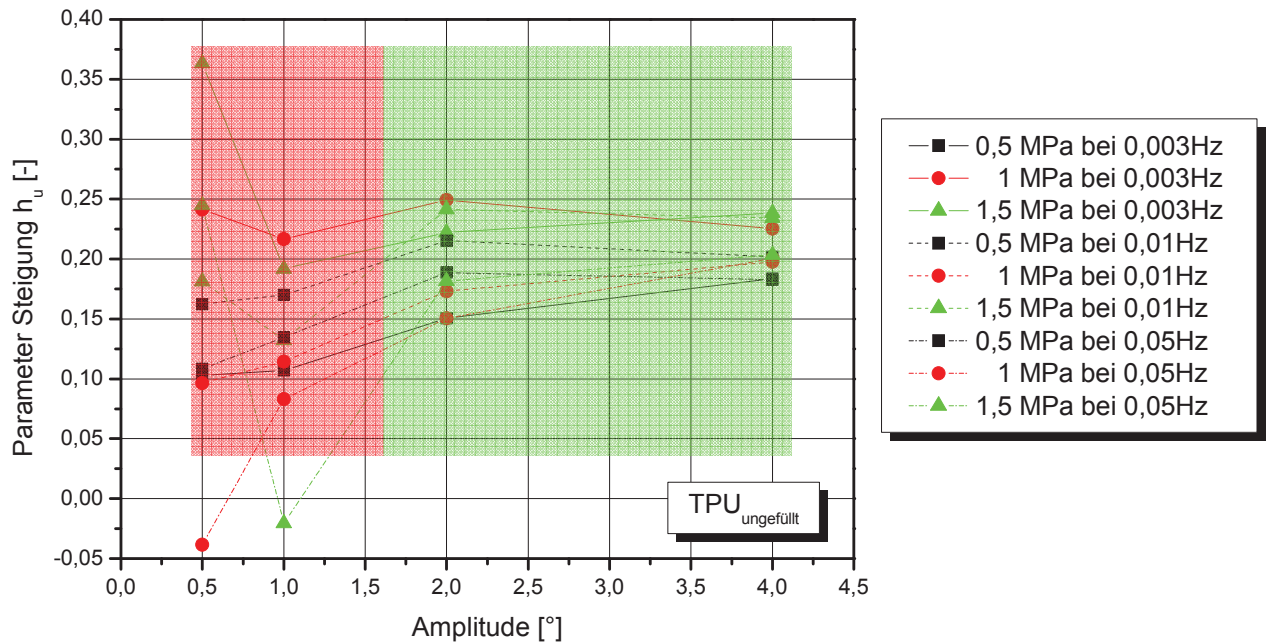


Abb. 4.42: Darstellung der ausgewerteten oberen Steigungen für das ungefüllte Material TPUu.

Für das Material TPUu sind in Abb. 4.42 die oberen Steigungen für sämtliche Amplituden, Belastungen und Frequenzen dargestellt. Die nicht vorhandene Korrelation der experimentell ermittelten Werte mit denen des Modells wird durch den roten Bereich gekennzeichnet. Der grüne Bereich veranschaulicht, dass das Modell über einen weiten Bereich der Versuche funktioniert. Interessant ist vor allem der Vergleich dieser Ergebnisse mit denen der RCSSM, da sich (siehe Abb. 4.27) zeigt, dass die Bereiche „partieller Slip“ bis „Gross Slip“ sehr gut beschrieben werden können.

Als weiterer wichtiger Parameter des modifizierten Dahl-Modells (MDM) wird Parameter β in Abb. 4.43 in Abhängigkeit der Amplitude, Belastung und Frequenz dargestellt.

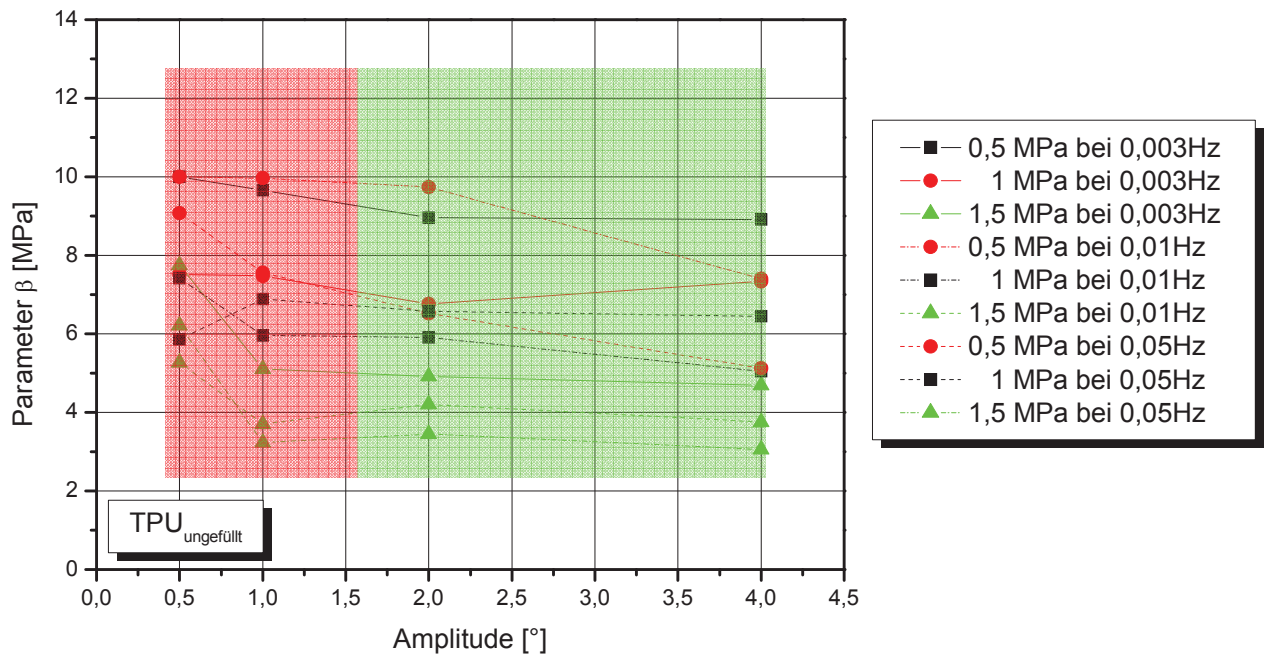
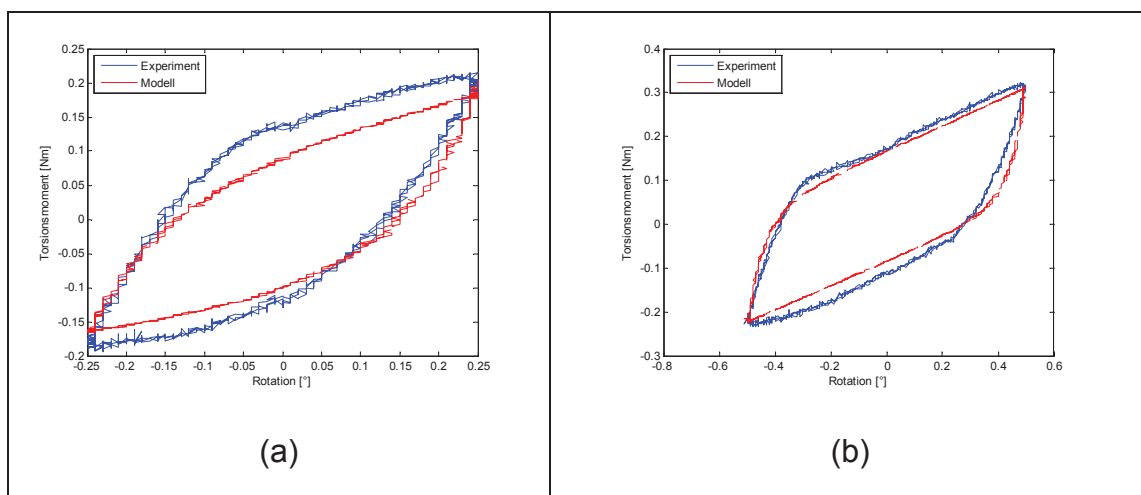


Abb. 4.43: Darstellung des ausgewerteten Parameters β für das ungefüllte Material TPUu.

Der Verlauf von β in Abb. 4.43 demonstriert ebenfalls, dass ab einer Amplitude von $1,5^\circ$ β sich bei weiterem Anstieg der Amplitude nicht mehr verändert. Somit weisen beide Parameter h_u und β ähnliche Tendenzen auf. Diese Tatsache lässt auf eine gute Korrelation des Modells für TPUu schließen.

In den Abb. 4.44 bis Abb. 4.46 sind die experimentellen Hysteresen den aus dem Modell berechneten Hysteresen für TPUg gegenübergestellt. In diesem Zusammenhang wird die Belastungs- und Amplitudenabhängigkeit untersucht.



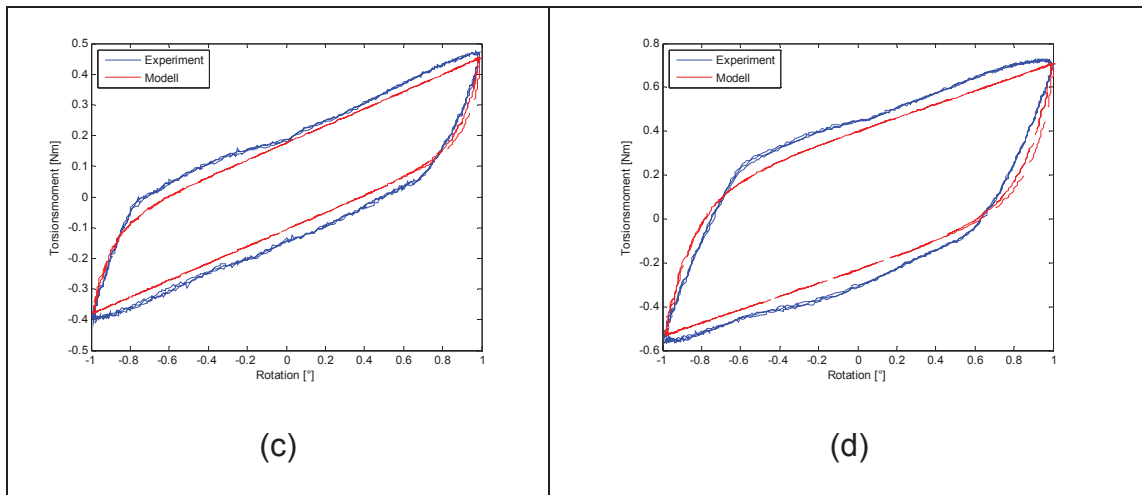


Abb. 4.44: TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Es zeigt sich in Abb. 4.44, dass auch für TPUg das Modell bei niedriger Normalspannung und kleinen bis großen Amplituden sehr gut funktioniert.

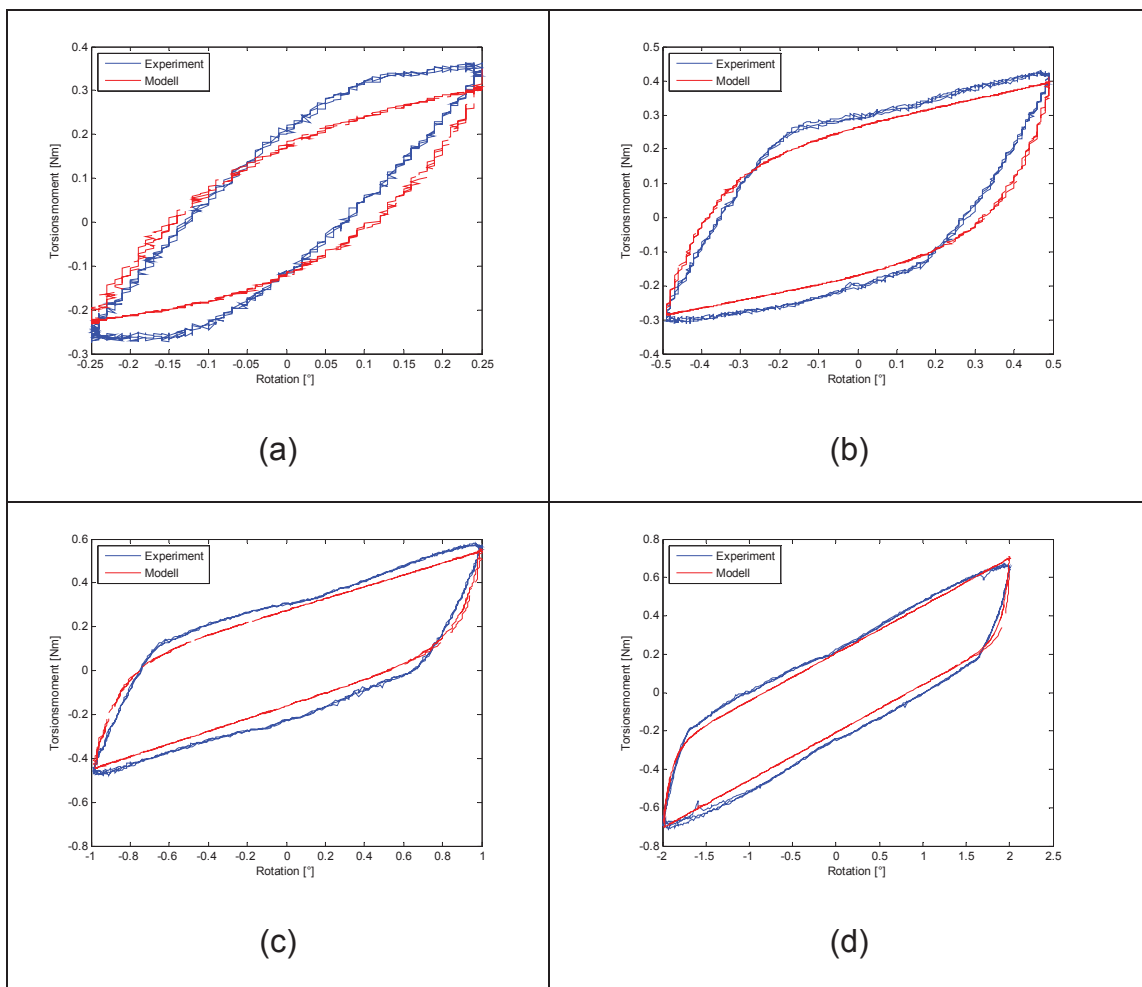


Abb. 4.45: TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Durch die Zunahme der Normalspannung, wie aus Abb. 4.45 (a) hervorgeht, kommt es zur Ausbildung einer klassischeren Hysteresencharakteristik, die stark der eines Festkörpers ähnelt. Dieser Bereich kann mit dem „linearen Bereich“ der RCSSM verglichen werden. Diese Hysteresenformen können nicht durch das MDM beschrieben werden.

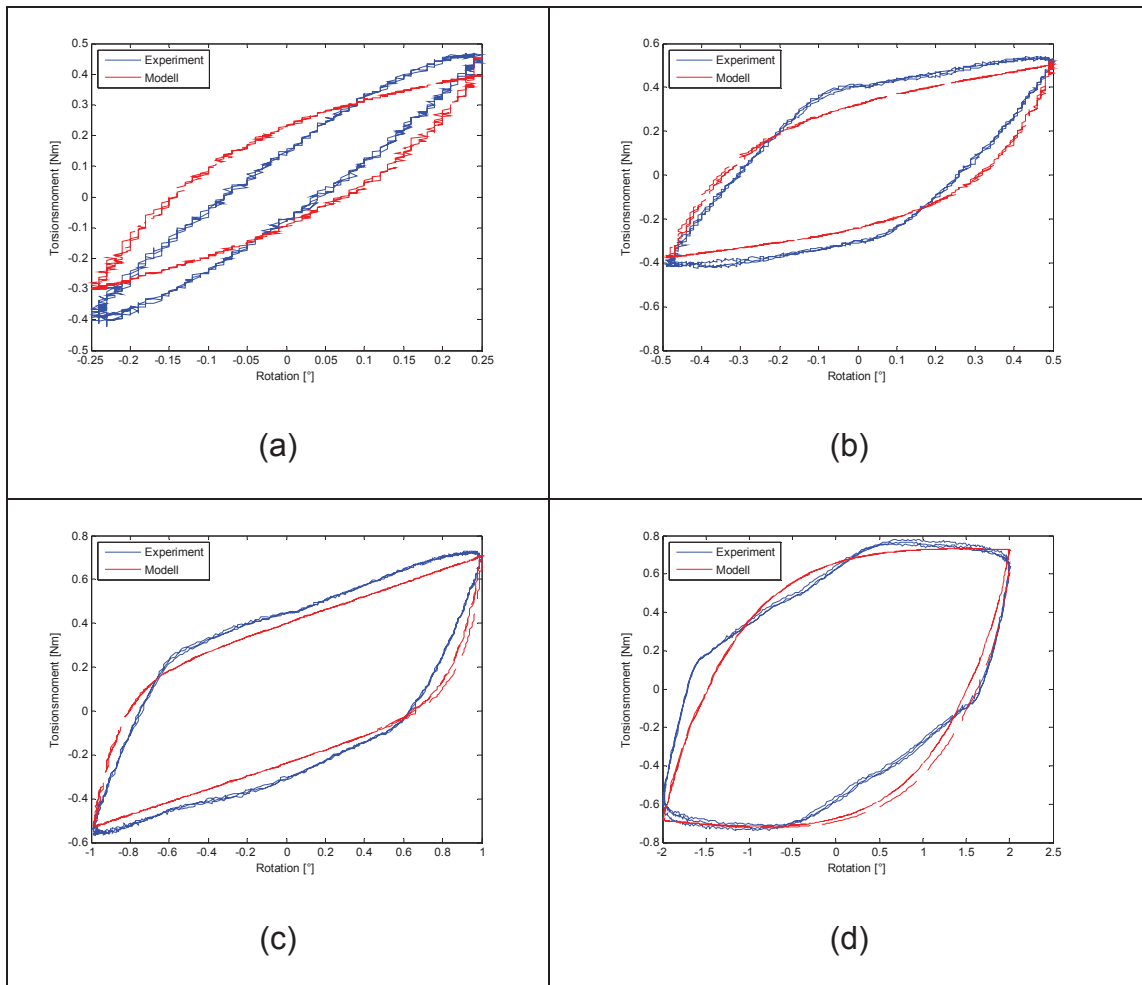


Abb. 4.46: TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz 1,5 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

Aus Abb. 4.46 kann abgeleitet werden, dass das Modell ab einer Amplitude von 1° die Hysteresen aus den Versuchen gut beschreiben kann. Jedoch zeigt Abb. 4.46 (d) die in Kapitel 4.2.1 erwähnten Instabilitäten des „Gross Slip“ Bereichs. Diese Instabilitäten können ebenfalls von dem MDM nicht beschrieben und so liefert das MDM eine gute Übereinstimmung mit den Experimenten bis zu einer Amplitude von 2° .

