

DIPLOMARBEIT
Master Thesis

*Entwicklung und Optimierung einer Labor-
Alterungsmethode für Asphaltprobekörper
zur Simulation der Langzeitalterung und
Bewertung der Alterungsbeständigkeit*

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

unter der Leitung von

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

und

Univ. Ass. Dipl.-Ing Dr. techn.
Bernhard HOFKO

E230

Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen
Technische Universität Wien

von

Daniel STEINER, BSc

Matrikelnummer.: 0826234

Böcklinstraße 24/2/4/18, 1020 Wien, Österreich
Wachaustraße 46, 3133 Traismauer, Österreich
steinerdaniel@gmx.at

Wien, September 2014

Kurzfassung

Das organische Bindemittel Bitumen verändert im Laufe seiner Lebensdauer das viskoelastische Materialverhalten. Steifigkeit und Sprödeheit steigen an und führen zu schlechteren Tieftemperatur- und Ermüdungsverhalten. Um diese Veränderungen im Labor zu simulieren, werden die genormten Methoden Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) und Pressure Aging Vessel (PAV) angewandt. In den letzten Jahren gab es weitere Entwicklungen, die es erlauben, Alterungssimulationen an losem Asphaltmischgut bzw. verdichteten Asphaltprobekörpern durchzuführen. Diese Methoden ermöglichen Mischgutoptimierungen, die zu einer verbesserten Dauerhaftigkeit oder einer verstärkten Möglichkeit des Recyclings von Altasphalt führen. Jedoch haben die Methoden den großen Nachteil, Prüfbedingungen, wie hohe Temperaturen und hohe Drücke, zu verwenden, die nicht den realen Belastungen einer Langzeitalterung im Feld entsprechen. Darum war es das Ziel eine Alterungsmethode zu entwickeln, die vor allem die oxidativen Vorgänge der Alterung ansprechen. Dabei werden verdichtete Asphaltprobekörper mit gasförmigem Oxidationsmittel durchströmt. Dieses ist aus ozonangereicherter Luft und Stickoxiden zusammengesetzt und maximiert somit oxidative Reaktionen. Steifigkeitsversuche an Asphaltprobekörpern (Spaltzug-Schwellprüfungen IT-CY) und am rückgewonnenen Bitumen (Dynamische Scher Rheometer Prüfungen DSR) zeigen die Veränderungen der Materialeigenschaften durch die Alterungsmethode. Bei moderaten Temperaturen (60°C) über eine Dauer von 4 Tagen und Volumenstrom von ca. 1 l/min wurde ein Alterungsniveau erreicht, das einer Langzeitalterung im Feld bzw. einem Laboralterungsniveau des Bitumens im Asphaltmischgut nach RTFOT+PAV Laboralterung entspricht.

Abstract

Towards an optimized lab aging protocol for asphalt mix specimen to assess long-term aging

Aging of bitumen leads to increased stiffness and brittleness. Thus, bituminous bound pavements become more prone to failure by low-temperature and fatigue cracking. Therefore, the aging behavior of bitumen has a crucial impact on durability, as well as recyclability of pavements. To simulate aging of bitumen, Rolling Thin Film Oven Test (RTFOT) and Pressure Aging Vessel (PAV) are standardized methods for short-term and long-term aging in the lab. For lab-aging of hot mix asphalt (HMA), various methods have been developed in the last decades. This thesis presents an optimized lab-aging procedure for compacted HMA specimens to simulate mix performance of long-term lab-aged specimens. Thus, it is possible to optimize mix design not only for short-term performance but to take into account effects of oxidative aging during its in-service life. Assessment and optimization of durability and recyclability of mixes will become possible. The procedure is based on a triaxial cell with forced flow of a gaseous oxidant agent through the specimen. The oxidant agent is enriched in ozone and nitric oxides to increase the rate of oxidation. It is shown by stiffness tests of unaged and lab-aged specimens as well as by DSR tests of recovered binder from aged specimens that asphalt mixes can be long-term aged at moderate temperatures (+60°C) and within 4 days and a flow rate of 1 l/min by applying the presented procedure. Thus, an aging procedure is at hand that can simulate long-term aging at conditions that are representative of conditions that occur in the field within an efficient amount of time.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt dem gesamten Team des Labors des Forschungsbereichs für Straßenwesen. Ich wurde sehr rasch in diese junge, dynamische Gruppe aufgenommen und perfekt integriert. Thomas Riedmayer und David Valentin standen stets für die unterschiedlichsten Probleme zur Verfügung, auch für die eine oder andere Fußballdiskussionsrunde. Proj.Ass. Dipl.-Ing. Mariyan Dimitrov und Proj.Ass. Mag. Georgi Chankov haben mich hervorragend auf den Prüfgeräten eingeschult. Univ.Ass. Dipl.-Ing. Markus Hospodka stand einerseits immer mit seinem detaillierten Wissen im Bereich der Bitumenforschung zur Verfügung, andererseits war er eine große Stütze, wenn es um Beschaffungsvorgänge für verschiedenste Utensilien ging.

Der größte Dank gilt allerdings dem Leiter des Labors, Univ. Ass. Dipl.-Ing. Dr. techn. Bernhard Hofko. Nach der Betreuung meiner Bachelorarbeit und Seminararbeit, hat es großen Spaß gemacht, im Zuge meiner Diplomarbeit gemeinsam diese Neuentwicklung voranzutreiben. Dies beschränkte sich in keinem Falle auf ausgewählte Korrekturtermine, sondern hatte ich die große Ehre, mehrmals täglich Optimierungen besprechen zu können, fachliche Diskussionen zu führen oder einfach nur beim Mittagessen die verschiedensten gesellschaftlichen Themen zu bereden. Auch Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab stand bei den regelmäßigen Forschungsbesprechungen mit seinem Fachwissen stets zur Verfügung und brachte sich sehr stark in die Weiterentwicklung ein.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinen Eltern, Andrea und Anton, bedanken. Nicht nur dafür, dass sie mir das Studium finanziert haben und mir somit genügend Zeit geschaffen haben mich intensiv mit den Themen auseinandersetzen zu können, sondern auch für meine gesamte musikalische Ausbildung. Musik ist für mich ein Teil meines Lebens geworden und sie haben mich dabei zeitlich, finanziell und auch emotional absolut unterstützt. Mein Bruder Florian hat mir in meiner Studienzeit so manches mathematisches Problem versucht näherzubringen. Was sicherlich nicht immer eine leichte Aufgabe war.

Zu guter Letzt will ich natürlich auch meine Freundin Carina erwähnen, da ich mit ihr meine gesamte Studienzeit verbringen durfte. Sie hat meine Launen so mancher schlaflosen Lernnacht ertragen und mich dabei auch noch in vollster Weise unterstützt.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	3
Danksagung.....	4
Inhaltsverzeichnis.....	5
1 Einleitung	6
2 Stand der Technik.....	8
2.1 Asphalttechnologie.....	8
2.2 Bitumen.....	9
2.3 Gestein	10
2.4 Rheologischen Eigenschaften von Bitumen	12
2.5 Alterungsprozess von Bitumen	14
2.6 Veränderung des Asphaltgefüges bei der Alterung	17
2.7 Möglichkeiten der Asphaltalterung im Labor	18
2.8 Alterung mit Ozon	24
2.9 Chemische Reaktionen	28
3 Alterungsversuche – Wiener Methode.....	30
3.1 Alterungsmethode.....	30
3.2 Wahl der zu untersuchenden Parameter	34
3.3 Laborcodes.....	36
3.4 Kontrollalterung in Stickstoffatmosphäre	38
4 Materialien und Prüfmethode	39
4.1 Materialien	39
4.2 Herstellung der Probekörper.....	42
4.3 Aufbau der Prüfmaschine.....	43
4.4 Ermittlung der Steifigkeiten des Bitumens.....	47
5 Vorversuche.....	51
5.1 Einfluss Hohlraumgehalt auf Steifigkeiten bei IT-CY	51
5.2 Wiederholungsprüfungen	54
6 Ergebnisse und Interpretationen	56
6.1 Veränderung der Asphalt – Materialeigenschaften.....	56
6.2 Veränderung der Bitumen – Materialeigenschaften	59
7 Zusammenfassung und Ausblick	63
Literaturverzeichnis	65
Anhang.....	I

1 Einleitung

Bituminöse Baustoffe ändern im Laufe ihrer Lebensdauer fortlaufend ihre Gebrauchseigenschaften hauptsächlich aufgrund von Alterung des organischen Bindemittels Bitumen. Dies kann dazu führen, dass ältere Asphaltaufbauten nicht mehr den Anforderungen genügen, für die sie beim Einbau bestimmt waren.

Das Amt der niederösterreichischen Landesregierung verwaltet mit dem 13600 km umfassenden Landesstraßennetz (B 2960 km / L 10650 km), im Vergleich zu den anderen Bundesländern, die größte Straßeninfrastruktur Österreichs [17]. Diese Straße sind hauptsächlich dem Baustoff Asphalt zuzuordnen. Die Verwaltungskosten verschieben sich dabei immer mehr von Neubau- zu Erhaltungsbereichen, weshalb jährlich zehntausende Tonnen Asphaltfräsgut anfallen, welche im Sinne eines geschlossenen Baustoffkreislaufes einem Recyclingprozess zugeführt werden sollten. Im Jahr 2010 sind in Österreich 860.000 t Asphaltfräsgut angefallen, wovon 850.000 t einer Wiederverwendung zugeführt werden konnten, weshalb man auf eine sehr gute Wiederverwendung schließen kann [45]. Betrachtet man dies genauer, dann erkennt man, dass es dabei größtenteils zu einem Downcycling und damit zu einer minderen Verwertung kommt. Gesteine und Bitumen aus Deckschichten mit vormals sehr hohen Anforderungen an die Qualität werden vermehrt in Tragschichten oder sogar ungebunden Tragschichten wiederverwendet, bei dessen Verwendung die qualitativen Eigenschaften weniger hoch sein müssen.

Um den Wert der Straße als Rohstoffquelle zu steigern, muss man die Veränderungen der Materialeigenschaften über die Lebensdauer einstufen können. Dazu bedarf es langjährigen Beobachtungen von Straßen über große Zeiträume von 5-10 Jahren. Alternativ kann man versuchen die Alterungserscheinungen im Labor zu simulieren, um eine Aussage über die Dauerhaftigkeit der Baustoffe tätigen zu können. Dazu werden heute hauptsächlich Versuche durchgeführt und Methoden entwickelt, die es erlauben Bitumen zeitraffend zu altern. Aufgrund der hohen Belastungen des Bitumens bei diesen Methoden, z.B. durch hohe Temperatur, sind diese aus chemischer Sicht im Vergleich zu den realen Vorgängen fragwürdig. Zielführender ist es, Alterungsaussagen auf Grundlage von Asphaltprobekörpern zu treffen. Dabei erhält man, im Gegensatz zu einer isolierten Bitumenbetrachtung, einen ganzheitlichen Blick auf den Baustoff in einem Zustand, wie er auch auf der Straße eingebaut ist. Dies ergibt den Vorteil, nicht nur die rheologischen Veränderungen des Bitumens in eine Beschreibung der Dauerhaftigkeit einfließen zu lassen, sondern auch eventuelles Versagen der Bitumen-Gesteinshaftung (Adhäsion) mit den Alterungsversuchen einzubeziehen.

Vorhandene Asphaltalterungsmethoden beschreiben die Vorgänge, die im Feld passieren, nur ungenügend, da sie ähnlich zu den Bitumenmethoden hohe Temperaturen oder Drücke verwenden. Aus diesem Grund ist die Entwicklung neuer bzw. Optimierung vorhandener, realitätsnaher Verfahren notwendig, die zusätzlich die oxidative Alterung des Bitumens besser abbilden. Dazu wurden im Herbst 2013 im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen Versuche durchgeführt, die eine Oxidation des Asphalts mittels Durchströmung mit Medien in flüssiger (3%-ige Wasserstoffperoxid-Lösung, Wasser) bzw. gasförmiger Phase (Sauerstoff, Ozon-Sauerstoffgemisch) ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass sich bei

1 Einleitung

Medien in flüssiger Phase Steifigkeitsverminderungen, bei gasförmigen Medien jedoch Steifigkeitserhöhungen eingestellt haben.

Mit dieser Arbeit sollen die Unklarheiten bezüglich des Einflusses von Temperatur, Hohlraumgehalt und Durchflusskonzentration, die die Alterung mit den gasförmigen Oxidationsmitteln enthält, aufklären. Somit lassen sich die veränderten Eigenschaften im Laufe der Alterung bereits bei Ausschreibungen. Dies könnte die Entscheidung zu vermehrten Wiederverwendung von Asphalt oder zu einer verlängerten Gewährleistungsfrist, welche zurzeit als Zuschlagskriterien im Sinne eines Bestbieterverfahrens in den Ausschreibungen formuliert sind, erleichtern.

In Kapitel 2 "Stand der Technik" wurden Literaturrecherchen zu den Themen straßenbautechnische Grundlagen, Alterungsvorgängen von bituminösen Materialien, vorhandene Laboralterungsmethoden für Asphalt und Ozon als Oxidationsmittel durchgeführt. Kapitel 3 „Alterungsversuche – Wiener Methode“ beschreibt die neu entwickelte Alterungsmethode für Asphaltprobekörper und die dabei untersuchten Parameter bzw. das Prüfprogramm. Die Materialien und Versuchsmethoden, die benötigt wurden um Probekörper herzustellen bzw. die Alterungseinflüsse feststellen zu können werden in Kapitel 4 „Materialien und Prüfmethoden“ beschrieben. Im Kapitel 5 „Vorversuche“ wird der Einfluss des Hohlraumgehalts bzw. von wiederholten Prüfungen desselben Probekörper im Zuge eines Spaltzug-Schwellversuch auf den dynamischen Modul $|E^*|$ bzw. den Phasenwinkel ϕ untersucht. Die Ergebnisse der Wiener Methode sind in Kapitel 6 „Ergebnisse und Interpretationen“ dargestellt.

2 *Stand der Technik*

2.1 *Asphalttechnologie*

2.1.1 *Asphalt*

Asphalt ist die Bezeichnung eines Baustoffes, der primär im Straßenbau eingesetzt wird und aus folgenden Komponenten besteht:

- Erdölbitumen
- Gesteinsmaterialien [31]

Die Verhältnis dieser beiden Bestandteile ist in etwa 91 – 96 M-% Gestein zu 4-9 M-% Bindemittel.

2.1.2 *Asphalttypen [31]*

Asphaltbeton – AC – asphalt concrete

Asphaltbetone oder Walzasphalte haben die besondere Eigenschaft der stetigen Korngrößenverteilung. Diese Kombination entspricht dem Prinzip des Betons, bei dem man versucht eine möglichst dichte Lagerung der Gesteinskomponenten zu erhalten und deswegen die Korngruppen nach der Fuller-Parabel zu konzipieren.

Splittmastixasphalt – SMA – Stone mastic asphalt

Die ersten Entwicklungen in die Richtung dieses Asphalttyps gab es in den 1960er Jahren in der Bundesrepublik Deutschland. Zur Erhöhung des Spikeabriebs und der Standfestigkeit von Decken aus Asphaltmastix, wurden diese mit Splitt abgestreut. Mischt man diese beiden Bestandteile nun zu einem Asphaltmischgut zusammen, dann erhält man eine Mischung, die eine Ausfallskörnung im Bereich des Feinsplitts bzw. Sands aufweist.

Anders als beim Asphaltbeton entspricht dies, aufgrund des fehlenden Bereiches, nicht dem Betonprinzip der dichtesten Lagerung.

In Österreich wird dieser Asphalt besonders häufig auf Autobahnen und Schnellstraßen in Form von SMA 8 oder SMA 11 verwendet.

Gussasphalt – mastic asphalt

Gussasphalt bezieht seinen Namen aus seiner wichtigsten Materialeigenschaft. Bei hohen Temperaturen lässt sich dieser Asphalttyp problemlos gießen und streichen und ist daher selbstverdichtend. Aus diesem Grund wird Gussasphalt vor allem auf Brücken oder in der Nähe von Gründerzeithäusern eingebaut, da hier Asphalte mit konventioneller Walzverdichtung Schäden an den angrenzenden Bauwerken anrichten würden. Diese Eigenschaften werden durch einen höheren Bindemittelgehalt, der die Hohlräume des Gesteinszuschlages zur Gänze verfüllen soll, erreicht.

Der Produktionsprozess kann auf 2 verschiedene Arten passieren:

- Stationär in speziellen Mischanlagen
- In fahrbaren Asphaltkochern.

Bei beiden Varianten bedarf es einer längeren Vorlaufzeit, um dem Bitumen eine Viskosität zu verleihen, die eine problemlose Verarbeitbarkeit gewährleistet. Dafür sind allerdings Temperaturen von ca. +230-+260 °C erforderlich, welche auf der einen Seite einen hohen Energiebedarf verursachen bzw. auf der anderen Seite eine größere thermische Belastung für das Bitumen bedeuten.

Offenporiger Asphalt – PA – porous asphalt

Poröse Asphalte oder Drainasphalte besitzen neben 2 großen Vorteilen auch 2 sehr gravierende Nachteile, welche allesamt in Tabelle 2.1 dargestellt sind.

Tab. 2.1 Eigenschaften des PA

<i>Vorteile</i>	<i>Nachteile</i>
Fähigkeit der Wasserableitung	Vermehrter Winterdienst
Lärmminderung	weniger alterungsbeständig

Oben genannte Parameter werden durch die besondere Rezeptur dieses Typs erreicht. Die Gesteinszusammensetzung besteht hauptsächlich aus einer Einkornmischung. Diese erlaubt eine Vergrößerung des Hohlraumgehalts auf über 17 Vol.-% bei trotzdem noch ausreichender Stabilität. Dabei verringern sich auch die Kontaktflächen der einzelnen Körner zueinander.

Deckschichten, die aus diesem Asphalttyp hergestellt sind weisen keine Dichtheit mehr auf, was eine schnellere Ableitung von Oberflächenwasser bedeutet bzw. eine Vergrößerung der Oberfläche zur Umwandlung von Schallenergie. Ersteres hat den Nachteil, dass dadurch auch die innenliegenden Bitumenbereiche von Oxidationsmittel umströmt werden und somit eine vermehrte Alterung unterzogen werden. Straßenerhalter beklagen immer wieder den vermehrten Aufwand des Winterdienstes, da die vorbeugende Salzausbringung nicht mehr wirkungsvoll ist und somit entweder kürzere Umlaufzeiten der Winterdienstfahrzeuge oder geringere Verkehrssicherheiten die Folge sind.

2.2 Bitumen

2.2.1 Definition

Bitumen ist ein schwerflüchtiges, dunkelfarbiges Gemisch verschiedener organischer Substanzen, das im Rahmen der Aufarbeitung geeigneter Erdöle als Rückstand des Raffinierungsprozesses anfällt [47].

2.2.2 Gewinnung von Bitumen

Bitumen ist der letzte Rückstand der fraktionellen Destillation von Erdöl. Diese wird in 2 Phasen durchgeführt, wobei erstere die atmosphärische Destillation mit den Produkten Gas, Benzin, Kerosin und Gasöl ist. Anschließend wird eine Vakuum-Destillation durchgeführt, bei der die Bestandteile Gasöl und Schmieröl abgeschieden werden und letztendlich nur das Bitumen überbleibt [47].

2.2.3 Bitumenarten [47]

Am europäischen Markt befinden sich viele verschiedene Bitumensorten, die sich aufgrund der Herstellungsverfahren, Anwendungsgebiete oder deren mechanischen Eigenschaften (Konsistenz) stark unterscheiden.

Im Straßenbau werden für Asphaltaufbauten besonders 2 Typen häufig verwendet:

- Straßenbaubitumen
- Modifiziertes Bitumen

Straßenbaubitumen werden seit vielen Jahrzehnten für Asphaltmischgüter, die für den Bau von Straßen, Flugbetriebsflächen oder auch im Wasserbau bestimmt sind, verwendet. Die Bezeichnung dieser Sorten bezieht sich auf die Nadelpenetration bei +25°C. Dabei sollte der Wert dieser Prüfung zwischen den angegebenen Grenzwerten (z.B. 20/30 oder 70/100) liegen. Bitumen der Sorte 70/100 sind in Österreich traditionell sehr häufig verbreitet.

Modifizierte Bitumen beziehen ihre Bezeichnung aufgrund von Zusätzen, die bei der Herstellung dem Bitumen hinzugefügt werden, um die rheologischen Eigenschaften zu verändern. Zu den Modifizierungsprodukten zählen:

- Naturkautschuk
- Synthetische Polymere
- Schwefel
- Organometallverbindungen

Weiters gibt es auch die Möglichkeit organische Polymere dem Bitumen hinzuzufügen, welche im hohen Temperaturbereich die Strukturviskosität des Bitumens ändern und letztendlich als polymermodifizierte Bitumen (PmB) bezeichnet werden. Der große Vorteil dieser Bitumen besteht darin, dass er die Temperaturgebrauchsspanne aufweitet. Die Beständigkeit gegen Spurrinnenbildung wird dadurch erhöht, ohne Gefahr zu laufen im Tieftemperaturbereich zu steifes Verhalten zu bekommen, welches zu Kälterissen führen würde.

2.3 Gestein

2.3.1 Gesteinsarten [27]

Eine Anhäufung von einem oder mehreren Mineralien in homogen zusammenhängender Form, nennt man Gestein. Diese können je nach Korngröße folgenden Gruppen zugeteilt werden:

- Festgestein
 - Fels
- Lockergestein
 - Steine
 - Kies
 - Sand
 - Schluff
 - Ton

Ein Mineral wiederum entstammt der Erdkrinde und ist dort als natürlicher und einheitlicher Bestandteil über mehrere tausend Jahre entstanden. Prinzipiell kann man diese, je nach Entstehungsort, in 3 große Gruppen einteilen, nämlich Magmatite, Sedimente und Metamorphite. Abbildung 2.1 zeigt den Kreislauf der Gesteine und den Zusammenhang der einzelnen Gruppen.

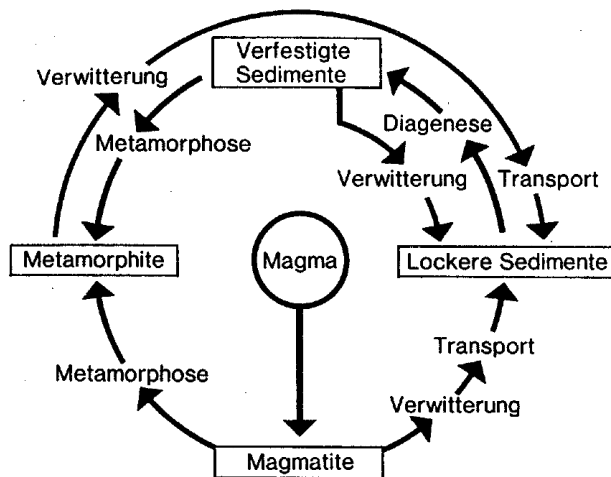


Abb. 2.1 Kreislauf der Minerale [41]

Zu den *Magmatiten* zählen sowohl die Mineralien der Tiefengesteine (Plutonite), als auch die der Ergussgesteine (Vulkanite). Der Unterschied dieser beiden Gesteinsarten liegt im Ort der Erstarrung von Magma zu einem Mineral. Vulkanite entstehen an der Erdoberfläche, wenn das flüssige Magma als Lava an die Erdoberfläche gelangt und dort nach Auskühlung abgelagert wird. Plutonite hingegen erstarren in der Erdkruste unter mehreren tausend Meter Gestein. Dabei kühlen sie nur langsam aus, weshalb Tiefengesteine besonders große Kristalle aufweisen. Durch die große Überlagerung entstehen sehr dichte und homogene Gefüge.

Sedimente sind Sekundärgesteine, da sie an der Erdoberfläche durch Verwitterung in ihrer Form verändert worden sind. Einflüsse, wie Sonneneinstrahlung, Frost, Regen, Organismen und Säuren, haben diese Gesteine im Laufe der Jahre physikalisch, mechanisch oder chemisch verändert.

Die Gruppe der *Metamorphite* erhielten ihren Namen Aufgrund deren Umwandlung (Metamorphose). Große Druck und hohe Temperaturen wandeln die Gesteine, trotz festem Aggregatzustand, um. Diese stellt sich durch Strukturveränderung, Umkristallisation oder Zu/Abfuhr von Stoffen ein. Charakteristisch dafür ist die Schieferung, welche durch einseitige Drücke eine blättrige Struktur entwickeln hat lassen.

