



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN

Vienna University of Technology

Beiträge zur Laboralterung von bituminösen Materialien

Diplomarbeit

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn.

Ronald BLAB

Ass. Prof. Dipl.-Ing Dr. techn.

Bernhard HOFKO

Univ. Ass. Dipl.-Ing

Daniel STEINER

E230 Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen

Verfasser:

Christopher SKLEDAR, BSc

WIEN, Oktober 2017

Kurzfassung

Um die Lebensdauer von Asphalt beurteilen zu können, muss man die Veränderung der Eigenschaften über die Zeit kennen. Diese Veränderung ist entweder durch eine langjährige Beobachtung der Straßen über 5 – 10 Jahre möglich oder durch unterschiedliche Methoden zeitraffend im Labor simulierbar.

Neben einer Literaturrecherche umfasst diese Arbeit mehrere Prüfprogramme welche an ungealterten, kurz- und langzeitgealterten Bitumenproben durchgeführt werden. Das erste Prüfprogramm beleuchtet eine eventuelle Streuung ungealterter Frischbitumen gleicher Charge (Kapitel 5). Da Probekörper für eine weiterführende Langzeitalterung erstmals eine Kurzzeitalterung bei der Probepplattenherstellung erfahren, wird in einem weiteren Prüfprogramm die Vergleichbarkeit der Probepplatten überprüft (Kapitel 6). Um die Verläufe der Langzeitalterung mittels PAV auch in den zwischenliegenden Alterungsniveaus zu bestimmen, nicht nur im Start- und Endniveau, wird ein auf diese Fragestellung abgestimmtes Prüfprogramm durchgeführt (Kapitel 7).

Speziell für die Langzeitalterung wurden optimierte Methoden angewandt und das Material auf die somit veränderten Eigenschaften geprüft. Eine Möglichkeit der Abgrenzung der thermischen von der oxidativen Alterung wird durch ein umfassendes Prüfprogramm beleuchtet (Kapitel 8). Das letzte Prüfprogramm ist eine Untersuchung, welche oxidativen Gase sich für eine Langzeitalterung von Asphalt Probekörpern eignen (Kapitel 9).

Abstract

To be able to assess the lifespan of asphalt mixtures, one must know the change in properties over time. Analyzing changes in properties can be carried out either by long-term observation of the roads over 5 – 10 years or can be simulated by different methods in the laboratory.

In addition to a literature research, this thesis includes a test program which is carried out on unaged, short- and long-term-aged bitumen samples. The first stage of the test program investigates the scattering of fresh bitumen of the same batch (chapter 5). Since test specimens experience a short-term aging in hot mix asphalt slab production, the comparability of the hot mix asphalt slabs is checked in a further stage of the test program (Chapter 6). To investigate the evolution of the long-term aging by means of PAV aging duration, a third stage of the test program adapted to this question is carried out (Chapter 7).

One way of distinguishing between thermal and oxidative aging is covered by a comprehensive test program (Chapter 8). The last stage of the test program is to investigate the impact of different gases on the long-term aging of hot mix asphalt test specimens (Chapter 9).

Danksagung

Ich möchte mich herzlich beim gesamten Laborteam des Forschungsbereichs für Straßenwesen für die perfekte Einschulung an den Laborgeräten bedanken. Besonderer Dank gilt dabei Herrn Thomas Riedmayer sowie Herrn Joseph Saad für die tolle Unterstützung bei der Abwicklung der Prüfprogramme.

Ein großer Dank gilt Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab für die Bereitstellung dieses interessanten wissenschaftlichen Themas. Vielen Dank auch an den Laborleiter des Forschungsbereichs für Straßenwesen Herrn Ass. Prof. Dipl. Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko für die großartige Unterstützung und die tolle Einteilung meiner Prüfprogramme an den Prüfeinrichtungen.

Ein großes Dankeschön an meinen Betreuer Herrn Univ. Ass. Dipl.-Ing Daniel Steiner für die hervorragende Unterstützung und die tolle und fachliche Beantwortung meiner vielen Fragen.

Von ganzem Herzen möchte ich mich bei meiner Familie bedanken. Ganz besonders bei meinen Eltern, Elisabeth und Manfred. Ohne euch hätte ich nie die Möglichkeit bekommen dieses Studium abzuschließen. Vielen Dank auch für eure verständnisvolle Art und die Unterstützung bei all meinen Entscheidungen. Herzlichen Dank auch an meine Schwester Nina und ihren Freund Stefan die immer ein offenes Ohr für mich haben. An meine Cousine Michaela für die tolle Unterstützung in Graz und für die coole gemeinsame Zeit in Tansania. Vielen Dank auch an meine Freunde und Studienkollegen für die großartige gemeinsame Studienzeit.

Zu guter Letzt bedanke ich mich bei meiner Freundin Kerstin für die Unterstützung in jeder Hinsicht. Ich durfte meine gesamte Studienzeit mit dir verbringen und du warst und bist immer für mich da.

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung und Aufgabenstellung	7
2 Häufig verwendete Abkürzungen.....	8
3 Literaturrecherche.....	9
3.1 Was ist Bitumen?.....	9
3.2 Gewinnung von Bitumen	10
3.3 Bitumen Zusammensetzung & Eigenschaften.....	11
3.3.1 Thermo-viskoses Verhalten	11
3.3.2 Visko-elastisches Verhalten.....	11
3.3.3 Relaxationsvermögen	12
3.4 Bitumenarten	12
3.4.1 Straßenbitumen	12
3.4.2 Modifiziertes Bitumen.....	13
3.5 Bitumenalterung	13
3.5.1 Alterungsmechanismen	13
3.5.2 Alterungsstufen.....	14
3.5.3 Labor- und Feldalterung.....	15
3.6 Asphalt	16
3.6.1 Gesteinskörnung.....	16
3.6.2 Asphaltarten.....	16
3.6.3 Asphaltbezeichnungen.....	17
4 Herstellung und Prüfmethode.....	17
4.1 Plattenherstellung und Probengewinnung	17
4.2 Angewandte Prüfmethode.....	19
4.2.1 Bitumenextraktion und Bitumenrückgewinnung	19
4.2.2 Simulation der Alterung im Labor.....	21
4.2.3 Rolling Thin Film Oven Test RTFOT	22
4.2.4 Pressure Aging Vessel PAV	23
4.2.5 Viennese Ageing Procedure VAPro [12].....	25
4.2.6 Thermische Alterung von Asphalt im Labor in Stickstoffatmosphäre	27
4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode.....	28

4.3.1	Dynamic Shear Rheometer DSR	28
5	Streuung der mechanischen Eigenschaften von Frischbitumen	32
5.1	Materialien und Testmethoden	32
5.2	Ergebnisse & Interpretation	33
6	Einfluss der Kurzzeitalterung bei der Plattenherstellung im Labor.....	39
6.1	Materialien und Testmethoden	39
6.2	Ergebnisse & Interpretation	40
7	Alterungsverlauf von Bitumen bei Laboralterung	44
7.1	Materialien und Testmethoden	44
7.2	Ergebnisse & Interpretation	45
8	Abgrenzung thermischer Alterung von oxidativer Alterung bei Labor Alterungsmethoden	51
8.1	Materialien und Testmethoden	51
8.2	Ergebnisse & Interpretation	52
9	VAPro-Parameterstudie Gase	59
9.1	Materialien und Testmethoden	59
9.2	Ergebnisse & Interpretation	60
10	Zusammenfassung und Ausblick	64
11	Literaturverzeichnis.....	68
12	Abbildungsverzeichnis	70
13	Tabellenverzeichnis	72
14	Formelverzeichnis.....	72

1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Durch die immer größer werdende Verkehrsbelastung in Österreich gibt es viele Faktoren, welche in Summe die Funktionalität des Verkehrssystems mitbestimmen. Ein großer Faktor ist die Qualität der Verkehrsflächen. Diese müssen, aufgrund der Erhöhung der Verkehrsbelastung, qualitativ mitgesteigert werden um den Ansprüchen zu genügen und die Lebensdauer einer Verkehrsfläche so lange wie möglich zu erhalten.

Diese Lebensdauer ist unter anderem von den Bestandteilen der Verkehrsflächen abhängig. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem bituminösen Baustoff Asphalt und damit speziell mit dem Bindemittel Bitumen. Bitumen ist ein organischer Baustoff und unterliegt somit einer gewissen Alterung auf Zeit. Die Maßgebenden Faktoren dafür sind Temperatur, Luftsauerstoff, Wasser, Verkehrsbelastung, Sonneneinstrahlung, Witterung und die spezifische Fläche.

Um die Lebensdauer von Asphalt beurteilen zu können, muss man die Veränderung der Eigenschaften über die Zeit kennen. Diese Veränderung ist entweder durch eine langjährige Beobachtung der Straßen über 5 – 10 Jahre möglich oder durch unterschiedliche Methoden zeitraffend im Labor simulierbar.

Zu diesem Zweck wurden diverse Prüfprogramme mit unterschiedlich gealterten Bitumen durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag in der Erkennung der Verläufe von ungealterten über kurzzeitgealterten bis hin zu langzeitgealterten Bitumen. Speziell für die Langzeitalterung wurden neue bzw. optimierte Methoden angewandt und auf die somit veränderten Eigenschaften geprüft.

Die folgenden Fragestellungen werden behandelt:

- Wie groß ist die Streuung der mechanischen Eigenschaften von Bitumen im ungealterten Anlieferungszustand? (Kapitel 5)
- Wie groß ist der Einfluss der Kurzzeitalterung bei der Plattenherstellung im Labor? (Kapitel 6)
- Wie gestaltet sich der Alterungsverlauf während der Labor-Langzeitalterung (PAV)? (Kapitel 7)
- Ab welcher Temperatur setzt die thermische Alterung bei Labor-Alterungsverfahren ein? (Kapitel 8)
- Welche Gase eignen sich zur Langzeitalterung von Asphalt im Labor? (Kapitel 9)

2 HÄUFIG VERWENDETE ABKÜRZUNGEN

DSR	Dynamic Shear Rheometer (Dynamischer Scherrheometer)
RTFOT	Rolling Thin Film Oven Test (Rollierender Dünnschicht Ofen Test)
PAV	Pressure Aging Vessel (Druckalterungskessel)
VAPro	Viennese Ageing Procedure
GVO	Gebrauchsverhaltensorientiert
LN2	Lagerung in Stickstoffatmosphäre
LLuft	Laboralterung mittels Druckluft (Kapitel 9) bzw. Lagerung von Probekörpern unter Luftatmosphäre im Wärmeschrank (Kapitel 8)
LO2	Laboralterung mittels technischem Sauerstoff
LO3	Laboralterung mittels Ozon angereichertem technischem Sauerstoff
LO3air	Laboralterung mittels Ozon + Stickoxiden angereicherter Druckluft, VAPro
IG*I	Komplexer Schubmodul
δ	Phasenverschiebungswinkel

3 LITERATURRECHERCHE

3.1 Was ist Bitumen?

Der Ausgangsstoff für die Gewinnung von Bitumen ist Erdöl. Im Rahmen der Aufbereitung geeigneter Erdöle fällt das Bitumen als Rückstand des Raffinierprozesses an. Wie in Tabelle 1 dargestellt, zählt das Bitumen zu den Organischen Baustoffen. Jene Einteilung erfolgt hinsichtlich der Stofflichen Zusammensetzung. Bitumen ist nahezu nicht flüchtig, dunkelfarbig, praktisch geruchslos und sowohl gegen viele Chemikalien als auch gegen die Einwirkung von Wasser unanfällig. Im speziellen die beiden letzten Punkte machen das Bitumen in bautechnischer Hinsicht unverzichtbar. [1] [2]

Tabelle 1 Einteilung der Baustoffe [1]

Anorganische Baustoffe		Organische Baustoffe
mineralische	metallische	
Natursteine, Glas, keramische Baustoffe, Mörtel, Beton u. a.	Gusseisen, Stahl, Aluminium, Kupfer u. a.	Holz u. Holzwerkstoffe, Bitumen, Asphalt, Kunststoffe

Abb. 1 Stellt die Terminologie Kohlenwasserstoff-Bindemittel laut ÖNORM EN 12597: 2014 dar.

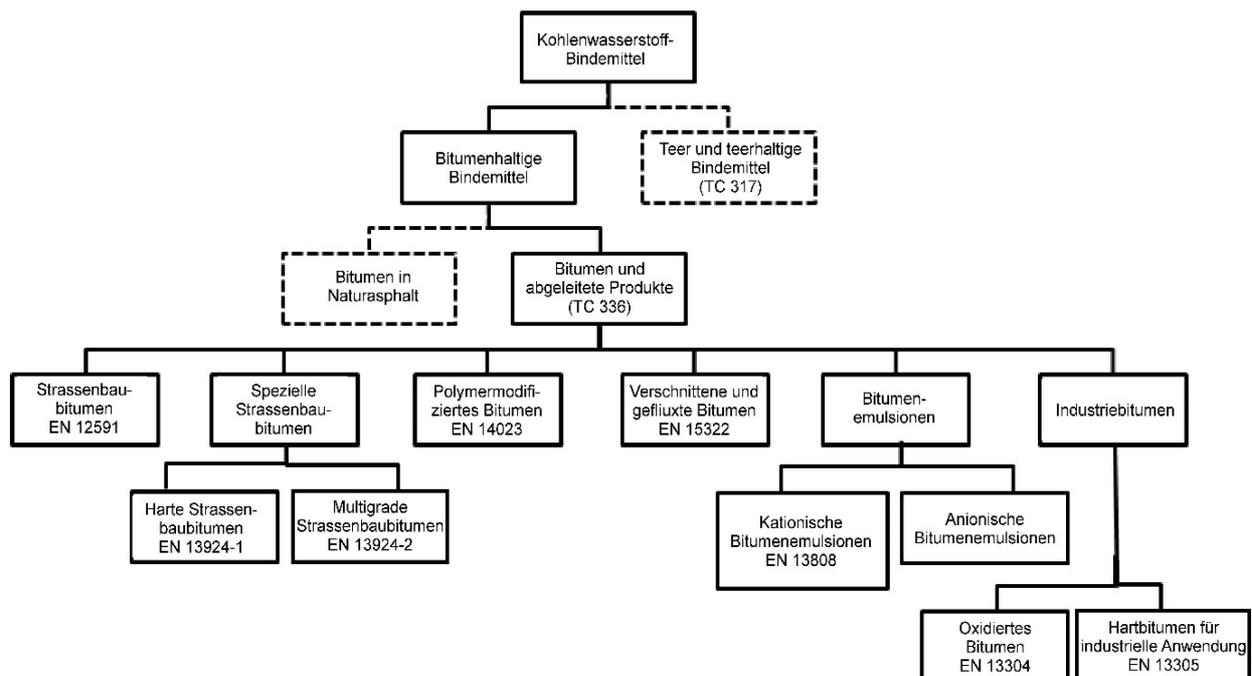


Abbildung 1 Terminologie der Kohlenwasserstoff-Bindemittel [3]

Aufgrund der Tatsache, dass Bitumen und Erzeugnisse daraus physiologisch unbedenklich eingestuft werden, wurde Teer als Vorgänger von Bitumen als Verwendungszweck für den Straßenbau, Dachabdichtungsbahnen, u.v.m., abgelöst. Teer und dessen Nachfolgeprodukte stehen im dringenden Verdacht im menschlichen Körper kanzerogen zu wirken. Aus diesem Grund ist es in den meisten Europäischen Ländern nicht mehr gebräuchlich, Teer und dessen Produkte zu verwenden. [1] [2]

In Europa ist der Erdölimport von großer Bedeutung. Die Vorkommen von Erdöl in Europa werden auf ca. 1% des gesamten Vorkommens der Erde geschätzt. Ca. 49% des Vorkommens befinden sich im Nahen Osten, 20% davon in Mittel- & Südamerika, 13% in Nordamerika, 8% in Afrika, 7 % in Eurasien und ca. 3% in Asien und Ozeanien. Aufgrund der Tatsache, dass eine in Zukunft zunehmende Nachfrage nach Öl einem stark abnehmenden Angebot gegenübersteht, ist laut Meinung vieler Experten eine Ölkrise zu befürchten. [4]

3.2 Gewinnung von Bitumen

Wie schon in Kapitel 3.1 erwähnt fällt Bitumen als Rückstand des Raffinerieprozesses an. In erster Linie wird Erdöl im Röhrenofen auf 350-400°C erhitzt. Danach werden die hochwertigen Bestandteile des Erdöls wie Treibstoffe sowie leichtere und schwere Öle durch eine fraktionierende Destillation gewonnen. Eine anschließende neuerliche Erhitzung im Röhrenofen und eine weitere Vakuumdestillation bewirkt eine Entziehung weiterer Produkte wie Gas- und Schmieröle aus dem nun verbleibenden Erdölrückstand. Der am Ende verbleibende Destillationsrückstand ist das Bitumen. Eine weitere Verarbeitung des Bitumens in Oxidationsbitumen, Fluxbitumen, Polymerbitumen oder Bitumenemulsion ist nun mit weiteren Prozessen möglich. [1] [5]

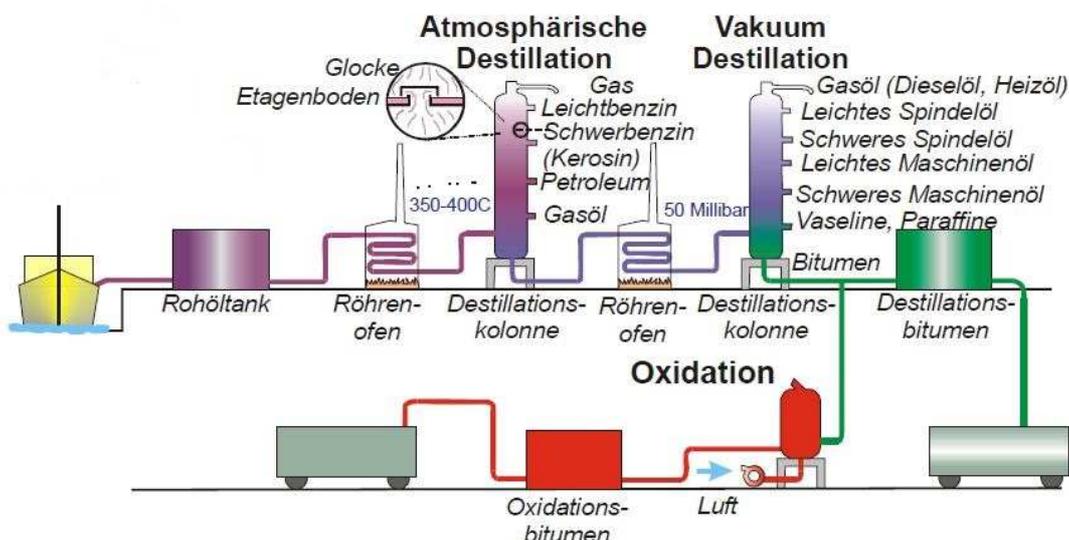


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Bitumengewinnung [5]

3.3 Bitumen Zusammensetzung & Eigenschaften

Bitumen ist als ein kolloidales System aufgebaut, wobei man hier einerseits in eine disperse Phase und andererseits in eine kontinuierliche Phase unterscheidet. Die disperse Phase (Asphaltene) liegt in der kontinuierlichen Phase (hochsiedende Öle: Maltene) in stabiler Verteilung vor. Der Anteil jener beiden Phasen ist entscheidend für das Fließverhalten des Bitumens. Jenes Fließverhalten, welches Thermoviskoses Verhalten genannt wird, ist die Grundlage der Bitumenverarbeitung. [1] [2] Tabelle 2 beschreibt die Hauptbestandteile von Bitumen

Tabelle 2 Hauptbestandteile von Bitumen [1]

chemisches Element	Abkürzung des chemischen Elements	Massenanteil [%]
Kohlenstoff	C	80 – 85
Wasserstoff	H	7 – 10
Sauerstoff	O	2 – 9
Stickstoff	N	0,1 – 1
Schwefel	S	0,5 – 7
Sonstiges	–	< 0,1

3.3.1 Thermo-viskoses Verhalten

Wie bereits in Kapitel 3.3 beschrieben weist Bitumen ein Thermoviskoses Verhalten auf, welches für die Verarbeitung eine essenzielle Rolle spielt. Jeder Arbeitsvorgang wie pumpen, spritzen, mischen, einbauen und verdichten, hat seinen bestimmten Viskositätsbereich. [1] Bei einer Temperatur von ca. 150 – 200°C wird Bitumen flüssig und reversibel. Diese Erscheinung bewirkt die Einteilung von Bitumen zu den thermoplastischen Werkstoffen.

3.3.2 Visko-elastisches Verhalten

Wie auch in Kapitel 4.3.1 etwas detaillierter beschrieben weist Bitumen ein visko-elastisches Verhalten auf. D.h. Bitumen hat einen elastischen Anteil und einen viskosen Anteil. Die Steifigkeit eines Bitumens hängt von dessen Härte ab, wobei jene stark temperatur- und zeitabhängig ist. Je länger die Belastungszeit ist, desto größer wird der viskose Anteil. Jener Anteil ist irreversibel. Der elastische Anteil überwiegt wiederum bei sehr kurzen Belastungszeiten. Jener Anteil ist reversibel. [1] Visko-Elastisches Verhalten ist zeit- temperatur- und frequenzabhängig. In Abb. 3 ist der Verlauf von Deformation und Rückformung dargestellt.

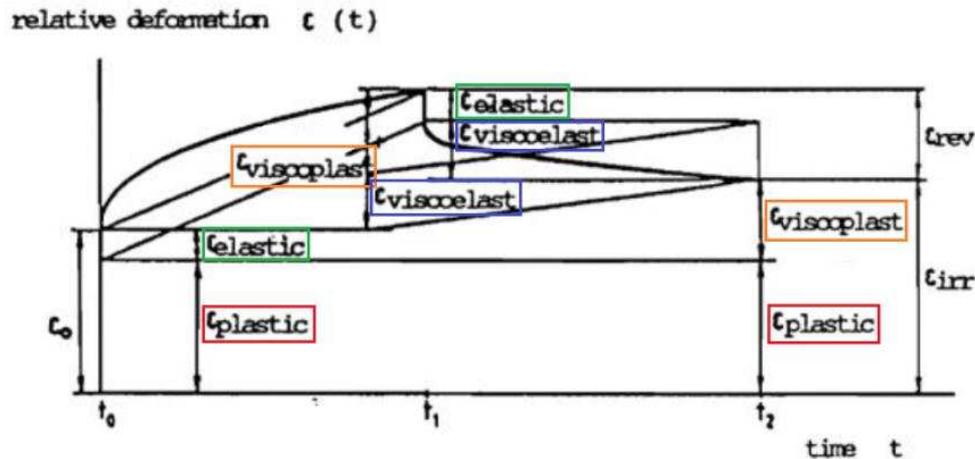


Abbildung 3 Deformation und Rückverformung bei visko-elastischem Materialverhalten [6]

3.3.3 Relaxationsvermögen

Aufgrund seines visko-elastischen Verhaltens ist es möglich, dass ein Werkstoff sich durch seine viskose Verformung einer aufgezwungenen Beanspruchung entzieht. Jenes Verhalten nennt man Relaxationsvermögen. Abhängig von der Viskosität des Werkstoffes ist die Abklinggeschwindigkeit variabel. In der Baupraxis ist dieses Relaxationsvermögen von großer Bedeutung. Zugspannungen, welche aufgrund von starker Abkühlung in Verbindung mit verhinderter thermischer Verkürzung entstehen, können so abgebaut werden, ohne dass Risse entstehen. [1] Je weicher das Bitumen, desto schneller erfolgt der Spannungsabbau.

3.4 Bitumenarten

Wie schon in Kapitel 3.1 beschrieben und in der Abb. 1 gezeigt, gibt es eine klare Einteilung der Kohlenwasserstoff-Bindemittel.

3.4.1 Straßenbitumen

Das Straßenbaubitumen wird in erster Linie für den Verkehrsflächenbau verwendet. Mittels Nadelpenetration werden diese Bitumen eingeteilt, wobei die Spannweite zwischen 20/10mm bis 300/10mm liegt. Jene Werte sind ein Maß für die Steifigkeit des Bindemittels und werden mit dem Nadelpenetrometer ermittelt. Der Wert gibt Aufschluss über die Eindringtiefe einer 100g schweren Nadel in ein 25°C vorgewärmtes Bitumen. [2]

In Österreich werden folgende Sorten am häufigsten verwendet: [2]

- 35/50
- 50/70
- 70/100
- 160/220

In dieser Diplomarbeit wurde ausschließlich mit 70/100 Bitumen gearbeitet. Jene Bitumensorte hat eine Eindringtiefe zwischen 70 und 100 Zehntelmillimeter. [1] [2]

3.4.2 Modifiziertes Bitumen

Polymermodifizierte Bitumen sind jene Bitumen, deren rheologische Eigenschaften durch das Beimengen eines oder mehrerer organischer Polymere modifiziert wurden. Aufgrund der immer größer werdenden Verkehrsbelastung muss sich auch die Entwicklung der bituminösen Bindemittel für Asphalt an die Umstände anpassen und darauf reagieren. [2]

Folgende Eigenschaften werden durch das Beimengen von Polymere verbessert: [2]

- Erweichungspunkt (Höherer Erweichungspunkt)
- Plastizitätsspanne (Rückgang der Verformung und verbessertes Rissverhalten im Tieftemperaturbereich)
- Elastizität (Erhalten von hochelastischen Bitumen)
- Verformungsbeständigkeit (Schnelle Rückbildung von eingebrachten Verformungen)
- Langzeitalterungsverhalten (Langsameres altern als herkömmliche Bitumen)

3.5 Bitumenalterung

Bitumen ist ein organischer Baustoff und unterliegt somit einer gewissen Alterung auf Zeit. Im Folgenden Kapitel werden Alterungsmechanismen zusammengefasst und die Veränderung der Bitumen, bezogen auf dessen Eigenschaften, beschrieben. Die Maßgebenden Faktoren dafür sind Temperatur, Luftsauerstoff, Wasser, Verkehrsbelastung, Sonneneinstrahlung, Witterung und die spezifische Oberfläche. [1]

3.5.1 Alterungsmechanismen

Alterungsmechanismen haben bei Bitumen eine destillative und/oder oxidative Wirkung, welche eine Verhärtung und Versprödung des Bitumens zur Folge hat.

Die destillative Alterung bewirkt eine Verdunstung noch verbliebener niedrigsiedender Komponenten aufgrund hoher Temperatur. Es handelt sich hierbei um einen rein physikalischen Vorgang. [1]

Folgende Faktoren spielen bei der destillativen Alterung eine Rolle: [1]

- Bitumensorte
- Temperatur
- Spezifische Oberfläche

Die oxidative Alterung ist eine Änderung der kolloidalen Struktur, weshalb jene Alterung auch gerne Strukturalterung genannt wird. Grundlage dafür ist eine Reaktion mit Luftsauerstoff. Es handelt sich hierbei um einen rein chemischen Vorgang. [1]

Folgende Faktoren spielen bei der oxidativen Alterung eine Rolle: [1]

- Luftzutrittsmöglichkeit
- Temperatur
- Licht

3.5.2 Alterungsstufen

Bitumen wird in 3 Alterungsstufen eingeteilt: [2]

- Ungealtert:
 - Jenes Bitumen hat einen frischen, unverwendeten und gebrauchsfertigen Zustand direkt aus der Raffinerie.
- Kurzzeitgealtert:
 - Entspricht einer thermischen und/oder oxidativen Alterung welche die kolloidale Struktur verändert. Jene Veränderung ist auf folgende Dinge zurückzuführen: den Bitumentransport zum Mischwerk, der Heißlagerung, den Pumpvorgängen, dem Mischen im Asphaltmischwerk, dem an Transport zur Einbaustelle und dem Einbau selbst. Je nach Ablauf jener Punkte kommt es zu unterschiedlichen Masseänderungen und Gebrauchseigenschaften.
- Langzeitalterung:
 - Jener Zustand ist auf eine Langzeitbeanspruchung auf der Straße zurückzuführen. Die Liegedauer entspricht hierbei etwa 5 bis 10 Jahre, wobei die Ausgangslage die Kurzzeitalterung ist. Die Langzeitalterung führt bei den Gebrauchseigenschaften zu einer Versteifung und Versprödung.

