



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

DIPLOMARBEIT

Master's Thesis

Untersuchung des viskoelastischen Verhaltens von Bitumen mit dem dy- namischen Scherrheometer im Tief- temperaturbereich

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

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab
Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernard Hofko
Institut für Verkehrswissenschaften,

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Elena Diamandieva
E 610/0729743
Zona B-18, 1, 16
1103 Sofia

Wien, Februar 2012

Unterschrift

Kurzfassung

Die Asphaltkonstruktionen finden auch aufgrund ihres viskoelastischen Verhaltens einen effizienten Einsatz im Straßenbau sowohl als Trag-, als auch als Deckschichten. Unter der starken Beanspruchung von ständig zunehmendem Verkehr und dem Klima gewinnt das Tieftemperaturverhalten besonders an Bedeutung, damit eine ausreichende Kältebeständigkeit und Dauerhaftigkeit gewährleistet werden. Die Ausbreitung der Kälterisse, die die Straßenkonstruktion schädigen und die Lebensdauer stark reduzieren können, ist in engem Zusammenhang mit der Relaxationsfähigkeit des Bitumens als Bindemittel von Asphaltmischgut.

Dieses komplexe Materialverhalten wird derzeit normgemäß entweder durch die konventionelle Methode - Brechpunkt nach Fraaß oder durch den Biegebalkenrheometer (BBR) erfasst. Für eine solche Charakterisierung ist aber auch der Dynamische Scherrheometer (DSR) theoretisch geeignet, der die Beschreibung des Verhaltens sowohl dynamisch, als auch statisch ermöglicht.

In der vorliegenden Diplomarbeit werden neben einer umfassenden Literaturrecherche über den Stand der Technik in Bezug auf die Prüfung des Tieftemperaturverhaltens von Bitumen auch praktische Prüfungen an zwei Bitumen mit vergleichbaren Prüfbedingungen und deren Auswertung durchgeführt.

Die Materialparameter können direkt für die Modellierung des Verhaltens von Bitumen im Tieftemperaturbereich herangezogen werden und in der Folge den Einsatz von Bitumen in Asphaltkonstruktionen weiter optimieren, um Schäden an Straßenkonstruktionen zu vermeiden.

Abstract

Flexible road pavements are efficiently used today due to their viscoelastic behavior in road construction as bituminous bond base courses, as well as surface layers. Under the high stress of the increasing traffic and climate, the low-temperature behavior is becoming more important to ensure a high resistance to low-temperature cracking and longer durability. The appearance of cold cracks, damaging the road structure and strongly reducing the life span, is closely related to the relaxation behavior of the bitumen as a binder of asphalt mix.

This complex material behavior is currently tested by either the conventional method - breaking point according to Fraass or by the Bending Beam Rheometer (BBR). Suitable for such a characterization is also the Dynamic Shear Rheometer (DSR), which allows both a static and dynamic assesment of the behavior.

This master's thesis conducts a comprehensive literature review relating to the examination of the low-temperature behavior of bitumen in addition to the practical implementation and evaluation of tests with two kinds of bitumen using comparable test conditions.

The material parameters can be directly applied for modeling the bitumen behavior in the low-temperature range and consequently for optimizing the use of bitumen in asphalt constructions to further prevent damage to road constructions.

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit wurde im Institut für Verkehrswissenschaften an der Technischen Universität Wien verfasst. Diese Diplomarbeit bildet den Abschluss meines Bauingenieurstudiums.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Bereitstellung dieses interessanten wissenschaftlichen Themas bedanken.

Ein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herr Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernard Hofko für die ausgezeichnete Betreuung meiner Diplomarbeit, seine ständige Diskussionsbereitschaft und die daraus entstehenden Anregungen für meine Arbeit.

Ich möchte auch herzlich dem ganzen Laborteam und besonders Herrn Thomas Riedmayer für die angenehme Zusammenarbeit und für das nette Entgegenkommen danken. Die praktische Laborarbeit in dieser kollegialen Atmosphäre bereitete mir große Freude.

Spezieller Dank gilt auch dem Univ. Ass. Dipl.-Ing. Lukas Eberhardsteiner, der mir bei der Auswertung der umfangreichen Untersuchungsergebnisse hilfreich zur Seite stand.

Für die Unterstützung meines Studiums bedanke ich mich bei der Fakultät für Straßenbau an der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie – Sofia.

Abschließend danke ich meinen Eltern, welche mir das Bauingenieurstudium ermöglicht haben und mich stets in jeder Hinsicht unterstützen.

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG	1
2. STAND DER TECHNIK BEI DER BITUMENPRÜFUNG.....	3
2.1 Prüfverfahren.....	4
2.1.1 Arbeitsweise.....	4
2.1.2 Messsensoren.....	9
2.1.3 Berechnung der Kennwerte beim PP Sensor - komplexer Schubmoduls G^* und Phasenverschiebungswinkel	10
2.2 Präzision des Verfahrens	13
2.3 Auswertung und Interpretation der Prüfergebnisse	14
3. MATERIALIEN UND PRÜFPROGRAMM	21
3.1 Bindemittelproben	21
3.2 Prüfeinrichtungen	24
3.3 Vorbereitung.....	25
3.3.1 Allgemeine Vorbereitung.....	25
3.3.2 Probekörpervorbereitung	26
3.4 Untersuchung des Kriechverhaltens von Bitumen im DSR.....	28
3.4.1 Festlegung der Prüfmodalitäten	28
3.4.2 Durchführung	29
4. ZUSAMMENSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN BITUMEN.....	32
4.1 Bindemittleigenschaften als Folge der Modifikation.....	32
4.2 Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur.....	36
4.3 Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Beanspruchung	43
4.4 Weitere Einflüsse	49
5. GEDANKEN ZUR WIEDERHOLBARKEIT DER KRIECHVERSUCHE	53
6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	56
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	58
TABELLENVERZEICHNIS.....	61
LITERATURVERZEICHNIS.....	62
ANHANG	1

1. EINLEITUNG

Bitumen ist ein schwerflüchtiges Gemisch verschiedener organischer Substanzen, das als Rückstand des Raffinierprozesses bei der Aufarbeitung geeigneter Erdöle gewonnen wird. Bitumen ist nicht flüchtig und sowohl gegen die Einwirkung der meisten anorganischen Säuren, Salze, aggressiver Wässer, Kohlensäure und Alkalien widerstandsfähig. Es weist viskoelastische Eigenschaften auf, die sich mit der Temperatur ändern. Sein dünnflüssiges Verhalten bei hohen Temperaturen und zähplastisches bei niedrigen setzt eine eindeutige prüftechnische Beurteilung seiner Gebrauchseigenschaften über den gesamten relevanten Temperaturbereich voraus.

Aufgrund dieses viskoelastischen Materialverhaltens haben Asphaltkonstruktionen eine wichtige Rolle im Straßenbau. Neben der ständig zunehmenden Verkehrsbelastung werden die Straßendeckschichten auch einer starken klimatischen Beanspruchung ausgesetzt, was eine ausreichende Beständigkeit gegen Kälterisse von der Oberfläche nach unten (top-down) bei tiefen Temperaturen erfordert. In Bezug auf die angestrebte Verhinderung der Straßenkonstruktionschädigung gewinnt der Einfluss des Tieftemperaturverhaltens bzw. starken Abkühlraten an besondere Bedeutung.

Infolge dieser Erscheinungen stehen heute immer höhere Anforderungen an die Baustoffe – Mineralstoffe und modifizierte bitumenhaltige Bindemittel, damit eine lange Dauerhaftigkeit gewährleistet wird.

Von großer Bedeutung im Straßenbau sind die polymermodifizierten Bitumen, deren rheologischen Eigenschaften bei der Herstellung durch Verwendung chemischer Zusätze modifiziert worden sind. Ihre temperaturabhängigen Eigenschaften und komplexes viskoelastisches Verhalten sind mit den konventionellen Methoden, wie die Prüfung des Brechpunktes nach Fraaß bei niedrigen Temperaturen, die Nadelpenetration und Duktilität bei mittleren Temperaturen und die Ermittlung des Erweichungspunktes mit Ring und Kugel im oberen Temperaturbereich, zur Beurteilung nicht zureichend erfassbar und geben keinen direkten Hinweis auf das Verhalten des Bindemittels bzw. des damit hergestellten Asphaltes für bestimmte Schadensfälle maßgebenden Temperaturen (HAGNER, 2003).

Eine Prüfmethode, die im Rahmen des amerikanischen Programms Strategic Highway Research Programm (SHRP) entwickelt wurde, ist der Versuch mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR). Bei dieser Prüfung wird ein großes Augenmerk darauf gerichtet, dass die Probebeanspruchung der tatsächlichen Beanspruchung möglichst entspricht und dadurch ermittelte Messwerte somit als verhaltensorientiert gelten können (LITZKA, 2003).

Die Durchführung der Prüfmethode beinhaltet die Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels von Bindemittel, die das viskoelastische Verhalten des Bitumens über einen Bereich von Prüffrequenzen und Prüftemperaturen im Schwing-Schermodus beschreiben,

in dem das Bindemittel durch Oszillation dynamisch beansprucht wird und das Ansprechen der Dehnung des Bindemittels auf die Spannung gemessen wird.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden Kriechprüfungen an zwei Bitumen (Oxidationsbitumen 70/100 und polymermodifizierten Bitumen PmB 45/80-65) mittels Dynamischen Scherrheometers (DSR) realisiert, sowie eine Literaturrecherche in der internationalen Forschung und Normung durchgeführt. Das Ziel ist eine Prüfprozedur beim DSR für statische Kriechprüfungen zu entwickeln, die vergleichbare und wiederholbare Ergebnisse liefert. Grundlage für die Beurteilung und Auswertung der Prüfergebnisse ist die Präzision des Prüfverfahrens, die bisher noch nicht ermittelt wurde. Es wird die Abhängigkeit der Bindemittleigenschaften von der Prüftemperatur und von der Beanspruchung untersucht und interpretiert und eine Prognose über die Gebrauchseigenschaften des Asphalts (Kälteverhalten) gestellt.

Auf Grund der Bewertung können die Daten zukünftig für die Modellierung des viskoelastischen Tieftemperaturverhaltens von Bitumen im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen an der Technischen Universität Wien herangezogen werden.

2. STAND DER TECHNIK BEI DER BITUMENPRÜFUNG

Um die erhöhten Belastungsansprüche an Straßen und die daraus resultierenden neuen Anforderungen treffen zu können, müssen die im Straßenbau verwendeten Baustoffe den maßgebenden Beurteilungskriterien wie Ermüdungsfestigkeit, Verformungswiderstand und Tieftemperaturverhalten entsprechen.

Im Rahmen des amerikanischen Straßenforschungsprogrammes SHRP aus den 1990-er Jahren wurden neue Methoden für gebrauchsverhaltensorientierten Bitumenprüfung entwickelt. Das 150 Mio. Dollar Projekt umfasst die Teilthemen Asphalt, Langzeitbeobachtung, Beton und Betonbauwerke sowie Straßenbetrieb, wobei ein großer Teil dieses Forschungsbereiches sich mit gebrauchsverhaltensorientierter Beurteilung des Bindemittels Bitumen beschäftigte (LITZKA, 2003).

Die neu entwickelten Prüfmethode zur Bindemittelprüfung sind Biegebalkenrheometer (Bending Beam Rheometer BBR), Dynamisches Scherrheometer (Dynamic Shear Rheometer DSR) und Rotationsviskosimeter (Rotational Viscometer RV). Diese Prüfungen erfolgen nicht nur am Originalbitumen, sondern auch an gealterten Bitumen, deren praxisrelevante Alterungszustände die Verarbeitungs- und Gebrauchssituationen simulieren. Diese Alterung des Bitumens können mit dem Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) und dem Pressure Aging Vessel (PAV) realisiert werden.

Während die konventionellen Prüfungen nur bei der normgemäßen Temperatur erfolgen, können die SHRP Prüfungen auch über einen außer den empfohlenen Prüftemperaturen bestimmten Temperaturbereich durchgeführt werden, was eine vollkommene Untersuchung der Temperaturanfälligkeit dieser Prüfmethode erlaubt (LITZKA, 2003).

Die Einführung dieser neuen Prüfmethode ermöglicht eine eindeutige prüftechnische Beurteilung des rheologischen Verhaltens des Bitumens, die den tatsächlichen Beanspruchungen des Bindemittels im Asphalt entspricht. Mit Hilfe der Ergebnisse können Modelle für das Gebrauchsverhalten oder die Nutzungsdauer erstellt werden, die das Verformungs-, Ermüdungs-, und Tieftemperaturverhalten erfassen. Die Abbildung (Abb. 2-1) zeigt die Anwendungsgebiete der gebrauchsverhaltensorientierten Prüfungen und die physikalische Anforderungen, die die Bitumen erfüllen müssen.

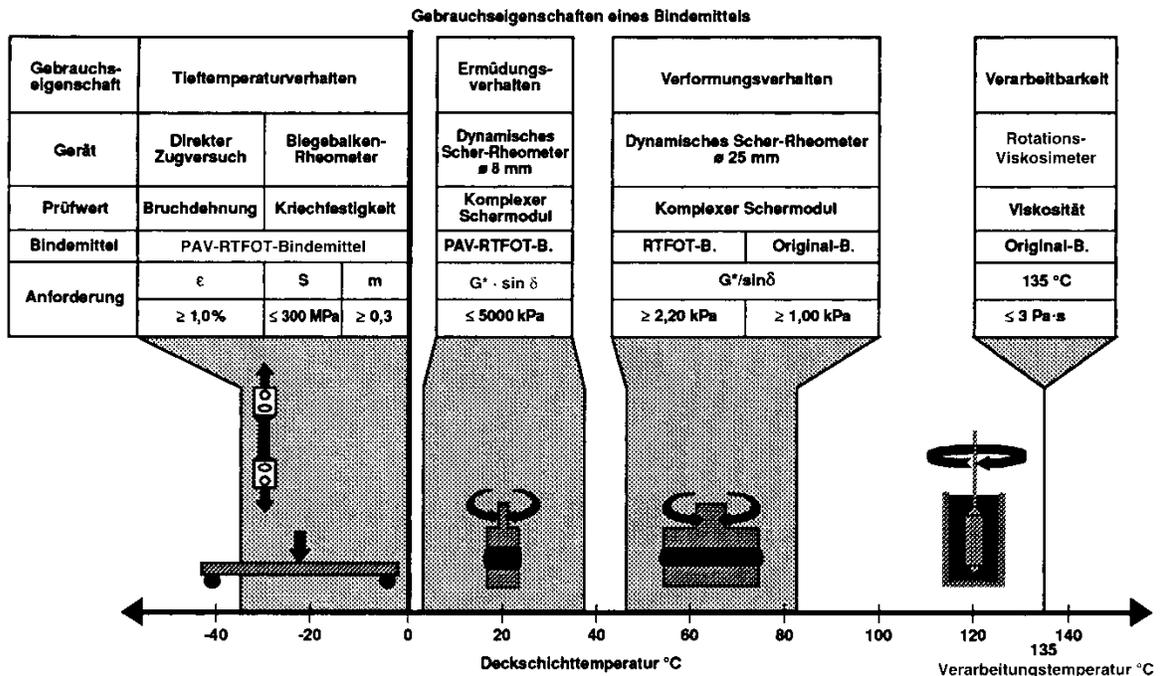


Abb. 2-1 Anwendungsbereiche der SHRP-Prüfungen, (LITZKA, 2003)

Bis zum jetzigen Zeitpunkt werden mit dem DSR nur dynamische Prüfungen durchgeführt, obwohl mit dem Gerät auch statische Prüfungen realisiert werden können. Die Ermittlung der Resultate von statischen Kriechprüfungen ist noch nicht normgemäß erfasst und auf Grundlage der Untersuchungen beruhenden Ergebnisse dienen zunächst der Erfahrungssammlung.

Dementsprechend wird nachfolgend bei der Literaturlauswertung den Prüfverfahren mit dem Dynamischen Scherrheometer mit dynamischer Belastung erläutert und ein Überblick auf Veröffentlichungen zum Thema gemacht.

2.1 Prüfverfahren

2.1.1 Arbeitsweise

Mit dem Dynamischen Scherrheometer (DSR) können die rheologischen Eigenschaften von Bitumen bei variierenden Prüftemperaturen und Prüffrequenzen gemessen werden. Die rheologischen Größen, die damit ermittelt werden können, sind der komplexe Schubmodul G^* und der Phasenwinkel δ .

Bei einer Platte-Platte Anordnung ist das Gerät mit zwei parallelen Platten versehen, wobei die obere sich über der unteren feststehenden Platte drehend hin- und her bewegt. Diese oszillierende Rotation beansprucht auf Scherung die zwischen den zwei Platten kraftschlüssig einge-

spannte Bitumenprobe (Abb. 2-2). Jede Bewegung der Markierung (schwarzer Strich) vom Punkt A nach Punkt B, dann wider zurück über Punkt A nach Punkt C und zurück zu dem Ausgangspunkt A stellt ein Zyklus dar.

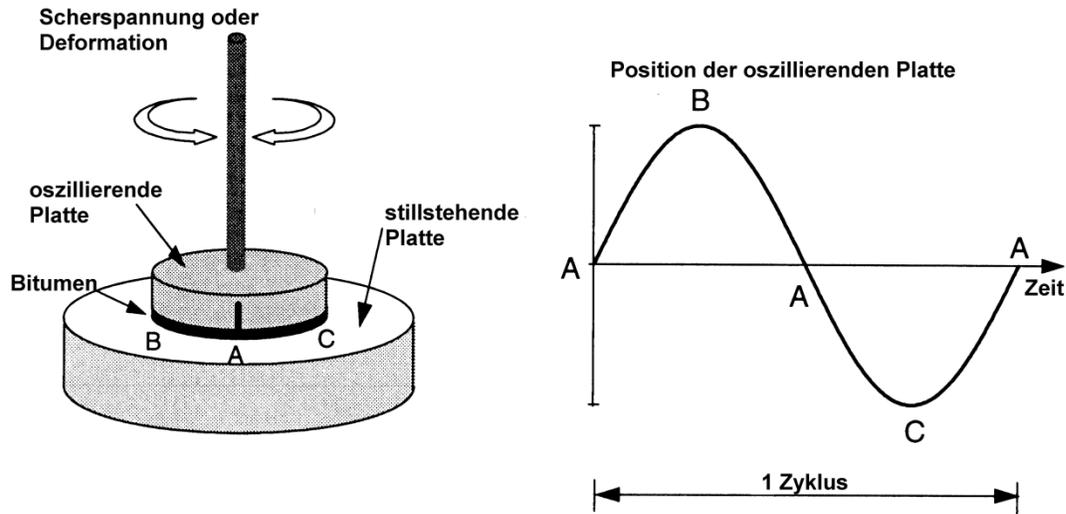


Abb. 2-2: Arbeitsweise DSR (EN 14770, 2006), (LITZKA, 2003).

Dieses Modell wird als Zwei-Platten Modell (Abb. 2-3) bezeichnet, bei dem eine Probe ausgehend vom Ausgangszustand 1 auf Scherung bis zu einer maximalen Auslenkung (bzw. Deformation) s_{max} (Punkt 2) beansprucht wird. Danach erfolgt eine Gegenbewegung nach Punkt 3, wobei die höchste Geschwindigkeit am Punkt 3 erhalten wird. Am Punkt 4 beginnt die erneute Umkehrung der Bewegung. Die Deformation wird durch eine Sinusfunktion beschrieben, die durch die zwei Parameter, Amplitude und Kreisfrequenz ω , charakterisiert ist. Die Kreisfrequenz ergibt sich dabei aus der Frequenz der Schwingung f nach der Formel Gl. 2-1 (RHEOLOGIE-KURS—ONLINE.DE).

$$\omega = 2\pi \cdot f$$

Gl. 2-1

Eine Auslenkung s genau um den Plattenabstand h bewirkt 100% Deformation (Abb. 2-3). Die Formeln zu der Abbildung beschreiben die Deformation, die eine Funktion aus dem Weg s und dem Plattenabstand h ist und die Schergeschwindigkeit, die von der Geschwindigkeit der oszillierenden Platte und dem Plattenabstand abhängig ist. Die Schergeschwindigkeit nimmt mit steigender Frequenz zu. Die Deformation (Auslenkung) darf nicht zu groß sein, um die innere Struktur der Probe nicht zu zerstören, d.h. der linear-viskoelastische Bereich darf nicht überschritten werden. Bei zu großer Auslenkung kann sich die Prüfsubstanz nicht mehr elastisch zurückformen. Es kommt zur Zerstörung der Probe (LITZKA, 2003).

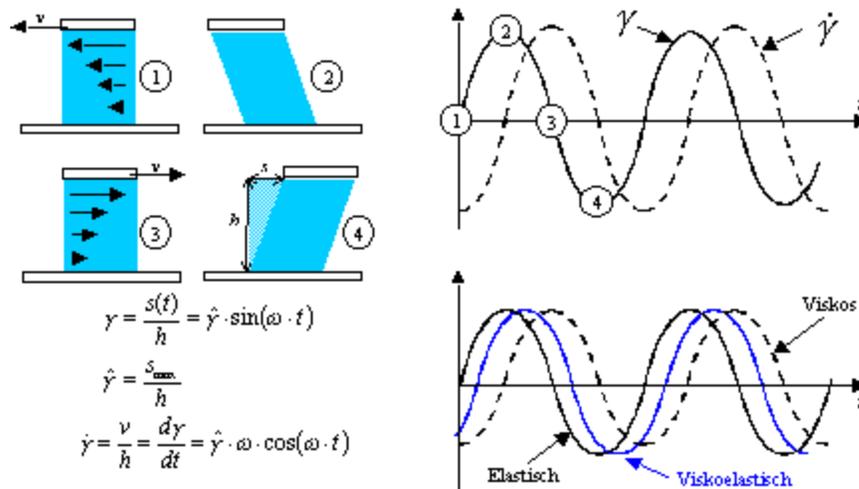


Abb. 2-3 Zwei-Platten Modell, (RHEOLOGIEKURS—ONLINE.DE)

Grundsätzlich kommen zwei Typen von Rheometern zur Verwendung – CS-Rheometer (Controlled Stress-Rheometer), bei dem die Spannung vorgegeben ist und die Deformation gemessen wird und CR-Rheometer (Controlled Rate-Rheometer), bei dem die Verformung vorgegeben wird und die Schubspannung gemessen wird.

Bei einem spannungsgeregelten Versuch wird eine definierte Scherspannung in die temperaturgeregelte Prüfgeometrie eingebracht und es wird die hervorgerufene Deformation gemessen. Ein PC führt die Regulierung der Messungsbedingungen und erfasst und berechnet die resultierenden Messdaten.

Bei einem verformungskontrollierten Versuch wird eine definierte Dehnung vorgegeben und die für die Verformung erforderliche Kraft wird gemessen. Beide Möglichkeiten der Versuchsdurchführung führen im Bereich des linear viskoelastischen Verhaltens von Bindemitteln zu gleichwertigen Beanspruchungen (HAGNER, 2003).

Zur Beschreibung der viskoelastischen Eigenschaften der Bindemittel werden im Oszillationsversuch mittels Dynamischem Scherrheometer der komplexe Schubmodul G^* und der Phasenwinkel δ sowie die in spannungsgeregelten Versuchen durch die Beanspruchung hervorgerufene Verformung γ oder die in verformungskotrollierten Prüfungen auftretende Schubspannung τ gemessen (HAGNER, 2003).

Der komplexe Schubmodul G^* beschreibt den nötigen Kraftaufwand, damit sich eine Substanz verformen lässt. Er stellt den Widerstand dar, den eine Substanz einer erzwungenen Verformung (Scherung) entgegenhält. Je höher G^* ist, desto schwer verformbar ist die untersuchte Substanz. Der Schubmodul G^* besteht aus zwei Komponenten - dem Speichermodul G' , der den elastischen Anteil von G^* darstellt, und dem Verlustmodul G'' , der den viskosen Anteil von G^* enthält. Speichermodul G' und Verlustmodul G'' stehen in einer Abhängigkeit vom komplexen Schubmodul (Gl. 2-2), die mit Hilfe eines Vektordiagramms sich darstellen lässt (Abb. 2-4).

Mit dem pythagoreischen Lehrsatz kann G^* durch den Phasenwinkel δ rechnerisch ermittelt werden (Gl. 2-3).

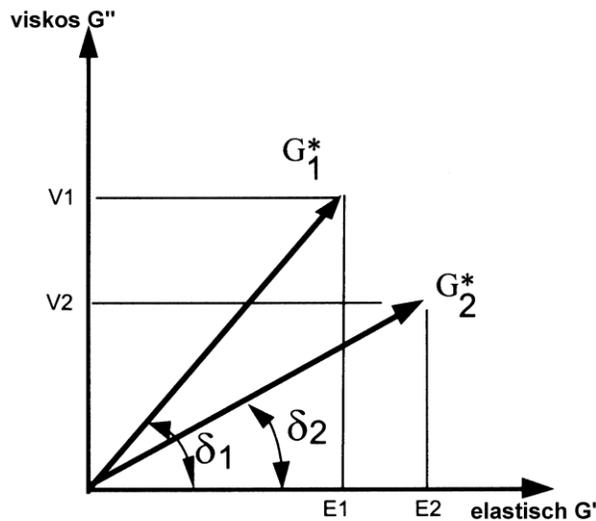


Abb. 2-4 Viskoelastisches Verhalten (LITZKA, 2003)

$$G^* = G' + iG'' = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Gl. 2-2}$$

$$|G^*| = \sqrt{(G')^2 + (G'')^2}$$

Gl. 2-3

$$G' = |G^*| \cdot \cos \delta$$

$$G'' = |G^*| \cdot \sin \delta$$

G^*komplexer Schubmodul (°)

τSpannung

γVerzerrung (bzw. Deformation)

G'Speichermodul

G''Verlustmodul

Die Abbildung (Abb. 2-4) zeigt zwei verschiedene Substanzen, die den selbe Schubmodul bzw. Widerstand gegen Verformung haben (die Länge der Vektoren sind gleich). Der Unterschied zwischen beiden Materialien lässt sich mit den verschiedenen elastischen Anteil G' bzw. visko-

sen Anteil G'' und Winkel δ , den der jeweilige G^* -Vektor mit der Abszisse einschließt, ausdrücken. Dieser Winkel entspricht dem Phasenverschiebungswinkel. Der größere eingeschlossene Phasenwinkel δ_1 bei Substanz 1 als dieser bei Substanz 2 δ_2 gibt Auskunft darüber, dass die erste einen höheren viskosen Anteil (G_1'') besitzt und eine eventuelle Verformung eher bei Substanz 1 als bei Substanz 2 bleiben wird (LITZKA, 2003).

Der Phasenverschiebungswinkel beschreibt den Zeitunterschied zwischen der eingebrachten Spannung und der daraus resultierenden Deformation (Abb. 2-5), was die Erkenntnis liefert, ob sich eine Substanz eher elastisch (δ – gering) oder eher viskos (δ – hoch) verhält. Die Verschiebung der Extremwerte der Sinusschwingung liegen bei realen Substanzen hinsichtlich ihrer Viskosität bzw. Elastizität zwischen den Werten von idealen viskosen Flüssigkeiten ($\delta = 90^\circ$) und idealen elastischen Festkörpern ($\delta = 0^\circ$) (LITZKA, 2003).

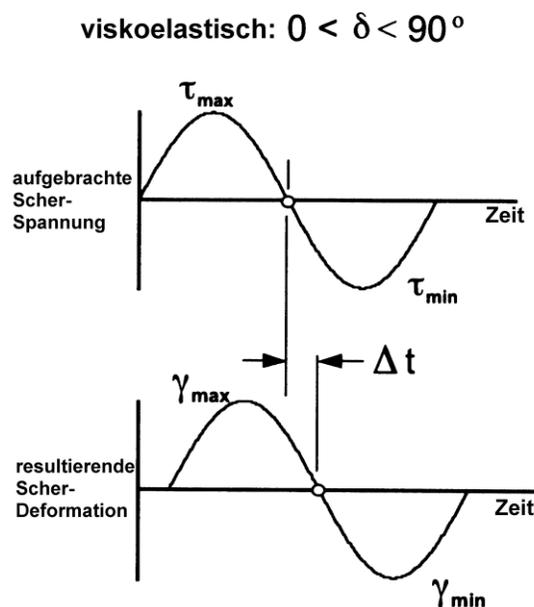


Abb. 2-5 Zeitunterschied zwischen den Spannung und Deformation bei viskoelastischem Verhalten (Litzka, 2003)

Die folgende Formel dient zur Berechnung der Phasenverschiebungswinkel unter Berücksichtigung der Frequenz:

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} \cdot 360 \quad \text{Gl. 2-4}$$

δPhasenverschiebungswinkel ($^\circ$)

Δt ...Zeitverschiebung zwischen τ_{\max} und γ_{\max} [s]

tZeit für eine Schwingung [s]

$$t = \frac{1}{f}$$

Gl. 2-5

t....Zeit für eine Schwingung (s)

f....Frequenz [Hz]

2.1.2 Messsensoren

Rheometer lassen sich auch nach ihrer Messkonfiguration unterscheiden. Im Stand der Technik sind zwei auch „Sensoren“ genannte Messsysteme bekannt - Platte-Platte (Abb. 2-6) und Kegel-Platte (Abb. 2-7).

Ausgehend von dem Prinzip eines Zwei-Platten-Modells ist der Platte-Platte Sensor (PPS) das am meisten eingesetzte Messsystem.

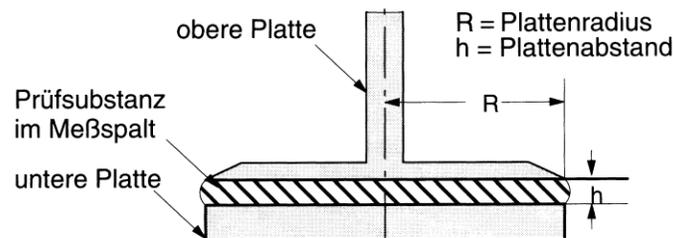


Abb. 2-6 Platte-Platte Messsystem, (LITZKA, 2003)

Aufgrund eines wesentlichen Einflusses der Plattengeometrie auf die Messwerten, sowie auch des Plattenabstands und der Prüfsubstanz im Messspalt, ist in den Normen die Verwendung von parallelen Platten mit Durchmessern von 8 und 25mm vorgesehen. Normalerweise kommt die größere Platte bei Prüfungen an Bindemittel im Originalzustand oder nach Kurzzeitalterung (z.B, RTFOT) zur Verwendung und ist auf einen Spalt von 1mm abgestimmt. Zu dem Anwendungsbereich der kleineren Platte mit Durchmesser von 8mm und Spalt von 2mm zählt die Untersuchung von langzeitgealterten Bitumenproben (nach RTFOT und PAV) (ARBEITSANWEISUNG AA304 – LABOR DER PROFESSUR FÜR STRAßEN- UND FLUGSBETRIEBSFLÄCHEN TU WIEN).

Bei einer Platte mit Durchmesser von 25mm und einem Spalt von 1mm, entspricht die Auslenkung s der oberen Platte am äußersten Umfang genau um den Plattenabstand (1mm Auslenkung) einer 100% Deformation und kann nach der Formel ermittelt werden (Gl. 2-6):

$$\gamma = \frac{s}{h} \times 100(\%)$$

Gl. 2-6

γ ... Deformation [%], dimensionslos angegeben: $\gamma=s/h$

s....Auslenkung [mm]

h....Plattenabstand (Spalt) [mm]

Bei einer Verformung um die Hälfte des Durchmessers $D/2$ (12,5mm) ist die berechnete Deformation 50%, weil die Auslenkung der Hälfte der Auslenkung am Rande ist.

Dieser nachteilige Effekt der abnehmenden Deformation kann mit einer anderen Messkonfiguration verhindert werden. Bei der Kegel-Platte Anordnung wird mit der Annäherung an die Rotationsachse auch der Spalt enger (Abb. 2-7). So erfolgt eine Messung mit konstanter Deformation. Üblicherweise ist der Kegel mit einem gekürzten Spitze, damit sich keine im Messsubstanz befindende Partikel zwischen den beiden Platten „verkeilen“ (LITZKA, 2003).

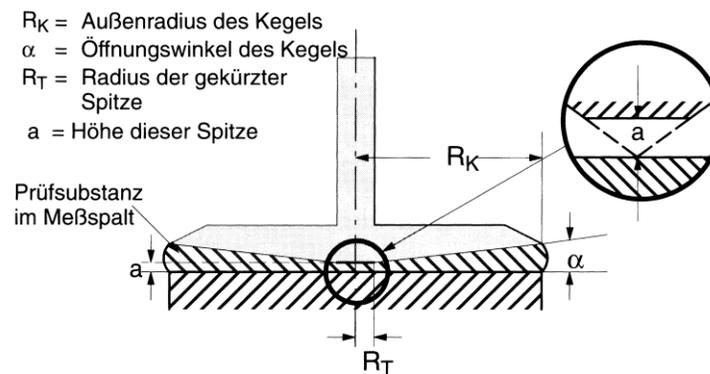


Abb. 2-7 Kegel-Platte Konfiguration, (LITZKA, 2003)

Um dieses Problem zu vermeiden, verwendet man die Platte-Platte Sensor unter der Berücksichtigung, dass die resultierenden Messwerte nur mit solchen zu vergleichen sind, die auch mit dem selbe Messsystem ermittelt wurden (LITZKA, 2003).

Es ist darauf hinzuweisen, dass sowohl die Prüftemperatur und die Beanspruchung als auch die Plattengeometrie einen direkten Einfluss wegen des temperaturabhängigen viskoelastischen Verhaltens des Bitumens auf die Prüfergebnisse ausüben. Eine geeignete Wahl der Prüfmodalitäten ist wichtige Voraussetzung für die umfassende Auswertung und Interpretation der Kennwerte und die exakte Feststellung des rheologischen Verhaltens der Bitumen.

2.1.3 Berechnung der Kennwerte beim PP Sensor - komplexer Schubmodul G^* und Phasenverschiebungswinkel

Für die Ermittlung des Schubmoduls sind die Scherspannung und die Verformung nötig. Mit dem Drehmoment und den geometrischen Kennwerten der Platten kann die Scherspannung

berechnet werden (Gl. 2-7). Aus der Auslenkung (Verformung) kann die Deformation ermittelt werden (Gl. 2-8) und damit anhand folgender Formel auch der komplexe Schubmodul (Gl. 2-9).

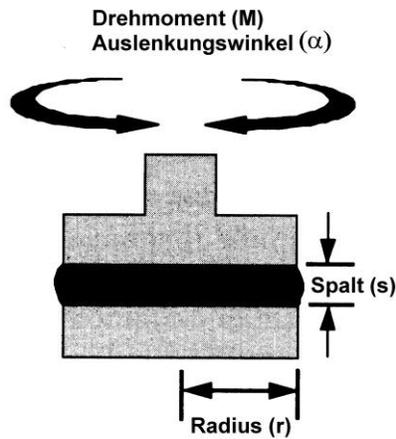


Abb. 2-8 Benötigte Probenabmessungen für die Berechnung, (LITZKA, 2003)

$$\tau = \frac{2M}{\pi r^3} \quad \text{Gl. 2-7}$$

τScherspannung [Pa]

M.....maximal aufgebrachtes Drehmoment [Nm]

r.....Plattenradius [m]

$$\gamma = \frac{\lambda r}{h} \quad \text{Gl. 2-8}$$

γDeformation

λVerdrehwinkel [rad]

r.....Plattenradius [m]

h.....Messspalt [m]

$$G^* = \frac{\tau}{\gamma} \quad \text{Gl. 2-9}$$

G.....Modul [Pa]

τSpannung [Pa]

γDeformation

(LITZKA, 2003).

Eine steigende Temperatur bewirkt ein Ansteigen der Viskosität und ein Abnehmen des inneren Widerstands des Stoffes gegen eine erzwungene Verzerrung. Folglich führt die Erhöhung der Prüftemperatur zu immer geringeren komplexen Schubmodul.

Die Aufbringung einer steigenden Schubspannung ruft im linear-viskoelastischen Bereich der Bindemittel einer proportionalen Zunahme der Verzerrung hervor (Gl. 2-9). Anhand der Formel des komplexen Schubmoduls, kann man die Schlussfolgerung ziehen, dass im ersten Newtonischen Bereich (linear-viskoelastischen) der komplexe Schubmodul unabhängig von der aufgebrauchten Schubspannung ist.

Seine Größe hängt von der Schergeschwindigkeit ab, was das Geschwindigkeitsgefälle zwischen der unteren stationären Platte und der oberen oszillierenden Platte beschreibt (Abb. 2-3). Die Schergeschwindigkeit erhöht sich mit steigender Frequenz (Gl. 2-3 und Gl. 2-10 aus der Abbildung) und führt durch die zunehmende Ansprache des elastischen Verhaltens des Bindemittels zu einer Zunahme des komplexen Schubmoduls (HAGNER, 2003).

Nach dem Einsetzen von Formeln Gl. 2-6 und Gl. 2-11 in Gl. 2-9 ergibt sich Gl. 2-12, was die direkte Proportionalität des Schubmoduls von der Schergeschwindigkeit zeigt.

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{h} \quad \text{Gl. 2-10}$$

$\dot{\gamma}$... Schergeschwindigkeit/Geschwindigkeitsgefälle

v ... Geschwindigkeit

h ... Plattenabstand

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{Gl. 2-11}$$

η ... dynamische Viskosität (Ns/m²)

τ ... Spannung [Pa]

$\dot{\gamma}$... Schergeschwindigkeit/Geschwindigkeitsgefälle

$$G^* = \frac{\dot{\eta} \cdot \dot{\gamma}}{\dot{\gamma}}$$

Gl. 2-12

$$G^* = \frac{\dot{\eta} \cdot \dot{\gamma} \cdot h}{s}$$

(RHEOLOGIEKURS—ONLINE.DE).

Ein weiterer Einflussfaktor auf das Geschwindigkeitsgefälle und dadurch auf den komplexen Schubmodul ist die Plattengeometrie und der Plattenabstand. Mit Abnahme der Plattenradien und Zunahme der Plattenabstände reduziert sich das Geschwindigkeitsgefälle in der Messprobe (Gl. 2-10), wodurch der komplexe Schubmodul wächst (HAGNER, 2003). (Gl. 2-12).