Analog zu dem Material TPUu wird nun für das Material TPUg der Parameter h_l in Bezug auf die Belastung, Amplitude und Frequenz in Abb. 4.47 dargestellt.

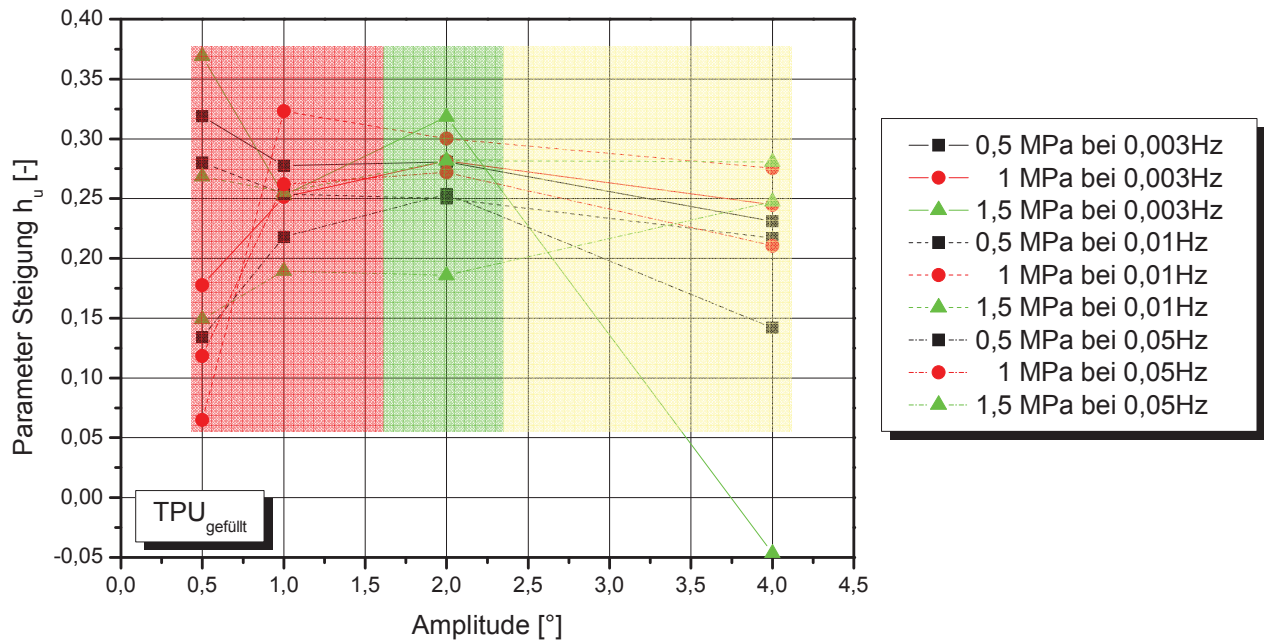


Abb. 4.47: Darstellung der ausgewerteten oberen Steigungen für das ungefüllte Material TPUg.

Im Gegensatz zu TPUu zeigt sich, wie in Abb. 4.47 dargestellt, zwar eine ähnliche Linearisierung der Steigung, jedoch treten öfter Unregelmäßigkeiten auf. Ein Grund dafür ist der Füllstoff, der einen Einfluss auf das Stick-Slip-Verhalten hat. So deckt sich die Instabilität der oberen Steigung mit dem bei TPUg auftretenden instabilen „Gross Slip“ Bereichen (vgl. Abb. 4.26).

Um dieses Verhalten genauer zu untersuchen wurde auch für das gefüllte Material TPUg der Parameter β in Bezug auf Belastung, Amplitude und Frequenz dargestellt (siehe Abb. 4.48).

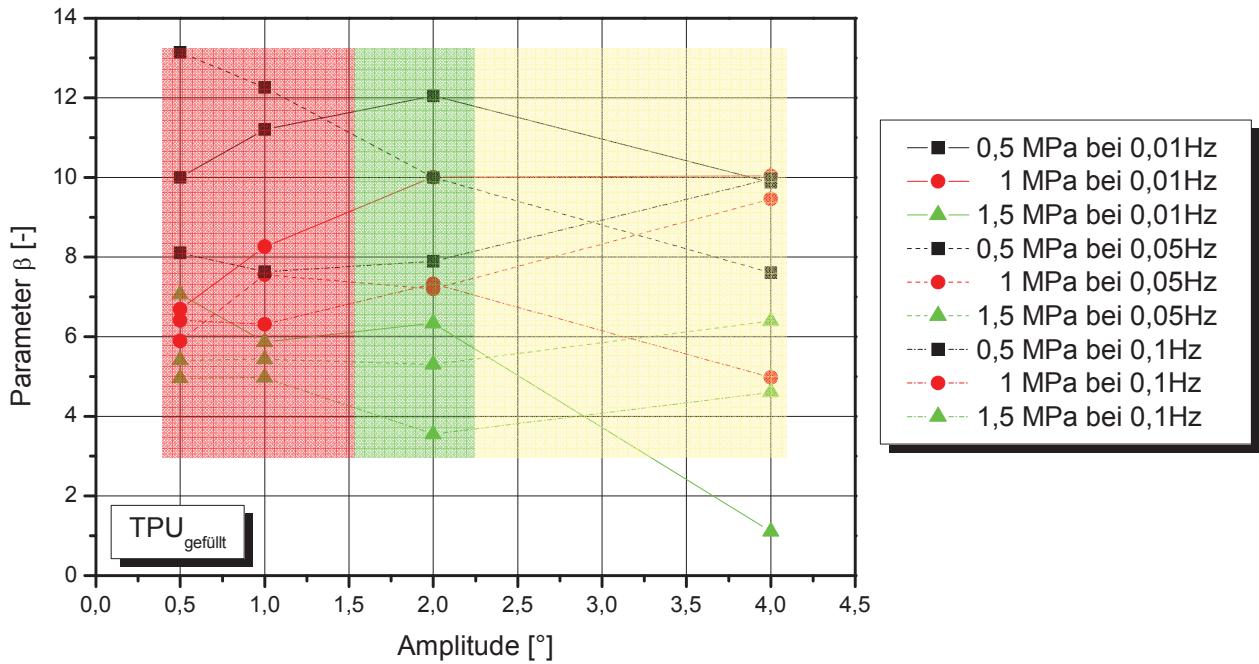


Abb. 4.48: Darstellung des ausgewerteten Parameters β für das ungefüllte Material TPUg.

Betrachtet man den Parameter β wie in der Darstellung (Abb. 4.48), zeigt sich, dass der gefüllte Werkstofftyp stärker zu Unregelmäßigkeiten neigt als das ungefüllte Material. Die Beschreibbarkeit des Hysteresenverhaltens ist für TPUg einem deutlich kleineren Bereich als bei TPUu gegeben. Jedoch lassen die Verläufe von h_u und β darauf schließen, dass der Füllstoff auch bei der Modellierung deutlich macht, dass das Stick-Slip-Verhalten bei diesem Material nicht so stark ausgeprägt ist und es dadurch zu höheren Schwankungen der Parameter kommt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es, einen Aufbau zu entwickeln der die Möglichkeit bietet, das Stick-Slip-Verhalten unter monotoner wie auch dynamischer Bewegung zu untersuchen. Das Auftreten von Stick-Slip konnte für beide Bewegungsformen eindeutig nachgewiesen werden. Des Weiteren konnte ein passendes phänomenologisches Modell zur Beschreibung der dynamischen Oberflächenversuche gefunden werden.

Eingangs wurden entsprechende Vorversuche durchgeführt um das Stick-Slip-Phänomen bei monotonen Oberflächenuntersuchungen zu lokalisieren und in Folge dessen, Einflüsse bezüglich Belastung und Geschwindigkeit zu untersuchen. Die erlangten Erkenntnisse der monotonen Oberflächenuntersuchungen sollten in die Auswahl der Parameter zur Analyse des dynamischen Stick-Slip-Verhaltens mit einfließen. Bei den dynamischen Oberflächenuntersuchungen galt es, die Amplituden-, Belastungs- und Frequenzabhängigkeit zu analysieren. Das modifizierte Dahl-Modell wurde verwendet, um die dynamischen Ergebnisse zu approximieren.

Betrachtet man sämtliche experimentellen Ergebnisse, zeigt sich dass das ungefüllte System TPUu generell ein deutlicheres Stick-Slip-Verhalten aufweist als das gefüllte System TPUg. Dies liegt an der Schmierstoffwirkung des Füllstoffes, die zu einer deutlichen Minderung der Stick-Slip-Intensität führt. Es kommt zu einer eindeutigen Absenkung der Stick-Slip-Amplituden bei den monotonen Oberflächenuntersuchungen mit dem Material TPUg, vor allem bei niedrigen Belastungen und Geschwindigkeiten (vgl. Abb. 4.14). Durch den Vergleich der Ergebnisse aus den monotonen Oberflächenuntersuchungen mit denen der Festkörperuntersuchungen (siehe Abb. 4.30 und Abb. 4.33) konnten deutliche Spannungsunterschiede aufgrund der unterschiedlichen festkörper- und oberflächenbezogenen Eigenschaften hervorgehoben werden.

Betrachtet man die ausgearbeiteten „Running Condition Stick-Slip Maps“ (siehe Abb. 4.27 und Abb. 4.28) so zeigen diese erwartete Unterschiede im Auftreten der Stick-Slip-Regionen in Bezug auf die Werkstoffeigenschaften (gefüllt und ungefüllt). Bei der Begutachtung der Hysteresen der dynamischen Oberflächenuntersuchungen konnte ein stabiler (TPUu) sowie instabiler (TPUg) „Gross Slip“ Bereich lokalisiert werden (vgl. Abb. 4.26).

Die Erkenntnisse aus der phänomenologischen Beschreibbarkeit der Hysteresen durch das modifizierte Dahl-Modell (MDM) zeigen, dass Bereiche die in der experimentellen Auswertung als instabil gelten auch durch das MDM nicht beschrieben werden können. Das MDM ist generell besser in der Lage das hysteretische Verhalten von TPUu zu beschreiben als das von TPUg (vgl. Abb. 4.42 und Abb. 4.47).

Aus den gesamten Ergebnissen geht hervor, dass Stick-Slip nur unter bestimmten Voraussetzungen (Belastung, Amplitude und Frequenz) unterschiedlich stark auftritt. Die Schwierigkeit liegt nach wie vor in der exakten physikalischen Beschreibung des Stick-Slip-Verhaltens, da das MDM nicht in der Lage ist, die experimentellen Daten ausreichend genau zu approximieren. Diese Umstände machen deutlich, dass die Simulation der Kontaktbedingungen mit Hilfe von „Finite Elemente Methode“ und „Mikromechanik-Simulation“ eine wichtige Rolle spielt, um Bauteilauslegung sowie Werkstoffauswahl zu unterstützen.

6. Literatur

Al Majid A. and Dufour R. (2002), „Formulation of a Hysteretic Restoring Force Model. Application to Vibration Isolation”, *Nonlinear Dynamics*, 27.

Bastien J., Schatzmann M., Lamarque C. (2000). „Study of some rheological models with finite number of degrees of freedom”, *European Journal Mechanics A/Solids*, 19.

Beitz F. R. und Grote K.-H. (2001). „Doppel Taschenbuch für den Maschinenbau“, Springer Verlag, 20. Aufl., Berlin D.

Bhushan B. (2000). „Modern Tribology Handbook“, CRC Pr. Inc., UK.

Bhowmick A. K. (2008), „Current Topic in Elastomers Research”, CRC Pr. Inc., UK.

Bouissou S., Petit J.P. and Barquins M. (1998). „Normal load, slip rate and roughness influence on the polymethylmethacrylate dynamics of sliding 1. Stable sliding to stick-slip transition“, *Wear*, 214.

Bouissou S., Petit J.P. and Barquins M. (1998). „Normal load, slip rate and roughness influence on the polymethylmethacrylate dynamics of sliding 2. Characterisation of the stick-slip phenomenon“, *Wear*, 215.

Chatelet E. (2008), „Stick/slip phenomena in dynamics: Choise of contact model. Numerical prediction & experiments“, *Mechanism and Machine Theory*, 43

DIN 4768: Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a R_z R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten. Beuth Verlag GmbH, D-10787 Berlin, Ausgabe November 1990.

Dufour R. and Al Majid A. (2004), „Harmonic response of a structure mounted on an isolator modelled with a hysteretic operator: experiment an prediction“, *Journal of Sound and Vibration*, 277

Erhard G. (1999). „Konstruieren mit Kunststoffen“, Hanser, München, D.

Erhard G. (2006). „Designing with plastics“, Hanser, München, D.

Fouvry S., Kapsa P., Vincent L. (1996): „Quantification of fretting damage“, *Wear*, 200.

Gódor I., (2008), „Tribologie und Betriebsfestigkeit ausgewählter Maschinenelementen“, LV. Nr. 140.140, Montanuniversität Leoben A.

Hausberger A. (2008). „Implementierung neuer Testmethoden an einem Tribometer und Charakterisierung von TPU-Materialien“, Bakkalaureatsarbeit, Institut für Werkstoffprüfung und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, A.

Jost H.P. (1966). „The Jost Report“, House of commons, Vol.733 Nr.74, UK.

Li J.C.M. and Zhang S.L. (2002). „Slip process of stick-slip motion in the scratching of a polymer, Materials Science and Engineering“, A344.

Nakano K. und Maegawa S. (2009). „Stick-Slip in sliding systems with tangential contact compliance“, Tribology International.

Ottl D. (1993); „Modellierung der mechanischen Hysterese“, Naturwissenschaften, 80.

Riesner M. (2006), „Tribologische Charakterisierung von PEEK und PA 6“, Studienarbeit, Institut für Werkstoffprüfung und Prüfung der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, A.

Scherf H. E. (2007). „Modellbildung und Simulation dynamischer Systeme“, Wissenschaftsverlag, Oldenbourg

Schwarzl F. R., 1990. „Polymermechanik: Struktur und mechanisches Verhalten von Polymeren“, Springer Verlag, Berlin, D.

Sousa J.M.C. (2007). „Analyse der Ursache des Stick-Slip-Effekts an Bahnenerzeugnissen für die Anwendung im Fahrzeuginnenraum am Beispiel von PVC“, Dissertation, Fakultät für Werkstoffwissenschaften und Werkstofftechnologie der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, D.

Summer F. (2009). „Einfluss der Materialstruktur auf die Stick-Slip- und Langzeiteigenschaften von Elastomeren“, Projektarbeit, AMB, Montanuniversität Leoben A.

Tschoegl N. W., 1989. „The phenomenological theory of linear viskoelastic behaviour, an introduction“, Springer Verlag, Berlin D.

Uetz und Wiedmeyer (1985). „Tribologie der Polymere“, Hanser, München.

Vestroni S.L. and Noori M. (2002), „Hysteresis in mechanical systems-modeling and dynamic response“, International Journal of Non-Linear Mechanics, 37

Weipert D. (1993). „Rheologie der Lebensmittel“, Behrs Verlag, Hamburg D.

Zhou Z. R., Vincent L. (1996). „Mixed fretting regime“, Wear, 181.