Abb. 4 stellt den schematischen Verlauf der Alterung über die Zeit dar. Wie man gut erkennen kann, trägt die Alterung während des Mischvorganges und des Einbauens einen sehr großen Teil zur Gesamalterung bei. Auf diese spezielle Tatsache wird in Kapitel 7 noch näher eingegangen.

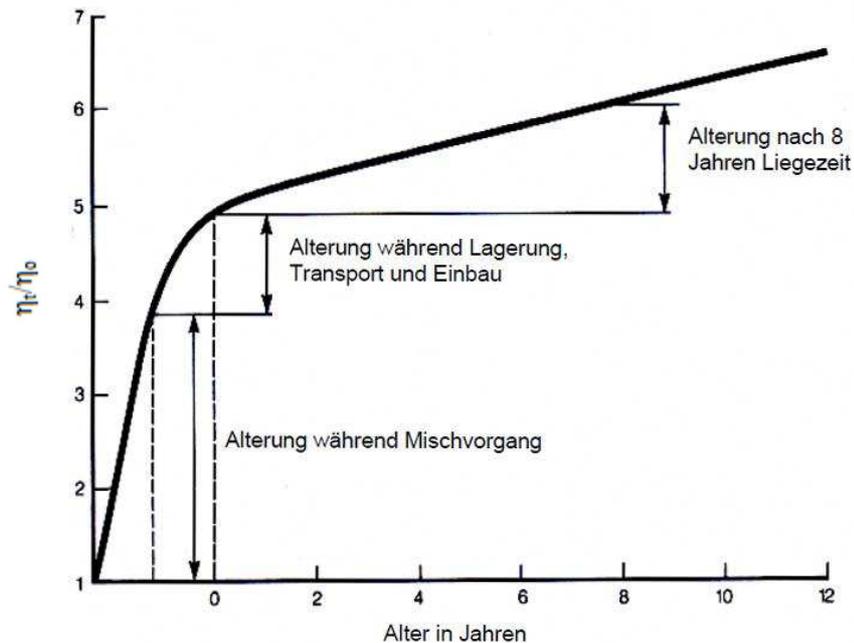


Abbildung 4 Schematische Darstellung des Alterungsverlaufes bituminöser Materialien [7]

3.5.3 Labor- und Feldalterung

Die Feldalterung beschreibt die Alterung in der Umwelt auf natürlichem Weg. Die Laboralterung lässt sich in Alterungsmethoden am Bitumen und Alterungsmethoden am Asphaltmischgut bzw. am verdichteten Asphaltprobekörper unterscheiden. Laboralterung beschreibt das Altern von bituminösen Materialien mittels eines Verfahrens in kürzester Zeit im Labor. Ziel ist es die Feldalterung im Labor so gut wie möglich nachzustellen und jene Proben mit weiterführenden Prüfmethoden zu überprüfen. Folgende Verfahren kommen im Labor zum Einsatz:

- Kurzzeitalterung:
 - RTFOT Rolling Thin Film Oven Test (Kapitel 4.2.3)
 - MRTFOT Modified Rolling Thin Film Oven Test
 - TFOT Thin Film Oven
 - RFT Rotating Flask Test
- Langzeitalterung:
 - PAV Pressure Aging Vessel (Kapitel 4.2.4)
 - RCAT Rotating Cylinder Aging Test
 - LTRFT Long-Term Rotating Flask Test
 - Exemplarisch für Asphaltalterung
 - VAPro Viennese Ageing Procedure (Kapitel 4.2.5)
 - BAV Bochumer Alterungsverfahren
 - BSA Braunschweiger Alterungsverfahren

Wie in Kapitel 4.2.2 beschrieben sind der RTFOT und der PAV die am häufigsten angewandten Alterungsmethoden im Labor in Österreich.

3.6 Asphalt

Asphalt ist ein Gemisch aus Gesteinskörnung und Bitumen bzw. bitumenhaltigen Bindemitteln. Überwiegend werden die aus Gesteinskörnung und Bitumen differenzierte zusammengesetzten technischen Asphalte als so genanntes Asphaltmischgut zur Befestigung von Straßen und anderen Verkehrsflächen (Radwege, Parkflächen, Flugplätze usw.) in großen stationären Mischwerken hergestellt. [1]

Asphalte für den Straßenbau bestehen zu etwa 95 M.-% aus Gesteinskörnungen. Ihre Aufgabe ist es, die durch den Verkehr auftretenden Kräfte aufzunehmen und über die ausgebildete Kornstruktur im Mischgut auf die unteren Schichten abzuleiten. Auf der Straßenoberfläche sind die Gesteinskörnungen der Teil der Asphaltmischung, welcher dem Verschleiß entgegenwirkt und eine dauerhafte Griffigkeit des Belags gewährleistet. Folglich sind die Eigenschaften einer Straßenbefestigung, und dort insbesondere der Fahrbahnoberfläche, ganz entscheidend von der Beschaffenheit und Zusammensetzung dieser Gesteinskörnungen abhängig. [1]

3.6.1 Gesteinskörnung

Wie in Kapitel 3.6 beschrieben, besteht Asphalt zu etwa 95 M.-% aus Gesteinskörnung. Es werden daher an die Gesteinskörnung hohe Anforderungen gestellt. Jene können in geometrische, physikalische und chemische Eigenschaften zusammengefasst werden. Diese sind: [8]

- Kornaufbau
- Feinanteil
- Rohdichte
- Kornform
- Anteil gebrochener Körner
- Kantigkeit
- Widerstand gegen Zertrümmerung und Polieren
- Frostbeständigkeit
- Organische und chemische Bestandteile
- Haftverhalten
- Sonstige von Herkunft oder Verwendungszweck abhängige Eigenschaften

3.6.2 Asphaltarten

Walzasphalt:

Walzasphalt besitzt einen Bindemittelanteil, welcher den Hohlraum des Mineralstoffgerüsts im verdichteten Zustand bis auf einen geringen verbleibenden Restporenraum ausfüllt. Die verwendete Bindemittelmenge muss also so bemessen

werden, dass alle Kornoberflächen gleichmäßig umhüllt sind, möglichst viele Punkte verklebt werden und dass für den Einbau und die Verdichtung ausreichend „Schmiermittel“ vorhanden ist. Andererseits sollten die Bitumenfilme aber so dünn bleiben, dass nur kleinste Verformungsmöglichkeiten bestehen und damit die auftretenden Spannungen durch die Verkehrslast über kleinste Wege von Korn zu Korn übertragen werden. [1] Der Walzasphalt besitzt somit 3 Phasen. Gestein – Bindemittel – Luft. [1]

Gussasphalt:

Im Gegensatz zu Walzasphalt besitzt der Gussasphalt nur 2 Phasen. Gestein – Bindemittel. Jenes ist auf einen Bindemittelüberschuss zurückzuführen, welcher den Hohlraum des Mineralstoffgerüsts geringfügig übersteigt. Vom Typ her handelt es sich hierbei um eine mit Gesteinskörnungen versteifte Flüssigkeit. [1]

3.6.3 Asphaltbezeichnungen

Zunächst werden Asphalte hinsichtlich ihrer Art der Zusammensetzung des Mischguts eingeteilt. Es folgt die Einteilung in Asphaltbeton (AC), Splittmastixasphalt (SMA), Offenporiger Asphalt (PA) und Gussasphalt (MA). Die Gesamtbezeichnung eines Asphalts erfolgt durch die Angabe des Größtkorns und verwendeten Bindemittels, bei Asphaltbeton zusätzlich die jeweilige Anwendungsschicht („trag“, „binder“, „deck“), sowie einem Zusatz für den Sieblinientyp und die Gesteinsklasse. [9]

Bsp.: AC11(Mischgut-Typ) deck(Anwendungsschicht) PmB45/80-65(Bindemittel), A2(Zusammensetzung), G1(Gesteinsklasse)

4 HERSTELLUNG UND PRÜFMETHODEN

4.1 Plattenherstellung und Probengewinnung

Für die in Kapitel 6, 8 und 9 beschriebenen Prüfungen war es nötig Asphaltplatten herzustellen. Jene wurden in einem Gegenlaufzwangsmischer nach ÖNORM EN 12697-35: 2016 erstellt.

Der Asphalt wird, abhängig von der Bindemittelsorte, bei einer Zieltemperatur und innerhalb einer gewissen Zeit erstellt. Es ist genau darauf zu achten, dass diese Grenzwerte eingehalten werden um die mechanische Bearbeitung der Gesteinskörnung und die Veränderung der mechanischen Bindemittleigenschaften so gering als möglich zu halten.

In Tabelle 3 sind die Höchstwerte der Mischdauer im Labor laut ÖNORM EN 12697-35: 2016 dargestellt. Wobei die Dauer sich nur auf die reine Mischzeit bezieht. [10]

Tabelle 4 zeigt die Bezugstemperatur für die Verdichtung von Mischgut mit Straßenbaubitumen. Die zulässige Höchsttemperatur darf maximal um 20°C höher als die Bezugstemperatur liegen. Die Temperatur muss so gewählt werden, dass der Asphalt bei der Verdichtung die erforderliche Bezugstemperatur aufweist. [10]

Tabelle 3 Höchstwerte der Mischdauer im Labor (nur tatsächliches Mischen) [10]

Mischguttyp	Bindemittel	Ausbauasphalt	Maschinelles Mischen	Manuelles Mischen
Splittmastixasphalt	Für den Straßenbau	Nicht enthalten	4 min	5 min
		Enthalten	5 min	Je nach Erfordernis
	Modifiziert	Enthalten oder nicht enthalten	5 min	Je nach Erfordernis
Jedes Mischgut außer Splittmastixasphalt	Für den Straßenbau	Nicht enthalten	3 min	5 min
		Enthalten	5 min	Je nach Erfordernis
	Modifiziert	Enthalten oder nicht enthalten	5 min	Je nach Erfordernis

Tabelle 4 Bezugstemperatur für die Verdichtung von Mischgut mit Straßenbaubitumen [10]

Bitumensorte	Bezugstemperatur für die Verdichtung für: °C	
	Jedes Mischgut außer Gussasphalt	Gussasphaltmischgut
10/20 bis 20/30	180	230
30/45	175	220
35/50	165	210
40/60	155	200
50/70	150	-
70/100	145	-
100/150	140	-
160/220	135	-

Folgend wird der frisch gemischte Asphalt in einem Walzsegmentverdichter gemäß ÖNORM EN 12697-33: 2007 verdichtet. Ein Asphaltmischgut wird mittels aufbringen einer Last in einer Rechteckigen Probeform verdichtet. [11] Aus den nun erstellten Probepplatten werden 8 Probekörper (DN=100mm; H=40mm) ausgebohrt (Abbildung 5).

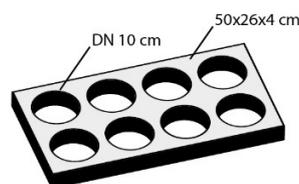


Abbildung 5 Schematische Darstellung der Asphaltplatte nach der Probekörperausbohrung [12]



Abbildung 6 Ablauf Plattenherstellung von links oben: Asphaltmischgut im Gegenlaufzwangsmischer bis unten mitte: fertige ausgebohrte Probekörper

Abbildung 6 zeigt den Ablauf der Plattenherstellung im Labor. Beginnend mit dem Mischen des Asphaltmischguts im Gegenlaufzwangsmischer (links oben) bis hin zu den fertigen aus den Probepplatten ausgebohrten Probekörpern (mitte unten).

4.2 Angewandte Prüfmethode

4.2.1 Bitumenextraktion und Bitumenrückgewinnung

Um Bindemittel aus Asphalt untersuchen zu können, muss dieses mittels Bitumenextraktion nach ÖNORM EN 12697-3: 2013 von den restlichen Bestandteilen getrennt werden. In Abbildung 7 ist ein Extraktor der Firma InfraTest dargestellt. Eine Trommel wird mit dem Asphaltprobekörper, aus welchem das Bitumen rückgewonnen werden soll, befüllt. Jene Trommel wird, wie im Abb. 5 ersichtlich in die linke Kammer eingebracht. In der mittleren Kammer wird eine Metallhülse eingebracht, welche in späterer Folge den Füller auffängt. Die beiden Kammern werden nun geschlossen und das Extraktionsprogramm gestartet. In der Linken Kammer wird nun der Asphalt mit Tetrachlorethen vermischt und gewaschen. Das

Bitumen löst sich auf diese Art von der Gesteinskörnung. Das so erhaltene Gemisch aus Tetrachlorethen, Bitumen und Füller wird nun Richtung der mittleren Kammer geleitet. Der Fülleranteil wird durch Rotation der Metallhülse von dem Tetrachlorethen-Bitumen-Gemisch getrennt und dort aufgefangen. Das Tetrachlorethen-Bitumen-Gemisch kann nun in ein entsprechendes Gefäß gefüllt werden und ist für die Destillation bereit.

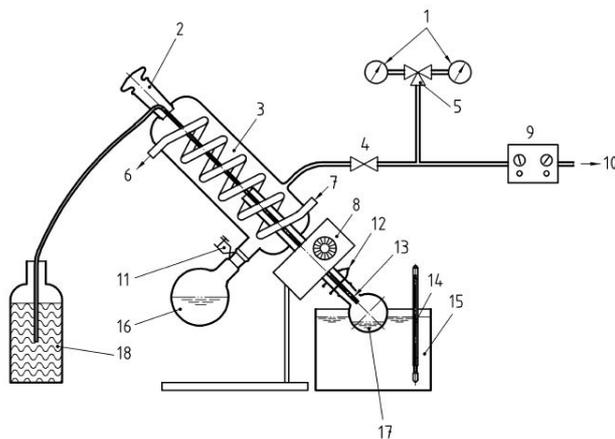


Abbildung 7 Extraktor

In Tabelle 5 sind die Destillationsbedingungen dargestellt. Im Zuge dieser Projektarbeit wurde als Lösungsmittel das Tetrachlorethen verwendet.

Tabelle 5 Destillationsbedingung [13]

Lösemittel		Erste Phase		Zweite Phase		Zusatz
Beschreibung	Siedepunkt	Temperatur	Druck	Temperatur	Druck	Temperatur
	°C	T_1	P_1	T_2	P_2	T_3
		°C	kPa	°C	kPa	°C
Dichlormethan	40,0	85	85	150	2,0	175
1.1.1-Trichlorethan	74,1	80	30	160	2,0	185
Benzen	80,1	80	30	160	2,0	185
Trichlorethylen	87,0	90	40	160	2,0	185
Xylen	140	120	30	180	2,0	205
Toluen	110,6	110	40	160	2,0	185
Tetrachlorethylen	121	110	40	160	2,0	180



Legende

- | | | |
|----------------------------|--|------------------------------------|
| 1 Vakuummeter | 8 Antriebsmotor für die Rotation | 14 Temperaturmesser |
| 2 Einlasshahn | 9 Vakuumregler | 15 Ölbad |
| 3 Kühler | 10 Zur Vakuumpumpe | 16 Vorlage |
| 4 Zusätzlicher Lufteinlass | 11 Schraubklemme | 17 Rotierender Destillationskolben |
| 5 Umschaltventil | 12 Quetschklemme | 18 Bitumenlösung |
| 6 Wasserablass | 13 Entnahmeröhrchen (Ende bis etwa 1/3 in den Kolben hineinreichend) | |
| 7 Wassereinlass | | |

Abbildung 8 Links: Schematische Darstellung eines Rotationsverdampfers + Legende [13], rechts: Rotationsverdampfer im Bitumenlabor

In Abbildung 8 links ist eine schematische Darstellung eines Rotationsverdampfers dargestellt. [13] Rechts ein Rotationsverdampfer im Bitumenlabor.

Destillationsverfahren: [13]

Der Destillationskolben wird am Rotationsverdampfer angebracht und mit der Bitumenlösung befüllt. Aufgrund der hohen Temperatur des Ölbad und des Druckes in der Apparatur, verdampft das Tetrachlorethen, kondensiert im Kühler und wird in der Vorlage aufgefangen. Je nach Menge der zu destillierenden Bitumenlösung kann dies einige Stunden dauern. Dies ermöglicht eine Destillation des Bitumengemisches, bei welcher das Bitumen und ein vom Lösemittel abhängiger Lösemittelgehalt von < 1M.-% zurückbleibt.

4.2.2 Simulation der Alterung im Labor

Die in Kapitel 4.2.2 folgenden Methoden sind darauf ausgelegt die natürliche Alterung des Bitumens, welche sich nach mehreren Jahren Liegedauer einstellt, im Labor innerhalb kürzester Zeit zu simulieren.

Die beiden Methoden, Rolling Thin Film Oven Test, kurz RTFOT, und Pressure Aging Vessel, kurz PAV, sind jene Verfahren, welche nach dem Stand der Technik im Labor zur Anwendung kommen.

Die beiden Methoden, Viennese Ageing Procedure, kurz VAPro und Thermische Alterung von Asphalt im Labor in Stickstoffatmosphäre, wurden auf der Technischen Universität Wien entwickelt um Langzeitalterungen auch am Asphaltmischgut bzw. an den fertigen Asphaltprobekörpern durchführen zu können.

4.2.3 Rolling Thin Film Oven Test RTFOT

Um eine Verhärtung und eine damit verbundene Alterung des Bitumens zu erhalten, welche den Vorgängen des Mischens bis zum Mischguteinbau geschuldet ist, wird auf das Rolling Thin Oven Test Verfahren nach ÖNORM EN 12607-1: 2014, kurz RTFOT, zurückgegriffen. Jene Simulation der Bitumenalterung ist in Österreich schon seit einiger Zeit Stand der Technik. Das RTFOT-Verfahren erfolgt durch einen rollierenden Film eines bitumenhaltigen Bindemittels, welcher in einer Wärmekammer für eine bestimmte Zeit unter konstanter Luftzufuhr auf eine festgelegte Temperatur erwärmt wird. [14] [15]

Folgende Vorgänge sollen mittels RTFOT- Verfahren abgedeckt werden: [15]

- Bitumentransport
- Heißlagerung
- Pumpvorgänge
- Mischen im Asphaltmischwerk
- Asphalttransport zum Einbauort
- Mischguteinbau

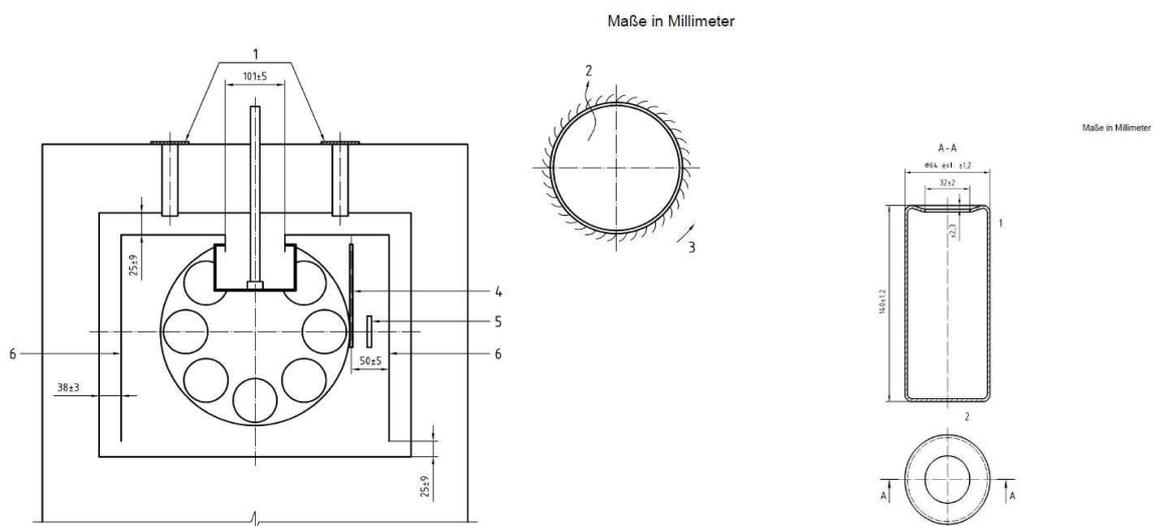


Abbildung 9 Links: RTFOT Wärmekammer, rechts: RTFOT Glasbehälter [14]

In Abbildung 9 links werden die Wärmekammer und die wichtigsten Bestandteile jener veranschaulicht. Punkt 1 zeigt die obere Öffnung der Wärmekammer. Punkt 2

und 3 beschreiben den Luftstrom bzw. die Drehrichtung des Käfigläufer Lüfters. Punkt 4, 5 und 6 zeigen den Thermometer, den Sensor für das Thermostat und die Ummantelung. Abbildung 9 rechts zeigt eine Draufsicht bzw. einen Schnitt des Glasbehälters. In Punkt 1 wird die Öffnung dargestellt. [14]



Abbildung 10 RTFOT Wärmekammer mit innenliegendem Drehgestell

Wenn die Wärmekammer (Abbildung 10) die Prüftemperatur von $163 \pm 1^\circ\text{C}$ erreicht hat, werden die Glasbehälter, welche mit $35,0 \pm 0,5$ g der Probe befüllt wurden, in den Bohrungen mittels Federklammern fixiert. Das Drehgestell wird nun mit einer Drehzahl von $15,0 \pm 0,2 \text{ min}^{-1}$ gedreht. Der Durchfluss des Luftstromes durch den Kupferschlauch und die am Ende liegende Düse wird auf $4,0 \pm 0,2$ l/min eingestellt. Jener Vorgang wird nun 75 ± 1 min aufrechterhalten. Im Anschluss werden die Glasbehälter aus der Wärmekammer genommen und die Proben in jeweils eine Metalldose geleert. Jener Zustand der Kurzzeitalterung kann nun mit Prüfmethode ermittelt und verglichen werden. [14]

4.2.4 Pressure Aging Vessel PAV

Das Pressure Aging Vessel – Verfahren nach ÖNORM EN 14769: 2012, kurz PAV, ist ein Verfahren um die Veränderung eines Bindemittels über eine gewisse Feld-Nutzungsdauer im Labor zu simulieren. Dabei wird jenes Bindemittel unter einem festgelegten Druck für eine vorgegebene Zeitspanne auf eine festgelegte Temperatur erwärmt. Die so simulierte Nutzungsdauer entspricht ca. 5 bis 10 Jahren. Auf die Feld-Nutzungsdauer haben das verwendete Frischbitumen und die Umwelteinflüsse (Temperatur, Luft, Wasser, Salz, Verkehrsbelastung und Sonneneinstrahlung) Einfluss. [15] [16]

Prüfeinrichtung:

- Druck/Temperatur-Behälter
- Druckregelnde Vorrichtungen
- Thermometer
- Temperatur-Aufzeichnungsgerät
- Metallschalen
- Waage
- Vakuumofen
- Handelsübliche Luft in Gasflasche

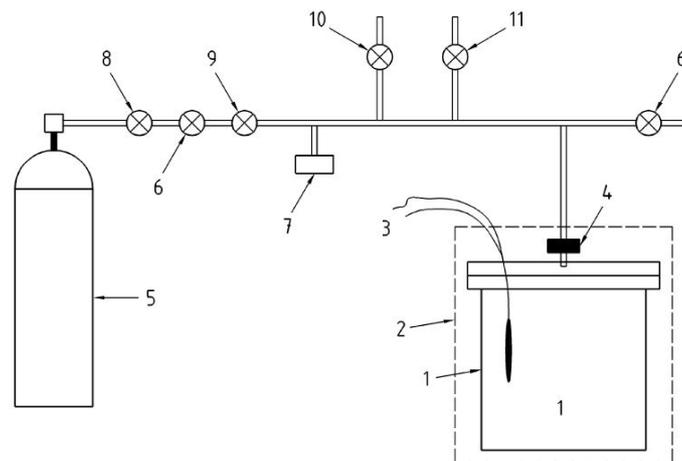


Abbildung 11 PAV Beispiel eines Prüfsystems [16]

In Abbildung 11 ist ein Beispiel eines PAV-Prüfsystem dargestellt. Punkt 1 zeigt einen Druckluftbehälter. Punkt 2 und 3 veranschaulichen den Temperaturregler und den Thermometer. Die Druckregelnden Vorrichtungen sind die Schnelltrennkupplung (4), das Nadelventil (6), die Berstscheiben (7), der Druckregler (8), das Druckmessgerät (9), das Entlüftungsventil (10) und das Überdruckventil (11). Punkt 5 zeigt noch die benötigte Druckluftflasche. [16]

Abbildung 12 rechts zeigt eine Darstellung der Schalenanordnung in dem PAV-Druckluftbehälter. [16]



Abbildung 12 Links: Pressure Aging Vessel, mitte: Druckluftbehälter, rechts: Schalenanordnung

Den Ursprung der PAV Alterung bildet ein Bindemittel welches bereits den Zustand der Kurzzeitalterung (Zustand RTFOT) erreicht hat. Deswegen wird als zu alternde Probe das bereits RTFOT gealterte Bindemittel verwendet. Der Druckbehälter und die Schalen werden auf 110°C vorgeheizt und die Schalen werden mit dem bereits RTFOT gealtertem Bitumen mit je $50,0 \pm 0,5$ g befüllt. Die Schalenanordnung mit dem Rost werden nun in den schon vorgeheizten Druckbehälter gestellt. Nun sind Temperatur und Druck (100°C, 21bar) für eine feste Alterungsdauer von 20h aufrechtzuerhalten. Der Druck wird auf $2,1 \pm 0,1$ MPa beaufschlagt. Jener Druck verhindert, dass kein Verlust flüchtiger Bitumenbestandteile erfolgt. Nach der Alterungsdauer ist der Druck langsam auf Atmosphärendruck zu senken und der Druckluftbehälter kann geöffnet werden. Die Schalenanordnung wird nun in einen schon vorgeheizten Ofen gestellt und nach einer 30 ± 1 min Lagerung einzeln aus dem Ofen genommen und in dafür passende Metalldosen geleert.

4.2.5 Viennese Ageing Procedure VAPro [12]

Die nun im folgenden Kapitel beschriebene Langzeitalterung ist eine Alternative zu der genormten Alterung mittels RTFOT und PAV. Im Gegensatz zu den Bitumen-Alterungsmethoden ist es mit VAPro möglich, das Verfahren an losem Asphaltmischgut bzw. verdichteten Asphaltprobekörpern durchzuführen. Eine Optimierung des Mischgutes und eine damit verbundene Verbesserung der Dauerhaftigkeit und damit der Lebensdauer ist mit dieser Methode möglich.