Die Berechnungsformeln für die Phasenverschiebungswinkel passen mit diesen bei den theoretischen Zwei-Platten Modell zusammen und sind schon in Gl. 2-4 und Gl. 2-5 behandelt.

Eine Zunahme der Belastungsfrequenz verkürzt wesentlich die Zeit des Bindemittels zum Fließen und spricht sein elastisches Verhalten an. Folglich sinkt auch der Phasenwinkel, der im engen Zusammenhang mit der Frequenz steht (Gl. 2-5). Die Plattengeometrie hat auch Einfluss auf den Wert des Phasenwinkels und demzufolge führen kleinere Geschwindigkeitsgefälle zu größeren Phasenwinkeln. Größere Schubspannungen haben im linear-viskoelastischen Bereich keinen Einfluss auf den Phasenwinkel, aber rufen proportionale Veränderungen der Verzerrung hervor (HAGNER, 2003).

2.2 Präzision des Verfahrens

Die Präzision des DSR Prüfverfahrens wird bisher nicht ermittelt. Jedoch sollen die unter Wiederholbedingungen durchgeführten Prüfungen den Anforderungen an die Genauigkeit und den Zulässigkeitskriterien entsprechen. Die Regelungen des Dynamischen Scherrheometer Versuchs stehen in der europäischen Normung - EN 14770:2006 zur Verfügung.

Die Faktoren, die die Präzision der Prüfergebnisse wesentlich beeinflussen, stehen im engen Zusammenhang mit der ausführlichen Vorgehensweise bei der Entnahme der Bitumenproben, sowie mit der richtig festgestellten Geometrie und einwandfreien Vorbereitung (HAGNER, 2003).

Das Rheometer und das Temperaturregelsystem sollten in Übereinstimmung mit dem Qualitätssicherungsverfahren des Laboratoriums in regelmäßigen Abständen kalibriert werden. Das regelmäßige Kalibrieren der Sensoren für Drehmoment und –winkel sowie des Temperaturfühlers ist auch eine Voraussetzung für die gute Präzision des Geräts und kann Prüffehler bei den Messdaten vermeiden. Möglicherweise sind die Arbeitsgrenzen von dem Hersteller bestimmt und zur Verfügung stehenden Angaben sind bei der Durchführung der Prüfungen zu berücksichtigen.

sichtigen. Es muss auf diesen Prüfbereich des Dynamischen Scher-Rheometers, den durch Vorgabe eines maximal zulässigen Drehmomentes beziehungsweise eines minimalen Verdrehwinkels beschrieben wird, geachtet werden und soll nicht überschritten werden (EN 14770:2006).

Ein weiterer Schwerpunkt bei der Betrachtung möglicher Fehlerquelle ist die Vorgehensweise bei der exakten Einhaltung von der bestimmten Prüftemperatur. Aufgrund des temperaturabhängigen viskoelastischen Verhaltens des Bitumens ist die Messtemperatur von großer Bedeutung. Die Regelungen bei der Probenvorbereitung müssen auch in Kauf genommen werden, damit die Ergebnisse auf eine gute Vergleichbarkeit und Wiederholbarkeit abzielen.

2.3 Auswertung und Interpretation der Prüfergebnisse

Die Versuchsdurchführung erfolgt in dem Bereich des linearen viskoelastischen Verhaltens, in dem der komplexe dynamische (Scher-)Modul von der (Scher-)Spannung oder Dehnung unabhängig ist.

Die ermittelten Kennwerte sind Resultat von dem gemessenen Ansprechen der Dehnung des Bindemittels auf die Schwing-Scherspannung. Alternativ dazu kann auf den Probekörper eine bekannte Schwing-Scherdehnung angewendet werden und die hervorgerufene Scherspannung gemessen werden.

Die Auswertung der Resultate ermöglicht sowohl die Klassifizierung der Bindemittel, als auch die Untersuchung der Eigenschaftenveränderungen bei variierender Prüftemperatur, Belastung oder Alterung. Die für die Darstellung und Beschreibung der rheologischen Eigenschaften erforderlichen graphischen Formen sind die so genannten Isothermen und Isochronen.

Isotherme stellen graphisch Gleichung oder Kurve dar, die das Verhalten eines Werkstoffes bei konstanter Temperatur beschreiben (Abb. 2-9). Die folgende Grafik zeigt den komplexen Schubmodul bei variierender Frequenz und konstanter Temperatur. Mit zunehmender Frequenz steigt G^* , d.h. mit steigender Belastungsgeschwindigkeit steigt der Widerstand gegen Verformung. Entsprechend der vorstehenden Erläuterungen bedeutet eine Zunahme der Belastungsfrequenz verkürzte Zeit zum Fließen und dementsprechend höhere Ansprüche an den elastischen Eigenschaften des Bindemittels.

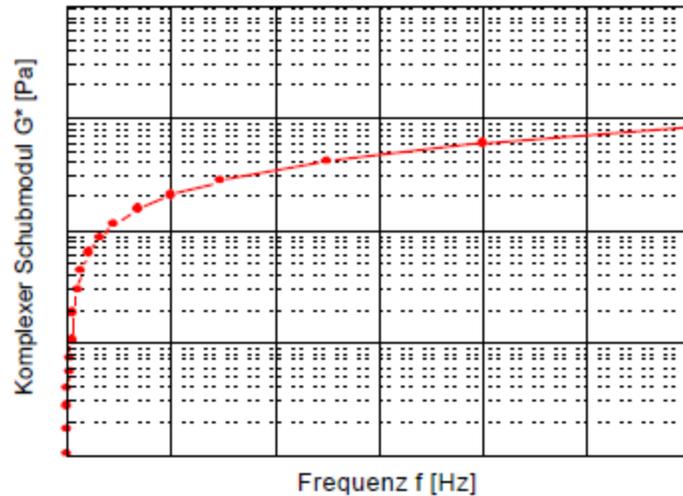


Abb. 2-9 Darstellung der Ergebnisse durch Isothermen (HAGNER, 2003)

Isochrone sind eine Darstellungsform, die das Verhalten eines Werkstoffes bei konstanter Belastungsfrequenz beschreiben (Abb. 2-10).

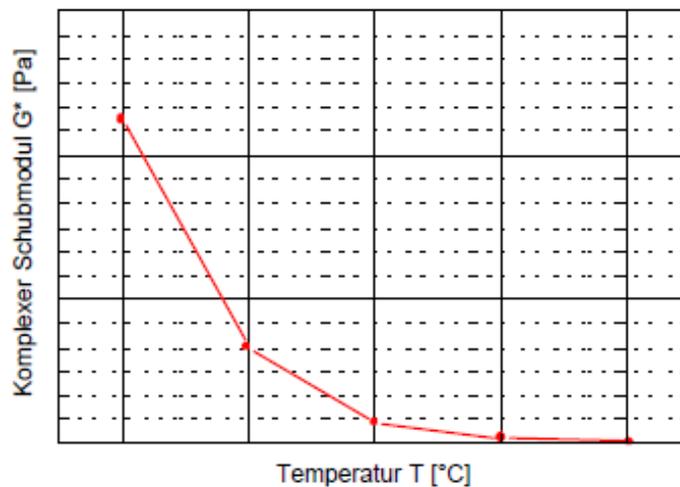


Abb. 2-10 Darstellung der Ergebnisse durch Isochronen (HAGNER, 2003)

Aus der Abbildung Abb. 2-10 ist es ersichtlich, dass der komplexe Schubmodul mit Temperatursteigerung sinkt, was eine Erkenntnis für die stark abnehmende Schersteifigkeit des Bitumens liefert. Das eher elastische Verhalten des Materials geht in viskoses über.

Isochronen ermöglichen auch detaillierte Aussagen zur Beschreibung der Auswirkung von Bindemittelmodifikationen oder Additiven, deren Zugabe zum Zwecke gewünschter Veränderungen des Temperaturverhaltens von Bitumen erfolgt, zu treffen (HAGNER, 2003).

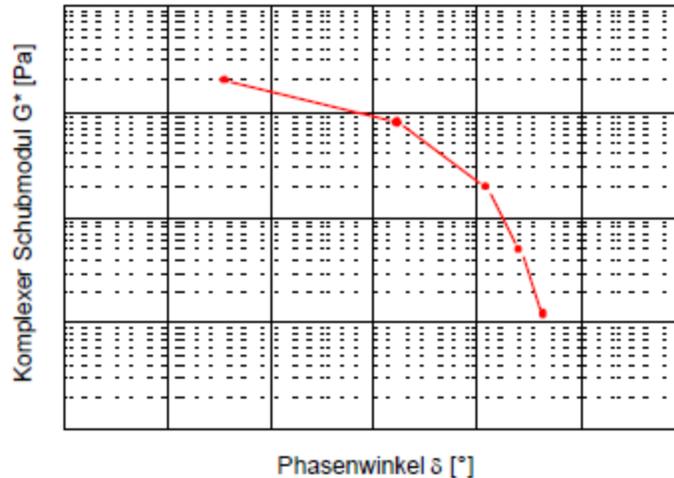


Abb. 2-11 Darstellung des komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels (HAGNER, 2003)

Das obige Diagramm (BLACK-Diagramm) (Abb. 2-11) ist die graphische Darstellung des Logarithmus des komplexen Schubmoduls G^* als Funktion des Phasenwinkels. Diese Präsentation der Messwerte ist vorteilhaft aufgrund ihrer Unabhängigkeit von der Belastungsfrequenz und der Prüftemperatur. Mit sinkendem Schubmodul drückt sich das viskose Verhalten des Materials aus und nimmt der Phasenwinkel zu. Somit kommt zum Ausdruck, dass der Widerstand des Bitumens gegen bleibende Verformung bei Temperaturanstieg abnimmt. Die anschauliche Gegenüberstellung der Komponenten des Schubmoduls - Verlustmodul G'' , der elastische Teil, und Speichermodul G' , der viskose Teil - ist auf Abb. 2-12 ermöglicht (HAGNER, 2003).

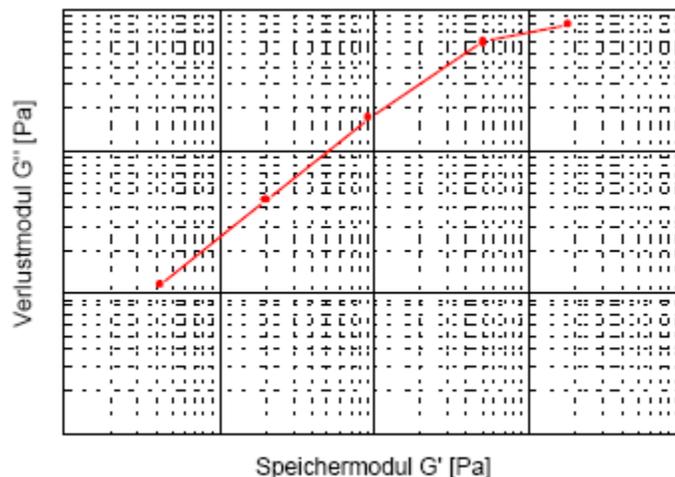


Abb. 2-12 Graphische Darstellung des Speicher- und Verlustmoduls (HAGNER, 2003)

Der Quotient $G^*/\sin\delta$ hat eigentlich keine physikalische Bedeutung und wird unbestimmt, wenn δ gegen Null strebt. Von der Gl. 2-9 und Gl. 2-13 folgt die Formel Gl. 2-14, die die reziproke Proportionalität zwischen der eingebrachten Arbeit pro Belastungszyklus im DSR W und dem Quotient beschreibt. Je höher $G^*/\sin\delta$, desto geringer wird W , bzw. desto geringer ist die Verformungsbeanspruchung des Materials. Hinsichtlich der Spurrinnenbildung wird ein möglichst hoher G^* und möglichst geringer δ angestrebt, damit der daraus hergestellte Asphalt genug steif und elastisch ist, um eine gute Standfestigkeit und vollständige Rückverformung bei der Radüberrollung zu gewährleisten.

Laut Normen (EN 14770:2006) ist der Quotient $G^*/\sin\delta$ mit einem Minimum von 1 kPa (ungealtertes Bitumen) bzw. 2,2 kPa (RTFOT-gealtertes Bitumen) im Temperaturbereich von 46°C bis 82°C begrenzt.

$$W = \pi \cdot \tau \cdot \gamma \cdot \sin \delta \quad \text{Gl. 2-13}$$

$$W = \pi \cdot \tau^2 \cdot \gamma \cdot \frac{1}{\frac{G^*}{\sin \delta}} \quad \text{Gl. 2-14}$$

Weingebrachte Arbeit pro Belastungszyklus im DSR

τSpannung

γDeformation

δPhasenverschiebungswinkel

G^*komplexer Schubmodul

Im Rahmen vieler neuen umfangreichen Untersuchungen erfolgt eine Gegenüberstellung der ermittelten Kennwerte G^* und δ mit den Gebrauchseigenschaften der daraus hergestellten Asphalte. Nach den Berichten von DESMAZES und SYBILSKI erfolgt eine gute Korrelation zwischen der Spurrinnenerscheinung und der Null-Scherviskosität (zero-shear-viscosity), die aus frequency-sweeps Versuche - Prüfung ausgewählter Bindemittel mit über die Prüfdauer variierender Belastungsfrequenz - erhalten wird (HAGNER, 2003).

Das Produkt $G^* \cdot \sin\delta$ stellt den Verlustmodul G'' dar, d.h. den imaginären Anteil (verlorenen Anteil) von G^* und ist nach oben hin limitiert. Als Grenzwert des Produktes $G^* \cdot \sin\delta$ ist in der Normung maximal 5.000 kPa (PAV-gealtertes Bitumen) im Temperaturbereich von 4°C bis 40°C festgelegt.

Die beiden Größen – die Arbeit und der Verlustmodul sind in direkter Proportionalität. Je höher $G^* \cdot \sin \delta$ wird, desto größer wird die eingebrachte Arbeit W (Gl. 2-15). Gemäß SHRP-Versuchen hat dieses Produkt große Aussagekraft bei der Feststellung des Widerstands von Asphalt gegen Ermüdungsrisse. Die notwendigen gebrauchungsverhaltensorientierten Eigenschaften wie leichte Verformbarkeit und zureichende Elastizität werden von einem niedrigen komplexen Schubmodul G^* und niedrigem Phasenverschiebungswinkel charakterisiert.

$$W = \pi \cdot \gamma^2 (G^* \cdot \sin \delta) \quad \text{Gl. 2-15}$$

Die Abbildungen Abb. 2-13 und Abb. 2-14 zeigen die Abnahme der Quotienten „ $G^*/\sin \delta$ “ und „ $G^* \cdot \sin \delta$ “ bei zunehmender Temperatur. Die Punkte, wo die Kurven die Geraden der Grenzwerte schneiden, zeichnen die für die Gebrauchsverhaltenseinteilung maßgebenden Temperaturen. (LITZKA, 2003).

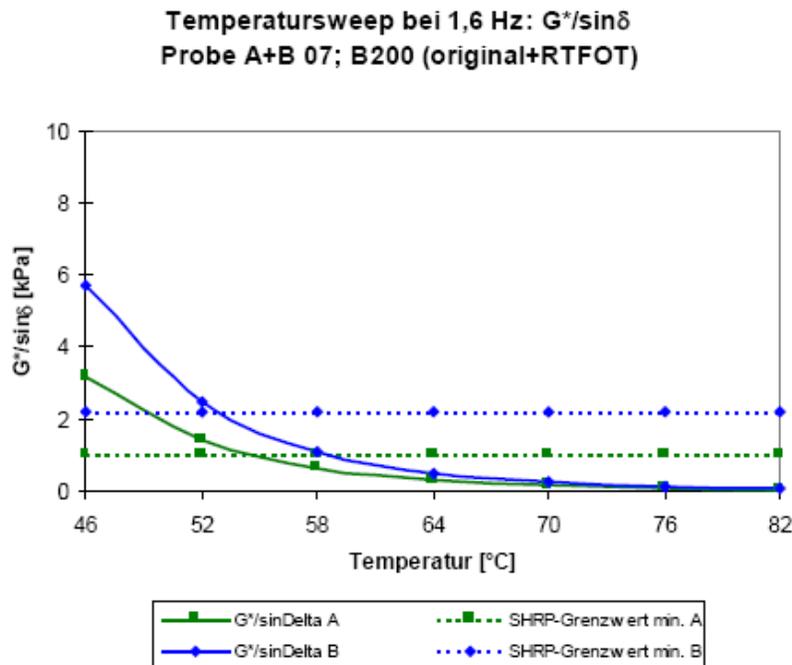


Abb. 2-13 Quotient $G^*/\sin \delta$ in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, bei 1.6Hz Frequenz (LITZKA, 2003)

Temperatursweep bei 1,6 Hz: $G^* \cdot \sin \delta$
Probe C 07; B200 (PAV)

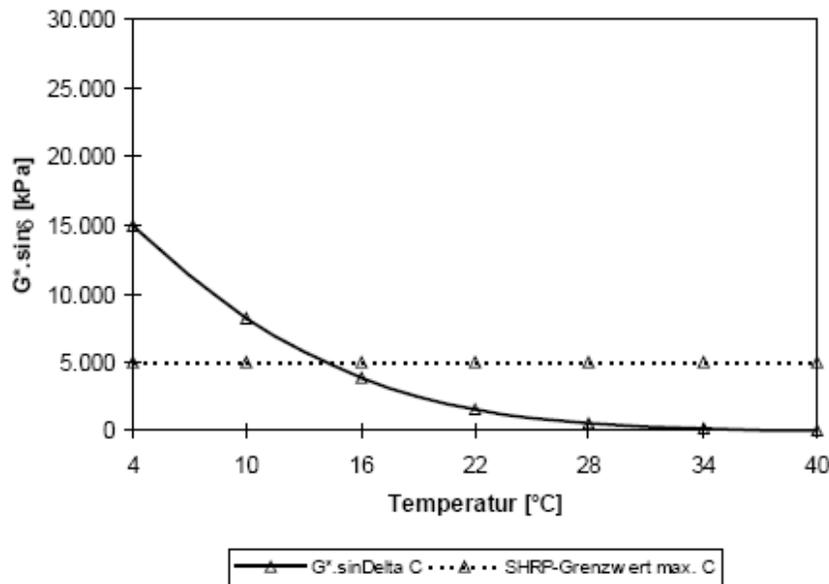


Abb. 2-14 Quotient $G^* \cdot \sin \delta$ in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, bei 1.6Hz Frequenz (LITZKA, 2003)

Beachtenswert ist bei der Auswertung der Ergebnisse die Anwendung des Zeit-Temperatur-Superpositionsgesetzes, das die Beschreibung der Bindemittleigenschaften, die außerhalb des messbaren Temperaturbereiches des Prüfverfahrens liegen, ermöglicht. So kann z.B. die erhaltene Isothermen-Masterkurve durch sogenanntes „shiften“ zu einer Kurve für eine Referenztemperatur zusammengefügt werden (HAGNER, 2003).

Die mit dem DSR ermittelten Kennwerte bieten auch die aussagekräftige Möglichkeit, neben dem direkten Vergleich von Messergebnissen mit Anforderungswerten auch die Eigenschaften unterschiedlicher Bindemittel, Modifikatoren und/oder Alterungszustände miteinander zu vergleichen. Das Ziel aller Untersuchungen im Rahmen des SHRP Programms ist die Beurteilung des Verformungs- beziehungsweise des Ermüdungswiderstandes des Bitumens zu erfüllen und detaillierten Aussagen über die gebrauchungsverhaltensorientierten Eigenschaften zu treffen. Die aufgrund der verschiedenen Studien beruhenden Untersuchungen setzen sich damit auseinander, ob die Beurteilungskriterien das tatsächliche Bitumenverhalten zutreffend erfassen können. Die verschiedenen Autorstellungen diesbezüglich sind widersprüchlich (HAGNER, 2003).

Molenaar berichtet über einen linearen Zusammenhang zwischen dem komplexen Schubmodul und der Nadelpenetration. Wallner und Wörner stellen die Korrelation zwischen den Ergebnissen der Untersuchung des Erweichungspunktes mit Ring und Kugel und dem Verformungseigenschaften beschreibenden Kennwert $G^*/\sin \delta$ fest. Die Forschungsergebnisse von Renken

und Hagner bestätigen einen engen Zusammenhang zwischen $G^*/\sin\delta$ und der im Kraft-Duktilometer gemessenen Maximalkraft (HAGNER, 2003).

Wegen der mangelnden Erfahrung bei der Beurteilung der rheologischen Kennwerte - komplexer Schubmodul und Phasenwinkel - widmen sich viele Untersuchungen der Ermittlung von Korrelationen mit konventionellen Bindemittelkennwerten (Nadelpenetration, Erweichungspunkt mit Ring und Kugel usw.), für die ein ausreichender Bewertungshintergrund existiert. Viele neue Veröffentlichungen richten sich auf die Prognose der Einflüsse der Bindemittleigenschaften auf den damit hergestellten Asphalt und seines Verformungs- und das Ermüdungsverhalten (HAGNER, 2003).

Die ersten Ergebnisse in dieser Richtung werden im Rahmen des SHRP geliefert. Die erbringen einen Nachweis für die Korrelation zwischen der am Asphalt festgestellten Bruchlastwechselzahl und dem Produkt $G^*\sin\delta$. Zur Beurteilung und Untersuchung der Ermüdungseigenschaften wird als geeignetes Messinstrument der Dynamischen Scherrheometer angenommen. Nachfolgende Forschungsarbeiten aber ziehen die Aussagekraft der vorigen Ergebnisse in Zweifel.

Nach einer Studie von E.Masad und Ch.Huang (MASAD, 2008) lässt es sich bei der Beobachtung des Verhaltens von Asphalt unter äußerer Beanspruchung erkennen, dass die Dehnungen im Asphalt überwiegend vom Bindemittel aufgenommen werden, da das Bindemittel gegenüber dem Gestein den deutlich geringeren Elastizitätsmodul aufweist. Die durchschnittliche Bindemittelbelastung ist etwa achtmal größer als diese der ganzen Mischung des Asphalts. Mit Hilfe des ABAQUS FE Software kann die auftretende Deformationsverteilung in den Bindemittelfilmen errechnet werden. Die Bindemittelfilmedehnungen können aber unter Beanspruchung des Asphalts im linear-viskoelastischen Bereich nicht vollkommen registriert werden. Bei höherem Belastungsniveau verhielt sich das Material nicht linear, was auch Untersuchungen der Bindemittel zur Überprüfung der Gebrauchseigenschaften in den nicht linear-viskoelastischen Bereich erfordert. Aufgrund der nachfolgenden Resultate der Bindemittelprüfungen im nicht linear-viskoelastischen Bereich äußert sich ein gutes Übereinstimmen mit den am Asphalt gemessenen Kennwerten sowie eine deutliche Differenzierung der Eigenschaften zwischen modifizierten und nicht-modifizierten Bindemitteln. Im Jahr 2008 setzt sich E.Masad (MASAD, 2008) mit der Entwicklung von Rahmen für die nichtlineare viskoelastische Analyse von Bitumen unter der Berücksichtigung der möglichen Wechselwirkungen zwischen Beanspruchung, Temperatur, Frequenz und Alterung auseinander. 2002 entwickeln A.Collop und G.Airey (COLLOP, 2002) ein mathematisches Model fürs Interpretieren der Resultaten und Untersuchung der Anwendbarkeit der Zwei-Platten Model DSR und das Bitumenverhalten gegenüber Scherdeformation.

3. MATERIALIEN UND PRÜFPROGRAMM

3.1 Bindemittelproben

Die für die Untersuchungen vorgesehenen Bindemittelproben werden im Anlieferungszustand (ungealtert) genommen. Es sind dies ein Straßenbaubitumen 70/100 und ein SBS-modifiziertes Bitumen PmB 45/80-65. Zusätzlich zu den Kriechversuchen am DSR werden auch die konventionellen Bitumenkennwerte bestimmt.

Zu diesen Prüfungen zählen Nadelpenetration, Erweichungspunkt mit Ring und Kugel, Brechpunkt nach Fraaß und elastische Rückformung (Abb. 3-1), die die wesentliche Grundlage zur Klassifizierung der Bitumensorten nach ÖN EN 12591 (Straßenbaubitumen) und ÖN EN 14023 (polymermodifizierte Bitumen) bilden.

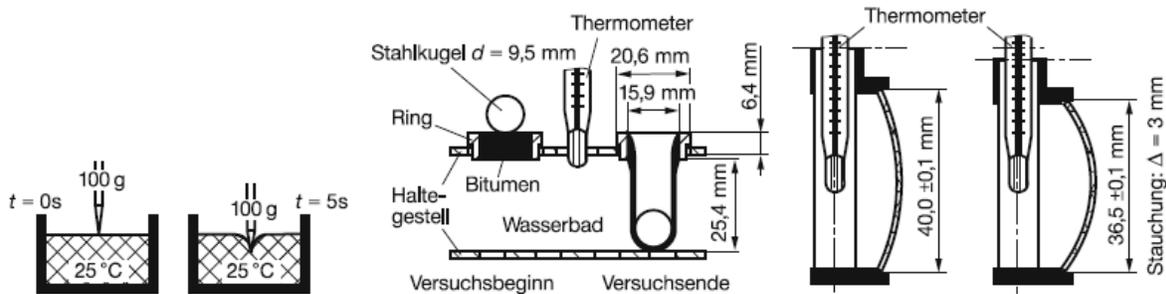


Abb. 3-1 Konventionelle Prüfungen – (von links nach rechts) Nadelpenetration, Erweichungspunkt mit Ring und Kugel, Brechpunkt nach Fraaß (NEROTH, 2011)

Die Benennung der Bitumen erfolgt nach der Spanne der Nadelpenetration, was ein Prüfverfahren, das eine Aussage über die Härte des Bitumens ermöglicht (Abb. 3-1 links), darstellt. Als Ergebnis des Versuchs erhält man die Eindringtiefe einer Nadel in die Bitumenprobe bei einer festgelegten Temperatur von $+25^\circ\text{C}$ innerhalb einer Belastungsdauer von 5 Sekunden. Die Angabe der Einsinktiefe (Penetration) erfolgt in $1/10\text{ mm}$. Die Bezeichnung eines Bitumens gibt an, in welcher Spanne sich seine Nadelpenetration befindetet, d.h. ein Bitumen 70/100 besitzt eine Nadelpenetration von 70 $1/10\text{ mm}$ bis 100 $1/10\text{ mm}$. Entsprechend der EN 1426 liegen dem Ergebniswert der Nadelpenetration mindestens drei Messungen jeweils einer Bindemittelprobe zugrunde. Das Prüfverfahren kann bis zu einer Nadelpenetration von 350 $1/10\text{ mm}$ angewendet werden.

Der Erweichungspunkt nach Ring und Kugel dient zur Klassifizierung von Bitumen laut EN 1427. Bei dieser international gebräuchlichen Methode wird die Temperatur bestimmt, bei der eine Bitumenschicht unter festgelegten Bedingungen bei gleichmäßiger Erwärmung in einem Flüssigkeitsbad eine Verformung von $25,4 \pm 0,2$ Millimeter durch eine aufgelegte Stahlkugel mit

einem etwa 9,8 Millimeter Durchmesser und einem Gewicht von 3,5 Gramm erfährt (Abb. 3-1 rechts). Die bei Erreichen dieser Verformung in dem Flüssigkeitsbad gemessene Temperatur wird als Erweichungspunkt in °C angegeben und gibt eine Auskunft über das Wärmeverhalten des Bindemittels. Je höher der Erweichungspunkt liegt, desto härter ist das Bitumen. Die „Weichheit“ des Bitumens und die Nadelpenetration sind direkt proportional. Je niedriger der EP_{RuK} liegt, desto höhere Pen-Werte werden im Allgemeinen ermittelt. Oxidationsbitumen zeigen keinen solchen eindeutigen Zusammenhang zwischen EP_{RuK} und Pen 25 °C.

Dieses Prüfverfahren ist für Straßenbaubitumen anwendbar, deren Erweichungspunkte Ring und Kugel zwischen 25 °C und 160 °C liegen.

Eine weitere konventionelle Methode zur Klassifizierung der Bitumen ist der Brechpunkt nach Fraaß. Dieses Verfahren bestimmt die Temperatur, bei der ein Film aus Bitumen, welcher auf ein Prüfblech aufgeschmolzen oder aufgepresst wurde, bei einer vorgeschriebenen Abkühlung und Durchbiegung des Prüfbleches bricht. Der Messwert des Brechpunktes wird in °C angegeben und gibt die Temperaturgrenze an, bei der das plastische Verhalten des Bitumens in ein starr-elastisches Verhalten übergeht. Diese Prüfung erlaubt einen Ausschluss über das Tief-temperaturverhalten des Bitumens. Aus dem Erweichungspunkt Ring und Kugel und dem Brechpunkt nach Fraaß ermittelt man die Plastizitätsspanne von Bitumen: Plastizitätsspanne: $T_{RuK} - T_{BP}$.

Die an den Bindemitteln im Anlieferungszustand bestimmten Brechpunkte nach Fraaß erfüllen jeweils die Anforderungen EN 12593 und EN 14023 und die Ergebnisse sind in den Tabellen Tab. 3-2 und Tab. 3-1 erfasst.

Die Prüfung der elastischen Rückstellung des Bitumens ist eine Ergänzung der Duktilitätsprüfung nach ÖN EN 52013, der Ausdehnungsfähigkeit der Bitumenfäden in cm bei 25°C und gilt nur bei polymermodifizierten Bitumen. Um die elastischen Eigenschaften der polymermodifizierten Bitumen zu erfassen, wird das Verfahren der elastischen Rückstellung eingeführt (Abb. 3-2) (THIENEL, 2011).

Bei dieser Untersuchungsmethode wird ein Bitumenfaden im Duktilometer auf 200 mm Länge gedehnt und nach einer Vorschubausstellung mit einer Schere in der Mitte geschnitten. Nach einer Wartezeit von 30 min wird die lichte Weite zwischen den Fadenenden nach der elastischen Rückstellung gemessen. Auf die Ausgangslänge (200 mm) bezogen ergibt sich der Wert der elastischen Rückstellung in % (NEROTH, 2011).

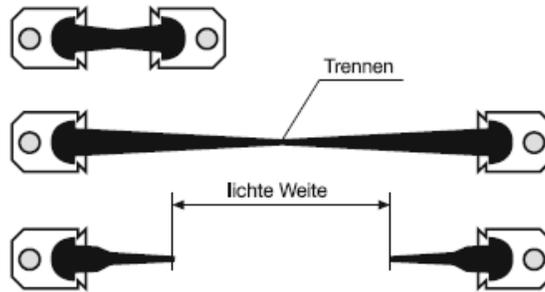


Abb. 3-2 Schema der Elastischen Rückformung (Neroth, 2011)

Nach den Prüfungen bestimmte Kennwerte werden in den folgenden Tabellen zusammengefasst (Tab. 3-2 und Tab. 3-1). Die Prüfberichte von den konventionellen Prüfungen können zahlenmäßig im Anhang dieses Berichtes angesehen werden.

B144 (PmB45/80-65)

Messung Nr.	Nadelpenetration [1/10mm]	Erweichungspunkt R.und K. [°C]	Brechpunkt nach Fraaß [°C]
1	57,30	76,84	-21,60
2	55,20	77,84	-23,90
3	55,70	-	-
Mittelwert	56,1	77,3	-22,8

Probe (Mess.1)	Elastische Rückstellung		
	Ausdehnung b. Bruch [mm]	Abstand d [mm]	Elast. Rückstellung [%]
1	20,00	17,00	86,50
2	20,00	18,00	87,50
Mittelwert	20,00	17,50	87,00

Tab. 3-1 Prüfergebnisse von den konventionellen Prüfungen mit dem PmB 45/80-65

B136 (70/100)

Messung Nr.	Nadelpenetration	Erweichungspunkt R.und K.	Brechpunkt nach Fraaß
	[1/10mm]	[°C]	[°C]
1	80,40	45,21	-18,70
2	78,30	45,03	-19,50
3	82,40	-	-
Mittelwert	80,4	45,1	-19,1

Tab. 3-2 Prüfergebnisse von den konventionellen Prüfungen mit B135 (70/100)

3.2 Prüfeinrichtungen

Nach den Anforderungen gemäß ÖNORM EN 14770:2006 muss das Dynamische Scherrheometer mit einem integrierten Temperaturregelsystem oder einer externen Temperaturregelung versehen sein, mit dem die Temperatur während der gesamten Prüfdauer mit einer Fehlergrenze von $\pm 0,1^\circ\text{C}$ geregelt werden kann. Von fundamentaler Bedeutung ist das exakte Ausrichten der Prüfgeometrie, damit die parallelen Platten einen konstanten Abstand über die gesamte Prüffläche haben. Das Temperaturregelsystem muss die beiden Platten anschließen, damit es keine Temperaturgefälle dazwischen entsteht. Es ist sicherzustellen, dass die temperierende Flüssigkeit, wenn anders als Wasser, keinen Einfluss auf die Bitumeneigenschaften ausübt. Als Anmerkung werden in den Normen Abstandseinstellungen von 0,5mm bis 2,00mm für bitumenhaltige Bindemittel von 8mm bis 25mm als geeignet empfohlen. Hinsichtlich der Arbeitsbereiche des Geräts von 1kPa bis 10MPa ($\pm 2\%$) sind laut Normung 25mm Platten auf Steifigkeitswerte von 1kPa bis 100kPa abgestimmt und 8mm Platten auf Werten im Bereich von 100kPa bis 10MPa. Falls die Nachgiebigkeit des Geräts die Ergebnisse nicht beeinflusst, können auch andere Platten und Abstandstellungen verwendet werden. Die Gussformen müssen aus Silikon oder einem ähnlichen Werkstoff bestehen, das nicht am Probekörper bleibt.

3.3 Vorbereitung

3.3.1 Allgemeine Vorbereitung



Abb. 3-3 Dynamisches Scherrheometer

Das Dynamische Scherrheometer ist entsprechend der in den Herstelleranleitungen angegebenen Reihenfolge einzurichten, um die Stabilität des Systems zu gewährleisten. Zuerst ist die Luftzufuhr für das DSR Haake MARS zu öffnen (Abb. 3-4), danach der Universal Temperatur Controller und der Mars Controller einzuschalten.



Abb. 3-4 Luftzufuhr



Abb. 3-5 Universal Temperatur und MARS Controller

Dann muss der PC Rechner angeschaltet werden, sowie die Temperaturanlage Haake Phoenix II (Abb. 3-6). Die Software ist mit dem Rheowin-Job-Manager zu starten.



Abb. 3-6 PC-Rechner



Abb. 3-7 Wasserbad Haake II

Anschließend trifft man Auswahl der Systemgeometrie und stellt den richtigen Abstand ein, was die Genauigkeit der Ergebnisse stark beeinflussen kann. Die Einstellungen müssen den von dem Hersteller bestimmten Arbeitsgrenzen entsprechen. Es ist ratsam, die Präzision des Temperaturregelsystems mit einem kalibrierten Temperaturmessgerät in regelmäßigen Zeitabständen nachzuprüfen, weil das auch negativ auf die Resultate ausspiegeln könnte.

Vor dem Einsetzen des Probekörpers ist der Abstand zwischen den Platten einzustellen, wobei beide Platten nominal die gleiche Temperatur haben müssen. Die Platten müssen gut mit einem Lösungsmittel (z.B. Toluol) gereinigt werden und mit einer Einstellung der Temperatur von einem Höchstwert des Erweichungspunkt des Bindemittels plus $(20\pm 5)^{\circ}\text{C}$ oder auf $(90\pm 5)^{\circ}\text{C}$ (je nachdem welcher Wert kleiner ist) vorbereitet werden, damit ein guter Verbund mit dem Probekörper gewährleistet wird (EN 14770:2006).

3.3.2 Probekörpervorbereitung

Eine Menge von ca.10g des zu messenden Bitumens wird erhitzt (Abb. 3-8). Danach sind die dafür vorgesehenen Kautschukformen bis zum Rand mit der Probe zu füllen und anschließend mit einem Deckel zu versehen. Normalerweise misst man ungealtertes und RTFOT-gealtertes Bitumen mit einem Plattendurchmesser von 25mm und einem Messspalt von 1mm. PAV-gealtertes Bitumen wird mit einem Plattendurchmesser von 8 mm und einem Messspalt von 2mm gemessen.



Abb. 3-8 Erhitzung und Homogenisieren des Bitumens, Gussformen und Spateln

Während das Bitumen in der Kautschukform auf Raumtemperatur abkühlt, wird der Messsensor des DSRs auf Messtemperatur vorgewärmt. Der schon abgekühlte Probekörper ist an die obere Platte zu kleben und durch einen internen Wegaufnehmer mit hoher Präzision auf die ausgewählte Abstandseinstellung plus 0,05mm zu bringen, damit ein guter mechanischer Verbund zwischen den Platten und der Probe erreicht wird (Abb. 3-9). Die Vortemperierung der Sensor ist unbedingt nötig, da sonst, speziell bei hartem oder hochmodifiziertem Bitumen, der Messspalt infolge hoher Bitumensteifigkeit nicht so leicht einstellbar ist. Es ist beachtungswert, dass nach dem Zusammenfahren der Platten ein Materialüberschuss erhalten wird, der danach mit einem Messer oder Spatel am Plattenrand abgeschnitten wird. Dieser Arbeitsschritt ist, wie nachfolgend noch erörtert wird, von einer besonderen Bedeutung hinsichtlich der Präzision des Prüfverfahrens. Bedeckt der Probekörper nicht die gesamte Messplatte, ist dieser zu entnehmen und ein neuer Probekörper vorzubereiten.

Anschließend ist die obere Platte auf den eingestellten Prüfabstand $\pm 0,01\text{mm}$ zu senken. Dadurch entsteht ein kleiner „Bitumenbauch“. Diese Vorgehensweise muss unbedingt eingehalten werden, da diese Prozedur in den SHRP-Richtlinien genau vorgeschrieben ist und nur so vergleichbare Werte liefert.