Tabelle 2.2 zeigt eine Auflistung der wichtigsten Gesteine und deren Zuordnung zu den Hauptgruppen.

Tab. 2.2 Beispielzuteilung zu den Gesteinsgruppen

<u>Erstarrungsgestein Magmatit</u>	Granit	Syenit
	Diorit	Gabbro
	Quarzporphyr	Porphyrit
	Andesit	Basalt
	Melaphyr	Basaltlava
	Diabas	
<u>Sedimentgesteine</u>	Dichte Kalke	Dolomite
	Kieselig gebundene Sandsteine	Quarzsandsteine
	Kiese rund /gebrochen	
<u>Metamorphe Gesteine</u>	Gneise	Granulit
	Amphibolit	Serpentinit
	Quarzit	Kristalline Marmore

2.3.2 Füller

Als Füller werden Korngruppen genannt, welche einen Korndurchmesser $< 0,063$ mm haben [31]. Dabei unterscheidet man zwischen

Eigenfüller

Darunter versteht man den Anteil der Sandfraktion $< 0,063$ mm, der durch die Korngruppen mit größeren Korndurchmesser mitgeliefert wird. Dieser darf keinesfalls quellfähig sein, sonst müsste dieser durch Fremdfüller ersetzt werden.

Steinmehl / Fremdfüller

Dies sind Körnungen, die dem Asphalt hinzugefügt werden um den gewünschten Anteil an Kleinstteilen zu erreichen und somit die geforderten mechanischen Eigenschaften zu erhalten.

Das Verhältnis Füller zu Bitumen hat großen Einfluss auf das Materialverhalten des eingebauten Asphalts. Idealerweise sollte dies zwischen 1,5:1 und 1,8:1 liegen [31]. Fällt das Verhältnis unter 1:1, dann vermindert dies die Steifigkeit des Asphalts und dabei kann es zu unerwünschten Verformungen kommen. Steigt aber andererseits das Verhältnis Füller zu Bitumen über 2:1, dann erhält man erhöhte Steifigkeiten, aber auch erhöhte Sprödeheit.

2.4 Rheologischen Eigenschaften von Bitumen

2.4.1 Visko-elastisches Materialverhalten [44]

Die visko-elastischen Materialverhalten von Bitumen sind sehr stark von der Viskosität abhängig, die je nach Bitumensorte unterschiedlich sein kann. Zusätzlich beeinflusst aber auch

Temperatur und Belastungsgeschwindigkeit die Steifigkeit. Bei hohen Temperaturen reagiert das Bitumen weicher als bei tiefen Temperaturen. Gegensätzlich dazu ist die Steifigkeit bei raschen Einwirkungen höher als bei langsamen Belastungen. Wie unter Punkt 2.4.2 „Time Temperature Superposition Principle“ beschrieben sind diese beiden Parameter austauschbar.

Betrachtet man die Materialantworten des Bitumens, wie Sie auf Belastungen in Form von Verformungen reagieren, dann zeigt sich, dass es sowohl reversible elastische, als auch irreversible plastische Anteile gibt. Wie sich die Deformationen im Verlauf der Zeit einstellen, ist in Abbildung 2.2 dargestellt.

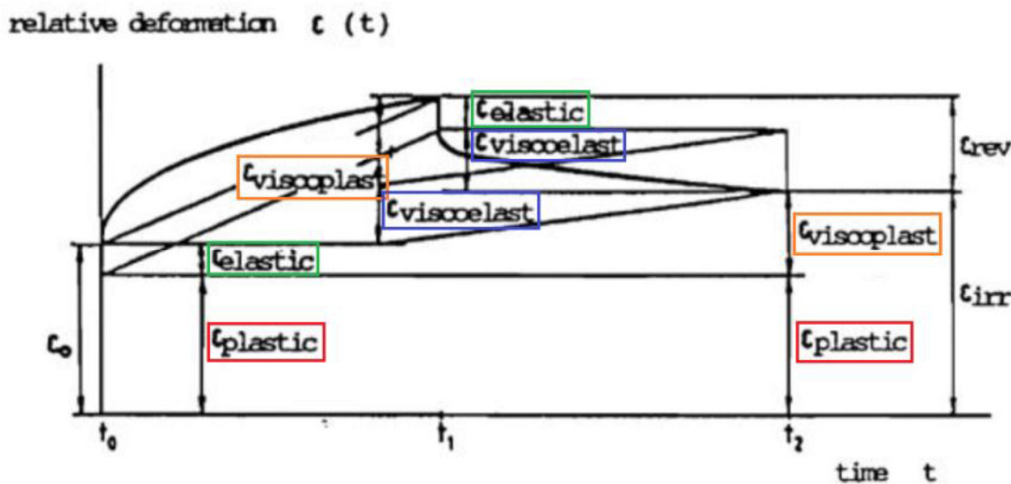


Abb. 2.2 visko-elastisches Materialverhalten [44]

ϵ_0	Anfangsdehnung	$\epsilon_{elastic}$	elastische Anfangsdehnung
$\epsilon_{plastic}$	plastische Anfangsdehnung	$\epsilon_{viscoelast}$	zeitabhängige elastische Dehnung
$\epsilon_{viscoplast}$	zeitabhängige plastische Dehnungen	ϵ_{irr}	gesamte plastische Dehnung (irreversibel)
ϵ_{rev}	gesamte elastische Dehnung (reversibel)		

2.4.2 Time Temperature Superposition Principle

Die beschreibenden Parameter von visko-elastischen Materialien, wie Phasenwinkel und dynamischer Schubmodul $|G^*|$ sind von der Frequenz der Belastung und der Temperatur abhängig. Bitumen wird zu der Gruppe thermorheologisch einfacher Materialien gezählt, d.h. die Parameter Temperatur und Belastungsfrequenz sind austauschbar und lassen sich zu einem einzigen Parameter, der reduzierten Frequenz, zusammenfassen. Damit erhält man die Möglichkeit aus vielen Versuchen bei variierenden Temperaturen und Frequenzen eine einzige Kurve, die sogenannte „Mastercurve“, mit sehr dichtem Werteverlauf zu erzeugen bzw. aus wenigen Versuchen von verschiedenen Temperaturen auf die gesamte Temperaturspanne zu schließen. Niedrige Temperaturen sind hohen Belastungsfrequenzen zuzuordnen und umgekehrt [22].

2.4.3 Chemische Struktur von Bitumen

Bitumen setzt sich aus einer großen Menge verschiedener Kohlenwasserstoffe und Kohlenwasserstoffderivate zusammen. Die Gebrauchseigenschaften werden aber jedoch eher von der mikro-physikalische Struktur als von der chemischen Zusammensetzung geprägt.

Wie in Abbildung 2.3 dargestellt, kann man die mikro-physikalische Struktur von Bitumen anhand des SARA-Modells (*saturates, aromatics, resins, asphaltenes*) beschreiben. Dabei wird unter folgenden Bestandteilen unterschieden:

- Maltenphase (viskos – geringere Polarität)
 - Harze und Aromaten
 - Paraffine
- Asphaltene (spröd-elastisch – hohe Polarität)

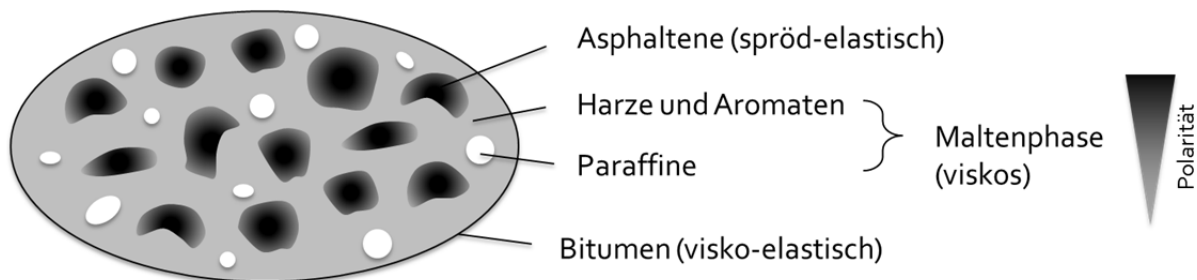


Abb. 2.3 Mikro-mechanisches Modell von Bitumen mit Veränderungen [19]

Dabei ist die in n-Heptan unlösliche Phase (Asphaltene) stabil in der n-Heptan löslichen Phase (Maltene) verteilt. Asphaltene stellen sich nach einer Fraktionierung bei Raumtemperatur als schwarzes Pulver dar. Maltene sind als hochviskose Flüssigkeit zu betrachten. Die Interaktion dieser beiden Phasen verhilft dem Bitumen zu seinem thermo-viskosem und visko-elastischem Materialverhalten. [8, 25]

2.5 Alterungsprozess von Bitumen

2.5.1 Natürliche Alterungsvorgänge

Die Alterung von Bitumen zeichnet sich durch eine Verschlechterung der Gebrauchseigenschaften aus, wobei man generell sagen kann, dass Bitumen dabei steifer und spröder wird. Folgende Faktoren haben Einfluss auf den Alterungsprozess (nach [25]):

- Temperatur
- Gasförmige Oxidationsmittel (u.a. Luftsauerstoff, Ozon)
- Wasserlösliche Oxidationsmittel
- Sonneneinstrahlung (UV-Strahlung)
- Verkehrsbelastung
 - Mechanische Belastung
 - Schadstoffe

2.5.2 Zusammensetzung der Luft und Oxidationsmittel in der Atmosphäre

Die Erdatmosphäre ist mit ihrer Mächtigkeit von ca. 100 km Höhe ein wichtiger Bestandteil von Leben auf diesem Planeten. Die Zusammensetzung und deren Bedingungen unterscheiden sich allerdings in den verschiedensten Höhen sehr stark, weshalb es sinnvoll ist genauere Schichteneinteilungen zu definieren. Die Troposphäre ist die direkt an die Erdoberfläche angrenzende Schicht, welche in Mitteleuropa ca. 12-14 km hoch ist, wobei sie zu

den Polen hin abflacht bzw. zum Äquator hin wächst. Die Hauptbestandteile der bodennahen Luft auf Meereshöhe sind in Tabelle 2.3 aufgelistet [39].

Tab. 2.3 Anteile der bodennahen Luft [39]

Gas	Anteil [Vol-%]	Ursprung
Stickstoff – N ₂	78,08	Biologisch / mikrobiologisch
Sauerstoff – O ₂	20,94	Biologisch / mikrobiologisch
Argon – Ar	0,93	
Kohlenstoffdioxid – CO ₂	0,038	Anthropogen / Chemisch
Wasserdampf – H ₂ O Dampf	10 ⁻³ - 1	Physikalisch / Chemisch

Zusätzlich gibt es noch andere Gase in geringeren Konzentrationen, welche aber für die biologischen, chemischen und physikalischen Vorgänge in der Troposphäre keinen unwesentlichen Anteil haben. Diese werden Spurengase genannt und sind in Tabelle 2.4 aufgelistet.

Tab. 2.4 Spurengase [39]

Gas	Mischungsverhältnis [ppm]	Zyklus					
		anthropogen	biogen	biologisch	chemisch	mikrobiologisch	physikalisch
Neon - Ne	18						
Krypton - Kr	1,1			Kein Zyklus			
Xenon - Xe	0,9						
Methan - CH ₄	1,78			X	X		
Kohlenstoffmonoxid - CO nördliche Hemisphäre	0,13	X			X		
Kohlenstoffmonoxid - CO südliche Hemisphäre	0,07	X			X		
Wasserstoff - H ₂	0,58		X		X		
Distickstoffmonoxid - N ₂ O	0,323		X		X		
Schwefeldioxid - SO ₂	10 ⁻⁵ -10 ⁻⁴	X	X		X		
Ammoniak - NH ₃	10 ⁻⁴ -10 ⁻³		X		X		
Stickstoffmonoxid - NO	10 ⁻⁶ -10 ⁻²	X	X		X		
Stickstoffdioxid - NO ₂	10 ⁻⁶ -10 ⁻²	X	X		X		
Ozon - O ₃	10 ⁻² -10 ⁻¹				X		
Helium - He	5,2				X		X

Von den oben genannten Gasen und Spurengasen haben folgende chemischen Zusammensetzungen Einfluss auf die Asphaltalterung. Dabei kann man eine Aufgliederung in 3 Gruppen vornehmen, wobei die Eindringtiefe in den Asphaltoberbau maßgebliches Unterscheidungsmerkmal ist, wie Tabelle 2.5 zeigt.

Tab. 2.5 reale Alterungsbelastungen während der Liegezeit von Asphaltpaufbauten [23]

Oberflächennah	Mehrere Zentimeter	Gesamter Asphaltpaufbau
UV Strahlung	Reaktive Gase: NO _x – Stickoxide O ₃ - Ozon	Wasserlösliche Gase: HNO ₂ – salpetrige Säure H ₂ SO ₄ - Schwefelsäure
Mineralstäube	OH - Radikale	H ₂ O ₂ - Wasserstoffperoxid

2.5.3 Zeitliche Alterungsstufen

- Ungealtert
- Kurzzeitgealtert
- Langzeitgealtert
- Frischbitumen
- Alterung während Transport, Lagerung, Mischvorgang und Einbau
- Alterung ab Fertigstellung des Einbaus, wobei für die Quantifizierung Betrachtungszeitpunkte von 5-10 Jahren Liegezeit interessant sind [25].

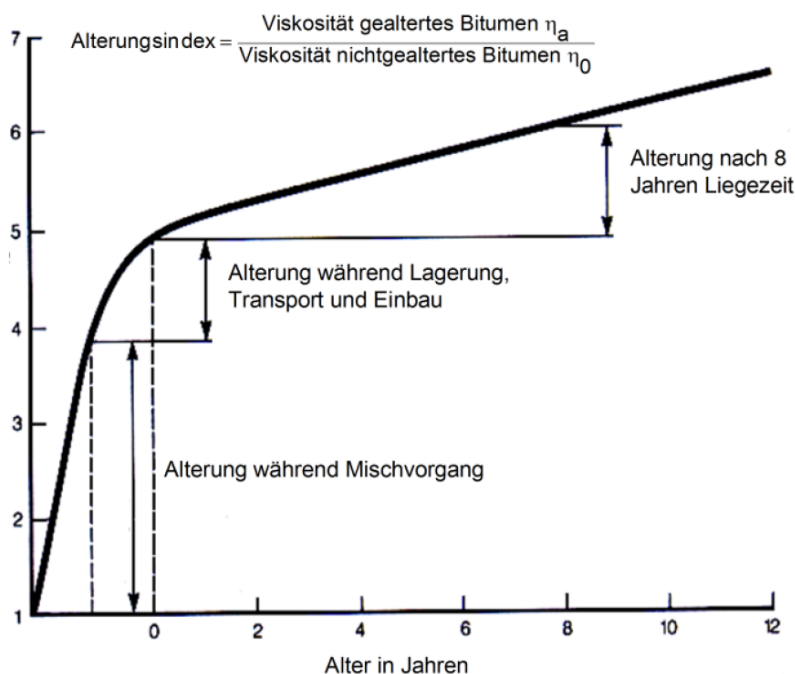


Abb. 2.4 Alterungsverlauf von Bitumen (nach [38])

2.5.4 Destillative Alterung

Dieser rein physikalische Vorgang verursacht ein Abdampfen niederviskoser Ölanteile aus dem Bitumen. Dabei sind hohe Temperaturen notwendig, wie sie vor allem in der Mischanlage bis zum Einbau auftreten. Einfluss auf die destillative Alterung haben:

- Temperatur
- Spezifische Oberfläche
- Bitumensorte.

Je weicher die Bitumensorte, bzw. je höher die Temperatur, desto stärker fällt die Alterung aus, da einerseits die Menge der niederviskosen Ölanteile größer ist und andererseits der Dampfdruck steigt [25].

2.5.5 Oxidative Alterung

Die Oxidative Alterung ist Folge von chemischen Reaktionen des Bitumens mit einem Oxidationsmittel, wie sie im Kapitel 2.5.2 beschrieben sind. Die Reaktionsgeschwindigkeit, siehe Kapitel 2.9, hängt von der Temperatur und Konzentration des Oxidationsmittels ab. Die Sonneneinstrahlung, welche ca. 4-5 μm in den Asphaltaufbau eindringt [47], hat Einfluss auf die Temperaturerhöhung. Wichtig ist auch, ob die vorhandenen Oxidationsmittel in flüssiger oder gasförmiger Form vorliegen, da erstere nur wenige Zentimeter, zweitere aber den ganzen Aufbau beanspruchen. Eine Methode zum Nachweis der oxidativen Alterung ist die Fourier-Transform-InfraRot (FT-IR) Spektroskopie, da diese den Zuwachs der Oxidationsprodukte messen kann [25, 47].

2.5.6 Strukturalterung

Die Strukturalterung beschreibt im Prinzip die strukturellen Veränderungen des Aufbaus von Bitumen bei der destillativen und oxidativen Alterung. Mechanisch gesehen steigert sich die Viskosität des Bitumens und wird dadurch härter. Begründet ist dies in der Zunahme der Asphaltene bei gleichzeitiger Abnahme von Maltenen (Harze und Aromaten). Die kolloidal dispergierten Teilchen vergrößern sich werden zu größeren Aggregaten koaguliert [29]. Die Veränderung ist in Abbildung 2.5 dargestellt und kann mit Abbildung 2.3 verglichen werden.

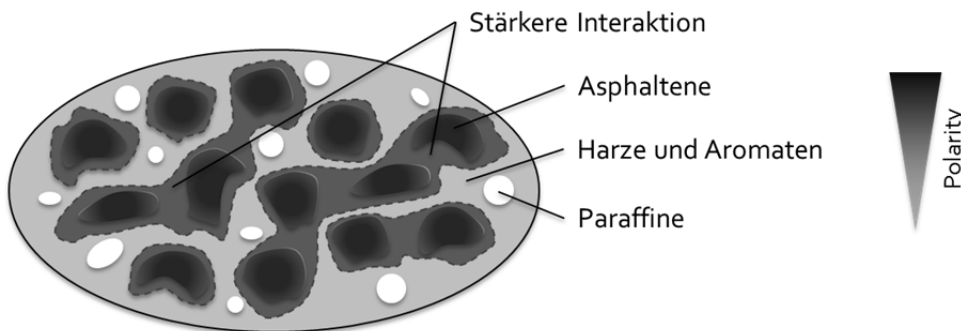


Abb. 2.5 Mikro-mechanisches Modell von Bitumen mit Veränderungen [19]

2.6 Veränderung des Asphaltgefüges bei der Alterung

2.6.1 Strukturschädigung – Kohäsion

Unter dem Begriff Kohäsion versteht man die Bindungskräfte, die zwischen den Molekülen eines Materials wirken. Dabei ist dies bei Feststoffen stärker ausgeprägt, als bei Stoffen in flüssiger Phase, weshalb sich zweitere auch leichter verformen lassen. Bei Flüssigkeiten ist die Tropfenbildung durch die Kohäsion begründet. Im Inneren dieser Tröpfchen grenzen alle Moleküle an benachbarte Moleküle und dabei wirken die Bindungskräfte gleichmäßig in alle Richtungen. Im Gegensatz dazu haben jene, die am Rand situiert sind, keine angrenzenden Moleküle und somit bilden sich Oberflächenspannungen aus. Am wenigsten Energie wird

dabei bei einer möglichst kleinen Oberfläche verbraucht und damit bilden sich kugelförmige Formen aus [37].

2.6.2 Bedeutung der Bitumen-Gesteins Haftung – Adhäsion

Zwischen Flüssigkeiten und anderen Stoffen gibt es, ähnlich der Kohäsion, Kräfte zwischen den Molekülen, jedoch verschiedener Materialien. Diese wirken dann auch nur an den Kontaktflächen [37].

Ein lückenloser Bitumenfilm rund um ein Gesteinskorn ist für eine gute Kraftübertragung von Bitumen auf das Gestein und umgekehrt besonders wichtig. Staub oder Feuchtigkeit verhindern dies, weshalb beim Mischprozess auf folgende Punkte geachtet werden sollte, da diese den Haftverbund mindern.

- Umfassende Trocknung
- Reinigung der Gesteinskörnungen [47]

Die Adhäsion zeigt sich auch im Zusammenhang mit auftretendem Wasser. Die Affinität zwischen Gestein und Bindemittel ist dabei der ausschlaggebende Grund. Ist diese Eigenschaft für die verwendeten Mischgutbestandteile nicht gegeben, dann kann es bei Wasserzutritt zu einem Ablösevorgang des Bitumens von Gestein kommen. Dabei schieben sich Wassertropfen zwischen die beiden Bestandteile und somit dem Verlust des umhüllenden Bitumenfilmes. Je nach Stärke dieses Vorganges, kann es einerseits zu vereinzelt Kornverlusten andererseits bei großen Hohlraumgehalten auch zu Schäden durch die gesamte Schicht führen [31].

2.7 Möglichkeiten der Asphaltalterung im Labor

2.7.1 Asphaltzustände bei der Alterung

Folgende 3 Zustände des Asphalts bieten sich grundsätzlich für eine Laboralterung an:

- Loses Asphaltmischgut
- Asphaltmastix aus Bitumen, Füller
- Asphaltmörtel aus Bitumen, Füller und Sand
- Verdichtete Asphaltprobekörper

2.7.2 Alterungsmedien

In den letzten Jahrzehnten wurden mehr als 30 Asphaltalterungsmethoden entwickelt. Dabei unterscheiden sich diese zumeist in einigen Parametern, wobei man aber Grundzüge bei den Methoden erkennen kann, welche sich wie folgt (Tabelle 2.6) auflisten lassen.

Tab. 2.6 Alterungsmedien

<i>Alterungsmedium</i>	<i>Rolle im Alterungsprozess</i>
Temperatur +40 bis +165 °C	Destillative Alterung Erhöht Oxidationspotential
Atmosphärischer Sauerstoff	Oxidative Alterung
Reiner Sauerstoff	Oxidative Alterung
Stickstoff	Abgrenzungsmedium (Oxidation)
UV-Licht	Spaltung organischer Bindungen
Wasserstoffperoxid	Oxidative Alterung
Ozon	Oxidative Alterung
Überdruck	Erhöht Oxidationspotential
Wasser / Wasserdampf	Oxidative Alterung

2.7.3 Übergang Feldalterung zur Laboralterung

Bei Laboralterungsmethoden versucht man im Feld auftretende Alterungsvorgänge, so genau wie möglich nachzubilden. Dazu muss man anhand der zeitlichen Alterungsstufen unterscheiden, mit welchen Methoden man die Asphaltprobekörper behandeln möchte. Im Labor wird mit ungealtertem Frischbitumen und Gesteinskörnungen das Mischgut erzeugt, aus dem anschließend die Probekörper hergestellt werden (Verdichtung). Dabei passiert, ähnlich wie in den Mischanlagen, eine Alterung des Bitumens durch das Aufheizen und Mischen der Rezeptur. Weiters werden durch das Verdichten der Probekörper mechanische Belastungen aufgebracht. Vergleicht man diese Vorgänge mit dem Prozesslauf beim realen Asphalteinbau, dann ergibt sich einschließlich der Kurzzeitalterung eine gute Vergleichbarkeit von realen Vorgängen zu den Laborprozessen. Sowohl die Temperaturbeanspruchung durch das Mischen, als auch die mechanische Belastungen durch den Verdichtungsprozess sind bei der Probekörperherstellung im Labor vorhanden.

Laboralterungsverfahren sind also für die Langzeitalterung von Asphalt notwendig, wobei man hier eine möglichst zeitraffende Variante finden muss. Dabei sollten die realen Vorgänge während der mehrjährigen Gebrauchszeit des Straßenaufbaus gut abgebildet werden. Bei der Langzeitalterung findet eine oxidative Alterung des Asphalts statt, welche man mit verschiedenen Oxidationsmitteln zu simulieren versucht. Die Temperatur spielt hierbei auch eine Rolle, da eine höhere Temperatur die Reaktivität des Oxidationsmittels erhöht und damit eine raschere Versuchsdurchführung erlaubt, welche für die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens sehr wichtig ist. Generell kann man sagen, dass eine Erhöhung der Temperatur um +10 K eine doppelte Reaktionsgeschwindigkeit bewirkt.