Verwendet wurden hierbei gasförmige Oxidationsmittel, welche mittels Überdruck durch den Probekörper strömen. Ein schonender Umgang mit dem Asphaltprobekörper soll so gewährleistet werden.

Folgendes wird für das Verfahren benötigt: [12]

- Druckzelle: Der Asphaltprobekörper wird in die Druckzelle zwischen 2 Filtersteine eingebaut und mittels mehrerer Ab- und Zuleitungsschläuche mit dem Gas durchströmt.
- Drucksensor: Messen des Drucks in der Zelle und in der Durchströmungsleitung.
- Druckerzeuger: Erzeugung des notwendigen Überdrucks.
- Druckminderer: Regulierung des Durchströmungsdrucks.
- Ozongenerator: Druckluft wird mit Ozon + Stickoxiden angereichert.
- Anwärmspirale: Erhitzung der mit Ozon + Stickoxiden angereicherten Druckluft.
- Magnetrührer mit Becherglas: Weiterleitung des Gasmisches zum Probekörper. Als Heizmedium wurde Rapsöl verwendet.

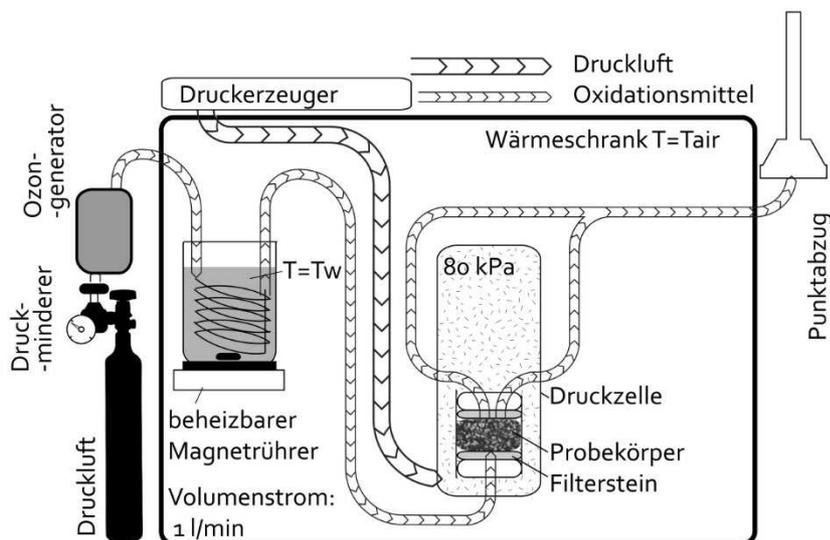


Abbildung 13 Schematische Darstellung des VAPro Versuchsaufbaus [12]

In Abbildung 13 ist eine schematische Darstellung der oben beschriebenen Utensilien des Versuchsaufbaus abgebildet.

Für Kapitel 9 wurden die Standardbedingungen von VAPro für die Fragestellung leicht abgeändert.

4.2.6 Thermische Alterung von Asphalt im Labor in Stickstoffatmosphäre

Wie bei der VAPro-Alterungsmethode ist es auch mit der thermischen Alterung mittels Stickstoffatmosphäre möglich, die Langzeitalterung an losem Asphaltmischgut bzw. an Asphaltprobekörpern durchzuführen. [17]

Der Versuchsaufbau ist an jenen der Alterung mittels VAPro angelehnt. Abbildung 14 zeigt eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Anstelle einer Druckluftflasche mit angeschlossenem Ozon-Generator (VAPro) wird hier eine Versorgung mittels komprimiertem Stickstoff verwendet. [17]

Die Proben werden zwischen Filtersteinen und von einer elastischen Membran umhüllt in eine Einspannvorrichtung eingebaut. Der Druck des Stickstoffes wird reguliert sodass jegliche Luftporen des Probekörpers mit Stickstoff gesättigt werden. Wenn dieser Zustand erreicht wurde beginnt das Durchströmen der Probekörper mittels Stickstoff. Die Temperatur des Wärmeschanks, in welchem sich die Einspannvorrichtung befindet, wird variiert. Es werden 4 unterschiedliche Temperaturstufen verwendet: +60, +85, +110 und +135°C. [17]

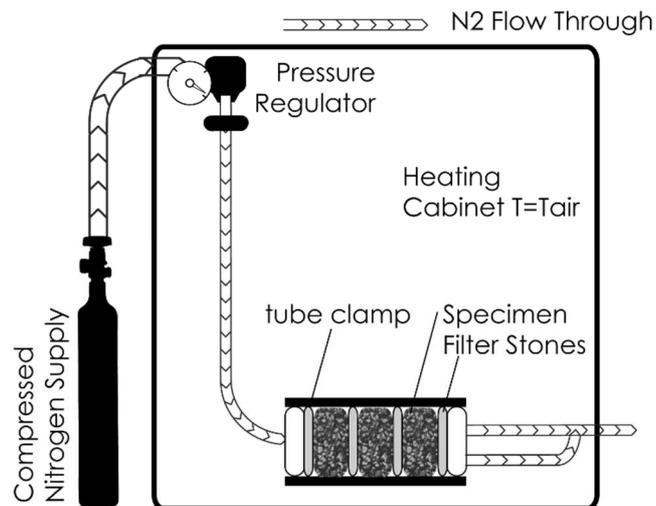


Abbildung 14 Schematische Darstellung des Versuch Ablaufes der Stickstoffatmosphären-Alterung [17]

4.3 Gebrauchsverhaltensorientierte Prüfmethode

In ganz Europa erfolgt die Beurteilung der bituminösen Bindemittel auf Grundlage der konventionellen Prüfmethode. Gegenüber den konventionellen Prüfmethode sind die Gebrauchsverhaltensorientierten Prüfmethode, kurz GVO-Prüfmethode, darauf ausgelegt, möglichst realitätsnah zu Prüfen. Die zunehmende Verkehrsbelastung hat auch eine Auswirkung auf die Belastbarkeit des Bitumens und ihrer damit verbundenen Leistung im Asphalt. Ziel ist es, physikalische Eigenschaften von Bitumen zu bestimmen und aufgrund dessen eine Voraussage treffen zu können, wie sich das bituminöse Bindemittel, in dem Bezug auf die Gebrauchseigenschaft, verhält. [2]

GVO-Prüfmethode sind:

- Rotations Viscosimeter RV
- Dynamischer Scherrheometer DSR (Kapitel 4.3.1)
- Bending Beam Rheometer BBR
- Direct Tension Test DTT

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurde mit dem DSR gearbeitet. In dem nun Folgenden Kapitel wird jene Prüfmethode näher erläutert.

4.3.1 Dynamic Shear Rheometer DSR

Grundlage der Prüfung mittels DSR nach ÖNORM EN 14770:2012 ist die Rheologie. Jene ist die Wissenschaft der fließenden Stoffe und beschreibt mittels physikalischer Kenngrößen den Zustand des geprüften Stoffes. Wie in Kapitel 3.3.2. erwähnt, weist Bitumen eine visko-elastisches Verhalten auf. Jenes Verhalten ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass ein Körper nie zu 100% elastisch oder viskos sein kann. Abbildung 15 links zeigt einen ideal elastischen Zustand mit einer dazu passenden Phasenverschiebung von 0° . D.h. die eingebrachte Spannung und die daraus resultierende Deformation treten zeitlich ident auf. [15]

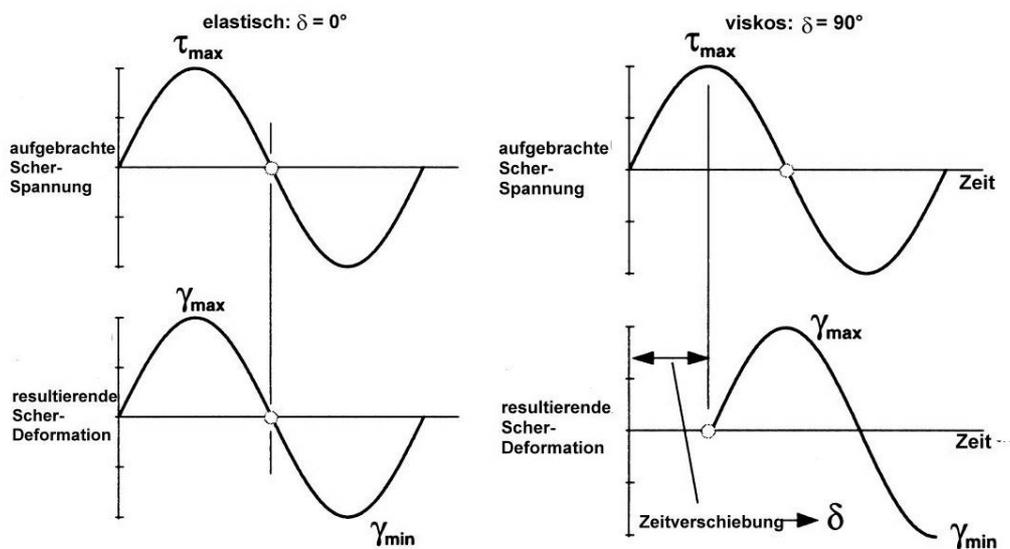


Abbildung 15 Links: DSR ideal elastisches Verhalten, rechts: DSR ideal viskoses Verhalten [15]

Das Gegenteil von ideal elastischem Verhalten ist ideal viskos. Wobei hier, wie in Abbildung 15 rechts ersichtlich, die eingebrachte Spannung und die daraus resultierende Deformation eine Zeitverschiebung aufweist. Der Körper reagiert zeitverzögert auf die Einwirkung. [15]

Der gebrauchrelevante Zustand von Bitumen liegt allerdings genau zwischen diesen beiden idealen Verformungszuständen. Bei der Prüfung eines bituminösen Bindemittels ist davon auszugehen, dass die Messergebnisse immer zwischen ideal elastisch und ideal viskos liegen werden. D.h. der Phasenverschiebungswinkel wird sich immer zwischen 0° und 90° bewegen. Abbildung 16 zeigt jenes visko-elastische Verhalten, bei welcher die eingebrachte Spannung und die daraus folgende Deformation weder ident sind noch eine Phasenverschiebung von 90° aufweist. [15] [2]

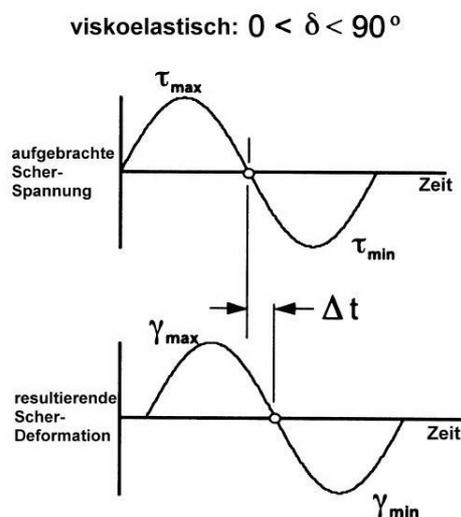


Abbildung 16 DSR visko-elastisches Verhalten [15]

Das Bitumen kann im Labor auf die oben genannten Zustände untersucht werden. Dies erfolgt mittels eines Dynamischen Scherrheometer nach OENORM EN 14770:2012, kurz DSR. Wie in Abbildung 17 veranschaulicht, ist die Funktionsweise jenes Versuches die Oszillation. D.h. eine sich hin und her bewegende Platte befindet sich über einer stillstehenden Platte. Zwischen diesen beiden Platten befindet sich kraftschlüssig das bituminöse Bindemittel welches nun auf die Oszillation reagiert. Die Verformung des Bindemittels als Reaktion auf die Spannung wird gemessen. Auch die genaue Bewegung wird in Abb. 22 sehr gut beschrieben. Die oszillierende Platte startet bei A dreht sich anschließend nach B in weiterer Folge nach A zurück und dann in Richtung C und wieder zurück nach A. Jene Bewegung (A-B-A-C-A) bildet somit einen Zyklus und ist die Arbeitsweise eines DSR. [15] [18]

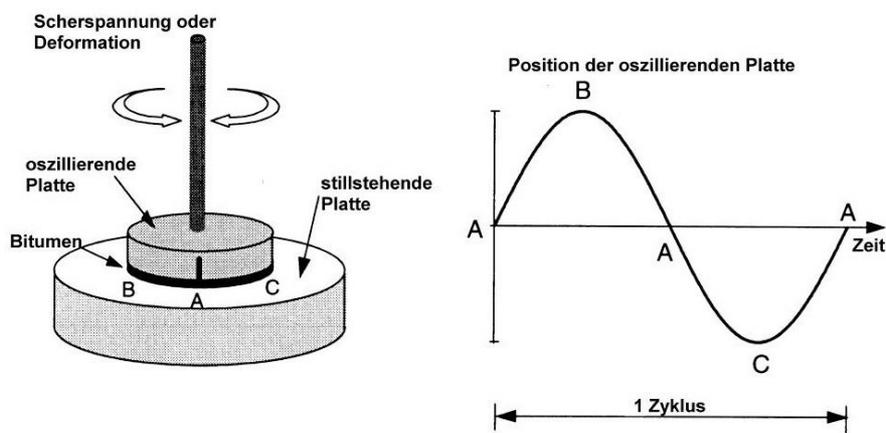


Abbildung 17 DSR Oszillationszyklus [2]

Die mittels des DSR zu ermittelten physikalischen Kenngrößen sind:

- Phasenverschiebungswinkel δ
- Komplexer Schubmodul G^*

Abbildung 18 beschreibt die einzelnen Komponenten des komplexen Schubmoduls bzw. den Zusammenhang zwischen G^* und δ .

$V_x (G')$ beschreiben den viskosen Anteil und somit den Verlustmodul (Kraft geht verloren). $E_x (G'')$ beschreiben den elastischen Anteil und somit den Speichermodul (Kraft bleibt erhalten). Beide Komponenten gemeinsam bilden den komplexen Schubmodul. [2]

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

Formel 1 Berechnung des komplexen Schubmoduls

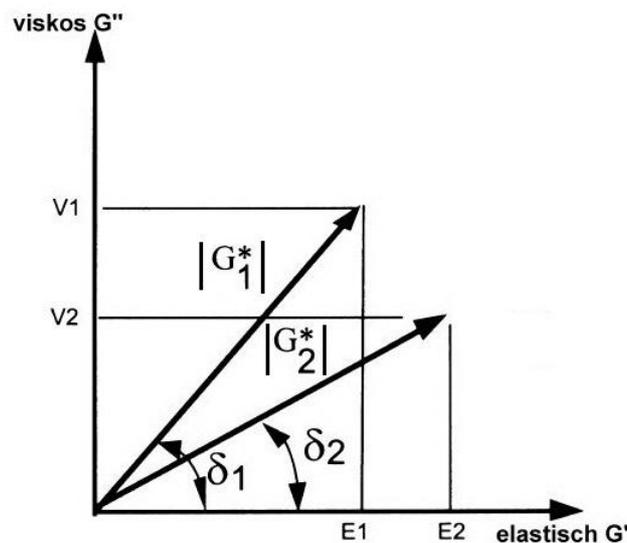


Abbildung 18 DSR Phasenverschiebungswinkel [15]

Für die Berechnung des Phasenverschiebungswinkels wird messtechnisch der Zeitunterschied zwischen den beiden Extremwerten der Spannung und der daraus resultierenden Deformation erfasst. Mittels dieser beiden Werte und der Messfrequenz ist die Berechnung von δ nun möglich. [15]

$$\delta = \frac{\Delta t}{t} * 360^\circ$$

Formel 2 Berechnung des Phasenverschiebungswinkels

Mit:

δPhasenverschiebungswinkel [°]

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

t.....Zeit für eine Schwingung [s]

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

Formel 3 Berechnung der Zeit einer Schwingung

Mit:

t.....Zeit für eine Schwingung [s]

f....Frequenz [Hz]

Mit den nun erhaltenen physikalischen Kenngrößen kann man auf das Verformungsverhalten des geprüften Stoffes schließen. Jene Werte werden mittels Computersoftware automatisch verarbeitet und für die Weiterverwendung als passende Datenform wiedergegeben.

5 STREUUNG DER MECHANISCHEN EIGENSCHAFTEN VON FRISCHBITUMEN

Ziel war es, die Unterschiede von ungealtertem Bitumen gleicher Chargen zu überprüfen. Bitumen ist ein Naturprodukt und deshalb immer mit geringen Streuungen in der Zusammensetzung behaftet. Jene Unterschiede gab es zu beleuchten und die damit verbundene Streuung einzelner Kübel gleicher Charge zu ermitteln.

5.1 Materialien und Testmethoden

Dem Labor wurden, wie in Tabelle 6 dargestellt, folgende Bitumen zur Verfügung gestellt.

Tabelle 6 Bitumensorten

Bitumen Code	Bitumenart	Alterung	Anzahl Kübel
B637A	70/100	A (ungealtert)	10
B655A	70/100	A (ungealtert)	10

Als Prüfmethode wurde der DSR ausgewählt mit einem kurzen Prüfprogramm. Geprüft wurde das Bitumen jedes einzelnen Kübels auf dessen rheologische Eigenschaft. Tabelle 7 zeigt das verwendete Prüfprogramm.

Tabelle 7 Prüfprogramm Frischbitumen

Messgerät	Messgeometrie	Spaltgröße	Prüf-temperatur	Prüffrequenz	Laborcode	Probenanzahl
MARS II	PP25	1,00mm	+46°C	1,592Hz	B637A_K1-K10	10Stk
MARS II	PP25	1,00mm	+46°C	1,592Hz	B655A_K1-K10	10Stk
					SUMME	20Stk

Probenvorbereitung für die DSR-Prüfung:

Aus jedem Kübel beider Chargen wurde eine geringe Menge Bitumen mit einem zuvor vorgewärmten Messer geschnitten und in kleine Kännchen gefüllt. Diese geringe Menge Bitumen wird nun erwärmt und in eine auf die Messgeometrie abgestimmte Silikonform gegossen. Der Probekörper wird am Vortag der Prüfung erstellt. Dies gewährleistet eine vollständige Abkühlung des Probekörpers bevor dieser geprüft wird. In Abbildung 19 sind die Silikonform, die zu prüfende Bitumenprobe, ein Kännchen und ein Gasbrenner als Vorrichtung zum erwärmen des Bitumen abgebildet.



Abbildung 19 DSR Probenvorbereitung Silikonform, Bitumenprobe, Kännchen und Vorrichtung zum Erwärmen

Abbildung 20 zeigt die vorbereitete leere Silikonform, das Eingießen des erhitzten Bitumens in jene und den fertigen Probekörper.



Abbildung 20 Links: Silikonform und beschriftete Schutzhülle, mitte: eingießen des flüssigen Bitumens aus Kännchen in Silikonform, rechts: befüllte Silikonform

5.2 Ergebnisse & Interpretation

In Abbildung 21 sind die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B637A Bitumens dargestellt. Verwendet wird eine absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls auf der Y-Achse und die Kübel 1-10 auf der X-Achse. Die Linie in der Mitte, bei ca. 17110 Pa, repräsentiert den Mittelwert aller 10 Kübel und wurde als Referenz gewählt. Die Punkte von Kübel 1 bis 10 zeigen die Streuung der einzelnen Kübel wobei das Minimum bei 91,1% (Kübel 8) des Mittelwertes und das Maximum bei 112,5% (Kübel 10) des Mittelwertes liegt.

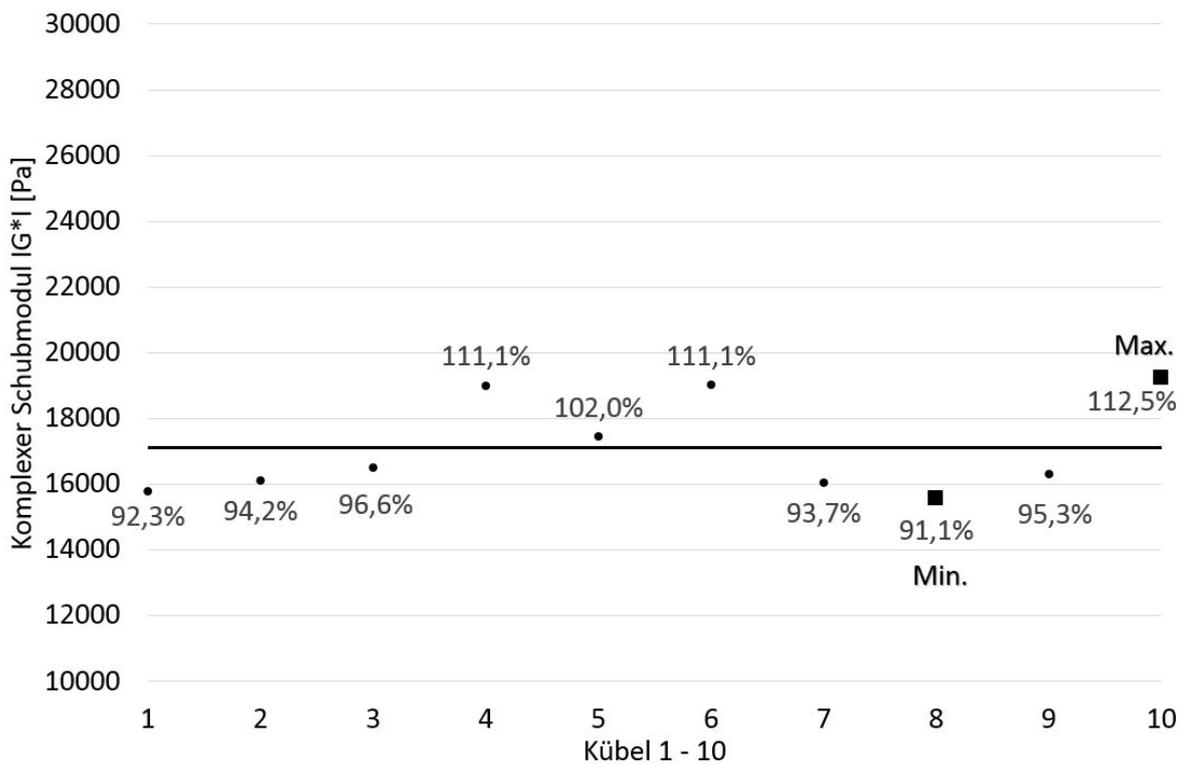


Abbildung 21 DSR 46°C bei 1,59 Hz, absolute Streuung des komplexen Schubmoduls der Kübel 1-10 von B637

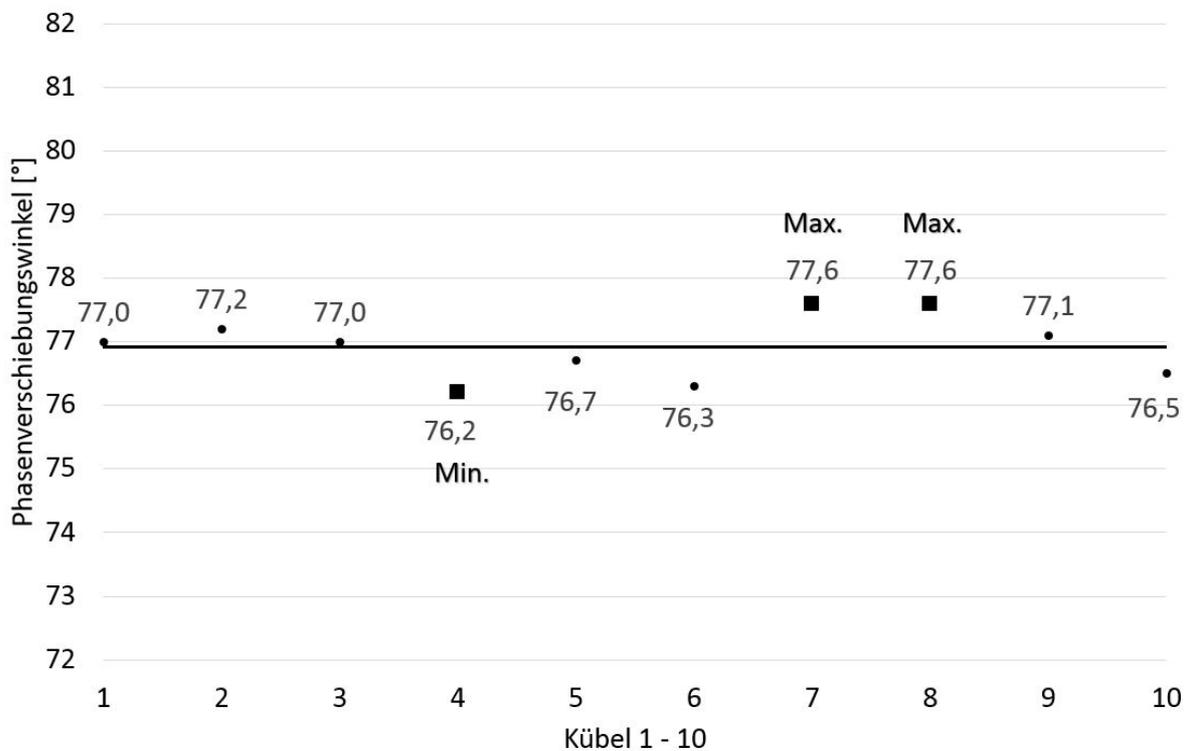


Abbildung 22 DSR 46°C bei 1,59 Hz, absolute Streuung des Phasenwinkels der Kübel 1-10 von B637

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B637A Bitumens. Verwendet wird eine absolute Darstellung des Phasenverschiebungswinkels auf der Y-Achse und die Kübel 1-10 auf der X-Achse. Die Linie in der Mitte, bei ca. $76,9^\circ$, repräsentiert den Mittelwert aller 10 Kübel. Die Punkte von Kübel 1 bis 10 zeigen die Streuung der einzelnen Kübel wobei das Minimum bei $76,2^\circ$ (Kübel 4) und das Maximum bei $77,6^\circ$ (Kübel 7&8) liegt.

In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B655A Bitumens dargestellt. Verwendet wird eine absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls auf der Y-Achse und die Kübel 1-10 auf der X-Achse. Die Linie in der Mitte, bei ca. 13350 Pa, repräsentiert den Mittelwert aller 10 Kübel und wurde als Referenz gewählt. Die Punkte von Kübel 1 bis 10 zeigen die Streuung der einzelnen Kübel wobei das Minimum bei 90,1% (Kübel 6) des Mittelwertes und das Maximum bei 119,3% (Kübel 8) des Mittelwertes liegt.