7. Anhang

7.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Darstellung des für die Masterarbeit entwickelten Gesamtkonzepts. ..	2
Abb. 2.1:	<i>Darstellung der Reibungsverhalten: a) konstantes Gleiten, b) regelmäßiges und c) unregelmäßiges Stick-Slip-Verhalten (Sousa 2007).</i>	4
Abb. 2.2:	Gegenüberstellung von Dämpfungs-, Speichermodul- und Reibungsverlauf von POM mit einem austen. Stahl als Reibpartner, bei drei unterschiedlichen Gleitgeschwindigkeiten. (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	5
Abb. 2.3:	Darstellung der Verschleißrate über die Temperatur für unterschiedliche Thermoplaste (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	6
Abb. 2.4:	Darstellung des Reibungskoeffizienten für vier Elastomere in Abhängigkeit der Eisflächentemperatur (Bhowmick, 2008).	7
Abb. 2.5:	Veranschaulichung des Reibungsverhaltens in Abhängigkeit der Normalspannung für verschiedene Thermoplasten (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	8
Abb. 2.6:	Darstellung der Abhängigkeit des COF von der Belastung und der Temperatur für Butadienstyrol (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	9
Abb. 2.7:	Darstellung der maximal erreichten Slip-Geschwindigkeit in Abhängigkeit der Prüfgeschwindigkeit und der Belastung für ein SAN Copolymer (Li, 2002).	10
Abb. 2.8:	Abhängigkeit der Reibungszahl von der Geschwindigkeit am Beispiel von POM (Erhard, 1999).	11
Abb. 2.9:	Darstellung des COF in Abhängigkeit der Geschwindigkeit für einige Elastomere (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	11
Abb. 2.10:	Verdeutlichung des enormen Temperaturanstiegs bei Zunahme der Geschwindigkeit (Uetz und Wiedemeyer, 1985).	12

Abb. 2.11:	Darstellung des Einflusses der Rauheit auf die Adhäsion bzw. Deformation (Erhard 1999).....	14
Abb. 2.12:	Darstellung der Vorgänge bei Stick-Slip-Verhalten (Gódor, 2008). ...	16
Abb. 2.13:	Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit (Gódor,2008).	17
Abb. 2.14:	Illustration einer Kraft-Weg Hysterese mit den beiden Funktionen h_u und h_l (Bastien 2007).....	20
Abb. 2.15:	(a) Hysterese für ein linear-viskoelastisches Material und (b) Hystereseform eines Reibungskontaktes (Ottl, 1993).	21
Abb. 2.16:	Veranschaulichung der Kontaktsituation der Reibpartner (Bouissou, 1998).	22
Abb. 2.17:	<i>Veranschaulichung des Prüfaufbaues (a) und der verwendeten Prüfkongfiguration (b) (Summer, 2009)</i>	<i>23</i>
Abb. 3.1:	Darstellung eines Zugversuches bei Raumtemperatur für alle fünf Werkstoffe.	24
Abb. 3.2:	Veranschaulichung eines DMA Versuches mit „Temperatursweep“ durchgeführt an TPUu und TPUg.	25
Abb. 3.3:	Darstellung der Prüf- und Gegenkörperhalterung.....	26
Abb. 3.4:	Darstellung des Prüfsystems.....	27
Abb. 3.5:	„Ring-on-Disk“-Prüfkörper.	28
Abb. 3.6:	Prüfkörpergeometrie für „Ring-on-Disc“-Versuche.	28
Abb. 3.7:	„Ring-on-Disc“ Gegenkörper.	29
Abb. 3.8:	Gegenkörpergeometrie für „Ring-on-Disc“ Versuche.	29
Abb. 3.9:	Oberflächentopographische Aufnahmen des (a) Prüfkörpers und (b) des Gegenkörpers.	30
Abb. 3.10:	Prüfkörperhalterung mit eingespanntem Prüfkörper.....	31
Abb. 3.11:	Darstellung des Torsionsprüfkörpers (a) und der Prüfkörpergeometrie (b).....	32
Abb. 3.12:	Darstellung des Messaufbaus mit den notwendigen Gerätschaften..	32

Abb. 3.13:	Darstellung eines Drehmoment-Auslenkungsverlaufs mit Markierung der für die Auswertung des Stick-Slip relevanten Punkte.	34
Abb. 3.14:	Darstellung eines Drehmoment-Auslenkungsverlaufs mit Markierung der für die Auswertung des Stick-Slip relevanten Punktes.	35
Abb. 4.1:	Darstellung der Variation der Auslenkungen bei einer Normalspannung von 1,5 MPa und einer Geschwindigkeit von 0,05 °/s für TPUu.	40
Abb. 4.2:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 1 °/s und 4 Belastungen für TPUu.	41
Abb. 4.3:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 1 °/s und 5 Belastungen für TPUg.	41
Abb. 4.4:	Gegenüberstellung von TPUu und TPUg bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 °/s und einer Normalspannung von 1,5 MPa.	42
Abb. 4.5:	Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Stick für das Material TPUu.	42
Abb. 4.6:	Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Slip für das Material TPUu.	43
Abb. 4.7:	Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Stick für das Material TPUg.	43
Abb. 4.8:	Veranschaulichung der Belastungs- und Geschwindigkeitsabhängigkeit der kritischen Spannungen bei Slip für das Material TPUg.	44
Abb. 4.9:	Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Stick für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUu.	45
Abb. 4.10:	Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Slip für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUu.	45

Abb. 4.11:	Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Stick für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUg.	46
Abb. 4.12:	Vergleich der Reibungskoeffizienten bei Slip für unterschiedliche Geschwindigkeiten und Normalspannungen bei TPUg.	46
Abb. 4.13:	Diagramm zur Darstellung der Stick-Slip-Intensität in Abhängigkeit zur Belastung und Geschwindigkeit für TPUu.	47
Abb. 4.14:	Diagramm zur Darstellung der Stick-Slip-Intensität in Abhängigkeit der Belastung und Geschwindigkeit für TPUg.	48
Abb. 4.15:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.	49
Abb. 4.16:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.	49
Abb. 4.17:	Vergleich der Hysteresen von TPUu mit TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz einer Normalspannung von 1,5 MPa und Amplitude von 4 °. 50	
Abb. 4.18:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,003 Hz.	51
Abb. 4.19:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,003 Hz.	51
Abb. 4.20:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz.	52
Abb. 4.21:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,01 Hz.	52
Abb. 4.22:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,05 Hz.	53

Abb. 4.23:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,05 Hz.	53
Abb. 4.24:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUu bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz.	54
Abb. 4.25:	Darstellung der kritischen Spannungen über die entsprechenden kritischen Rotationen in Abhängigkeit von Belastung und Amplitude für TPUg bei einer Prüffrequenz von 0,1 Hz.	54
Abb. 4.26:	Darstellung der arithmetischen Mittelwerte von φ_c^{Stick} über die Amplitude für TPUu und TPUg.	55
Abb. 4.27:	Darstellung der RCSSM für das ungefüllte Material TPUu.	56
Abb. 4.28:	Darstellung der RCSSM für das ungefüllte Material TPUg.	57
Abb. 4.29:	Veranschaulichung der Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen des Materials TPUu.	58
Abb. 4.30:	Vergleich der monotonen Festkörper- und Oberflächenuntersuchungen für TPUu.	59
Abb. 4.31:	Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls von der Geschwindigkeit und der Temperatur für das ungefüllte TPU Material.	59
Abb. 4.32:	Veranschaulichung der Geschwindigkeits- und Temperaturabhängigkeit bei monotonen Torsionsversuchen des Materials TPUg.	60
Abb. 4.33:	Vergleich der monotonen Festkörper- und Oberflächenuntersuchungen für TPUg.	61
Abb. 4.34:	Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls von der Geschwindigkeit und der Temperatur für das gefüllte TPU Material.	62
Abb. 4.35:	Darstellung der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit von TPUu bei dynamischen Torsionsversuchen.	63

Abb. 4.36:	Darstellung der Frequenz- und Temperaturabhängigkeit von TPUg bei dynamischen Torsionsversuchen.	63
Abb. 4.37:	Darstellung der aus den dynamischen Torsionsversuchen durchgeführten Temperaturverschiebung für TPUu.	64
Abb. 4.38:	Darstellung der aus den dynamischen Torsionsversuchen durchgeführten Temperaturverschiebung für TPUg.	64
Abb. 4.39:	TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	65
Abb. 4.40:	TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	66
Abb. 4.41:	TPUu bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	67
Abb. 4.42:	Darstellung der ausgewerteten oberen Steigungen für das ungefüllte Material TPUu.	68
Abb. 4.43:	Darstellung des ausgewerteten Parameters β für das ungefüllte Material TPUu.	69
Abb. 4.44:	TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	70
Abb. 4.45:	TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	70
Abb. 4.46:	TPUg bei einer Frequenz von 0,01 Hz 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	71
Abb. 4.47:	Darstellung der ausgewerteten oberen Steigungen für das ungefüllte Material TPUg.	72
Abb. 4.48:	Darstellung des ausgewerteten Parameters β für das ungefüllte Material TPUg.	73
Abb. 7.1:	Konstruktionszeichnung der Prüfkörperhalterung.	89
Abb. 7.2:	Konstruktionszeichnung der Gegenkörperhalterung.	90

Abb. 7.3:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 5 °/s und 4 Belastungen für TPUu.	91
Abb. 7.4:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 5 °/s und 5 Belastungen für TPUg.	91
Abb. 7.5:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 10 °/s und 4 Belastungen für TPUu.	92
Abb. 7.6:	Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von 10 °/s und 5 Belastungen für TPUg.	92
Abb. 7.7:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.....	93
Abb. 7.8:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.....	93
Abb. 7.9:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.....	94
Abb. 7.10:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.....	94
Abb. 7.11:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.....	95
Abb. 7.12:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.....	95
Abb. 7.13:	Darstellung der gemessenen Hysterese in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.....	96

Abb. 7.14:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.....	96
Abb. 7.15:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUG.....	97
Abb. 7.16:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUG.....	97
Abb. 7.17:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.....	98
Abb. 7.18:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.....	98
Abb. 7.19:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.....	99
Abb. 7.20:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUG.....	99
Abb. 7.21:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUG.....	100
Abb. 7.22:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUG.....	100
Abb. 7.23:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.....	101

Abb. 7.24:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.....	101
Abb. 7.25:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.....	102
Abb. 7.26:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.....	102
Abb. 7.27:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.....	103
Abb. 7.28:	Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.....	103
Abb. 7.29:	Darstellung des In Matlab [®] erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 1).	104
Abb. 7.30:	Darstellung des In Matlab [®] erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 2).	105
Abb. 7.31:	Darstellung des In Matlab [®] erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 3).	106
Abb. 7.32:	TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	106
Abb. 7.33:	TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	107
Abb. 7.34:	TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	108
Abb. 7.35:	TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	108

Abb. 7.36:	TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	109
Abb. 7.37:	TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	110
Abb. 7.38:	TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	110
Abb. 7.39:	TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	111
Abb. 7.40:	TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	112
Abb. 7.41:	TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	112
Abb. 7.42:	TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).	113
Abb. 7.43:	TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).....	114

7.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Auflistung der Rauheitswerte angelehnt an die DIN 4768 bestimmt wurden.....	30
Tabelle 2:	Übersicht über den Prüfplan der monotonen Stick-Slip-Versuche.....	37
Tabelle 3:	Übersicht der durchgeführten dynamischen Stick-Slip Versuche.	38

7.4 Monotone Stick-Slip Diagramme

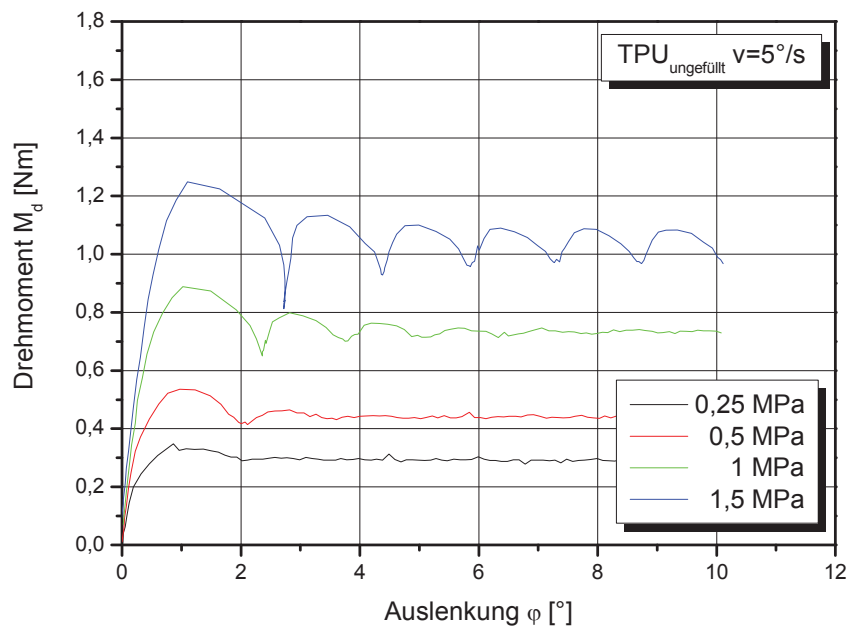


Abb. 7.3: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $5^\circ/s$ und 4 Belastungen für TPUu.

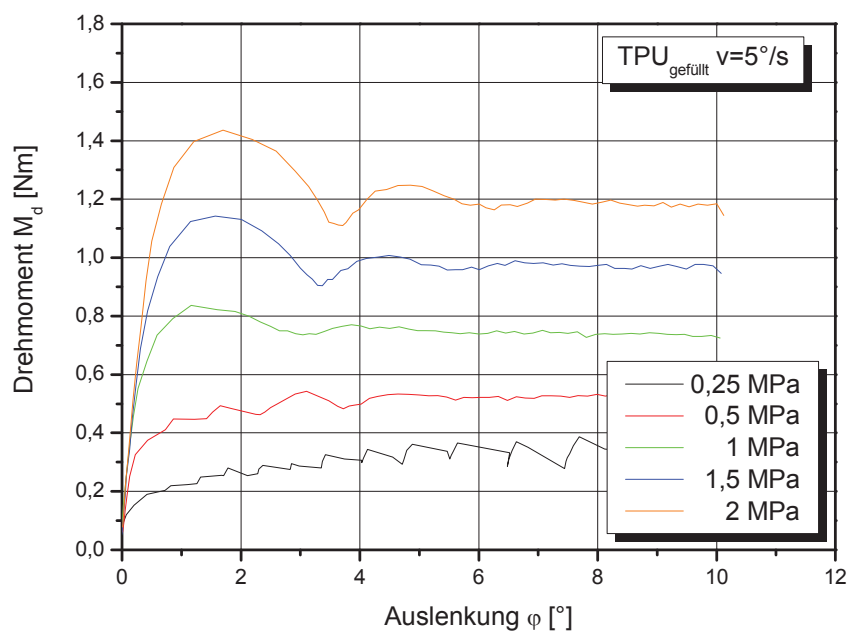


Abb. 7.4: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $5^\circ/s$ und 5 Belastungen für TPUg.

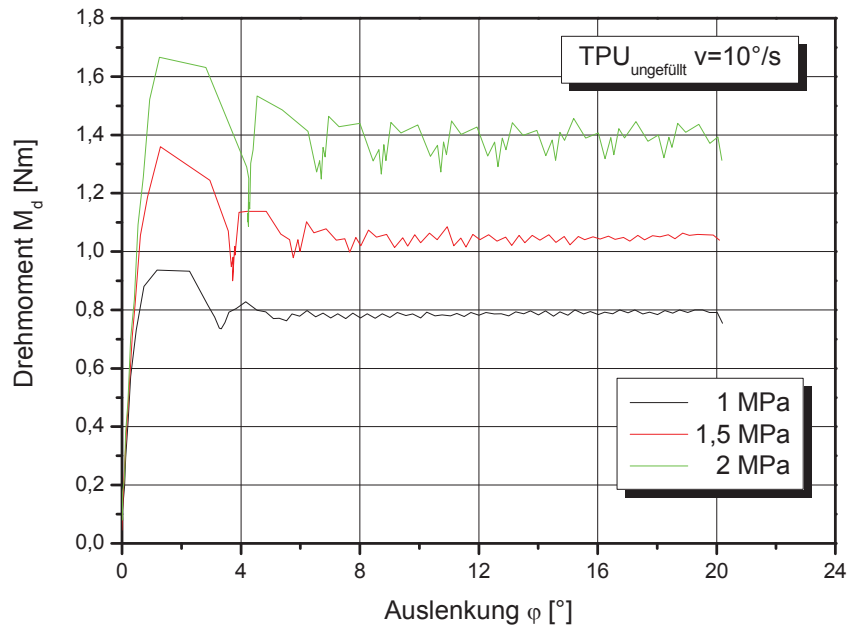


Abb. 7.5: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $10^\circ/s$ und 4 Belastungen für TPUu.

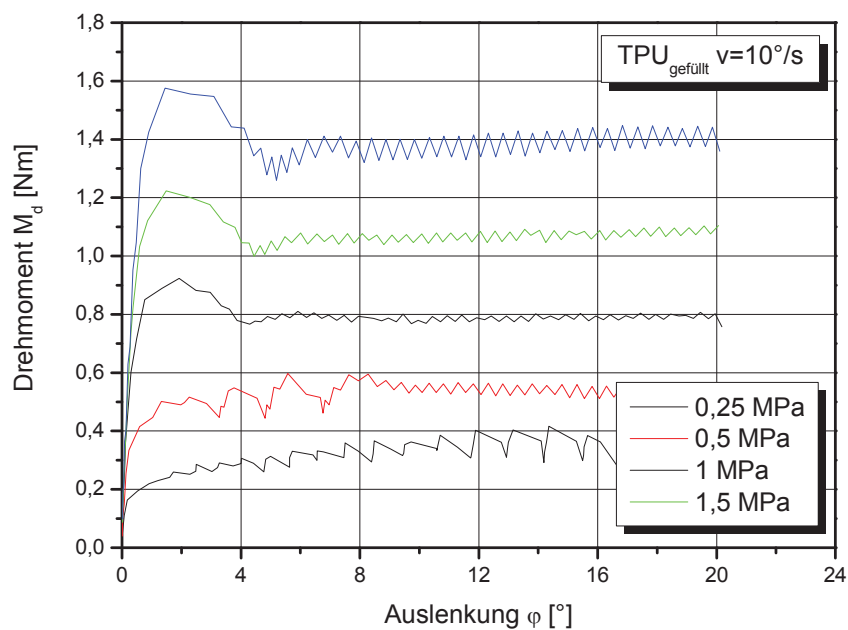


Abb. 7.6: Darstellung des Drehmomenten-Verlaufes über die Auslenkung bei einer Geschwindigkeit von $10^\circ/s$ und 5 Belastungen für TPUg.