Dabei gilt es aber immer die realen Randbedingungen zu beachten, d.h. nicht die Temperatur zu hoch steigen zu lassen und somit die Vergleichbarkeit der Laboralterung zur Feldalterung zu verlieren. Im Osten Österreichs erreicht man im Sommer Asphalttemperaturen bis zu $+63\text{ °C}$,¹ welche man sich bei der Entwicklung einer neuen Methode als Zielwert setzen könnte, um begleitende Erscheinungen wie Adhäsions- bzw. Kohäsionsverluste zu vermeiden.

2.7.4 *Vorhandene Laboralterungsmethoden für Asphalt*

Methoden zur Langzeitalterung dienen der Simulation der Änderungen von wichtigen Gebrauchseigenschaften des Asphaltes bei Liegezeiten nach Einbau von ca. 5- 10 Jahren. Dabei kommt es zu einer Verhärtung und Versprödung des Bitumens und zu einer Verschiebung der Temperaturgebrauchsspanne von Asphaltaufbauten. Dies kann bei tiefen Temperaturen dazu führen, dass sich verstärkt Kälterisse in der Deckschicht bilden können. Grund dafür ist, dass sich durch die Versprödung größere kryogene Zugspannungen aufbauen können und somit die Zugfestigkeit schon bei höheren Temperaturen überschritten wird, als es bei jungen Asphaltaufbauten der Fall ist. Verfahren zur Alterung von Asphaltmischgut wären für die Konzeption neuer Asphaltzusammensetzungen sehr wichtig, da man somit die Veränderungen im Laufe der Jahre im Labor testen könnte und einen Vergleich mit anderen Zusammensetzungen bezüglich der Lebensdauer von Straßen machen könnte. Dazu gibt es schon entwickelte Labormethoden, die versuchen diese Veränderungen im Material mit annehmbarem Zeitaufwand nachzustellen, wobei sich diese auf Verfahren an losem Mischgut bzw. leicht verdichteten Probekörpern beschränken. Angestrebt wird aber, Methoden zu finden, welche eine Alterung an verdichtetem Asphaltkörpern erlauben, da nur diese Rahmenbedingungen der Realität entsprechen [5].

Bei Asphaltalterungsmethoden in Kombination mit Temperatur besteht, abgesehen von der Vergleichbarkeit mit den natürlichen Temperaturbereichen, die Gefahr von Strukturschädigungen durch Kohäsionsverlust des Bitumens. Deswegen sollten derartige Grenzen von $+100\text{ °C}$ nicht überschritten werden[16] bzw. Untersuchungen bezüglich der Erweichungspunkte gemacht werden. Dieser ist allerdings von der Mischform, d.h. ob reines Bitumen oder Mastix etc. verwendet wird, abhängig.

In Tabelle 2.7 werden einige vorhandene Asphaltalterungskonzeptionen aufgelistet, welche aus verschiedensten Parameterkombinationen zusammengestellt sind. Dabei kann man auch sehen, welche Alterungsmedien verwendet werden. Zusätzlich werden in den Kapitel 2.7.5, 2.7.6 und 2.7.7 exemplarisch 3 Alterungsverfahren näher beschrieben.

¹ Gemessen am Probefeld des Projekts „Ökophalt“; TU Wien, 2013 (unveröffentlicht).

Tab. 2.7 Übersicht vorhandener Laboralterungsmethoden *aufbauend auf [16] und [15]*

Alterungsmethode	Temp. [°C]	Dauer [h]	Probeart	DIN EN	Veröffentlichung	Jahr	Alterung durch
Short-Term Oven Ageing (STOA)	135	8-36	loses Material	-	NCHRP	1988	-
Long-Term Oven Ageing (LTOA)	85	120	verdichtete PK	-	NCHRP	1988	-
Low-Pressure Oxidation (LPA)	60, 85	120	verdichtete PK	-	SHRP	1989	Sauerstoff (1,9 l/min)
Rotating Cylinder Aging Test (RCAT)	70 - 100	144	Asphaltmastix	15323	Verhasselt & Choquet	1991	Sauerstoff (4,5 l/h)
Long-Term Ageing	60	48	verdichtete PK	-	NCHRP	1988	-
	60	120 - 240	verdichtete PK	-	NCHRP	1988	Druck (0,7 MPa) Luft
	107	72	verdichtete PK	-	NCHRP	1988	-
Bitutest-Protocol	135	2	loses Material	-	Scholz (PhD-Thesis) Nottingham	1995	-
	85	120	verdichtete PK	-	Scholz (PhD-Thesis) Nottingham	1995	-
Ottawa Sand Mixtures	163	variiert	verdichtete PK	-	AAPT	1952	-
	60	1200	verdichtete PK	-	AAPT	1982	-
Plancher et al.	150	5	verdichtete PK	-	AAPT	1976	-
Hugo & Kennedy	100	96, 168	-	-	AAPT	1985	80 % relative Luftfeuchtigkeit
Khalid & Walsh	60	bis 600	verdichtete PK	-	EE Congr.	2000	Luft (3 l/min)
Kumar & Goetz	60	24-240	verdichtete PK	-	AAPT	1977	Luft Wasser
Kim et al.	60	24-120	verdichtete PK	-	Oregon	1886	Druck (0,7 Mpa) Luft
Pressure Ageing Vessel	100	72	verdichtete PK	14769	EE Congr.	1996	Druck (2,07 Mpa) Luft
Saturation Ageing tensile stiffness conditioning Test (SATS)	85	65	verdichtete PK	12697-45	Transport 157	2004	Wasser Druck
Modelltopf nach Potschka	140	1	loses Material	-	FA 07.121 G85 E		Luft 20% Sauerstoff 80% Stickstoff
Braunschweiger Alterung (BSA)	80	96	loses Material	-	FE 07.208/2004/BGB 2007	2007	Luft
Warmboldscher Alterungstisch	40	720 - 1440	verdichtete PK	-	Diss. Warmbold	1996	Luft UV Licht
Alterung im Wärmeschrank	135- 175	4-24	loses Material	-	Biturmen 2/1999	1999	Luft Stickstoff
Bochumer Alterungsverfahren BAV	100	72	verdichtete PK	-	Cetinkaya (Diss.) Bochum	2011	Erwärmte Druckluft
Wheatherometer Delft	-20 - +60	1,2,3,4, 6,8,10,12	verdichtete PK	-	Hagos (PhD-Thesis) Delft	2008 2011	Weather-Ometer UV Licht Luftfeuchtigkeit NaCl
BRRC long term Re road	60	24, 72, 216, 336	loses Material	-	journal of wuhan university	2010	Sauerstoff (15ml/min)
UV (LCPC) long term	60	336	loses Material	-	journal of wuhan university	2010	UV Licht
Rilem (ISBS - Braunschweig)	85	24, 72, 144, 216	loses Material	-	journal of wuhan university	2010	-
Pr.1-van de ven - circular Steelplate - STA	165	2	Asphaltmastix	-	van de Ven et al: EE congress	2012	-
Pr.1-van de ven - LTA - PAV	80	168	Asphaltmastix	-	van de Ven et al: EE congress	2012	Druck (21 bar)
Pr.1-van de ven - for removal from plate	150	0,5	Asphaltmastix	-	van de Ven et al: EE congress	2012	-
Pr.2-van de ven - STA - oven	135	4	loses Material	-	van de Ven et al: EE congress	2012	-
Pr.2-van de ven - protocol 2 - heated up and compacted	155		loses Material	-	van de Ven et al: EE congress	2012	mechanische Bel.
Pr.2-van de ven - LTA - PAV	70+80	72+96	verdichtete PK	-	van de Ven et al: EE congress	2012	Druck (21 bar)
AASHTO R302 (nchrp) - STA	135	4	loses Material	-	RILEM Advances in [...]Testing [...]of Bituminous Materials	2013	-
c - long-term aging	85	120	verdichtete PK	-	RILEM Advances in [...]Testing [...]of Bituminous Materials	2013	-
Braunschweiger Alterung (BSA)	80	96	loses Material	-	Büchler et al; EE congress	2008	Luft

2.7.5 Bochumer Alterungsverfahren [15]

Versuchsdurchführung

Offenporige Asphaltplatten (PA) in Walzsektorverdichter-Größe werden in einen Aluminiumbehälter mit Silikonmatten umrandet eingebaut, welcher einen Lochboden und einen Lufteinlass am Deckel besitzt um eine Luftdurchströmung von oben nach unten zu gewährleisten. Zusätzlich befindet sich dieser in einem Wärmeschrank bei einer Innentemperatur von +100 °C. Die Durchströmungsdruckluft wird davor in einem Heizbad mittels einer Kupferrohrspirale erhitzt. Den detaillierten Aufbau kann man Abbildung 2.6 und eine Auflistung der Versuchsdaten Tabelle 2.8 entnehmen.

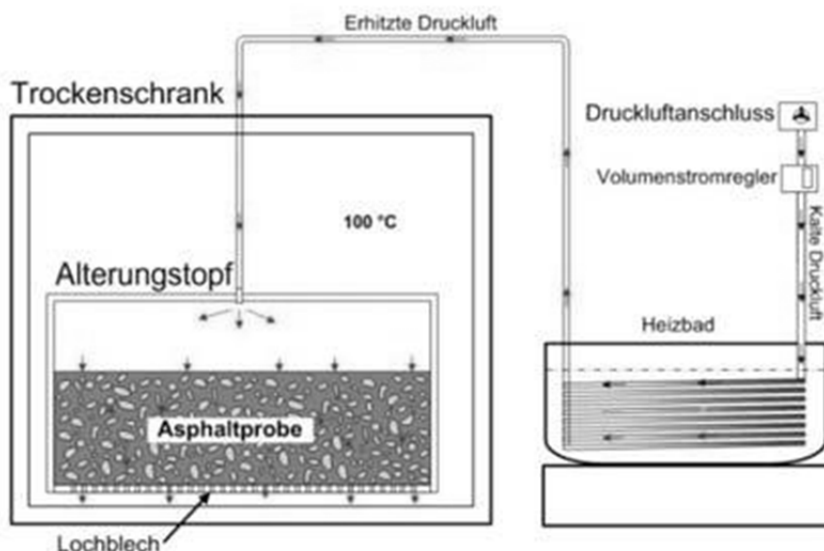


Abb. 2.6 Versuchsaufbau Bochumer Alterungsverfahren [15]

Ergebnisse

In Vorversuchen wurde eine Validierung der Ergebnisse der Bindemittleigenschaften mit natürlich langzeitgealterten Proben durchgeführt. Die Laboralterungsdauer von 72 h entspricht ca. 10 Jahren Feldalterung. Die Veränderung des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ wird in dieser Arbeit mit dem Alterungsindex $|G^*|_{\text{gealtert}} / |G^*|_{\text{ungealtert}}$ beschrieben. Wobei dieser beim Straßenbaubitumen 70/100 mit 5 M-% Anteil am Asphaltmischgut für Prüftemperaturen von +30 / +60 / +90 °C bei ca. 4 / 4,5 / 5,5 [-] und beim Straßenbaubitumen 20/30 bei 3,5 / 5,5 / 5 [-] liegt.

Tab. 2.8 Versuchsdaten

Asphaltform	Verdichtete Probekörper - Platten
Bitumensorte	70/100 ; 20/30
Alterung durch	Erwärmte Druckluft (7500 ml/min)
Temperatur	+100 °C
Alterungsdauer	72 h
Veröffentlichung	2011

2.7.6 Braunschweiger Alterungsverfahren [6, 15]

Versuchsdurchführung

Granuliertes Asphaltmischgut wird auf einem Drahtgitter in einem Wärmeschrank gleichmäßig verteilt. Dabei wird Luft aufgeblasen und bei +80 °C für 96 Stunden gealtert. Die Versuchsparameter kann man Tabelle 2.9 entnehmen.

Ergebnisse

Die Ergebnisse zeigten einen Anstieg des Erweichungspunktes RuK um ca. 12 °C.

Tab. 2.9 Versuchsdaten

<i>Asphaltform</i>	Granuliertes Asphaltmischgut
<i>Bitumensorte</i>	70/100 ; 20/30
<i>Alterung durch Temperatur</i>	atmosphärische Luft
<i>Alterungsdauer</i>	+80 °C
<i>Veröffentlichung</i>	96 h
	2010

2.7.7 Triaxial - Zellen Alterung (Triaxial Cell Aging) [3]

Versuchsdurchführung

Verdichtete Asphaltprobekörper werden in eine Triaxialzelle eingebaut, wie sie in Abbildung 2.7 dargestellt ist, und dabei mit Sauerstoff bzw., Luft durchströmt. Diese haben einen Durchmesser von 10,2 cm bei einer Höhe von 6,4 cm. Bei einem Volumenstrom von 0,11 m³/h, einem Druck von 345 kPa, Temperaturen von +25° bzw. +60 °C werden die Probekörper bis zu 7 Tage gealtert. Alle weiteren Parameter kann man Tabelle 2.10 entnehmen.

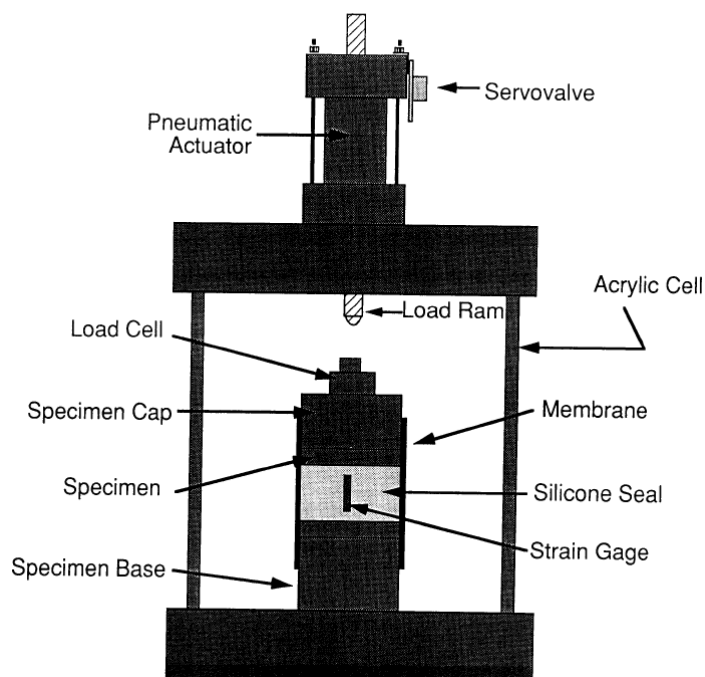


Abb. 2.7 Versuchsaufbau Triaxial Cell Aging [3]

Ergebnisse

Die Ergebnisse der modifizierten Triaxial-Prüfungen zeigten ein Verhältnis des Steifemoduls (Anm. resilient modulus) nach Alterung zu vor Alterung von 1,5 – 1,75 (7 Tage/ +60 °C) bei Sauerstoffdurchströmung. Bei der Luftdurchströmung gab es einen Steifigkeitsanstieg von 5-37 % (3 Tage / +60 °C).

Tab. 2.10 Versuchsdaten

<i>Asphaltform</i>	Verdichtete Probekörper zylindrisch (d=10,2 cm; h=6,4 cm)
<i>Bitumensorte</i>	SHRP Code AAG-1; AAK-1
<i>Alterung durch</i>	Druckluft / Sauerstoff 0,11 m ³ /h (1,83 l/min bei 345 kPa)
<i>Temperatur</i>	+25 / +60 °C
<i>Alterungsdauer</i>	24 / 72 / 168 h
<i>Veröffentlichung</i>	1994

2.7.8 Methodenkritik

Jede der zuvor beschriebenen Methoden besitzt Stärken, jedoch auch einige Schwächen. Das Bochumer Alterungsverfahren verwendet mit 100°C eine Versuchstemperatur, die nicht mehr den realen Temperaturen im Feld entspricht. Weiters besitzt Druckluft als Alterungsmedium nur ein mäßiges Oxidationspotential. Das Braunschweiger Alterungsverfahren hat den großen Nachteil, loses Asphaltmischgut zu altern. Dabei wird das Mischgut nur zum Teil einer Kurzzeit-Alterung unterzogen. Die Simulation der Langzeitalterung entspricht aber nicht den realen Vorgängen. Die Triaxial-Zellen Alterung verwendet Temperaturen in realen Randbedingungen, jedoch sind die Alterungsdauern mit bis zu 168 h sehr ausge dehnt.

Zusammenfassend sind folgende Punkte für eine Alterungsmethode anzustreben:

- Verwendung von verdichteten Asphaltprobekörper
- Senkung der Temperatur und des Drucks in Bereiche, die im Feld vorzufinden sind
- Minimierung der Versuchsdauer
- Maximierung der oxidativen Alterung bei gleichzeitiger Minimierung der thermischen Alterung

2.8 Alterung mit Ozon

2.8.1 Chemische Eigenschaften [40]

Ozon ist ein gasförmiges, stark riechendes und giftiges Gas welches als starkes Oxidationsmittel viele Verwendungen in der Technik findet. Folgend draus ist es:

- Stark brandfördernd
- Hoch reaktiv

In chemischer Definition handelt es dabei um ein bipolares Molekül mit Summenformel O_3 . (Abbildung 2.8)

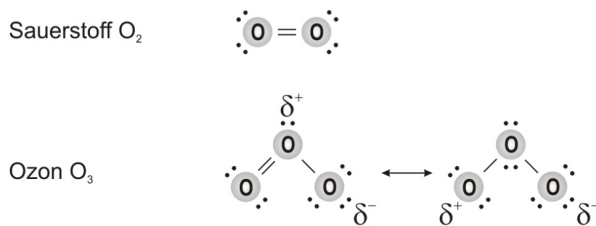


Abb. 2.8 chemische Struktur des Moleküls Ozon [40]

Grundsätzlich muss man unterscheiden in welchen Atmosphärenschichten sich das Ozon befindet. Das Vorkommen des Ozons in der Stratosphäre ist für das Leben auf der Erde enorm wichtig, da es die UV-Strahlung des Sonnenlichts abschirmt. Andererseits wird, vor allem im Sommer immer wieder vom bodennahen Ozon berichtet [21].

Besonders relevant für die Entstehung von Bodennahem Ozon sind dessen Vorläufersubstanzen, welche sowohl natürlichen als auch anthropogenen Ursprung haben können. Dazu zählen unter anderem:

- Flüchtige organische Verbindungen (VOC)
- Stickoxide (NO_x)
- Methan (CH_4) [33].

2.8.2 Erzeugung im Labor [28]

Abbildung 2.9 zeigt die Gleichung, die der Ozonentstehung zu Grunde liegt. Dabei erkennt man, dass für diesen Prozess Energie benötigt wird, die in elektrischer, optischer oder chemischer Form vorhanden sein kann. Folgend aus den verschiedenen Energieformen gibt es auch mehrere Möglichkeiten zur Ozonproduktion in einem Laborumfeld.

- Siemens Ozonisator
- Lichtenergie
- Elektrolyse von Schwefelsäure (über Peroxidisulfat).
- Wasserstoffperoxid oder $HMnO_4$ (aus Schwefelsäure und Kaliumpermanganat)

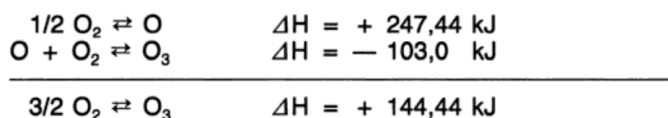


Abb. 2.9 Ozonentstehung [28]

Werner von Siemens entdeckte bereits im 19. Jahrhundert, dass durch elektrische Gasentladung Ozon erzeugt werden kann, auch stille Elektrische Entladung genannt. Dieses Phänomen tritt auch bei Blitzen auf, wo durch die hohen Spannungen Ozon angereichert wird.

Beim Siemens Ozonisator wird Hochspannung zwischen 2 Elektroden beim Durchleiten von sauerstoffhaltigen Gasen Ozon angereichert. Nur 4-10% der zugeführten Energie ist für die Ozonanreicherung verantwortlich. Die restliche Energie wird in Wärme umgewandelt und

muss abgeführt werden, da es sonst zu schnelleren Reaktionen kommt, wie dies in Kapitel 2.9 beschrieben ist. Dafür werden Ozongeneratoren mit metallischen Oberflächen, Kühlrippen und / oder Kühlwassersystemen ausgestattet, wie es in Abbildung 2.10 dargestellt ist.

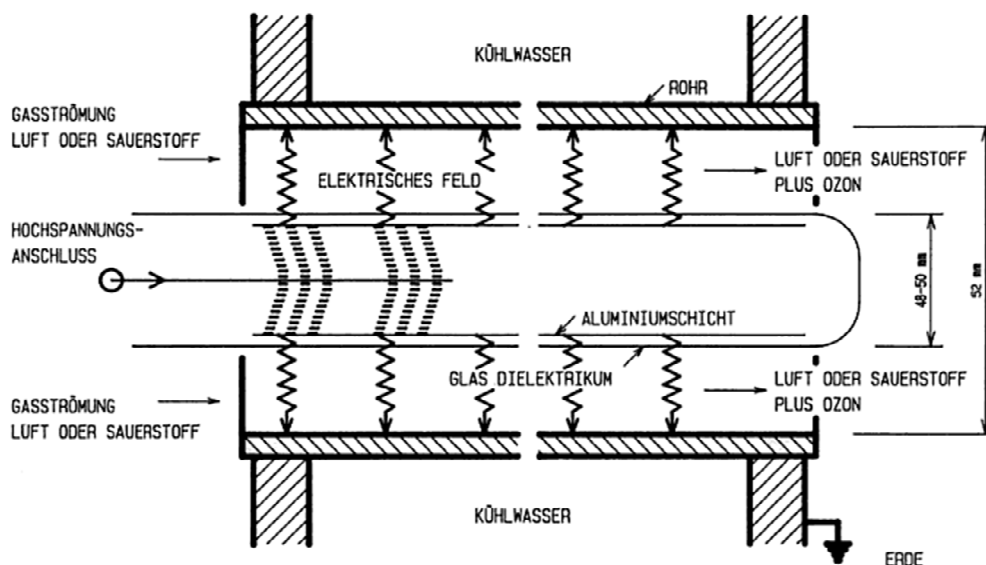


Abb. 2.10 Aufbau eines Ozongenerators[28]

Diese Methode stellt heute die einzig technisch machbare Ozonerzeugung dar, die auch in großen Maßstäben anwendbar ist. Um eine die größtmögliche Konzentration des Ozon im Ausgangsmedium zu erhalten, ist es notwendig dieses zuerst aufzubereiten. Folgende Punkte sind dabei zu beachten:

- Konstante Zusammensetzung des Ausgangsgases
- Keine Verunreinigungen
- Entfernung von möglichen Staubpartikel
- Vorschalten eines Ölabscheiders
- Keine Beinhaltung von Wasserstoff
- Keine organischen Verbindungen
- Trocken (Taupunkt bei -70 bis -60 °C)
- Kühl

2.8.3 Gesundheitliche Aspekte und arbeitsrechtliche Bestimmungen [20]

Wie schon oben beschrieben, ist Ozon ein starkes Oxidationsmittel, welches aufgrund seiner geringen Wasserlöslichkeit tief in den Atemapparat eindringen kann, da es durch den Feuchtigkeitsmantel nicht abgefangen wird, und es somit zu jenen Folgen kommen kann:

- Verschlechterung der Lungenfunktion (strukturelle und entzündliche Veränderungen der Lungenalveolen)
- Zunahme von Asthmafällen
- Atemwegserkrankungen

Bei erhöhten Ozonkonzentrationen ist zu beachten in welchem Umfeld man sich befindet. Die Vorläufersubstanzen der Stickoxide, Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂), haben großen Einfluss auf die Ozonbelastung der Region. Der Straßenverkehr stößt hauptsächlich NO aus, welcher erst zu NO₂ oxidiert werden muss, um zur Ozonproduktion geeignet zu sein. Dies geschieht zumeist mit Hilfe von Ozon selbst. Das heißt, dass vor allem in städtischen Gebieten die Ozonkonzentration, durch Reaktion von NO mit O₃ zu NO₂, sinkt. Diese Stickoxide können durch den Wind in emissionsferne Gebiete verfrachtet werden und dort in Kontakt mit Sauerstoff O₂ und Sonneneinstrahlung zu Ozon umgewandelt werden. Deshalb sind vor allem emissionsferne Gebiete, z.B. Naherholungsgebiete, besonders gefährdet. Zusätzlich nimmt die Ozonproduktion bei Sonnenuntergang wieder ab und die Konzentration sinkt aufgrund der Reaktion mit verunreinigter Luft. Da diese in Städten stärker ausgeprägt ist, sinkt der Ozonanteil an der Luft rasanter als in „Reinluftgebieten“.