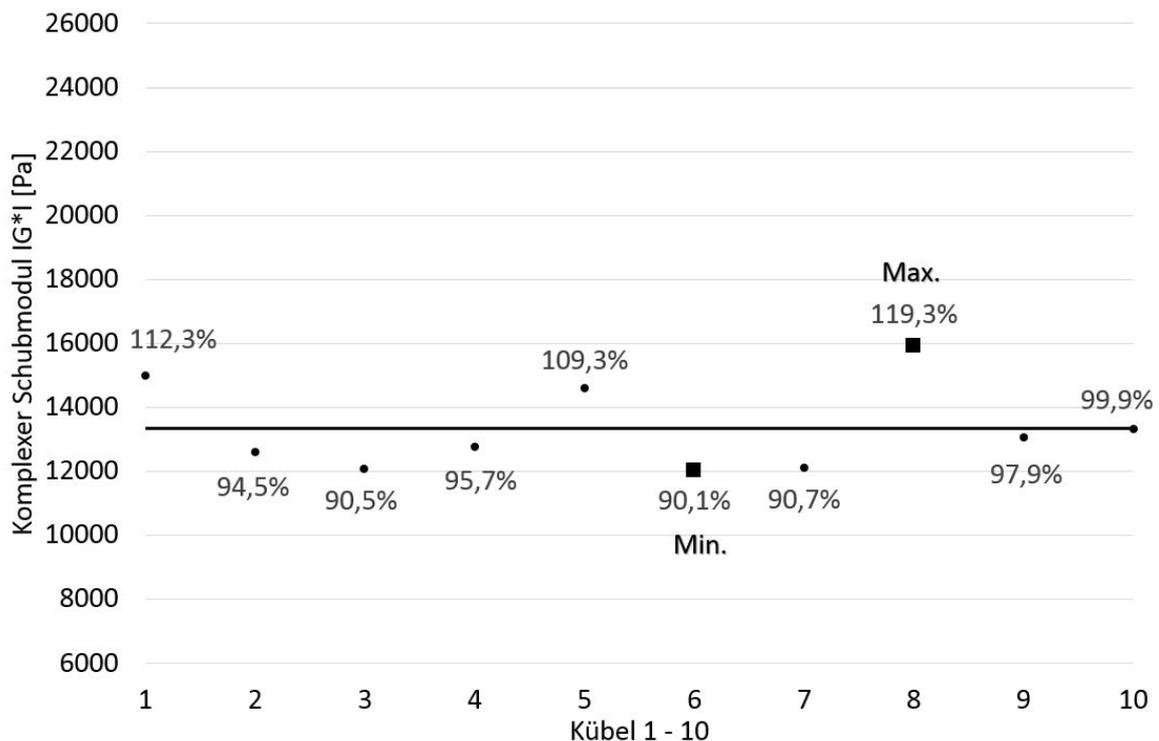


Abbildung 23 DSR 46°C bei 1,59 Hz, absolute Streuung des komplexen Schubmoduls der Kübel 1-10 von B655

Abbildung 24 zeigt die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B655A Bitumens. Verwendet wird eine absolute Darstellung des Phasenverschiebungswinkels auf der Y-Achse und die Kübel 1-10 auf der X-Achse. Die Linie in der Mitte, bei ca. $83,0^\circ$, repräsentiert den Mittelwert aller 10 Kübel. Die Punkte von Kübel 1 bis 10 zeigen die Streuung der einzelnen Kübel wobei das Minimum bei $82,4^\circ$ (Kübel 8) und das Maximum bei $83,5^\circ$ (Kübel 6) liegt.

In Abbildung 25 sind die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B637A und des B655A Bitumens dargestellt. Verwendet wird eine absolute Darstellung des

Mittelwertes und des Konfidenzintervalls des komplexen Schubmoduls auf der linken Seite und eine relative Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls des komplexen Schubmoduls auf der rechten Seite. Die Berechnung des 95% - Konfidenzintervalls erfolgt mittels: Standardabweichung \rightarrow Standardfehler (Standardabweichung/Wurzel(n)) \rightarrow 95% - Konfidenzintervall ($1,96 \cdot$ Standardfehler).

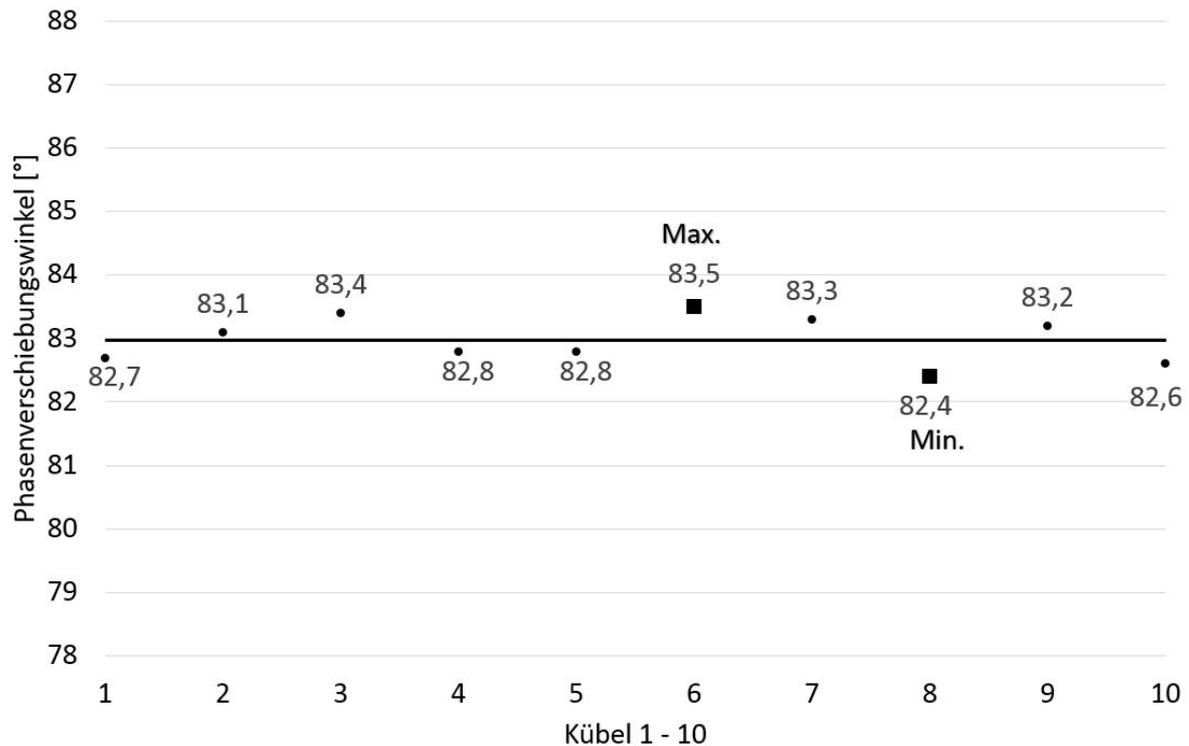


Abbildung 24 DSR 46°C bei 1,59 Hz, absolute Streuung des Phasenwinkels der Kübel 1-10 von B655

Interessant ist nun die Streuung der einzelnen Kübel um den jeweiligen Mittelwert. Verwendet wurde hierfür das 95% - Konfidenzintervall.

Aus den Konfidenzintervallen erkennt man, dass der absolute Unterschied des B637A Bitumen größer ist als der des B655A Bitumen. Bei dem relativen Unterschied stellt sich genau das Gegenteil ein.

Das B637A Bitumen hat also eine kleinere Streuung als das B655A Bitumen bezogen auf den Mittelwert.

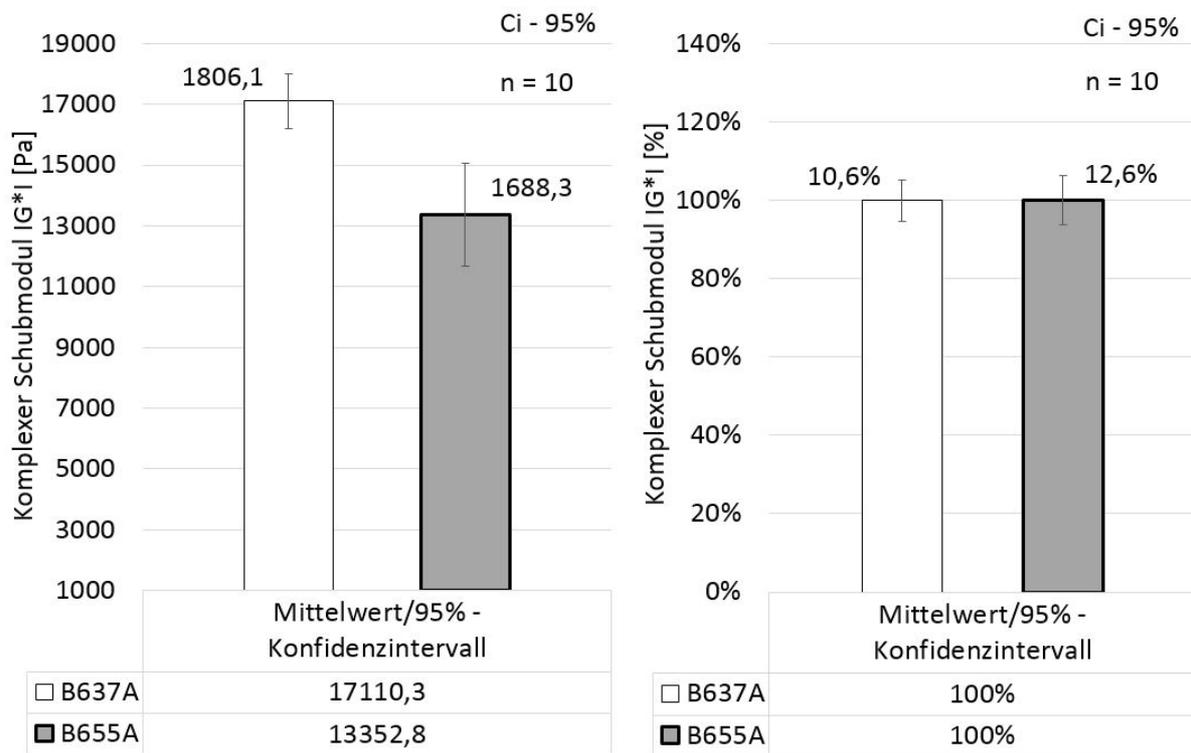


Abbildung 25 Links: DSR 46°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls der Kübel 1-10 von B637 und B655 des komplexen Schubmoduls. Rechts: DSR 46°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls der Kübel 1-10 von B637 und B655 des komplexen Schubmoduls.

In Abbildung 26 sind die Ergebnisse der geprüften Kübel von 1-10 des B637A und des B655A Bitumens dargestellt. Verwendet wird eine absolute Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls des Phasenverschiebungswinkels auf der linken Seite und eine relative Darstellung des Mittelwertes und des Phasenverschiebungswinkels auf der rechten Seite.

Interessant ist nun die Streuung der einzelnen Kübel um den jeweiligen Mittelwert. Verwendet wurde hierfür das 95% - Konfidenzintervall.

Das Konfidenzintervall des B637A Bitumen ist in der absoluten Darstellung größer als jenes des B655A Bitumen. Die Streuung der beiden Bitumen ist annähernd gleich.

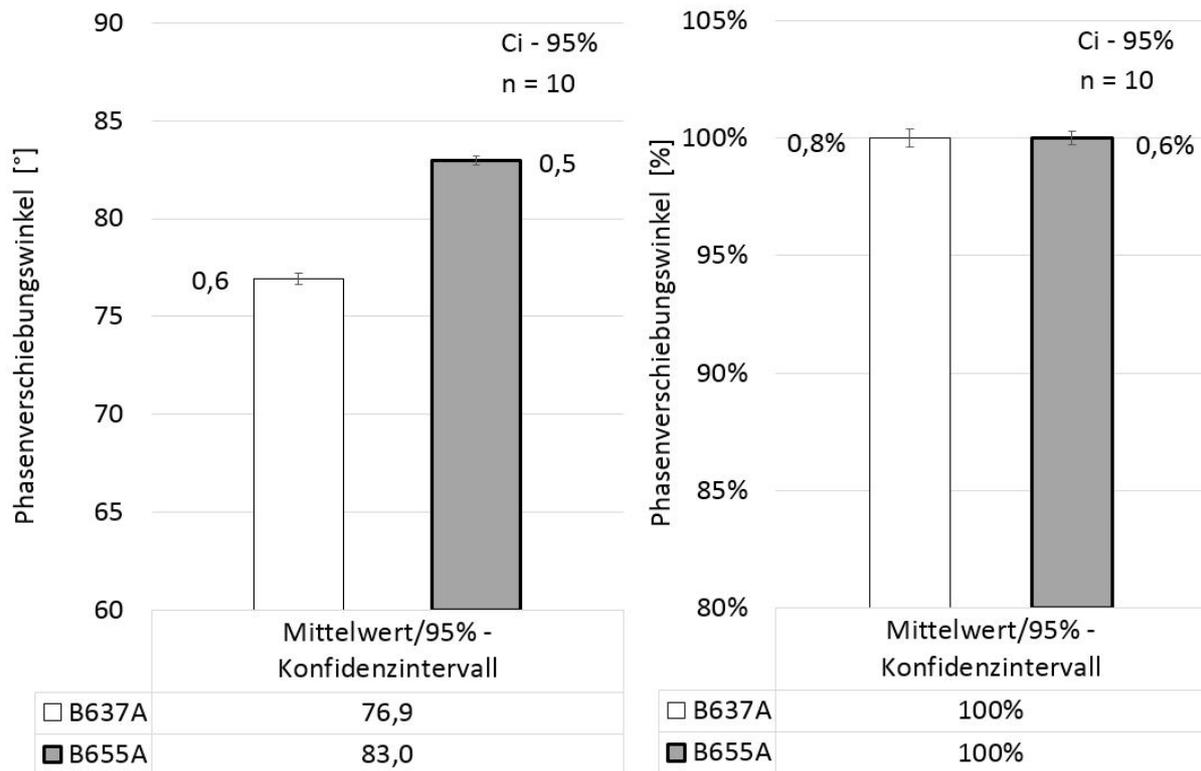


Abbildung 26 DSR 46°C bei 1,59 Hz, links: absolute Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls der Kübel 1-10 von B637 und B655 des Phasenverschiebungswinkels, rechts: relative Darstellung des Mittelwertes und des Konfidenzintervalls der Kübel 1-10 von B637 und B655 des Phasenverschiebungswinkels

Jene Streuung ist von verschiedenen Faktoren abhängig, welche alle einen Anteil daran haben.

Faktoren der Streuung:

- Abweichungen innerhalb einer Chargenproduktion
- Unterschiede bei der Probekörpervorbereitung
- Wiederholbarkeit der Prüfeinrichtung / Versuche

6 EINFLUSS DER KURZZEITALTERUNG BEI DER PLATTENHERSTELLUNG IM LABOR

Um die Kurzzeitalterung im Labor bei der Plattenherstellung zu prüfen, wurden wie bereits in Kapitel 4.1 beschriebene Prüfplatten erstellt. Aus jenen Prüfplatten wurden dann die Prüfkörper ausgebohrt, welche in den späteren Kapiteln 8 und 9 zur Anwendung kommen.

Das Bitumen der so entstandenen Plattenreste wurde wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben rückgewonnen und mittels DSR auf dessen rheologischen Eigenschaften geprüft. Der Grundgedanke war, dass die Vergleichbarkeit der Probekörper, welche aus den Probeplatten gebohrt werden, untersucht werden soll. Diese Vergleichbarkeit und eine eventuelle Schwankung der Probeplatten, kann in den Ergebnissen der Langzeitalterung im Labor berücksichtigt werden.

6.1 Materialien und Testmethoden

Tabelle 8 zeigt die verwendeten Bitumen.

Tabelle 8 Bitumensorte

Bitumen Code	Bitumenart	Alterung
B637A	70/100	A (ungealtert)

Das B637A Bitumen bildet die Grundlage des Versuchs und wurde für die Plattenherstellung verwendet. Tabelle 9 zeigt die erstellten Probeplatten.

Tabelle 9 Plattenvarianten

Probekörpernummer	Bitumen	Alterungszustand	Variante	Zeit im Mischer	Herstellung
E897	B637	C_L000	V1	5 min	1
E898	B637	C_L000	V2	5 min	2
E899	B637	C_L000	V3	13 min	
E900	B637	C_L000	V4	21 min	
E901	B637	C_L000	V5	5 min	3
E902	B637	C_L000	V6	13 min	
E903	B637	C_L000	V7	21 min	
E904	B637	C_L000	V8*	5 min	4
E905	B637	C_L000	V9	13 min	
E906	B637	C_L000	V10	21 min	
E907	B637	C_L000	V11	5 min	5
E908	B637	C_L000	V12	13 min	
E909	B637	C_L000	V13	21 min	

*Bei der Rückgewinnung von V8 gab es einen Probeverlust. V8 wird für dieses Kapitel nicht verwendet.

Der Laborcode setzt sich aus den in Tabelle 9 dargestellten Daten zusammen. Als Bsp. Variante 1:

- B637C_L000_V1

Der Alterungszustand C_L000 beschreibt eine Laborkurzzeitalterung bei 0 Monaten Langzeitalterung. D.h. Ein frisch erstellter kurzzeitgealterter Asphaltprobekörper am Beginn seiner Langzeitalterung.

Bis auf B637C_L000_V1, welche ein eigenständiger Mischvorgang war, wurden immer jeweils 3 Platten bei einem Mischvorgang erstellt. An den 13 Varianten und den dazu notierten Mischzeiten wurden die Bitumeneigenschaften geprüft.

Zur Vollständigkeit wurde das selbe Prüfprogramm auch mit dem ungealterten Bitumen (637A), dem kurzzeitgealterten Bitumen nach Norm (637B_LRTF) und dem langzeitgealterten Bitumen (637C_LPAV) durchgeführt. Tabelle 10 zeigt das verwendete Prüfprogramm.

Tabelle 10 Prüfprogramm Platten kurzzeitgeltert

Messgerät	Mess- geometrie	Spaltgröße	Prüf- temperatur	Prüffrequenz	Laborcode	Probenanzahl
Anton Paar MCR 302	PP25	1,00mm	+46°C-+64°C	1,592Hz	B637A_K1-K4	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP25	1,00mm	+46°C-+64°C	1,592Hz	B637B_LRTF1- 2	2Stk
Anton Paar MCR 302	PP25	1,00mm	+46°C-+64°C	1,592Hz	B637C_LPAV1 -2	2Stk
Anton Paar MCR 302	PP25	1,00mm	+46°C-+64°C	1,592Hz	B637C_L000 _V1-V13	13Stk
					SUMME	21Stk

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurden die Proben für die Prüfung mittels DSR vorbereitet.

6.2 Ergebnisse & Interpretation

In Abbildung 27 ist die absolute logarithmische Darstellung der Plattenversuch Mittelwerte des komplexen Schubmoduls dargestellt. Die unterste Linie wird aus dem ungealtertem B637A Bitumen gebildet. Über dieser Linie liegen die kurzzeitgealterten Bitumen. Die Streuung der Mittelwerte wurde mit dem 95%-Konfidenzintervall abgebildet. Berechnung des 95%-Konfidenzintervalls laut Kapitel 5.2.

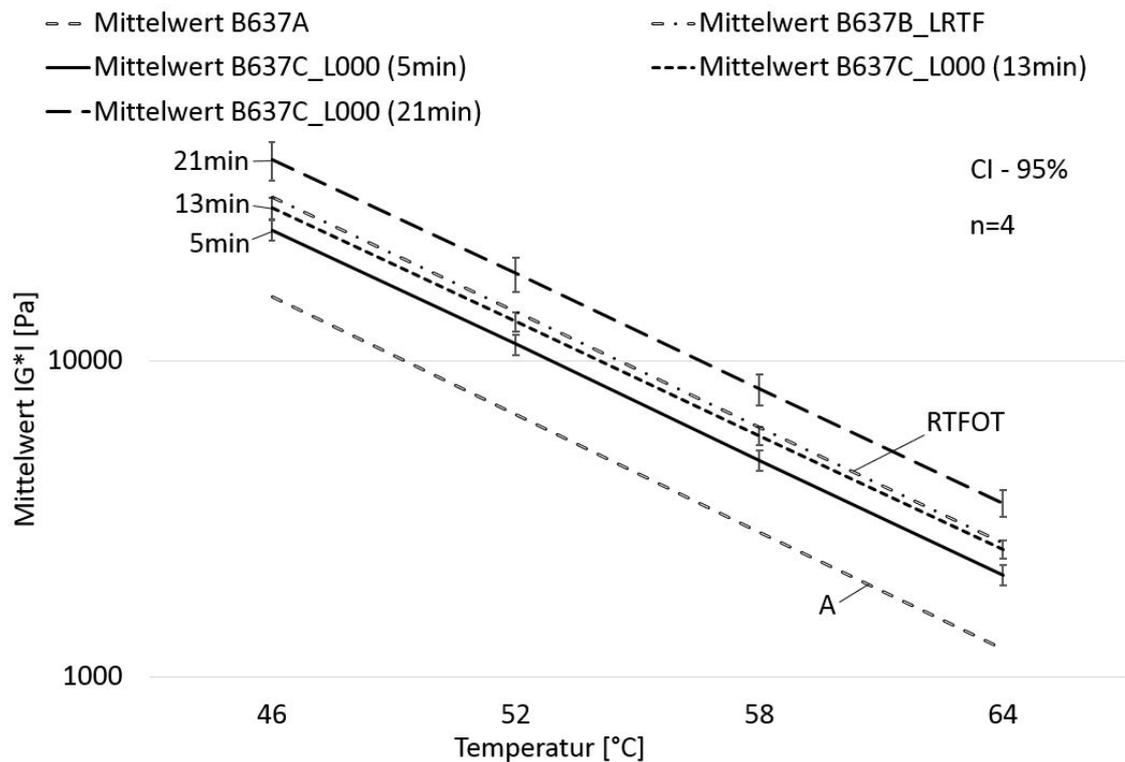


Abbildung 27 Kurzzeitalterung verschiedener Platten, DSR +46-+64°C bei 1,59 Hz, absolute logarithmische Darstellung der Plattenversuch Mittelwerte des komplexen Schubmoduls [Pa]

Abbildung 28 zeigt die relative Darstellung der Plattenversuche. Als Referenz wurde hier das RTFOT-kurzzeitgealterte B637B_LRTF Bitumen verwendet. Jene Darstellung soll besonders deutlich die Unterschiede aufgrund der Mischzeit veranschaulichen. Der Mittelwert der Varianten mit 5 min im Mischer erfährt eine Alterung und eine damit verbundene Höhe des komplexen Schubmoduls von 79% in Bezug auf der RTFOT Alterung. Jene Asphaltplatten welche nach 13 min mischen erstellt wurden, weisen einen komplexen Schubmodul von 92 – 95% in Bezug auf der RTFOT-Alterung auf. Den höchsten Alterungsgrad gegenüber der RTFOT-Alterung und damit 131 – 134% des komplexen Schubmoduls, weisen jene Varianten auf, welche sich 21 min im Mischer befunden haben.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die Mischdauer einen signifikanten Einfluss auf den Alterungsgrad der Bitumen hat und daher auch eine starke Erhöhung der Steifigkeit einhergeht.

Um die Streuung der einzelnen Platten gegenüber dem Mittelwert darzustellen, wurde das 95% - Konfidenzintervall verwendet. Die Streuung der einzelnen Platten ist zwar sehr groß, jedoch ist dennoch eine Signifikanz in den Ergebnissen sichtbar. Ähnlich verhält es sich bei der Darstellung des Phasenverschiebungswinkels. In Abbildung 29 wird eine absolute Darstellung jenes veranschaulicht. Die oberste und unterste Linie bilden das ungealterte (B637A) bzw. langzeitgealterte Bitumen (B637C_LPAV). Zwischen diesen Beiden bilden die kurzzeitgealterten Bitumen die ersichtlichen Linien.

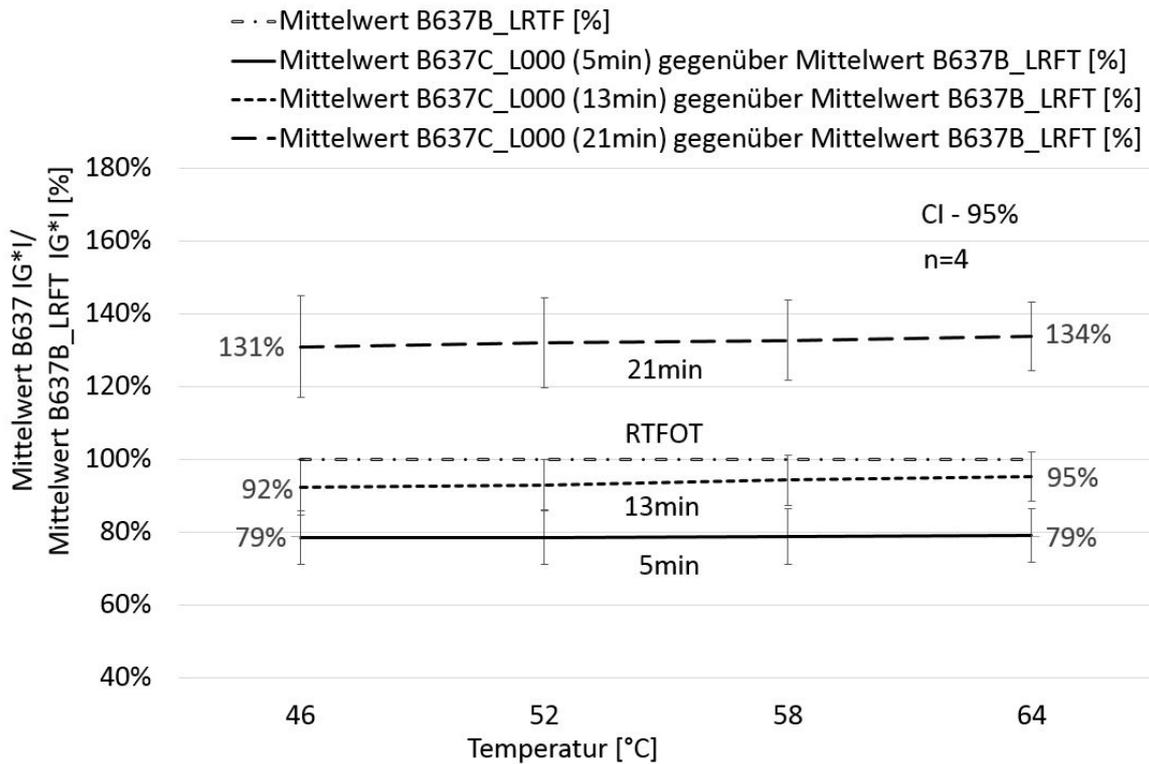


Abbildung 28 Kurzzeitalterung verschiedener Platten, DSR +46-+64°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung der Plattenversuch Mittelwerte IG*I / Referenz B637B_LRFT IG*I [%]

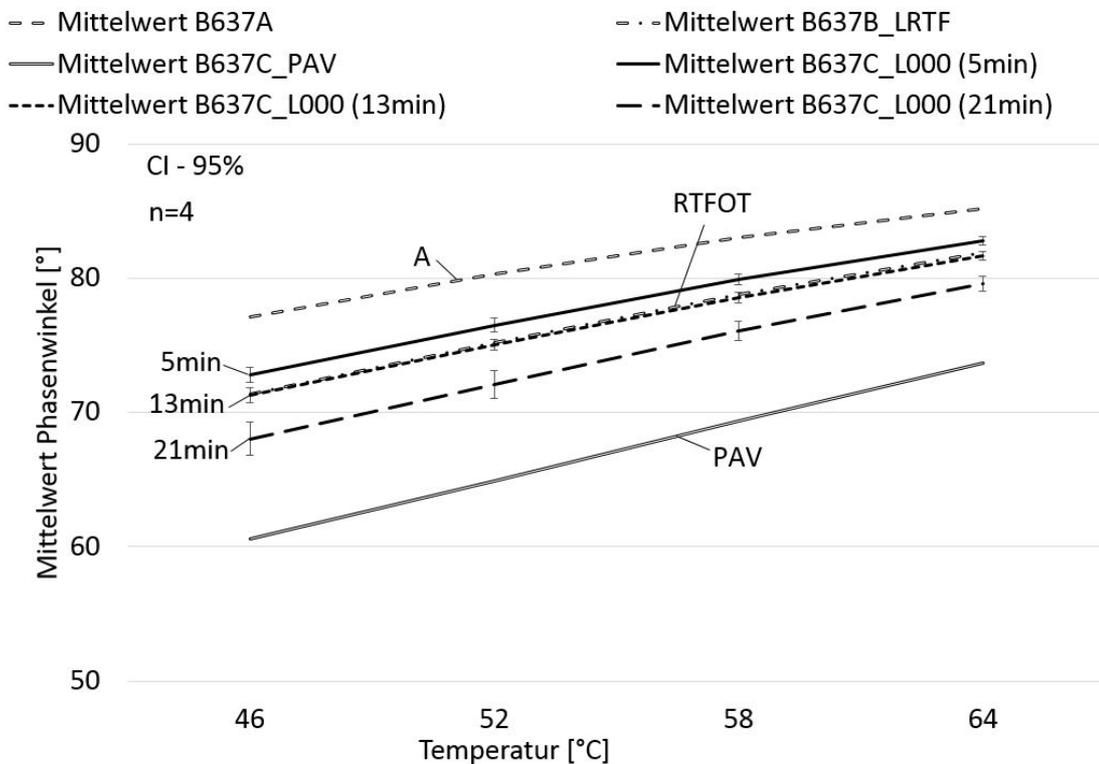


Abbildung 29 Kurzzeitalterung verschiedener Platten, DSR +46-+64°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Plattenversuch Mittelwerte des Phasenverschiebungswinkels [°]

Abbildung 30 zeigt eine absolute Darstellung der Differenz des Phasenverschiebungswinkels bezogen auf das B637B_LRFT Bitumen, welches als Referenz gewählt wurde. Der Mittelwert der Varianten mit 5 min im Mischer haben eine Differenz des Phasenverschiebungswinkels von +1,5 - +0,9° der RTFOT Alterung. Jene Asphaltplatten welche nach 13 min mischen erstellt wurden, weisen einen Phasenverschiebungswinkel von 0,0 – -0,3° in Bezug auf die RTFOT-Alterung auf. Den höchsten Alterungsgrad gegenüber der RTFOT-Alterung und damit eine Differenz des Phasenverschiebungswinkels von -3,3 – -2,3°, weisen jene Varianten auf, welche sich 21 min im Mischer befunden haben.