Nachdem der Messspalt genau eingestellt wird, wird der Sensor mit der Bitumenprobe auf Messtemperatur erhitzt. Dies geschieht mittels einer Peltier-Temperiereinheit, die mit dem Haake Phoenix II Wasserbad temperiert wird. Nachdem die Messtemperatur erreicht wird und sich stabilisiert hat, muss man noch mindestens 10min mit dem Starten der eigentlichen Messung warten, um eine gleichmäßige Durchtemperierung des gesamten Sensors und der Bitumenprobe zu gewährleisten.

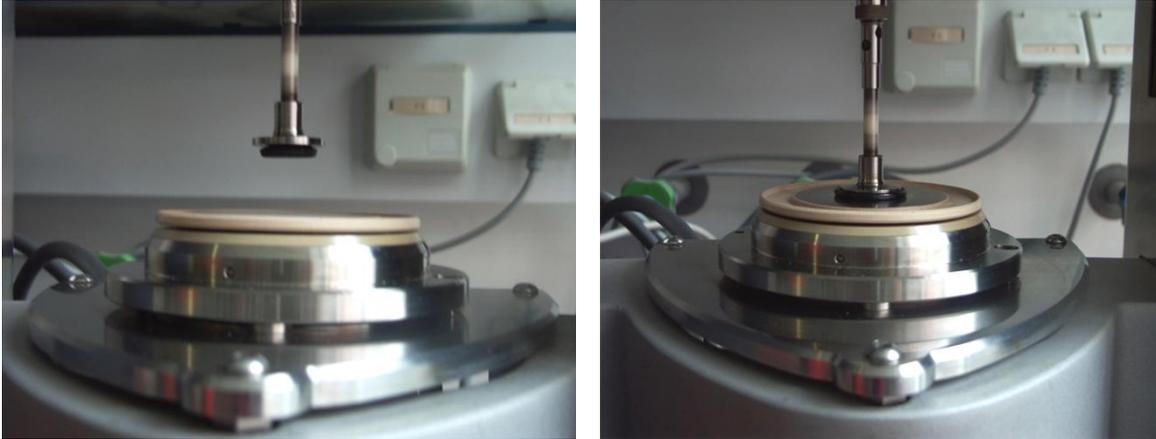


Abb. 3-9 Kleben und Zusammenfahren der Platten

3.4 Untersuchung des Kriechverhaltens von Bitumen im DSR

3.4.1 Festlegung der Prüfmodalitäten

Für die im Rahmen dieser Untersuchungen durchgeführten Prüfungen mithilfe des Dynamischen Scherrheometers wird ein Temperaturbereich zwischen $-25\text{ °C} \leq T \leq +0\text{ °C}$ gewählt.

Zur Erfüllung der vergleichenden Betrachtung der viskoelastischen Eigenschaften der unterschiedlichen Bindemittelarten ist es erforderlich, alle Bindemittelproben im ersten Newtonschen Bereich zu untersuchen, in dem sich das Bitumen linear-viskoelastisch verhält. Das setzt proportionale Änderung der resultierenden Verzerrung nach Erhöhung der aufgebrachtten Scher-spannung voraus.

Die Festlegung der dem Untersuchungsprogramm zugrundeliegenden Belastung wird anhand der Ergebnisse der Optimierungsversuche und aus Erkenntnissen abgeschlossener Forschungsarbeiten getroffen, unter der Berücksichtigung, dass sich die Bindemittelproben linear-viskoelastisch verhalten und somit alle Messwerte der verschiedenen Bindemittel direkt untereinander vergleichbar sind. Die Schubspannung wurde größtmöglich gewählt, um an steifen Bindemitteln bei tiefen Temperaturen messbare Verzerrungen zu erzielen und auch den Anspruch der Eigenschaften der weichen Bindemittel im linear-viskoelastischen Bereich zu gewährleisten. Es muss eine klare Differenzierung zwischen den Bindemittelarten und eine gute Wiederholbarkeit der gelieferten Messergebnisse erreicht werden (HAGNER, 2003).

Die Messungen mit dem Dynamischen Scherrheometer werden mit Platte-Platte Messanordnung im spannungskontrollierten Modus betrieben. Die zu untersuchenden Proben sind mit einer Dicke von 1 oder 2mm und einem Durchmesser von 8 oder 25mm. Der gewählte Temperaturbereich ist von $-25\text{ °C} \leq T \leq +0\text{ °C}$. Die Schubspannungen werden mit $\tau = 10\ 000\text{ Pa}$, $\tau = 14\ 400\text{ Pa}$, $\tau = 20\ 000\text{ Pa}$ festgelegt. Die ermittelten Werte bei dem statischen Kriechversuch mittels DSRs werden der temperaturabhängige viskoelastische Schubmodul und die erzwungene Ver-

zerrung γ . Die folgende Tabelle Tab. 3-3 zeigt die Kombinationen der Untersuchungen und das vollständige Prüfungsprogramm.

	Temperatur	Durchmesser	Spalt	Schubkraft
B144	-0°÷-25°	8mm/25mm	1mm/2mm	14 400Pa
B136	-0°÷-25°	8mm/25mm	1mm/2mm	14 400Pa

	Temperatur	Messungskonfiguration				Spannung		
		Durchmesser 8mm		Durchmesser 25mm		10 000 Pa	14 400 Pa	20 000 Pa
		Spalt 1mm	Spalt 2mm	Spalt 1mm	Spalt 2mm			
Bindemittel B144	0	x	x	x	x			
	-5		x	x				
	-10		x	x		x	x	
	-15		x	x			x	
	-20		x	x			x	
	-25	x	x	x	x		x	
Bindemittel B136	0		x	x			x	
	-5		x	x			x	
	-10		x	x		x	x	
	-15		x	x			x	
	-20		x	x			x	
	-25		x	x			x	

Tab. 3-3 Prüfungsprogramm - Modalitäten

3.4.2 Durchführung

Mit der auf dem PC installierten Software Program Rheowin wird durch die Nullpunkteinstellung die genaue Spaltbreite definiert. Das Prüfprogramm – statische Belastung, Prüftemperatur und Belastungsdauer wird ebenfalls über die Software eingestellt. Nachdem der vollständigen Temperierung mittels weißer Gummiabdeckung sichergestellt ist (Abb. 3-10), kann der eigentliche Messungsvorgang beginnen (Abb. 3-11).



Abb. 3-10 Weiße Gummiabdeckung der Prüfprobe

Der Belastungsvorgang stellt eine statische Kriechprüfung mit einer konstanten eingebrachten Schubkraft in einem Zeitraum von 3600s dar (Abb. 3-11). Der an das DSR angeschlossene PC ermöglicht neben der Messsteuerung auch die Datenauswertung. Dabei erfolgt die Bestimmung der erzwungenen Verzerrung sowie des viskoelastischen Schubmoduls G bei einer definierten Scherspannung und temperaturgeregelten Prüfgeometrie, die die zeitabhängige Steifigkeit beschreibt und den Widerstand, den die Substanz einer aufgezwungenen Verformung (Scherung) entgegenhält, feststellt.

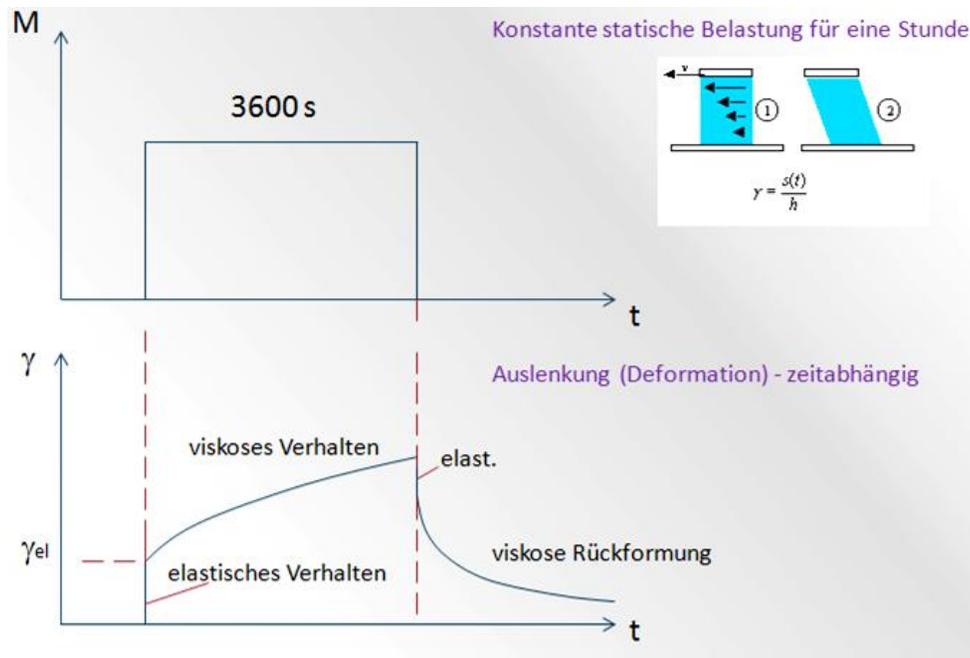


Abb. 3-11 Graphische Darstellung der Messungsvorgang und des viskoelastischen Verhaltens der Bitumenprobe

Die Belastung ist konstant und dauert eine Stunde, wobei die Deformation erst als spontan elastisch auftritt - γ_{el} . Danach drückt sich das viskose Verhalten des Bitumens aus und bei der Entlastung tritt zuerst spontan elastische und danach viskose Rückformung (Rückkriechen). Der viskoelastische zeitabhängige Schubmodul kann rechnerisch von dem Moment und der Auslenkung ermittelt werden.

4. ZUSAMMENSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN BITUMEN

Im Rahmen dieser Diplomarbeit, in der zwei Bindemittel Oxidationsbitumen 70/100 und Polymermodifiziertes Bitumen PmB 45/80-65 im Anlieferungszustand umfangreichen Kriechprüfungen unterzogen sind, werden die ermittelten Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen dargestellt.

Die Messung mittels Dynamischem Scherrheometer erfolgt bei dem spannungskontrollierten Versuch in einem Prüftemperaturbereich von $-25\text{ °C} \leq T \leq 0\text{ °C}$ mit Intervallen von $\Delta T = 5\text{ °C}$. Die ermittelten Kennwerte sind der Schubmodul G und die Verzerrung γ . Die Untersuchungen basieren auf den Ergebnissen einer Dreifachbestimmung und aus Gründen der Übersichtlichkeit werden in getrennten Diagrammen vorgestellt.

Die Vielzahl der Untersuchungsergebnisse erfordert die Darstellung auf wesentliche Prüfergebnisse ausgewählter Analysen zu reduzieren. Im Anhang sind jedoch die vollständigen Prüfergebnisse und die zugehörigen Abbildungen einzusehen.

Im folgenden Abschnitt werden die mit dem Dynamischen Scherrheometer ermittelten Prüfergebnisse der beiden Bindemittel bei unterschiedlichen Prüfbedingungen – Temperatur und Beanspruchung dargestellt und verglichen. Durch die ausführlichen Untersuchungen werden auch weitere Einflüsse auf die Bitumeneigenschaften erfasst. Die berechneten Kennwerte sowie festgestellten Verhältnissen und Beziehungen sind graphisch dargestellt und können jeweils in tabellarischer Form im Anhang eingesehen werden.

4.1 Bindemittleigenschaften als Folge der Modifikation

Bei Verwendung von geeigneten polymermodifizierten Bindemitteln können härtere Bitumen verwendet werden ohne dabei die Gefahr der Rissbildung bei tiefen Temperaturen einzugehen. Durch die Modifizierung mit Polymeren werden die qualitativen Vorteile von Elastomeren schnell erkennbar, weil sich mit ihnen das Viskositäts-Temperaturverhalten sowie die elastischen Eigenschaften für die gestiegenen Anforderungen an das Gebrauchsverhalten besser optimieren lassen.

Ein Polymerzusatz von 3 bis 5 % unterschiedlichster Kunststoffe bewirkt eine Erhöhung der Viskosität des Materials und somit verbessern sich die Standfestigkeit und das Kälteverhalten. Ein wesentlicher Unterschied zum normalen Straßenbaubitumen besteht in der größeren Plastizitätsspanne und in der elastischen Rückformung. Diese elastische Eigenschaft des PmBs spiegelt sich bei den Resultaten der durchgeführten Prüfungen aus, obwohl es sich durch viele Prüfverfahren meist nur indirekt nachweisen lässt.

Die Ausprägung dieser Erscheinung lässt sich durch die Ermittlung des Schubmoduls bei den Messungen erkennen. Bei der Betrachtung der Werte des Schubmoduls ist es festzustellen,

dass sie generell mit abfallender Temperatur zunehmen und Bindemittel mit größerer Viskosität auch größere Werte des Schubmoduls besitzen (HAGNER, 2003) (Abb. 4-1).

Folglich sind in diesen Untersuchungen bei dem polymermodifizierten Bindemittel PMB 45/80-65 die größten Kennwerte zu registrieren (Abb. 4-2).

Im Prinzip liefert das Oxidationsbitumen 70/100 geringste Werten. Die Grafiken der Mittelwerte bei B 70/100 und PMB 45/80-65 zeigen einen analogen Kurvenverlauf der ermittelten Schubmodule.

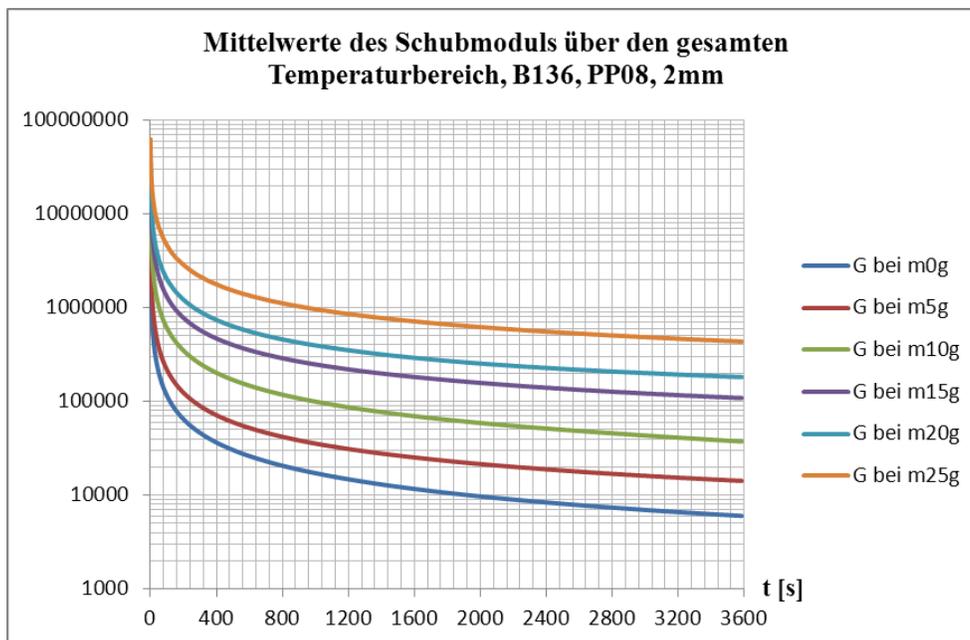


Abb. 4-1 Schubmodule über den gesamten Temperaturbereich, B 70/100, PP08, 2mm

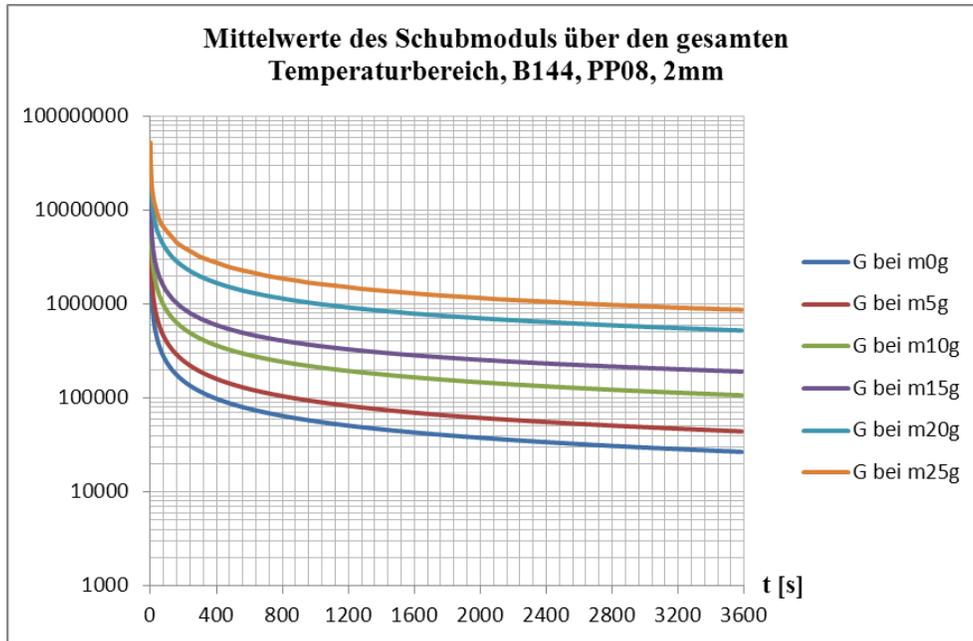


Abb. 4-2 Schubmodule über den gesamten Temperaturbereich, PmB 45/80-65, PP08, 2mm

Die Grafiken Abb. 4-3 und Abb. 4-4 zeigen den Kurvenverlauf des Vergleichsfaktors zwischen den beiden Bindemitteln zum Zeitpunkt $t=0s$ und $t=3600s$. Während die ermittelten Module des Bindemittels PmB PMB 45/80-65 bei der Prüftemperatur $T=-25^{\circ}C$ in 3600-ter Sekunde lediglich etwa den doppelten Wert gegenüber den B 70/100 darstellen, unterschieden sie sich im oberen des geprüften Temperaturbereiches bei $-0^{\circ}C$ etwa um den Faktor fünf. Das heißt, die relative Spreizung der Messergebnisse wird mit steigender Prüftemperatur größer (Tab. 4-2) und bei höheren Temperaturen ist es am Ende der Belastung eine stärkere Ausprägung des Unterschieds zwischen den beiden Bindemittel als Folge der Modifikation des polymermodifizierten Bitumens zu bemerken.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der Einfluss der Modifikation im Nullpunkt noch nicht ausgeprägt ist und mit dem Zeitverlauf gewinnt sie an die Bedeutung und beeinflusst stärker die Ergebnisse (Tab. 4-1 und Tab. 4-2). Im Zeitpunkt Null liefert das Straßenbaubitumen 70/100 aufgrund der noch nicht "aktivierten" Modifikation des polymermodifizierten Bitumens höhere Werte des Null-Schubmoduls als PMB 45/80-65.

Tab. 4-1 Vergleich der Schubmodule (Mittelwerte) im Nullmoment (0s), PP08, 2mm Spalt – Bindemittel B 70/100 und PmB PMB 45/80-65

Bindemittel	Zeitpunkt	G bei m0g	G bei m5g	G bei m10g	G bei m15g	G bei m20g	G bei m25g
B144	5,20E-02	5,82E+06	7,65E+06	1,28E+07	3,23E+07	3,66E+07	4,84E+07
B136	5,20E-02	6,29E+06	1,11E+07	2,19E+07	3,39E+07	3,54E+07	5,09E+07
Faktor	-	9,25E-01	6,92E-01	5,83E-01	9,54E-01	1,03E+00	9,50E-01

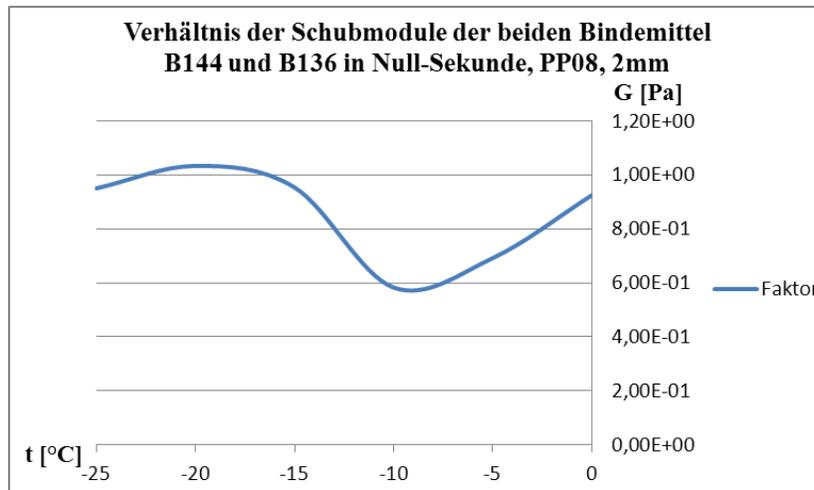


Abb. 4-3 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule beider Bindemittel im Nullmoment

Tab. 4-2 Vergleich der Schubmodule (Mittelwerte) am Ende der Belastung (3600s), PP08, 2mm Spalt – Bindemittel B 70/100 und PmB PMB 45/80-65

Bindemittel	Zeitpunkt	G bei m0g	G bei m5g	G bei m10g	G bei m15g	G bei m20g	G bei m25g
B144	3,60E+03	2,67E+04	4,41E+04	1,07E+05	3,35E+05	5,23E+05	7,04E+05
B136	3,60E+03	6,00E+03	1,42E+04	3,79E+04	1,08E+05	1,82E+05	4,34E+05
Faktor	-	4,45E+00	3,11E+00	2,82E+00	3,08E+00	2,88E+00	1,62E+00

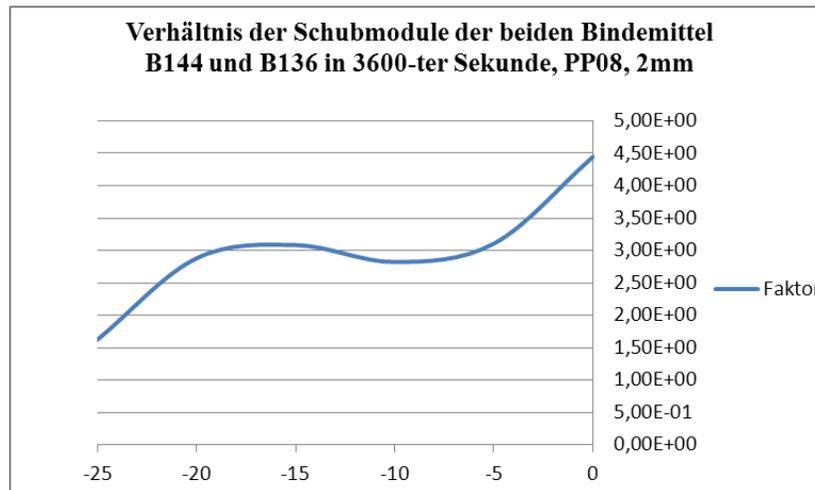


Abb. 4-4 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule beider Bindemittel in 3600-ter Sekunde

Zum Abschluss kann man zusammenfassen, dass die Schubmodule bei dem untersuchten Bindemittel PMB 45/80-65 als Folge der Modifikation viel höhere Werte bei höheren Prüftemperaturen und nach einer bestimmten Zeit besitzen. Im Nullmoment ist die Wirkung der Modifikation noch nicht „aktiviert“ und beeinflusst die Ergebnisse in geringerem Maß.

4.2 Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur

Von Natur aus ist Bitumen ein viskoelastisches, thermoplastisches Material. Seine Struktur besteht aus einer öligen Maltene und einer festen Asphaltenephase. Die mechanischen Eigenschaften, im Besonderen die Festigkeit, Verformbarkeit und Temperaturbeständigkeit, hängen entscheidend vom Verhältnis Maltene/Asphaltene ab. Als nichtkristalliner Werkstoff sind die Eigenschaften des Bitumens in hohem Maße temperaturabhängig (thermoplastisch). Bei niedrigen Temperaturen verhält es sich wie ein Feststoff und zeigt elastische Eigenschaften (sofortige Reaktion). Bei steigender Temperatur erweicht es, seine Viskosität verringert sich, und er fließt wie eine Flüssigkeit (verzögerte Reaktion), was auf einen Phasenübergang nach der Thermodynamik zwischen der Maltene und Asphaltene Phase hindeutet (THIENEL, 2011).

Dementsprechend dieser temperaturabhängigen Erscheinungen setzen sich die Untersuchungen mit der Bestimmung der Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur auseinander. Die Prüftemperatur beeinflusst vornehmlich die Viskosität des Materials, die ein Maß für das gegenseitige Verschieben von verschiedenen Fluidteilchen bei Bewegung ist.

Je größer die Viskosität (hochviskos), desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid. Bei niedrigen Temperaturen gibt es zwischen den Teilchen höhere Anziehungskräfte und verhält sich das Bitumen eher elastisch, was eine Voraussetzung für stärkeren Widerstand gegen Verformung ist.

Aus Gründen der notwendigen Übersichtlichkeit dieser temperaturabhängigen Veränderungen der charakteristischen Eigenschaften werden die Daten von den Bitumenprüfungen in Grafiken erfasst, die die Schubmodule in 0-ter, 10-ter, 100-ter, 1000-ter und 3600-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich von -25°C bis 0°C zeigen.

Die Temperatur ist ein Maß für die mittlere kinetische Energie der Moleküle. Je höher die Temperatur eines Körpers ist, desto größer ist der mittlere Geschwindigkeitsbetrag seiner Teilchen und folglich desto leichter fließt das Material. Bei niedrigen Temperaturen kennzeichnen die größeren Messwerte des Null-Schubmoduls ein stärkeres elastisches Verhalten. Bei höheren Temperaturen verhält sich das Material im Zeitpunkt Null gering elastisch und damit ist sein Schubwiderstand und beziehungsweise seine Steifigkeit – viel kleiner.

Alle Grafiken zeigen die Ergebnisse der Dreifachmessung mit relativ kleinen Abweichungen, was die Erkenntnis für eine gute Präzision der Prüfungen liefert. Eine Wiederholung der Dreifachmessung ist nur bei einigen Untersuchungen als nötig erschienen.

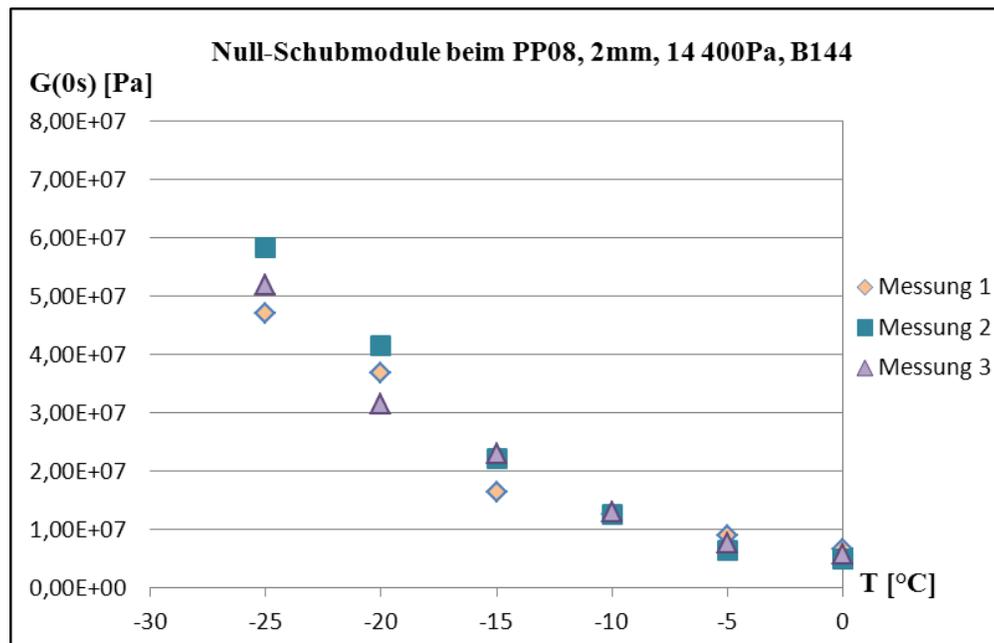


Abb. 4-5 Der Schubmodul in 0-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit kleiner Platte PP08, 2mm Abstand, PMB 45/80-65

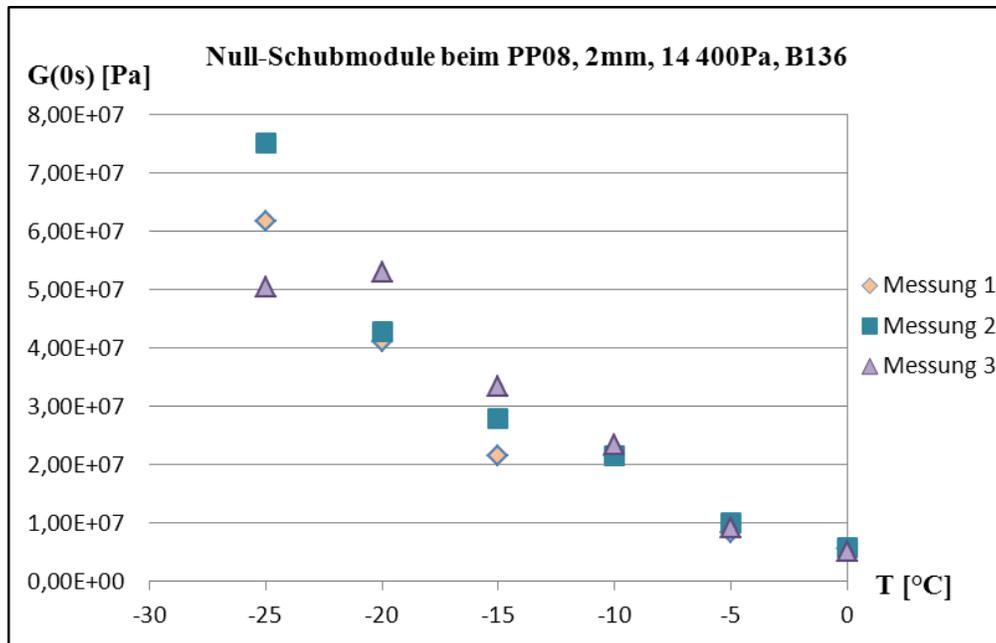


Abb. 4-6 Der Schubmodul in 0-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit kleiner Platte PP08, 2mm Abstand, B 70/100

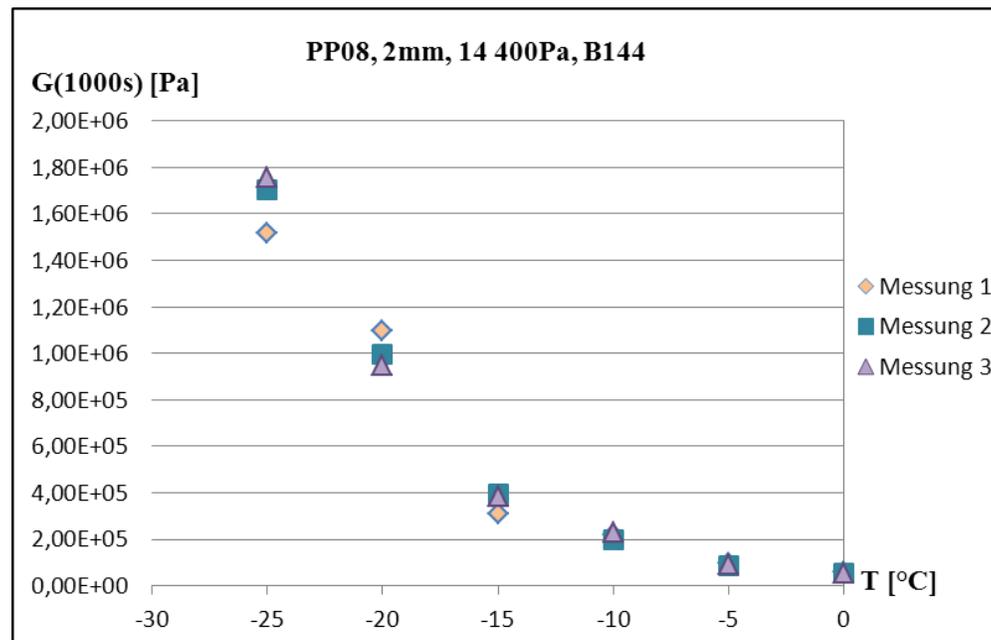


Abb. 4-7 Der Schubmodul in 1000-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit großer Platte PP08, 2mm Abstand, PMB 45/80-65

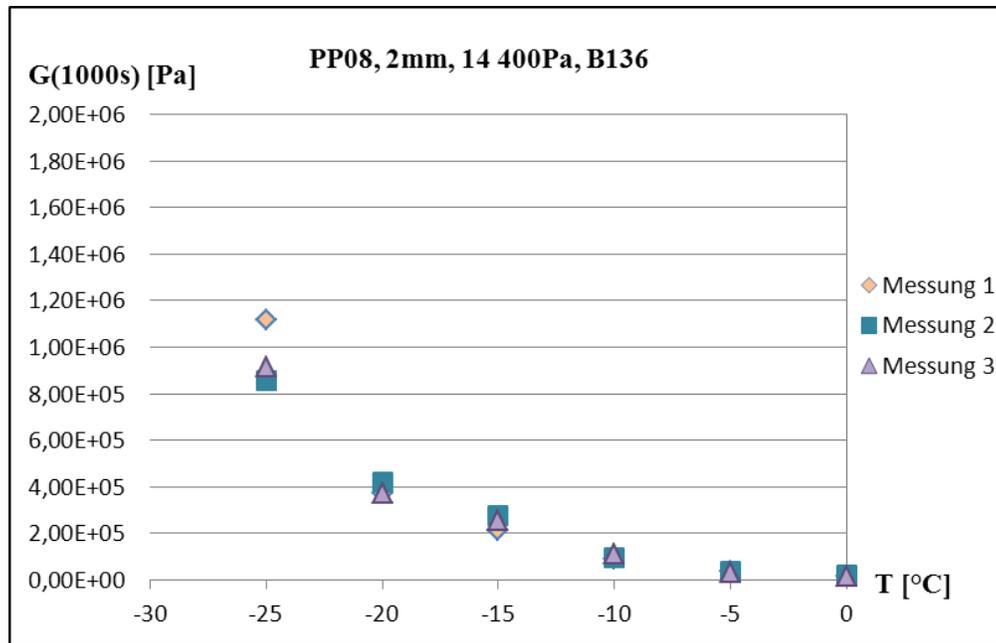


Abb. 4-8 Der Schubmodul in 1000-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit großer Platte PP08, 2mm Abstand, B 70/100

Die Grafiken der Schubmodule beider Bindemittel in 1000-ter Sekunde weisen die schon im Kapitel 4.2 erörterte größere Steifigkeit des PmBs nach, die sich erst nach einem bestimmten Zeitmoment ausprägt.

Die folgende Tabellen und Grafiken der Verhältnissen G_0/G_{10} und G_0/G_{3600} ermöglichen die Beobachtung des Einflusses der Temperatur auf die rheologischen Eigenschaften der Bindemittel hinsichtlich der Zeit. Bei höheren Temperaturen schrumpfen die Werte der Schubmodule viel schneller und es ergibt sich größeren Unterschied zwischen diesen in 0-ter und 10-ter und 0-ter und 3600-ter Sekunde, da die Steifigkeit des Materials mit Anstieg der Prüftemperatur viel stärker abnimmt.