7.5 Dynamische Stick-Slip Diagramme

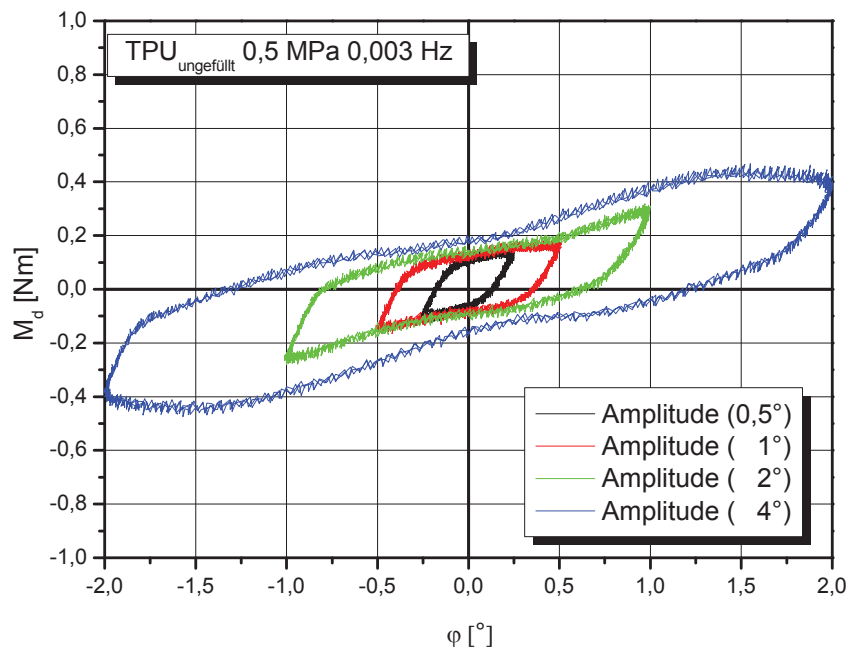


Abb. 7.7: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.

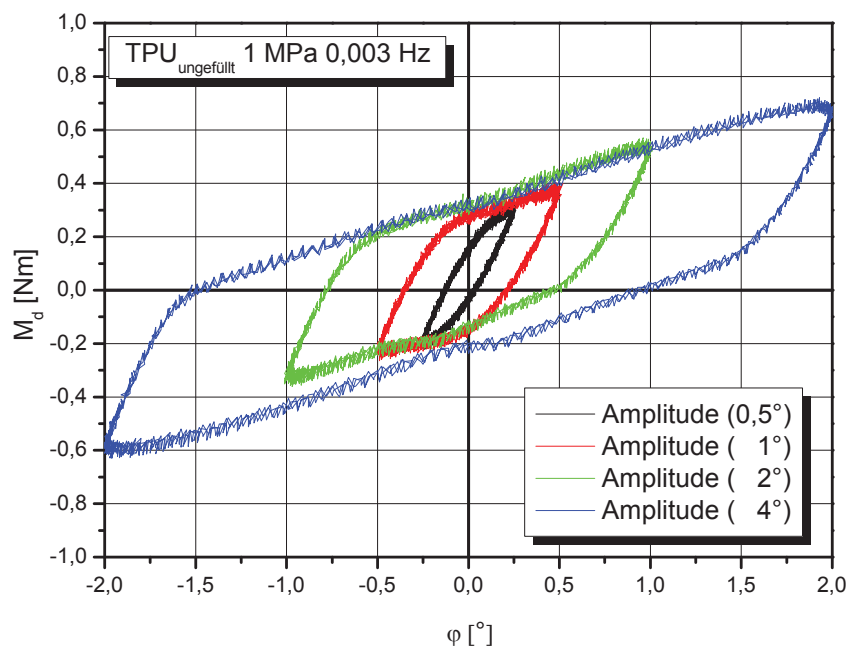


Abb. 7.8: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.

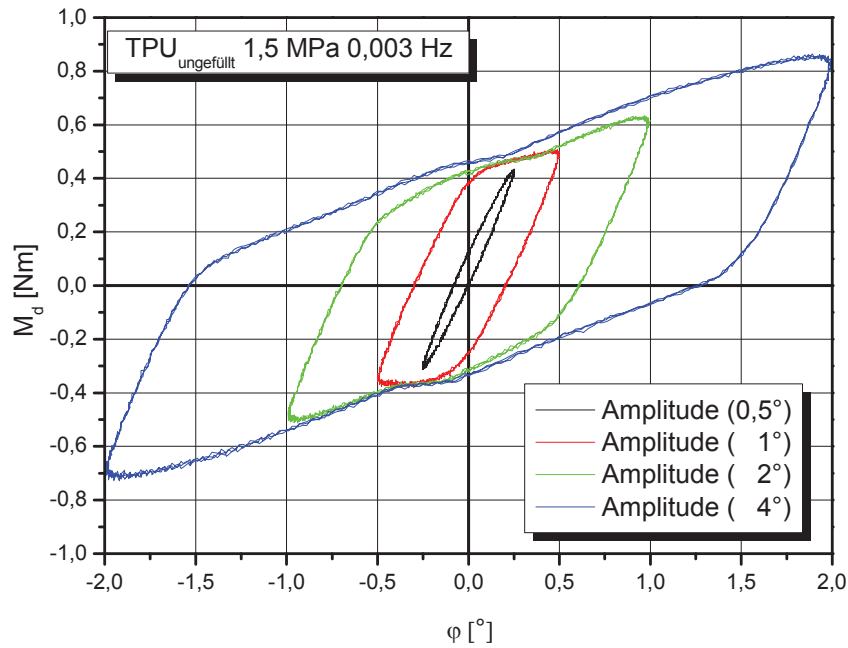


Abb. 7.9: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.

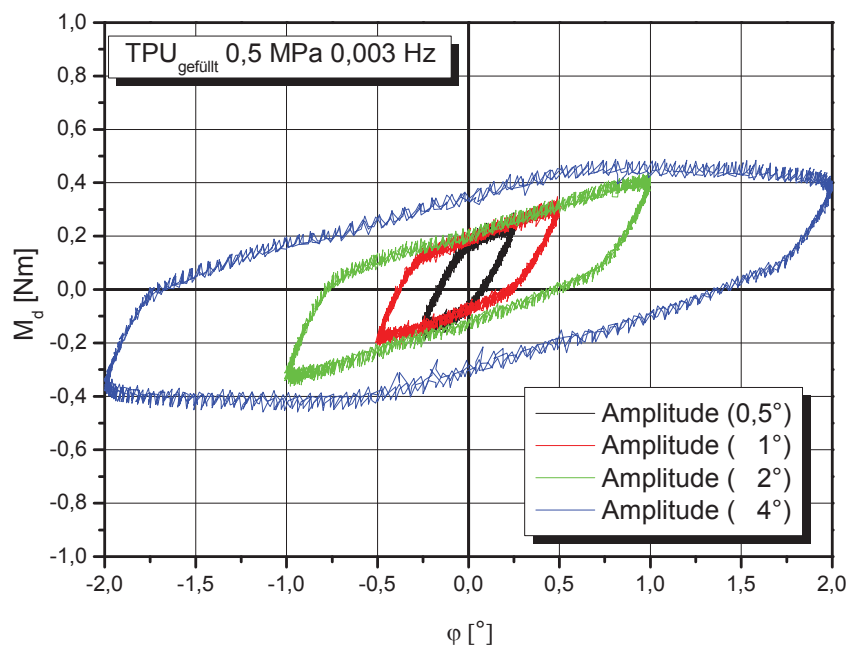


Abb. 7.10: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.

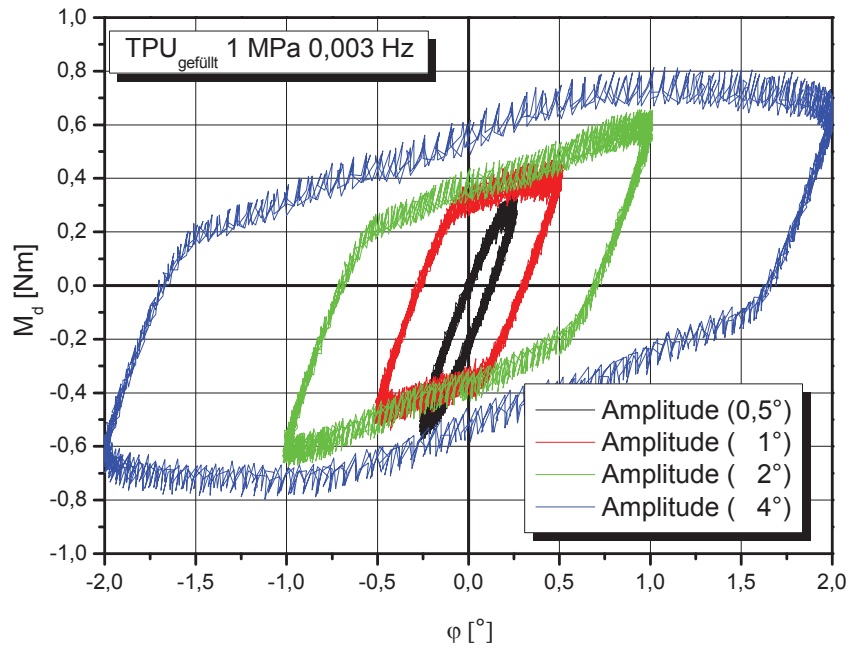


Abb. 7.11: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.

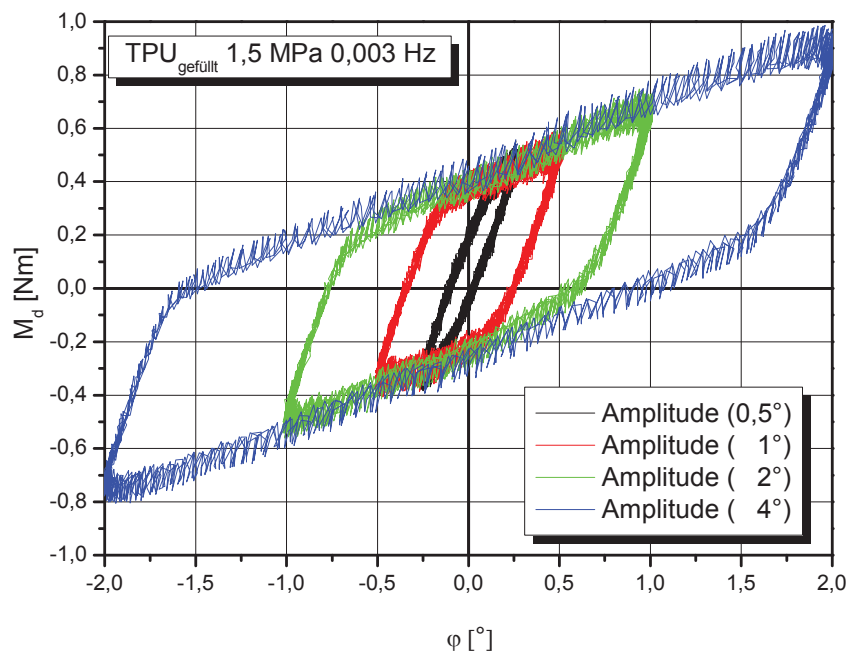


Abb. 7.12: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,003 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.

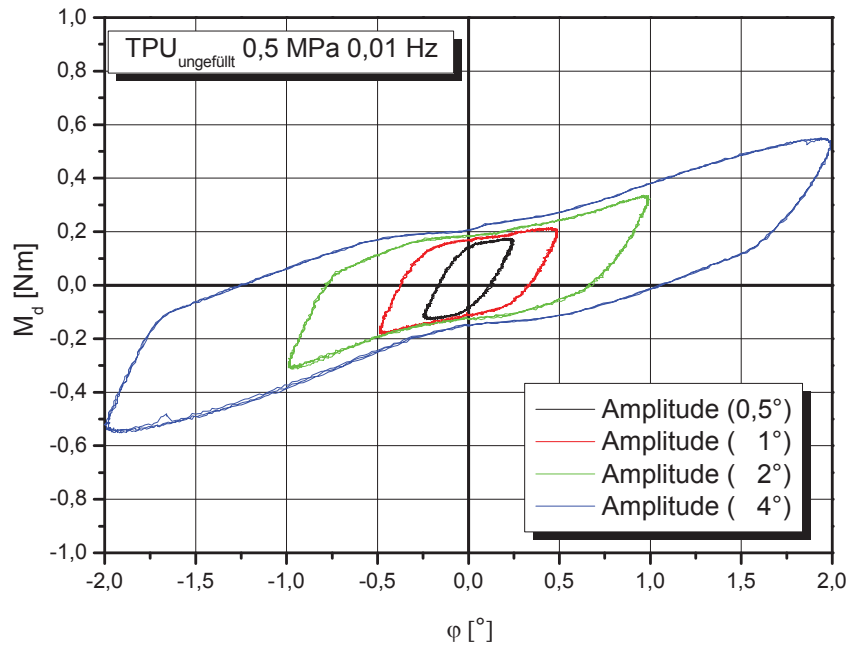


Abb. 7.13: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.

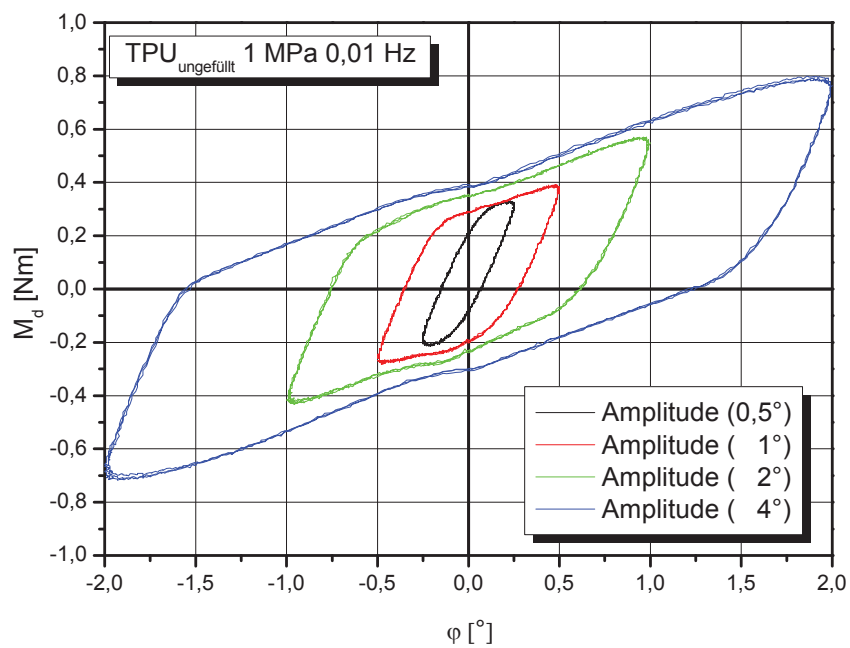


Abb. 7.14: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.

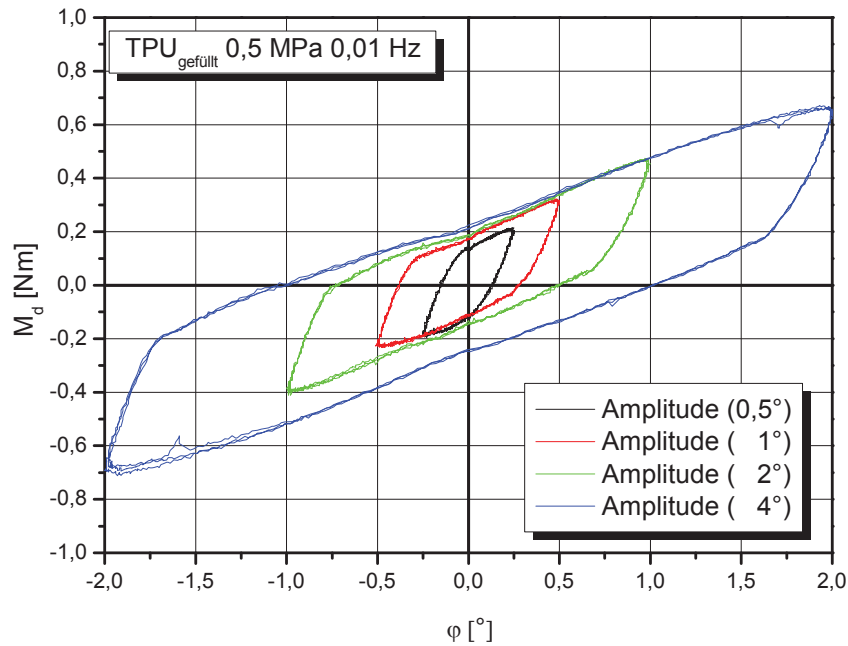


Abb. 7.15: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.

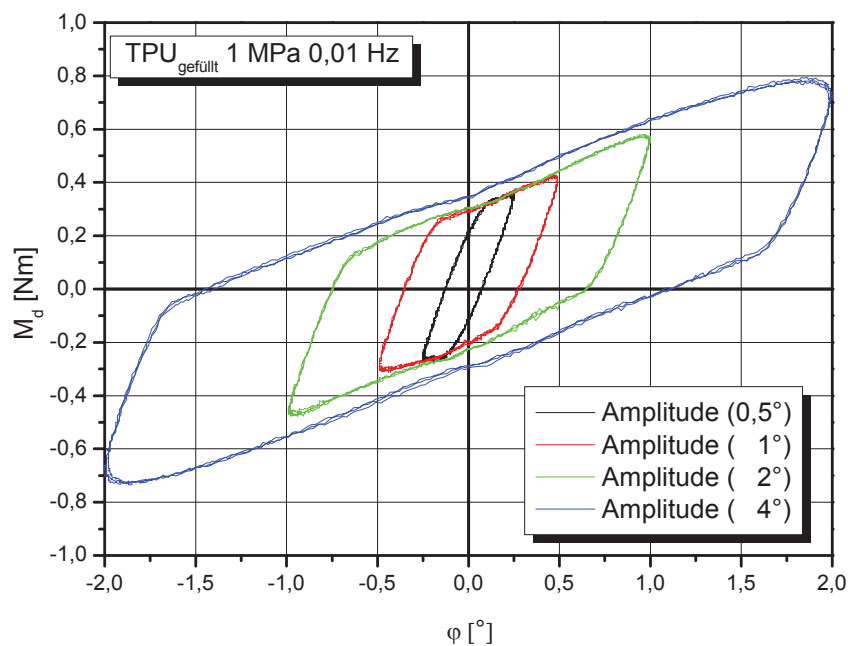


Abb. 7.16: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,01 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.