Bei Konzentrationen von mehr als 200 µg/m³ kann es zu Reizerscheinungen von Augen, Nase und Rachen kommen. Hustenreiz kann zusätzlich ab einer Konzentration von 240 µg/m³ entstehen. Unklar ist jedoch der Zusammenhang von Müdigkeit und Kopfschmerzen mit erhöhten Ozonkonzentrationen, da diese zumeist bei höheren Temperaturen auftreten und dies der Grund für die beiden Symptome sein kann.

Tab. 2.11 Auszug aus BGI. II Stoffliste [35]

Stoff	CAS	MAK oder TRK	Krebs- er- zeu- gend	TMW		Grenzwert KZW		Dauer [min]	Häufig- keit pro Schicht
				[ppm]	[mg/ m ³]	[ppm]	[mg/ m ³]		
Ozon	[1002-15-6]	MAK	IIIB	0,1	0,2	0,2	0,4	5(Mow)	8x

Legende

CAS Chemical Abstracts Service registry number

B kurzzeitgealtert

MAK Max. Arbeitsplatzkonzentration

Mow Momentanwert

KZW Kurzzeitwert

TRK Technische Richtkonzentration

TMW Tagesmittelwert

Ozon ist in laut Grenzwertverordnung 2011 in die Liste B der krebserregenden Stoffe zugeteilt. Dies bedeutet, dass der Stoff „begründeten Verdacht auf krebserzeugendes Potential“ hat. Die Geruchsschwelle von Ozon liegt bei 40 µg/m³. Vergleicht man die Grenzwerte für Reizerscheinungen bzw. die in Tabelle 2.11 angegeben MAK, dann erkennt man, dass Ozon bereits riechbar ist, bevor es gesundheitsgefährdende bzw. gesetzlich vorgeschriebenen Schwellkonzentrationen erreicht. Dies erleichtert den Umgang mit Ozon im Laborbetrieb enorm, da bei Leckagen sofort reagiert werden kann, ohne gesundheitliche Folgen für die Labormitarbeiter befürchten zu müssen.

2.9 Chemische Reaktionen

Chemische Reaktionen sind Prozesse bei denen es zu Stoffumwandlungen kommt. Dabei werden folgende Bestandteile verändert [4]:

- Relative Lage der Atomkerne im Raum
- elektronische Struktur der beteiligten Atome, Ionen und Moleküle [4]

2.9.1 Reaktionsgeschwindigkeiten [4]

Der zeitliche Ablauf einer chemischen Reaktion ist von 2 Parametern abhängig

- Konzentration
- Temperatur

Die Teilchenkonzentration hat einen wesentlichen Anteil an der erzielten Reaktionsgeschwindigkeit, da die Chance eines Zusammenstoßes zweier reagierender Teilchen umso größer ist, je mehr reaktionsfähige Teilchen im Raum vorhanden sind. Aus diesem Grund bewirkt eine Druckerhöhung bei Gasen eine schnellere Reaktion, da es zu einer Teilchenverdichtung kommt.

Auch die Temperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Die Teilchen des Gases bewegen sich abhängig von der vorherrschenden Temperatur mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten. Nach Stoßtheorie muss eine gewisse kinetische Mindestenergie vorhanden, damit bei einer Kollision zweier Teilchen eine Reaktion stattfinden kann. Da bei höheren Geschwindigkeiten größere kinetische Energien vorhanden sind, steigt die Reaktionsgeschwindigkeit mit steigender Temperatur. Abbildung 2.11 zeigt die Häufung der Teilchen bei verschiedenen Temperaturen in Bezug auf die Geschwindigkeit. Dabei sieht man, dass bei höheren Temperaturen eine flachere Verteilung vorhanden ist und somit mehr Teilchen mit höheren Geschwindigkeiten Reaktionen auslösen können.

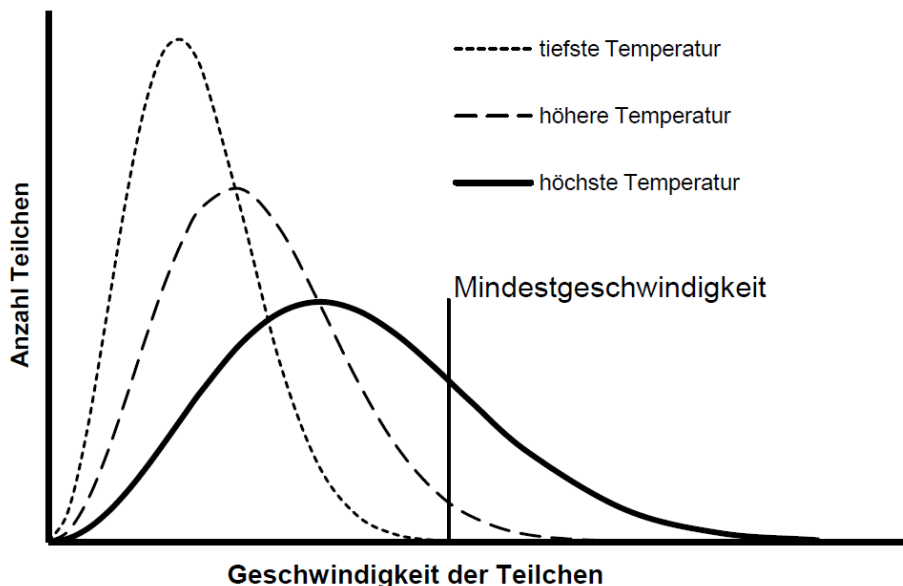


Abb. 2.11 Einfluss der Temperatur auf die Teilchenhäufung in Bezug auf die Teilchengeschwindigkeit [42]

VAN'T HOFF beschreibt mit der RGT-Regel (Reaktionsgeschwindigkeit-Temperatur-Regel), dass die Anzahl der Teilchen bei Erhöhung der Temperatur um 10 K um das Zwei- bis Vierfache ansteigt. Somit erhöht sich auch die Reaktionsgeschwindigkeit um das Zwei- bis Vierfache.

3 Alterungsversuche – Wiener Methode

3.1 Alterungsmethode

Die Grundidee dieses Versuches ist einen Asphaltprobekörper einem gasförmigen Oxidationsmittel auszusetzen, um eine Alterung hervorzurufen. Im März 2013 gab es Vorversuche, bei denen mit Hilfe eines Unterdruckes ein flüssiges Oxidationsmittel in den Probekörper eingebracht wurde. Da die Ergebnisse nicht erfolgsversprechend waren, änderte man den Probeablauf, indem man flüssige und gasförmige Oxidationsmittel mit Hilfe eines Überdruckes durch den Probekörper hindurch strömen ließ. Dabei soll ein schonenderer Umgang mit dem Asphaltgefüge gewährleistet werden. Die Ergebnisse der verschiedenen Methoden zeigten, dass eine Alterung mit ozonangereichertem Sauerstoff (vgl. Abbildung 3.3) am wirkungsvollsten ist.

3.1.1 Versuchsaufbau

Druckzelle

Der Asphaltprobekörper wird in die Druckzelle zwischen 2 Filtersteinen – jeweils ein Filterpapier oben/unten - und den außenliegenden Probekörperböcken eingebaut. Auf letztere wird die umschließende Latexhaut mit jeweils 2 Gummidichtungsringen oben und unten befestigt, wobei als Trennlage zwischen Probekörper und Latexmembran eine Adhäsionsfolie angebracht wird. Diese dient als Alterungsschutz für die ozonempfindliche Umhüllungsmembran und reicht bis nahe der innenliegenden Gummiabdichtungsringe. Dort wird die Folie mittels Isolierband mit dem Probekörperbock verklebt (siehe Abbildung 3.1 rechts). Am oberen Probekörperbock werden 2 Ableitungsschläuche angebracht, welche das durchströmende Gas über den Zellboden ableiten. Am unteren Ende befinden sich 2 weitere Schlauchanschlüsse mit Ventilen, die einerseits für die axiale Durchströmung und andererseits für die Zelldruckflüssigkeit dienen. Die Probekörper wurden allesamt mit der offeneren Seite, das ist die Oberseite bei der Walzsegmentverdichtung, eingebaut, um ein optimales Einströmen in den Probekörper zu gewährleisten.

Drucksensor

Dieser wird benötigt um den Zelldruck bzw. den Druck in den Durchströmungszuleitungen zu messen.

Druckerzeuger

Das Druckspeichersystem „Aircontrol“ LT 1300-10 erzeugt den notwendigen Überdruck für den Stützdruck der Druckzelle (ca. 80 kPa). Gespeist wird es vom Labordruckluftsystem, welches gleichzeitig auch für die Durchströmung dient, wobei für letzteres ein Druckminderer vorgeschaltet ist.

Druckminderer

Dieser dient der Regulierung des Durchströmungsdrucks.

Hilfsmittel

- 2 Stk. Filtersteine (Durchmesser 100 mm)
- 4 Stk. Filterpapier (Durchmesser 100 mm)

Diese sollten nach jedem Versuch gewechselt werden, da sie durch Feinteile verlegt werden können und damit den Durchfluss vermindern.

- 1 Stk. Latexüberzug (ca. 120 mm Höhe)

Die Dicke des Überzuges sollte nicht zu dünn gewählt werden, da einerseits das Oxidationsmittel diesen versprödet, andererseits aber auch der Überdruck den Überzug in die Hohlräume des Probekörpers presst und an deren scharfen Kanten reißen kann.

- 4 Stk. Gummi-O-Ringe (86 x 4 mm)
- Gummidichtungen für Druckzelle
- Adhäsionsfolie
- Klebeband

Ozonerzeuger Oxy3

Bei diesem Gerät der Firma Ozongeräte Produktion GmbH wird mittels einer Hochspannungs-Entladungsröhre Sauerstoff mit Ozon angereichert. Dabei wird eine Konzentration von maximal 1,4 g/h bei einem maximalen Durchfluss von 3,0 l/min erreicht.

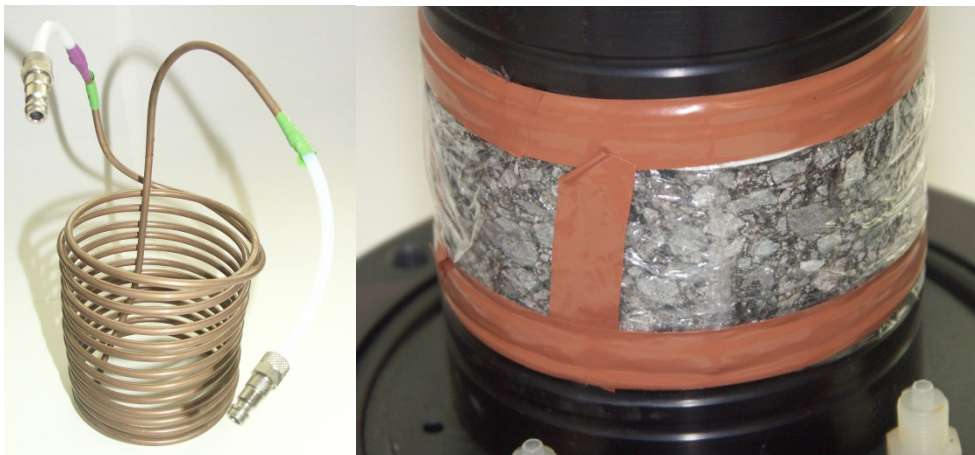


Abb. 3.1 links: Kupfer-Nickel-Anwärmspirale - rechts: Verklebung der Adhäsionsfolie mit den Probekörperböcken

Anwärmspirale

Diese selbst gebaute Spirale (siehe Abbildung 3.1 links) dient zur Erhitzung des Ozons/Sauerstoffs um eine größere Reaktivität hervorzurufen. Das Ausgangsprodukt ist ein 5 m langes Bremsrohr (Cu Ni 10 Fe 1 Mn) der Firma Cohline (Durchmesser = 4,75 mm, Wandstärke = 0,7 mm). Als bessere Alternative zu diesem Kupfer / Nickel – Rohr wäre ein Produkt aus Edelstahl oder Aluminium, da dieser korrosionsbeständiger ist. Allerdings ist das verwendete Produkt bezüglich Länge und Durchmesser sehr gut geeignet, weshalb hier ein Kompromiss eingegangen wurde.

Magnetrührer mit Becherglas

Als Heizmedium wurde handelsübliches Rapsöl verwendet, welches für diese Zwecke gut geeignet ist, da es bei Temperaturen bis zu +75 °C kaum verdunstet und einen Flammpunkt von über +170 °C hat.

3.1.2 Herausforderungen bei der Durchströmung mit ozonangereicherter Druckluft

Beim Versuch mit Ozon als Durchströmungsmedium wird nicht nur das Bitumen im Asphalt gealtert, sondern auch alle übrigen Versuchseinrichtungen, die nicht stabil gegenüber Ozon sind. Dies hatte die Folge, dass folgende Versuchseinrichtungen Schäden davon trugen.

Druckzelle

Die Zelle und sämtliche Einbauten (Probekörperböcke, Ventile), die mit dem Durchströmungsmedium in Kontakt kommen, müssen aus ozonbeständigen Materialien gefertigt sein, da es sonst sehr schnell zu Schäden führt.

Latex-Trennmembran

Die Membran, die den Probekörper umhüllt und aus Latex gefertigt ist, weist keine sehr hohe Ozonbeständigkeit auf und würde bei Kontakt des Durchströmungsmediums sofort verspröden und reißen. Um dies zu verhindern wurde der Probekörper mit zweilagiger Adhäsionsfolie umwickelt, welche die Membran vor dem Ozon schützt. Zusätzlich wurden die Ränder der Folie mit Klebeband an den Probekörperböcken verklebt. (siehe Abbildung 3.1 rechts)

Schläuche

Alle Schläuche, die nach der Ozonanreicherung mit dem Durchflussmedium Kontakt aufnehmen, müssen aus dem gegenüber Ozon beständigen Material Polytetrafluorethylen – PTFE / Teflon® - gefertigt sein. Bei den Zuführungsschläuchen, in denen sich nur Druckluft befindet, können auch Schläuche aus Polyamid –PA- verwendet werden.

3.1.3 Versuchsablauf

Die detaillierte Anordnung, der im vorigen Kapitel beschriebenen Utensilien, ist in Abbildung 3.3 und Abbildung 3.2 dargestellt.

Die kühle Druckluft, die aus der Druckluftversorgung stammt, wird durch den Ozongenerator geleitet, welche die durchströmende Luft mit Ozon und Stickoxiden anreichert. Danach wird dieses Gasgemisch im Ölbad (+70 °C) des beheizbaren Magnetrührers angewärmt und zum Probekörper weitergeleitet. Dabei wird dieser von der elastischen Membran und dem Stützdruck so fest umschlossen, dass das Gas gezwungen wird durch den Probekörper hindurchzuströmen. Die Druckzelle bzw. das Ölbad inkl. Magnetrührer sind in einem Wärmeschrank positioniert. Die ozonangereicherte Druckluft wird nach der Probekörperdurchströmung über einen Punktabzug abgeleitet.



Abb. 3.2 Foto des Versuchsaufbaus im Wärmeschrank

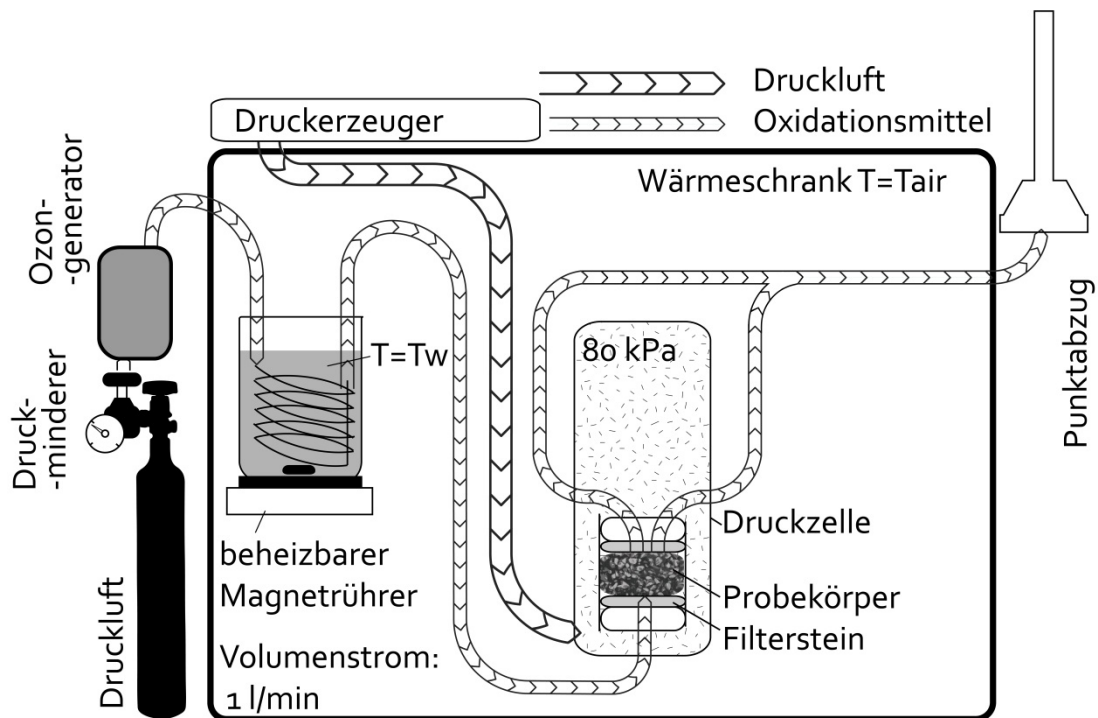


Abb. 3.3 Skizze des Versuchsaufbaus

3.2 Wahl der zu untersuchenden Parameter

3.2.1 Einflussgrößen

Temperatur des Wärmeschranks

In Kapitel 2.9 wurde bereits der Einfluss der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeit von chemischen Reaktionen beschrieben. Des Weiteren hat natürlich die Wahl der Temperatur Auswirkungen auf die Aufteilung von thermischer und oxidativer Alterung, wobei für die Langzeitalterung eine oxidative Laboralterung bevorzugt wird, da dies eher den realen Vorgängen entspricht. Deswegen sollte die Temperaturwahl ein Optimum ergeben zwischen

- Realistische Feldalterungstemperatur (Maximumsbedingung)
- Akzeptable Reaktionsgeschwindigkeit (Minimumsbedingung)
- Hohe oxidative Alterung (Maximumsbedingung)

Temperatur des Durchflussmediums

Die Temperatur des Durchflussmediums hat auf der einen Seite einen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit des Gases. Auf der anderen Seite gibt es aber auch Temperierungseinflüsse, da bei hohen Volumenströmen der Probekörper abgekühlt wird und somit wieder die Reaktion gehemmt wird. Da die Temperatur des Durchflussmediums nicht variiert wurde, könnte durchaus der Fall eingetreten sein, dass bei einer niedrigen Wärmeschranktemperatur der Probekörper trotzdem die Temperatur des Mediums angenommen hat und somit wärmer war als die Umgebung.

Volumenstrom des Durchflusses

Hier hat vor allem die Hochspannungsröhre zur Ozonanreicherung besonderen Einfluss. Diese Röhren sind für gewisse Volumenströme konzipiert. Übersteigt die Durchflussrate die maximale Kapazität der Röhre, dann sinkt die Ozonkonzentration der angereicherten Luft. Hier gilt es also, den Punkt zu finden, bei dem die Ozonkonzentration, bei möglichst hohem Volumenstrom, am höchsten ist, da ein hoher Durchfluss mehr reaktionsfähige Teilchen durch den Probekörper schickt.

Zusammensetzung der Ausgangsdruckluft

Das Ausgangsmedium der Durchströmung kann entweder reiner Sauerstoff sein oder ein atmosphärisches Gasgemisch sein. Reiner Sauerstoff hat den Vorteil, dass mehr Ozon angereichert werden kann und somit bei gleichem Volumenstrom, ein reaktiveres Gasgemisch entsteht. Ein Gasgemisch, welches hauptsächlich aus Sauerstoff und Stickstoff besteht entspricht eher den Randbedingungen der Feldalterung, da durch die Hochspannungsröhre auch Stickoxide gebildet werden. Als Entscheidungsgrundlage treten hier vor allem die Kosten in Erscheinung, da zu den meisten Laboreinrichtungen eine Druckluftversorgung zählt, eine Sauerstoffversorgung aber oft in Gasflaschen gekauft werden muss und somit hohe laufende Kosten verursacht.

Anreicherungspotential der Röhre (Ozonkonzentration)

Wie schon in Kapitel 2.8.2 aufgelistet gibt es mehrere Faktoren, die für eine optimale Ozonanreicherung des Ausgangsgases zu beachten sind. Hier tritt im Zusammenhang mit der Auswahl des Ozongenerators und dessen eingebauten Ozonröhre, die Dimensionierung und die Kühlung dieses Bauteils in den Vordergrund. Je besser die erzeugte Wärme von der Röhre abgeführt werden kann, desto mehr Ozon kann dadurch angereichert werden. Auch die Größe der Hochspannungsröhre hat einen Einfluss auf die Ozonkonzentration, da bei zu hohem Volumenstrom in Bezug auf die Dimensionierung, die Ozonkonzentration wieder abnimmt.

Reaktionspotential der Einbauten

Bei den verwendeten Versuchseinrichtungen ist besonders darauf zu achten, dass diese eine gute Beständigkeit gegenüber Ozon besitzen. Dies hat zwei Gründe:

- Schäden an Einbauten
- Verminderung des Reaktionspotentials vor dem Probekörper

Ersteres ist für die Langlebigkeit des Aufbaus von Bedeutung, aber auch um die Versuche ohne Unterbrechungen aufgrund von Schäden durchführen zu können. Zweiteres hat besonderen Einfluss auf die Effektivität der Alterungsmethode und somit auf die Zeit, die benötigt wird, um ein gewisses Alterungsniveau zu erreichen.

Hohlraumgehalt / Durchlässigkeit

Die Probekörper weisen verschiedene Raumdichten auf, welche direkt Einfluss auf die Durchlässigkeit des Gasgemisches nehmen. Um einen konstanten Volumenstrom zu erhalten, muss man den Durchströmungsdruck bei den jeweiligen Probekörpern variieren.

3.2.2 *Mögliche Temperaturgrenzen für die Alterungsversuche*

Nachdem das Bitumen mit steigender Temperatur die Eigenschaften verändert, kann es bei höheren Temperaturen vorkommen, dass es zu Ablöseerscheinungen vom Gestein kommt. Um dies ausschließen zu können dient als Entscheidungsgrundlage der Erweichungspunkt Ring und Kugel nach EN 1427 [7]. Dabei ist zu beachten, dass der Erweichungspunkt von reinem Bitumen bei niedrigeren Temperaturen liegt, als wenn man Bitumenmastix, wie sie im Asphalt wirksam ist, prüft. Beim Asphaltgefüge haben auch noch größere Korngruppen des Sands und Kies Einfluss darauf, sodass der Erweichungspunkt weiter gesteigert wird.

Tab. 3.1 Erweichungspunkt RuK verschiedener Bitumen

<i>Labor- code</i>	<i>Bitu- men</i>	<i>Anmerkung</i>	<i>EPRuK [°C]</i>
B287A	70/100	ungealtert	+46,7
B331A	70/100	Bitumen/Füller=1/1,26	+54,3
B287B	70/100	MA-Mischgut rückgewonnen	+52,6
B337B_LRTF	70/100	Bitumen/Füller=1/1,26	+59,4

Die Erweichungspunkte aus Tabelle 3.1 lassen erkennen, dass diese bei kurzzeit-gealterten Bitumen (B337B_LRTF) bzw. bei Mastix, im Vergleich zum Frischbitumen deutlich ansteigen. Bitumen, welche aus dem Mischgut rückgewonnen wurden und somit bereits dem

größten Teil der Kurzzeitalterung unterzogen wurden, erweichen erst bei einer Temperatur, die ca. 6 K höher liegt als beim Frischbitumen. Bei Mastix erhöht sich der EP RuK ebenfalls sehr stark. Beim Frischbitumen um ca. 9 K und bei im Labor kurzzeitgealterten Bitumen (RTFOT) um ca. 14 K.