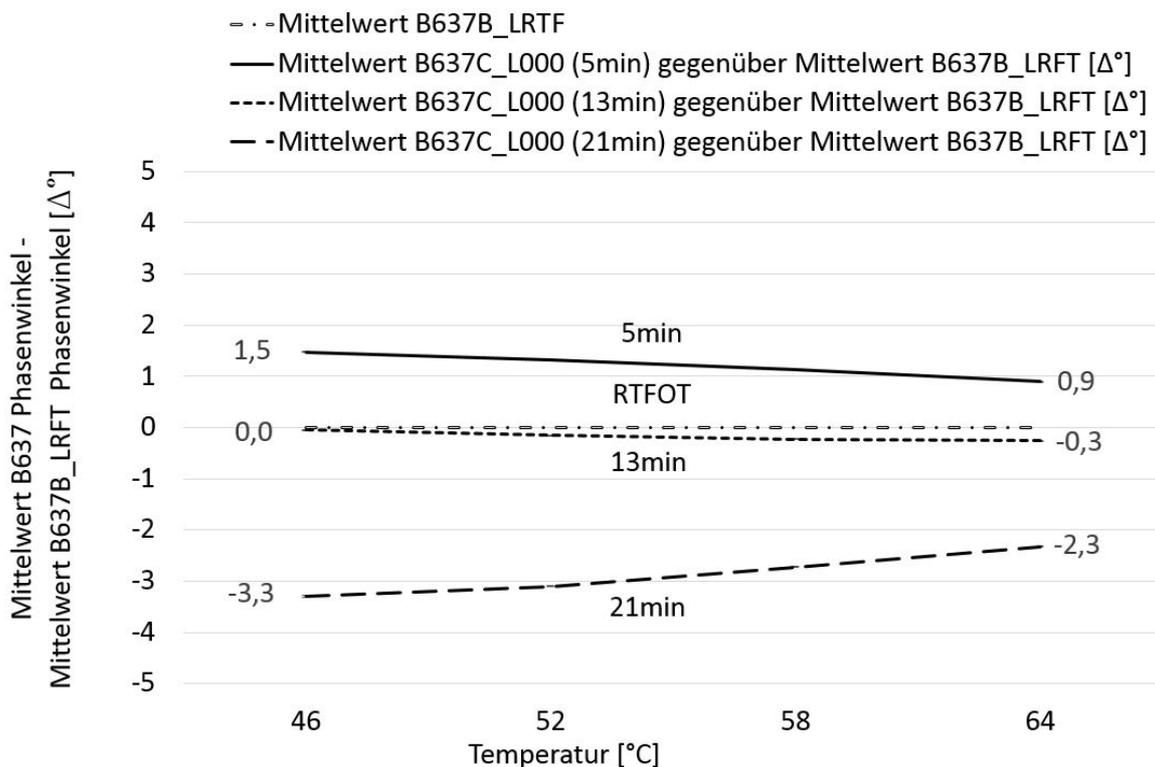


Abbildung 30 Kurzzeitalterung verschiedener Platten, DSR +46-+64°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Plattenversuch Mittelwerte Phasenverschiebungswinkel - Referenz B637B_LRFT Phasenverschiebungswinkel [Δ°]

Sowohl bei der Überprüfung des komplexen Schubmoduls als auch bei jener des Phasenverschiebungswinkel wurden deutliche Unterschiede aufgrund der Mischdauer erkennbar. Bezogen auf die RTFOT-Alterung weist die relative Darstellung zwischen 5 min und 21 min im Mischer einen Unterschied von bis zu 55% des komplexen Schubmoduls auf. In absoluten Zahlen entspricht dieser Unterschied 1458 Pa des komplexen Schubmoduls. Der Phasenverschiebungswinkel hat einen absoluten Unterschied von bis zu 4,8°. Die Varianten welche 13 min im Mischer waren, entsprechen annähernd der RTFOT-Alterung.

Unter Rücksichtnahme der oben beschriebenen Ergebnisse, ist die Relevanz der Mischdauer deutlich erkennbar und die damit verbundene Kurzzeitalterung stark beeinflusst.

7 ALTERUNGSVERLAUF VON BITUMEN BEI LABORALTERUNG

Die Grundidee hinter dieser Fragestellung ist, die Verläufe der Alterung auch in den zwischenliegenden Alterungsniveaus zu erfahren. Speziell im Bereich der PAV Alterung ist uns nur das Startniveau und das Endniveau bekannt. Die Ausgangsalterung ist das RTFOT-gealterte Bitumen, welches dann zur weiteren PAV-Alterung verwendet wird. Das Ergebnis ist dann ein PAV-langzeitgealtertes Bitumen. Jenes Bitumen wird bei der PAV-Methode 20 Stunden lang gealtert. Die Frage ist, wie sich die Alterung in den Zwischenschritten (5,10,15h) verhält. In dieser Arbeit wurde diese Fragestellung näher beleuchtet.

Ausgangslage sind ungealterte Bitumen welche zuerst mit dem RTFOT-Verfahren kurzzeitgealtert wurden und dann mit dem PAV-Verfahren langzeitgealtert. Die Dauer der Langzeitalterung wurde allerdings auf 4 unterschiedliche Zeiträume aufgeteilt um das zwischenzeitliche Alterungsniveau zu erfahren.

Die Schritte mit 5, 10 und 15 Stunden wurden eingefügt und die für das PAV-Verfahren üblichen 20 Stunden ergeben einen Verlauf von kurzzeitgealtert bis langzeitgealtert. Jeweils nach der gewünschten Dauer wurde der PAV abgebrochen und das Bitumen in eine Metalldose gefüllt um es in späterer Folge mittels DSR prüfen zu können.

7.1 Materialien und Testmethoden

Es wurden Bitumen unterschiedlicher Herkunft (Raffinerien) verwendet. Tabelle 11 zeigt die verwendeten Bitumen.

Tabelle 11 Bitumensorten

Bitumen Code	Bitumenart	Alterung	Herkunft
B637A	70/100	A (ungealtert)	A
B655A	70/100	A (ungealtert)	B
B501A	70/100	A (ungealtert)	C
B502A	70/100	A (ungealtert)	D
B503A	70/100	A (ungealtert)	B
B504A	70/100	A (ungealtert)	E

Tabelle 12 zeigt das verwendete Prüfprogramm.

Tabelle 12 Prüfprogramm Alterungsverlauf Langzeitalterung

Messgerät	Mess- geometrie	Spalt- größe	Prüf- temperatur	Prüf- frequenz	Laborcode	Proben- anzahl
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B637A	1Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B655A	1Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B637B_LRTF	1Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B655B_LRTF	1Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B637C_LPAV5-20	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B655C_LPAV5-10	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B501C_LPAV5-10	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B502C_LPAV5-10	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B503C_LPAV5-10	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08	2,00mm	-8 - 40°C	0,1 - 40Hz	B504C_LPAV5-10	4Stk
SUMME						28Stk

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurden die Proben für die Prüfung mittels DSR vorbereitet.

7.2 Ergebnisse & Interpretation

Abbildung 31 ist eine absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der mittels PAV-Verfahren gealterten Bitumen. Das B502 Bitumen weist eine deutliche Abweichung gegenüber den restlichen Bitumen auf. Die restlichen mittels PAV gealterten Bitumen befinden sich annähernd im selben Bereich. Die Verläufe sind dargestellt bei 40°C Prüftemperatur und 1,592Hz Prüffrequenz.

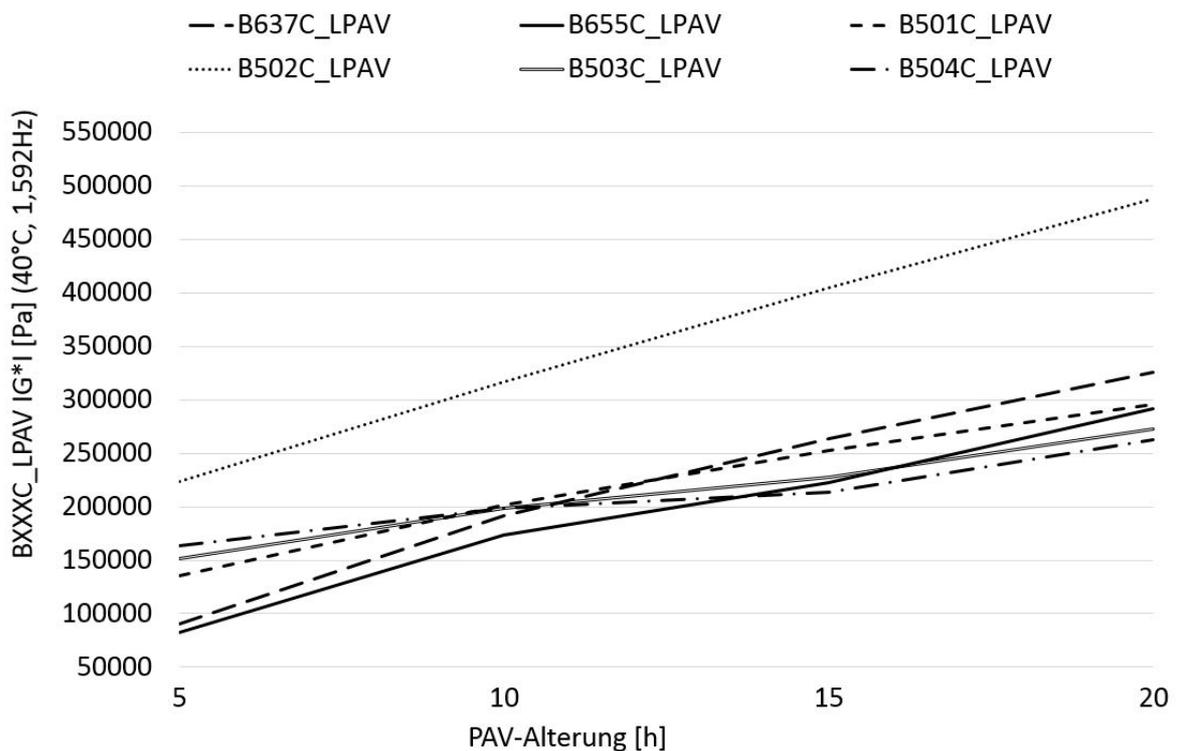


Abbildung 31 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, VDSR 40°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXC_PAV5-20h gealterten Bitumen $|G^*|$ [Pa]

Um den Alterungsverlauf der Probe der PAV-Langzeitalterung darzustellen, wurde als Referenz die jeweilige 20h PAV-Alterung gewählt. Abbildung 32 ist eine relative Darstellung des komplexen Schubmoduls bezogen auf diese Referenz. Dies ermöglicht eine bessere Betrachtung der Zwischenschritte 5, 10 und 15h PAV-gealtert. Die Verläufe sind dargestellt bei 40°C Prüftemperatur und 1,592Hz Prüffrequenz. Bei 5h PAV-gealtert liegt eine deutliche Streuung des komplexen Schubmoduls bezogen auf die Referenz (20h PAV-gealtert) vor. Bei 10h PAV-gealtert wird die Streuung um einiges geringer. Im weiteren Verlauf bei 10h PAV-gealtert ist dies ebenfalls zu beobachten. Es ist eine Signifikante Bündelung der Werte, von 5 – 15h PAV-gealtert, erkennbar. Die Verläufe sind bei allen Proben ähnlich. Alle Proben zeigen eine minimal unterschiedliche Annäherung an ihr jeweiliges 20h PAV-Alterungsniveau.

Abbildung 33 ist eine absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der mittels PAV-Verfahren gealterten Bitumen. Das B502 Bitumen weist auch bei dieser Darstellung eine deutliche Abweichung gegenüber den restlichen Bitumen auf. Die restlichen mittels PAV gealterten Bitumen befinden sich annähernd im selben Bereich. Der Verlauf ist dargestellt bei 28°C Prüftemperatur und 1,592Hz Prüffrequenz.

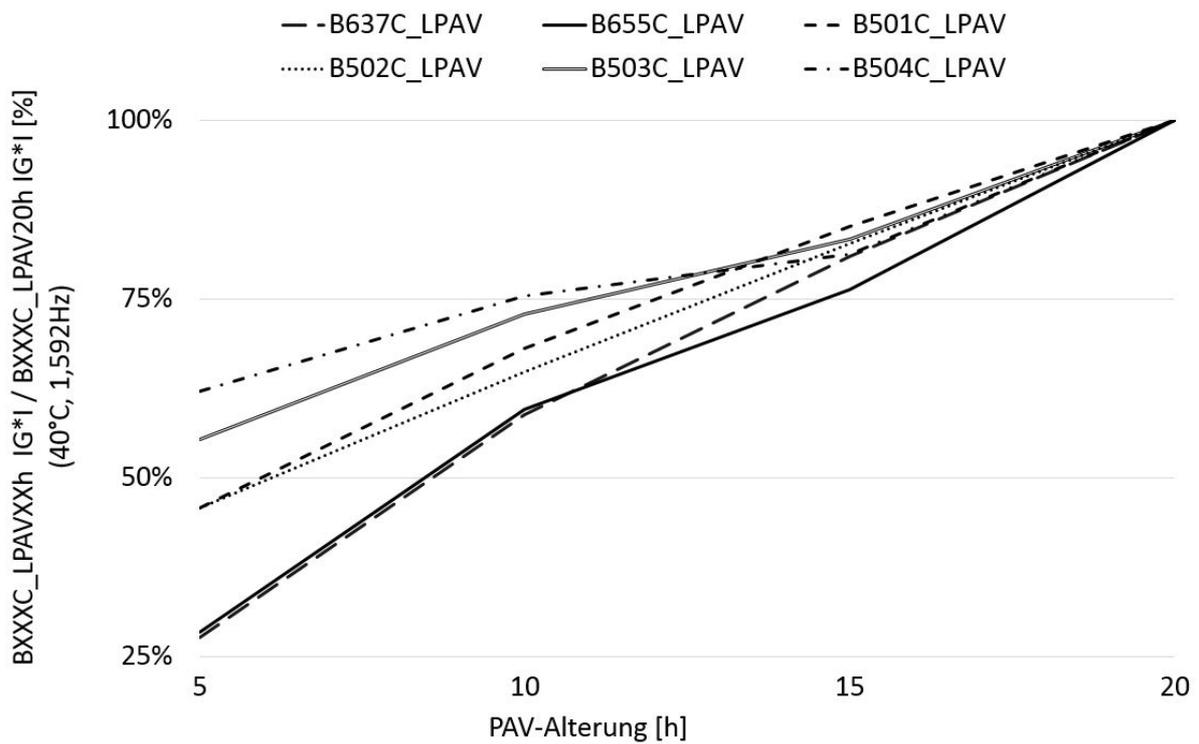


Abbildung 32 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 40°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXX_LPAVXXh IG*I / Referenz BXXXX_LPAV20h IG*I [%]

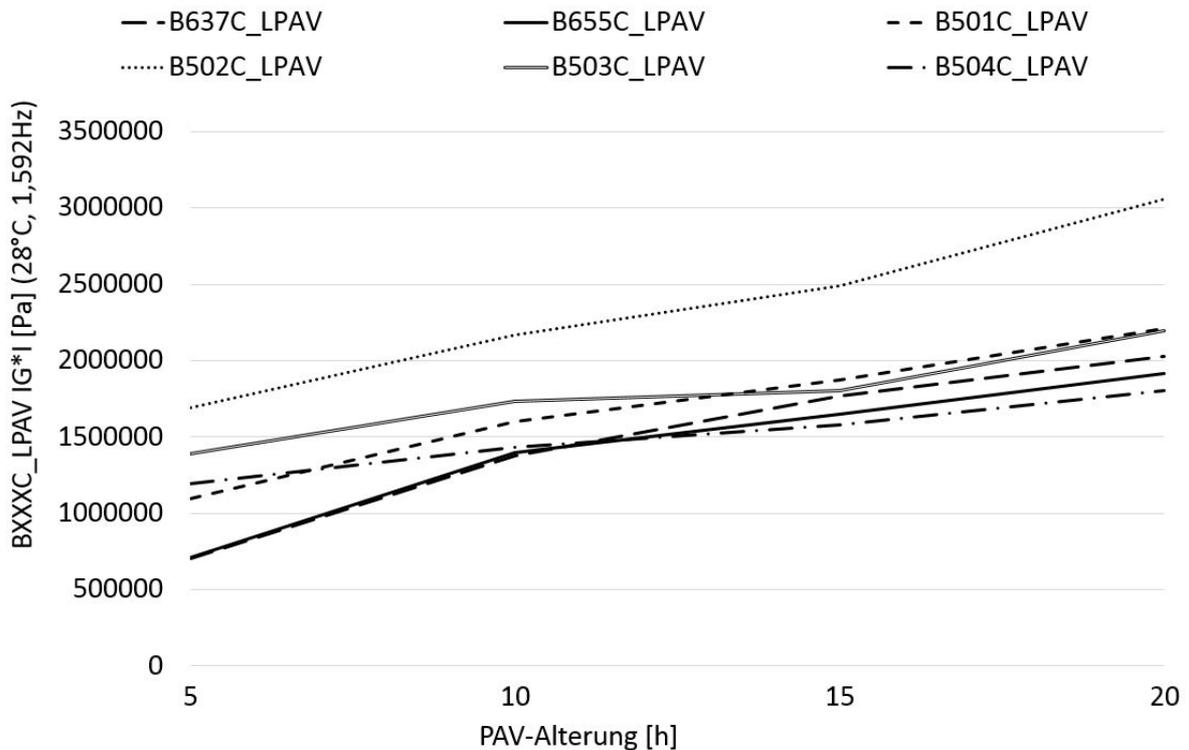


Abbildung 33 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 28°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXX_PAV5-20h gealterten Bitumen IG*I [Pa]

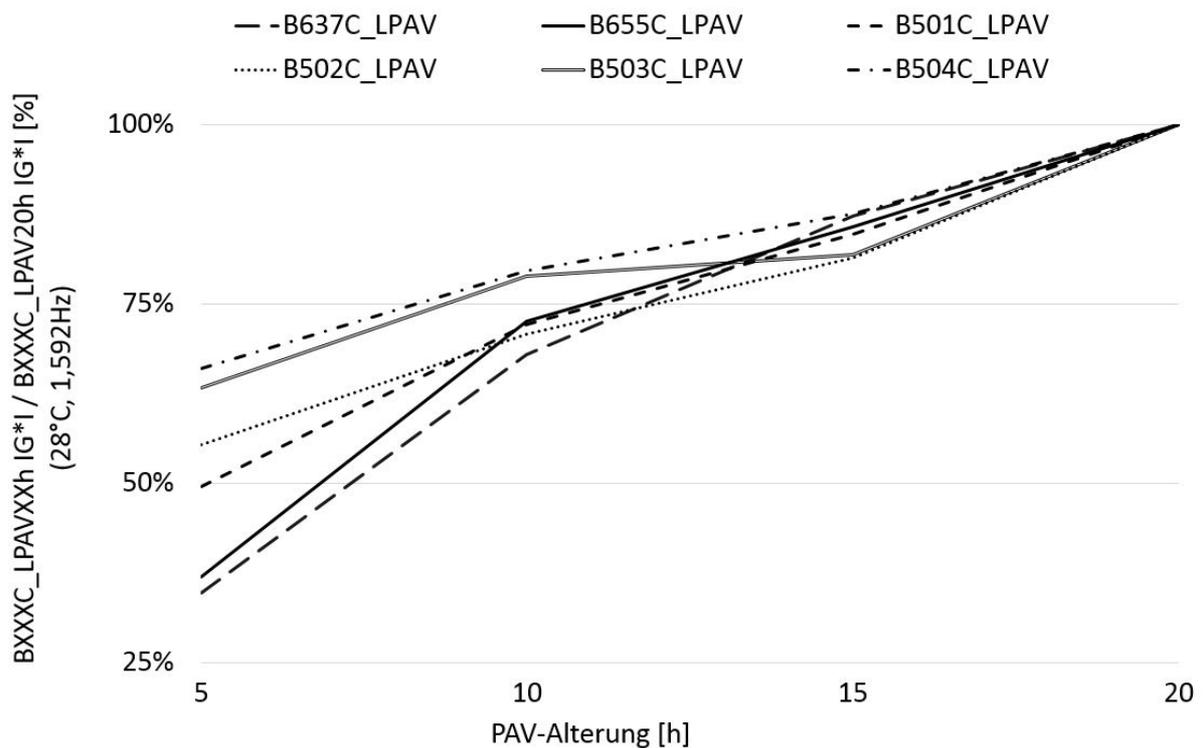


Abbildung 34 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 28°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXX_LPAVXXh IG*I / Referenz BXXXX_LPAV20h IG*I [%]

Auch in Abbildung 34 wurde als Referenz die jeweilige 20h PAV-Alterung gewählt. Der komplexe Schubmodul wurde relativ bezogen auf diese Referenz dargestellt. Dies ermöglicht eine bessere Betrachtung der Zwischenschritte 5, 10 und 15h PAV-gealtert. Die Verläufe sind dargestellt bei 28°C Prüftemperatur und 1,592Hz Prüffrequenz. Auch bei dieser Temperatur liegt bei 5h PAV-Alterung eine deutliche Streuung des Komplexen Schubmoduls bezogen auf die Referenz vor. Auch hier ist eine Signifikante Bündelung der Werte (5 – 15h PAV-gealtert) erkennbar. Die Verläufe verhalten sich, im Gegensatz zu den 40°C, doch etwas unterschiedlicher in ihrer Annäherung an ihr jeweiliges 20h PAV-Alterungsniveau.

Ebenfalls wurden unterschiedliche Prüffrequenzen betrachtet und ausgewertet. In Abbildung 35 bis Abbildung 38 sind exemplarisch die Verläufe bei 40°C bzw. 28°C Prüftemperatur und bei 10Hz Prüffrequenz dargestellt. Auch bei dieser Frequenz und den beiden Temperaturen liegt bei 5h PAV-Alterung eine deutliche Streuung des Komplexen Schubmoduls bezogen auf ihr jeweiliges 20h PAV-Alterungsniveau vor. Auch hier ist eine Signifikante Bündelung der Werte (5 – 15h PAV-gealtert) erkennbar.