Tab. 4-3 Werte der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde, PP08, 2mm, PMB 45/80-65 (Mittelwerte der drei Messungen)

B144	Temperaturbereich [°C]					
	0	-5	-10	-15	-20	-25
G_0 [Pa]	5,82E+06	7,65E+06	1,28E+07	2,05E+07	3,66E+07	5,25E+07
G_{10} [Pa]	1,03E+06	1,65E+06	3,30E+06	5,01E+06	1,26E+07	1,69E+07
G_0/G_{10}	5,67E+00	4,63E+00	3,87E+00	4,10E+00	2,90E+00	3,11E+00

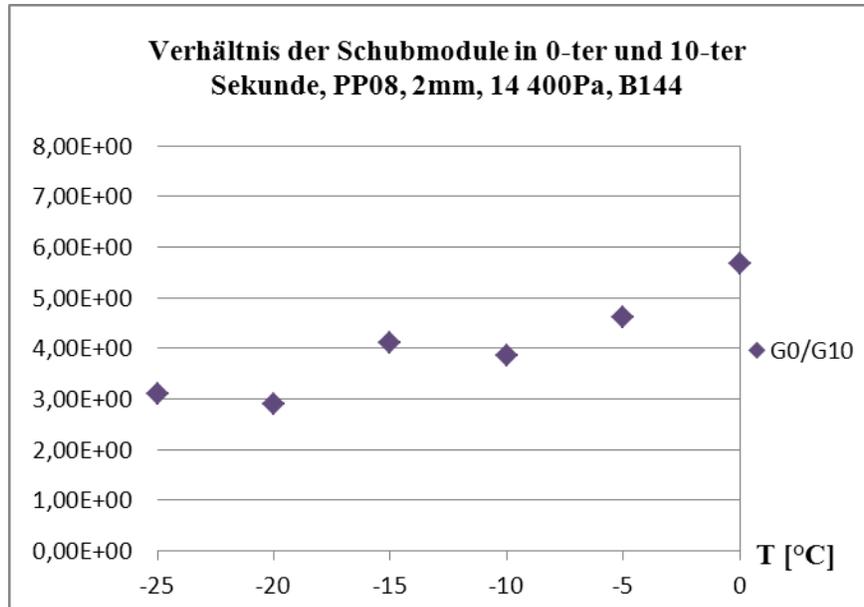


Abb. 4-9 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde beim PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)

Tab. 4-4 Werte der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde, PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)

B144	Temperaturbereich [°C]					
	0	-5	-10	-15	-20	-25
G₀ [Pa]	5,82E+06	7,65E+06	1,28E+07	2,05E+07	3,66E+07	5,25E+07
G₃₆₀₀ [Pa]	2,67E+04	4,41E+04	1,07E+05	1,91E+05	5,23E+05	8,69E+05
G₀/G₃₆₀₀	2,18E+02	1,74E+02	1,20E+02	1,07E+02	7,00E+01	6,04E+01

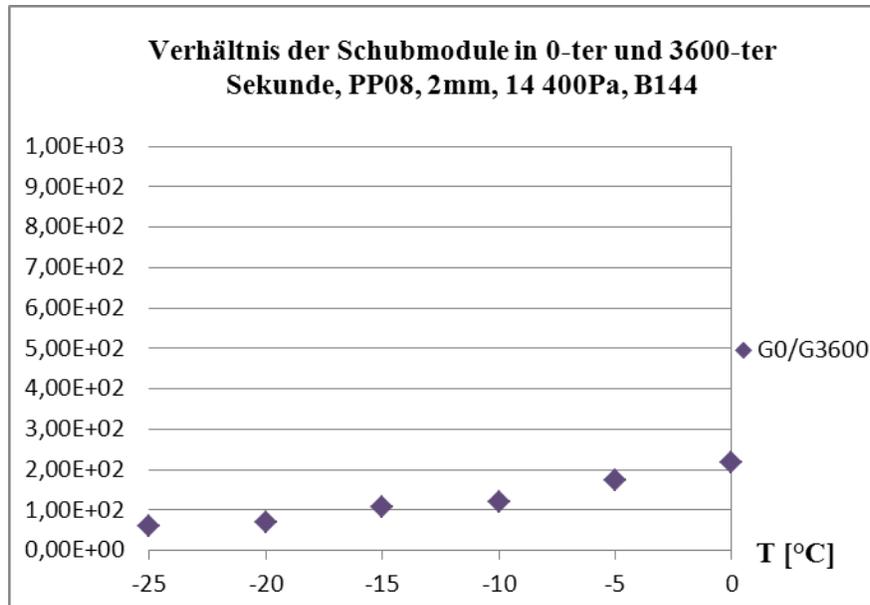


Abb. 4-10 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde beim PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)

Tab. 4-5 Werte der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde, PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)

B136	Temperaturbereich [°C]					
	0	-5	-10	-15	-20	-25
G_0	5,43E+06	9,19E+06	2,21E+07	2,76E+07	4,56E+07	6,24E+07
G_{10}	7,19E+05	1,30E+06	3,42E+06	6,35E+06	9,70E+06	1,83E+07
G_0/G_{10}	7,56E+00	7,06E+00	6,47E+00	4,35E+00	4,70E+00	3,40E+00

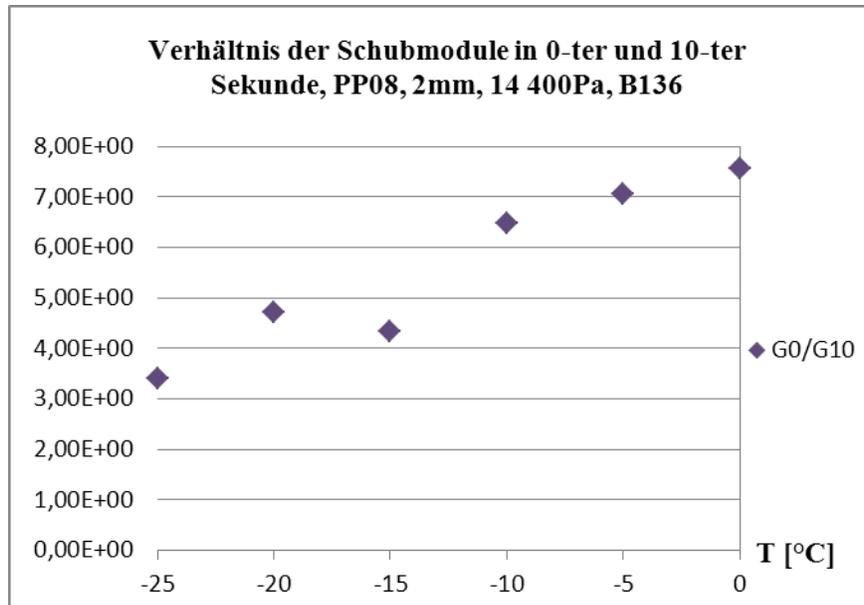


Abb. 4-11 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde beim PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)

Tab. 4-6 Werte der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde, PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)

B136	Temperaturbereich [°C]					
	0	-5	-10	-15	-20	-25
G_0	5,43E+06	9,19E+06	2,21E+07	2,76E+07	4,56E+07	6,24E+07
G_{3600}	6,00E+03	1,42E+04	3,73E+04	1,08E+05	1,75E+05	4,34E+05
G_0/G_{3600}	9,05E+02	6,48E+02	5,93E+02	2,54E+02	2,60E+02	1,44E+02

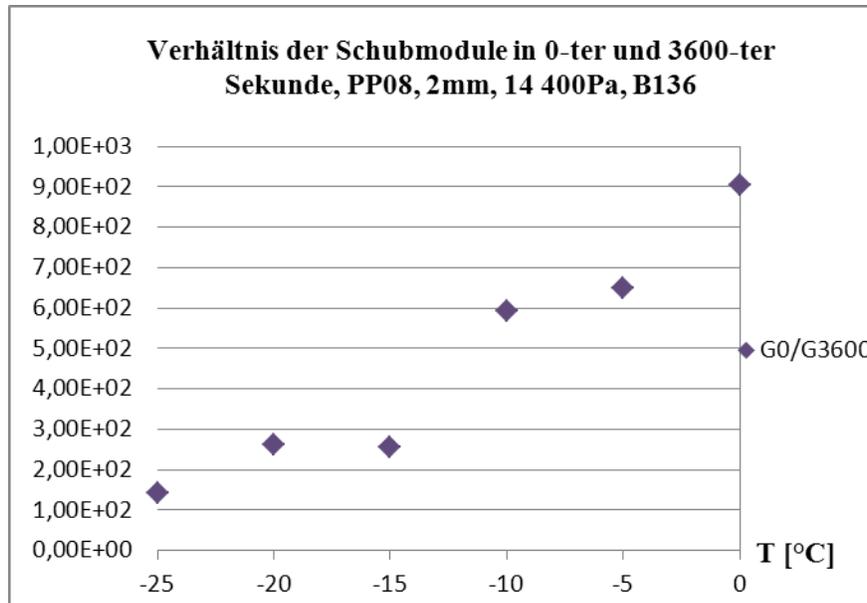


Abb. 4-12 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde beim PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)

Entsprechend der vorstehenden Erläuterungen sind die Messwerte der Schubmodule in starker Abhängigkeit von der Prüftemperatur. Bei niedrigen Temperaturen besitzt das Material höhere Steifigkeit. Mit Anstieg der Temperaturen wächst der Unterschied zwischen den Schubmodule in 0-ter und 10-ter und zwischen den 0-ter und 3600-ter Sekunde und beziehungsweise nimmt der Widerstand gegen erzwungene Verformung ab.

Bei einer Zusammenstellung beider Bindemittel können wir die Feststellung treffen, dass der Einfluss der Temperatur sich auf das nicht modifizierte Bindemittel viel stärker ausprägt und als Folge schrumpfen die Werte der Schubmodule viel schneller. Damit ist auch der größere Faktor G_0/G_{10} und G_0/G_{3600} zu erklären (Tab. 4-5 und Tab. 4-6).

4.3 Bindemittleigenschaften in Abhängigkeit von der Beanspruchung

Die ermittelten Schubmodule, die aus den Prüfungen mit unterschiedlicher Beanspruchung – Schubkraft 10 000Pa, 14 400Pa und 20 000Pa bei -10°C, hervorgingen, liefern eine gute Übereinstimmung. Bei einigen Versuchen ist eine Wiederholung als notwendig erschienen.

Grundsätzlich soll die Beanspruchung keinen Einfluss auf die ermittelten Schubmodule haben, weil die Untersuchungen im linear-viskoelastischen Bereich durchgeführt wurden. Das setzt eine lineare Abhängigkeit der Deformation von der Beanspruchung voraus und folglich bleibt der Schubmodul unverändert (nach der Gleichung Gl. 2-9 ist die Deformation proportional der Spannung). Daraus ist es zu schließen, dass die aufgebrachte Schubkraft im Rahmen eines

spannungsgeregelten Versuchs bestimmte Deformation hervorruft, die mit Anstieg der Spannung proportional zunimmt.

Mittels der Methode der Finiten Elemente wird das Diagramm der Spannungsverteilung bei verschiedener Schubkraft im linear elastischen Fall erstellt (Abb. 4-13). Die folgenden Grafiken wurden von ABAQUS FE Software genommen. Am Rand der Platte ist der höchste Wert der Spannung zu bemerken. Der innere Teil wird am wenigstens beansprucht, da der Weg infolge der eingebrachten Kraft sehr kurz ist. Bei 20 000Pa nehmen die Spannungen mit zunehmendem Radial viel schneller im Vergleich zu 10 000 und 14 400Pa zu.

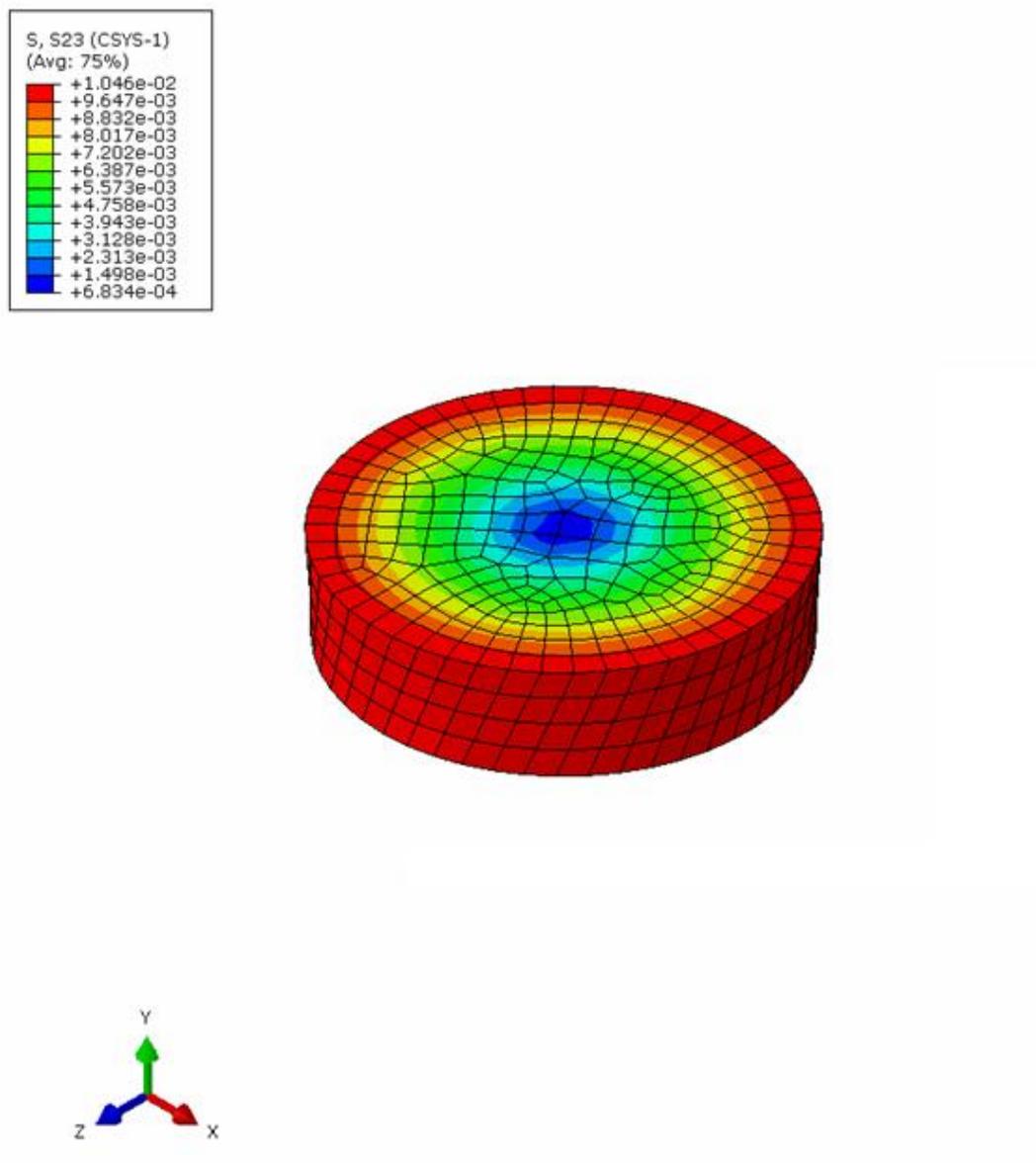


Abb. 4-13 Spannungsverteilung bei Schubkraft 10 000Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE (Eberhardsteiner, 2011)

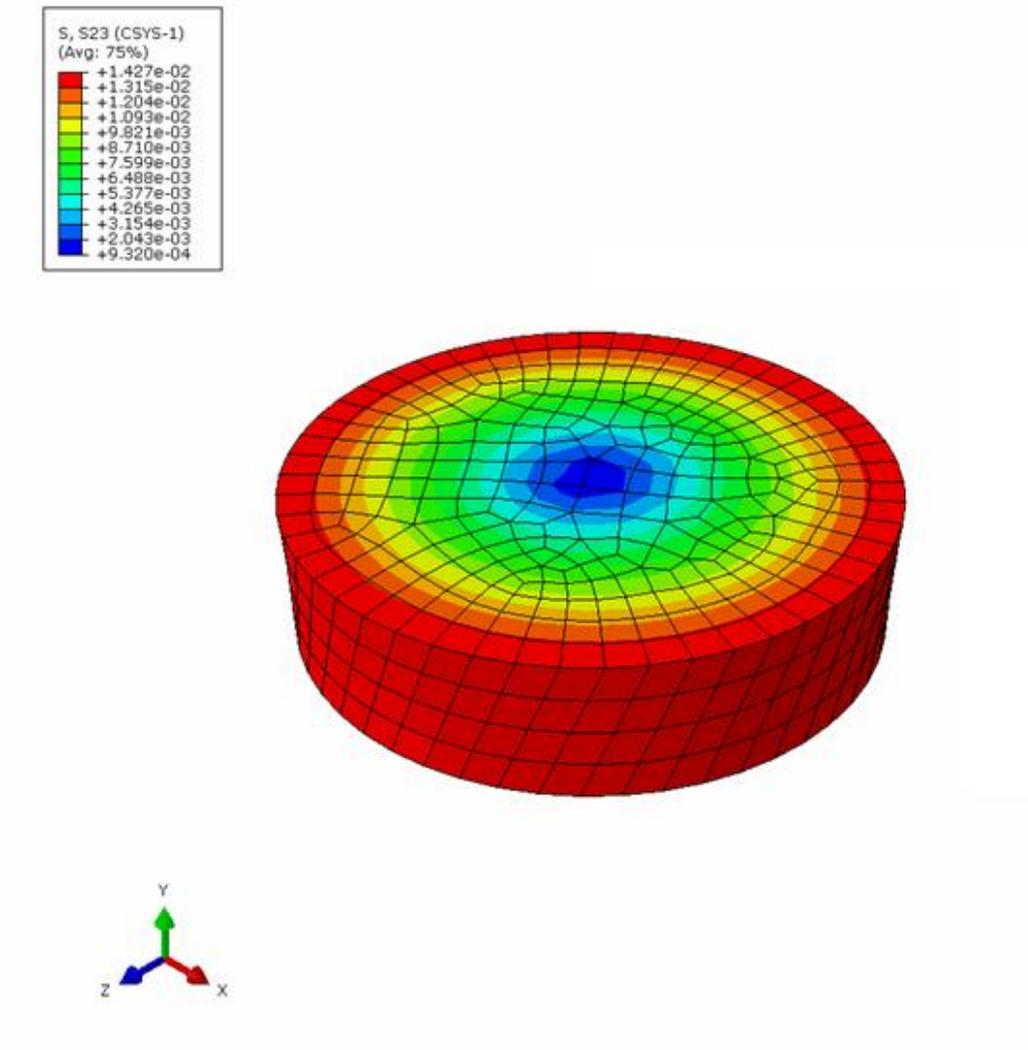


Abb. 4-14 Spannungsverteilung bei Schubkraft 14 400Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE, (Eberhardsteiner, 2011)

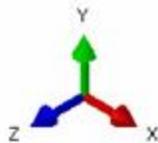
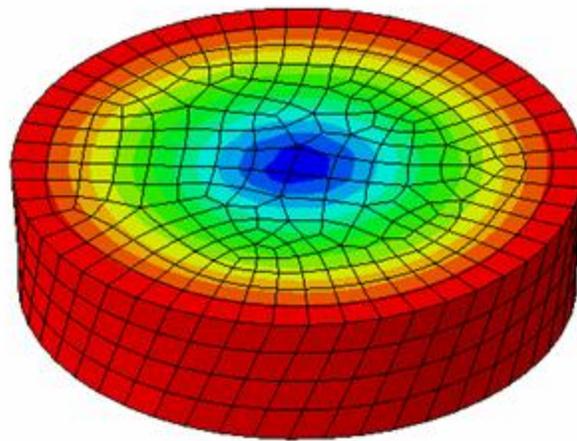
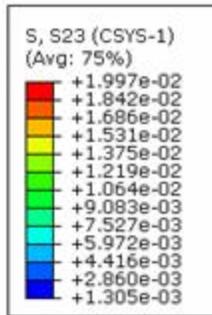


Abb. 4-15 Spannungsverteilung bei Schubkraft 20 000Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE, (Eberhardsteiner, 2011)

Für alle Messungen wurden auch die maximale Abweichung, der Abstand zwischen den am meisten entfernten Kurven und seinen exakten Zeitmoment berechnet. Die folgenden Grafiken zeigen auch den Kurvenverlauf der Abweichung in Prozenten.

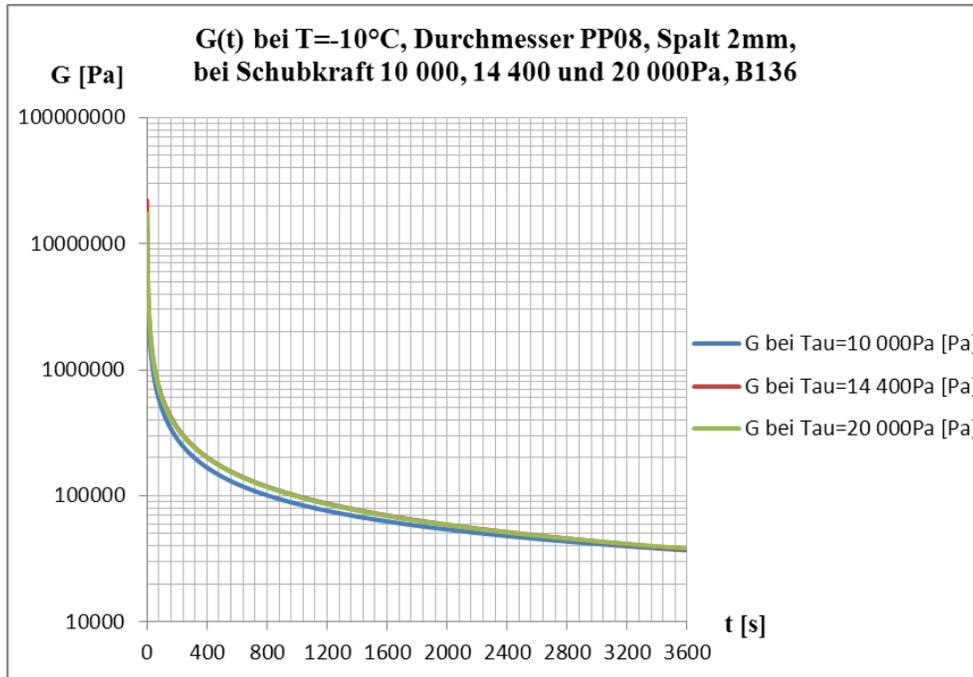


Abb. 4-16 Schubmodule bei verschiedener Beanspruchung, kleine Platte, großer Spalt, -10°C Prüftemperatur, B 70/100

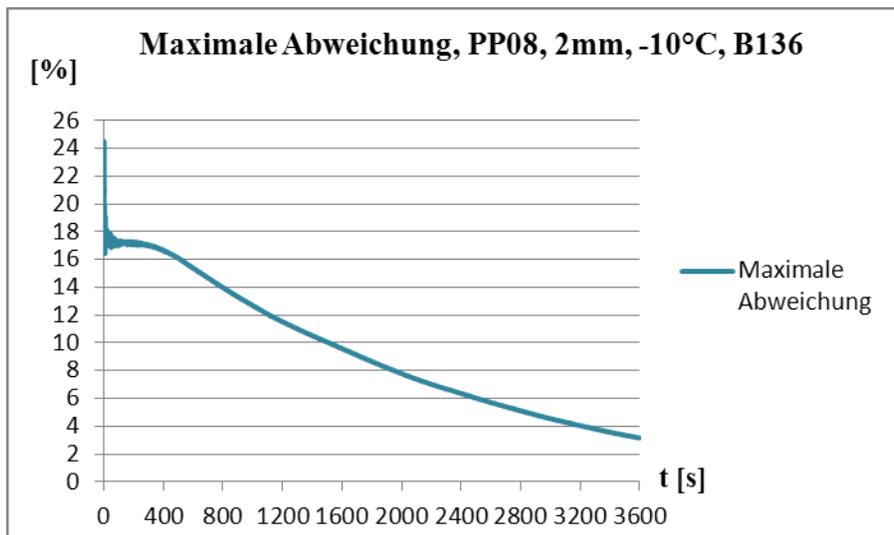


Abb. 4-17 Grafik der maximalen Abweichung der Kurven bei 10 000, 14 400 und 20 000Pa in %, kleine Platte, großer Spalt, -10°C, B 70/100; max.25,52% in 0,69s

Es ist zu erkennen, dass die Kurvenverläufe bei PMB 45/80-65, kleine Platte, großer Spalt nicht exakt zusammenfallen (Abb. 4-16). Da passen aber die einzelnen Diagramme der Dreifachbestimmung bei 10 000Pa, 14 400Pa und 20 000Pa sehr gut zusammen (im Anhang ersichtlich).

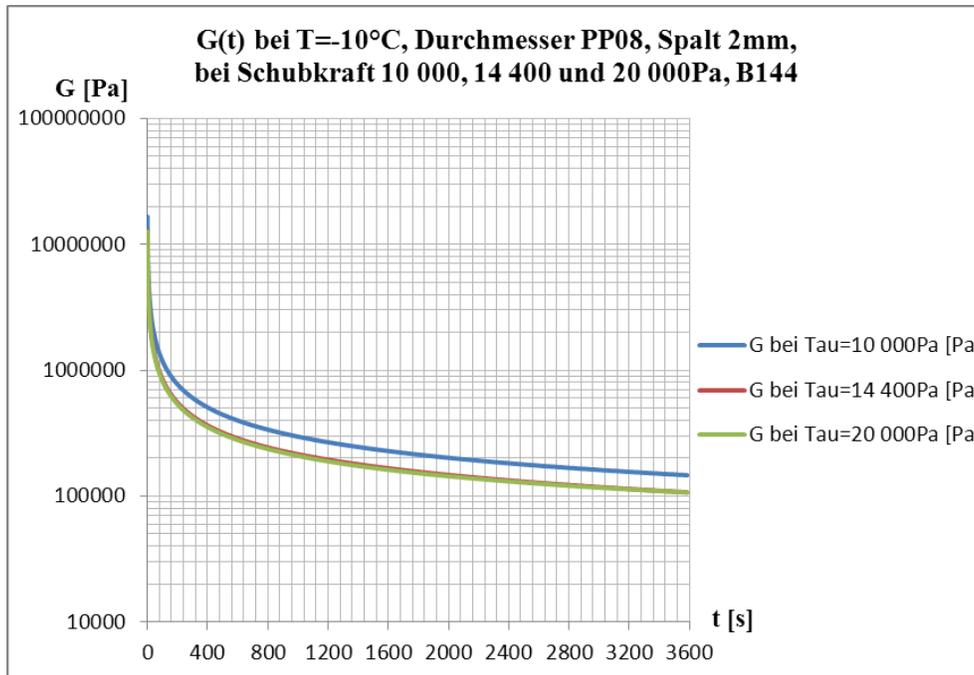


Abb. 4-18 Schubmodule bei verschiedener Beanspruchung, kleine Platte, großer Spalt, -10°C Prüftemperatur, PMB 45/80-65

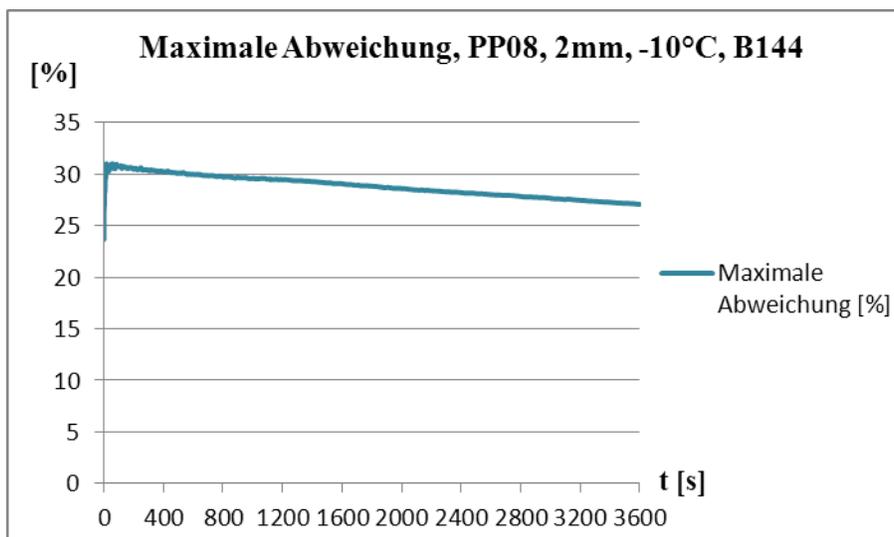


Abb. 4-19 Grafik der maximalen Abweichung der Kurven bei 10 000, 14 400 und 20 000Pa in %, kleine Platte, großer Spalt, -10°C, PMB 45/80-65; max.31,01% in 16,04s

Im Prinzip hat die Beanspruchung nur moderaten Einfluss auf die Schubmodule. Sie liegen im Bereich der natürlichen Streuung der Ergebnisse. Die Untersuchungen lieferten relativ passende Resultate. Einige wurden dreimal wiederholt, damit eine gute Übereinstimmung der 3 Kurven

der Mittelwerte von 10 000, 14 400 und 20 000Pa erzielt wurde. Die vollständige Resultaten und Diagrammen sind im Anhang ersichtlich.

4.4 Weitere Einflüsse

Die Ausführung von zusätzlichen Prüfungen mit kleiner Platte – kleinem Spalt und großer Platte – großem Spalt ermöglicht eine detaillierte Auseinandersetzung mit den Einflüssen der anderen Faktoren wie Spalt und Durchmesser.

Die Diagramme Abb. 4-20 und Abb. 4-21 bieten dem Betrachter die Möglichkeit, die Werte der Schubmodule in Abhängigkeit von dem Spalt zu vergleichen. Die Messungen wurden bei Temperatur -0°C und mit dem polymermodifizierten Bindemittel durchgeführt.

Der Schubmodul bei einem Spalt von 1mm und Durchmesser 8mm ist deutlich größer als bei 2mm (Abb. 4-20), was auf einen höheren Widerstand der zwischen den beiden Platten kräftig eingespannten Bitumenprobe hindeutet. Dabei ist die „innere“ Reibung viel höher und die Anziehungskräfte zwischen den Moleküle des Materials - größer. Bei dem kleinen Spalt ist die Verzerrung viel geringer. Bei gleicher Spannung ist in diesem Fall größeres Verschieben der verschiedenen Materialschichten erforderlich und deswegen verhält sich das Material viel widerstandsfähiger. Bei einem Durchmesser von 25mm liefert der 2mm Spalt höhere Werte der Null-Schubmodule und mit dem Zeitlauf nehmen sie im Vergleich zu diesen bei 1mm Spalt ab (Abb. 4-21).

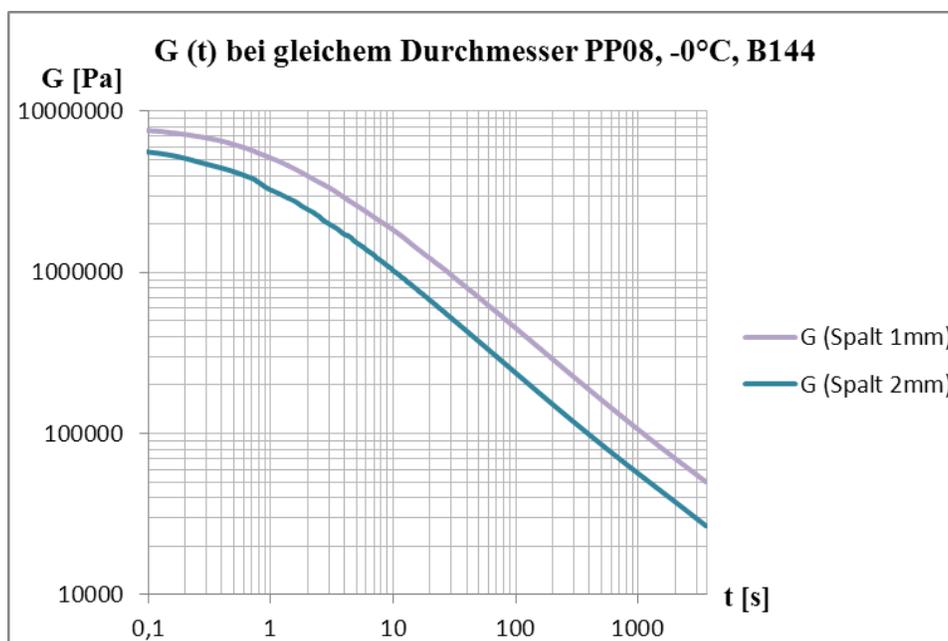


Abb. 4-20 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Durchmesser PP08, Spalt – 1mm und 2mm, -0°C

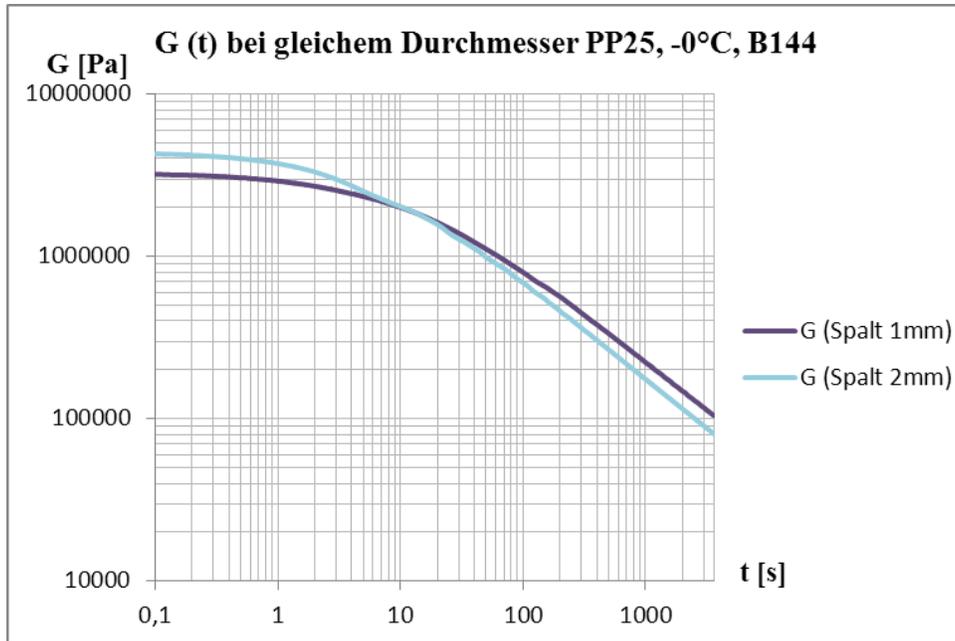


Abb. 4-21 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Durchmesser PP25, Spalt – 1mm und 2mm, -0°C

Aus allen Grafiken ist es zu erkennen, dass die große Platte mit Durchmesser 25mm viel höhere Werte des Schubmoduls als diese mit Durchmesser 8mm (Ausnahme: die Null-Schubmodule) liefert. Theoretisch müssen die beide Konfigurationen zu ähnlichen Resultaten führen. Die folgenden Grafiken zeigen diese Zusammenstellung beider Durchmesser bei gleichem Spalt – 2mm und 1mm (Abb. 4-22 und Abb. 4-23).

Unabhängig von dem Abstand zwischen den Platten sind die Werte des Schubmoduls bei PP25 viel höher und damit die Verzerrung – viel kleiner. Es ist auch zu bemerken, dass der Durchmesser einen viel stärkeren Einfluss auf die rheologische Größe G als der Spalt hat.

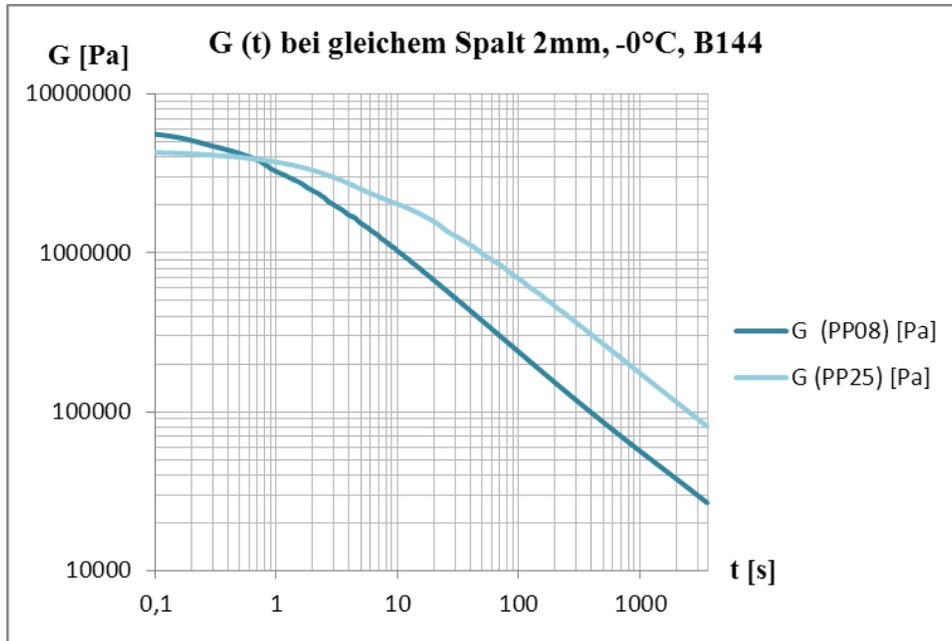


Abb. 4-22 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Spalt 2mm , Durchmesser PP08 und PP25, -0°C

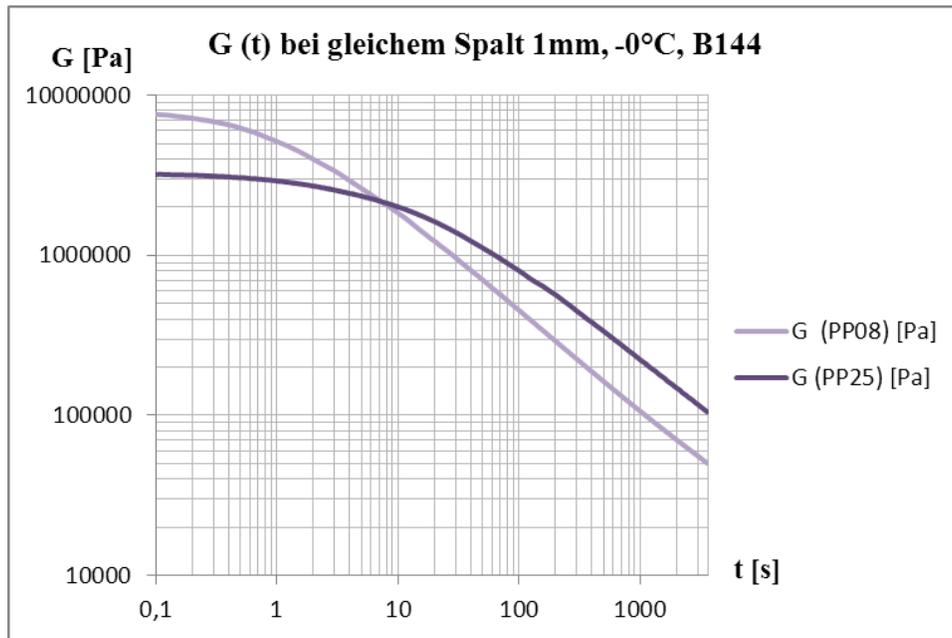


Abb. 4-23 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Spalt 1mm, Durchmesser PP08 und PP25, -0°C

Der Vergleich der auf den unterschiedlichen Durchmesser und gleichem Spalt basierenden Kennlinien lässt auch erkennen, dass die Null-Schubmodule bei kleinem Durchmesser 8mm unabhängig von dem Spalt immer höhere Werte als bei dem größeren Durchmesser 25mm

aufweisen (Abb. 4-22 und Abb. 4-23). Im Laufe der Zeit aber schrumpfen die Messwerte viel stärker, was als ein Indiz dafür gewertet werden kann, dass die Verzerrung bei der kleinen Platte viel größer ist und die Steifigkeit stärker abnimmt.

5. GEDANKEN ZUR WIEDERHOLBARKEIT DER KRIECHVERSUCHE

Zur Untersuchung der Präzision liegt die Gesamtheit der ermittelten Messwerte dieser Untersuchung zu Grunde. Die vorliegende Arbeit umfasst eine Vielzahl von Untersuchungen verschiedener Bindemittel über einen ganzen Temperaturbereich von -25°C bis 0°C.

Zunächst wurde der Mittelwert aus den Einzelwerten der Dreifachbestimmung gebildet. Im Anschluss wurde die 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert ermittelt. Diese sind in den nachfolgenden Abbildungen für beide Bitumen, jede Temperatur und beide Messgeometrien (Plattendurchmesser, Plattenabstand) dargestellt. Wie in den Diagrammen erkennbar ist, zeigt die Messgenauigkeit keine Abhängigkeit von der Temperatur, dem geprüften Material oder der Messgeometrie. Die Abweichungen liegen jedoch bis auf zwei Ausnahmen mit 95% Wahrscheinlichkeit unter 20% des Mittelwerts, was als Wiederholgrenze festgestellt wurde.