Diese Daten lassen erkennen, dass bei einer Asphaltalterung von +60°C noch keine Verflüssigung des Bitumens auftreten sollte. Auch in Anbetracht, dass es sich bei den Daten um Versuche an reinem Bitumen bzw. Mastix handelt. Die Verflüssigung im Asphaltgefüge sollte nochmals um einiges höher liegen.

3.2.3 Prüfprogramm

Zu variierende Parameter:

- Temperatur des Wärmeschrankes
- Dauer der Alterung

Gewählte Temperaturen:

- +45 °C
- +60 °C
- +75 °C

Gewählte Alterungszeiten:

- 1 Tag
- 2Tage
- 3 Tage
- 6 Tage

Der Tabelle 3.2 kann man die Kombination der verschiedenen Prüfparameter entnehmen.

Tab. 3.2 Prüfprogramm

		Temperatur [°C]		
		+45	+60	+75
Dauer [d]	1	x	x	x
	2	x	x	x
	3	x	x	x
	6		x	x

Aufgrund der Ergebnisse des ersten Prüfprogramms, siehe Kapitel 3.2.3, wurde eine zweite Versuchsreihe zusammengestellt, welche dazu dient, die Wiederholbarkeit der Methode zu bestätigen. Dazu wurde als Randbedingung eine 4 tägige Alterung bei +60°C gewählt, welche in 3-facher Form durchgeführt wird.

3.3 Laborcodes

Zur besseren und schnelleren Erkennbarkeit einzelner Versuchsdaten wurden Laborcodes, sowohl für die Alterungsversuche, als auch für die Bitumenrückgewinnungen, vergeben.

3.3.1 Laborcode für die Alterungsversuche

Die Laborcodes kann man in mehrere Bereiche untergliedern, wobei sie zusammengesetzt folgende Form aufweisen: C₄O₃air60.

Das „C“ steht für eine Langzeitalterung. Der Buchstabe „B“ würde bedeuten, dass die Probekörper hergestellt wurden, aber keiner weiteren oxidativen oder thermischen Belastung ausgesetzt wurden, sprich nur kurzzeitgealtert.

Die Zahl an der 2. Stelle bedeutet die Alterungsdauer in Tagen. Beispielsweise würde die „4“ eine 4-tägige Alterung beschreiben. „O₃air“ bedeutet, dass die Probekörper mit ozonangereicherter Druckluft durchströmt wurden. Alternativ gäbe es die Bezeichnungen „O₂“ für Sauerstoffdurchströmung und bzw. „O₃“ für eine Durchströmung mit ozonangereichertem Sauerstoff. Die letzten beiden Zahlen symbolisieren die Temperatur des Wärmeschrankes. Alternativ wurde ein Versuch ohne Anwärmspirale durchgeführt, wobei dazu noch ein nachgestelltes „05“ angefügt wurde.

3.3.2 Laborcode für die Bitumenproben

Für die Bitumenproben ist bereits ein laborintern entwickelter Code vorhanden, der auch bei anderen Projekten angewendet wird und somit ein eindeutiges klassifizieren der Proben zulässt. Dabei wird grob in Proben mit Feldalterung bzw. Laboralterung unterschieden.

Tab. 3.3 Laborcode für laborgealterte Bitumen

Laborcode	Alterungszustand	Laboralterung	Methode	Variante
	A			
	B		RTF	
			PAV	
BXXX		L	3RT	
	C		O ₃	
			O ₂	VXX
			O ₃ air	

Legende

A	Frischbitumen	B	kurzzeitgealtert
C	langzeitgealtert	L	laborgealtert
RTF	Rolling Thin Film Oven Test	PAV	Pressure Aging Vessel
O ₂	Alterung mit reiner Sauerstoff	VXX	Variantennummer
O ₃	Alterung mit ozonangereichertem Sauerstoff	3RT	3fach Rolling Thin Film Oven Test
O ₃ air	Alterung mit ozonangereicherter Druckluft		

3.3.3 Probekörper für die Laboralterung

Folgende Probekörper wurden für die Alterung ausgewählt und sind in Tabelle 3.4 aufgelistet.

Tab. 3.4 Alterungsprobekörper

<i>Probekörper- nummer</i>	<i>Hohlraumgehalt Verf. D [Vol-%]</i>	<i>Alterungs- parameter</i>	<i>Bitumencode</i>
E637E	10,9	C6O3air60	B287C_LO3air_V1
E636G	9,7	C6O3air60oS	B287C_LO3air_V2
E636H	11,0	C3O3air60	B287C_LO3air_V3
E637C	12,2	C3O3air75	B287C_LO3air_V4
E636F	11,6	C6O3air75	B287C_LO3air_V5
E636A	11,3	C2O3air60	B287C_LO3air_V6
E636B	10,2	C3O3air45	B287C_LO3air_V7
E636C	10,6	C2O3air75	B287C_LO3air_V8
E640A	12,1	C6O3air60	B287C_LO3air_V9
E639A	11,2	C1O3air60	B287C_LO3air_V10
E641D	12,2	C1O3air75	B287C_LO3air_V11
E641H	11,5	C2O3air45	B287C_LO3air_V12
E641F	11,0	C1O3air45	B287C_LO3air_V13
E641C	10,8	C4N275	B287C_LN2
E641A	14,5	-	B287B_L000
E639B	9,3	C1,5O3air60	B287C_LO3air_V14
E636D	11,6	C4O3air60	B287C_LO3air_V15
E637B	10,4	C4O3air60	B287C_LO3air_V16
E643G	11,2	C4O3air60	B287C_LO3air_V17

3.4 Kontrollalterung in Stickstoffatmosphäre

Bei Alterungsversuchen lässt sich schwer feststellen, welcher Anteil thermischer bzw. oxidativer Alterung zufällt. Darum wurde als Kontrolltest ein Probekörper in die Druckzelle eingebaut und mit Stickstoff durchströmt. Auch als Stützdruckmedium wurde Stickstoff verwendet. Wesentlicher Unterschied zur Alterungsmethode war, dass es keine Durchströmung gab, da dies aufgrund des Stickstoffs zu kostenintensiv gewesen wäre.

Dabei wurden als Randbedingung eine 4-tägige Lagerung bei +75 °C gewählt.

4 Materialien und Prüfmethode

4.1 Materialien

4.1.1 Gestein

Für die Herstellung der Probekörper wurden als Gesteinskomponente im Asphalt Produkte mit der Handelsbezeichnung „Loja“ verwendet. Dieser Name leitet sich aus der Bezeichnung des Abbauwerkes (Hartsteinwerk Loja Betriebs GmbH, 3680 Persenbeug), in dem diese Gesteine gewonnen werden, ab. Im Südwesten des niederösterreichischem Waldviertels erstreckt sich der „Lojagraben“, wobei sich der Steinbruch im Gemeindegebiet Persenbeug befindet. In diesen Gebieten grenzt die Böhmisches Masse mit den Kristallinen an das Alpenvorland mit Großteils tertiären und quartären Lockergesteinen, wobei zweitens nach Süden hin ersteres überdeckt [1]. Nach geologischen Gesichtspunkten handelt es sich bei diesen Gesteinen um einen Porphyrit [2]. Phorphyrite setzen sich aus Plagioklas und einem dunklen Gemengeteil zusammen, der aus den Gesteinen Hornblende, Biotit oder Augit besteht. Die kompakte Grundmasse hat ein schwärzlich bis grünlich oder grünlich bis bräunliches Aussehen, wobei durchaus auch Einsprenglinge vorhanden sein können [32]. Da es sich hier um ein Ganggestein handelt, dessen Mächtigkeiten in der Natur oft nicht so große Ausmaße annehmen, sodass sie ohne fremde Bestandteile abgebaut werden können, kann es zu Verunreinigungen kommen [36]. Alle relevanten Kennwerte sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tab. 4.1 EU Konformitätserklärung gemäß EN 13242, ZA.1 und ZA.2.2 [2]

Eigenschaft	Abschnitt	Anmerkungen	Prüfverfahren	EBK	EBK	EBK	EBK
				0/2	2/4	4/8	8/11
Korngruppe	4.1.2	---	---				
Korngrößenverteilung	4.1.3	---	EN 933-1	G _{F85} , G _{r20}	G _C 90/15	G _C 90/15	G _C 90/15
Gehalt der Feinteilen	4.1.4	< 0,0,63	EN 933-1	f ₁₀	f ₁	f ₁	f ₁
Reinheit Qualität der Feinteile	4.1.5	---	EN 933-9	MB _{F10}	MB _F NPD	MB _F NPD	MB _F NPD
Kornform	4.1.6	>2 mm	EN 933-4	---	SI ₁₅	SI ₁₅	SI ₁₅
Anteil gebrochen. Körner	4.1.7	---	EN 933-5	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}	C _{100/0}
Kantigkeit D<2mm	4.1.8		EN 933-6	E _{C535}	---	---	---
Widerstand gegen Zertrümmerung	4.2.2	LA 8/11	EN 1097-2 Abschn. 5	LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀	LA ₂₀
Widerstand gegen Polieren	4.2.3	PSV 8/11	EN 1097-8	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀	PSV ₅₀
Widerstand gegen Oberflächenabrieb	4.2.4	AAV bei Deckschichten	EN 1097-8 Anhang A	AAV NPD	AAV NPD	AAV NPD	AAV NPD

Widerstand gegen Verschleiß	4.2.5	---	EN 1097-1	M _{DE} NPD	M _{DE} NPD	M _{DE} NPD	M _{DE} NPD
Rohdichte	4.2.7	ρ_a	EN 1097-6	2,81- 2,87	2,81- 2,87	2,81- 2,87	2,81- 2,87
Wasseraufnahme	4.2.9	---	EN 1097-6	WA _{24,1}	WA _{24,1}	WA _{24,1}	WA _{24,1}
Frostwiderstand	4.2.9	Falls erforderl.	EN 1367-1	F ₁	F ₁	F ₁	F ₁
Affinität zu bit. Bindemittel Was-serlagerung bei 40 °C	4.2.11	Anzahl Steine Bedeckung in %	EN 12697-11 Punkt B	≤ 1 ≥ 80	≤ 1 ≥ 80	≤ 1 ≥ 80	≤ 1 ≥ 80
Widerstand gegen polieren	---	PWS _{0,2/0,4}	RVS 11.06.23	≥ 0,50	---	---	---

4.1.2 Füller

Als Fremdfüller wurde für die Probekörper Kalksteinmehl verwendet, welches aus gewaschenem, gemahlenen und feuergetrockneten Kalkstein besteht. Dabei darf der Feuchtegehalt nicht mehr als 0,1 % betragen. Die chemische Formel des Rohkalksteins ist CaCO₃. Bezogen wurde dieser Füller mit der Dichte von 2,7 g/cm³ von der Firma Teerag-Asdag AG. Die Bestimmung der Korngrößenverteilung hat ergeben, dass 76,5 M-% kleiner als die Korngröße 0,063 mm und 95 M-% kleiner als 0,125 mm sind.

4.1.3 Bitumen

Die Sortenwahl des Bitumens fiel auf ein 70/100 Straßenbaubitumen mit dem internen Laborcode B287A, welches von der Firma OMV AG produziert wurde. Diese Sorte ist in Österreich für Deckschichten die häufigst verwendete und somit besonders relevant bzgl. einer Einstufung der Alterungsbeständigkeit. In Tabelle 4.2 kann man die Kennwerte einiger konventioneller und gebrauchsvorhaltensorientierter Bitumenversuche ablesen.

Tab. 4.2 Bitumenkenngrößen

Versuch	Kennwertbezeichnung	Einheit	Kennwert
Penetration	Pen	[1/10 mm]	90,9
Ring und Kugel	EP RuK	[°C]	+46,7
DSR / BBR	SHRP PG	[°C]	58-22
Brechpunkt nach Fraaß	BP Fraaß	[°C]	-20,3

4.1.4 Sieblinien

Die Sieblinien für die Asphaltprobekörper, des Typs AC 11 deck 70/100, A₁, G₁, wurden nach den Bestimmungen der Normenserie ÖNORM B 3580-1 – Erstprüfung von Asphalten – erstellt [34]. Ausgangsmaterialien waren, neben der Füllerkomponente, „Loja“-Gesteinsmischungen der Korngruppen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/11. Abbildung 4.1 zeigt die unteren und oberen Grenzwerte, laut ÖNORM B 3580-1 [34], der einzelnen Korngruppen, zwischen denen sich die Gesamtsieblinie befinden muss. In Tabelle 4.3 erkennt man die Anteile der einzelnen Fraktionen mit Berücksichtigung des Bitumenanteils.

Tab. 4.3 Rezeptur mit Bindemittelgehalt

Korngruppe/ Bitumen	Handelsbe- zeichnung	Laborcode	Anteil [M-%]
Füller	Kalksteinmehl	F021	5,2
0/2	Loja	G606	33,2 - 35,4
2/4	Loja	G615	8,2 - 13,4
4/8	Loja	G620	21,6 - 24,1
8/11	Loja	G607	21,4 - 21,9
Bitumen	70/100	B287A	5,20
SUMME			100,00

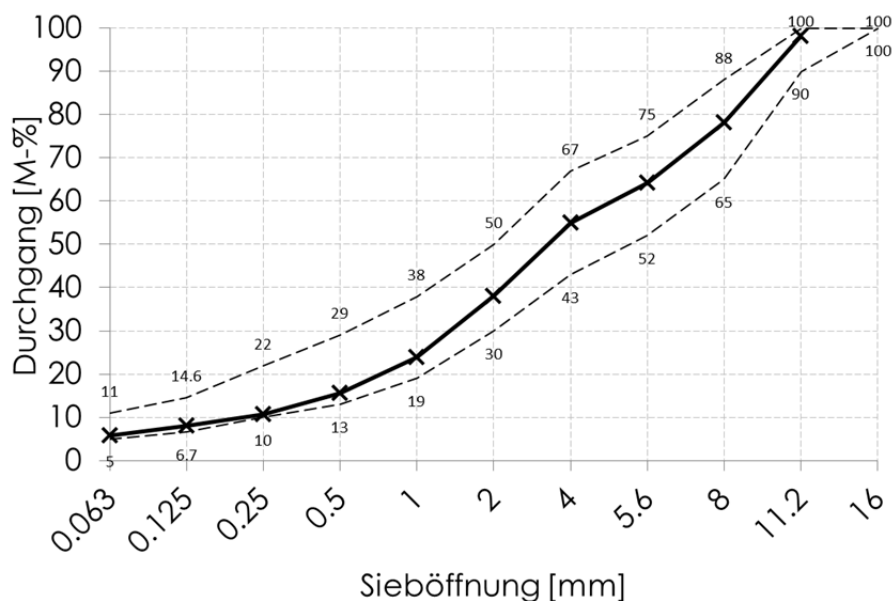


Abb. 4.1 IST-Sieblinie und Sieblienspanne und -grenzen nach ÖNORM B 3580-1.

4.1.5 Asphaltmischgut

Für die Alterung kommen primär nur Asphalte in Frage, die für Deckschichten verwendet werden können. Dies hat den Grund, dass die obersten Schichten am meisten den natürlichen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind und somit eine vermehrte Oxidation des Bindemittels aufweisen. Die Wahl der Asphaltmischguttpe fiel auf Asphaltbeton – AC 11 deck 70/100, A1, G1 -, da es sich hierbei um eine der am häufigsten eingesetzten Deckschichttypen handelt. Alternativ könnten natürlich auch offenporige Asphalte bzw. Splitt-Mastix-Asphalte verwendet werden. Erst genannte sind in Österreich aufgrund des Mehraufwandes für den Winterdienst weniger verbreitet. SMA werden sehr häufig als Deckschichten auf Schnellstraßen und Autobahnen verwendet, wobei dieser Typ, für die in dieser Arbeit beschriebene Alterungsmethode, Vorteile hätte. Aufgrund der Ausfallkörnung ist dieser Asphalttyp von Anfang an durchlässiger und somit auch alterungsanfälliger. Weiters würde dadurch mehr Gas hindurchströmen können und dabei eine schnellere Laboralterung ermöglichen.

4.2 Herstellung der Probekörper

4.2.1 Kenngrößen und Herstellung von Mischgut und Probekörper

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Versuchsreihe wurden Platten hergestellt, deren Mischgut in einem Gegenlaufzwangsmischer nach EN 12697-35 [12] gemischt wurde. Anschließend wurde diese mittels Walzsegmentverdichter der Firma Freundl / Wenningsen nach EN 12697-33 [11] verdichtet und jeweils 8 Probekörper (DN= 100 mm ; H=40 mm) aus-gebohrt. (Abbildung 4.2)

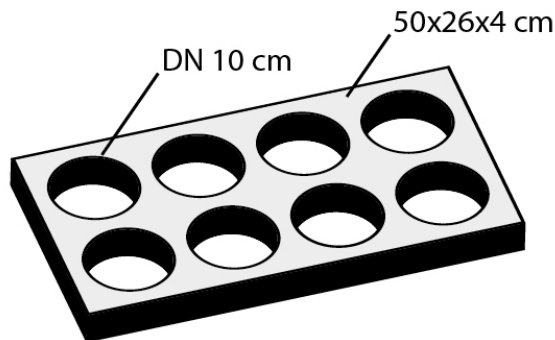


Abb. 4.2 Schematische Darstellung der Asphaltplatte nach der Probekörperausbohrung

4.2.2 Ermittlung der Raumdichte der Probekörper

Bei der Ermittlung der Raumdichte und in weiterer Folge auch der Hohlraumgehalte stehen nach EN 12697-6 vier Verfahren zur Verfügung, welche jeweils für besondere Randbedingungen empfohlen werden.

In Tab 4.4 kann man die einzelnen Verfahren und Vorgaben entnehmen

Tab. 4.4 Probekörperkenngrößen

Verfahren	Bezeichnung	Hohlraumgehaltinformationen [V%]
A	Raumdichte - trocken	klein
B	Raumdichte – gesättigte Oberfläche trocken (SSD)	<5 SMA <4
C	Raumdichte – umhüllte Probekörper	<15
D	Raumdichte durch Ausmessen	>15

Die Auswahl des passenden Verfahrens für die Probekörper dieser Versuchsreihe gestaltet sich nicht einfach, da hier Probekörper verwendet werden, die für Asphalte des Typs AC relativ niedrige Raumdichten / hohe Hohlraumgehalte aufweisen.

Das Verfahren C „Raumdichte – umhüllte Probekörper“ kommt, aufgrund der Komplexität und der Einschränkungen bei folgenden Versuchsanwendungen an demselben Probekörper, nicht in Frage.

Da das Verfahren A „Raumdichte – trocken“ für Probekörper mit glatten Oberflächen, wenig Hohlräumen und von außen schwierig zu erreichenden Hohlräumen empfohlen wird, kann dieses Verfahren nicht angewendet werden, da die Alterungsmethode durchlässige Probekörper voraussetzt.

Aus den genannten Gründen wurden die Probekörper sowohl mit dem Verfahren B „Raumdichte – gesättigte Oberfläche trocken (SSD)“, als auch dem Verfahren D „Raumdichte durch Ausmessen“ geprüft. Die Ergebnisse zeigten Unterschiede, die verschiedene Gründe aufweisen. Verfahren B hat den Nachteil, dass die Probekörper nicht an allen Seiten glatte Oberflächen besitzen und dadurch Wasser aus größeren Unebenheiten herausgetupft werden könnte. Weiters ist das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ist bei den Abmessungen von $d=100$ mm; $h=40$ mm – nicht optimal, da die Abweichungen dadurch noch größer werden. Verfahren D hat den Nachteil, dass hier auch aufgrund der Oberflächenunebenheiten Volumina in die Berechnung einfließen, die kein Material beinhalten [10].

Verfahren B wird deswegen zu geringe und Verfahren D zu hohe Hohlraumgehalte ausweisen. Bei den Werten des Verfahren D kann man von der Bezeichnung „technisch maximal möglicher Hohlraumgehalt“ ausgehen, da die Masse auf ein größtmögliches Volumen bezogen wird [43].

In weiterer Folge werden alle Raumdichten bzw. Hohlraumgehalte auf das Verfahren D bezogen, da diese kleinere Schwankungsbreiten erwarten.

4.2.3 Spaltzug-Schwellversuch Grundlagen

Um das Steifigkeitsverhalten, der durchströmten Probekörper und deren Veränderungen, zu untersuchen, wurde der Spaltzug-Schwellversuch nach FGSV AL Sp-Asphalt 09 gewählt [46]. Dieser Versuch erlaubt die Bestimmung der Steifigkeiten bei verschiedenen Temperaturen und Spannungen.

4.3 Aufbau der Prüfmaschine

Als Prüfgerät diente eine servohydraulische Maschine der Firma Wille Geotechnik mit Regler WDC 580 und dazu passender Software GEOSys 8.7.8.2. Der in Abbildung 4.3 dargestellte Geräteaufbau befindet sich in einem Klimaschrank. Die Prüftemperatur wurde mit $+10^{\circ}\text{C}$ gewählt, da erfahrungsgemäß die erhaltenen Steifigkeiten des indirekten Zugversuches bei dieser Temperatur bei niedrigen Frequenzen besser mit anderen Steifigkeitsversuchen, z.B. 4-Punkt Biegebalkenversuch, übereinstimmen.

Über einen Computer und servohydraulisch gesteuerten Laststempel und den weiterlaufenden Lastverteilungstreifen wird der Probekörper mit einer sinusförmigen Druckschwellkraft belastet, welche im Probekörper einen zweiachsigen Spannungszustand entstehen lässt. In vertikaler Richtung bildet sich eine Druckspannung und in horizontaler Richtung Druck- und Zugspannung aus. Den Verlauf der horizontalen Spannungsverteilung kann man der Abbildung 4.4. entnehmen. Die vertikale Druckspannung übersteigt den Wert der horizontalen Zugspannung um ca. das Dreifache [46].

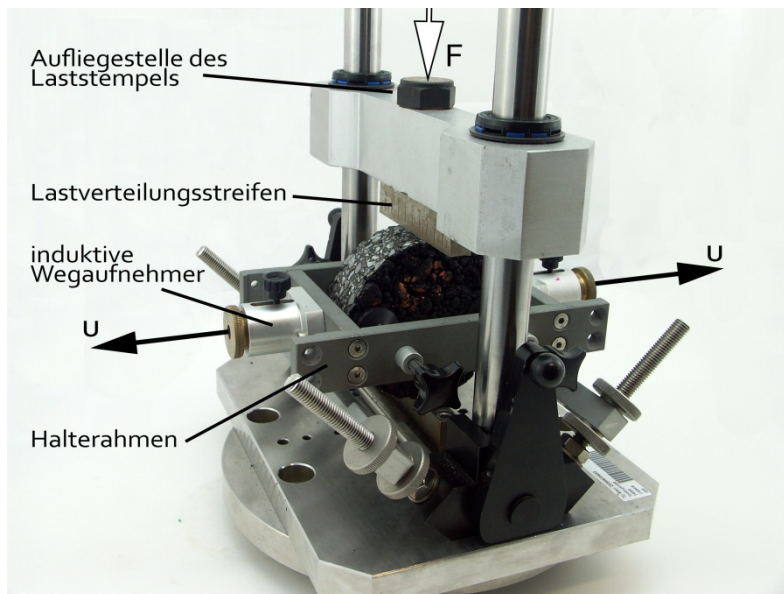


Abb. 4.3 Aufbau des Prüfgerätes

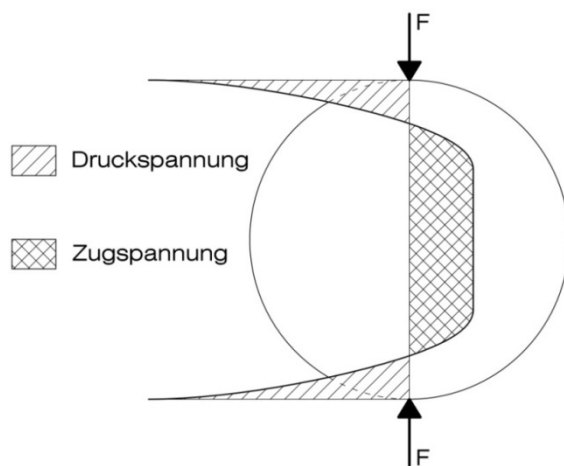


Abb. 4.4 horizontaler Spannungsverlauf des Probekörpers (angelehnt an [46])

Über induktive Wegaufnehmer (LVDTs), mit einer Minimalauflösung von $0,1 \mu\text{m}$, werden die resultierenden Horizontalverformungen aufgezeichnet. Diese sind an Probekörpermantelflächen mittig positioniert. Die Auswertung der Steifigkeiten, welche durch den dynamischen Modul $|E^*|$ dargestellt werden, erfolgt analog zu der in der FGSV AL Sp-Asphalt og beschriebenen Methode (siehe 4.3.1). Zusätzlich erhält man den Phasenverschiebungswinkel ϕ [°], welcher den Anteil der viskosen bzw. elastischen Materialantwort beschreibt. Ein Winkel von 0° würde ein rein elastisches bzw. 90° ein rein viskoses Verhalten bedeuten.