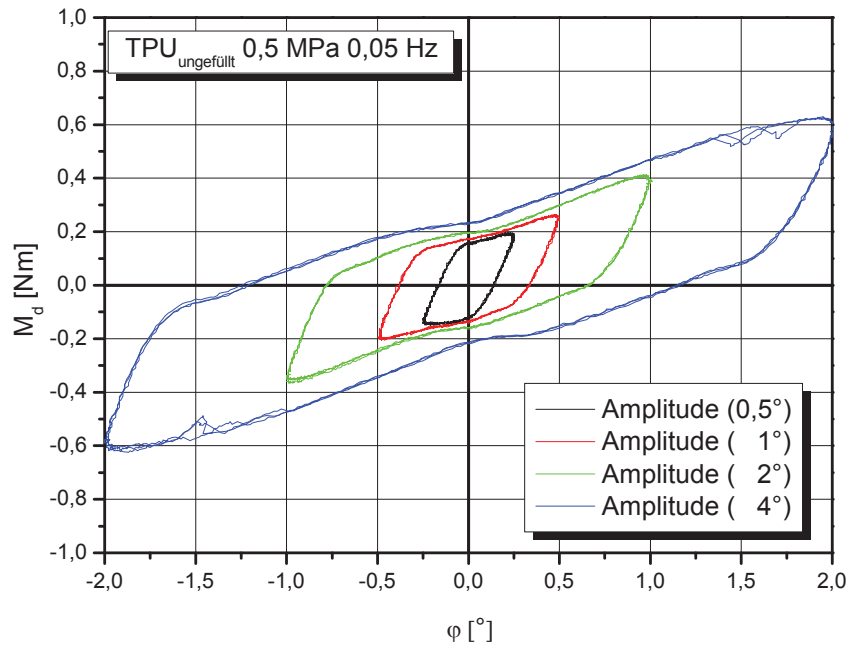


Abb. 7.17: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.

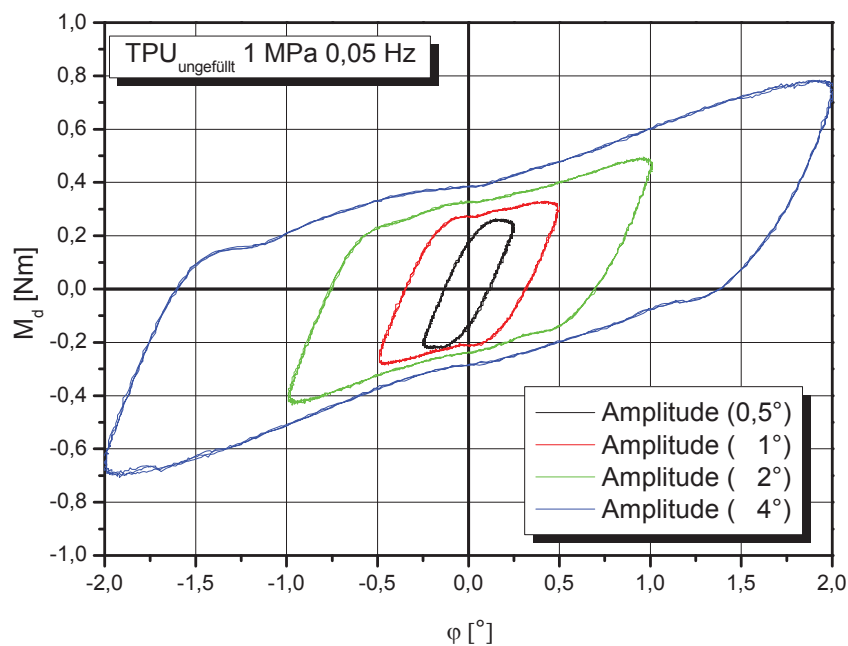


Abb. 7.18: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.

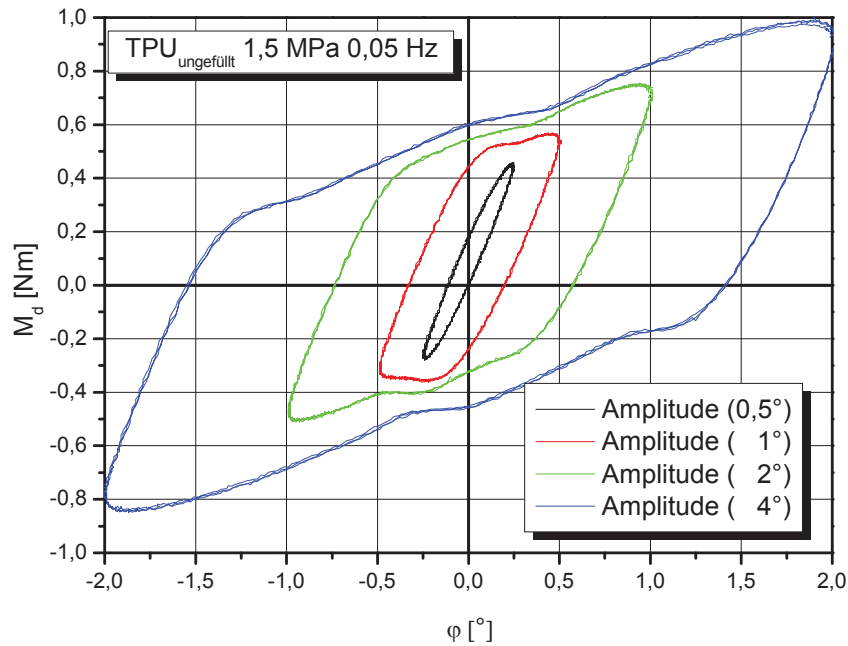


Abb. 7.19: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.

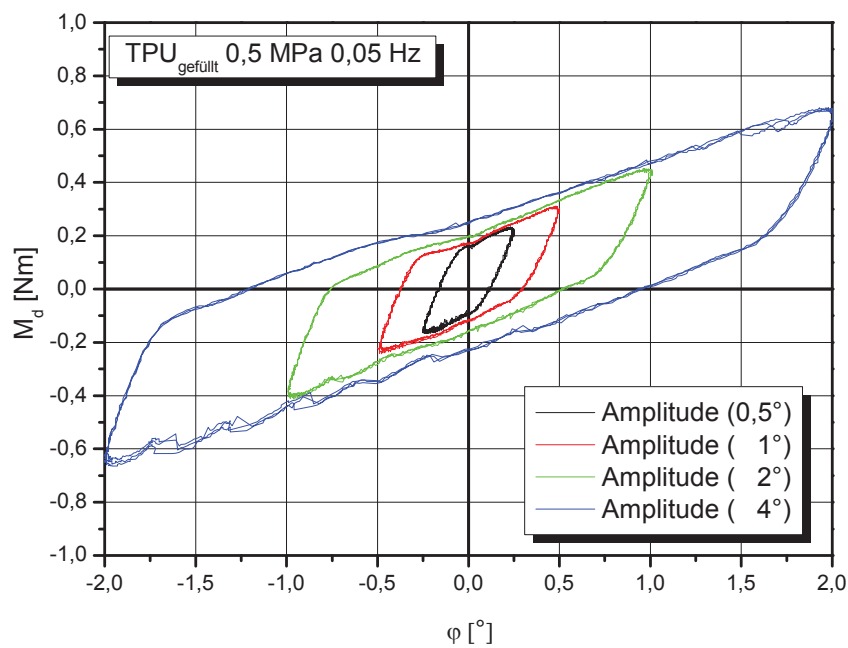


Abb. 7.20: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.

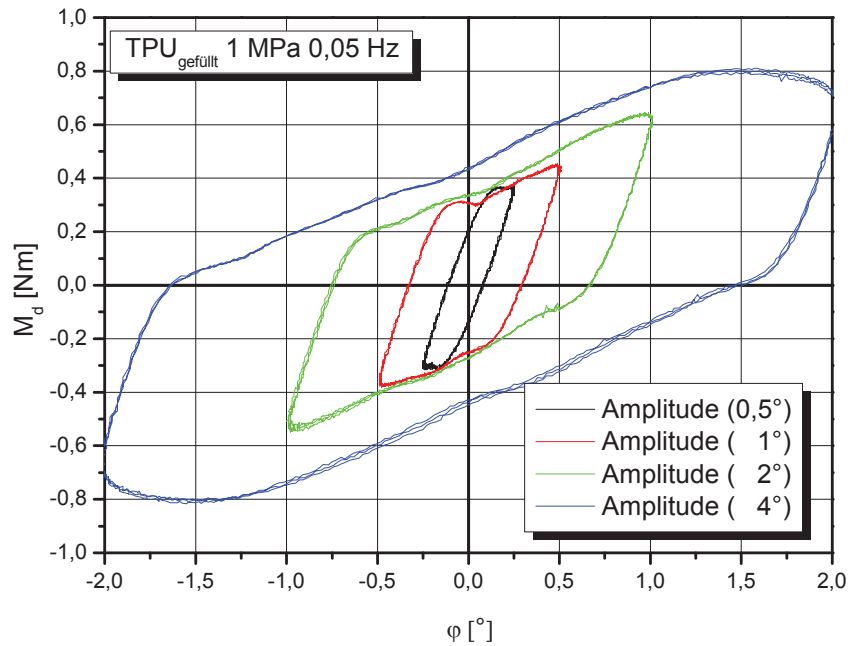


Abb. 7.21: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.

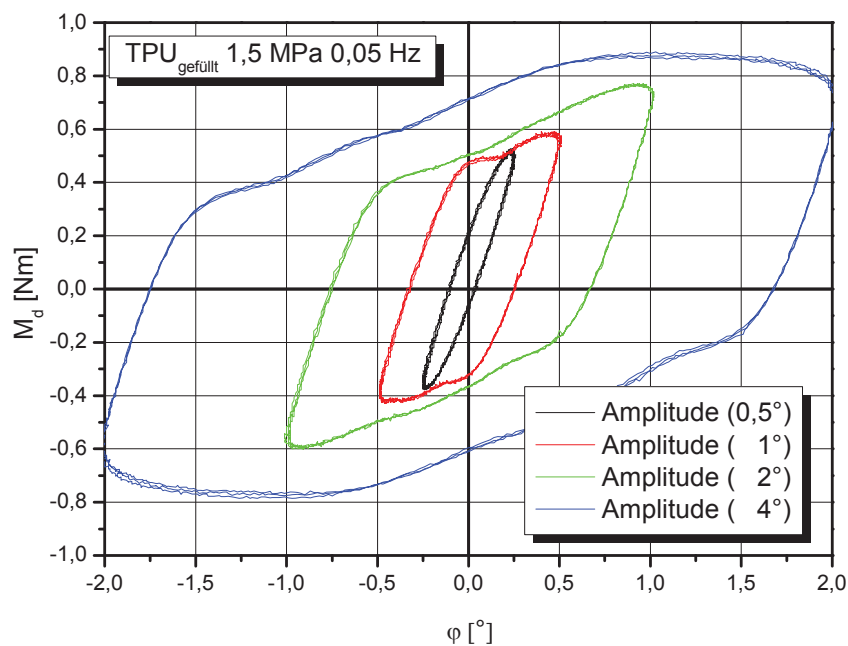


Abb. 7.22: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,05 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.

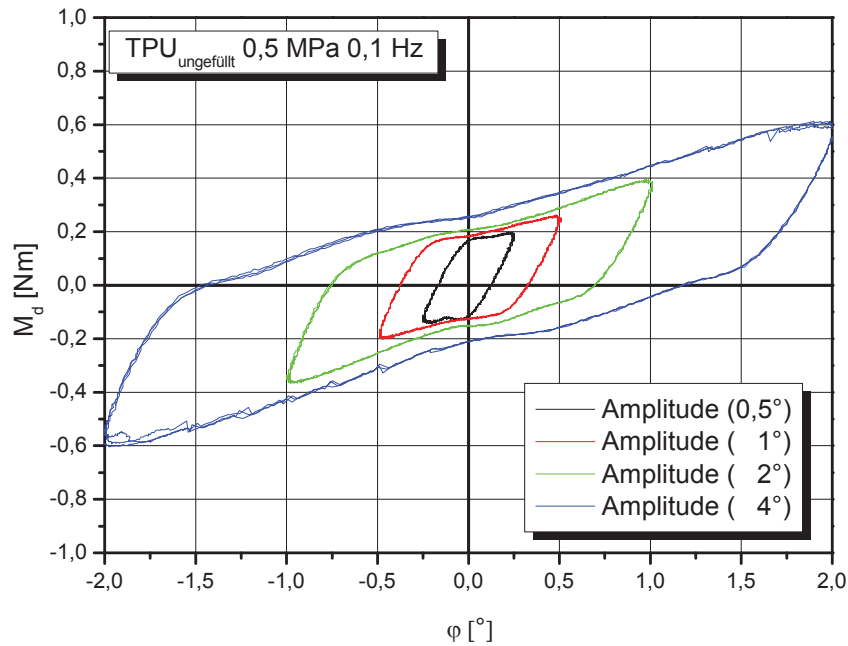


Abb. 7.23: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUu.

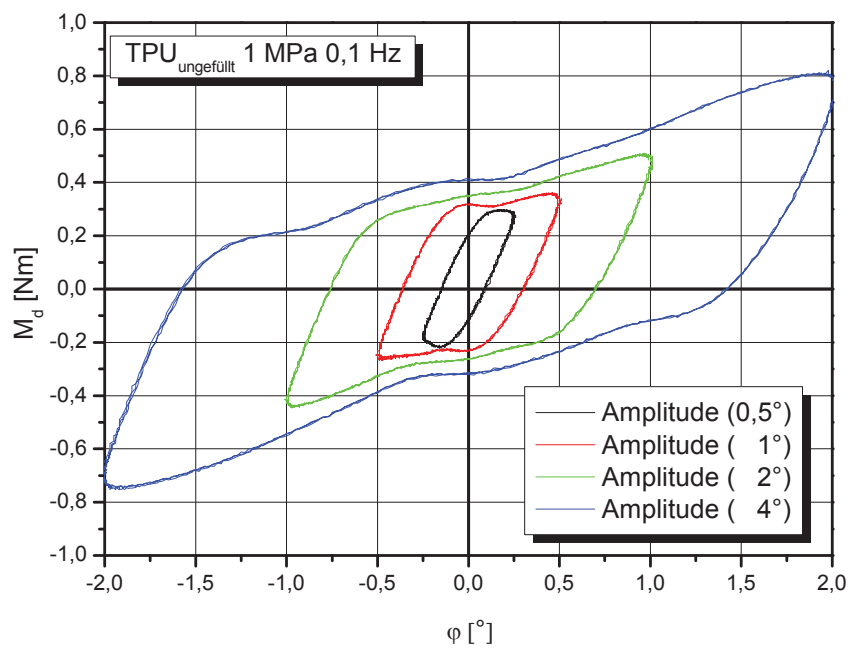


Abb. 7.24: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUu.

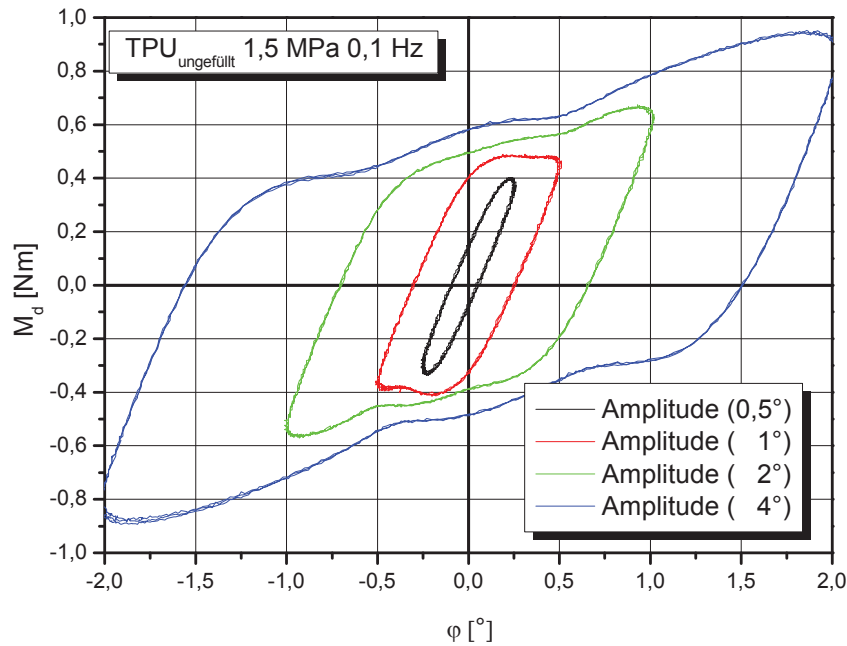


Abb. 7.25: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUu.