Nach allen Berechnungen ergaben sich viele ungünstigere Ergebnisse der Untersuchungen, die wiederholt werden mussten. Die folgenden Grafiken zeigen die Resultaten nach der Ermittlung der Quantile und nach den Wiederholungen. Alle liegen im Rahmen der zulässigen Abweichungen.

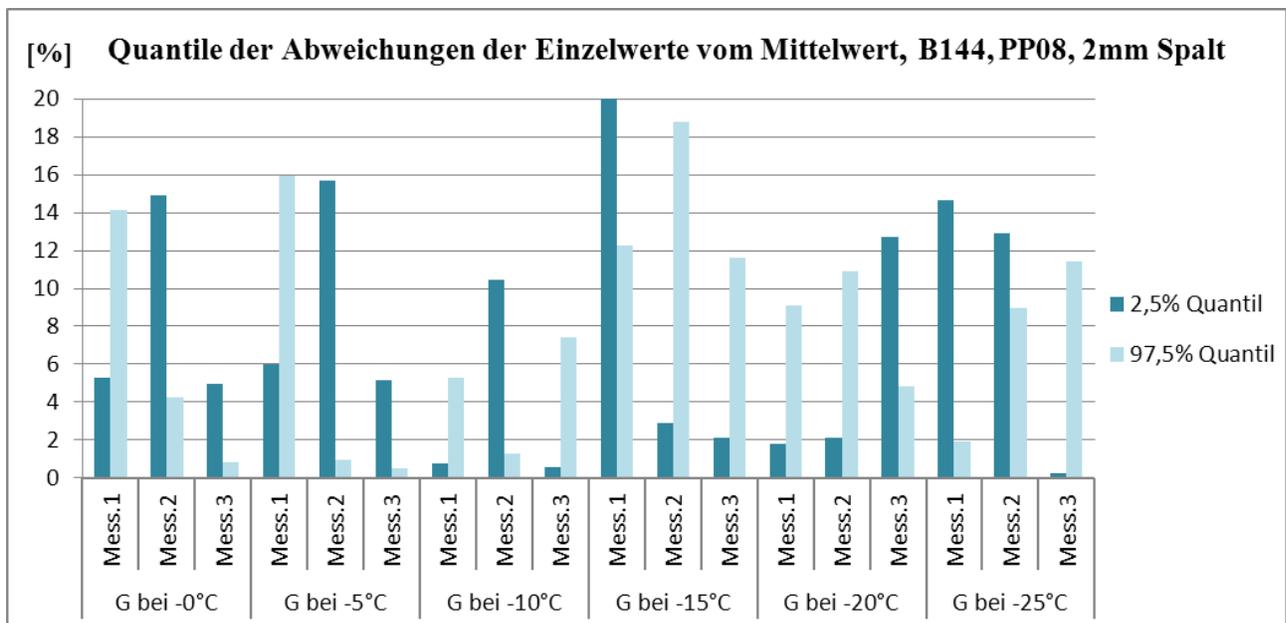


Abb. 5-1 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, PMB 45/80-65, PP08, 2mm Spalt

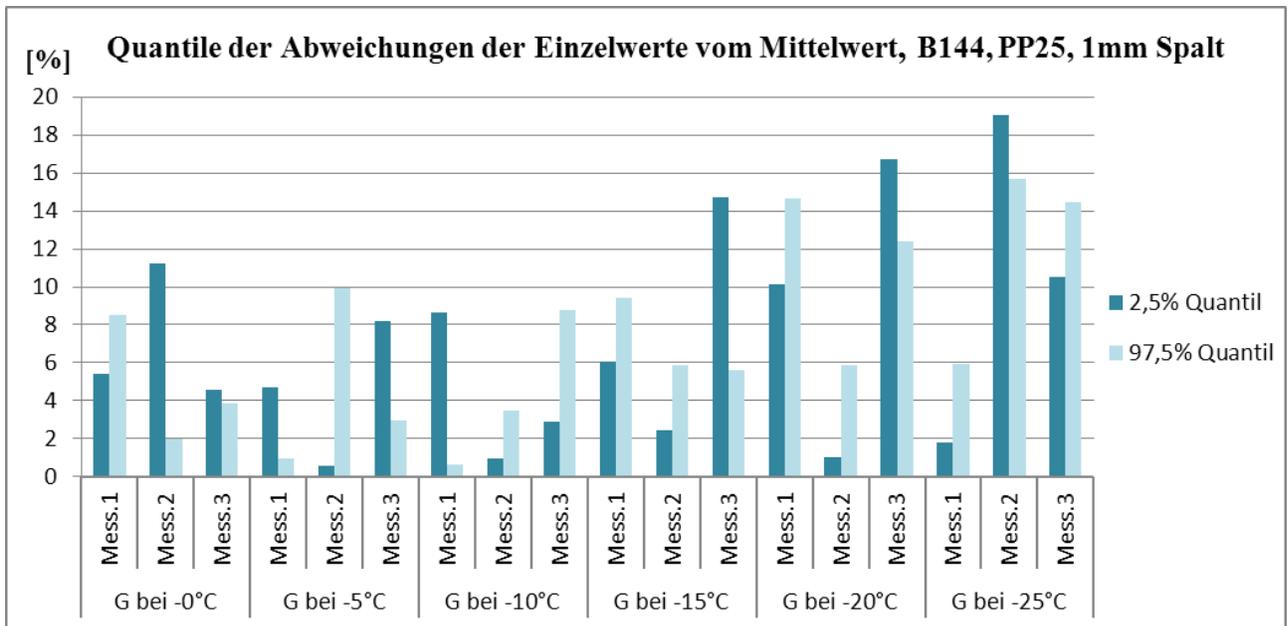


Abb. 5-2 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, PMB 45/80-65, PP25, 1mm Spalt

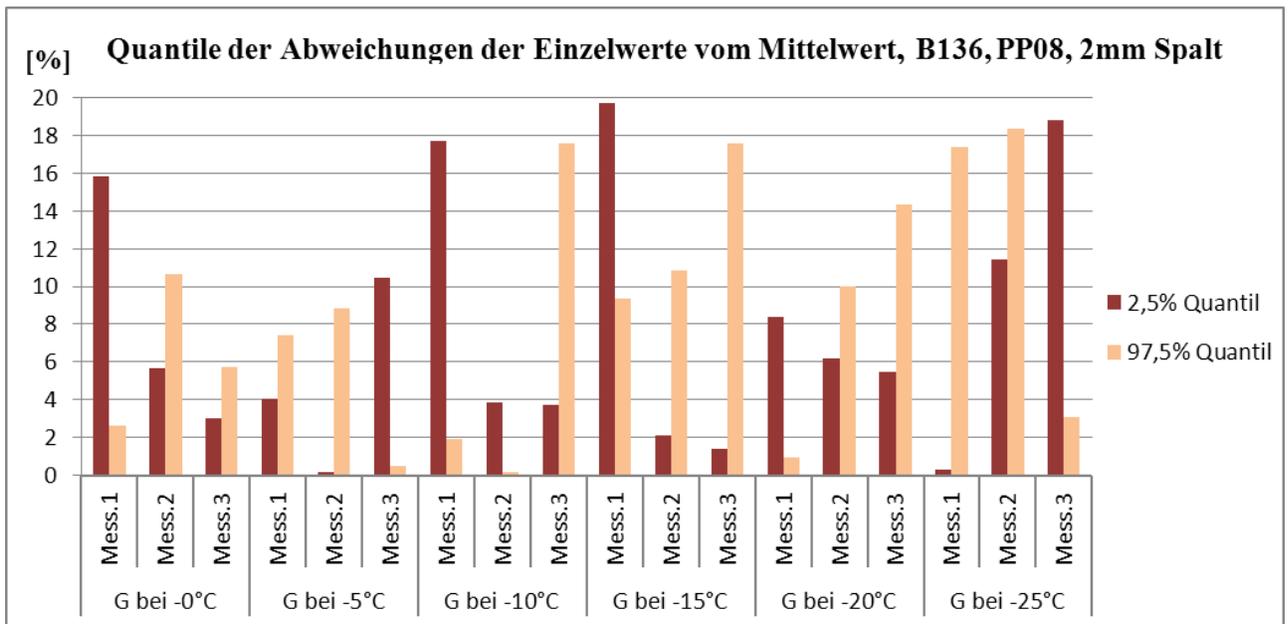


Abb. 5-3 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, B 70/100, PP08, 2mm Spalt

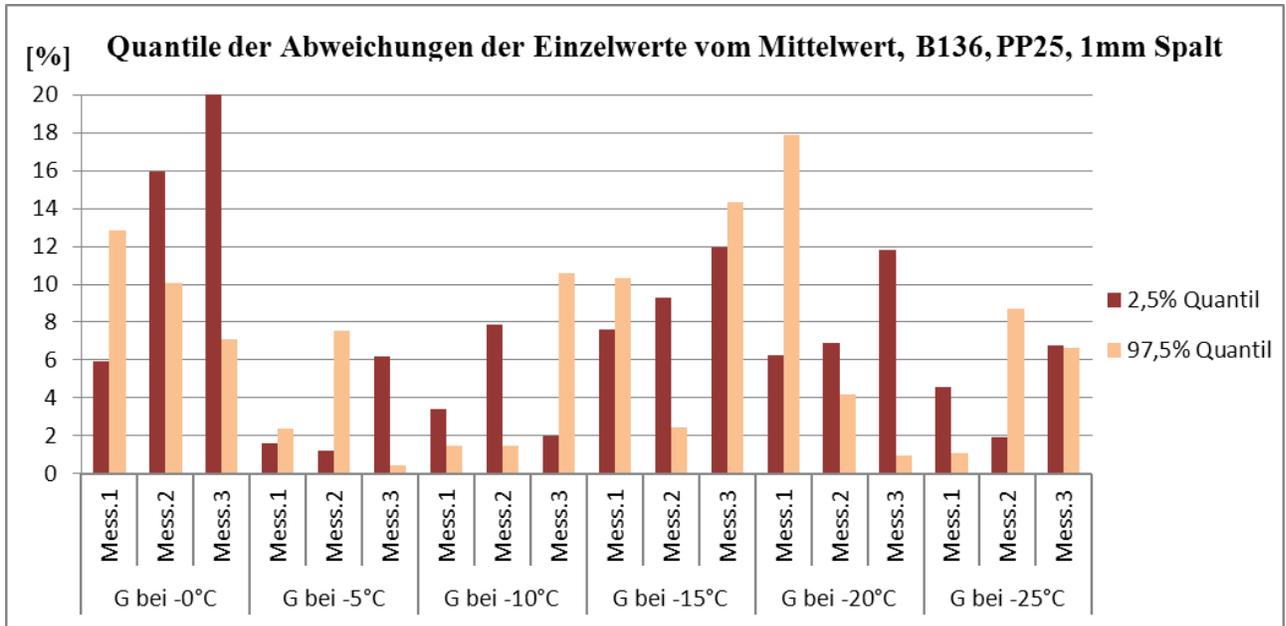


Abb. 5-4 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, B 70/100, PP25, 1mm Spalt

6. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die ständig zunehmenden Beanspruchungen durch Klima und Verkehr stellen an den Straßenbau immer höhere Herausforderungen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden kommen immer häufiger polymermodifizierte Bindemittel bei der Asphaltherstellung zum Einsatz, die ein komplexes viskoelastisches Materialverhalten aufweisen. Um eine lange Dauerhaftigkeit und Beständigkeit gegen Kälterisse gewährleistet zu werden, gewinnt die Untersuchung des Einflusses des Tieftemperaturverhaltens besondere Bedeutung.

Die Einführung der neuen Prüfmethode Biegebalkenrheometer (Bending Beam Rheometer BBR), Dynamisches Scherrheometer (Dynamic Shear Rheometer DSR) und Rotationsviskosimeter (Rotational Viscometer RV) ermöglicht eine eindeutige prüftechnische Beurteilung des rheologischen Verhaltens des Bitumens, das den tatsächlichen Beanspruchungen des Bindemittels im Asphalt entspricht.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war eine Prüfprozedur beim DSR für statische Kriechprüfungen zu entwickeln, die wiederholbare Ergebnisse liefert und die eine detaillierte Aussage über die komplexen temperaturabhängigen viskoelastischen Eigenschaften der Bitumen ermöglicht. Die auf Grund dieser Arbeit gebildeten Schlussfolgerungen dienen zunächst lediglich als Erfahrungssammlung. Im Erfolgsfall könnte diese Methode zukünftig für die Charakterisierung des Gebrauchsverhaltens herangezogen werden, da die durchgeführten Untersuchungen bestimmte Abhängigkeiten und Verhältnisse zwischen verschiedenen Modalitäten bewiesen und aussagekräftig für die Temperaturempfindlichkeit der Bitumen sind. Ausgedrückt wird das Tieftemperaturverhalten durch die Veränderung des Schubmoduls, bzw. des Widerstands gegen erzwungene Verformung.

Zunächst wird in der vorliegenden Arbeit der Stand der Technik in Bezug auf die Prüfung des rheologischen Verhaltens von Bitumen, sowie die Vorbereitung und Durchführung der Untersuchungen nach Normen dargestellt.

Da die Messungen im Rahmen dieser Diplomarbeit an zwei Bindemittel mit und ohne Modifikation bei verschiedener Prüfbedingungen im spannungskontrollierten Modus betrieben wurden, werden im Anschluß die Einflüsse und unterschiedlichen Erscheinungen bei Variation der Prüftemperatur, der Beanspruchung und der Plattenkonfiguration untersucht und zusammengefasst.

Anhand der gelieferten Resultate dieser Arbeit konnte festgestellt werden, dass die Schubmodule des polymermodifizierten Bindemittels tendenziell höher liegen, was ein Indiz für die größere Steifigkeit in Folge der Modifikation darstellt. Die Verbesserung der rheologischen Eigenschaften kann vor allem bei höheren Prüftemperaturen und nach einer bestimmten Beanspruchungszeit festgestellt werden. Im Gegensatz dazu sind die Null-Schubmodule des nicht modifizierten Bitumens 70/100 höher, da sich der Einfluss der Modifikation des PmB 45/80-65 erst nach einem bestimmten Zeitmoment "aktiviert". Die allgemeine Betrachtung der Ergebnisse liefert die Erkenntnis, dass das nicht modifizierte Straßenbaubitumen temperaturempfindlicher ist und größere Änderungen des Schubmoduls mit Anstieg der Temperatur erfährt.

Da das Bitumen zu den thermoplastischen Stoffen gehört, zeigt es temperaturabhängige Viskosität und somit auch temperaturabhängige Steifigkeit. Aufgrund dieser Eigenschaften lassen sich bei niedrigen Temperaturen höhere Werte des Schubmoduls registrieren, die auf einen stärkeren Widerstand des Materials hindeuten.

Auf der Datenbasis dieser umfangreichen Prüfungen erfolgt eine Gegenüberstellung der Wirkung der verschiedenen Beanspruchungen – 10 000, 14 400 und 20 000 Pa bei einer Prüftemperatur von -10°C . Als Folge der Tatsache, dass alle Untersuchungen im linear-viskoelastischen Bereich durchgeführt wurden, wuchs proportional mit der eingebrachten Schubkraft auch die Deformation und somit bleibt der Schubmodul praktisch unverändert. Diese lineare Abhängigkeit setzt ein absolutes Zusammenfallen der Kennlinien der Werte bei der grafischen Darstellung voraus.

Unter Berücksichtigung der gesammelten Erkenntnisse ist es zu konstatieren, dass der Durchmesser höheren Einfluss auf die Resultate im Vergleich zum Spalt hat und unabhängig vom Plattenabstand liefert die große Platte immer höhere Kennwerte.

Die ermittelten Schubmodule, die aus den Prüfungen bei kleinerem Spalt (bei gleichem Plattendurchmesser) hervorgingen, bewiesen viel höhere Steifigkeit, da bei kleinerem Spalt die "innere" Reibung viel größer ist und somit auch der Widerstand des kräftig eingespannten Bitumens wächst.

In Bezug auf die Wiederholbarkeit wurden die 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichung der Einzelwerte von den Mittelwerten berechnet. Es zeigt sich unabhängig vom Material, Temperaturen und Messgeometrie, dass die Abweichungen 20% des Mittelwerts nicht überschreiten.

Bei der Beurteilung des viskoelastischen Bitumenverhaltens kann man zusammenfassen, dass unter Anwendung der statischen Kriechprüfung mittels DSR die Kälteeigenschaften der Bindemittel zutreffend beschrieben werden können.

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2-1 Anwendungsbereiche der SHRP-Prüfungen, (LITZKA, 2003).....	4
Abb. 2-2: Arbeitsweise DSR (EN 14770, 2006), (LITZKA, 2003).....	5
Abb. 2-3 Zwei-Platten Modell, (RHEOLOGIEKURS—ONLINE.DE).....	6
Abb. 2-4 Viskoelastisches Verhalten (LITZKA, 2003).....	7
Abb. 2-5 Zeitunterschied zwischen den Spannung und Deformation bei viskoelastischem Verhalten (Litzka, 2003).....	8
Abb. 2-6 Platte-Platte Messsystem, (LITZKA, 2003).....	9
Abb. 2-7 Kegel-Platte Konfiguration, (LITZKA, 2003).....	10
Abb. 2-8 Benötigte Probenabmessungen für die Berechnung, (LITZKA, 2003).....	11
Abb. 2-9 Darstellung der Ergebnisse durch Isothermen (HAGNER, 2003).....	15
Abb. 2-10 Darstellung der Ergebnisse durch Isochronen (HAGNER, 2003).....	15
Abb. 2-11 Darstellung des komplexen Schubmoduls und des Phasenwinkels (HAGNER, 2003).....	16
Abb. 2-12 Graphische Darstellung des Speicher- und Verlustmoduls (HAGNER, 2003).....	16
Abb. 2-13 Quotient $G^*/\sin\delta$ in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, bei 1.6Hz Frequenz (LITZKA, 2003).....	18
Abb. 2-14 Quotient $G^*.\sin\delta$ in Abhängigkeit von der Prüftemperatur, bei 1.6Hz Frequenz (LITZKA, 2003).....	19
Abb. 3-1 Konventionelle Prüfungen – (von links nach rechts) Nadelpenetration, Erweichungspunkt mit Ring und Kugel, Brechpunkt nach Fraaß (NEROTH, 2011).....	21
Abb. 3-2 Schema der Elastischen Rückformung (Neroth, 2011).....	23
Abb. 3-3 Dynamisches Scherrheometer.....	25
Abb. 3-4 Luftzufuhr Abb. 3-5 Universal Temperatur und MARS Controller.....	25
Abb. 3-6 PC-Rechner Abb. 3-7 Wasserbad Haake II.....	26
Abb. 3-8 Erhitzung und Homogenisieren des Bitumens, Gussformen und Spateln.....	27
Abb. 3-9 Kleben und Zusammenfahren der Platten.....	28
Abb. 3-10 Weiße Gummiabdeckung der Prüfprobe.....	30
Abb. 3-11 Graphische Darstellung der Messungsvorgang und des viskoelastischen Verhaltens der Bitumenprobe.....	31
Abb. 4-1 Schubmodule über den gesamten Temperaturbereich, B 70/100, PP08, 2mm.....	33

Abb. 4-2 Schubmodule über den gesamten Temperaturbereich, PMB 45/80-65, PP08, 2mm.....	34
Abb. 4-3 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule beider Bindemittel im Nullmoment.....	35
Abb. 4-4 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule beider Bindemittel in 3600-ter Sekunde.....	36
Abb. 4-5 Der Schubmodul in 0-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit kleiner Platte PP08, 2mm Abstand, PMB 45/80-65	37
Abb. 4-6 Der Schubmodul in 0-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit kleiner Platte PP08, 2mm Abstand, B 70/100.....	38
Abb. 4-7 Der Schubmodul in 1000-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit großer Platte PP08, 2mm Abstand, PMB 45/80-65.....	38
Abb. 4-8 Der Schubmodul in 1000-ter Sekunde über den gesamten Temperaturbereich, Messung mit großer Platte PP08, 2mm Abstand, B 70/100.....	39
Abb. 4-9 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde beim PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)	40
Abb. 4-10 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde beim PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)	41
Abb. 4-11 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde beim PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen).....	42
Abb. 4-12 Grafik des Verhältnisses der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde beim PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen).....	43
Abb. 4-13 Spannungsverteilung bei Schubkraft 10 000Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE	44
Abb. 4-14 Spannungsverteilung bei Schubkraft 14 400Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE	45
Abb. 4-15 Spannungsverteilung bei Schubkraft 20 000Pa, Methode der Finiten Elementen - ABAQUS FE	46
Abb. 4-16 Schubmodule bei verschiedener Beanspruchung, kleine Platte, großer Spalt, -10°C Prüftemperatur, B 70/100.....	47
Abb. 4-17 Grafik der maximalen Abweichung der Kurven bei 10 000, 14 400 und 20 000Pa in %, kleine Platte, großer Spalt, -10°C, B 70/100; max.25,52% in 0,69s.....	47
Abb. 4-18 Schubmodule bei verschiedener Beanspruchung, kleine Platte, großer Spalt, -10°C Prüftemperatur, PMB 45/80-65	48

Abb. 4-19 Grafik der maximalen Abweichung der Kurven bei 10 000, 14 400 und 20 000Pa in %, kleine Platte, großer Spalt, -10°C, PMB 45/80-65; max.31,01% in 16,04s	48
Abb. 4-20 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Durchmesser PP08, Spalt – 1mm und 2mm, -0°C	49
Abb. 4-21 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Durchmesser PP25, Spalt – 1mm und 2mm, -0°C	50
Abb. 4-22 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Spalt 2mm , Durchmesser PP08 und PP25, -0°C	51
Abb. 4-23 Der Schubmodul im Zeitverlauf bei gleichem Spalt 1mm, Durchmesser PP08 und PP25, -0°C	51
Abb. 5-1 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, PMB 45/80-65, PP08, 2mm Spalt.....	53
Abb. 5-2 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, PMB 45/80-65, PP25, 1mm Spalt.....	54
Abb. 5-3 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, B 70/100, PP08, 2mm Spalt.....	54
Abb. 5-4 2,5% und 97,5% Quantile der Abweichungen der Einzelwerte vom erreichten Mittelwert, B 70/100, PP25, 1mm Spalt.....	55

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 3-1 Prüfergebnisse von den konventionellen Prüfungen mit dem PmB 45/80-65	23
Tab. 3-2 Prüfergebnisse von den konventionellen Prüfungen mit B135 (70/100)	24
Tab. 3-3 Prüfungsprogram - Modalitäten.....	29
Tab. 4-1 Vergleich der Schubmodule (Mittelwerte) im Nullmoment (0s), PP08, 2mm Spalt – Bindemittel B 70/100 und PmB PMB 45/80-65	34
Tab. 4-2 Vergleich der Schubmodule (Mittelwerte) am Ende der Belastung (3600s), PP08, 2mm Spalt – Bindemittel B 70/100 und PmB PMB 45/80-65.....	35
Tab. 4-3 Werte der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde, PP08, 2mm, PMB 45/80-65 (Mittelwerte der drei Messungen)	39
Tab. 4-4 Werte der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde, PP08, 2mm, PMB 45/80-65, (Mittelwerte der drei Messungen)	40
Tab. 4-5 Werte der Schubmodule in 0-ter und 10-ter Sekunde, PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)	41
Tab. 4-6 Werte der Schubmodule in 0-ter und 3600-ter Sekunde, PP08, 2mm, B 70/100, (Mittelwerte der drei Messungen)	42

LITERATURVERZEICHNIS

- ÖNORM EN 14770:2006** – Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer, Ausgabe 2006-01
- ÖNORM EN 1426:2007** - Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel-Bestimmung der Nadelpenetration, Ausgabe 2007-06
- ÖNORM EN 1427:2007** - Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren, Ausgabe 2007-06
- ÖNORM EN 12593:2007** - Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Brechpunktes nach Fraaß, Ausgabe 2007-06
- ÖNORM EN 13398:2010** - Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung der elastischen Rückstellung von modifiziertem Bitumen, Ausgabe 2010-10
- ÖNORM EN 12 597:2001** - Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel – Terminologie, Ausgabe 2001-01
- LITZKA J.** Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung // Mitteilungen des Institutes für Strassenbau und Strassenerhaltung TU Wien, Heft 9, 2003
- HAGNER T.** Untersuchung und Bewertung von bitumenhaltigen Bindemitteln für Asphalt mittels Dynamischem Scher-Rheometer // Dissertation – Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2003
- COLLOP A., AIREY G., KHANZADA SH.** Creep Testing of Bitumens Using the Dynamic Shear Rheometer // The international Journal of Pavement Engineering, 2002 Vol.3 (2), pp 107-116
- WASAGE T., CANTU M., STASTNA J., POLACCO G., ZANOTTO L.** Role of Viscosity in Dynamic Creep Tests in Conventional, Oxidized, and Polymer-Modified Asphalts // Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No.1998, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C.2007, pp.56-64
- MASAD E., HUANG CH., AIREY G., MULIANA A.** Nonlinear viscoelastic analysis of unaged and aged asphalt binders // Construction and Building Materials 22 (2008) 2179-2179
- SCHÄRFER V., BEER FR., KREIDE M.** Polymermodifizierte Bindemittel nach den TL PmB Ausgabe 2001, Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von elastomermodifiziertem und höher polymermodifiziertem Bitumen
- THIENEL K.** Werkstoffe des Bauwesens Bituminöse Baustoffe, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität der Bundeswehr München – Wintersemester 2011

PARTL M. Werkstoffe 1, ETHZ, Frühjahrsemester Vorlesung 2011, Technische Hochschule Zürich

RHEOLOGIEKURS – ONLINE.DE, <http://rheologie.homepage.t-online.de/kurs3.html>

NEROTH G., VOLLENSCHAAR D. 13.Bitumenhaltige Baustoffe, Wendehorst Baustoffkunde 2011, 751-811

HIRSCH V. Entwicklung der modifizierten Bindemittel und Ausblick in die Zukunft, Modifizierte Bindemittel, Bundesanstalt für Straßenwesen, Vorlesung 08.09.2008 – <http://www.strassenbau.uni-wuppertal.de>

DESMAZES C.; LECOMTE M.; LESUEUR D.; PHILIPS M. A Protocol for Reliable Measurement of Zero-Shear-Viscosity in order to Evaluate the Anti-Rutting Performance of Binder, 2-nd Eurasphalt&Eurobitume Congress, Book 1, 203-211, Barcelona 2000

EBERHARDSTEINER L. – FEßModellierung des DSR-Versuchs. Interne Studie des Forschungsbereichs für Strassenwesen, Institut für Verkehrswissenschaften, TU Wien, 2011

HTTP://WWW.PAVEMENTINTERACTIVE.ORG - Dynamic Shear Rheometer (Artikel) // Pavement Interactive April 21, 2011

ANHANG

Konventionellen Bitumenprüfungen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology

Institut für Verkehrswissenschaften
Labor des Forschungsbereichs für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau
Gußhausstraße 28/E230/3
1040 WIEN
Tel.: +43-1-58801-23301
Fax.: +43-1-58801-23399
DVR:0005886

Prüfbericht: Konventionelle Bitumenprüfung		P311 Seite 1 von 1
AuftraggeberIn	Flughafen Wien	
Datum	25.10.2011	
Projekt	11412	
ProjektleiterIn	David Valentin	
PrüferIn	Dimitrov Mariyan	

Probedaten					
Bitumenprobe	OMV BitumenPmB 45/80-65	Laborcode	B144A	Alterungsstufe	A

Prüfergebnisse			
Nadelpenetration			
Gerät	FröWag 1.572	Messung 1	57,3 1/10mm
Norm	EN 1426	Messung 2	55,2 1/10mm
		Messung 3	55,7 1/10mm
		Mittelwert	56,07 1/10mm
Erweichungspunkt Ring und Kugel			
Gerät	FröWag 1.640	Messung 1	76,84 °C
Norm	EN 1427	Messung 2	77,84 °C
Badflüssigkeit	Wasser	Mittelwert	77,40 °C
Breachpunkt nach Fraaß			
Gerät	IWS-vollautomatisch	Messung 1 (T0)	-21,60 °C
Norm	EN 12593	Messung 2 (T1)	-23,90 °C
		Mittelwert	-22,75 °C

Elastische Rückstellung				
Gerät	Straßentest	Messung 1	Probe 1	Probe 2
Norm	EN 13398	Ausdehnung b. Bruch	20 mm	20 mm
Temperatur	25,00 °C	Abstand d	17 mm	18 mm
Ausziehgeschw.	50 mm/min	Elast. Rückstellung RE	86,5 %	87,5 %
		Mittelwert.	87,0 %	

Anmerkungen

	TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology	Institut für Verkehrswissenschaften Labor des Forschungsbereichs für Straßen- und Flugbetriebsflächenbau Gußhausstraße 28/E230/3 1040 WIEN Tel.: +43-1-58801-23301 Fax.: +43-1-58801-23399 DVR:0005886	
		Prüfbericht: Konventionelle Bitumenprüfung	
AuftraggeberIn Datum Projekt ProjektleiterIn PrüferIn	Flughafen Wien 21.10.2011 11412 David Valentin Dimitrov Mariyan		

Probedaten			
Bitumenprobe	70/100	Laborcode	B136A Alterungsstufe A

Prüfergebnisse			
Nadelpenetration			
Gerät	FröWag 1.572	Messung 1	80,4 1/10mm
Norm	EN 1426	Messung 2	78,3 1/10mm
		Messung 3	82,4 1/10mm
		Mittelwert	80,37 1/10mm

Erweichungspunkt Ring und Kugel

Gerät	FröWag 1.640	Messung 1	45,21 °C
Norm	EN 1427	Messung 2	45,03 °C
Badflüssigkeit	Wasser	Mittelwert	45,20 °C

Brechpunkt nach Fraaß

Gerät	IWS-vollautomatisch	Messung 1 (T0)	N/V
Norm	EN 12593	Messung 2 (T1)	N/V
		Mittelwert	N/V

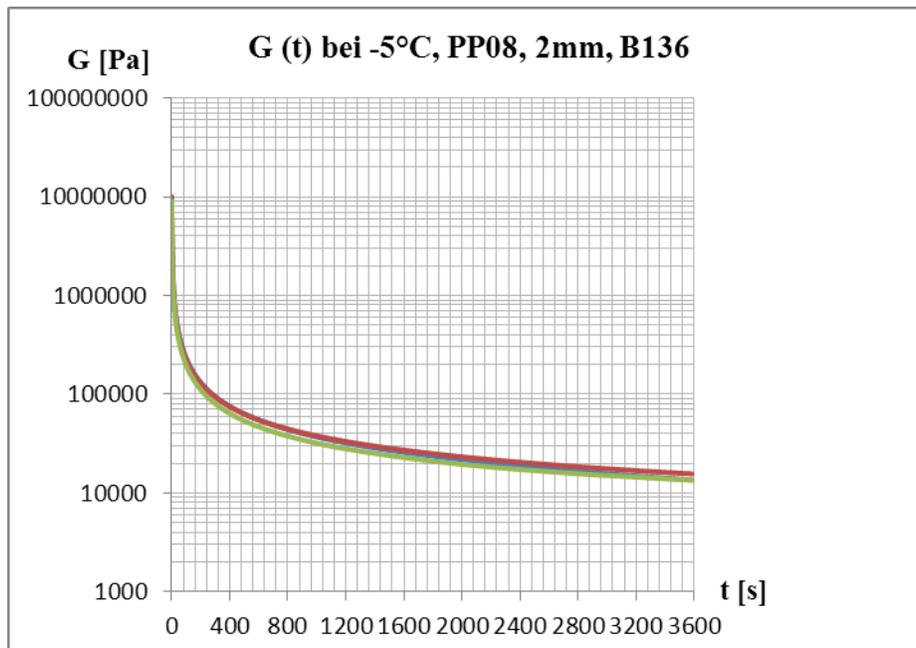
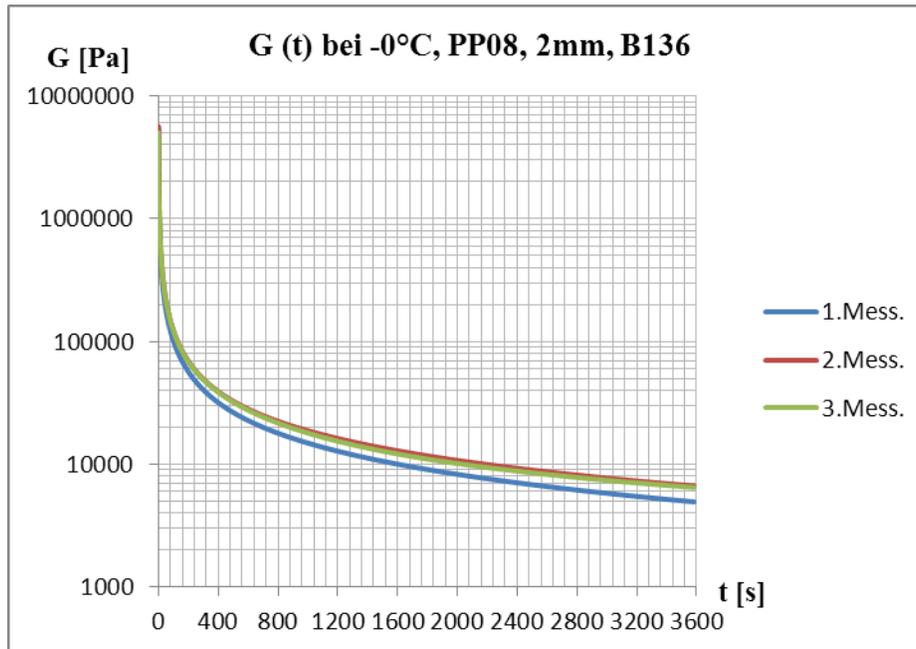
Elastische Rückstellung

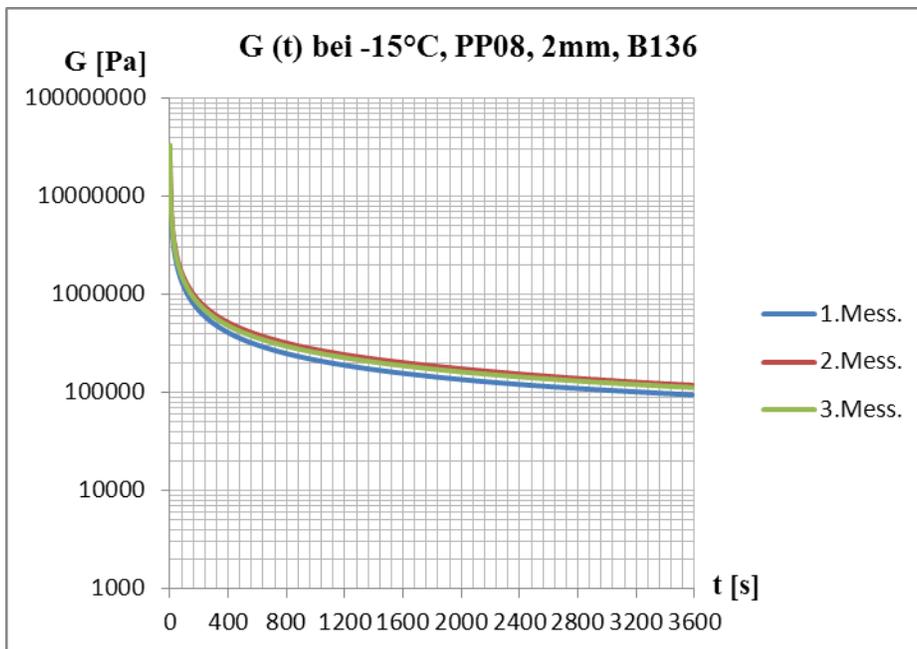
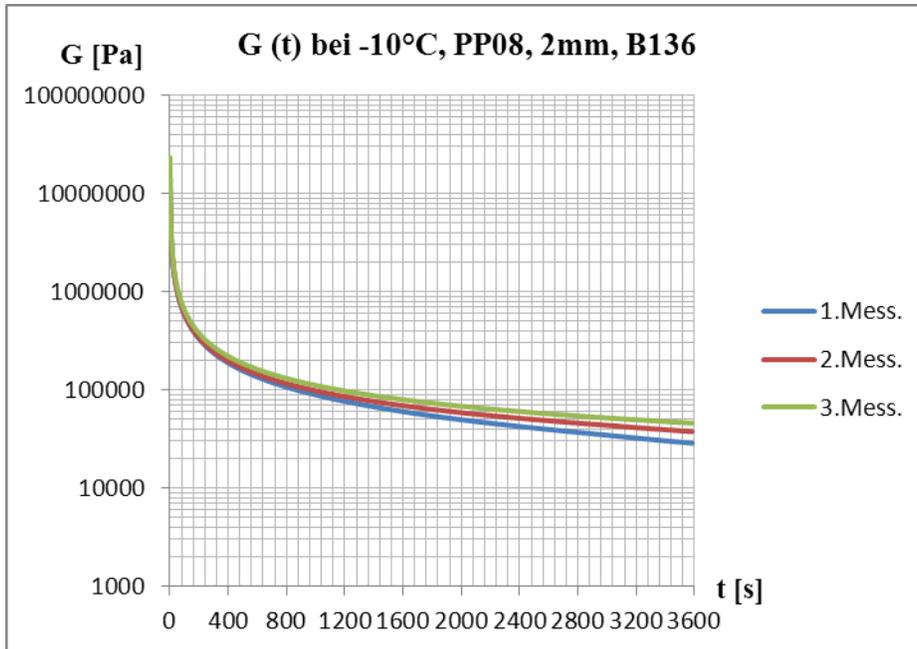
Gerät	Straßentest	Messung 1	Probe 1	Probe 2
Norm	EN 13398	Ausdehnung b. Bruch	N/V	N/V
Temperatur	25,00 °C	Abstand d	N/V	N/V
Ausziehgeschw.	50 mm/min	Elast. Rückstellung RE	N/V	N/V
		Mittelwert.	N/V	