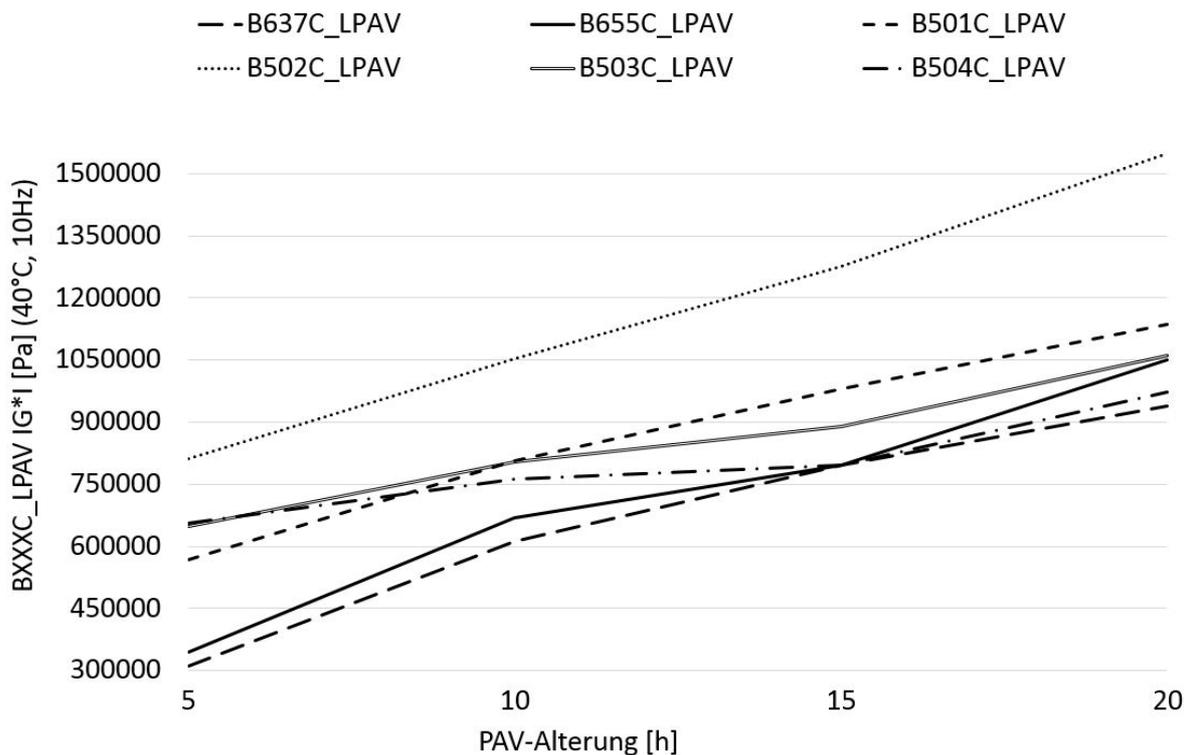


Abbildung 35 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 40°C bei 10 Hz, absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXC_PAV5-20h gealterten Bitumen IG**I* [Pa]

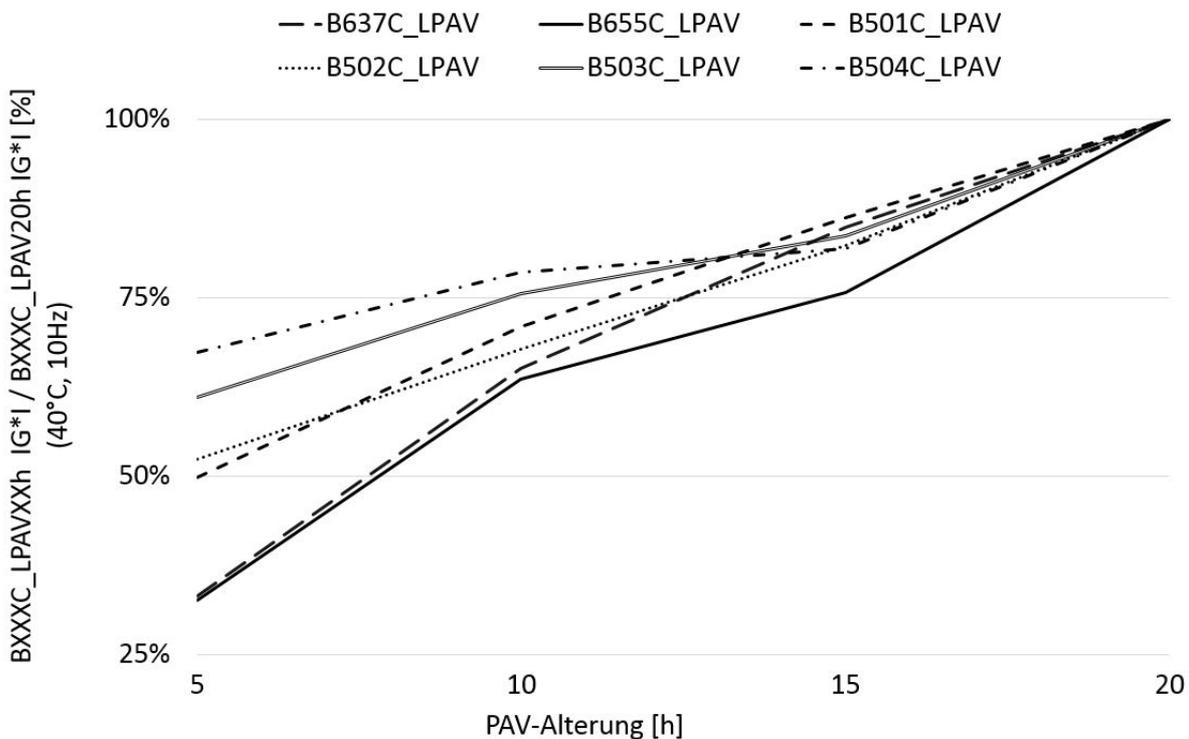


Abbildung 36 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 40°C bei 10 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXC_LPAVXXh IG**I* / Referenz BXXXC_LPAV20h IG**I* [%]

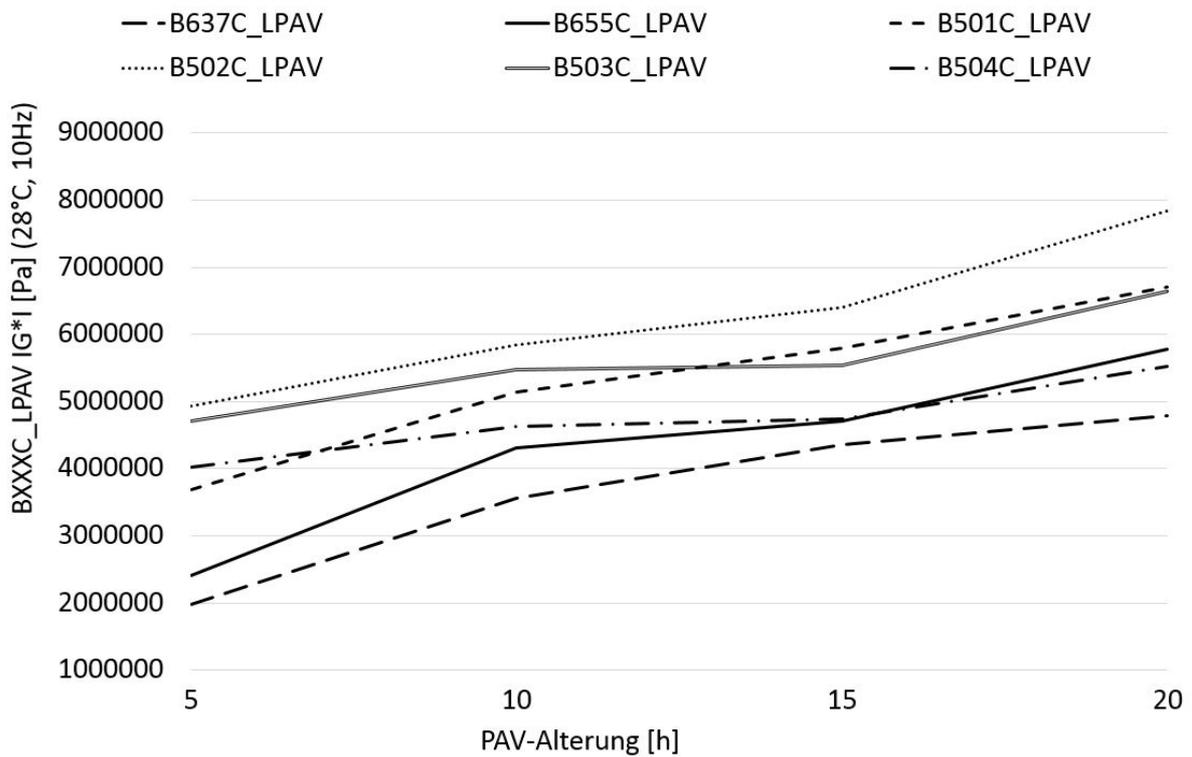


Abbildung 37 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 28°C bei 10 Hz, absolute Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXC_PAV5-20h gealterten Bitumen IG*I [Pa]

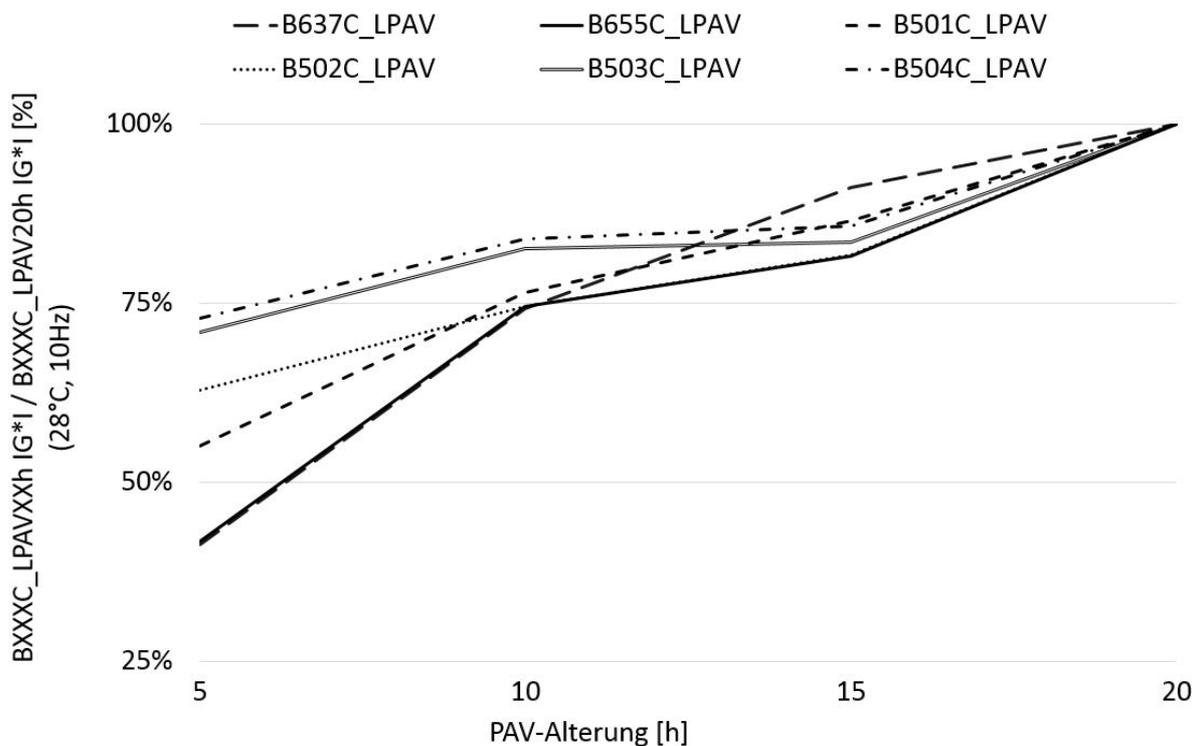


Abbildung 38 Verlauf der Langzeitalterung unterschiedlicher Bitumen, DSR 28°C bei 10 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der BXXXC_LPAVXXh IG*I / Referenz BXXXC_LPAV20h IG*I [%]

8 ABGRENZUNG THERMISCHER ALTERUNG VON OXIDATIVER ALTERUNG BEI LABOR ALTERUNGSMETHODEN

Wie in Kapitel 4.2.6 beschrieben wurden für dieses Prüfprogramm Probekörper mittels thermischer Alterung im Labor in Stickstoffatmosphäre langzeitgealtert. Ebenfalls wurde eine Langzeitalterung mittels Luft bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt. Hierbei wurden je 3 Probekörper in Marshall Formen bei verschiedenen Temperaturen im Wärmeschrank gealtert.

Die Grundidee lag in der Abgrenzung der thermischen Alterung von der oxidativen Alterung bei Labor Alterungsmethoden.

8.1 Materialien und Testmethoden

Tabelle 13 zeigt die verwendeten Bitumen.

Tabelle 13 Bitumenart

Bitumen Code	Bitumenart	Alterung
B637A	70/100	A (ungealtert)

Wie in Kapitel 4.1 beschrieben wurden die Probekörper mittels Gegenlaufzwangsmischer und Walzsegmentverdichter erstellt. Anschließend wurden die Probekörper aus den Platten gebohrt. In Tabelle 14 ist aufgelistet welcher Probekörper mit welcher Temperatur gealtert wurde.

Tabelle 14 Auflistung der Bitumenart, des Bitumencodes, des Laborcodes und der Temperatur der Langzeitalterung

Bitumenart	Bitumencode	Laborcode	Temperatur
70/100	B637A	B637C_Lluft_V3	135°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V4	135°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V5	135°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V6	60°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V7	60°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V8	60°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V9	85°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V10	85°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V11	85°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V12	110°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V13	110°C
70/100	B637A	B637C_Lluft_V14	110°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V1	60°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V2	60°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V3	60°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V4	135°C

70/100	B637A	B637C_LN2_V5	135°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V6	135°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V7*	85°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V8*	85°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V9*	85°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V10	110°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V11	110°C
70/100	B637A	B637C_LN2_V12	110°C

*Bei der Alterung von B637C_LN2_V7-V9 (85°C) wurde ein Problem der Stickstoffzufuhr erkannt. Die Daten wurden in diesem Kapitel verwendet und dementsprechend interpretiert.

In Tabelle 15 ist das verwendete Prüfprogramm dargestellt.

Tabelle 15 Prüfprogramm Abgrenzung thermischer von oxidativer Alterung

Messgerät	Messgeometrie	Spaltgröße	Prüf-temperatur	Prüf-frequenz	Laborcode	Proben-anzahl
MARS II	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	+4 - 40°C & +46-82°C	1,592Hz	B637A	2Stk
MARS II	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	+4 - 40°C & +46-82°C	1,592Hz	B637B_LRTF	2Stk
MARS II	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	+4 - 40°C & +46-82°C	1,592Hz	B637C_LPAV	2Stk
MARS II	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	+4 - 40°C & +46-82°C	1,592Hz	B637C_Lluft_V3-V14	24Stk
MARS II	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	+4 - 40°C & +46-82°C	1,592Hz	B637C_LN2_V1-V12	24Stk
MARS II	PP025	1,00mm	+46-82°C	1,592Hz	B637C_L000_V8*-V13	6Stk
					SUMME	60Stk

*Bei der Rückgewinnung von V8 gab es einen Probeverlust. V8 wird für dieses Kapitel anhand der Ergebnisse der sich gleich lange im Mischer befindenden Probenplatten abgeleitet. Wie im Kapitel 6. dargestellt, ist diese Herleitung der Daten durchaus legitim. Die Streuung der einzelnen Platten ist gering.

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurden die Proben für die Prüfung mittels DSR vorbereitet.

8.2 Ergebnisse & Interpretation

In Abbildung 39 ist eine relative Darstellung gegenüber der Referenz des komplexen Schubmoduls für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde das B637A-Frischbitumen gewählt. Es wurden das ungealterte Bitumen, das RTFOT-

kurzzeitgealterte Bitumen, das PAV-langzeitgealterte Bitumen und die mittels Luft bei unterschiedlichen Temperaturen langzeitgealterten Bitumen geprüft.

Es ist eine deutliche Signifikanz der mittels Luft langzeitgealterten Probekörper bei 135°C erkennbar. Die mittels Luft und bei 60°C langzeitgealterten Probekörper liegen knapp über dem RTFOT-kurzzeitgealtertem Niveau. Jeweils eine leichte Erhöhung des komplexen Schubmoduls gibt es bei 85°C und dann wieder bei den bei 110°C langzeitgealterten Probekörpern. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

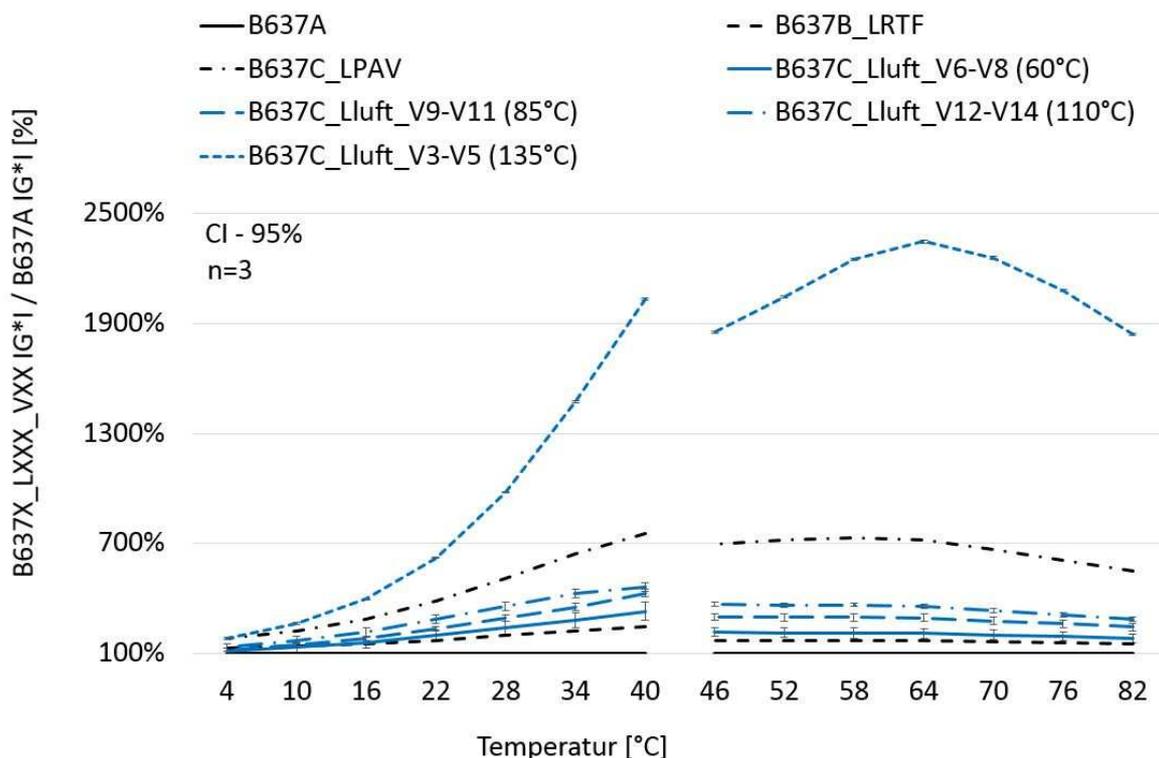


Abbildung 39 Langzeitalterung mittels Luft, DSR 4-82°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der Probekörper B637X_LXXX_VXX IG*I / Referenz B637A Bitumen IG*I [%]

In Abbildung 40 ist eine relative Darstellung gegenüber der Referenz des komplexen Schubmoduls für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde das B637A-Frischbitumen gewählt. Es wurden das ungealterte Bitumen, das RTFOT-kurzzeitgealterte Bitumen, das PAV-langzeitgealterte Bitumen und die mittels thermischer Alterung in Stickstoffatmosphäre bei unterschiedlichen Temperaturen langzeitgealterten Bitumen geprüft. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

Bei der thermischen Alterung in Stickstoffatmosphäre mit 85°C ist ein Problem bei der Stickstoffzufuhr aufgetreten. Diese Linie muss ausgeklammert werden, da sie sich aufgrund des fehlenden Stickstoffes annähernd gleich verhält wie die Alterung mittels Luft. Die Alterung bei 60 und 110°C ist annähernd im gleichen Bereich, welche sich knapp über dem kurzzeitgealtertem RTFOT-Bitumen befindet. Die Linie

der thermischen Alterung in Stickstoffatmosphäre mit 135°C befindet sich über den Linien der restlichen Temperaturen.

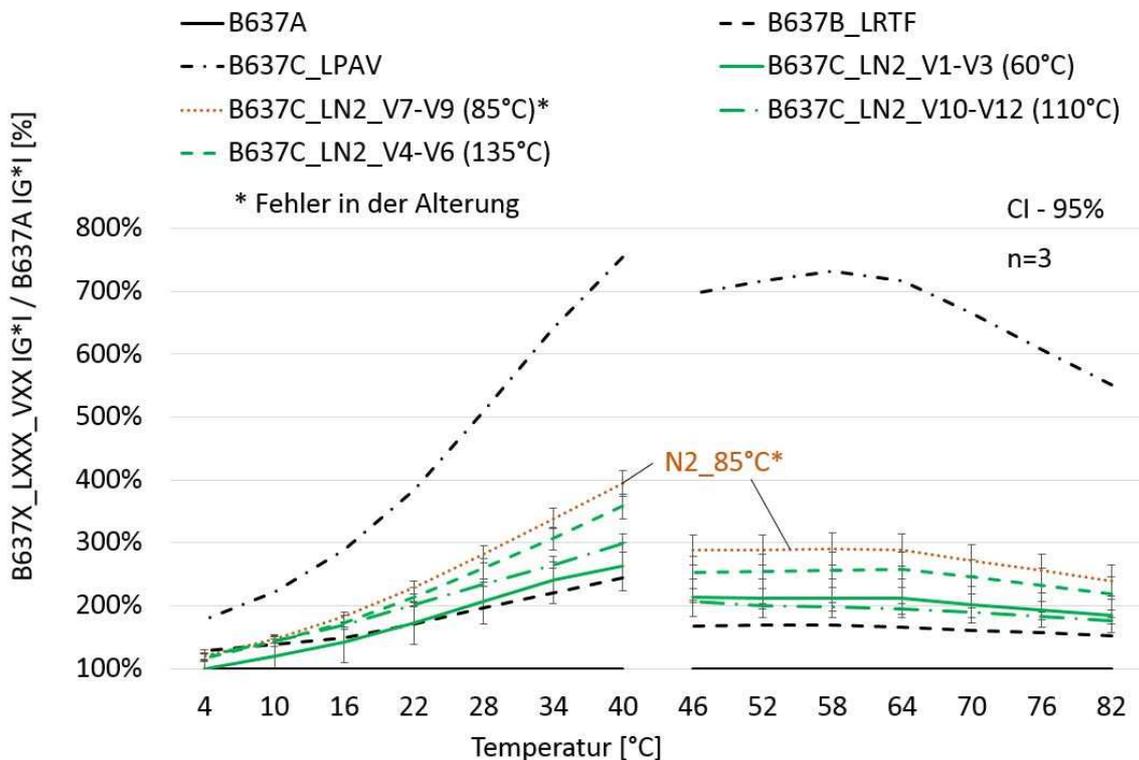


Abbildung 40 Langzeitalterung in Stickstoffatmosphäre, DSR 4-82°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der Probekörper B637X_LXXX_VXX IG* / Referenz B637A Bitumen IG* [%]

Um eine bessere Darstellung des für den Grenzwert der thermischen Alterung relevanten Bereichs zu bekommen, wurde das mittels Luft bei 135°C langzeitgealterte Bitumen und das PAV-gealterte Bitumen ausgeklammert. In Abbildung 41 ist eine relative Darstellung gegenüber der Referenz des komplexen Schubmoduls für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde das B637A-Frischbitumen gewählt. Es werden sowohl die mittels Luft langzeitgealterten als auch die in Stickstoffatmosphäre langzeitgealterten Bitumen abgebildet. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

Die 3 Linien der mittels Luft langzeitgealterten Bitumen (60, 85 und 110°C), zeigen eine Erhöhung des komplexen Schubmoduls abhängig von der Temperatur. Bei 60°C eine geringe (ca. 210% des ungealterten Bitumen), bei 85°C eine mittlere (ca. 290% des ungealterten Bitumen) und bei 110°C eine starke (ca. 370% des ungealterten Bitumen) Langzeitalterung. Das bei 85°C und in Stickstoffatmosphäre gealterte Bitumen ist wieder auszuklammern, da die Stickstoffzufuhr nicht über die komplette Alterungsdauer gewährleistet war. Aufgrund dessen sind die Alterung mit Luft bei 85°C und die Alterung in Stickstoffatmosphäre bei 85°C annähernd ident. Bei den restlichen 3 Linien der in Stickstoffatmosphäre gealterten Bitumen, ist die oxidative Alterung aufgrund der Stickstoffatmosphäre verhindert worden. Die beiden

Linien der bei 60°C und 110°C langzeitgealterten Bitumen liegen annähernd im selben Bereich und weisen eine geringe Erhöhung des komplexen Schubmoduls auf. Allein die Alterung bei 135°C zeigt eine größere Erhöhung des komplexen Schubmoduls auf ca. 200% des ungealterten Bitumen.

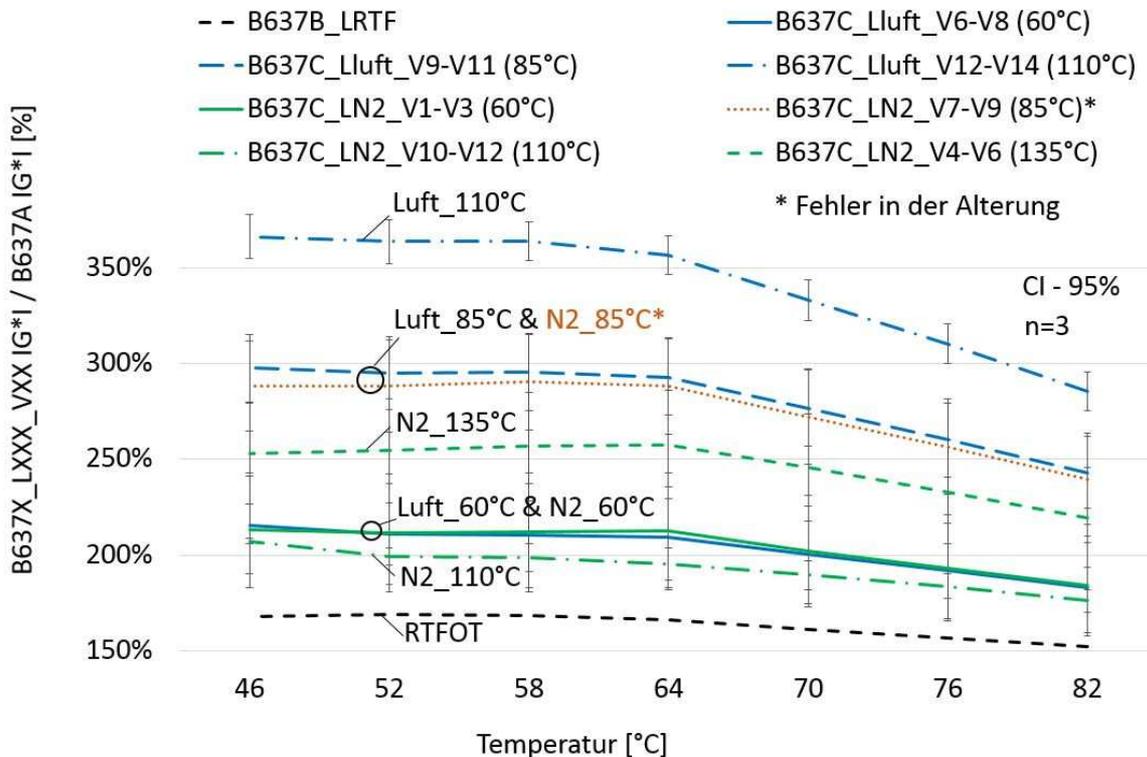


Abbildung 41 Langzeitalterung mittels Luft bzw. in Stickstoffatmosphäre, DSR 46-82°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung der Probekörper B637X_LXXX_VX IG* / Referenz B637A Bitumen IG* [%]

In Abbildung 42 ist eine relative Darstellung gegenüber der Referenz des komplexen Schubmoduls für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde hier die jeweils zu den Probekörpern passende Probeplatte gewählt. Dies soll den Einfluss und der damit verbundenen Schwankung der Bitumeneigenschaften aufgrund der Plattenherstellung (Kapitel 6) ausgleichen. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

Die Linien der in Stickstoffatmosphäre gealterten Proben liegen bei ca. 105 – 130% der dazu passenden kurzzeitgealterten Probeplatten. Dies zeigt, dass unter Stickstoffatmosphäre die oxidative Alterung verhindert wird und nur eine geringe thermische Alterung stattfindet. Das bei 85°C und in Stickstoffatmosphäre gealterte Bitumen ist wieder auszuklammern, da die Stickstoffzufuhr nicht über die komplette Alterungsdauer gewährleistet war. Aufgrund dessen sind die Alterung mit Luft bei 85°C und die Alterung in Stickstoffatmosphäre bei 85°C annähernd ident.

Exemplarisch sind in Abbildung 42 der thermische und der oxidative Anteil der Alterung mittels Luft bei 110°C dargestellt. Da die oxidative Alterung bei den in Stickstoffatmosphäre langzeitgealterten Proben nahezu nicht stattfindet, kann das

Niveau der N2_110°C Proben als thermischer Anteil der Langzeitalterung von Luft_110°C angesehen werden. Dieses Niveau liegt ca. bei 125% der dazu passenden Probepplatten. Der Bereich von ca. 125% - ca. 245% entspricht der oxidativen Alterung der mittels Luft bei 110°C gealterten Probekörper. Da die beiden Linien der Probekörper Luft_60°C und N2_60°C nahezu ident sind, findet dort größtenteils eine rein thermische Alterung statt.