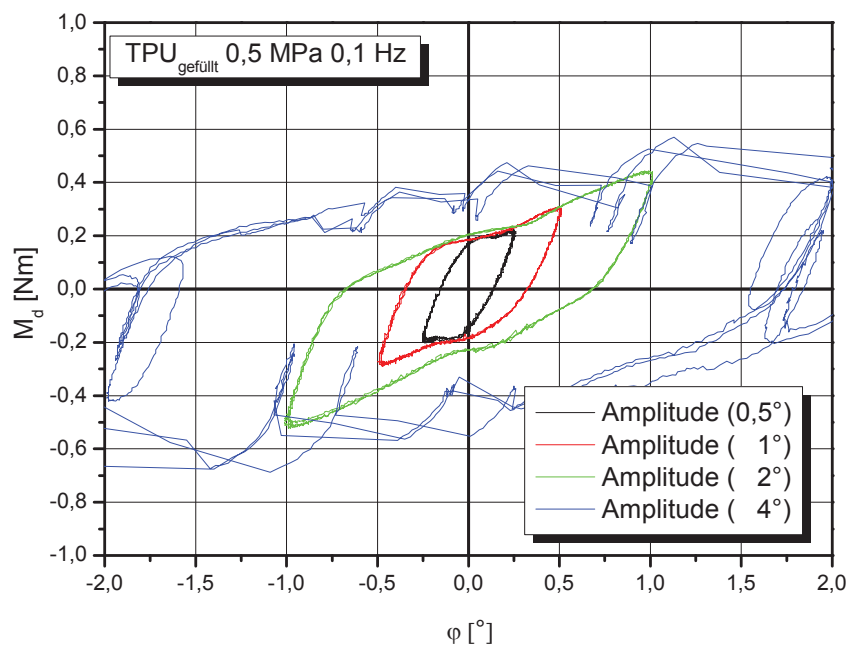


Abb. 7.26: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 0,5 MPa für TPUg.

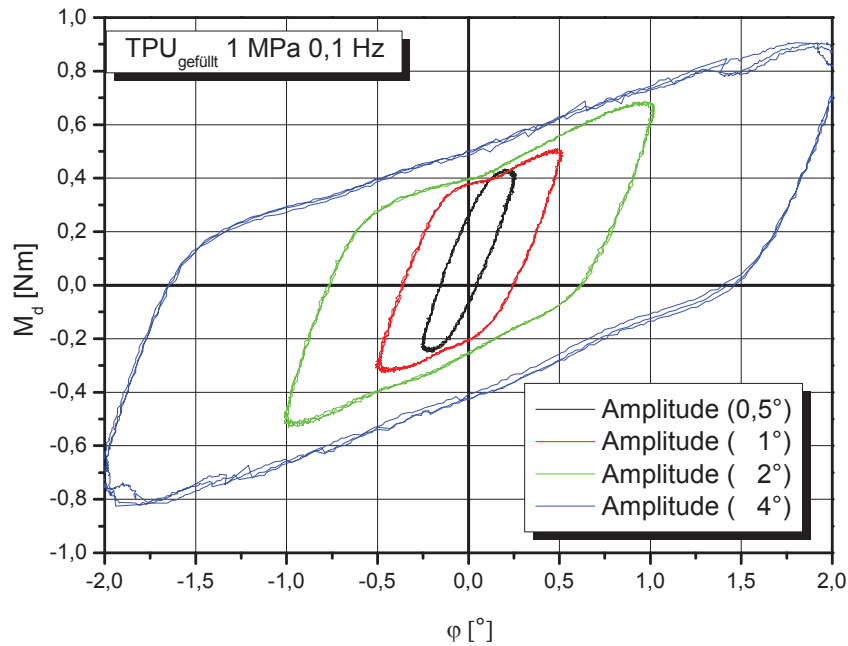


Abb. 7.27: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1 MPa für TPUg.

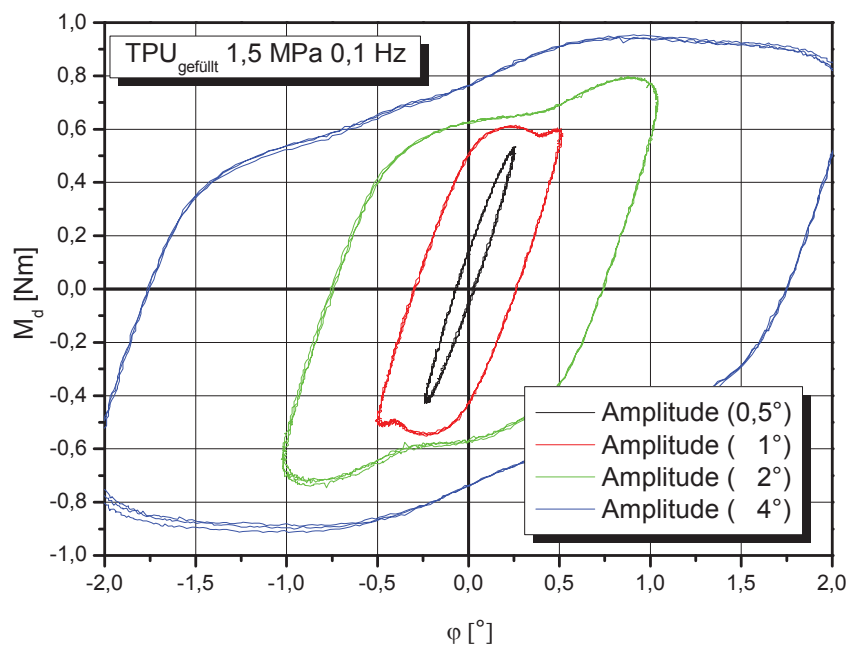


Abb. 7.28: Darstellung der gemessenen Hysteresen in Abhängigkeit der Amplitude bei einer Frequenz von 0,1 Hz und einer Normalspannung von 1,5 MPa für TPUg.

7.6 Matlab

```

clear all
close all

% Parameter:
lambda = 0.9; % Glättung von u für die Berechnung von du/dt
lambdaR = 0.9;

warning off
importdata('g4A_15MPA_5F.xls');
warning on
t = data(:,1);
u = data(:,5);
R = data(:,4);

t = unwrap(t);

figure(1)
plot(u,R)

x = zeros(1,4);
y = x;
button = 0;
while button~=2
    [xi, yi, button] = ginput(1);
    switch button
        case 1
            x(1) = xi;
            y(1) = yi;
        case 3
            x(2) = xi;
            y(2) = yi;
    end
    plot(u,R,'b',x(1:2),y(1:2),'ko-')
end

button = 0;
while button~=2
    [xi, yi, button] = ginput(1);
    switch button
        case 1
            x(3) = xi;
            y(3) = yi;
        case 3
            x(4) = xi;
            y(4) = yi;
    end
    plot(u,R,'b',x(1:2),y(1:2),'ko-',x(3:4),y(3:4),'ko-')
end

hu = polyfit(x(1:2),y(1:2),1);
hl = polyfit(x(3:4),y(3:4),1);

% du/dt berechnen
dudt = fnval(csaps(t,fnval(fnder(csaps(t,u,lambda)),t),10^-0),t);

figure(2)

```

Abb. 7.29: Darstellung des In Matlab® erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 1).

```

subplot(3,1,1)
plot(t,R)
hold on
plot(t,fnval(csaps(t,R,lambdaR),t),'r--','LineWidth',1.25)
legend('R','spline fit')
subplot(3,1,2)
plot(t,u)
hold on
plot(t,fnval(csaps(t,u,lambda),t),'r--','LineWidth',1.25)
subplot(3,1,3)
plot(t,dudt)
legend('du/dt')
pause(0.1)

fprintf('#####\n');
fprintf('Steigung oben: %f\n',hu(1))
fprintf('Steigung unten: %f\n',hl(1))

% h berechnen
hu = polyval(hu,u);
hl = polyval(hl,u);

h = 0.5*((hu+hl).*sign(dudt)+hu-hl);

% Lösungsintervall und Anfangswerte
Tspan = [min(t) max(t)];
IC = R(1);

options = optimset('lsqnonlin');
options = optimset(options,'Display','off','FunValCheck','on','OutputFcn',@outfun,...
    'Algorithm','levenberg-marquardt','DiffMaxChange',1,'DiffMinChange',0.01);

beta = lsqnonlin(@(x) betassr(x,R,t,Tspan,IC,h,dudt),10,[],[],options);

fprintf('beta: %f\n',beta)
fprintf('#####\n');

% Gefunde Lösung auswerten

f = beta*dudt.*sign(dudt);
g = beta*h.*dudt;

[T Y] = ode45(@(x,y) myode(x,y,t,f,g),Tspan,IC);

Y = interp1(T,Y,t);

figure(3)
plot(u,R)
hold on
plot(u,Y,'r--')
%plot(u,hu,'k--')
%plot(u,hl,'k--')
legend('Experiment','Modell',2)
xlabel('Rotation [°]')
ylabel('Torsionsmoment [Nm]')

```

Abb. 7.30: Darstellung des In Matlab[®] erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 2).


```

function residuals = betassr(beta,R,t,Tspan,IC,h,dudt)
% Funktion zur SSR-Berechnung

% f, g berechnen
f = beta*dudt.*sign(dudt);
g = beta*h.*dudt;

[T Y] = ode113(@(x,y) myode(x,y,t,f,g),Tspan,IC);

Y = interp1(T,Y,t);

residuals = sum((R(:)-Y(:)).^2);

```

Abb. 7.31: Darstellung des In Matlab[®] erstellten Programmcode zur Lösung des modifizierten Dahl Modells (Teil 3).

7.7 Modellauswertung

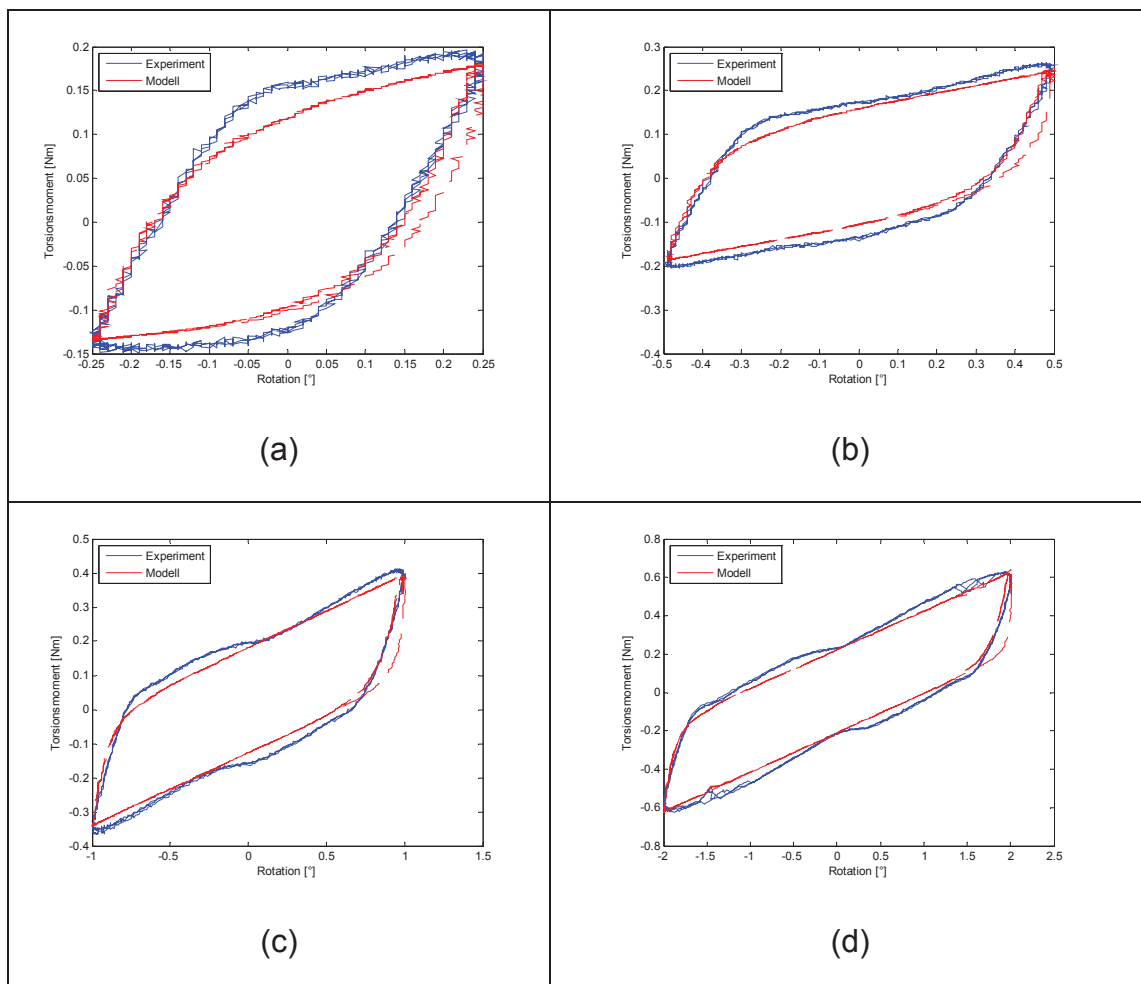


Abb. 7.32: TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

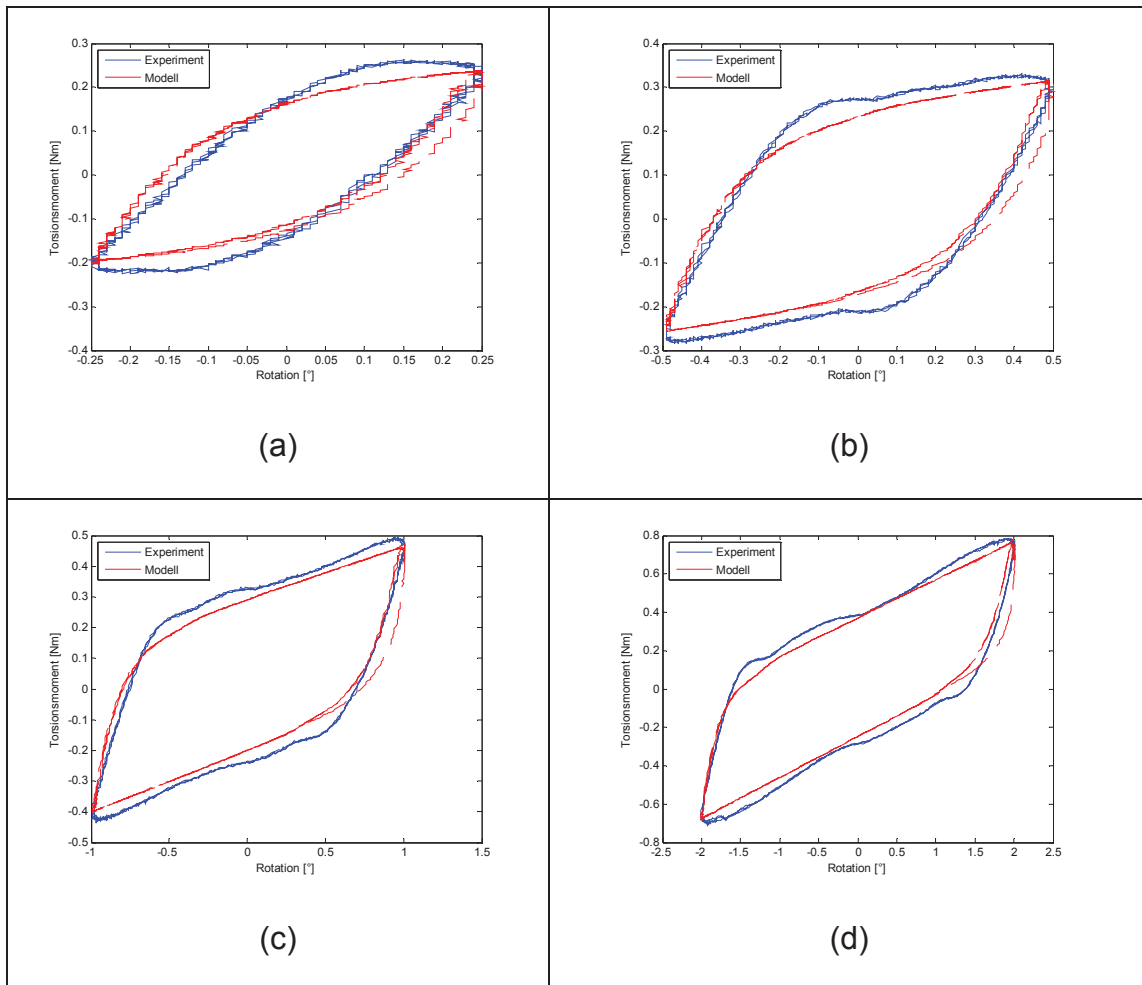
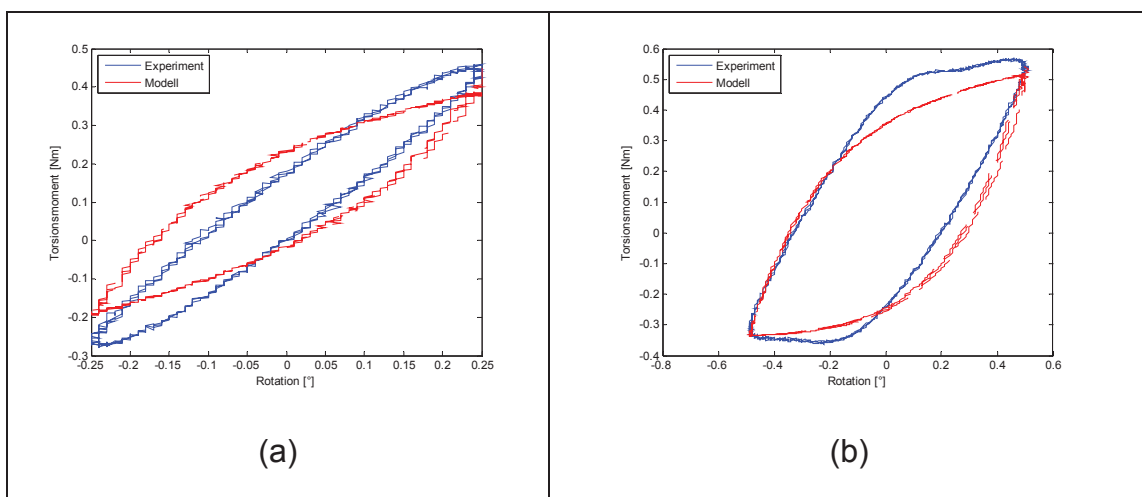


Abb. 7.33: TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).