Die Belastung wird im Zuge dieses Versuches kraftgesteuert und soll in Form einer harmonischen Sinusfunktion eingebracht werden, wobei darauf zu achten ist, dass es zu keinen Lastpausen kommt. Zugleich muss diese Funktion stetig und differenzierbar sein, da sonst Resonanzerscheinungen vorhanden sein könnten.

Die Ober- bzw. Unterspannungen der Sinusbelastungen wurden bei Vorversuchen ermittelt. Diese richten sich bei der Unterspannung ($0,035 \text{ MPa}$) an der Kraft, die dazu nötig ist, die Lage des Probekörpers zu fixieren. Bei der Ermittlung der Oberspannungen müssen die re-

sultierenden elastischen Dehnungen zwischen 0,05 und 0,1 % liegen. Im Zuge dieser Arbeit wurde versucht, die Oberspannungen so zu wählen, sodass sich die elastischen Dehnungen am untern Grenzwert orientieren, um die bleibenden Verformungen so gering als möglich zu halten und somit eine mehrmalige Prüfung der Probekörper durchführen zu können. Je ne Spannungen und Lastwechsel, welche bei dieser Versuchsreihe verwendet wurden, kann man der Tabelle 4.5 entnehmen [46].

Tab. 4.5 Prüfbedingungen IT-CY +10°C

Frequenz [Hz]	0,1	1	5	10	20
Oberspannung [kPa]	210	240	300	360	390
Lastwechselanzahl	9	15	50	100	100

Die Begründung, warum genau dieses Verfahren zur Steifigkeitsermittlung angewandt wurde, liegt darin, dass die Durchführung weniger Zeit als bei alternativen Methoden benötigt.

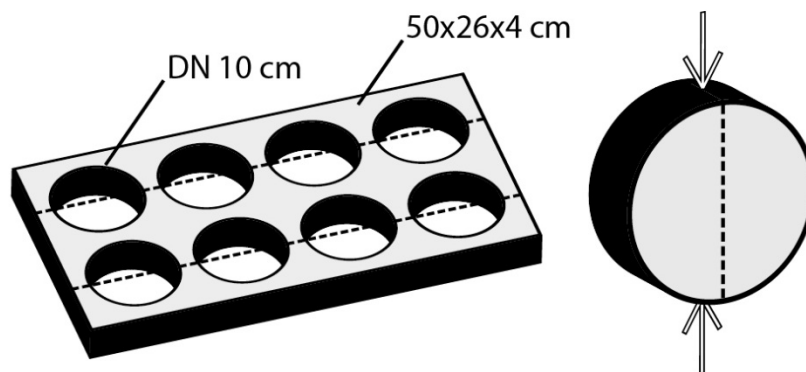


Abb. 4.5 Einbaurichtung der Probekörper

Die Positionierung des Probekörpers im Versuchsaufbau hat aufgrund der Anisotropie des Materials einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse [24]. Der Grund dafür ist, dass bei der Verdichtung im Walzsegmentverdichter die Asphaltplatten in den verschiedenen Achsrichtungen anders belastet werden. Dies hat zu Folge, dass die Steifigkeiten längs der Platte Unterschiede zu den Steifigkeiten quer zur Platte ergeben. Darum wurde vor der Probekörpergewinnung durch Bohren die Längsachse an den Platten angezeichnet. Diese Markierung diente beim Einbau als Orientierung der Lage insofern, dass die Längsachse immer in Belastungsrichtung eingebaut wurde, wie es in Abbildung 4.5 dargestellt ist.

4.3.1 Spaltzug-Schwellversuch – Auswertung der Ergebnisse [46]

Im Zug des Versuchs werden die Prüfkraft und horizontalen Verformungen gemessen und aufgezeichnet, welche für die weiteren Berechnungen verschiedenster Ergebnisse verwendet werden.

Wie im vorigen Kapitel beschrieben treten in der Probekörpermitte horizontale Zugspannungen auf, welche mittels der aufgezeichneten Kraft und den Probekörperabmessungen, wie folgt berechnet werden.

$$\sigma = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot h}$$

σ Horizontalspannung [N/mm²]
 F Kraft [N]

d Probekörperdurchmesser [mm]
 h Probekörperhöhe [mm]

Die Methode der kleinsten Fehlerquadrate wird für die Ermittlung des Steifigkeitsmoduls verwendet. Dazu werden die aufgezeichneten Werte Kraft und Horizontalverformung an eine Sinusfunktion angenähert. Dazu müssen Regressionsparameter gefunden werden, die diese am besten beschreiben.

Regressionsparameter der aufgebrachten Kraft:

$$F(t) = A + B \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + C)$$

$$\Delta F = 2 \cdot B$$

$F(t)$ Kraft-Messwert [N]

ΔF Kraftdifferenz (2fache Amplitude)

t Zeit [s]

f Frequenz der sinusförmigen Belastung [Hz]

A Verschiebung der Funktion zur X Achse (absolutes Glied) [N]

B Schwingungsamplitude [N]

C Phasenverschiebung [rad]

Regressionsparameter der horizontalen Verformung u:

$$u(t) = a + b \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + c)$$

$$\Delta u = 2 \cdot b$$

$u(t)$ Weg-Messwert (Summe der beiden Wegaufnehmer) [mm]

Δu Differenz der maximalen und minimalen Verformung je Lastwechsel [mm]

t Zeit [s]

f Frequenz der sinusförmigen Belastung [Hz]

a Verschiebung der Funktion zur X Achse (absolutes Glied) [mm]

b Schwingungsamplitude [mm]

c Phasenverschiebung [rad]

Steifigkeitsmodul:

$$|E| = \frac{\Delta F \cdot (0,274 + \mu)}{h \cdot \Delta u}$$

$|E|$ Steifigkeitsmodul [N/mm²]

μ Querdehnzahl [-]

temperaturabhängige Querdehnzahl:

$$\mu = 0,15 + \frac{0,35}{1 + e^{[3,1849 - 0,04233 \cdot (\frac{2}{5} \cdot T + 32)]}} \quad [-]$$

T Temperatur [°C]

$$\varphi = (c - C) \cdot \frac{180}{\pi} \quad [rad]$$

Φ Phasenwinkel [°]

Horizontale Dehnung:

$$\varepsilon_{el} = \frac{\sigma \cdot (1 + 3\mu)}{|E|} \quad [‰]$$

Kritik an der Druck-Schwellbelastung und Auswertung:

Für hohe Temperaturen $>+20^{\circ}\text{C}$ kann es im Bereich der Lasteintragungsstellen zu Deformationen und somit nicht zu gleich bleibenden Versuchsbedingungen kommen. Weiters werden plastische Verformungen in der Berechnung nicht berücksichtigt.

Deswegen wurden am Labor des Instituts für Verkehrswissenschaften – Forschungsbereich für Straßenwesen Anpassungen bezüglich der Auswertung getroffen. Die Arbeitsanleitung der FGSV enthält, wie oben gezeigt, als Ansatzfunktion einen einfachen Sinusansatz. Kappl beschreibt in seiner Dissertation noch weitere Ansätze: [26]

- Einfacher Sinusansatz
- Sinusansatz mit linearer Funktion
- Doppelter Sinusansatz mit linearer Funktion

Eine bessere Näherung ergibt sich, wenn man den Sinusansatz mit linearer Funktion verwendet. Dazu wird ein linearer Term hinzugefügt und ergibt somit:

$$F(t) = A + B * \sin(2\pi * f * t + C) + D * t$$

$$u(t) = a + b * \sin(2\pi * f * t + c) + d * t$$

Tabelle 4.5 beinhaltet die gewählten Lastwechsel pro Belastungsfrequenz. Diese Lastwechsel werden für die Auswertung aus statistischen Gründen zu Lastwechselzyklen zusammengefasst. In diesem Fall wurden jeweils 3 Lastwechsel, sprich 3 volle Sinusdurchgänge, für ein Auswertungsergebnis gemittelt.

4.4 Ermittlung der Steifigkeiten des Bitumens

4.4.1 Bitumenrückgewinnung

Das Bindemittel aus allen Probekörpern wurde mithilfe des Asphaltanalysators „ecoTest“ der Firma infraTest rückgewonnen, wobei der Prozess nach EN 12697-3 [9] durchgeführt wurde. Die anschließende Vakuumdestillation, mittels der Destillieranlage „Laborata 4000 efficient“ der Firma Heidolph, dient dazu, das verwendete Lösungsmittel Tetrachlorethylen wieder vom Bitumen zu trennen.

Folgender Ablauf lag der Rückgewinnung zu Grunde:

- Erhitzen der Probekörper bei $+90^{\circ}\text{C}$ für 1 h im Wärmeschrank, um ihn als Vorbereitung der Extraktion zerteilen zu können
- Trennen von Bindemittel, Füller und Gestein mittels Tetrachlorethylen
- Einsaugen des Bindemittel/Lösungsmittel – Gemisch in den Destillierkolben und Destillieren bei $+110^{\circ}\text{C}$ und 40 mbar bis kein Lösungsmittel mehr an den Kühl-schlangen kondensiert
- Absenken des Druckes auf 20 mbar
- Aufheizen des Ölbades auf $+180^{\circ}\text{C}$
- Halten der Temperatur für 10 min
- Entnahme des Destillierkolben und 5 min Temperierung bei $+180^{\circ}\text{C}$ im Wärmeschrank um das Bitumen besser ausgießen zu Können

- Abfüllen des Bitumens in Dosen

4.4.2 DSR – Grundlagen [30]

Um das rückgewonnene Bitumen nach seinen Steifigkeits- bzw. rheologischen Eigenschaften untersuchen zu können, wurden Versuche mittels Dynamic Shear Rheometer (DSR) durchgeführt. Dieses Gerät führt Oszillationsversuche (Schwingversuche) bei verschiedenen Temperaturen und Frequenzen durch. Dabei wird ein Bitumenfilm kraftschlüssig zwischen 2 Platten eingespannt und die obere Platte mittels einer Rotationsbewegung gegen die andere bewegt. Dabei kann man die auftretenden Scherverformungen mit den aufgetragenen Kraftverläufen vergleichen und daraus den dynamischen Schubmodul $|G^*|$ bzw. den Phasenwinkel ϕ ermitteln. Letzterer beschreibt die Aufteilung von viskosen und elastischen Anteil des Schubmoduls. Dieser Bitumentest ist in EN 14770 genormt [14].

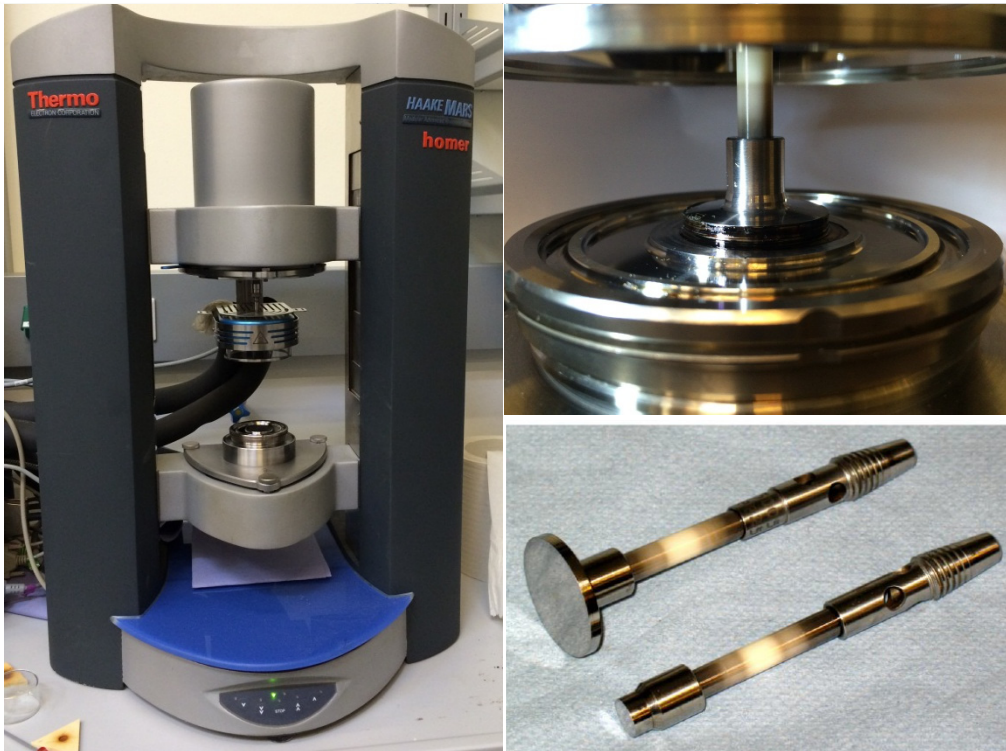


Abb. 4.6 DSR – Probenbereich – Messköpfe [25]

Abbildung 4.6 zeigt das Versuchsgerät mit den zugehörigen Messeinrichtungen. Grundsätzlich stehen beim DSR 2 verschiedene Messkopfeinrichtungen zur Verfügung. Diese variieren im Durchmesser (PP08 - $d_1=8$ mm, PP25 - $d_2=25$ mm). Zwischen diesem Messkopfplatte und einer unteren Platten wird das Bitumen positioniert, siehe Abbildung 4.7. Je nach Plattengeometrie des Messkopfes ist dieser Bitumenspalt 1 mm (PP25) bzw. 2 mm (PP08) dick.

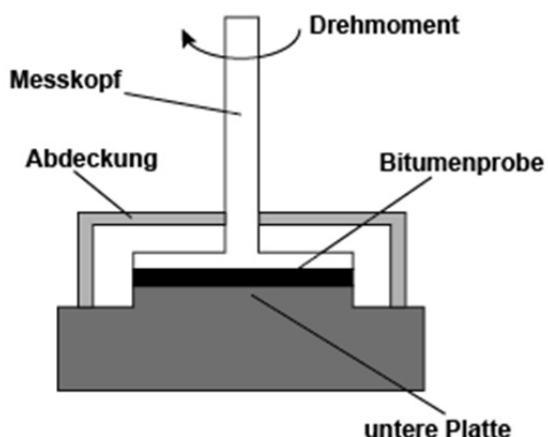


Abb. 4.7 DSR – Skizze Probenbereich inkl. Bitumenspalt (nach [18])

Es gibt verschiedene Prüfbedingungen, die für eine Prüfung herangezogen werden können. Einige Beispiele sind in Tabelle 4.6 aufgelistet, wobei für diese Arbeit ausschließlich Prüfungen der Form DSR 3 durchgeführt wurden.

Tab. 4.6 Versuchsdaten DSR 1, DSR 2 und DSR 3

	DSR 1	DSR 2	DSR 3
Temperatur [°C]	-10-+40	+30-+80°C	+46-+82
Frequenz [Hz]	0,1-1-3-5-10	0,1-1-3-5-10	1,6
Plattendurchmesser [mm]	8	25	25
Bitumenspalt [mm]	2	1	1

In Abbildung 4.8 wird die Aufbringung der Scherspannungen und der daraus resultierenden Deformation im Laufe eines Oszillationszyklus dargestellt. Dabei wird die obere Platte rotierend ausgelenkt, während die untere Platte still bleibt und somit die Materialprobe im Spalt deformiert wird.

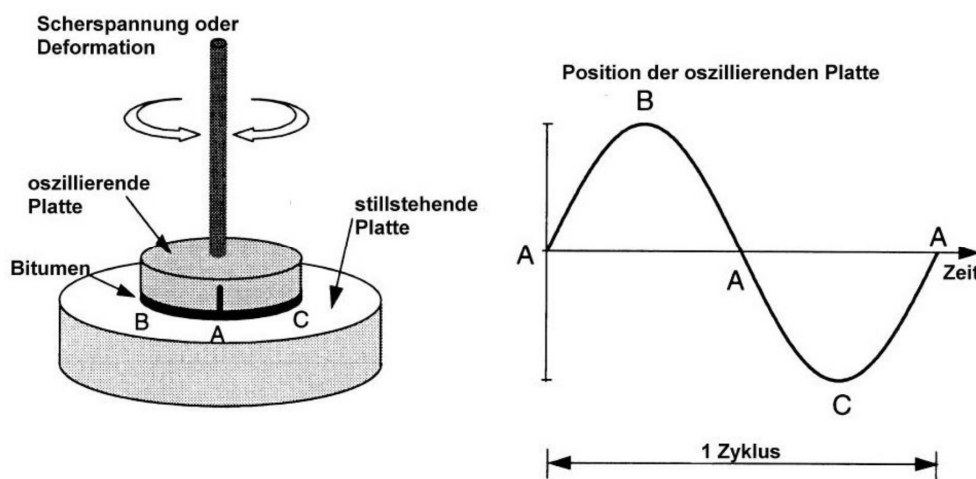


Abb. 4.8 DSR – Messeinrichtung und Darstellung des Oszillationszyklus [30]

$$\gamma = \frac{s}{h} * 100 [\%]$$

γ Scherdeformation [%]
 h Spalt zwischen den Platten [mm]

s Auslenkung am Rand der oberen Platte [mm]

Die wesentlichen Prüfergebnisse, die eine Prüfung im DSR liefert, sind der dynamische Schubmodul $|G^*|$ und der Phasenwinkel ϕ .

$$|G^*| = \frac{\tau_{max}}{\gamma_{max}}$$

mit $\tau_{max} = \frac{2 * M_{max}}{\pi * r^3}$ und $\gamma_{max} = \frac{\alpha_{max} * r}{h}$

$|G^*|$ dynamischer Schubmodul [Pa]

γ_{max} maximale Scherdeformation [-]

M_{max} maximales Drehmoment [Nm]

h Messspalt [m]

τ_{max} maximale Scherspannung [Pa]

r Radius Messkopf

α_{max} Verdrehwinkel [rad]

$$\phi = \frac{\Delta t}{t} * 360$$

ϕ Phasenwinkel

t Zeit für eine Schwingung [s]

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

Der Phasenwinkel beschreibt die Zeitverschiebung, die zwischen maximaler Scherspannung und maximaler Deformation auftritt. Bei ideal elastischem Verhalten würde dies einen Phasenwinkel von 0° bedeuten, da auf eine Einwirkung direkt die Materialantwort folgt. Ein Phasenwinkel von 90° würde ein rein viskoses Verhalten beschreiben, da die maximale Deformation zum spätest möglichen Zeitpunkt auf die maximale Scherspannung folgt. In der Praxis treten beim Bitumen visko-elastische Verhalten, bei denen der Phasenwinkel im Bereich zwischen 0° und 90° liegt.

5 Vorversuche

Die entwickelte Alterungsmethode benötigt zur Feststellung der Eignung und Effizienz Prüfverfahren, die an Asphaltprobekörper bzw. später am rückgewonnenen Bitumen durchgeführt werden. Um die Ergebnisse der Asphaltprüfungen der zu prüfenden Probekörper vergleichen zu können hat man 2 Möglichkeiten die Veränderungen einschätzen zu können:

- Steifigkeiten verschiedener PK vergleichen
- Steifigkeitsveränderungen am selben Probekörper durch eine Prüfung vor bzw. nach Alterung

Für die erste Möglichkeit benötigt es die Kenntnis der Abhängigkeit Steifigkeit von der Raumdichte. Da Probekörper bei unterschiedlichen Raumdichten auch unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, ist ein Vergleich zweier verschiedener Probekörper sehr problematisch. Dies könnte Ergebnisse der Alterungsmethode vortäuschen, die in Wirklichkeit auf die verschiedenen Raumdichten zurückzuführen sind.

Die zweite Möglichkeit beinhaltet die Gefahr, dass sich die Steifigkeiten bei mehrmaligen Prüfungen so stark verändern, dass die Auswirkungen der Asphaltalterung nicht mehr groß genug sind um von der Prüfmethode abgebildet werden zu können. Das heißt, die Streuung der Ergebnisse bei mehrmaliger Prüfung muss geringer sein, als die Veränderungen der Eigenschaften durch die Alterungsmethode.

5.1 Einfluss Hohlraumgehalt auf Steifigkeiten bei IT-CY

Die Raumdichte bzw. der Hohlraumgehalt haben Einfluss auf die Steifigkeiten des Asphalts. Je mehr Luftporen im Asphaltgefüge beinhaltet sind, desto weniger Materialquerschnitt steht zur Lastabtragung zur Verfügung. Darum werden auch in der Praxis Einbaubedingungen festgelegt, welche maximale Hohlraumgehalte festschreiben, da sonst die Steifigkeiten der Aufbauten zu gering wären und es somit schneller zu Schäden kommt bzw. die Anforderungen des Straßenerhalters nicht erfüllt werden. Ähnlich der Abnahmeprüfungen beim Unterbauplanum wird als Kenngröße die Raumdichte verwendet. Dies ist nicht ideal, da es zwar prinzipiell einen Zusammenhang zwischen Raumdichte und Steifigkeiten gibt, aber es durch Prüfverfahren und Inhomogenität zu Abweichungen kommen kann.

Um die Verknüpfung dieser beiden Parameter untersuchen zu können, werden Probekörper hergestellt, die eine starke Streuung der Hohlräume aufweisen. Dazu wurden aus 3 Platten mit unterschiedlichen Zielraumdichten, jeweils 8 Probekörper ausgebohrt. Aus Tabelle 5.1 kann man die Probekörperdaten entnehmen.

Tab. 5.1 Probekörperkenngrößen

Probe- körper Nr.	Höhe [mm]	Durch- messer [mm]	Hohlraum- gehalt (D) [V%]
E619F	40,2	99,0	5,6
E619C	39,8	99,0	5,7
E619E	39,8	99,1	5,7
E619G	40,2	99,1	5,7
E619H	40,4	99,0	6,2
E619B	40,3	98,9	6,4
E619A	40,3	99,1	7,1
E619D	40,1	99,1	9,6
E620A	40,5	99,1	3,6
E620C	40,5	99,1	3,9
E620F	40,2	99,0	4,1
E620D	40,3	99,1	4,3
E620G	40,8	99,1	4,5
E620B	40,5	99,1	4,6
E620H	40,5	99,1	5,0
E620E	40,7	99,1	5,5
E631F	40,3	99,9	10,6
E631D	40,4	100,0	10,8
E631E	39,9	100,0	10,8
E631B	40,8	99,9	11,8
E631G	40,3	100,0	12,2
E631H	40,5	100,0	12,2
E631C	39,6	99,9	13,6
E631A	40,2	100,0	15,9

In Abbildung 5.1 sind die Ergebnisse der Versuche zusammengefasst, wobei die Daten einer linearen Regression unterzogen wurden. Um die Verläufe der verschiedenen Prüffrequenzen vergleichen zu können, wurden die Steifigkeiten mit einem fiktiven dynamischen Modul $|E^*|_{0\%}$ normiert, welcher aus der linearen Fortführung der Regression zum fiktiven Hohlraumgehalt mit dem Wert 0% folgt. Man kann erkennen, dass die Änderungen der dynamischen Module $|E^*|$ keinen Zusammenhang mit der Prüffrequenz haben. Die angegebenen Gradienten zeigen die gleichen Werte. Eine kleine Abweichung ist bei 0,1 Hz Prüffrequenz zu erkennen, die jedoch daraus resultieren kann, dass bei dieser Frequenz, im Vergleich zu den anderen, weniger Lastwechsel erfolgen und somit die Streuung der Werte größer ist.

Eine Reduzierung des dynamischen Moduls $|E^*|$ von ca. 4 % per Anstieg des Hohlraumgehalts um 1 V-% hat einen wesentlichen Einfluss auf das Materialverhalten. Sollte es beim Asphalteinbau punktuell zu schlechten Verdichtungsergebnissen führen, dann würde dies bedeuten, dass der Straßenquerschnitt nicht den konzipierten Belastungen standhält und es dabei zu einem größeren Schadenspotenzial an diesen Stellen führt. Dies würde eine kürzere Lebensdauer bedeuten.