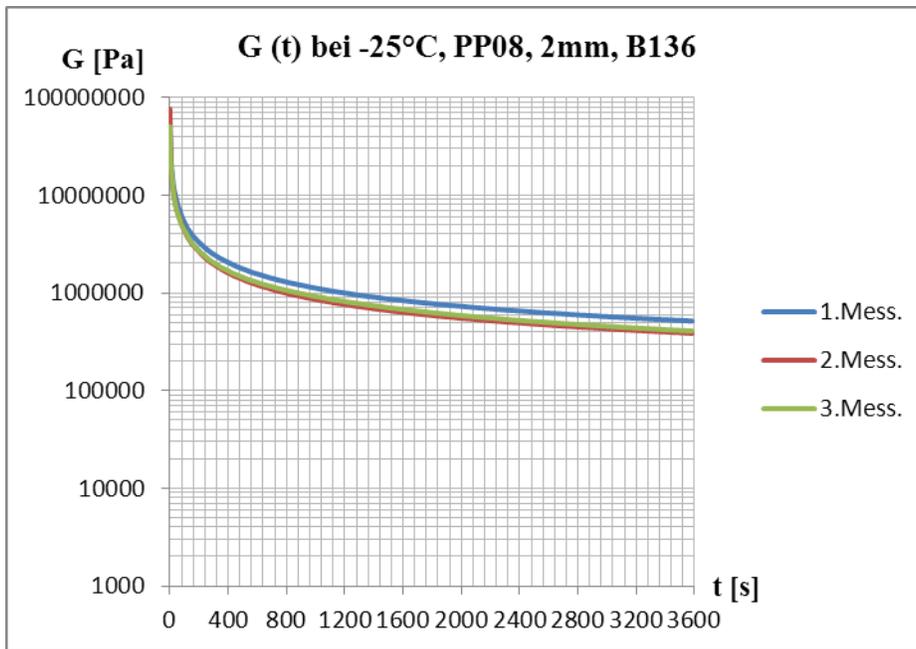
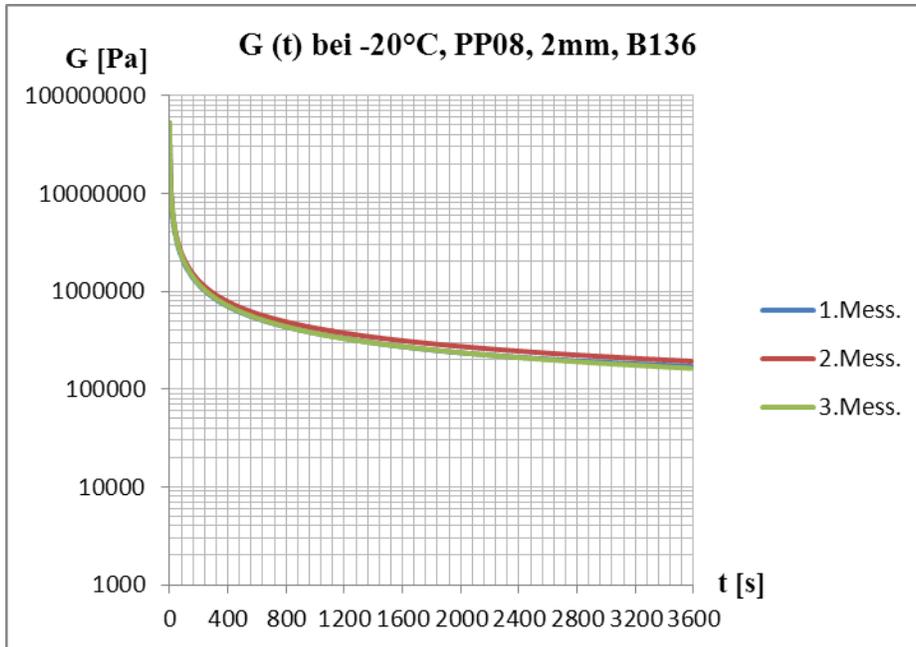
Anmerkungen

Ergebnisse der statischen Kriechprüfungen mittels DSR

Straßenbaubitumen 70/100 (B 70/100)



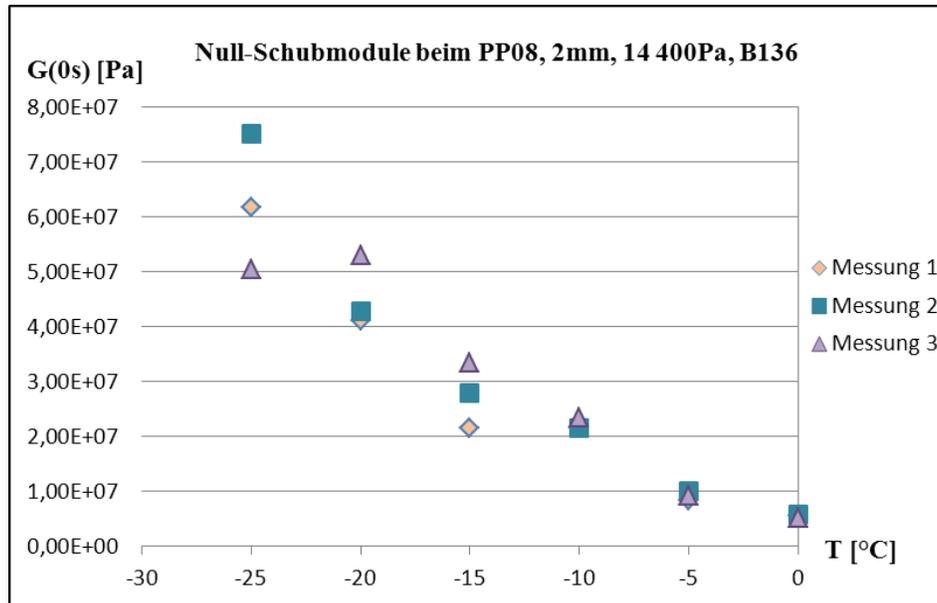




**G(t) als Funktion der Temperatur - 0s, 10s, 100s, 1000s, 3600s
bei PP08 Durchmesser und 2mm Spalt, B136**

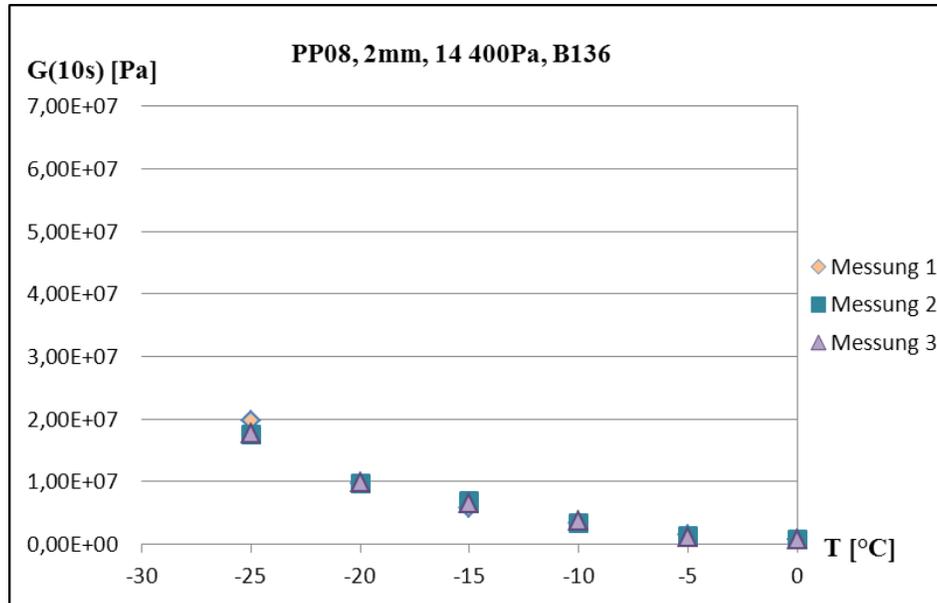
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₀	Messung 1	5,62E+06	8,38E+06	2,15E+07	2,15E+07	4,10E+07	6,17E+07
	Messung 2	5,64E+06	1,01E+07	2,15E+07	2,78E+07	4,28E+07	7,50E+07
	Messung 3	5,03E+06	9,15E+06	2,34E+07	3,35E+07	5,31E+07	5,04E+07



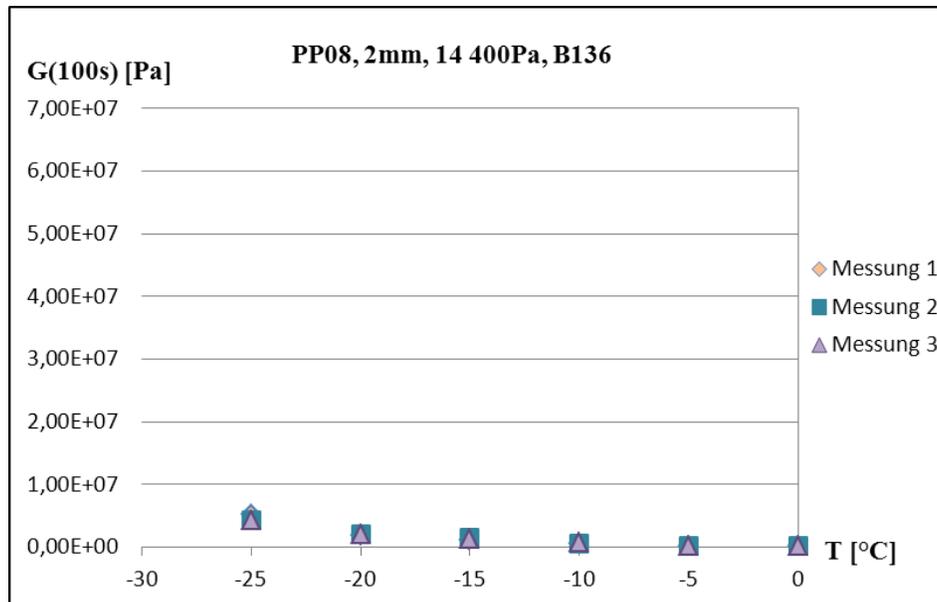
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₁₀	Messung 1	6,45E+05	1,40E+06	3,31E+06	5,71E+06	9,60E+06	1,97E+07
	Messung 2	7,66E+05	1,31E+06	3,32E+06	6,88E+06	9,69E+06	1,75E+07
	Messung 3	7,45E+05	1,19E+06	3,63E+06	6,46E+06	9,80E+06	1,78E+07



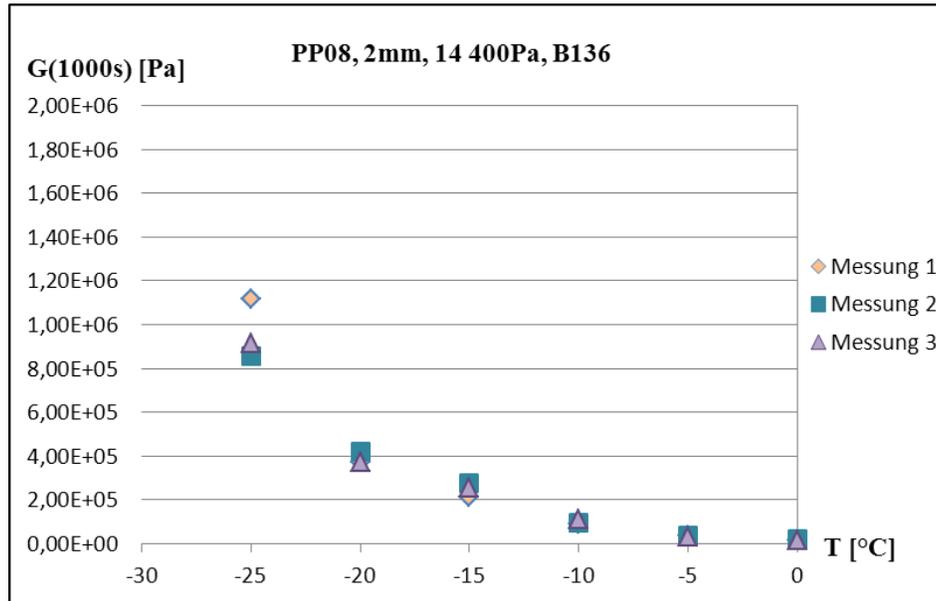
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀	Messung 1	1,01E+05	2,32E+05	5,79E+05	1,15E+06	1,92E+06	5,23E+06
	Messung 2	1,23E+05	2,24E+05	5,88E+05	1,43E+06	2,10E+06	4,30E+06
	Messung 3	1,21E+05	1,96E+05	6,49E+05	1,32E+06	1,98E+06	4,33E+06



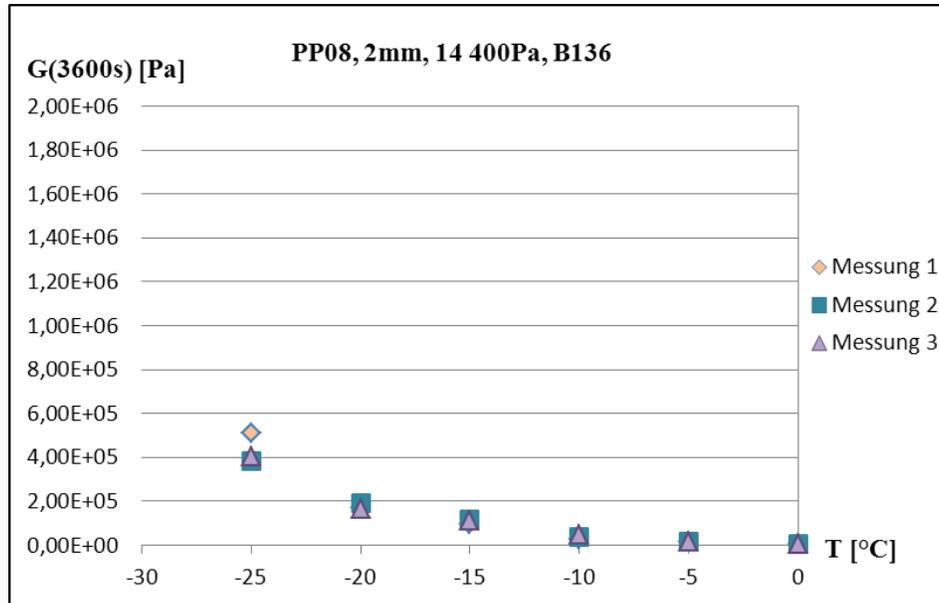
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀₀	Messung 1	1,49E+04	3,69E+04	8,92E+04	2,14E+05	3,72E+05	1,12E+06
	Messung 2	1,87E+04	3,78E+04	9,82E+04	2,74E+05	4,20E+05	8,56E+05
	Messung 3	1,80E+04	3,19E+04	1,11E+05	2,56E+05	3,72E+05	9,16E+05



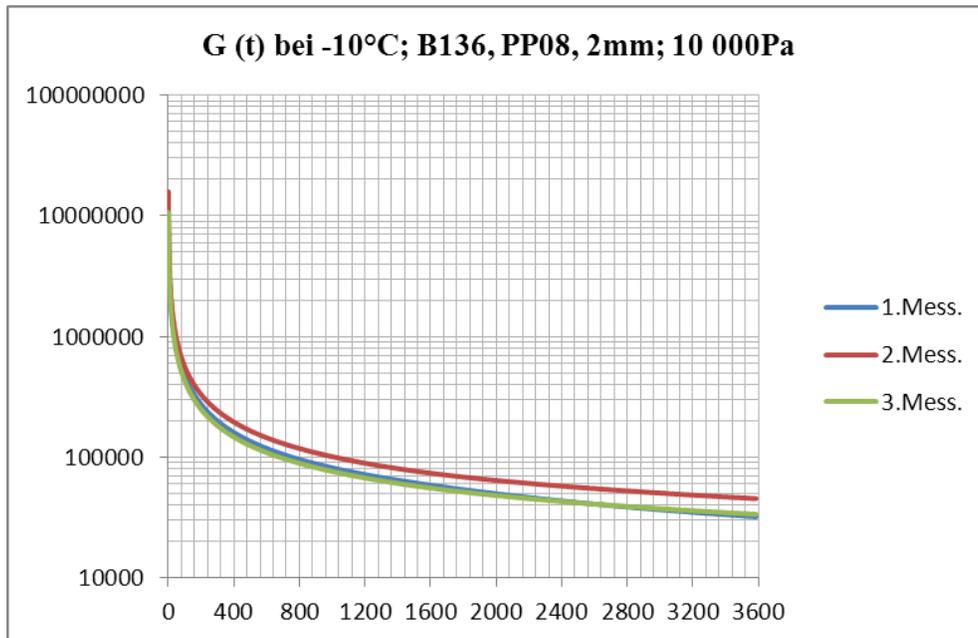
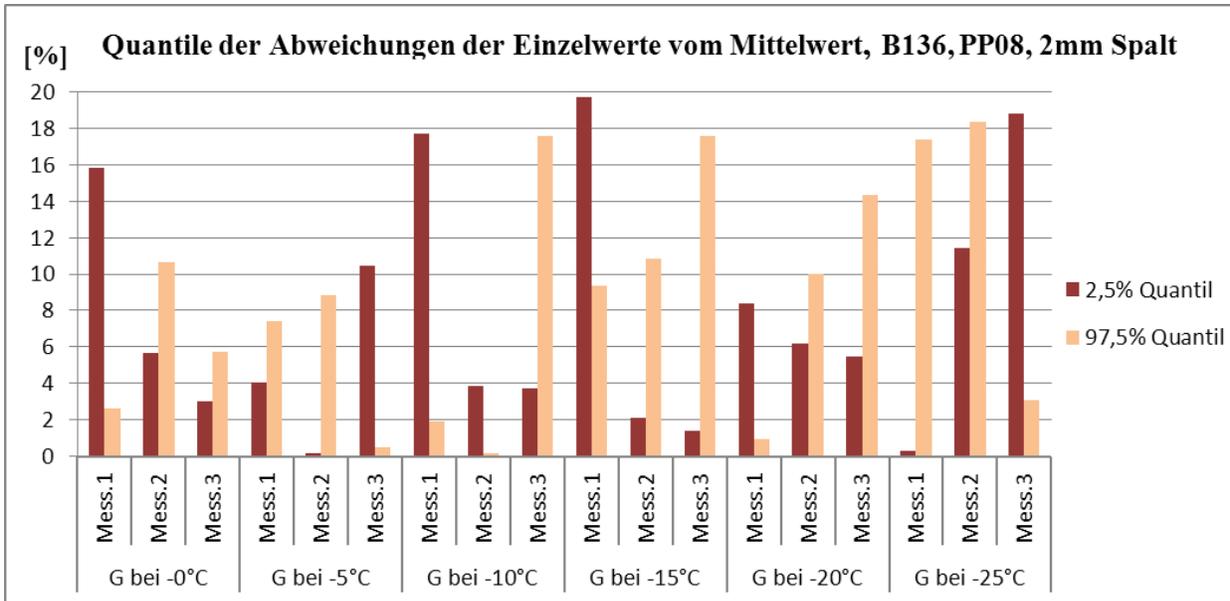
Messtemperatur

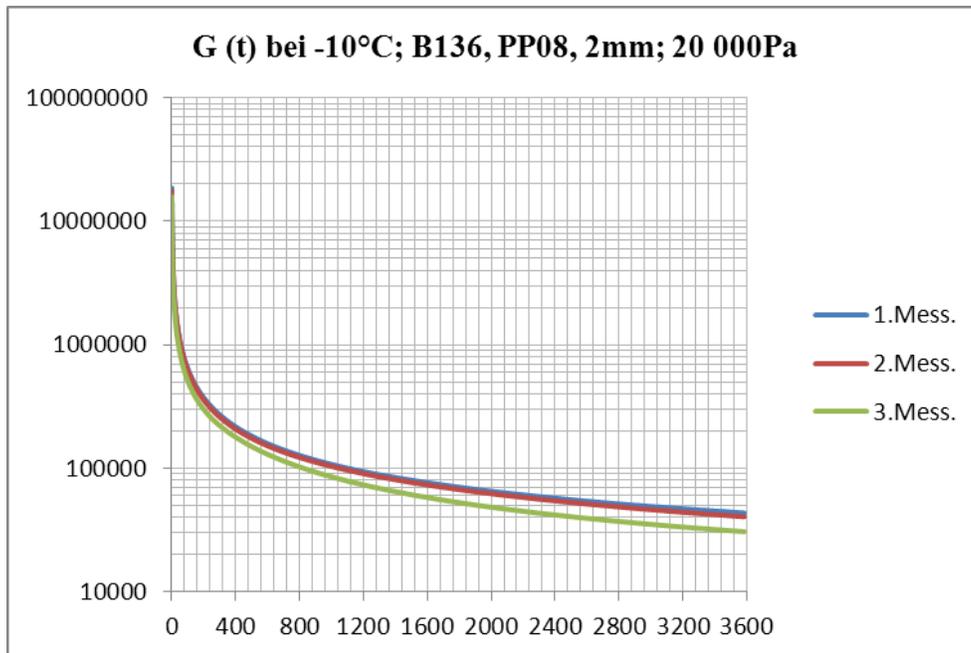
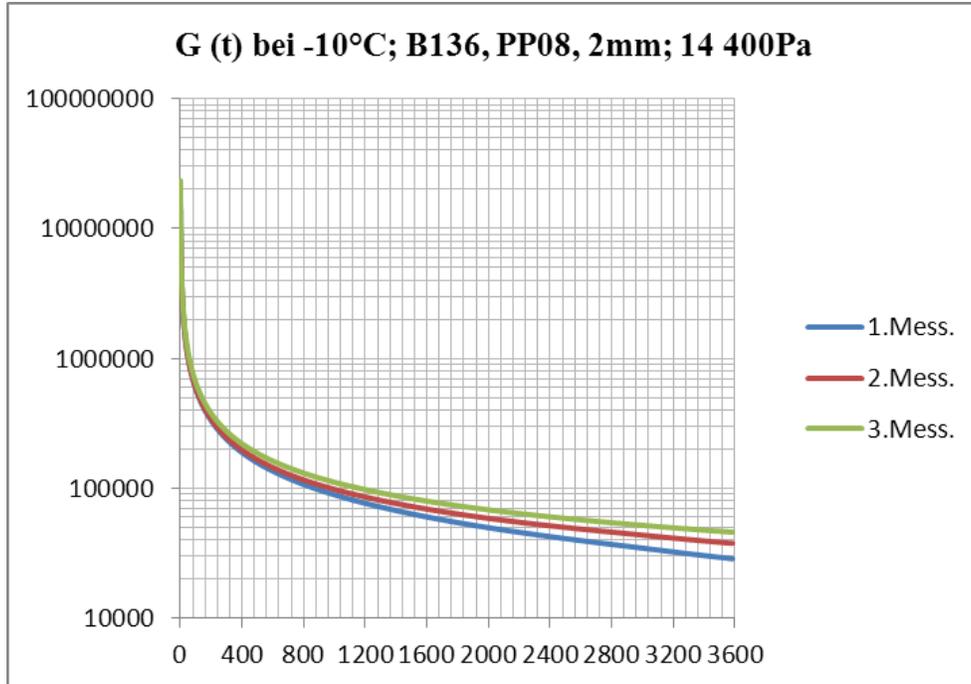
	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₃₆₀₀	Messung 1	4,92E+03	1,35E+04	2,86E+04	9,47E+04	1,71E+05	5,13E+05
	Messung 2	6,63E+03	1,56E+04	3,76E+04	1,19E+05	1,92E+05	3,84E+05
	Messung 3	6,45E+03	1,35E+04	4,58E+04	1,12E+05	1,63E+05	4,05E+05

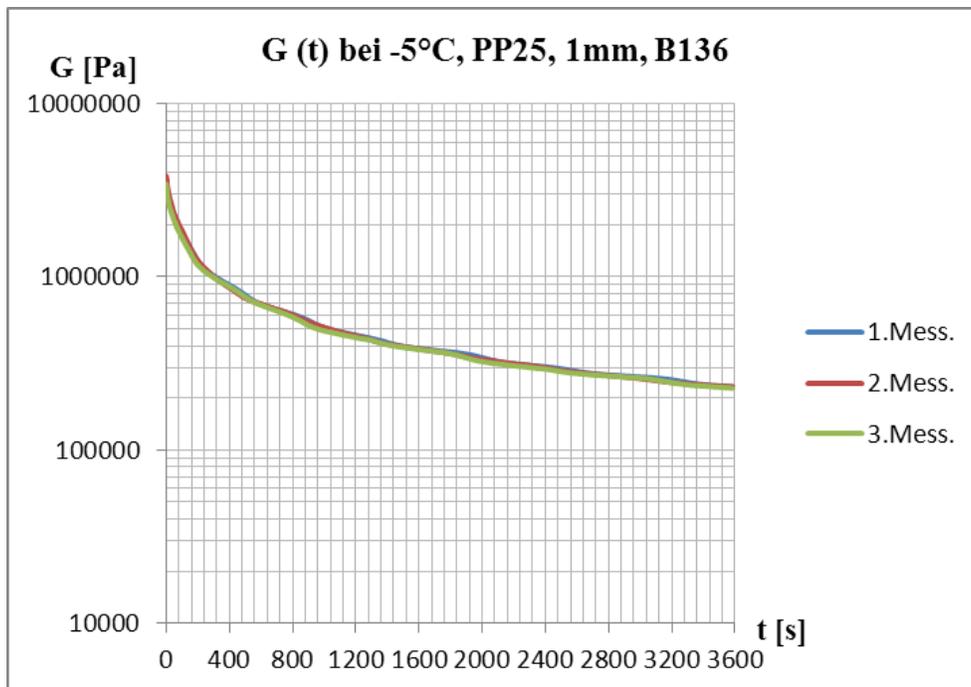
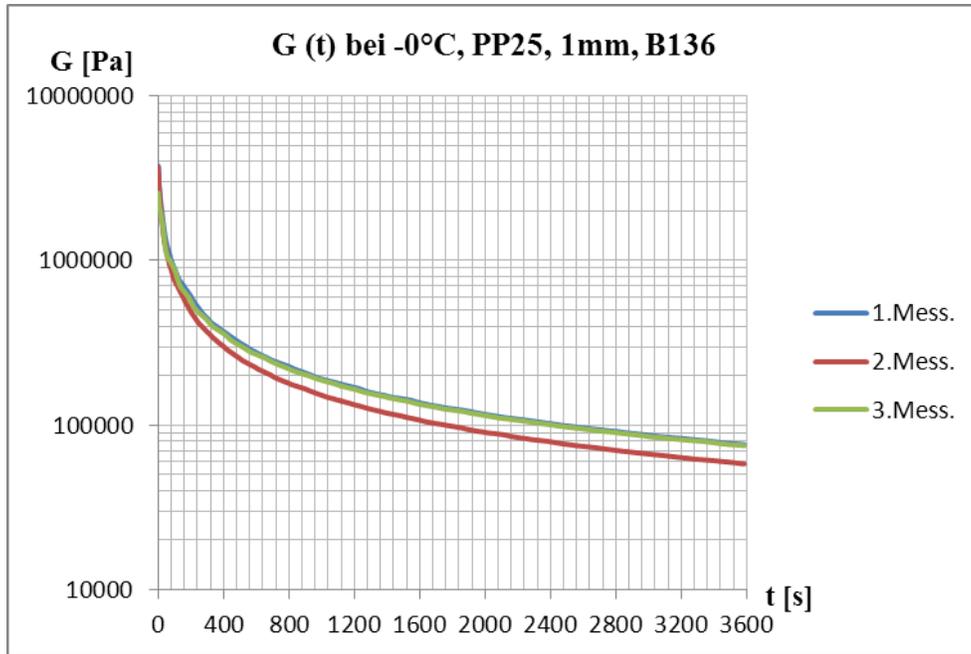


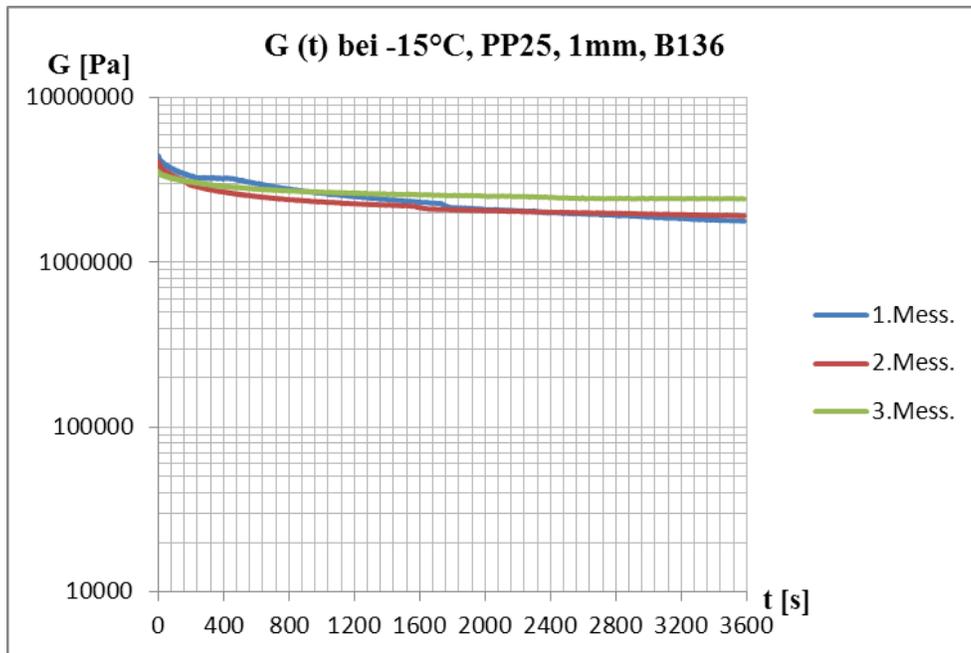
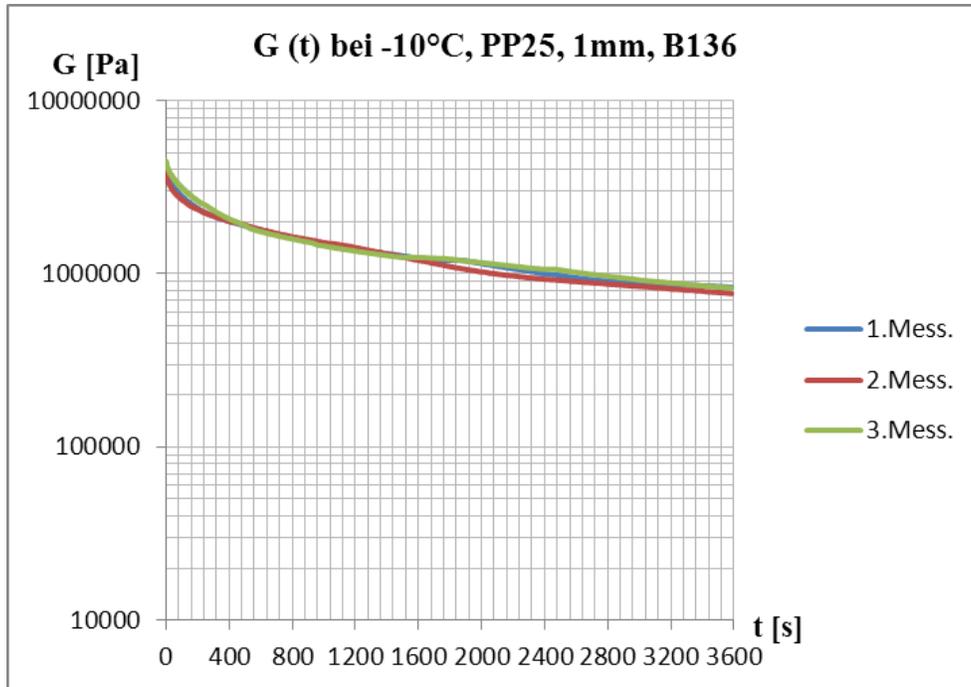
	G bei -0°C			G bei -5°C			G bei -10°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	15,8	5,7	3,0	4,0	0,2	10,5	17,7	3,9	3,8
97,5% Quantil	2,7	10,6	5,8	7,4	8,8	0,5	1,9	0,2	17,5

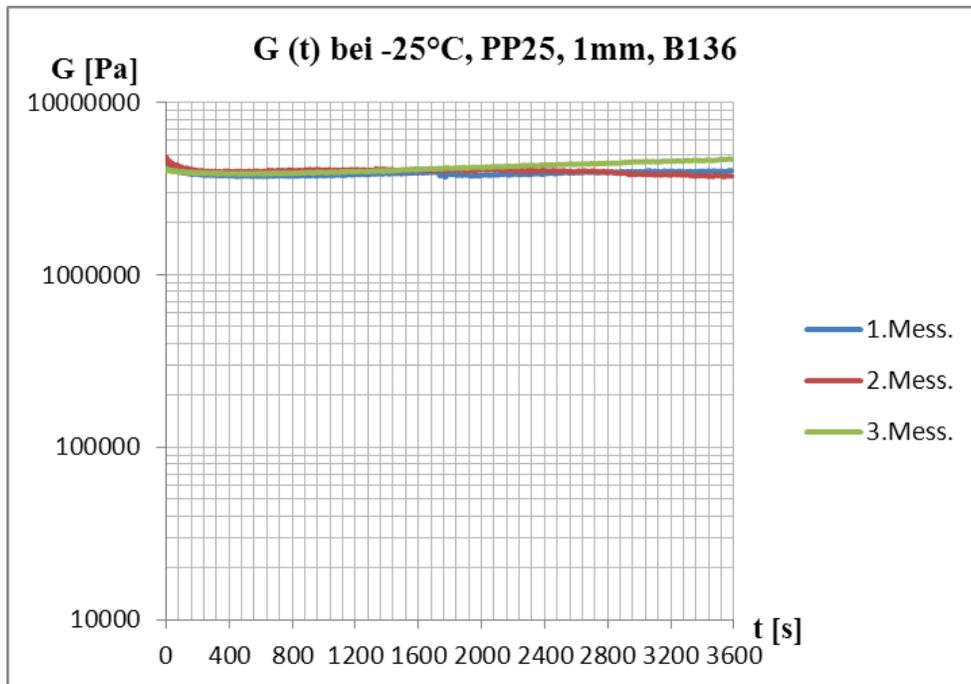
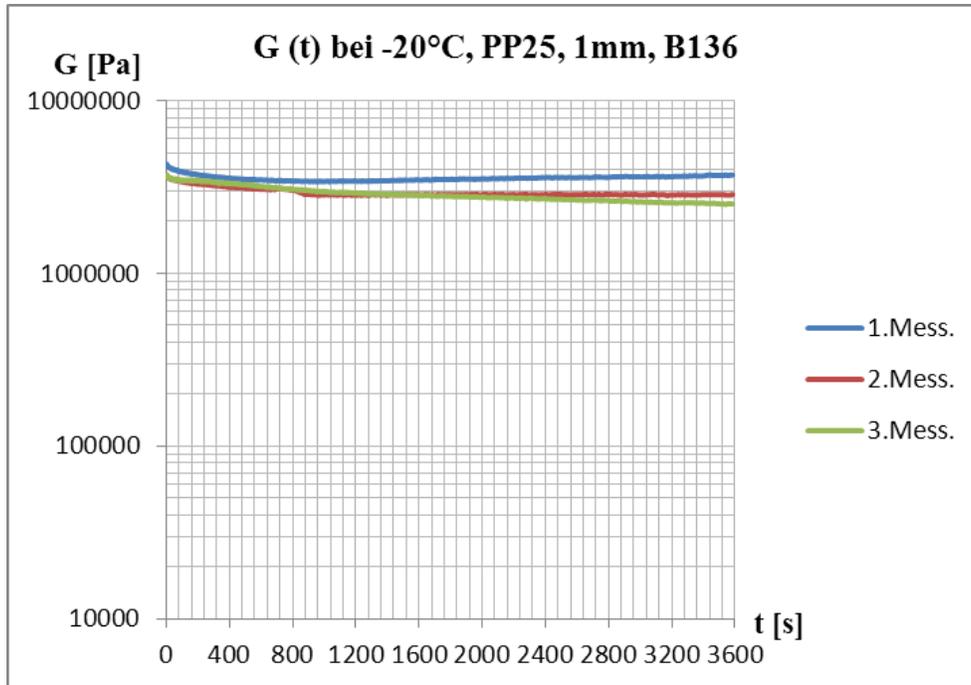
	G bei -15°C			G bei -20°C			G bei -25°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	19,7	2,1	1,4	8,4	6,2	5,5	0,3	11,4	18,8
97,5% Quantil	9,4	10,8	17,6	0,9	10,0	14,3	17,4	18,3	3,1





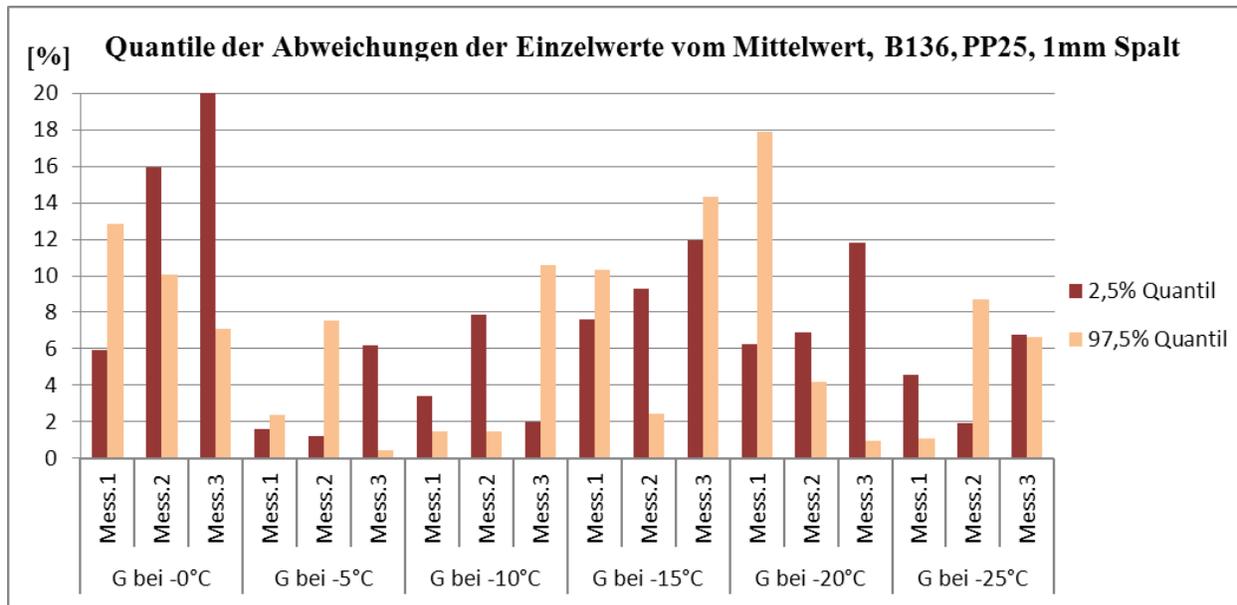






	G bei -0°C			G bei -5°C			G bei -10°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	5,9	16,0	22,6	1,6	1,2	6,2	3,4	7,8	2,0
97,5% Quantil	12,9	10,1	7,1	2,4	7,5	0,4	1,5	1,5	10,6