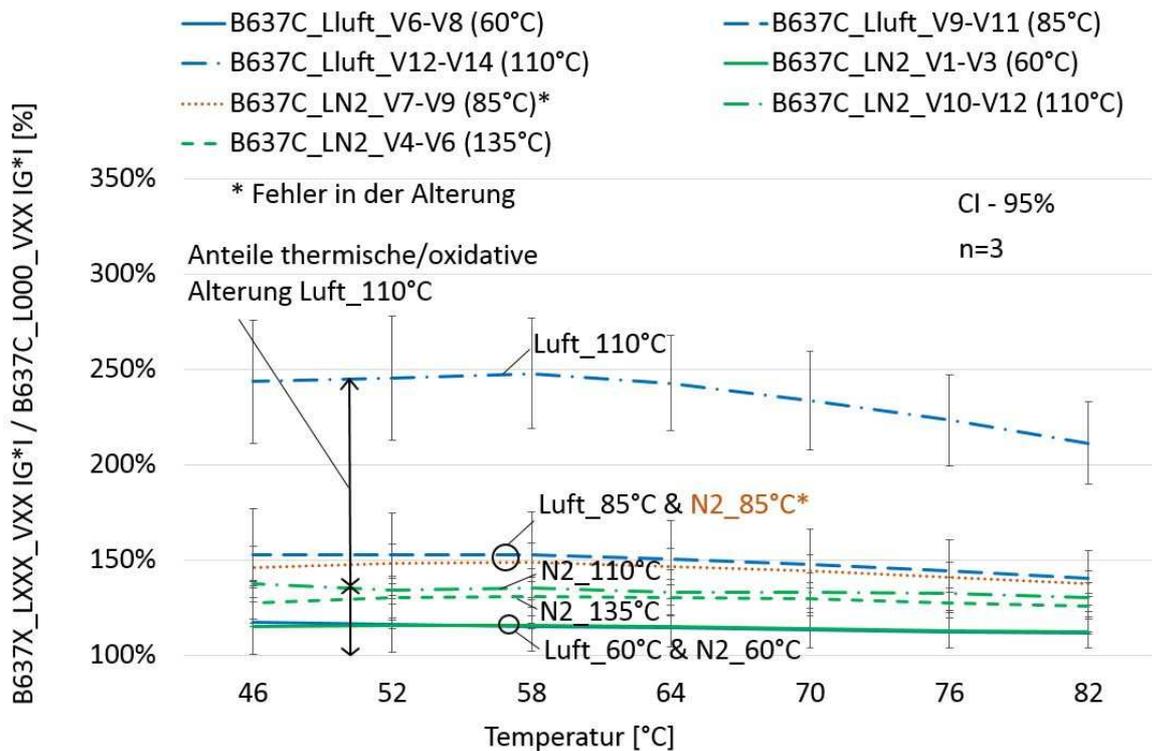


Abbildung 42 Langzeitalterung mittels Luft bzw. in Stickstoffatmosphäre, DSR 46-82°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung der Probekörper B637X_LXXX_VXX IG*1 / Referenz C_L000_VXX IG*1 [%]

Ähnlich verhält es sich bei der Betrachtung des Phasenverschiebungswinkels. In Abbildung 43 ist eine absolute Darstellung der Differenz gegenüber der Referenz des Phasenverschiebungswinkels für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde das B637A-Frischbitumen gewählt. Es werden sowohl die mittels Luft langzeitgealterten als auch die in Stickstoffatmosphäre langzeitgealterten Bitumen abgebildet.

Die 4 Linien der mittels Luft bei 60, 85, 110 und 135°C langzeitgealterten Proben, zeigen jeweils eine Verringerung des Phasenverschiebungswinkels beginnend mit der kleinsten Verringerung bei 60°C (ca. -2,4 - -8,0°), bei 85°C (ca. -3,1 - -10,3°), bei 110°C (ca. -3,7 - -12,0°) und die im Verhältnis zu den restlichen 3 Linien sehr stark langzeitgealterten 135°C (ca. -14,0 - -XX). Die Linie der mittels Luft bei 135°C langzeitgealterten Probe wird nur im Ansatz angezeigt um für die restlichen Linien eine bessere Darstellung zu bekommen. Das bei 85°C und in Stickstoffatmosphäre gealterte Bitumen ist wieder auszuklammern, da die Stickstoffzufuhr nicht über die

komplette Alterungsdauer gewährleistet war. Aufgrund dessen sind die Alterung mit Luft bei 85°C und die Alterung in Stickstoffatmosphäre bei 85°C annähernd ident. Die 2 Linien der in Stickstoffatmosphäre bei 60 und 110°C langzeitgealterten Proben sind annähernd im selben Bereich und zeigen eine geringe Reduktion des Phasenverschiebungswinkels. Allein die Alterung in Stickstoffatmosphäre bei 135°C zeigt eine größere Erhöhung des Phasenverschiebungswinkels auf ca. -3,0 - -9,1°.

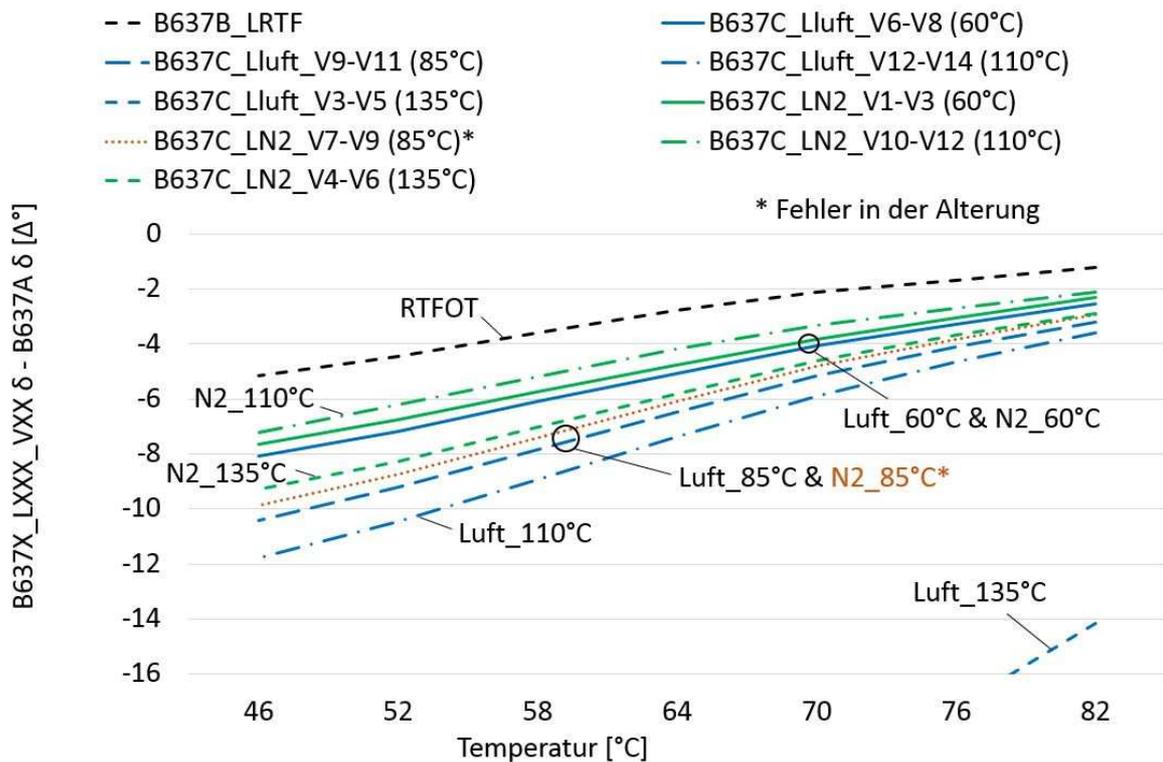


Abbildung 43 Langzeitalterung mittels Luft bzw. in Stickstoffatmosphäre, DSR 46-82°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Probekörper B637X_LXXX_VXX δ - Referenz B637A Bitumen δ [Δ°]

In Abbildung 44 ist eine absolute Darstellung der Differenz gegenüber der Referenz des Phasenverschiebungswinkels für die geprüften Proben abgebildet. Als Referenz wurde hier die jeweils zu den Probekörpern passende Probeplatte gewählt. Dies soll den Einfluss und der damit verbundenen Schwankung der Bitumeneigenschaften aufgrund der Plattenherstellung (Kapitel 6) ausgleichen.

Da die beiden Proben Luft_60°C und N2_60°C nahezu ident sind, findet dort größtenteils eine rein thermische Alterung statt. Auch die beiden Linien der in Stickstoffatmosphäre bei 110 und 135°C langzeitgealterten Proben liegen annähernd gleich auf und weisen eine geringe Reduktion des Phasenverschiebungswinkels auf. Das bei 85°C und in Stickstoffatmosphäre gealterte Bitumen ist wieder auszuklammern, da die Stickstoffzufuhr nicht über die komplette Alterungsdauer gewährleistet war. Aufgrund dessen sind die Alterung mit Luft bei 85°C und die Alterung in Stickstoffatmosphäre bei 85°C annähernd ident. Die 3 Linien der mittels Luft bei 60, 85 und 110°C langzeitgealterten Proben, zeigen jeweils eine Verringerung des Phasenverschiebungswinkels beginnend mit der kleinsten

Verringerung bei 60°C (ca. -0,5 - -1,0°), bei 85°C (ca. -1,1 - -2,9°) und bei 110°C (ca. -2,2 - -6,8°).

Exemplarisch sind in Abbildung 44 der thermische und der oxidative Anteil der Alterung mittels Luft bei 110°C dargestellt. Da die oxidative Alterung bei den in Stickstoffatmosphäre langzeitgealterten Proben nahezu nicht stattfindet, kann das Niveau der N2_110°C Proben als thermischer Anteil der Langzeitalterung von Luft_110°C angesehen werden. Dieses Niveau liegt ca. bei -0,8 - -2,2° der dazu passenden Probekörpern. Der Bereich von ca. -0,8 - -2,2° bis ca. -2,2 - -6,8° entspricht der oxidativen Alterung des mittels Luft bei 110°C gealterten Probekörpers.

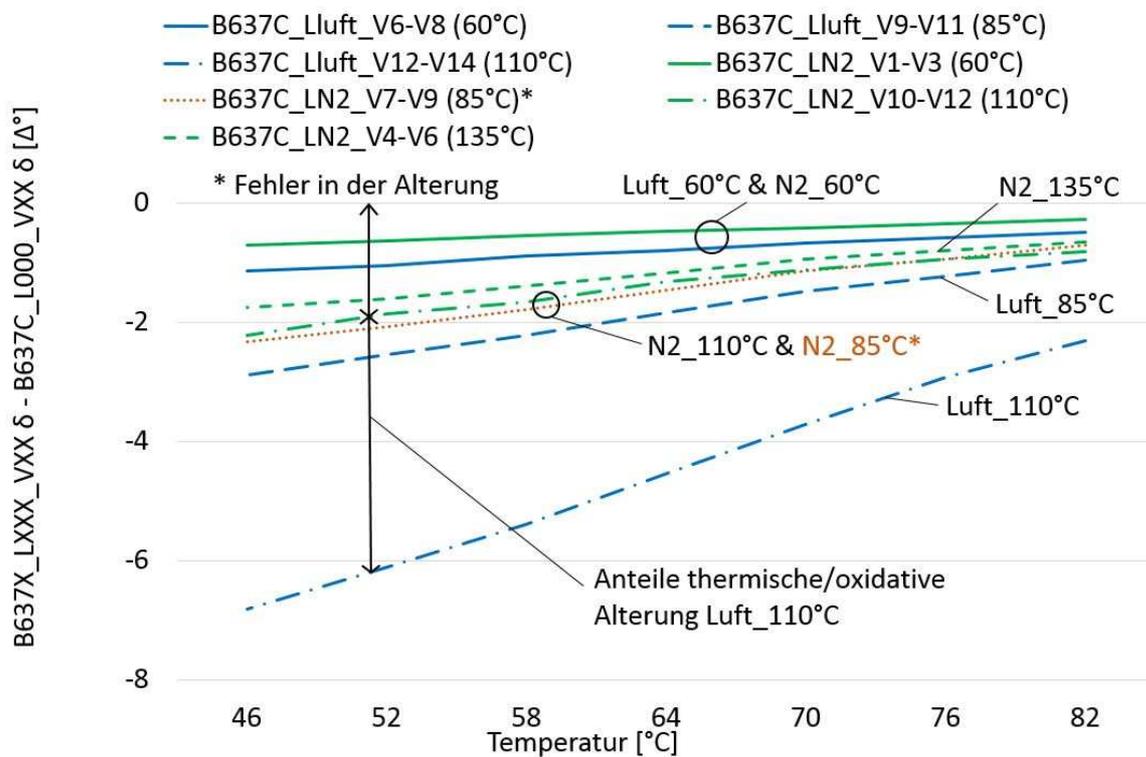


Abbildung 44 Langzeitalterung mittels Luft bzw. in Stickstoffatmosphäre, DSR 46-82°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Probekörper B637X_LXXX_VXX δ - Referenz C_L000_VXX δ [Δ°]

9 VAPRO-PARAMETERSTUDIE GASE

Wie in Kapitel 4.2.5 bereits beschrieben ist die Grundidee hinter VAPro-Viennese Ageing Procedure, dass eine Möglichkeit geschaffen wird Asphaltkörper im Labor realistisch nahe zu altern.

Grundsätzlich wird für diese Methode eine mittels Ozon + Stickoxid angereicherte Druckluft verwendet. Die Frage ist nun ob auch andere Gase dafür in Frage kommen.

9.1 Materialien und Testmethoden

Tabelle 16 zeigt das verwendete Bitumen.

Tabelle 16 Bitumenart

Bitumen Code	Bitumenart	Alterung
B637A	70/100	A (ungealtert)

Das B637A Bitumen bildet die Grundlage des Versuchs und wurde für die Plattenherstellung verwendet. Aus den Probepplatten wurden die Probekörper gebohrt. In Tabelle 17 sind die verwendeten Medien der Langzeitalterung und die dazu gewählten Laborcodes abgebildet.

Tabelle 17 Medium und Laborcode für Langzeitalterung

Medium	Laborcode
Druckluft	B637C_Lluft
Technischer Sauerstoff	B637C_LO2
Ozonangereicherter technischer Sauerstoff (Ozongenerator)	B637C_LO3
Ozon + Stickoxid angereicherte Druckluft (Ozongenerator, VAPro)	B637C_LO3air

Für die Prüfungen, welche in dieser Arbeit beschrieben werden, muss das Bitumen des Asphaltprobekörpers rückgewonnen werden. Der Ablauf dazu ist in Kapitel 4.2.1 beschrieben. Das rückgewonnene Bitumen kann nun auf dessen rheologische Eigenschaften untersucht werden. Die Prüfungen wurden mittels DSR durchgeführt. In Tabelle 18 ist das verwendete Prüfprogramm abgebildet.

Tabelle 18 Prüfprogramm VAPro-Parameterstudie Gase

Messgerät	Mess- geometrie	Spalt- größe	Prüf- temperatur	Prüf- frequenz	Laborcode	Probenanzahl
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637A	2Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637B_LRTF	2Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637C_LPAV	2Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637C_Lluft V1-V2	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637C_LO2 V1- V2	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637C_LO3 V1- V2	4Stk
Anton Paar MCR 302	PP08 & PP025	2,00 & 1,00mm	-8 - 40°C & +40-82°C	1,592Hz	B637C_LO3air V1-V2	4Stk
SUMME						22Stk

Wie in Kapitel 5.1 beschrieben wurden die Proben für die Prüfung mittels DSR vorbereitet.

9.2 Ergebnisse & Interpretation

In Abbildung 45 ist der komplexe Schubmodul der geprüften Probekörper relativ dargestellt. Als Referenz wurde das B637A Bitumen verwendet um die Alterungsschritte zwischen ungealtert, kurzzeitgealtert und langzeitgealtert zu verdeutlichen.

Bei 100% ist das B637A Bitumen abgebildet. Direkt darüber liegt das RTFOT-gealterte Bitumen. Die Alterungen mit Druckluft und technischen Sauerstoff befinden sich annähernd im selben Bereich, welcher sich etwas über dem kurzzeitgealterten RTFOT-Bitumen befinden. Direkt darüber liegt die Linie der mittels ozonangereichertem technischen Sauerstoff langzeitgealterten Proben. Deutlich zu erkennen ist, dass die Kurve der mittels Ozon + Stickoxid angereicherter Druckluft gealterten Proben sich ähnlich verhält wie die der PAV-gealterten. D.h. die oxidative Alterung mittels O3air (VAPro) entspricht annähernd der Alterung mittels PAV.

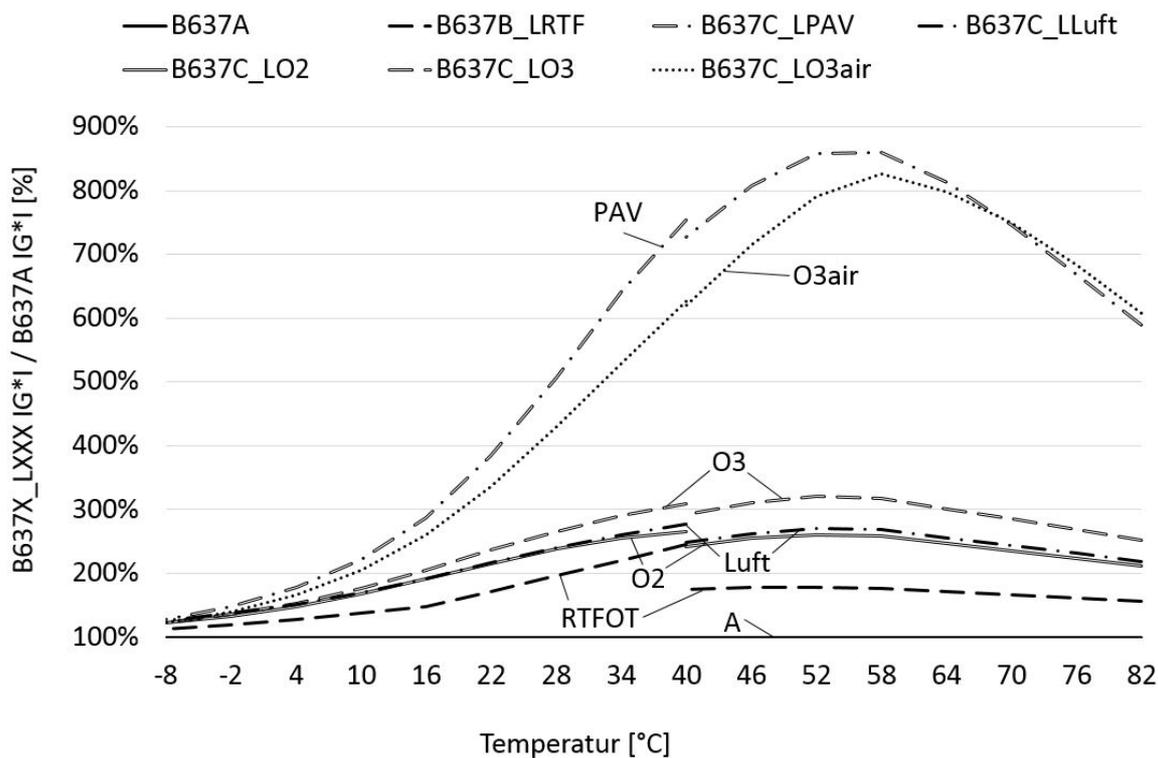


Abbildung 45 Langzeitalterung mittels unterschiedlicher Gase, DSR -8-82°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der Probekörper B637X_LXXX IG*I / Referenz B637A IG*I [%]

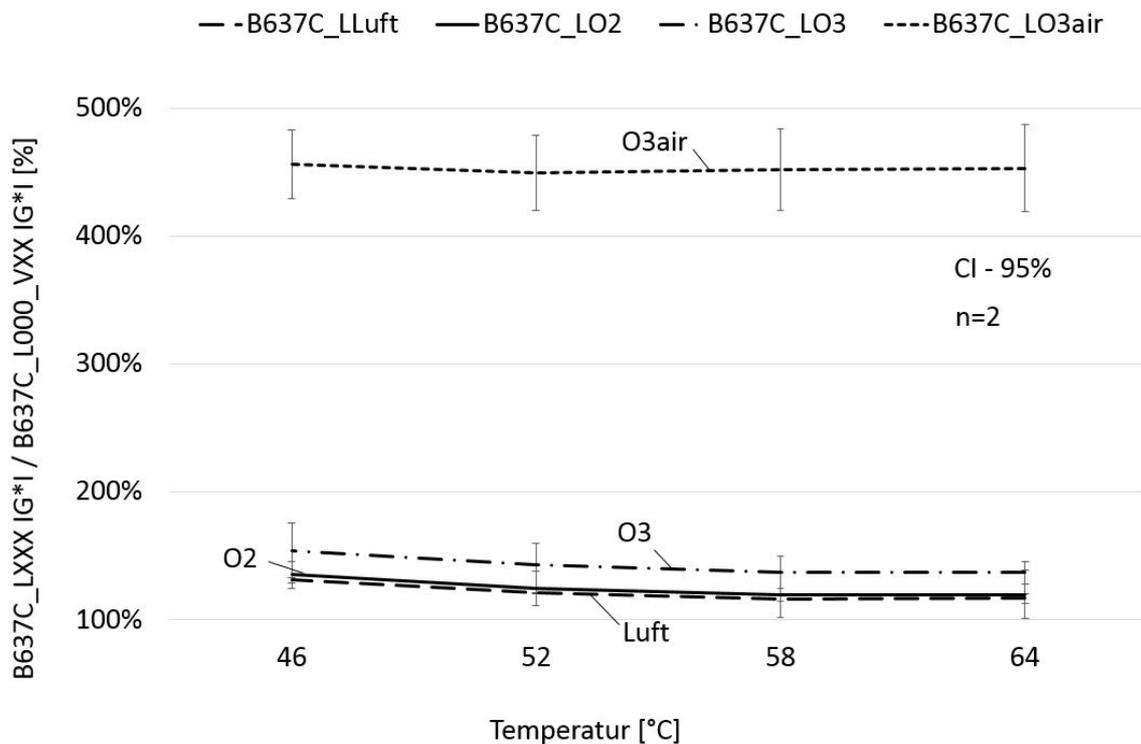


Abbildung 46 Langzeitalterung mittels unterschiedlicher Gase, DSR 46-64°C bei 1,59 Hz, relative Darstellung des komplexen Schubmoduls der Probekörper B637C_LXXX IG*I / Referenz B637C_L000_VXX IG*I [%]

In Abbildung 46 ist der komplexe Schubmodul relativ bezogen auf die gewählte Referenz dargestellt. Als Referenz wurden die jeweils zu den Probekörpern passenden Probepplatten verwendet. Diese Referenz ermöglicht eine Darstellung der Veränderung, welche durch die Langzeitalterung mittels Gase stattfindet, ohne Einfluss der Plattenherstellung. D.h. die reine Veränderung ist somit dargestellt ohne Einflüsse der Plattenherstellung und die damit verbundene Schwankung der Bitumeneigenschaften. Auch hier ist die oxidative Alterung mittels O3air (VAPro), gegenüber den restlichen Gasen, deutlich sichtbar. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

Abbildung 47 und Abbildung 48 zeigen die Entwicklung des Phasenverschiebungswinkels aufgrund der Alterung mittels der unterschiedlichen Gase. Abbildung 47 zeigt eine absolute Darstellung der Differenz des Phasenverschiebungswinkels gegenüber der Referenz B637A Bitumen. Direkt unter dem ungealterten B637A Frischbitumen liegt das RTFOT-gealterte Bitumen. Die Alterungen mit Druckluft und technischen Sauerstoff befinden sich annähernd im selben Bereich, welcher sich etwas unter dem kurzzeitgealterten RTFOT-Bitumen befinden. Direkt darunter liegt die Linie der mittels ozonangereicherter technischen Sauerstoff langzeitgealterten Proben. Deutlich zu erkennen ist, dass die Kurve der mittels Ozon + Stickoxid angereicherter Druckluft gealterten Proben sich ähnlich verhält wie die der PAV-gealterten. D.h. die oxidative Alterung mittels O3air (VAPro) entspricht annähernd der Alterung mittels PAV.

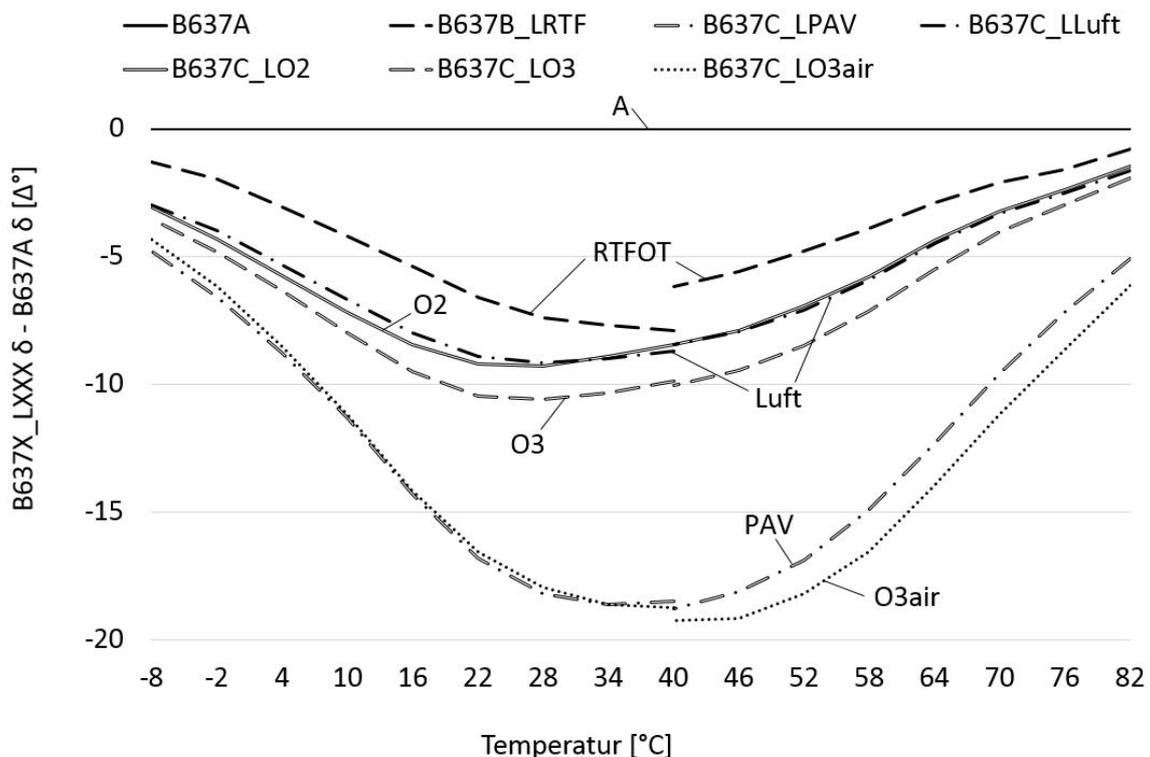


Abbildung 47 Langzeitalterung mittels unterschiedlicher Gase, DSR -8-82°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Differenz des Phasenverschiebungswinkels der Probekörper B637X_LXXX δ - Referenz B637A δ [Δ°]

In Abbildung 48 ist die Differenz des Phasenverschiebungswinkels gegenüber der Referenz dargestellt. Als Referenz wurden die jeweils zu den Probekörpern passenden Probekörperplatten verwendet. Dieses ermöglicht eine Darstellung der Veränderung, welche durch die Langzeitalterung mittels Gase stattfindet, ohne Einfluss der Plattenherstellung. D.h. die reine Veränderung ist somit dargestellt ohne Einflüsse der Plattenherstellung und die damit verbundene Schwankung der Bitumeneigenschaften. Die Streuung ist mittels 95%-Konfidenzintervall dargestellt.