Im Zuge dieser Arbeit kann man anhand dieses Zusammenhanges auf der einen Seite Versuchsergebnisse auf Plausibilität prüfen, auf der anderen Seite aber auch Probekörper miteinander vergleichen, die nicht denselben Hohlraumgehalt haben. Detailliertere Diagramme sind dem Anhang zu entnehmen.

Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C

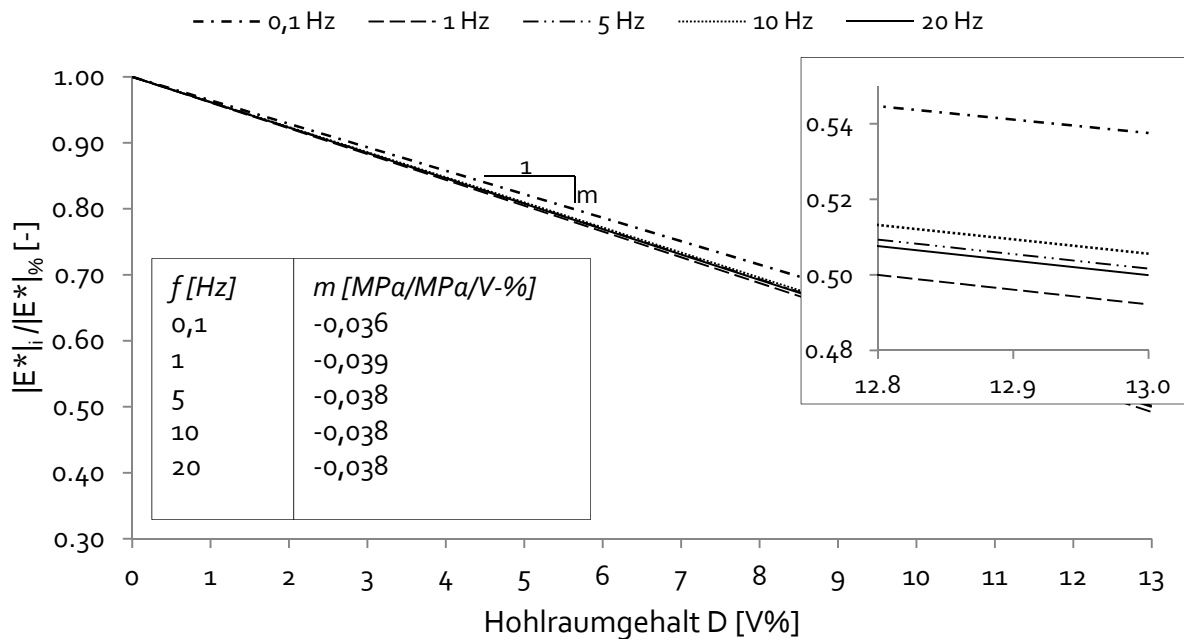


Abb. 5.1 Veränderung der Steifigkeiten in Bezug auf den Hohlraumgehalt nach Verfahren D

Abbildung 5.2 zeigt eine Darstellung, wie sich der ermittelte Phasenwinkel mit den verschiedenen Hohlräumen entwickelt. Dabei ist zu erkennen, dass der Phasenwinkel bei Probekörpern mit vielen Lufteinschlüssen größer ist, als dies bei dichten Probekörpern der Fall ist. Dies bedeutet, dass es bei Reduzierung der Hohlräume eine Verschiebung der Materialeigenschaften vom viskosen Bereich zum elastischen Bereich gibt. Dies bedeutet, dass dichte Probekörper schnellere Materialantworten in Form von Dehnungen bei Belastung liefern. Ein Grund dafür kann sein, dass es dabei zu Nachverdichtungserscheinungen kommt, welche sich bei einer IT-CY Prüfung nicht sofort in einer horizontalen Dehnung ablesen lassen, wie es bei dichteren Probekörpern der Fall wäre.

Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C

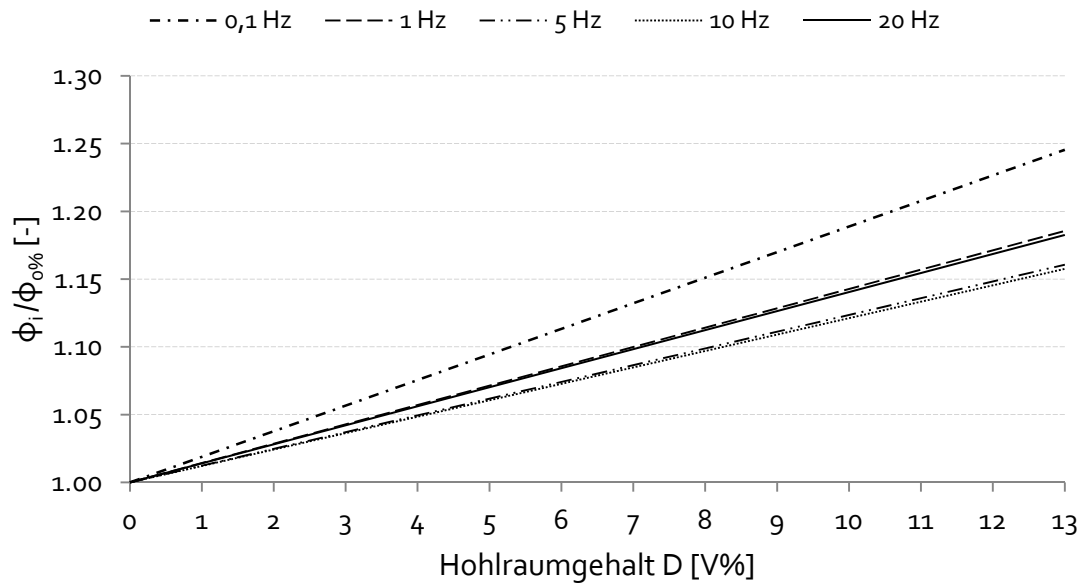


Abb. 5.2 Veränderung des Phasenwinkels in Bezug auf den Hohlraumgehalt nach Verfahren D

5.2 Wiederholungsprüfungen

Bei mehrmaliger Prüfung von zylindrischen Probekörpern beim Spaltzug-Schwellversuch kann es im Probekörper zu Strukturschädigungen kommen, die das Materialverhalten beeinflussen. Um die Zulässigkeit einer mehrmaligen Prüfung sicherzustellen gilt es die Veränderungen des dynamischen Moduls $|E^*|$ und des Phasenwinkels Φ zu untersuchen.

Dazu sind die Versuchsparameter so zu wählen, dass möglichst wenig bleibende Verformungen in den Probekörper eingebracht werden. Darum wurden in Vorversuchen die Oberspannungen variiert um ein Optimum der maximalen horizontalen Dehnung ϵ zu finden. Nach [46] sollten diese bei den Steifigkeitsversuchen in der Spanne von 0,05 ‰ bis 0,1 ‰ liegen. Darum wurde versucht dies möglichst nahe an den unteren Grenzwert anzunähern. Diese kann man der Tabelle 4.5 entnehmen.

Exemplarisch wurde die Darstellung bei einer Prüffrequenz von 10 Hz gewählt, da kein Einfluss zwischen den verschiedenen Frequenzen zu erkennen ist. Alle weiteren Darstellungen befinden sich im Anhang. Abbildung 5.3 zeigt Ergebnisse der jeweiligen Probekörper, die insgesamt 4-mal geprüft wurden, gereiht nach dem Hohlraumgehalt (nach rechts ansteigend). Dabei kann man ablesen, dass sich eine Steifigkeitszunahme bei mehrmaliger Prüfung einstellt. Bei den Werten der viermaligen Prüfung ist der dynamische Modul $|E^*|$ knapp weniger als 10 % angestiegen. Eine 2 - bzw. 3 - malige Prüfung lässt den Grenzwert des Steifigkeitsanstiegs auf ca. 5% festsetzen. Die Konfidenzintervalle (CI) der Werte beziehen sich auf die Streuung der Steifigkeitsauswertung nach der jeweiligen Zusammenfassung der Lastwechselzyklen. Dabei sieht man, dass die Veränderung nicht nur aufgrund der Streuung der einzelnen Lastwechsel zustande kommt, sondern sich tatsächlich eine Versteifung bei wiederholter Prüfung einstellt.

Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass es zulässig ist Probekörper öfter zu prüfen. Dies ermöglicht, dass alle Probekörper, die einer Laboralterung unterzogen werden, 2 mal geprüft werden. Die Zunahme der Steifigkeit durch Alterung sollte jedenfalls mehr als 5 % ausmachen, um die Abweichungen der zweimaligen Prüfung zu übersteigen.

Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=10 Hz

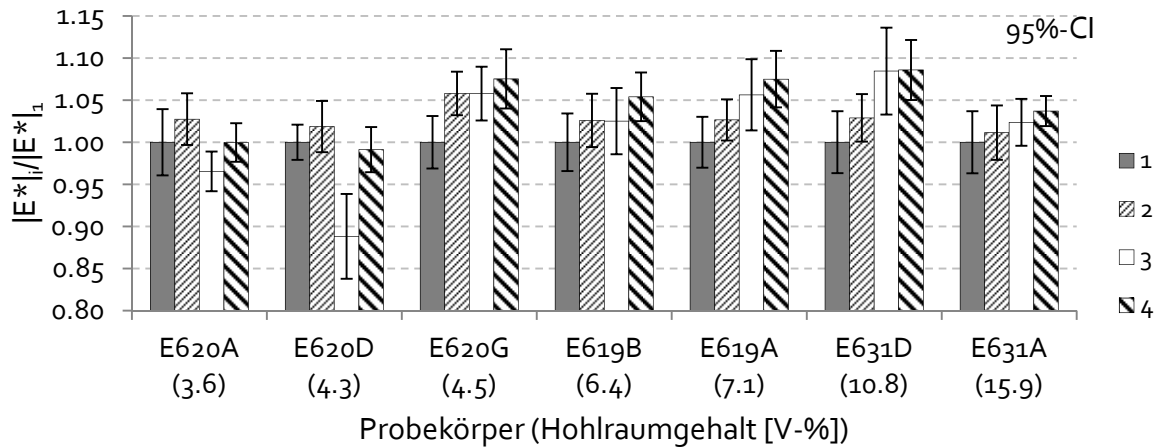


Abb. 5.3 Veränderung der dynamischen Module $|E^*|$ bei wiederholter IT-CY Prüfung

Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=10 Hz

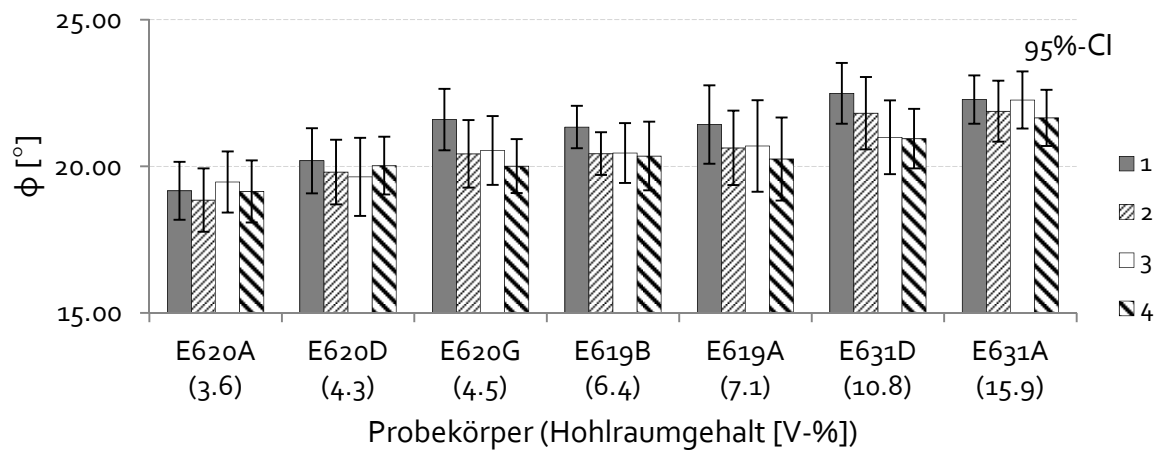


Abb. 5.4 Veränderung der dynamischen Module $|E^*|$ bei wiederholter IT-CY Prüfung

6 Ergebnisse und Interpretationen

6.1 Veränderung der Asphalt – Materialeigenschaften

6.1.1 Variation von Temperatur und Alterungsdauer

In Abbildung 6.1 sieht man die Ergebnisse der IT-CY Versuche für die Probekörperreihe, bei denen die Versuchsparameter variiert wurden. Dazu wurden die dynamische Module $|E^*|$ der Frequenzen 1 Hz, 5 Hz und 10 Hz zu Mittelwerten zusammengefasst und die Streuung durch das 95% - Konfidenzintervall (CI) angegeben. Dabei wurden die dynamischen Module $|E^*|$ vor und nach der Laboralterung festgestellt und deren Veränderung dargestellt. Zusätzlich wurden Temperatur des Wärmeschanks und Alterungsdauer variiert. Klar zu erkennen ist, dass die Steifigkeiten mit Alterungsdauer ansteigen. Auch die Unterschiede der Temperaturen sind zu erkennen. Die Probekörper, welche bei $+75^\circ\text{C}$ gealtert wurden, weisen eine höhere Steifigkeitszunahme auf, als Probekörper bei $+45^\circ\text{C}$ oder $+60^\circ\text{C}$. Das Weglassen der Anwärmspirale hatte den Einfluss, dass die Veränderung des dynamischen Moduls $|E^*|$ nicht so stark ausgeprägt ist, wie es bei den übrigen Versuchen mit Anwärmspirale ist.

Die strichlierte Linie bei dem Verhältnis 1,05 folgt aus den Ergebnissen aus Kapitel 5.2, innerhalb dieser Grenze die Werte, durch die Wiederholung der IT-CY Prüfung, streuen können und somit kein zuverlässiger Indikator für eine Alterung mehr sind.

$$\text{Alterung } T = +45 / +60 / +75^\circ\text{C} - \text{IT-CY} + 10^\circ\text{C}$$

$$\text{MW } 1 / 5 / 10 \text{ Hz}$$

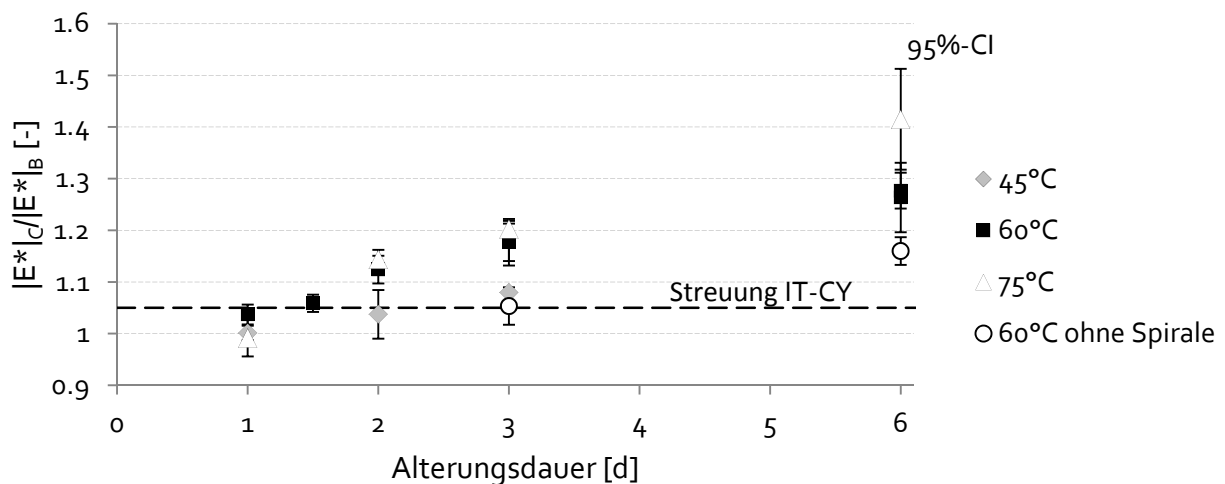


Abb. 6.1 Veränderung des dynamischen Moduls $|E^*|$ in Bezug auf die Ausgangssteifigkeiten

6.1.2 3 fache Versuchswiederholung

Abbildung 6.2 zeigt die Ergebnisse der IT-CY Versuche für die Probekörper, bei denen die Versuchsparameter konstant gehalten wurden, um eine Wiederholbarkeit der Alterungsversuche zu untersuchen. Der Quotient bezieht sich auf die Zunahme des dynamischen Moduls

$|E^*|$ gegenüber dem nicht gelalterten Zustand. Hierbei sind die Ergebnisse nach Probekörper und Frequenzen dargestellt, wobei die Konfidenzintervalle (95%) die Streuung der Einzelwerte innerhalb eines Steifigkeitsversuchs darstellen. Man kann erkennen, dass es zu einem signifikanter Anstieg der dynamischen Module $|E^*|$ kommt, jedoch ist dieser nicht so stark ausgeprägt, wie es bei der Variation der von Temperatur und Alterungsdauer der Fall war. Abbildung 6.3 zeigt die Abnahme der Phasenwinkel ϕ bei den Frequenzen 1, 5 und 10 Hz aufgeteilt nach Probekörper. Diese Werte zeigen eine durchgängige Abnahme der Phasenwinkels nach der Alterung, weshalb man auf eine Veränderung der Materialeigenschaften vom viskosen Bereich in Richtung elastischeren Verhalten schließen kann.

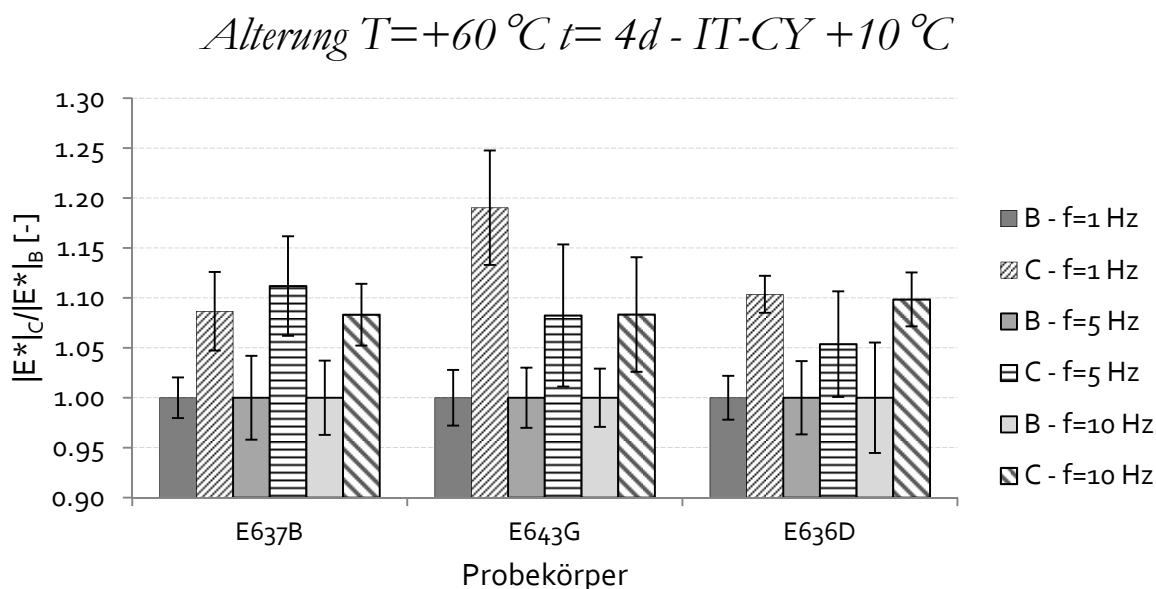


Abb. 6.2 Veränderung des dynamischen Moduls $|E^*|$ in Bezug auf die Ausgangssteifigkeiten

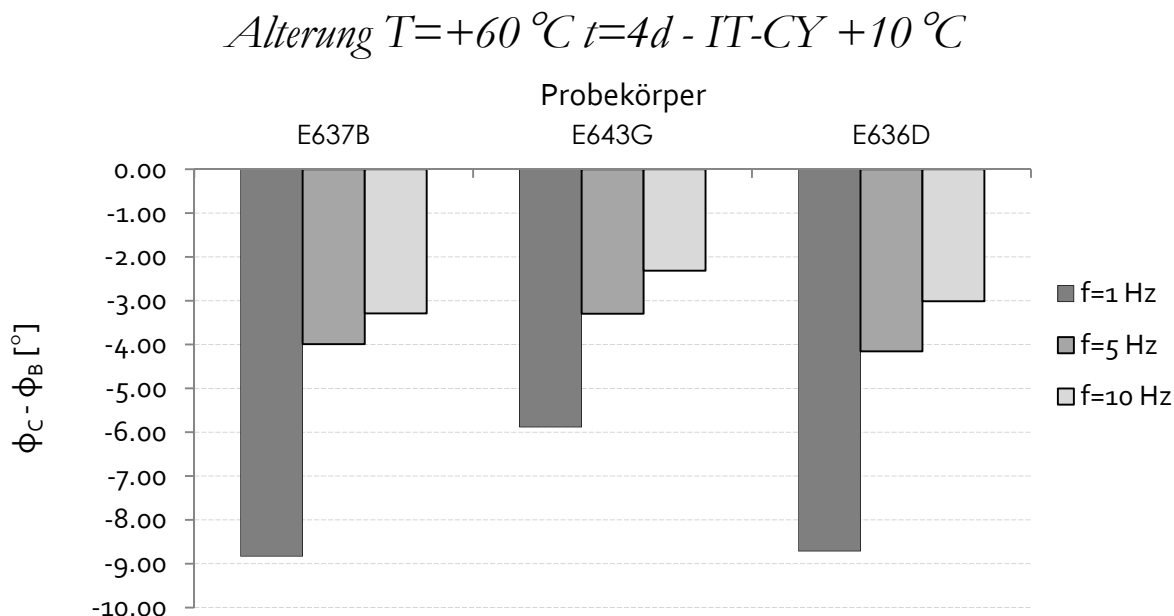


Abb. 6.3 Veränderung des Phasenwinkels in Bezug auf die Frequenz

6.1.3 4-tägige Kontrollalterung mit Stickstoff bei +75°C

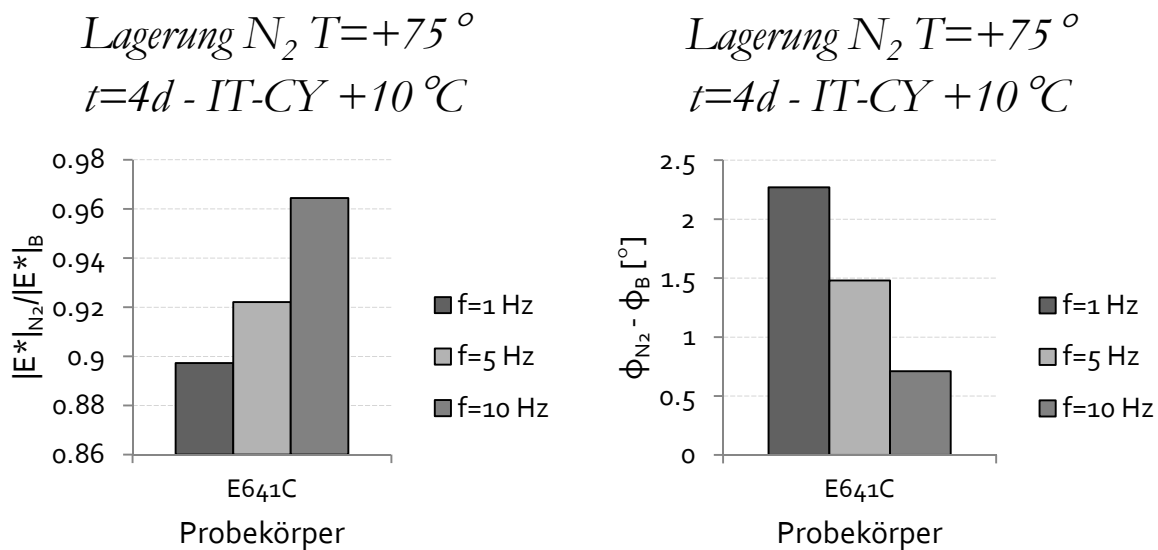


Abb. 6.4 links: Veränderung des dynamischen Moduls $|E^*|$ rechts: Differenz des Phasenwinkels

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben, diente dieser kleine Teilversuch zur Absicherung der Ergebnisse, damit der Anteil der thermischen Alterung gegenüber der erwünschten oxidativen Alterung abgegrenzt werden kann. Abbildung 6.4 zeigt, dass sich die Materialeigenschaften in eine gegenteilige Richtung entwickelt haben, als es die Ergebnisse aus den Alterungsversuchen mit ozonangereicherter Druckluft (Kapitel 6.1.1) oder der Wiederholungsprüfungen (Kapitel 5.2) gezeigt haben. Sowohl bei gealterten Probekörpern, aber vor allem auch bei wiederholter Steifigkeitsprüfung (IT-CY) sind die Steifigkeiten größer geworden bzw. die Phasenwinkel haben abgenommen. Bei der Stickstofflagerung sind die Steifigkeiten auf 90 % bis 96 % abgefallen, die Phasenwinkel haben je nach Frequenz um bis zu 2 ° zugenommen. Das heißt, dass bei der Lagerung in Stickstoffatmosphäre gefügeaufweichende Phänomene stattfinden. Dies kann auf der einen Seite das Bitumen betreffen, auf der anderen Seite aber auch die Bitumen-Gesteins Haftung. (*Ausblick: Nach dem Rückgewinnungsprozess und Auswertung der DSR Ergebnisse zeigte sich ein Anstieg der Bitumensteifigkeit. D.h. der Verlust der Steifigkeit ist auf eine Minderung der Bitumen-Gesteins Haftung zurückzuführen.*) Durch die Zunahme der Phasenwinkel erkennt man, dass sich die viskosen Anteile gegenüber den elastischen Anteilen der Materialeigenschaften vergrößert haben. Jedenfalls kann man sagen, dass die Steifigkeitszunahmen aus Kapitel 5.1 und Kapitel 6.1 nicht auf die thermische Alterung zurückzuführen sind, sondern vor allem, wie auch beabsichtigt, eine oxidative Alterung von staten geht.