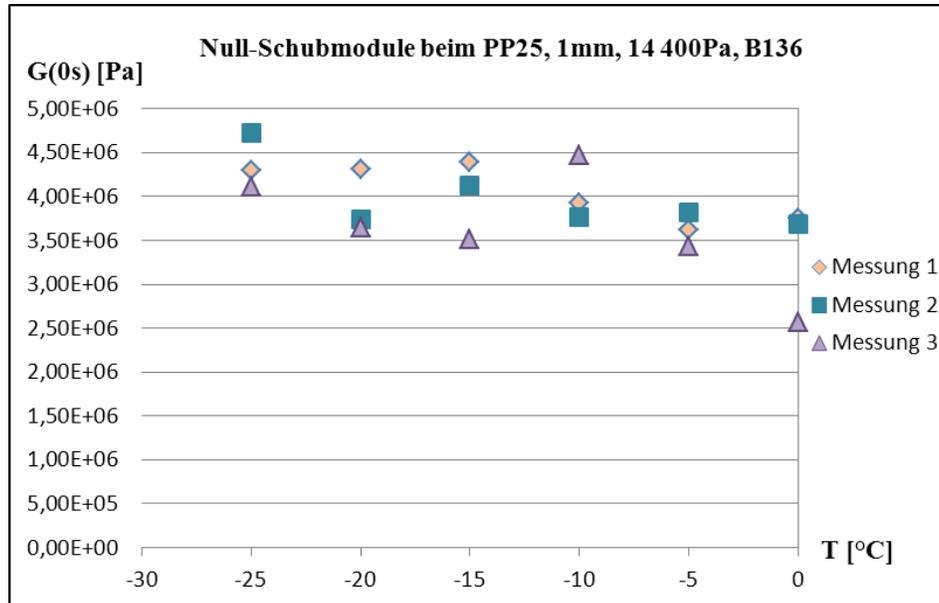
	G bei -15°C			G bei -20°C			G bei -25°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	7,6	9,3	11,9	6,3	6,9	11,8	4,6	1,9	6,7
97,5% Quantil	10,3	2,5	14,4	17,8	4,2	0,9	1,1	8,7	6,7



**G(t) als Funktion der Temperatur - 0s, 10s, 100s, 1000s, 3600s
bei PP25 Durchmesser und 1mm Spalt**

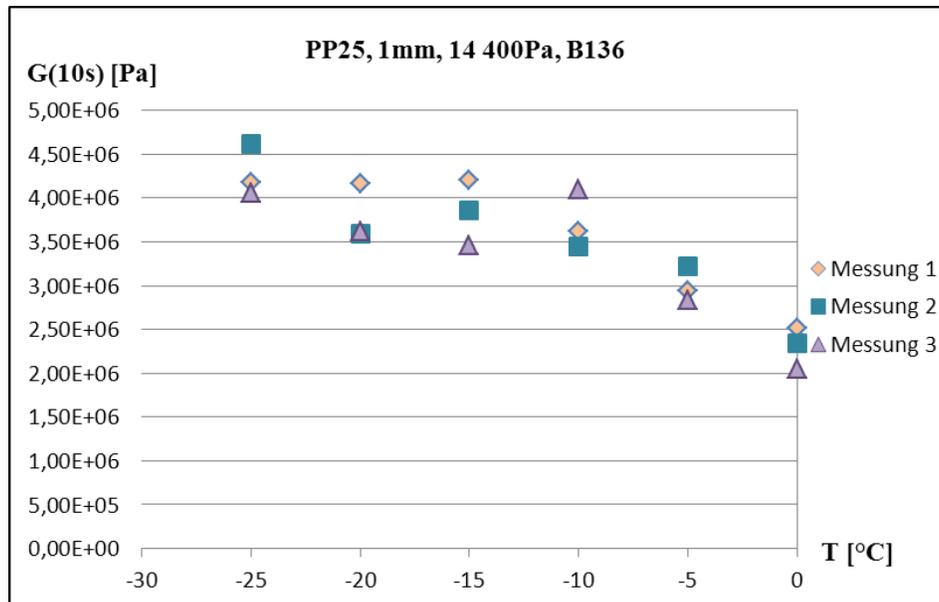
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₀	Messung 1	3,75E+06	3,62E+06	3,93E+06	4,39E+06	4,31E+06	4,30E+06
	Messung 2	3,68E+06	3,82E+06	3,77E+06	4,12E+06	3,74E+06	4,72E+06
	Messung 3	2,57E+06	3,43E+06	4,47E+06	3,51E+06	3,65E+06	4,11E+06



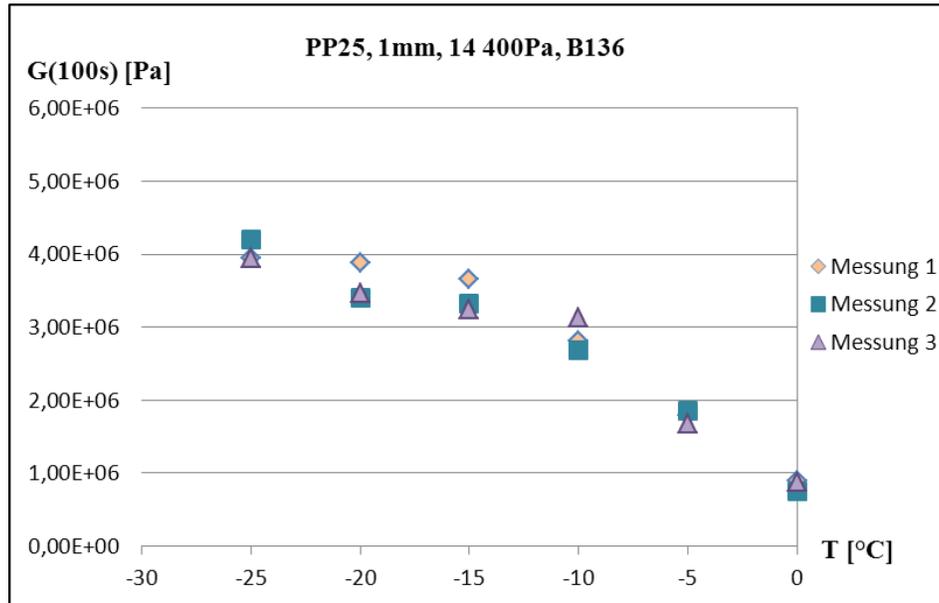
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₁₀	Messung 1	2,52E+06	2,95E+06	3,62E+06	4,21E+06	4,16E+06	4,18E+06
	Messung 2	2,34E+06	3,22E+06	3,44E+06	3,86E+06	3,59E+06	4,62E+06
	Messung 3	2,05E+06	2,83E+06	4,10E+06	3,45E+06	3,62E+06	4,06E+06



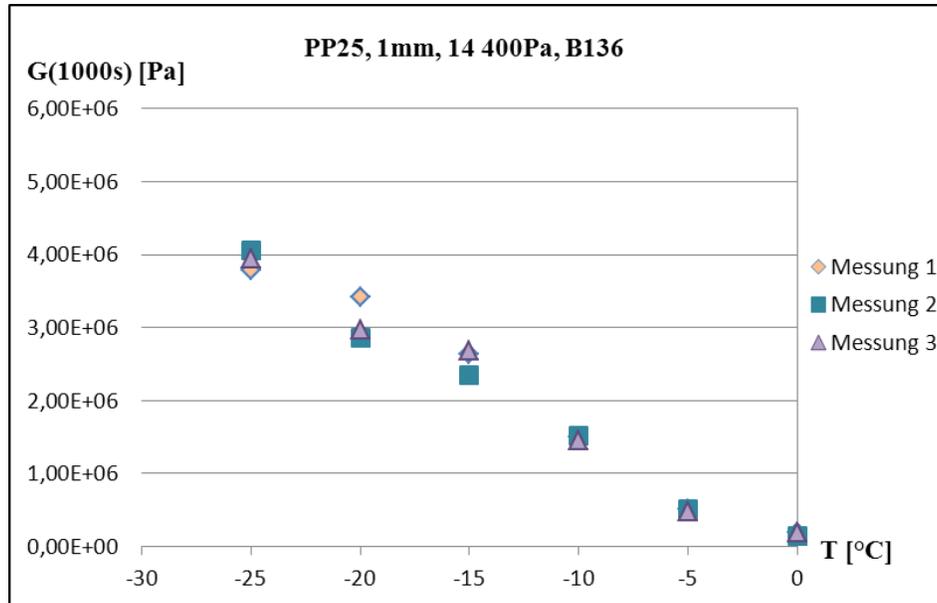
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀	Messung 1	8,90E+05	1,79E+06	2,82E+06	3,65E+06	3,89E+06	3,94E+06
	Messung 2	7,56E+05	1,85E+06	2,68E+06	3,33E+06	3,41E+06	4,19E+06
	Messung 3	8,76E+05	1,68E+06	3,14E+06	3,24E+06	3,47E+06	3,95E+06



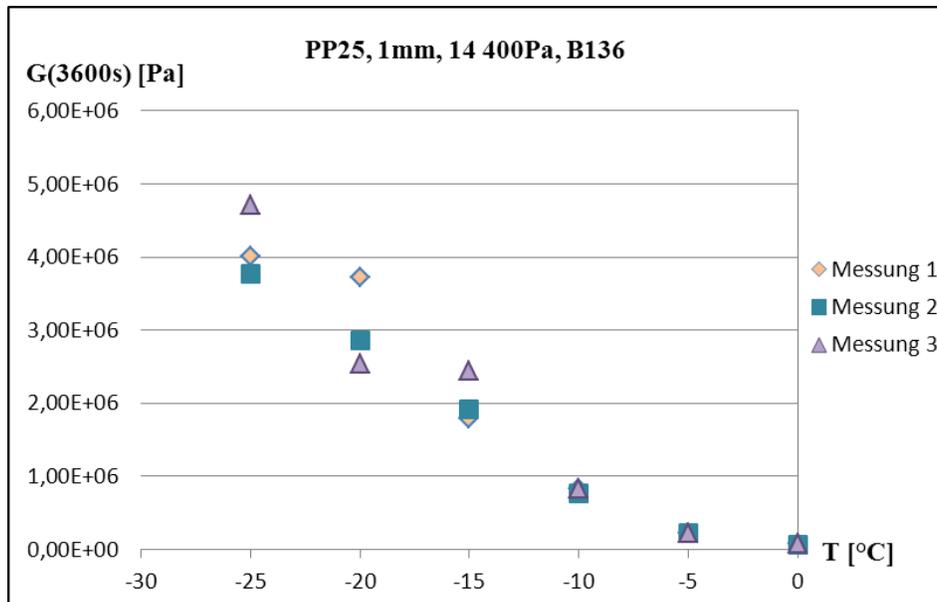
Messtemperatur

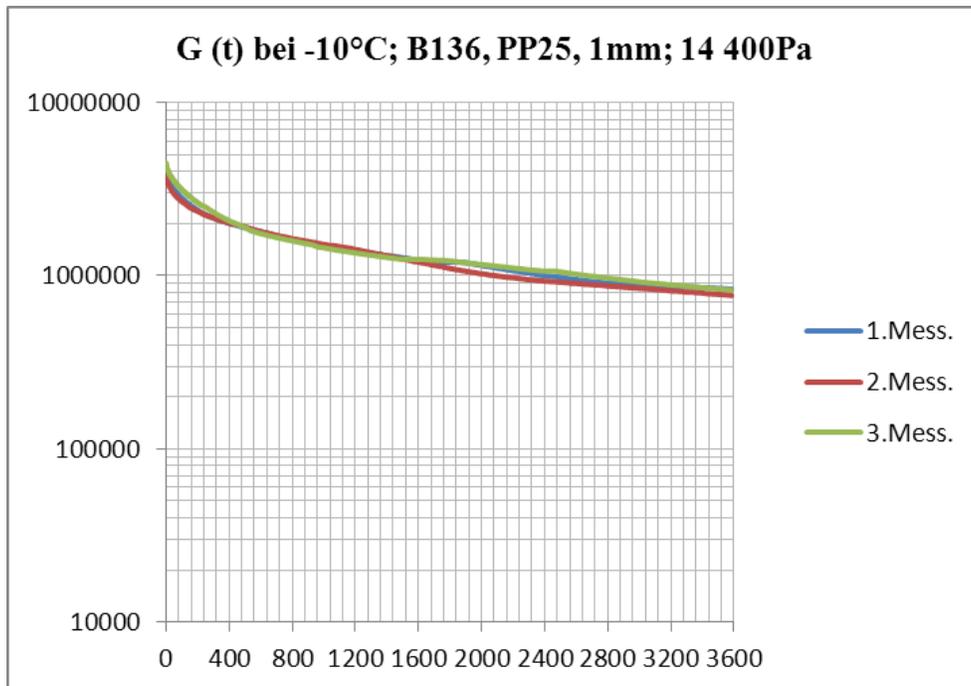
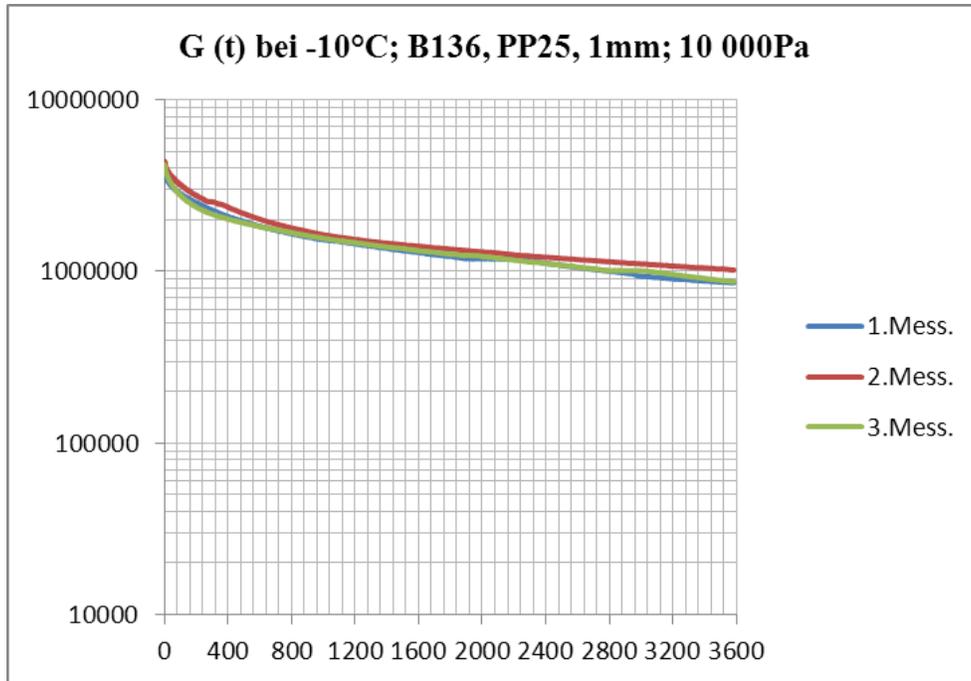
	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀₀	Messung 1	1,91E+05	5,08E+05	1,50E+06	2,64E+06	3,41E+06	3,79E+06
	Messung 2	1,52E+05	5,11E+05	1,52E+06	2,34E+06	2,86E+06	4,06E+06
	Messung 3	1,88E+05	4,87E+05	1,45E+06	2,69E+06	2,97E+06	3,95E+06

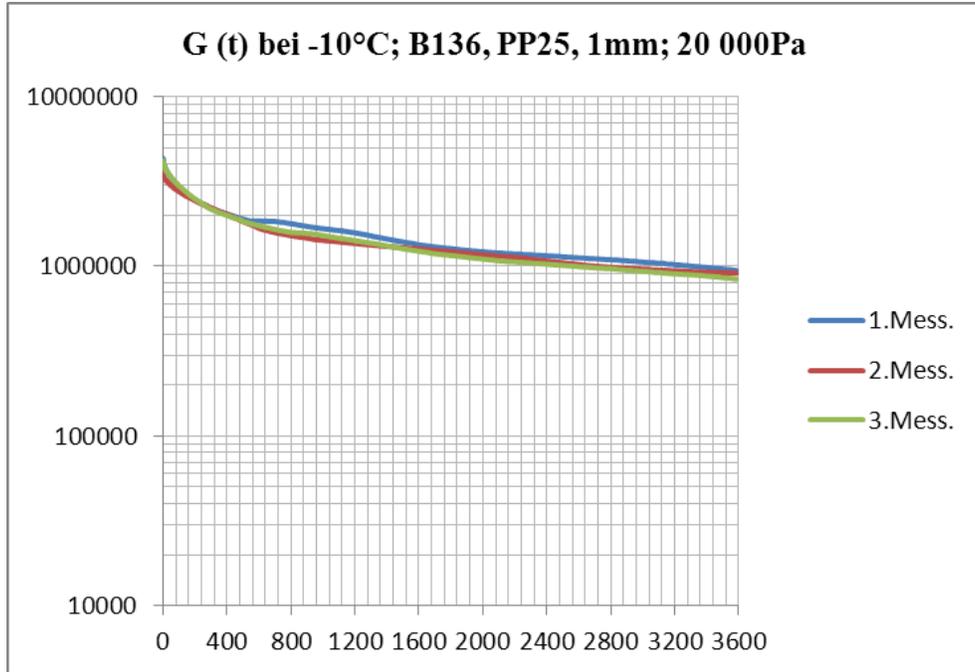


Messtemperatur

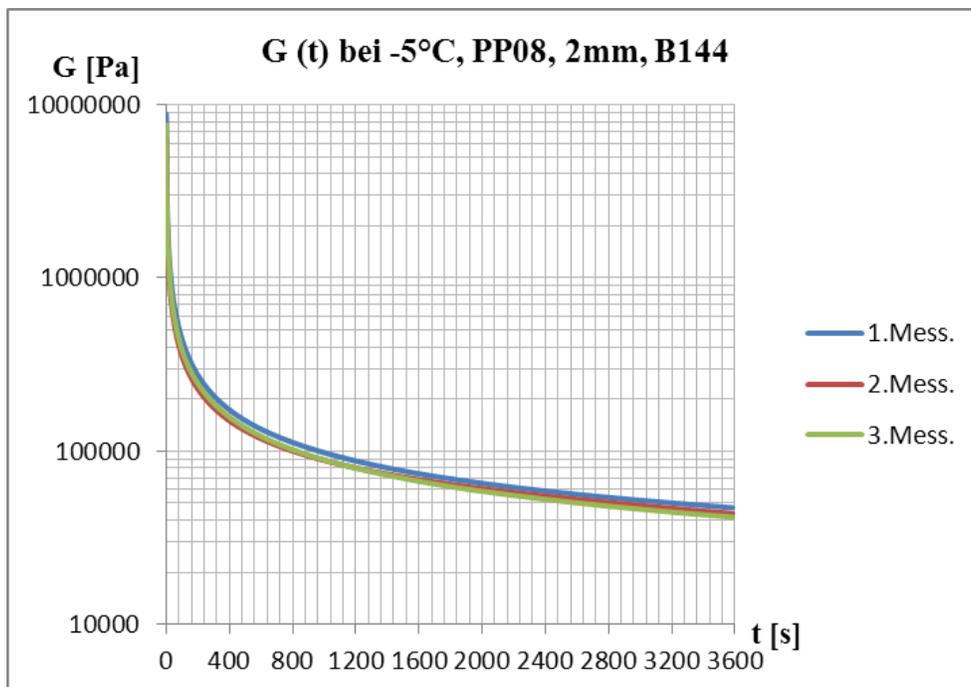
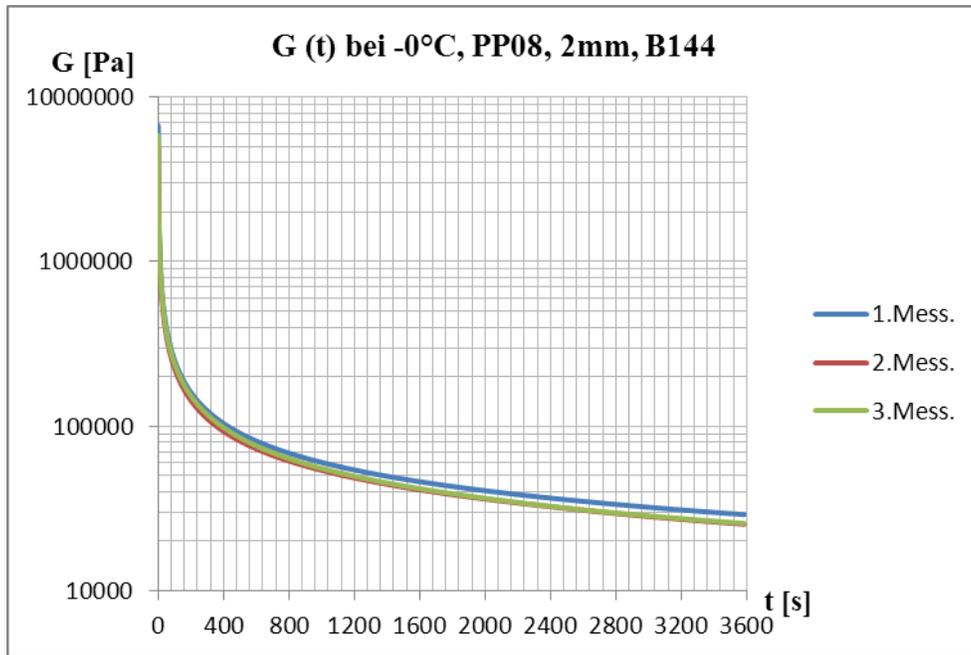
		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₃₆₀₀	Messung 1	7,62E+04	2,32E+05	8,38E+05	1,79E+06	3,72E+06	4,02E+06
	Messung 2	5,81E+04	2,31E+05	7,68E+05	1,91E+06	2,86E+06	3,77E+06
	Messung 3	7,49E+04	2,28E+05	8,27E+05	2,44E+06	2,54E+06	4,71E+06

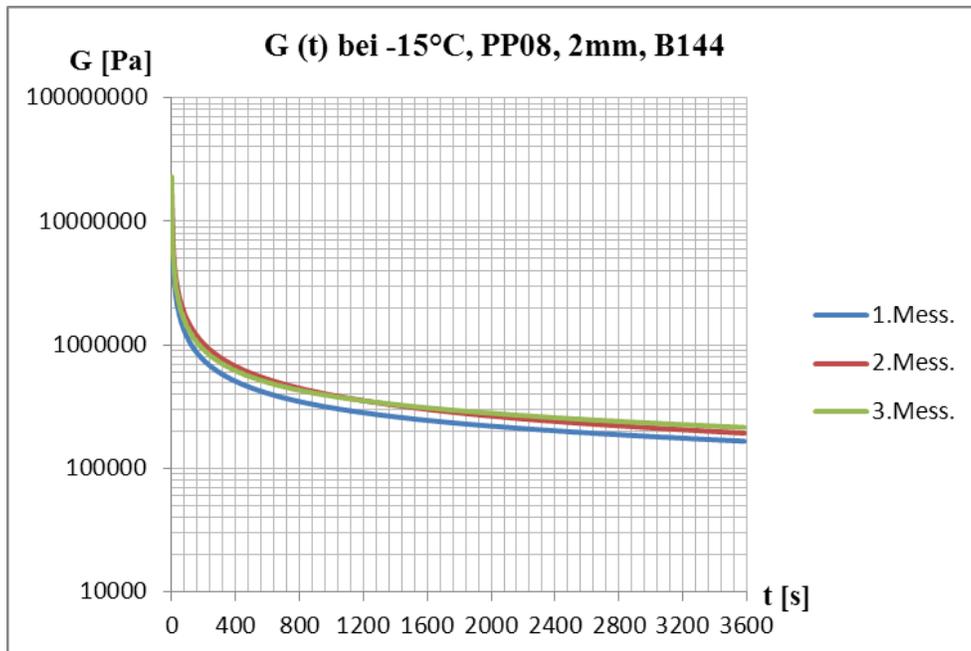
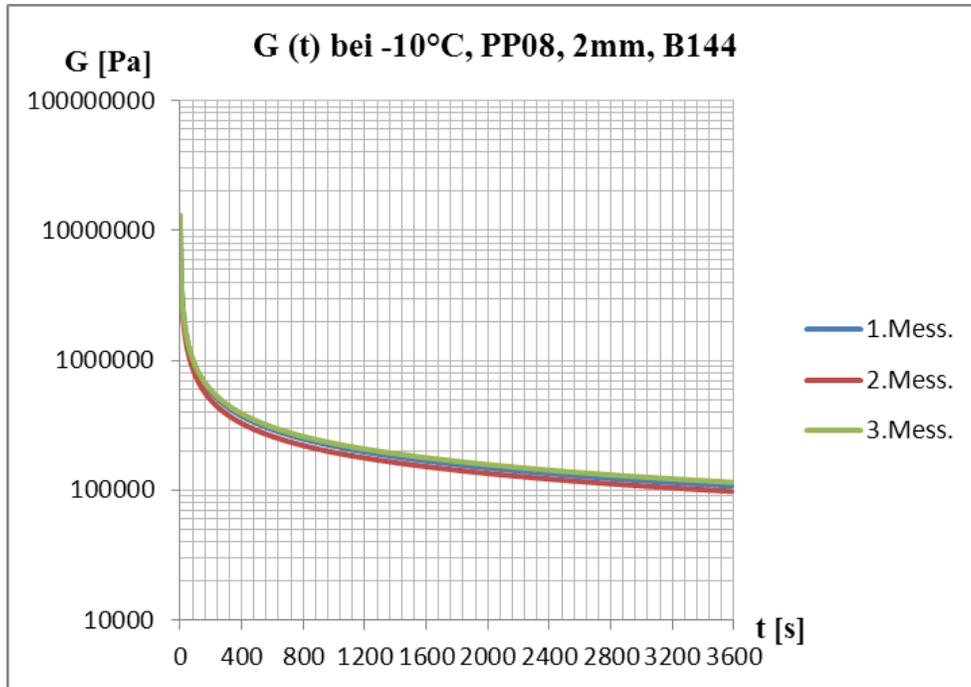


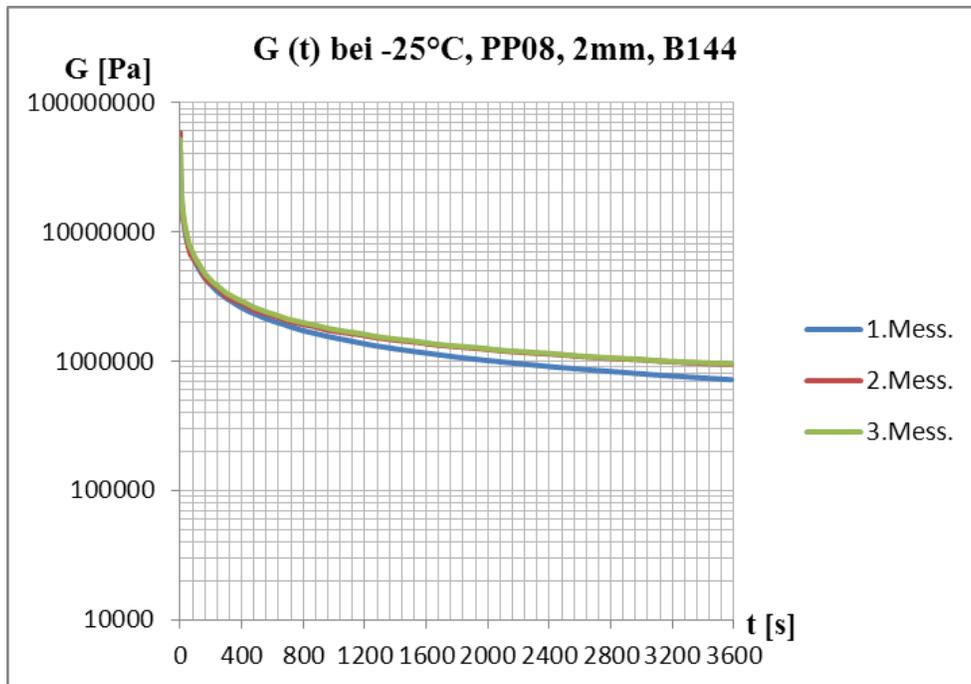
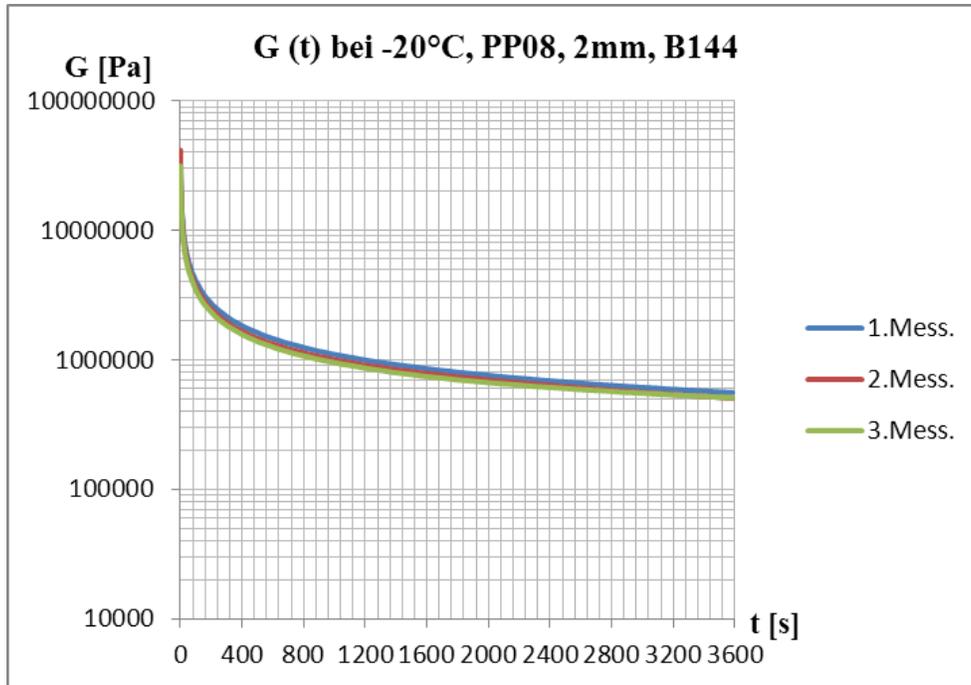




Polymermodifiziertes Bindemittel 45/80-65 (PmB PMB 45/80-65)

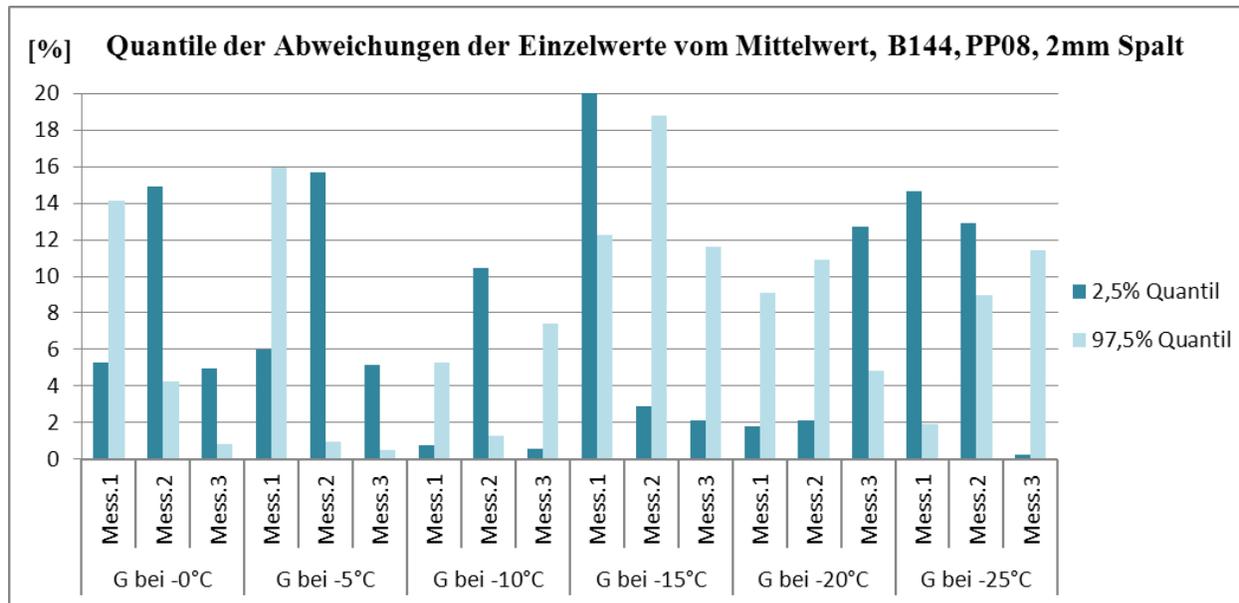






	G bei -0°C			G bei -5°C			G bei -10°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	5,3	14,9	5,0	6,0	15,7	5,2	0,8	10,5	0,6
97,5% Quantil	14,1	4,2	0,8	16,0	1,0	0,5	5,3	1,3	7,4

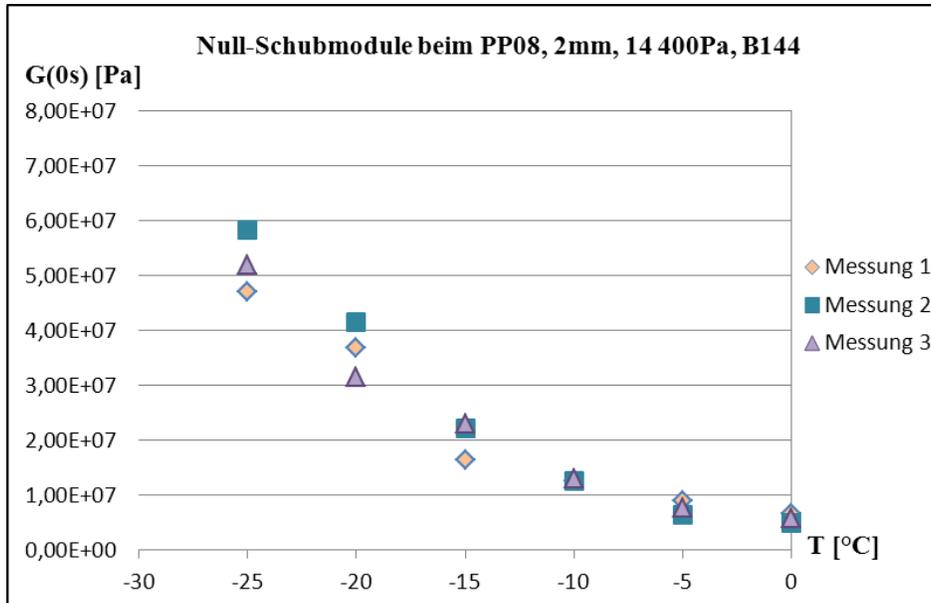
	G bei -15°C			G bei -20°C			G bei -25°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	20,0	2,9	2,2	1,8	2,1	12,7	14,7	12,9	0,3
97,5% Quantil	12,3	18,8	11,6	9,1	10,9	4,9	1,9	9,0	11,5



**G(t) als Funktion der Temperatur - 0s, 10s, 100s, 1000s, 3600s
bei PP08 Durchmesser und 2mm Spalt**

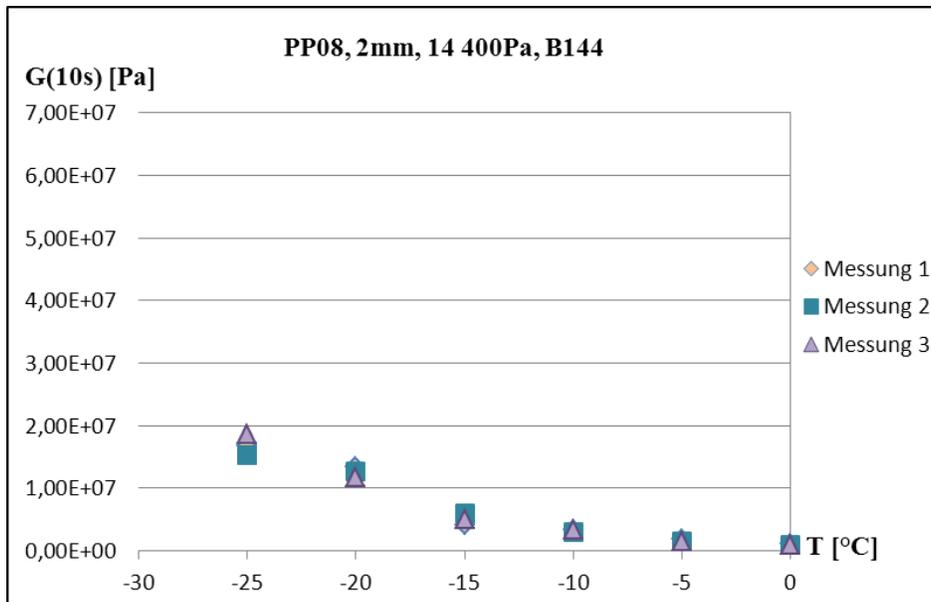
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₀	Messung 1	6,72E+06	8,87E+06	1,26E+07	1,64E+07	3,68E+07	4,70E+07
	Messung 2	4,90E+06	6,43E+06	1,27E+07	2,22E+07	4,15E+07	5,84E+07
	Messung 3	5,84E+06	7,67E+06	1,31E+07	2,30E+07	3,15E+07	5,20E+07