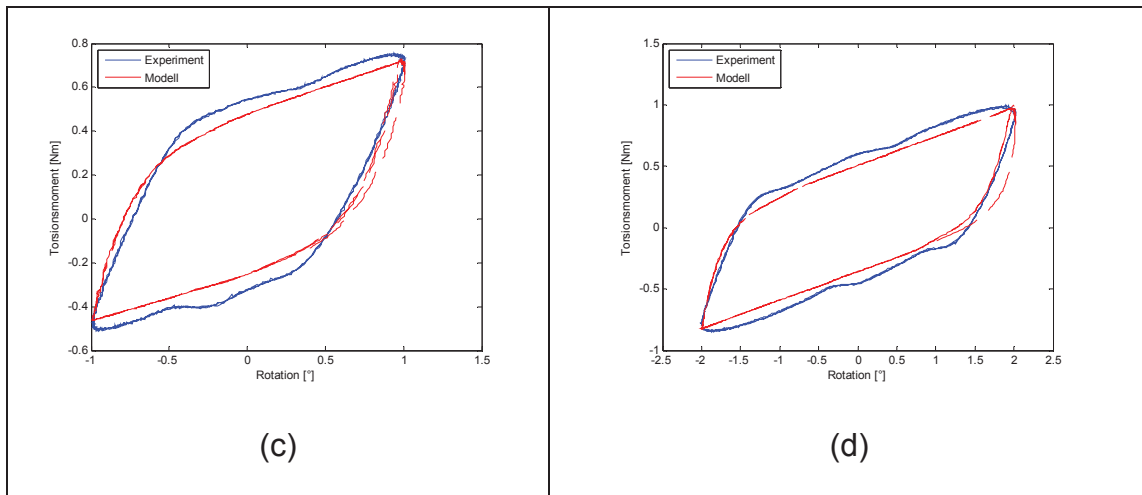


Abb. 7.34: TPUu bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1,5 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

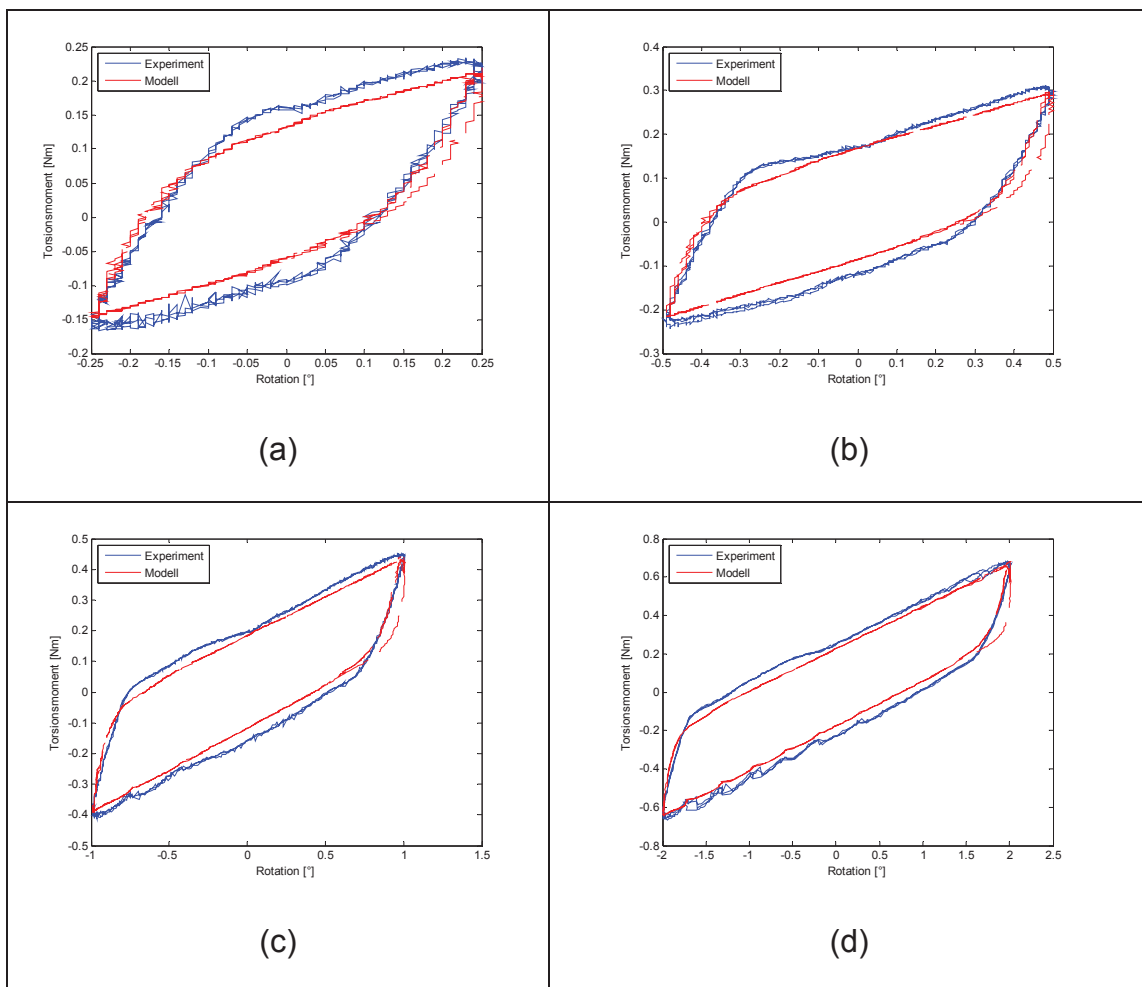


Abb. 7.35: TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 0,5 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

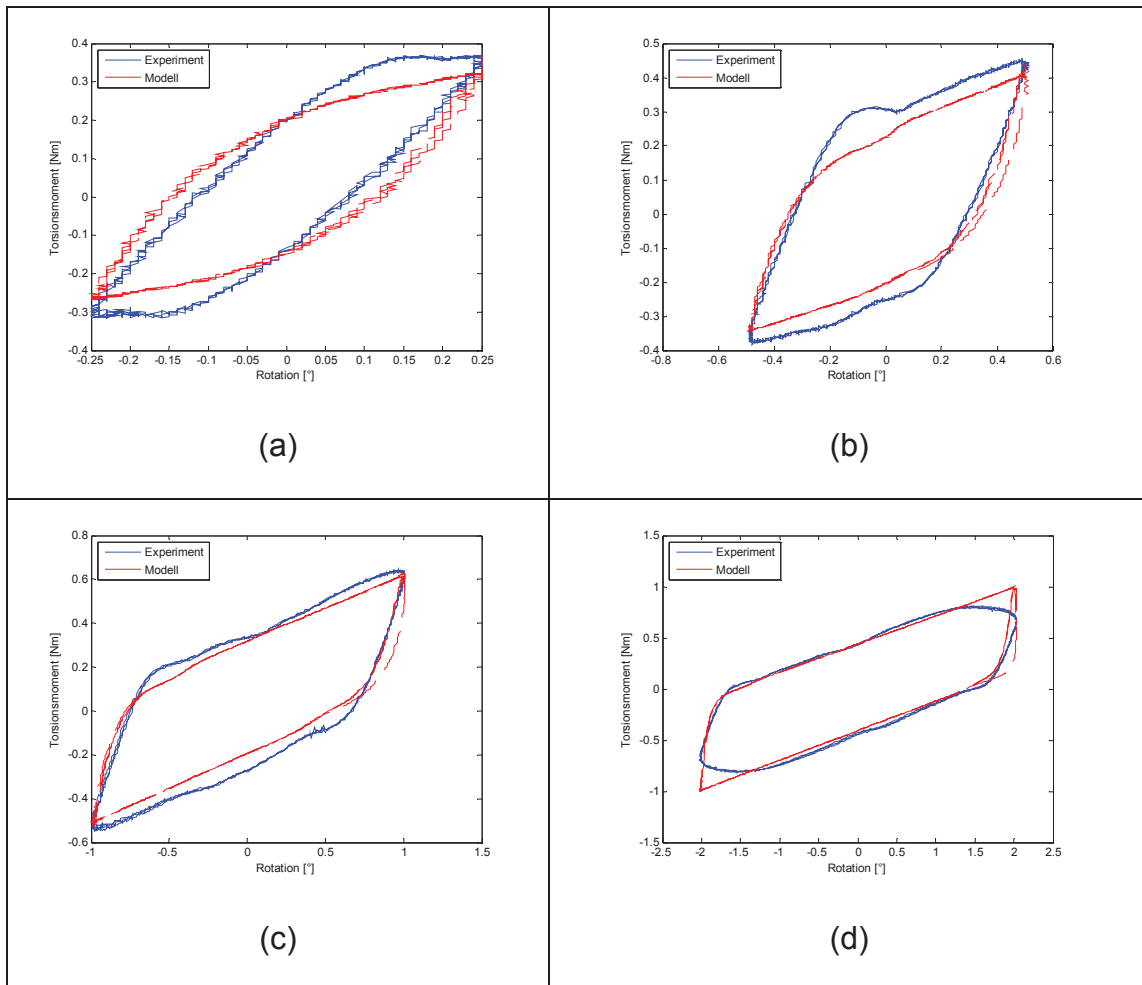
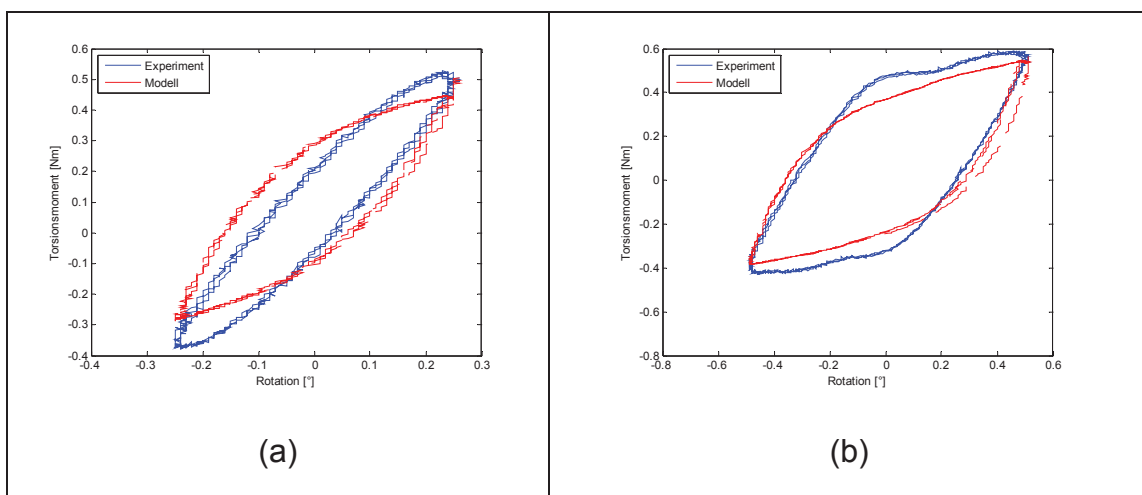


Abb. 7.36: TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).



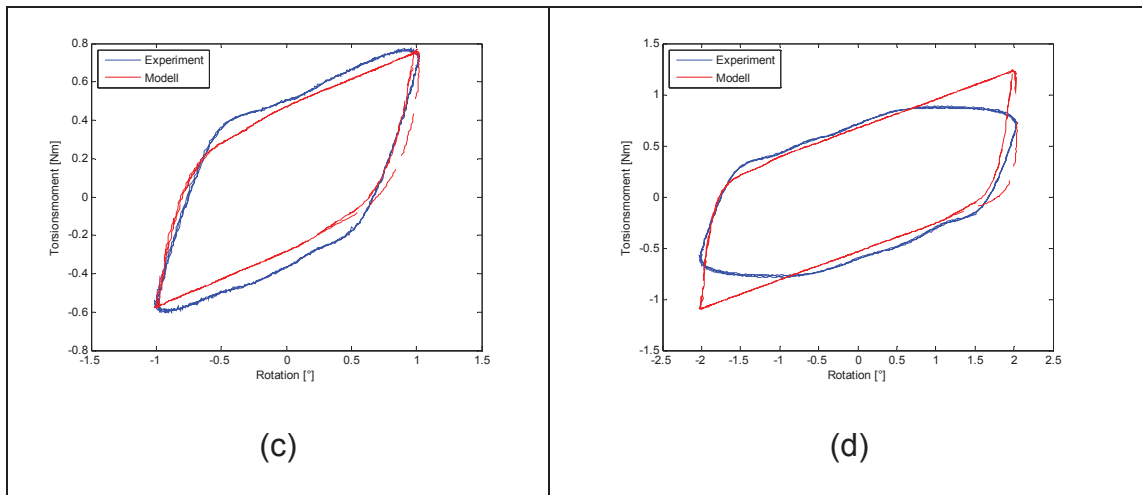


Abb. 7.37: TPUg bei einer Frequenz von 0,05 Hz, 1,5 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

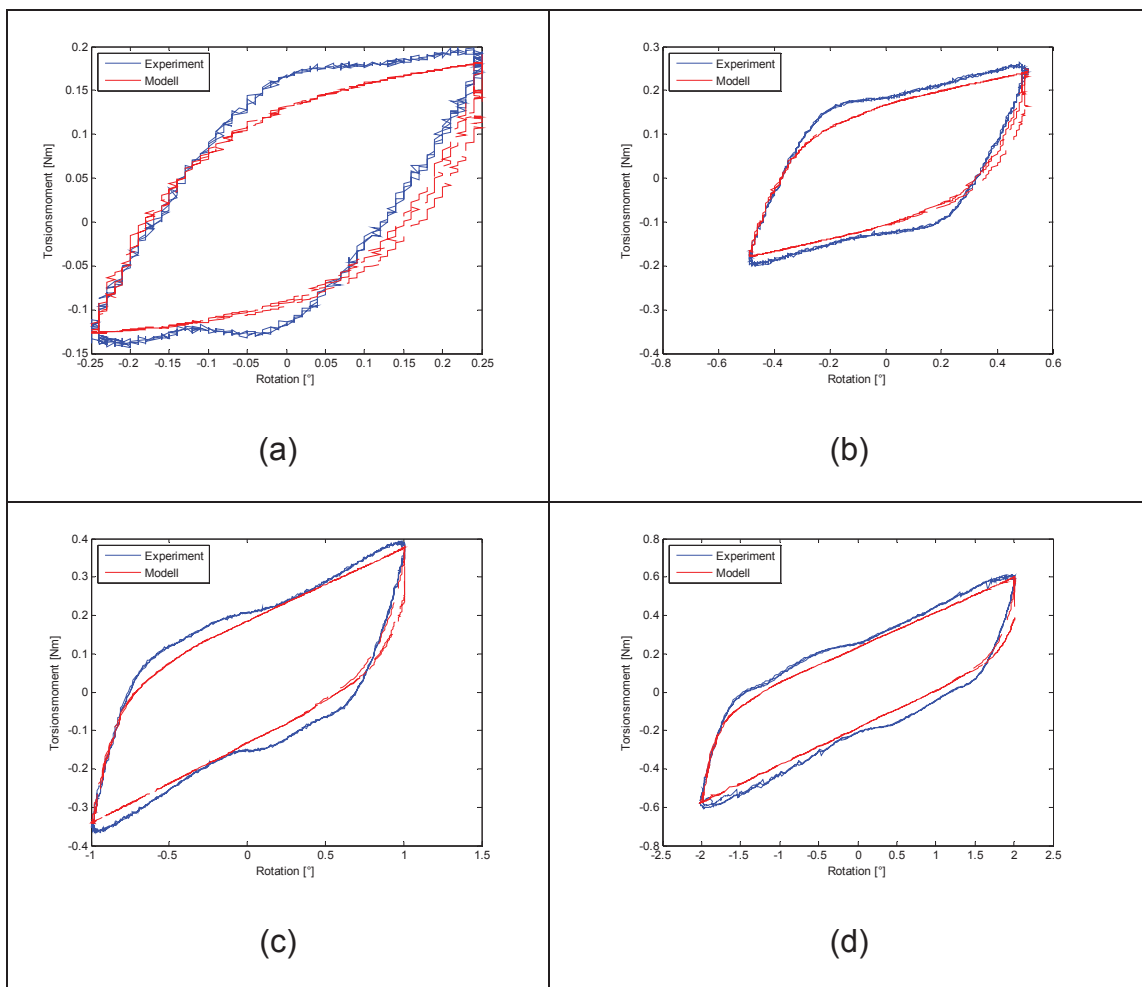


Abb. 7.38: TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 0,5 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