Die Alterungen mit Druckluft und technischen Sauerstoff befinden sich annähernd im selben Bereich. Direkt darunter liegt die Linie der mittels ozonangereichertem technischen Sauerstoff langzeitgealterten Proben. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Kurve der mittels Ozon + Stickoxid angereicherter Druckluft gealterten Proben von den restlichen Proben unterscheidet und damit eine wesentlich stärkere Langzeitalterung aufweist.

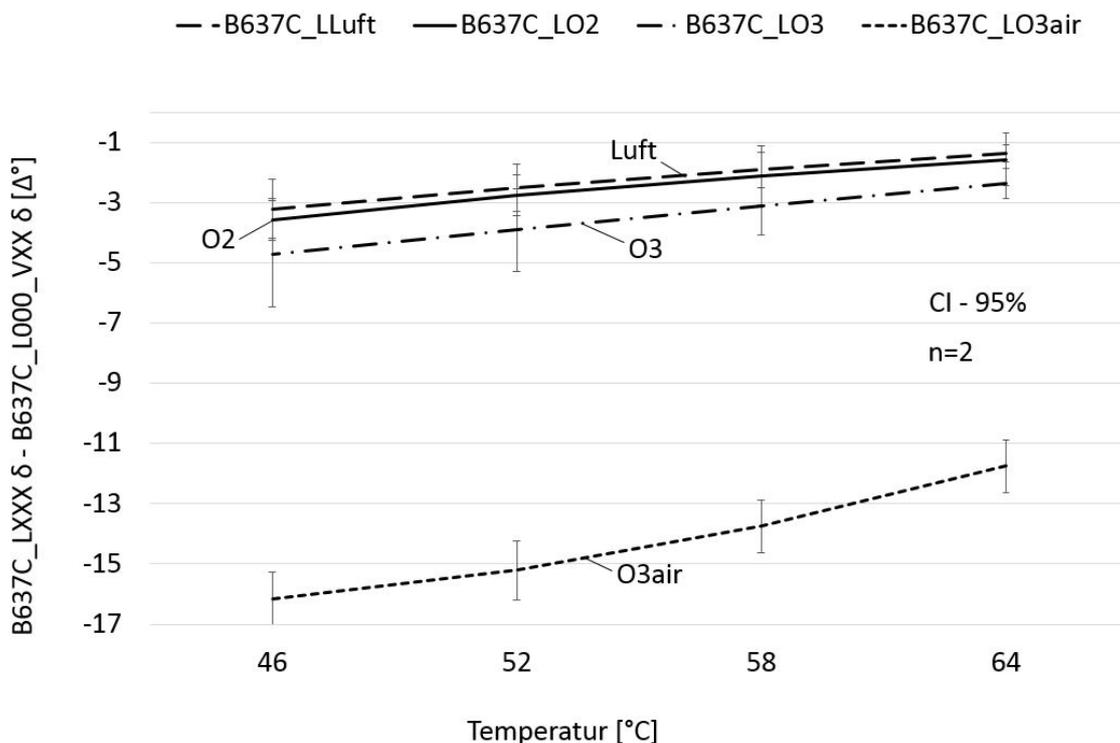


Abbildung 48 Langzeitalterung mittels unterschiedlicher Gase, DSR 46-64°C bei 1,59 Hz, absolute Darstellung der Differenz des Phasenverschiebungswinkels der Probekörper B637CLXXX δ - Referenz B637C_L000_VXX δ [Δ°]

Die Langzeitalterung mittels Ozon + Stickoxid angereicherter Druckluft hat eine ähnliche Intensität wie die des PAV langzeitgealterten Bitumens. Die restlichen verwendeten Gase zeigen nicht dieselbe und damit eine deutlich geringere Intensität der Langzeitalterung auf den Asphaltprobekörper.

10 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Um die Lebensdauer von Asphalt beurteilen zu können, muss man die Veränderung der Eigenschaften über die Zeit kennen. Diese Veränderung ist entweder durch eine langjährige Beobachtung der Straßen über 5 – 10 Jahre möglich oder durch unterschiedliche Methoden zeitraffend im Labor simulierbar.

Zu diesem Zweck wurden diverse Prüfprogramme mit unterschiedlich gealterten Bitumen durchgeführt. Besonderes Augenmerk lag in der Erkennung der Verläufe von ungealterten über kurzzeitgealterten bis hin zu langzeitgealterten Bitumen. Speziell für die Langzeitalterung wurden neue bzw. optimierte Methoden angewandt und auf die somit veränderten Eigenschaften geprüft.

Die folgenden Fragestellungen wurden behandelt:

- Wie groß ist die Streuung der mechanischen Eigenschaften von Bitumen im ungealterten Anlieferungszustand? (Kapitel 5)

Ziel war es, die Unterschiede von ungealtertem Bitumen gleicher Chargen zu überprüfen. Bitumen ist ein Naturprodukt und deshalb immer mit gewissen Streuungen in der Zusammensetzung behaftet. Jene Unterschiede gab es zu beleuchten und die damit verbundene Streuung einzelner Kübel gleicher Charge zu ermitteln. Es wurden 2 Bitumen unterschiedlicher Herkunft ausgewählt. Daraus wurden je 10 unterschiedliche Kübel für eine Prüfung der rheologischen Eigenschaften des Bitumens mittels DSR gewählt. Das Prüfprogramm umfasst 20 DSR-Prüfungen.

Aufgrund der erlangten Bitumeneigenschaften der 2 unterschiedlichen Bitumen und dem Vergleich dieser mittels 95%-Konfidenzintervall des jeweiligen Mittelwerts (10,6% Streuung bei B637 bzw. 12,6% bei B655) kann die Streuung der mechanischen Eigenschaften von Bitumen im ungealterten Anlieferungszustand als gering beurteilt werden.

Mehrere Faktoren können auf diese geringe Streuung der mechanischen Eigenschaften Einfluss nehmen. Eine mögliche Abweichung innerhalb einer Chargenproduktion könnte einen gewissen Teil zur Streuung der Ergebnisse beitragen. Auch eventuelle geringfügige Unterschiede in der Probekörperherstellung im Labor wären eine Möglichkeit minimale Unterschiede zu bewirken. Eine weitere Möglichkeit die Streuung zu beeinflussen, könnte die Wiederholbarkeit der Prüfeinrichtung bzw. der Versuche sein. Um diese Möglichkeiten beurteilen zu können sind weiterführende Prüfungen notwendig. Eine Variante wäre, das Bitumen eines Kübels öfters mittels DSR zu prüfen und die Ergebnisse dann zu vergleichen.

- Wie groß ist der Einfluss der Kurzzeitalterung bei der Plattenherstellung im Labor? (Kapitel 6)

Da aus den Probepplatten die Probekörper für eine Langzeitalterung gebohrt werden, ist die Vergleichbarkeit jener Probepplatten zu untersuchen. An 5 Herstellungstagen wurden die Probepplatten mit unterschiedlichen Mischzeiten erstellt. Das Bitumen wurde aus den Platten rückgewonnen und mittels DSR auf dessen rheologische Eigenschaften geprüft. Das Prüfprogramm umfasst 21 DSR Prüfungen.

Der Einfluss der Kurzzeitalterung im Labor aufgrund der Plattenherstellung ist durch einen Schwankungsbereich des komplexen Schubmoduls von ca. 80% - 135% des RTFOT-Alterungsniveaus (DSR Prüfung bei +46-+64°C, 1,59 Hz) als groß zu beurteilen. Dieser entspricht absolut gesehen ca. 1500Pa. Aufgrund der Ergebnisse wurden deutliche Unterschiede der mechanischen Eigenschaften der im Labor kurzzeitgealterten Probepplatten festgestellt.

Jener Schwankungsbereich ist für die Prüfungen der aus den Probepplatten ausgebohrten Probekörpern von großer Relevanz. Mittels Referenzierung der Probekörper auf die jeweils passenden Probepplatten kann das Problem der Streuung der Ergebnisse, aufgrund der Unterschiede in der Plattenherstellung, gelöst werden.

- Wie gestaltet sich der Alterungsverlauf während der Labor-Langzeitalterung (PAV)? (Kapitel 7)

Die Grundidee hinter dieser Fragestellung ist, die Verläufe der Alterung auch in den zwischenliegenden Alterungsniveaus zu erfahren. Speziell im Bereich der PAV Alterung ist uns nur das Startniveau und das Endniveau bekannt.

Ausgangslage sind ungealterte Bitumen welche zuerst mit dem RTFOT-Verfahren kurzzeitgealtert wurden und dann mit dem PAV-Verfahren langzeitgealtert. Die Dauer der Langzeitalterung wurde allerdings auf 4 unterschiedliche Zeiträume aufgeteilt um das zwischenzeitliche Alterungsniveau zu erfahren. Die Schritte mit 5, 10 und 15 Stunden wurden eingefügt und die für das PAV-Verfahren üblichen 20 Stunden ergeben einen Verlauf von kurzzeitgealtert bis langzeitgealtert. Jeweils nach der gewünschten Dauer wurde der PAV abgebrochen, um es in späterer Folge mittels DSR prüfen zu können. Das Prüfprogramm umfasst 28 DSR Prüfungen.

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse kann der Verlauf der Langzeitalterung einer Bitumenart bei verschiedener Herkunft unterschiedlich sein. Dies ist durch eine Betrachtungsweise mit unterschiedlichen Temperaturen und Frequenzen gut ersichtlich.

- Ab welcher Temperatur setzt die thermische Alterung bei Labor-Alterungsverfahren ein? (Kapitel 8)

Die Überlegung lag in der Abgrenzung der thermischen Alterung von der oxidativen Alterung bei Labor Alterungsmethoden.

Im Labor wurden Probekörper in Stickstoffatmosphäre bzw. mittels Luft bei unterschiedlichen Temperaturen langzeitgealtert. Das Bitumen wurde aus den Probekörpern rückgewonnen und mittels DSR auf dessen Eigenschaften geprüft. Das Prüfprogramm umfasst 60 DSR Prüfungen.

Aufgrund der ermittelten Ergebnisse ist eine Abgrenzung der thermischen von der oxidativen Alterung durchaus möglich. Bis zu einer Temperatur von 60°C hat die thermische Alterung nur einen sehr geringen Einfluss auf das Langzeitalterungsniveau. Bei den Proben welche bei 110°C bzw. 135°C gealtert wurden, ist ein Unterschied zu den bei 60°C langzeitgealterten Proben erkennbar. Die thermische Alterung hat bei 110°C bzw. 135°C eine Erhöhung des komplexen Schubmoduls von ca. 130% der kurzzeitgealterten Probeplatten bewirkt.

Eine genauere Betrachtung des Bereichs zwischen 60°C und 110°C ist aufgrund eines Problems der Langzeitalterung bei 85°C nicht möglich gewesen. Weiterführende Prüfungen in diesem Temperaturbereich könnten die genaue Abgrenzung der thermischen Alterung ermöglichen.

- Welche Gase eignen sich zur Langzeitalterung von Asphalt im Labor? (Kapitel 9)

Im Gegensatz zu den Bitumen-Alterungsmethoden ist es mit VAPro möglich, das Verfahren an losem Asphaltmischgut bzw. verdichteten Asphaltprobekörpern durchzuführen. Eine Optimierung des Mischgutes und eine damit verbundene Verbesserung der Dauerhaftigkeit und damit der Lebensdauer ist mit dieser Methode möglich. Verwendet wurden hierbei gasförmige Oxidationsmittel, welche mittels Überdruck durch den Probekörper strömen. Ein schonender Umgang mit dem Asphaltprobekörper soll so gewährleistet werden.

Grundsätzlich wird für diese Methode eine mittels Ozon + Stickoxid angereicherte Druckluft (VAPro) verwendet. Die Frage ist nun, ob auch andere Gase dafür in Frage kommen. Als alternative Gase wurden Druckluft, technischer Sauerstoff und ozonangereicherter technischer Sauerstoff verwendet. Mit diesen drei Gasen und dem VAPro üblichem Gas (Ozon + Stickoxid angereicherte Druckluft) wurden Probekörper langzeitgealtert. Das Bitumen wurde aus den Probekörpern rückgewonnen und auf dessen Eigenschaften mittels DSR geprüft. Das Prüfprogramm umfasst 22 DSR Prüfungen.

Die mit Druckluft und mit technischen Sauerstoff langzeitgealterten Probekörper weisen eine sehr geringe Erhöhung des Alterungsniveaus auf. Der Bereich liegt bei ca. 110 – 120% des Niveaus der kurzzeitgealterten Probeplatten. Die Proben welche

mit ozonangereichertem technischen Sauerstoff langzeitgealtert wurden liegen bei ca. 120 – 150% der kurzzeitgealterten Probeplatten. Die Langzeitalterung mittels Ozon + Stickoxid angereicherter Druckluft hat eine ähnliche Intensität wie die des PAV langzeitgealterten Bitumens. Die restlichen verwendeten Gase zeigen nicht dieselbe und damit eine deutlich geringere Intensität der Langzeitalterung auf den Asphaltprobekörper. Durch eine neuerliche Auswahl alternativer Gase sind weiterführende Prüfungen möglich.

11 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] G. Neroth, D. Vollenschaar, Wendehorst Baustoffkunde, Grundlagen-Baustoffe-Oberflächenschutz, 27. Auflage, 2011.
- [2] M. Spiegel, H. Bleier, A. Loibl, GESTRATA Asphalt Handbuch, 1. Bitumenhaltige Bindemittel, 4. Auflage, 2010.
- [3] ÖNORM EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel — Terminologie, 2014.
- [4] "Wikipedia" [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/%C3%96lvorkommen>. (Zugriff am 17.09.2017).
- [5] M. Partl, Asphalt und Bitumen, Vorlesung Werkstoffe 1, ETHZ, 2011.
- [6] H. Thamfeld, Permanent deformation characterization of asphalt mixes by means of wheel track testing, Doctoral Thesis, Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 1990.
- [7] Institut für Verkehrswissenschaften, Skriptum zur LVA Straßenwesen, Wien, Österreich: Technische Universität Wien, 2013.
- [8] R. Krzemien, A. Pfeiler, GESTRATA Asphalt Handbuch, 2. Gesteinskörnungen, 4. Auflage, 2010.
- [9] FSV, RVS 08.97.05: Anforderungen an Asphaltmischgut, Wien, Österreich, Ausgabe: 01-2007.
- [10] ÖNORM EN 12697-35: Asphalt — Prüfverfahren , Teil 35: Labormischung, 2016.
- [11] ÖNORM EN 12697-33: Asphalt — Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Walzenverdichtungsgerät, 2007.
- [12] D. Steiner, Entwicklung und Optimierung einer Labor-Alterungsmethode für Asphaltkörper zur Simulation der Langzeitalterung und Bewertung der Alterungsbeständigkeit, Master Thesis, 2014.
- [13] ÖNORM EN 12697-3: Asphalt — Prüfverfahren für Heißasphalt, Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer, 2013.
- [14] ÖNORM EN 12607-1: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel — Bestimmung der Beständigkeit gegen Verhärtung unter Einfluss von Wärme und Luft - Teil 1: RTFOT-Verfahren, 2014.

- [15] J. LITZKA, R. STROBL, F. PASS und H. AUGUSTIN,
Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung, Mitteilungen des Instituts für
Straßenbau und Straßenerhaltung, Heft 9, 1998.
- [16] ÖNORM EN 14769: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel — Beschleunigte
Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV), 2012.
- [17] D. Steiner, B. Hofko, R. Blab: Impact of Conditioning Temperature on Thermal
and Oxidative Aging, Proceedings of ISAP 2018, Brazil, 2018, Eingereicht.
- [18] ÖNORM EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel — Bestimmung des
komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels — Dynamisches
Scherrheometer (DSR), 2012.

12 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

ABBILDUNG 1 TERMINOLOGIE DER KOHLENWASSERSTOFF-BINDEMittel [3]	9
ABBILDUNG 2 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER BITUMENGEWINNUNG [5]	10
ABBILDUNG 3 DEFORMATION UND RÜCKVERFORMUNG BEI VISKO-ELASTISCHEM MATERIALVERHALTEN [6].....	12
ABBILDUNG 4 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES ALTERUNGSVERLAUFES BITUMINÖSER MATERIALIEN [7]	15
ABBILDUNG 5 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER ASPHALTPLATTE NACH DER PROBEKÖRPERAUSBOHRUNG [12].....	18
ABBILDUNG 6 ABLAUF PLATTENHERSTELLUNG VON LINKS OBEN: ASPHALTMISCHGUT IM GEGENLAUFZWANGSMISCHER BIS UNTEN MITTE: FERTIGE AUSGEBOHRTE PROBEKÖRPER.....	19
ABBILDUNG 7 EXTRAKTOR	20
ABBILDUNG 8 LINKS: SCHEMATISCHE DARSTELLUNG EINES ROTATIONSVERDAMPFERS + LEGENDE [13], RECHTS: ROTATIONSVERDAMPFER IM BITUMENLABOR.....	21
ABBILDUNG 9 LINKS: RTFOT WÄRMEKAMMER, RECHTS: RTFOT GLASBEHÄLTER [14].....	22
ABBILDUNG 10 RTFOT WÄRMEKAMMER MIT INNENLIEGENDEM DREHGESTELL.....	23
ABBILDUNG 11 PAV BEISPIEL EINES PRÜFSYSTEMS [16]	24
ABBILDUNG 12 LINKS: PRESSURE AGING VESSEL, MITTE: DRUCKLUFTBEHÄLTER, RECHTS: SCHALENANORDNUNG.....	25
ABBILDUNG 13 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VAPRO VERSUCHSABLAUFES [12]	26
ABBILDUNG 14 SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DES VERSUCH ABLAUFES DER STICKSTOFFATMOSPHEREN-ALTERUNG [17]	27
ABBILDUNG 15 LINKS: DSR IDEAL ELASTISCHES VERHALTEN, RECHTS: DSR IDEAL VISKOSES VERHALTEN [15]	29
ABBILDUNG 16 DSR VISKO-ELASTISCHES VERHALTEN [15]	29
ABBILDUNG 17 DSR OSZILLATIONSZYKLUS [2]	30
ABBILDUNG 18 DSR PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL [15].....	31
ABBILDUNG 19 DSR PROBENVORBEREITUNG SILIKONFORM, BITUMENPROBE, KÄNNCHEN UND VORRICHTUNG ZUM ERWÄRMEN ...	33
ABBILDUNG 20 LINKS: SILIKONFORM UND BESCHRIFTETE SCHUTZHÜLLE, MITTE: EINGEIBEN DES FLÜSSIGEN BITUMENS AUS KÄNNCHEN IN SILIKONFORM, RECHTS: BEFÜLLTE SILIKONFORM	33
ABBILDUNG 21 DSR 46°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE STREUUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER KÜBEL 1-10 VON B637	34
ABBILDUNG 22 DSR 46°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE STREUUNG DES PHASENWINKELS DER KÜBEL 1-10 VON B637	34
ABBILDUNG 23 DSR 46°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE STREUUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER KÜBEL 1-10 VON B655	35
ABBILDUNG 24 DSR 46°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE STREUUNG DES PHASENWINKELS DER KÜBEL 1-10 VON B655	36
ABBILDUNG 25 LINKS: DSR 46°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DES MITTELWERTES UND DES KONFIDENZINTERVALLS DER KÜBEL 1-10 VON B637 UND B655 DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS. RECHTS: DSR 46°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES MITTELWERTES UND DES KONFIDENZINTERVALLS DER KÜBEL 1-10 VON B637 UND B655 DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS.	37
ABBILDUNG 26 DSR 46°C BEI 1,59 Hz, LINKS: ABSOLUTE DARSTELLUNG DES MITTELWERTES UND DES KONFIDENZINTERVALLS DER KÜBEL 1-10 VON B637 UND B655 DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS, RECHTS: RELATIVE DARSTELLUNG DES MITTELWERTES UND DES KONFIDENZINTERVALLS DER KÜBEL 1-10 VON B637 UND B655 DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS	38
ABBILDUNG 27 KURZZEITALTERUNG VERSCHIEDENER PLATTEN, DSR +46-+64°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE LOGARITHMISCHE DARSTELLUNG DER PLATTENVERSUCH MITTELWERTE DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS [PA]	41
ABBILDUNG 28 KURZZEITALTERUNG VERSCHIEDENER PLATTEN, DSR +46-+64°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DER PLATTENVERSUCH MITTELWERTE IG*I / REFERENZ B637B_LRTF IG*I [%]	42
ABBILDUNG 29 KURZZEITALTERUNG VERSCHIEDENER PLATTEN, DSR +46-+64°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER PLATTENVERSUCH MITTELWERTE DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS [°]	42
ABBILDUNG 30 KURZZEITALTERUNG VERSCHIEDENER PLATTEN, DSR +46-+64°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER PLATTENVERSUCH MITTELWERTE PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL - REFERENZ B637B_LRTF PHASENVERSCHIEBUNGSWINKEL [Δ°].....	43
ABBILDUNG 31 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, VDSR 40°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_PAV5-20H GEALTERTEN BITUMEN IG*I [PA]	46

ABBILDUNG 32 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 40°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_LPAVXXH IG*I / REFERENZ BXXXC_LPAV20H IG*I [%].....	47
ABBILDUNG 33 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 28°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_PAV5-20H GEALTERTEN BITUMEN IG*I [PA]	47
ABBILDUNG 34 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 28°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_LPAVXXH IG*I / REFERENZ BXXXC_LPAV20H IG*I [%].....	48
ABBILDUNG 35 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 40°C BEI 10 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_PAV5-20H GEALTERTEN BITUMEN IG*I [PA]	49
ABBILDUNG 36 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 40°C BEI 10 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_LPAVXXH IG*I / REFERENZ BXXXC_LPAV20H IG*I [%]	49
ABBILDUNG 37 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 28°C BEI 10 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_PAV5-20H GEALTERTEN BITUMEN IG*I [PA]	50
ABBILDUNG 38 VERLAUF DER LANGZEITALTERUNG UNTERSCHIEDLICHER BITUMEN, DSR 28°C BEI 10 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER BXXXC_LPAVXXH IG*I / REFERENZ BXXXC_LPAV20H IG*I [%]	50
ABBILDUNG 39 LANGZEITALTERUNG MITTELS LUFT, DSR 4-82°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VXX IG*I / REFERENZ B637A BITUMEN IG*I [%]	53
ABBILDUNG 40 LANGZEITALTERUNG IN STICKSTOFFATMOSPHERE, DSR 4-82°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VXX IG*I / REFERENZ B637A BITUMEN IG*I [%]	54
ABBILDUNG 41 LANGZEITALTERUNG MITTELS LUFT BZW. IN STICKSTOFFATMOSPHERE, DSR 46-82°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VX IG*I / REFERENZ B637A BITUMEN IG*I [%].....	55
ABBILDUNG 42 LANGZEITALTERUNG MITTELS LUFT BZW. IN STICKSTOFFATMOSPHERE, DSR 46-82°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VXX IG*I / REFERENZ C_L000_VXX IG*I [%]	56
ABBILDUNG 43 LANGZEITALTERUNG MITTELS LUFT BZW. IN STICKSTOFFATMOSPHERE, DSR 46-82°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VXX Δ - REFERENZ B637A BITUMEN Δ [Δ°].....	57
ABBILDUNG 44 LANGZEITALTERUNG MITTELS LUFT BZW. IN STICKSTOFFATMOSPHERE, DSR 46-82°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX_VXX Δ - REFERENZ C_L000_VXX Δ [Δ°]	58
ABBILDUNG 45 LANGZEITALTERUNG MITTELS UNTERSCHIEDLICHER GASE, DSR -8-82°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX IG*I / REFERENZ B637A IG*I [%].....	61
ABBILDUNG 46 LANGZEITALTERUNG MITTELS UNTERSCHIEDLICHER GASE, DSR 46-64°C BEI 1,59 Hz, RELATIVE DARSTELLUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS DER PROBEKÖRPER B637C_LXXX IG*I / REFERENZ B637C_L000_VXX IG*I [%]	61
ABBILDUNG 47 LANGZEITALTERUNG MITTELS UNTERSCHIEDLICHER GASE, DSR -8-82°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER DIFFERENZ DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS DER PROBEKÖRPER B637X_LXXX Δ - REFERENZ B637A Δ [Δ°]	62
ABBILDUNG 48 LANGZEITALTERUNG MITTELS UNTERSCHIEDLICHER GASE, DSR 46-64°C BEI 1,59 Hz, ABSOLUTE DARSTELLUNG DER DIFFERENZ DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS DER PROBEKÖRPER B637CLXXX Δ - REFERENZ B637C_L000_VXX Δ [Δ°]	63

13 TABELLENVERZEICHNIS

TABELLE 1 EINTEILUNG DER BAUSTOFFE [1]	9
TABELLE 2 HAUPTBESTANDTEILE VON BITUMEN [1]	11
TABELLE 3 HÖCHSTWERTE DER MISCHDAUER IM LABOR (NUR TATSÄCHLICHES MISCHEN) [10]	18
TABELLE 4 BEZUGSTEMPERATUR FÜR DIE VERDICHUNG VON MISCHGUT MIT STRAßENBAUBITUMEN [10]	18
TABELLE 5 DESTILLATIONSBEDINGUNG [13]	20
TABELLE 6 BITUMENSORTEN	32
TABELLE 7 PRÜFPROGRAMM FRISCHBITUMEN	32
TABELLE 8 BITUMENSORTE	39
TABELLE 9 PLATTENVARIANTEN	39
TABELLE 10 PRÜFPROGRAMM PLATTEN KURZZEITGELTERT	40
TABELLE 11 BITUMENSORTEN	44
TABELLE 12 PRÜFPROGRAMM ALTERUNGSVERLAUF LANGZEITALTERUNG	45
TABELLE 13 BITUMENART	51
TABELLE 14 AUFLISTUNG DER BITUMENART, DES BITUMENCODES, DES LABORCODES UND DER TEMPERATUR DER LANGZEITALTERUNG	51
TABELLE 15 PRÜFPROGRAMM ABGRENZUNG THERMISCHER VON OXIDATIVER ALTERUNG	52
TABELLE 16 BITUMENART	59
TABELLE 17 MEDIUM UND LABORCODE FÜR LANGZEITALTERUNG	59
TABELLE 18 PRÜFPROGRAMM VAPRO-PARAMETERSTUDIE GASE	60

14 FORMELVERZEICHNIS

FORMEL 1 BERECHNUNG DES KOMPLEXEN SCHUBMODULS	30
FORMEL 2 BERECHNUNG DES PHASENVERSCHIEBUNGSWINKELS	31
FORMEL 3 BERECHNUNG DER ZEIT EINER SCHWINGUNG	31