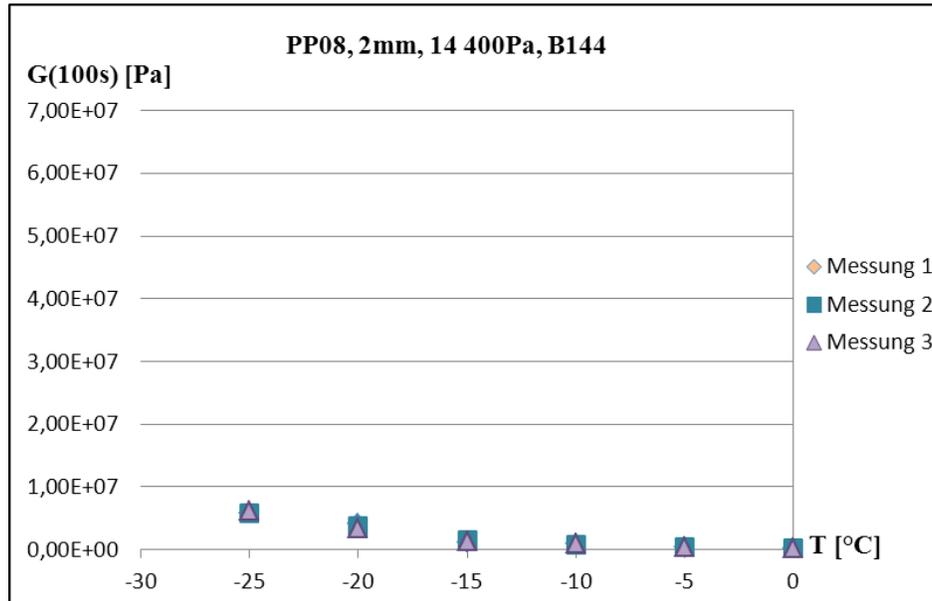
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₁₀	Messung 1	1,10E+06	1,90E+06	3,41E+06	4,09E+06	1,34E+07	1,67E+07
	Messung 2	9,61E+05	1,46E+06	3,08E+06	5,90E+06	1,27E+07	1,52E+07
	Messung 3	1,02E+06	1,60E+06	3,42E+06	5,03E+06	1,17E+07	1,86E+07



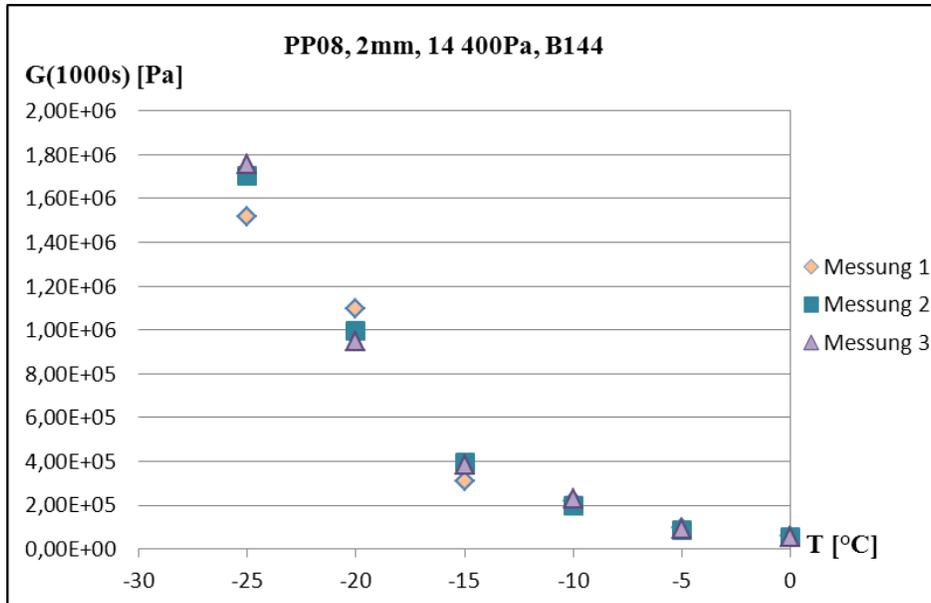
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀	Messung 1	2,51E+05	4,41E+05	8,78E+05	1,14E+06	4,05E+06	5,77E+06
	Messung 2	2,24E+05	3,54E+05	7,57E+05	1,56E+06	3,70E+06	5,85E+06
	Messung 3	2,39E+05	3,83E+05	9,00E+05	1,37E+06	3,44E+06	6,21E+06



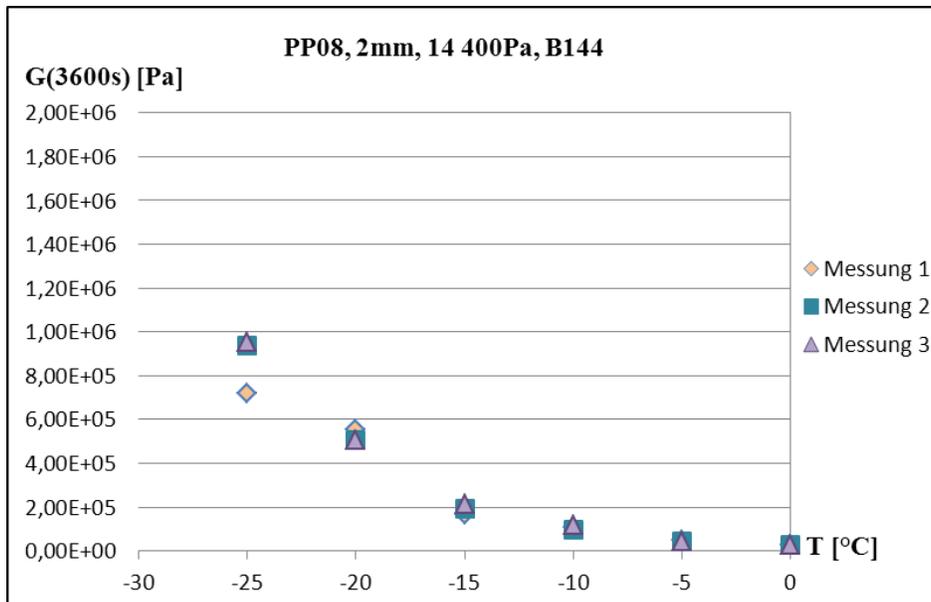
Messtemperatur

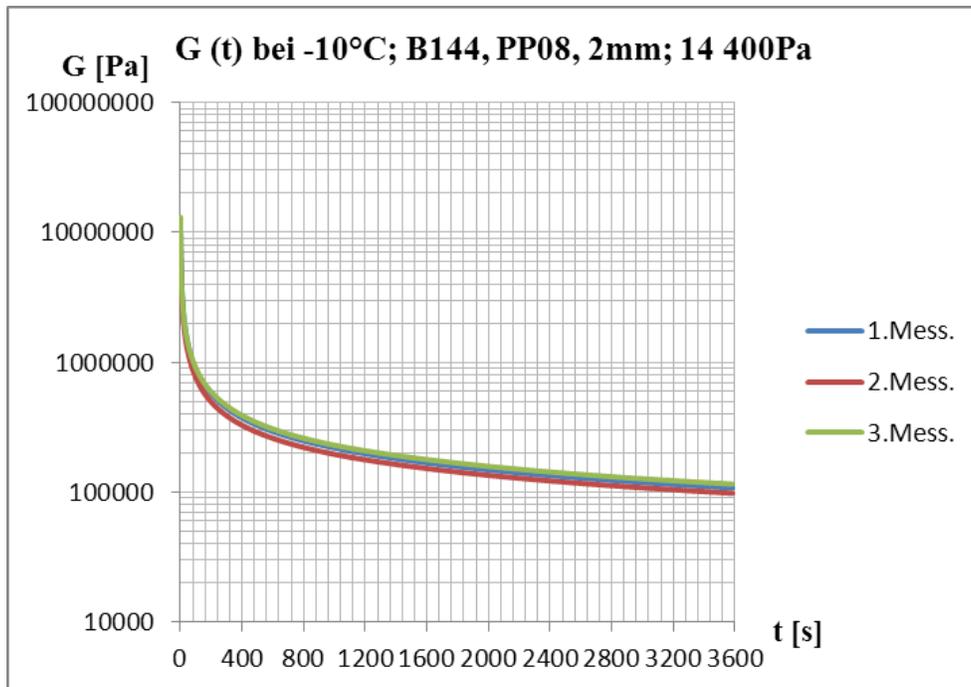
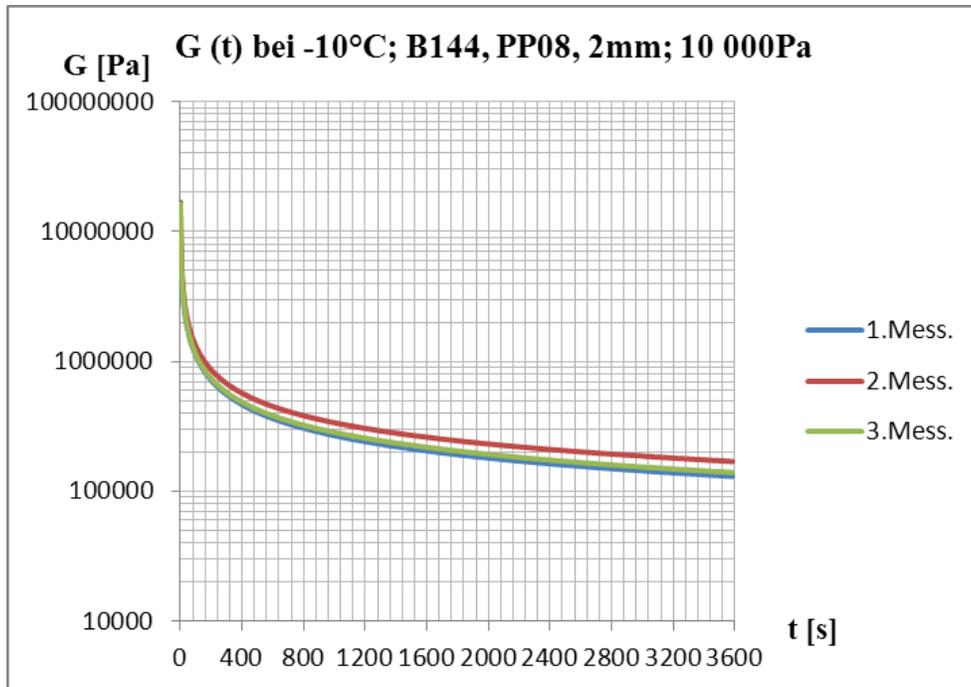
	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀₀	Messung 1	6,03E+04	9,80E+04	2,19E+05	3,10E+05	1,10E+06	1,52E+06
	Messung 2	5,40E+04	8,84E+04	1,96E+05	3,92E+05	9,98E+05	1,70E+06
	Messung 3	5,55E+04	8,91E+04	2,30E+05	3,86E+05	9,50E+05	1,76E+06

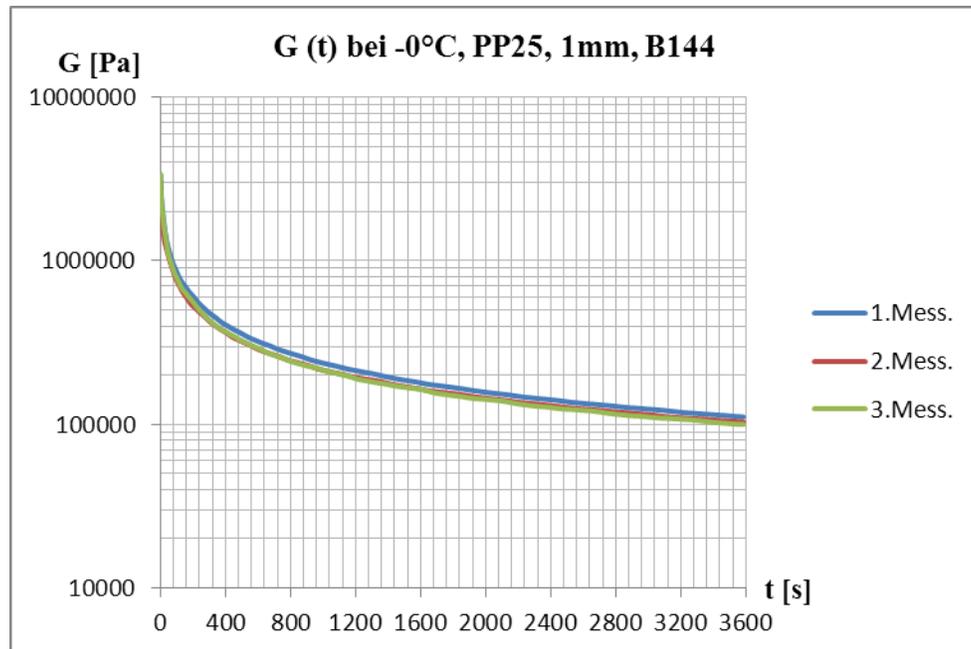
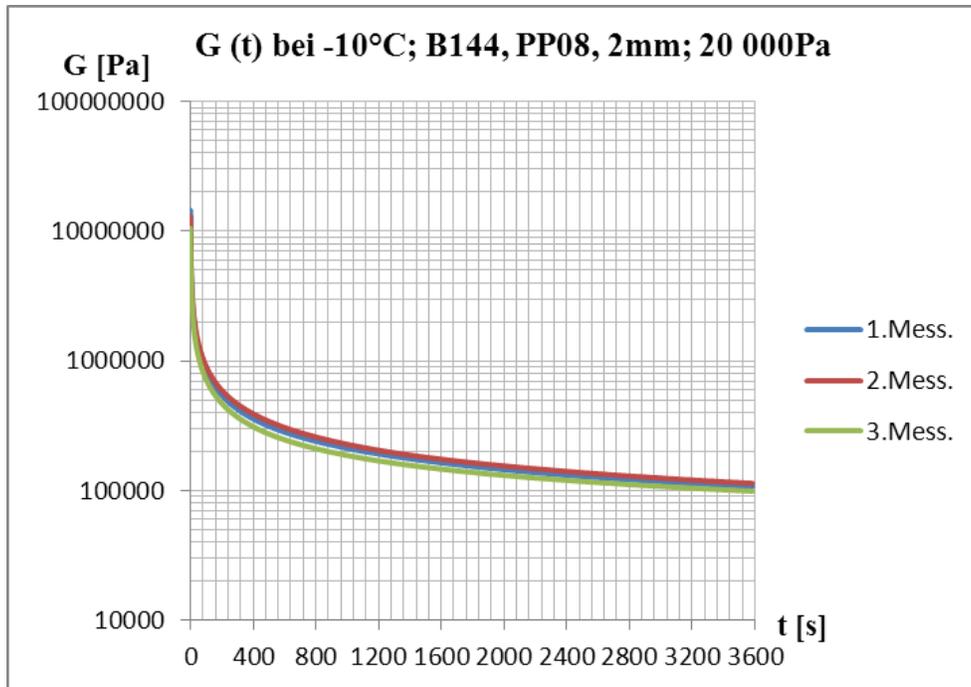


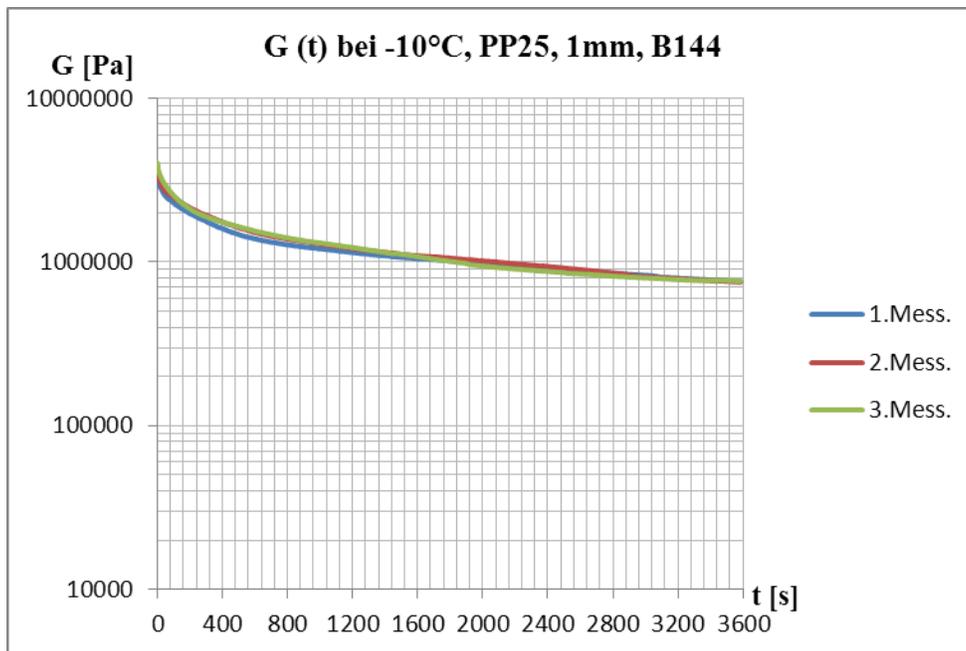
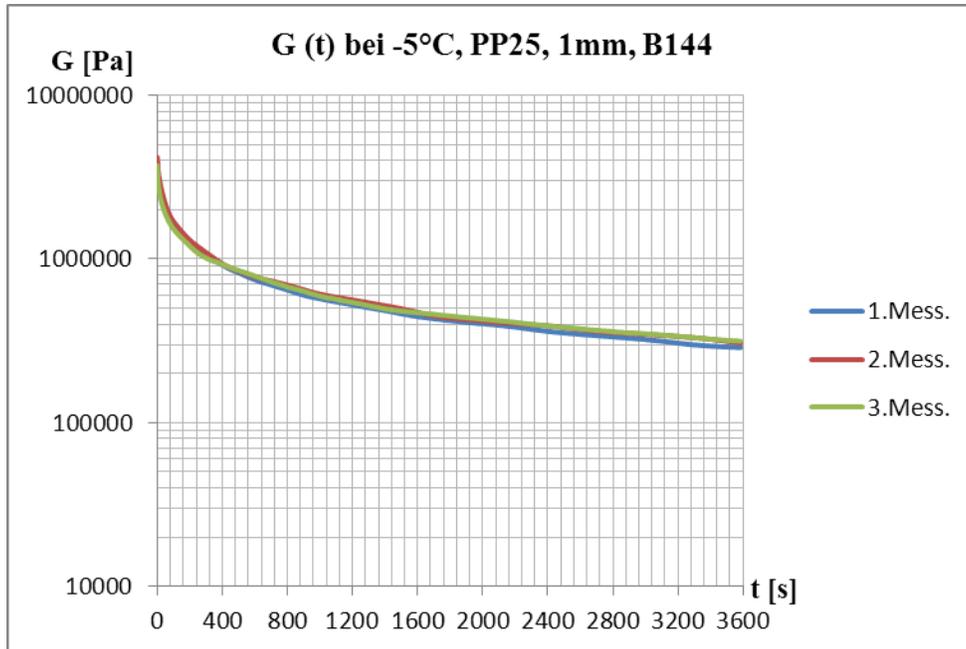
Messtemperatur

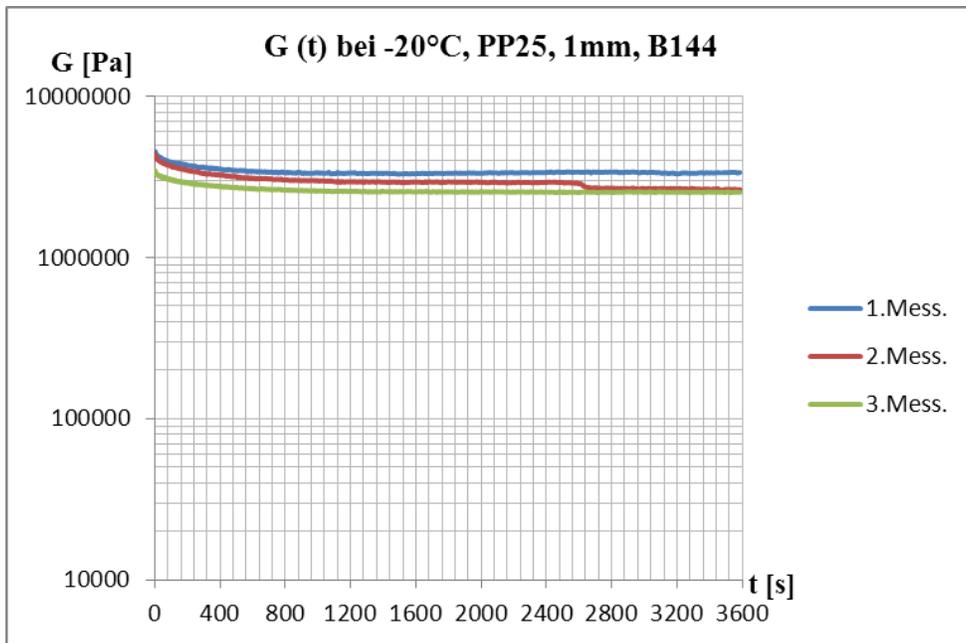
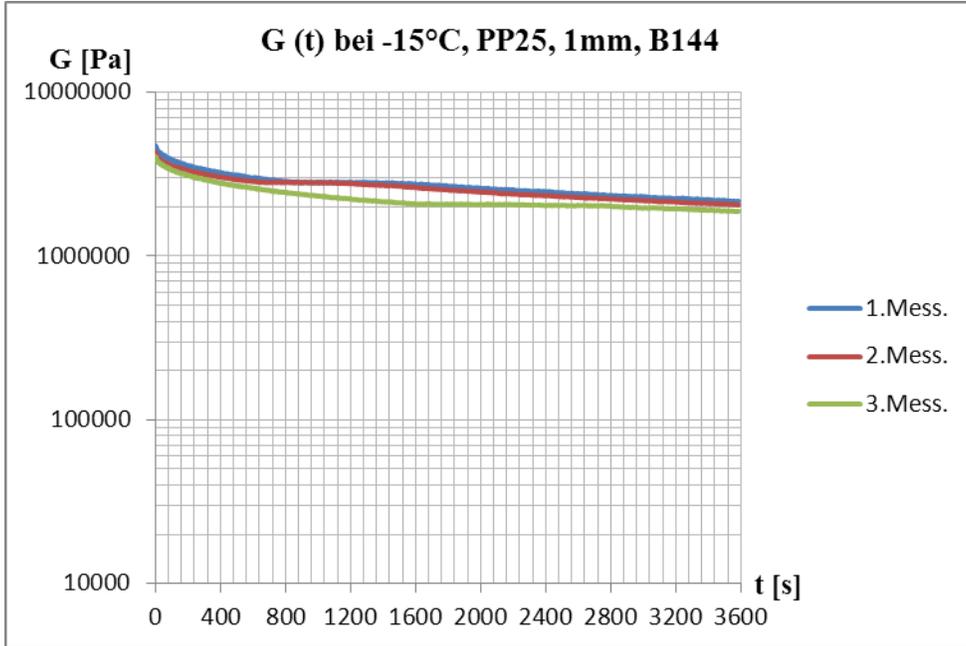
		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₃₆₀₀	Messung 1	2,90E+04	4,70E+04	1,08E+05	1,66E+05	5,55E+05	7,17E+05
	Messung 2	2,54E+04	4,36E+04	9,80E+04	1,93E+05	5,05E+05	9,39E+05
	Messung 3	2,57E+04	4,15E+04	1,15E+05	2,15E+05	5,08E+05	9,51E+05

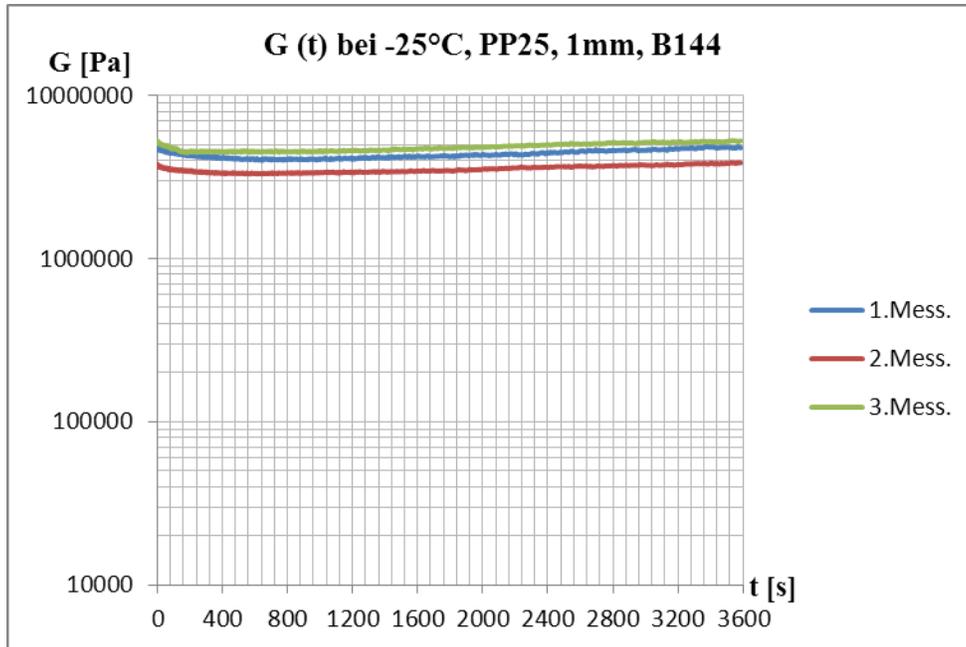






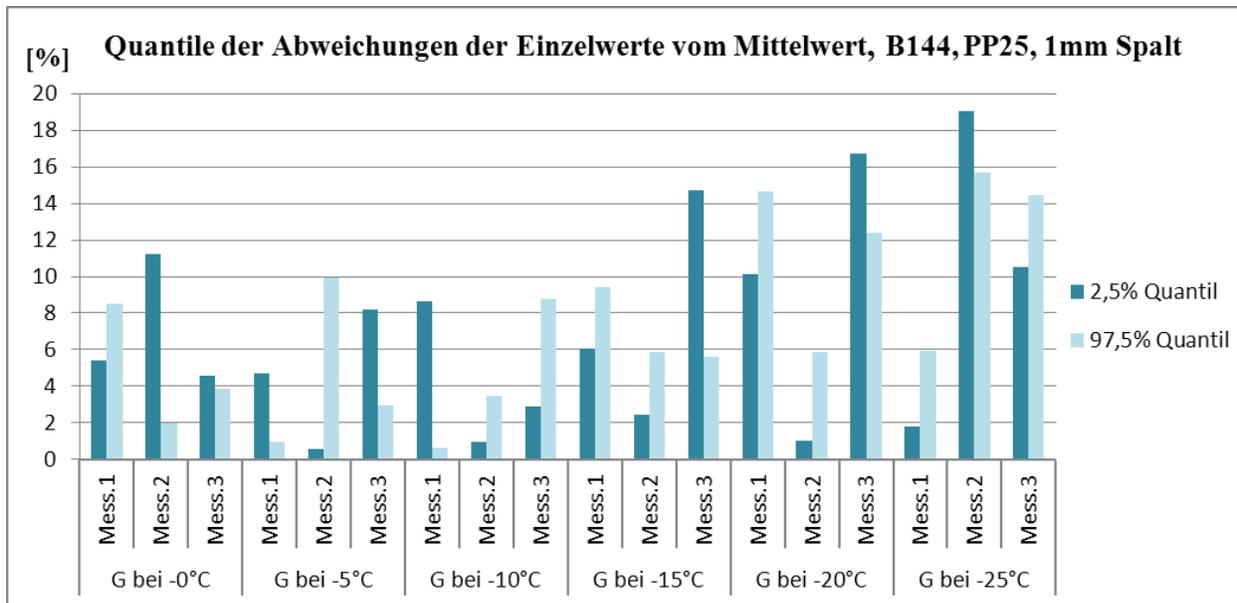






	G bei -0°C			G bei -5°C			G bei -10°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	5,4	11,3	4,6	4,7	0,6	8,2	8,7	1,0	2,9
97,5% Quantil	8,5	2,0	3,9	1,0	10,0	2,9	0,6	3,5	8,8

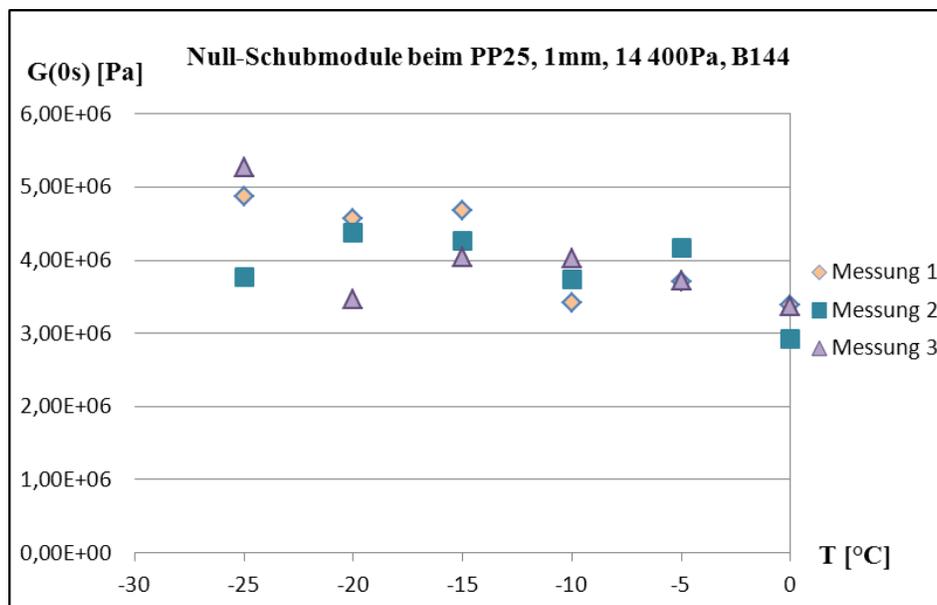
	G bei -15°C			G bei -20°C			G bei -25°C		
	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3	Mess.1	Mess.2	Mess.3
2,5% Quantil	6,1	2,4	14,7	10,1	1,0	16,7	1,8	19,0	10,5
97,5% Quantil	9,4	5,9	5,6	14,6	5,9	12,4	5,9	15,7	14,4



**G(t) als Funktion der Temperatur - 0s, 10s, 100s, 1000s, 3600s
bei PP25 Durchmesser und 1mm Spalt**

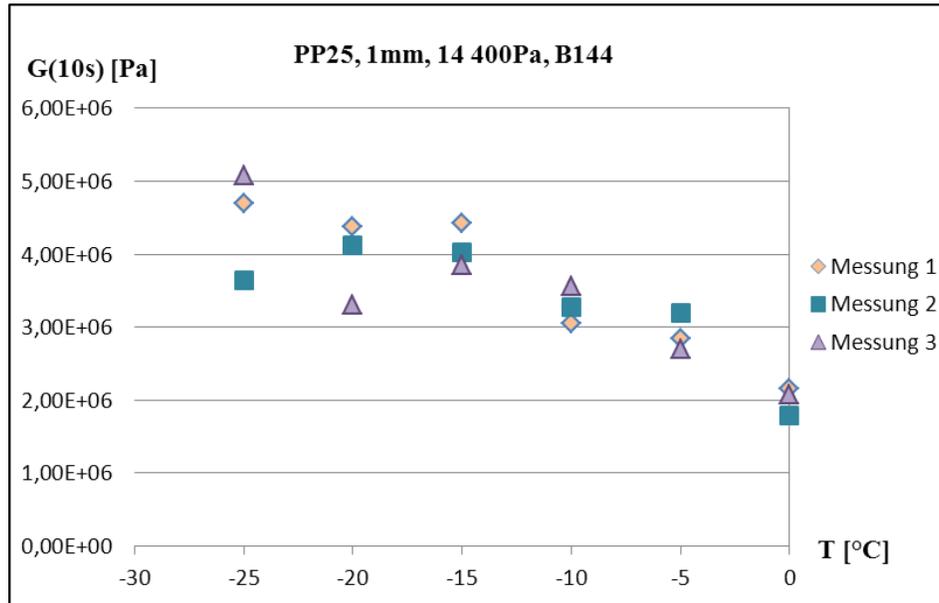
Messtemperatur

		0	-5	-10	-15	-20	-25
G₀	Messung 1	3,39E+06	3,71E+06	3,41E+06	4,68E+06	4,56E+06	4,87E+06
	Messung 2	2,91E+06	4,16E+06	3,73E+06	4,27E+06	4,37E+06	3,78E+06
	Messung 3	3,36E+06	3,72E+06	4,03E+06	4,05E+06	3,46E+06	5,27E+06



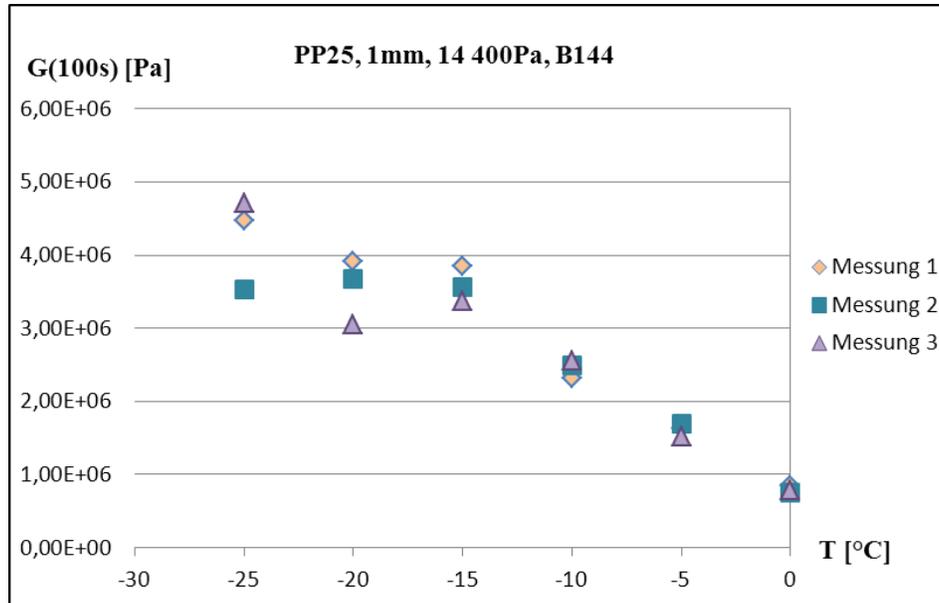
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀	Messung 1	2,16E+06	2,84E+06	3,05E+06	4,43E+06	4,37E+06	4,70E+06
	Messung 2	1,79E+06	3,19E+06	3,27E+06	4,02E+06	4,12E+06	3,65E+06
	Messung 3	2,08E+06	2,69E+06	3,56E+06	3,85E+06	3,31E+06	5,08E+06



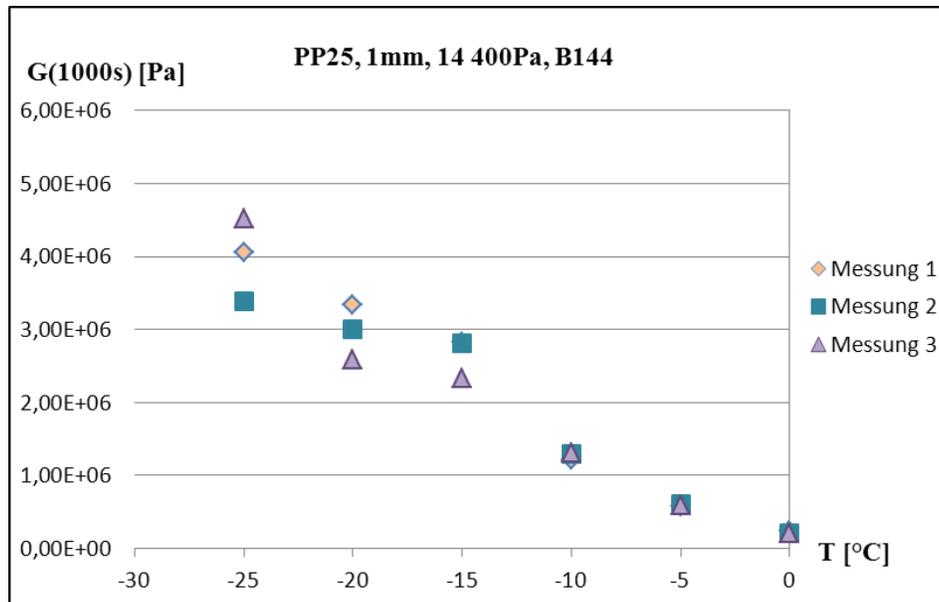
Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀	Messung 1	8,54E+05	1,62E+06	2,31E+06	3,85E+06	3,92E+06	4,48E+06
	Messung 2	7,55E+05	1,69E+06	2,49E+06	3,56E+06	3,67E+06	3,53E+06
	Messung 3	7,87E+05	1,52E+06	2,56E+06	3,37E+06	3,05E+06	4,71E+06



Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₁₀₀₀	Messung 1	2,37E+05	5,72E+05	1,21E+06	2,83E+06	3,34E+06	4,05E+06
	Messung 2	2,15E+05	6,10E+05	1,29E+06	2,80E+06	3,00E+06	3,38E+06
	Messung 3	2,15E+05	5,94E+05	1,31E+06	2,32E+06	2,59E+06	4,52E+06



Messtemperatur

	0	-5	-10	-15	-20	-25	
G₃₆₀₀	Messung 1	1,11E+05	2,87E+05	7,60E+05	2,15E+06	3,37E+06	4,78E+06
	Messung 2	1,04E+05	3,05E+05	7,51E+05	2,06E+06	2,66E+06	3,89E+06
	Messung 3	9,99E+04	3,15E+05	7,67E+05	1,87E+06	2,55E+06	5,25E+06