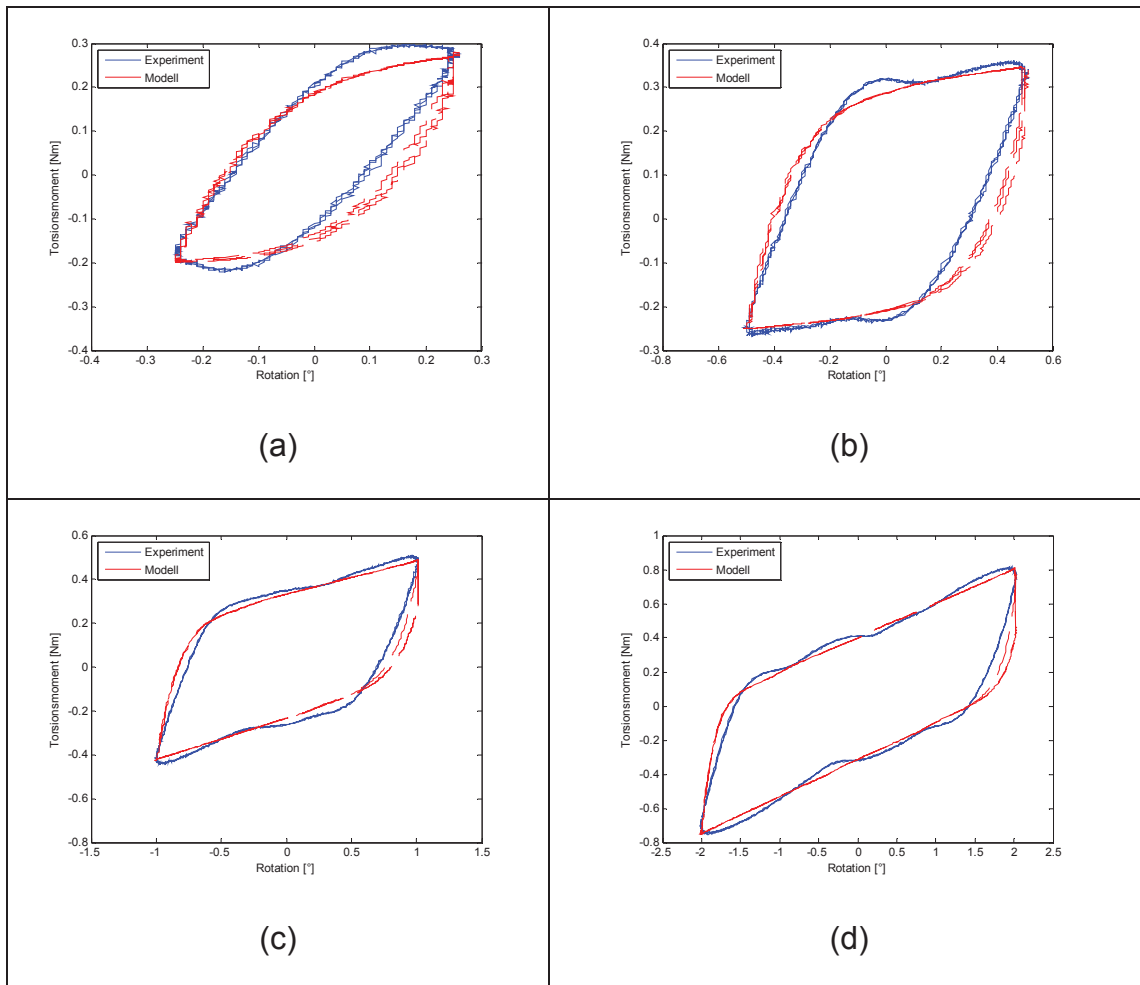
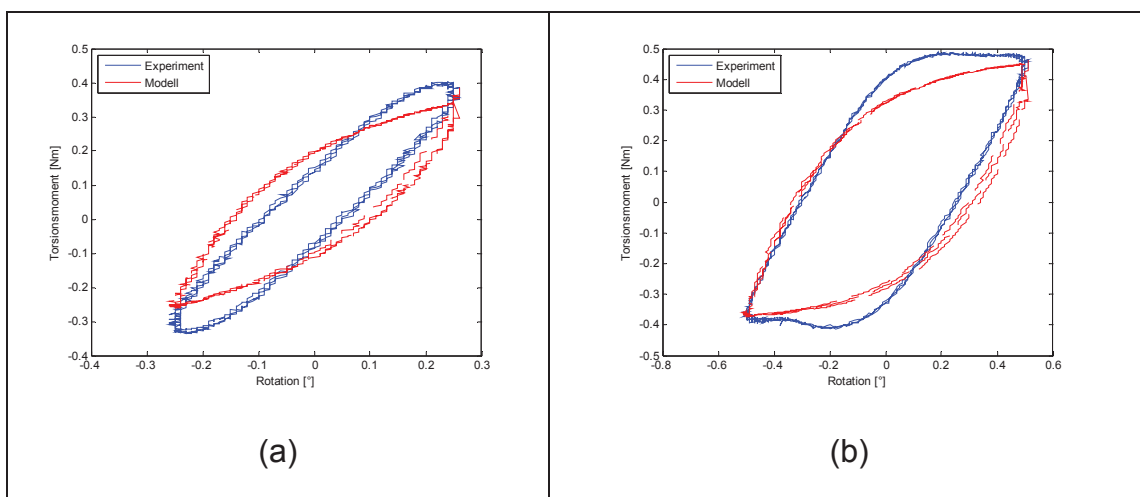


Abb. 7.39: TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).



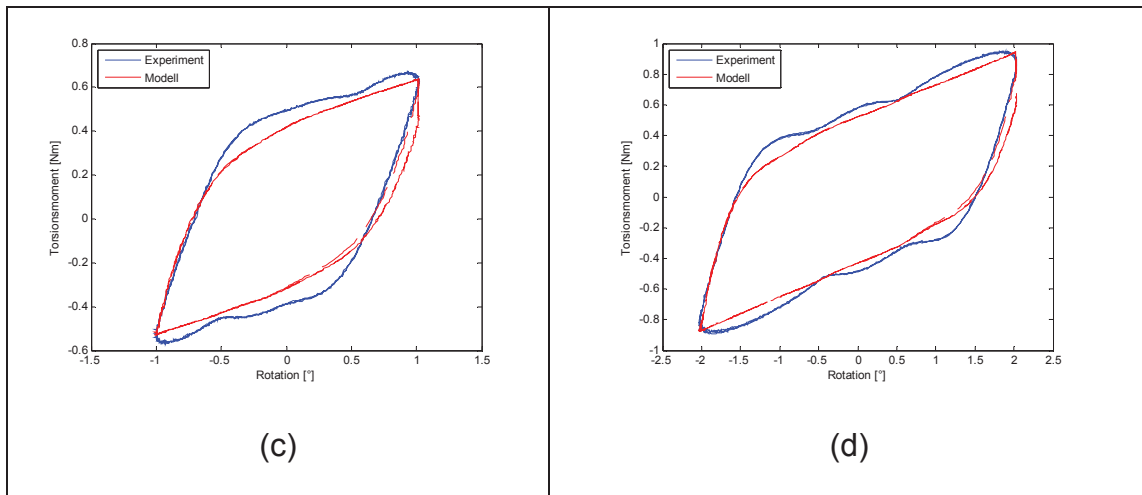


Abb. 7.40: TPUu bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

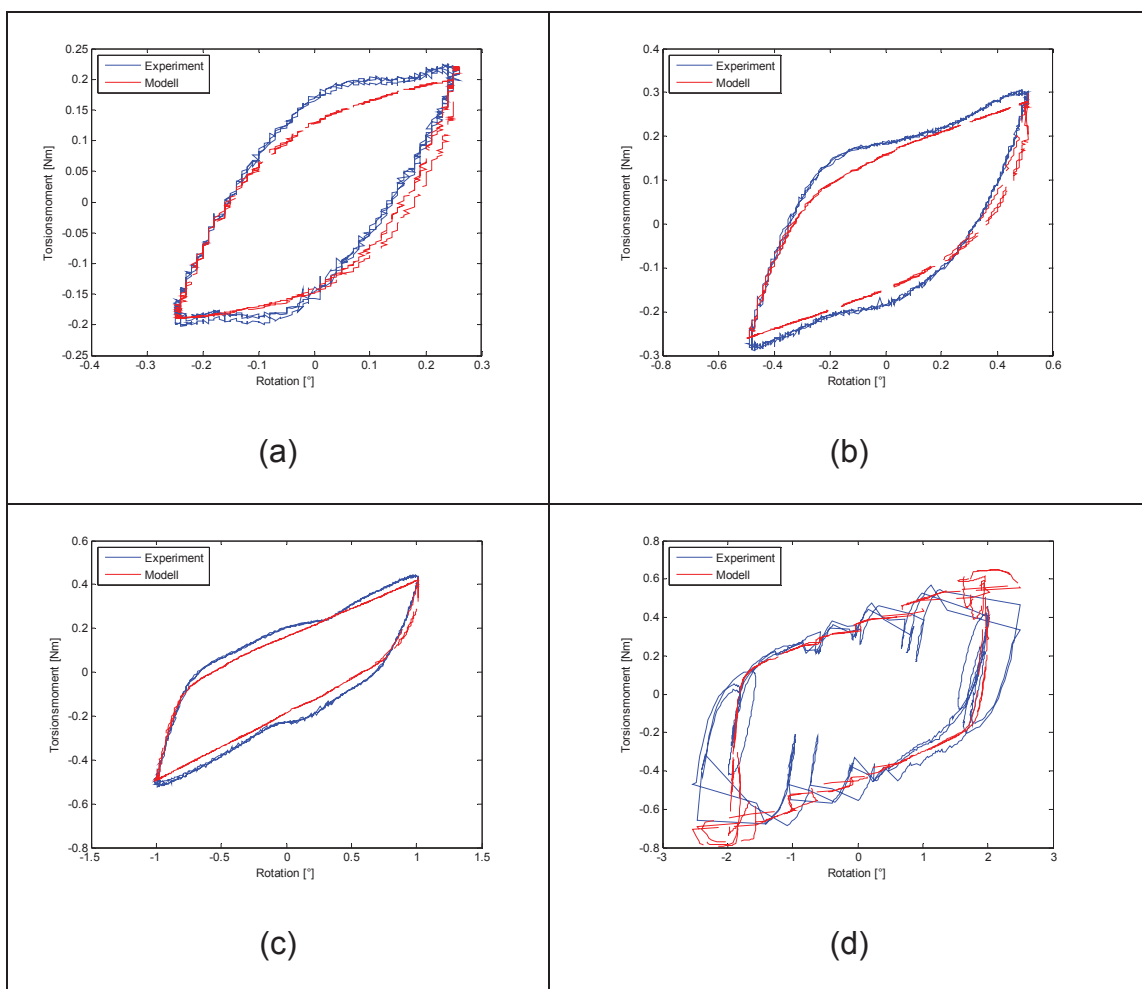


Abb. 7.41: TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 0,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).

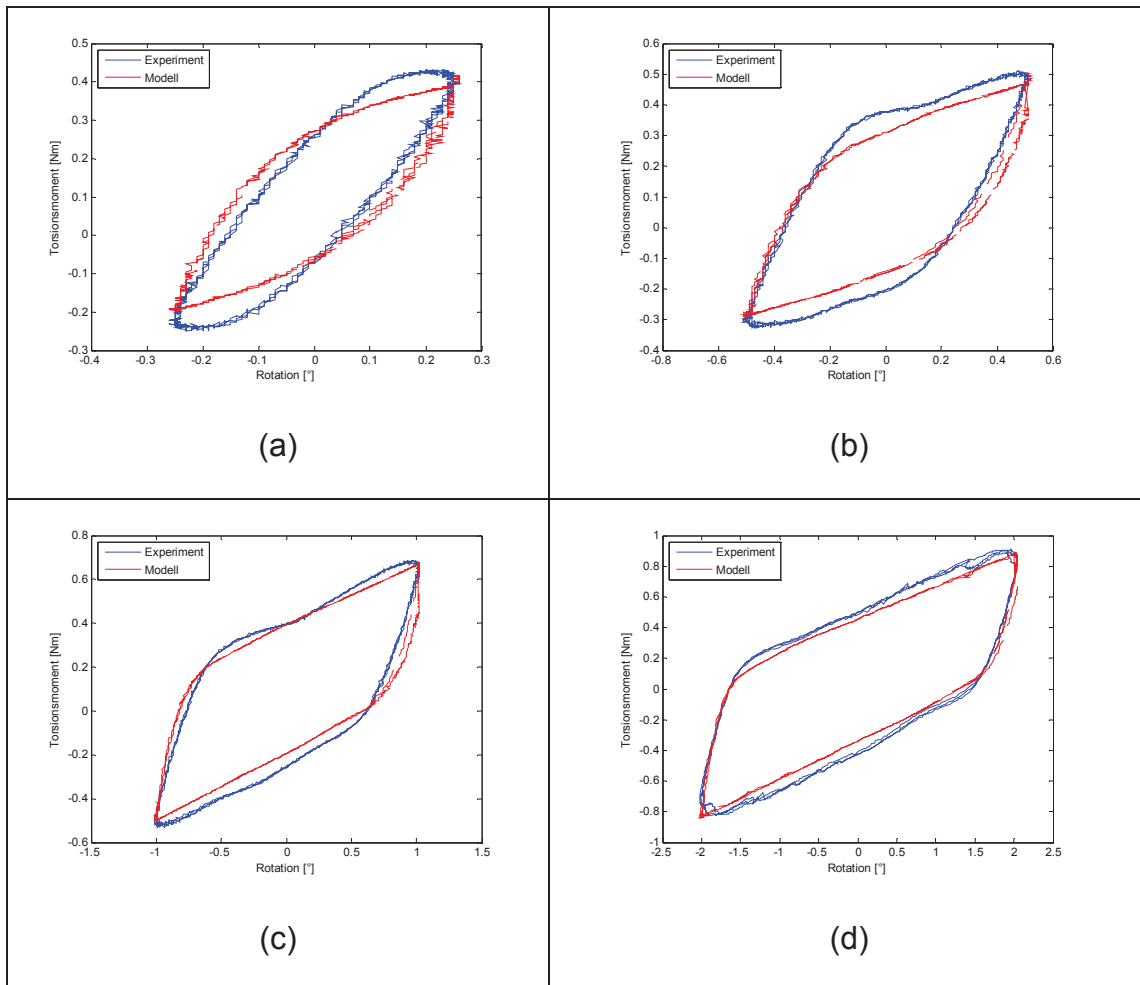
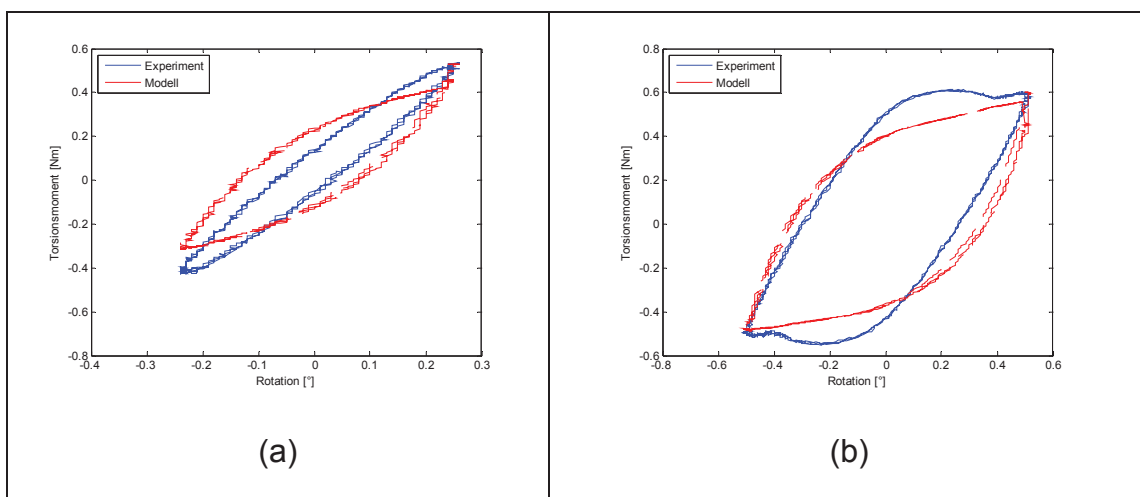


Abb. 7.42: TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1 MPa und Amplituden $0,5^\circ$ (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).



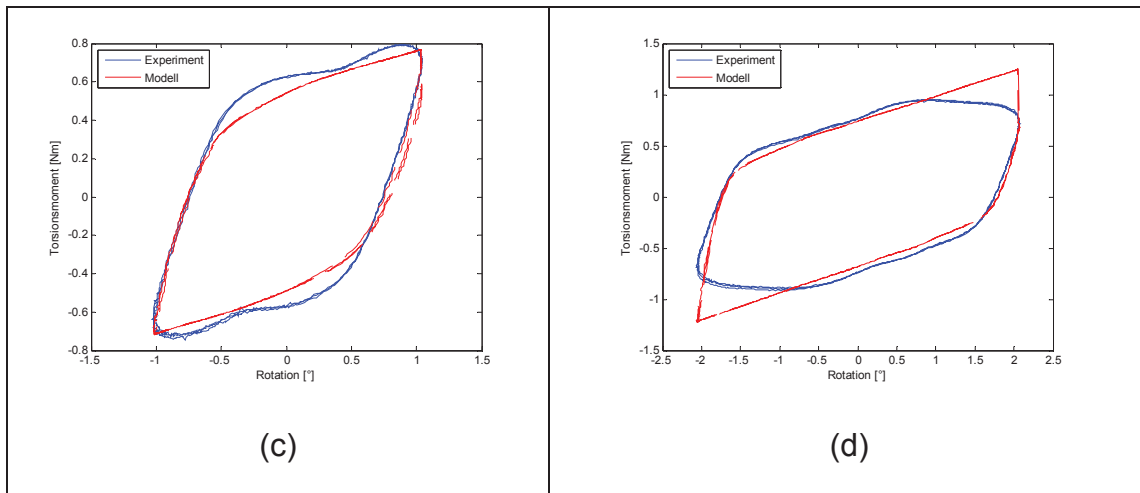


Abb. 7.43: TPUg bei einer Frequenz von 0,1 Hz, 1,5 MPa und Amplituden 0,5° (a), 1° (b), 2° (c) und 4° (d).