6.1.4 Veränderung des Ermüdungsverhaltens

Nachdem die Oberspannungen bei der 2-fachen IT-CY Steifigkeitsprüfung so gewählt wurden, dass sich die maximalen horizontalen Dehnungen dem unteren Grenzwert annähern, wurden kaum permanente Deformationen verursacht. Dies erlaubt es an den Probekörper weitere Prüfungen durchzuführen, die das Ermüdungsverhalten untersuchen, bevor das Bitumen für weitere Versuche rückgewonnen wird und somit der Probekörper zerstört werden muss. Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse eines Spaltzugschwellversuchs (IT-CY) zur

Untersuchung des Ermüdungsverhaltens. Dabei sind die Lastwechselzahlen dargestellt, bei denen das Ermüdungskriterium $S_{100LW}/2$ erreicht wurde, also bei denen die Hälfte des dynamische Moduls des 100. Lastwechsel erreicht wurde. Bezogen sind diese Werte auf die elastischen Anfangsdehnungen $\epsilon_{el,anf}$, die ebenfalls rund um den 100. Lastwechsel bestimmt wurden. Man kann erkennen, dass die Probekörper, die einer Laboralterung unterzogen wurden, bei gleicher elastischer Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf}$, erst zu späteren Zeitpunkten das Ermüdungskriterium erreicht haben. Beispielsweise würde bei einer elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf}$ von 0,065 ‰ das Ermüdungskriterium bei den Referenzprobekörpern bei 26400 Lastwechsel eintreten, bei den gealterten Probekörpern aber erst bei 43400 Lastwechsel. Die Ermüdungsbeständigkeit ist somit um 61 % höher.

Alterung $T=+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ $t=4d$ - Ermüdung - IT-CY
 $T=+10\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $f=10\text{ Hz}$

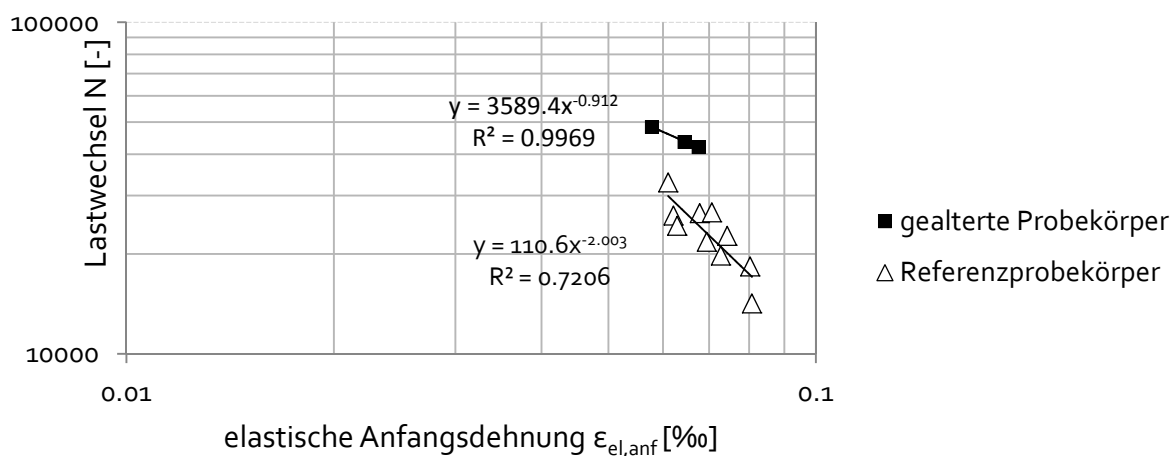


Abb. 6.5 Lastwechselzahl bei Ermüdungskriterium $S_{100LW}/2$ bezogen auf die elastische Anfangsdehnung

Die oben genannten Ergebnisse sind anders als man dies bei gealterten Probekörpern erwarten würde. Grundsätzlich sollten sich die Ermüdungseigenschaften im Laufe einer Alterung verschlechtern. Bei den Daten in Tabelle 6.5 erkennt man, dass die Ermüdungsbeständigkeit aber gestiegen ist. Die Werte der elastischen Anfangsdehnung $\epsilon_{el,anf}$ befinden sich in einer engen Bandbreite. Um eine genauere Aussagen über das Ermüdungsverhalten treffen zu können, würde man hier noch weitere Versuche bei anderen elastischen Anfangsdehnungen $\epsilon_{el,anf}$ benötigen. Ein weiterer Erklärungsgrund könnte sein, dass bei Ermüdungsprüfungen in Form von Spaltzugschwellversuchen (IT-CY) permanente Deformationen am Probekörper entstehen. Im Gegensatz dazu wären Prüfungen des Ermüdungsverhaltens in Form von 4-Punkt Biegebalkenversuchen zu bevorzugen.

6.2 Veränderung der Bitumen – Materialeigenschaften

6.2.1 Variation von Temperatur und Alterungsdauer

Nachdem sämtliche Asphaltprüfungen an den Probekörpern abgeschlossen waren, wurde das Bitumen dieser Probekörper rückgewonnen, um auch die Veränderungen der Materialeigenschaften des Bitumens bestimmen zu können.

In Abbildung 6.6 wird die Veränderungen des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$, bezogen auf den ungealterten Zustand, bei verschiedenen Alterungsdauern und Temperaturen des Wärmeschrankes, dargestellt. Anders als bei den Ergebnissen der Asphaltprüfungen aus Kapitel 6.1.1, zeigen die Ergebnisse der DSR Versuche, dass es bei den Veränderungen des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ keinen linearen Zusammenhang mit der Alterungsdauer gibt. Die Werte der 1, 2 und 3 Tages Alterungen liegen allesamt auf einem ähnlichen Niveau, wobei hier die Reihe der $+75^\circ\text{C}$ Versuche am oberen Ende liegt. Dies dreht sich bei den 6-tägigen Tests, wo dieser Wert am unteren Ende angesiedelt ist. Zusätzlich kann man erkennen, dass das Entfernen der Anwärmspirale einen negativen Einfluss auf die Erhöhung des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ hat, wie die Versuchsdaten bei den 6-tägigen Alterungen zeigen.

Betrachtet man den Verlauf der Versuchsergebnisse, dann erkennt man, dass man hier keinen linearen Zusammenhang finden kann. Eher zeigen sich diese ein exponentielles Wachstum, wobei man hier noch zusätzliche Werte im Bereich von 5-tägigen Versuchen benötigen würde.

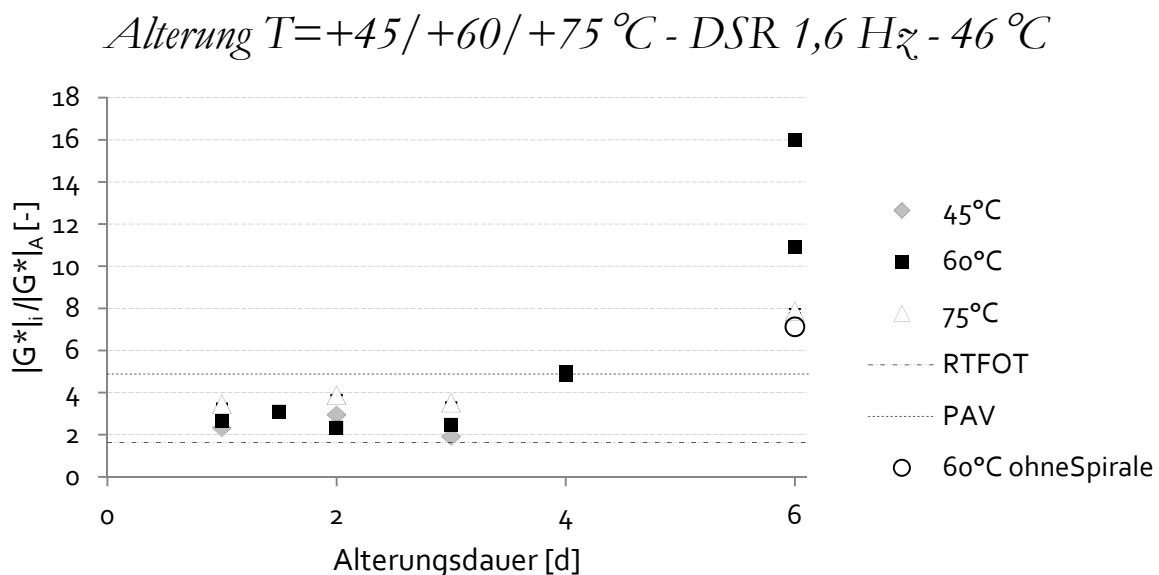


Abb. 6.6 Veränderung des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$

6.2.2 3 fache Versuchswiederholung

Abbildung 6.7 zeigt die Ergebnisse der DSR Versuche für die Probekörper, bei denen die Versuchsparameter konstant gehalten wurden, um eine Wiederholbarkeit der Versuche zu untersuchen. Als Vergleichswerte dienen auf der einen Seite die Ergebnisse des Frischbitumens, auf der anderen Seite RTFOT+PAV gealterte Bitumen als Benchmark. Der Quotient bezieht sich auf die Zunahme des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ gegenüber dem Frischbitumen.

Bei Betrachtung der Unterschiede der 3 Probekörper sieht man, dass die Werte sehr gut wiederholbar sind. Leichte Abweichungen können auch durch die grundsätzliche Streuung des Versuchs, aber auch durch Unterschiede in der Probevorbereitung, hervorgerufen werden. Der Zunahmefaktor des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ in Bezug auf ungealtertes

Bitumen liegt im Bereich von 4,8-5,0; 4,7-4,9 und 4,5-4,8 bei den Temperaturen +58°C, +52°C und +46°C. Die Veränderung der Phasenwinkel, welcher den Anteil der viskosen bzw. elastischen Eigenschaften angibt, ist in Abbildung 6.8 dargestellt. Hier sieht man, dass es eine Verminderung des Phasenwinkels gegeben hat, was bedeutet, dass es eine Vergrößerung der elastischen Anteile und Verminderung der viskosen Anteile gegeben hat. 2 der 3 Prüfungen sind nahezu ident mit den Daten einer PAV Alterung, wobei die Probe B287C_LO3air_V15 bei den Veränderungen des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$ auch leichte Abweichungen bezüglich des Verlaufs in Bezug auf die Temperaturen aufweist.

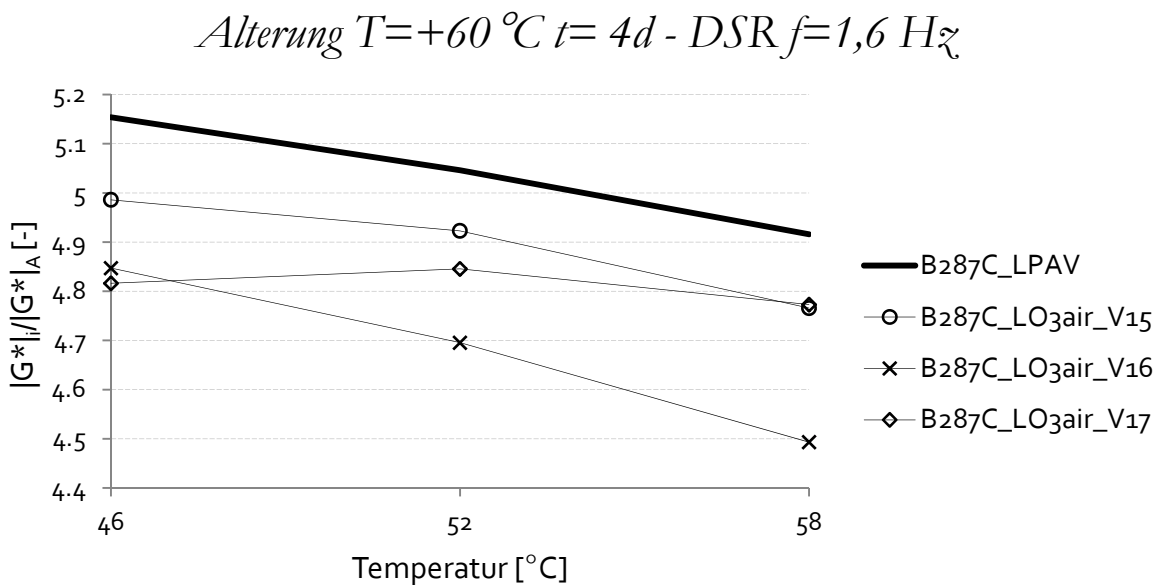


Abb. 6.7 Veränderung des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$

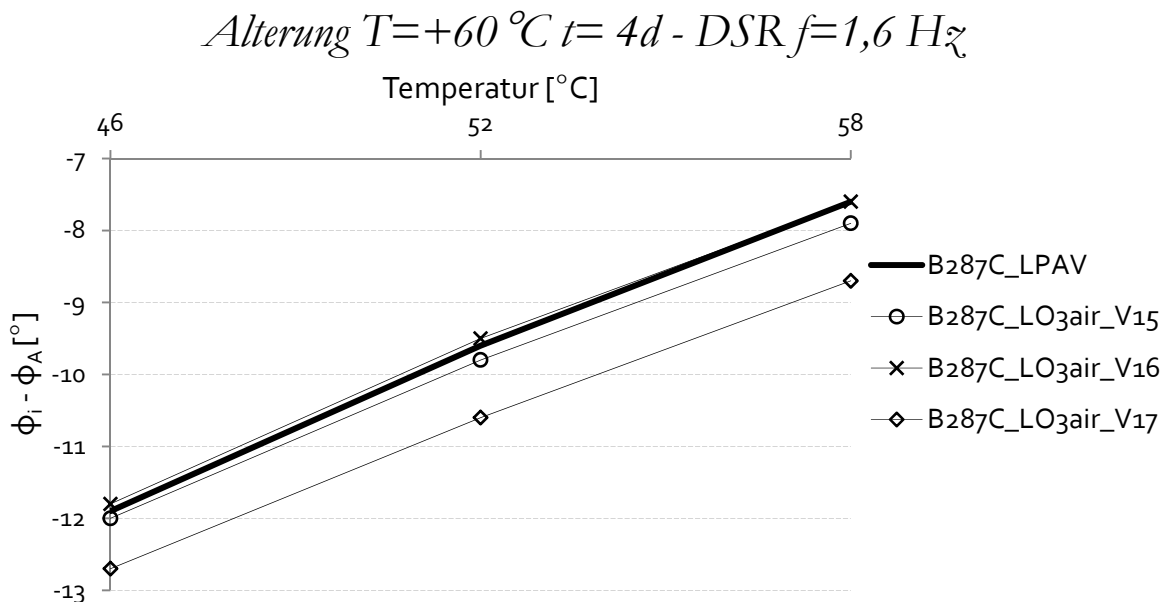


Abb. 6.8 Veränderung des Phasenwinkels von laborgealterten Bitumen zu Frischbitumen

6.2.3 4-tägige Kontrollalterung mit Stickstoff bei +75°C und Labor-Kurzzeitalterung

Wie in Kapitel 3.4 und 6.1.3 gezeigt, dient die Lagerung in einer Stickstoff Umgebung der Kontrolle der Ergebnisse. Zusätzlich wurde das Bitumen eines Probekörpers rückgewonnen, der nicht einer Alterungssimulation unterzogen wurde. Dieser wurde, wie alle anderen Probekörper im Labor zu Platten hergestellt und danach ausgebohrt und soll durch diesen Produktionsprozess einer Kurzzeitalterung unterzogen worden sein. Abbildung 6.9 zeigt die Ergebnisse einer DSR Prüfung bei den Temperaturen von 46, 52 und 58°C. Der dynamische Schubmodul $|G^*|$ der jeweiligen Probekörper (i) ist auf den dynamischen Schubmodul $|G^*|$ eines Frischbitumens bezogen. Dabei kann man erkennen, dass eine Lagerung in Stickstoffumgebung für 4 Tage und 75°C keine Unterschiede zu einem rückgewonnenen Bitumen zeigt, welches keiner Labor-Langzeitalterung unterzogen wurde. Das heißt, dass die Temperatur des Wärmeschrankes keinen bis wenig Einfluss auf die Steifigkeitszunahmen hat und somit gesichert ist, dass primär eine oxidative Alterung passiert.

*Lagerung N₂ T=+75 °C t= 4d -/ rückgewonnener
Probekörper DSR f=1,6 Hz*

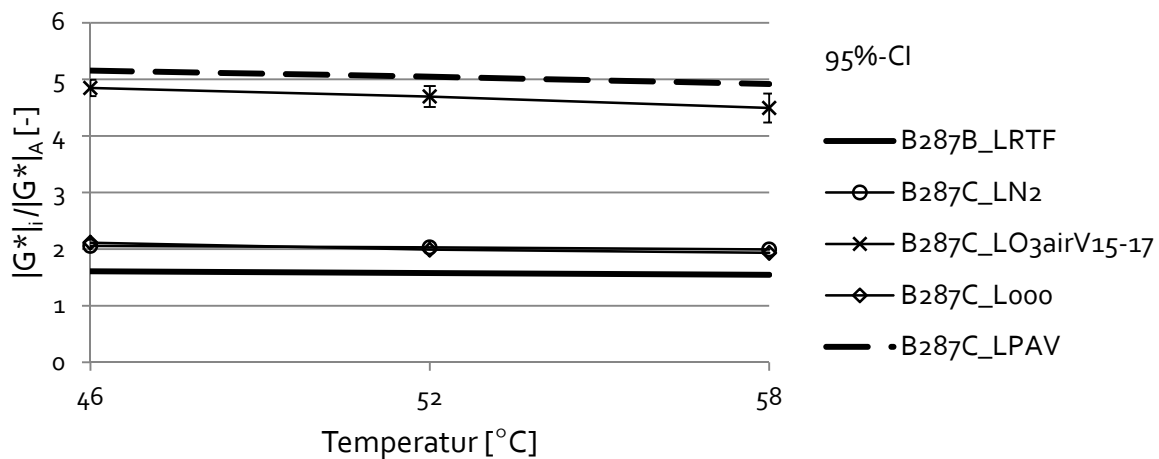


Abb. 6.9 Veränderung des dynamischen Schubmoduls $|G^*|$

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass eine Alterungsmethode für verdichtete Asphaltprobekörper mit ozon- und stickoxidangereicherter Druckluft großes Potential für eine effiziente Laboralterung hat. Mit Hilfe der beschriebenen Versuchseinrichtungen und Randbedingungen konnte in 4 Tagen ein Alterungszustand simuliert werden, der in etwa einem Bitumenalterungsniveau von ca. 10 Jahren entspricht bzw. einer Laboralterung mit dem Verfahren nach ÖNORM EN 14769 (PAV - Pressure Aging Vessel)[13]. Zusätzlich wurde eine Validierung der Methode in Bezug auf die oxidative Alterung in Abgrenzung zur thermischen Alterung durchgeführt, indem Probekörper in Stickstoffatmosphäre einer thermischen Alterung unterzogen wurden.

Die Wiener Alterungsmethode simuliert vor allem die oxidativen Vorgänge der Alterung. Dabei werden verdichtete Asphaltprobekörper mit gasförmigem Oxidationsmittel durchströmt. Dieses ist aus ozonangereicherter Luft und Stickoxiden zusammengesetzt und maximiert somit oxidative Reaktionen.

Trotz der sehr zufriedenstellenden Ergebnisse beinhaltet der Versuchsaufbau und -ablauf noch einiges an Optimierungspotential. Dazu sind vor allem die in Kapitel 3.2.1 bzw. 2.8.2 beschriebenen Einflussfaktoren und die Ausgangsgasaufbereitung anzudenken. Um dabei aber gezielte Aussagen treffen zu können, die auch in Echtzeit anwendbar sind, bedarf es einer Messeinrichtung, die es erlaubt, einerseits die Zusammensetzung der Ausgangsluft zu kontrollieren bzw. die Ozonanreicherung und die Veränderung des Gases zu überwachen. Eine Möglichkeit dafür ist ein Restgasanalyse-System (RGA) in Form eines Massenspektrometers. Des Weiteren ist anzudenken, dass die entwickelte Alterungsmethode auch für andere Formen von Asphaltprobekörper adaptiert wird. Der Grund dafür ist, dass momentan Steifigkeitsversuche an zylindrischen Probekörpern möglich sind. In der Realität werden allerdings die obersten Schichten des Asphaltaufbaus am meisten von den Oxidationsmitteln beansprucht. In diesen Zonen ist hauptsächlich das Tieftemperaturverhalten ausschlaggebend, weswegen eine Alterungsmöglichkeit für Probekörperformen sinnvoll sind, die bei Abkühlversuchen mit behinderter Längendehnung (TSRST) bzw. einaxialen Zugversuchen (UTST) geprüft werden können. Zusammenfassend kann man folgende Fragestellungen für die weitere Forschung und Entwicklung festsetzen:

- Welchen Einfluss hat das Ausgangsgas auf das Potential der Ozonanreicherung und somit der Alterungsgeschwindigkeit? (RGA)
- Welche Maßnahmen können zur Erhöhung des Ozonanreicherungspotentials getroffen werden?
- Kann durch eine Erhöhung des Volumenstroms eine schnellere Alterung hervorgerufen werden?
- Wie verändern sich die Tieftemperatur- und Ermüdungsverhalten des Asphalts bei der in dieser Arbeit beschriebenen Methode?

Abschließend muss man festhalten, dass sich die Veränderungen der Materialeigenschaften sehr gut mit einer Alterung des Bitumens im Pressure Aging Vessel vergleichen lassen. Be-

trachtet man die Unterschiede in der Konditionierung der Materialien, wie in Tabelle 7.1 dargestellt, dann zeigt sich, dass man mit dieser neu entwickelten Methode weit näher an einer realen Alterung, wie sie über die Jahre im Feld passiert, liegt.

Tab. 7.1 Vergleich der Alterungsparameter

<i>Parameter</i>	<i>PAV</i>	<i>Wiener Methode</i>
Temperatur [C°]	100	60-(70)
Druck [bar]	21	~0,1-0,2
Dauer [h]	20	96
Medium	atmosphärische Luft	ozonanreicherte Druckluft

Der Grund dafür und somit auch der große Vorteil dieser Methode ist, dass die Temperatur und der Druck sehr stark gesenkt werden konnten und somit realitätsnah sind. Natürlich gilt es hier noch Untersuchungen anzustellen, welche chemisch strukturellen Veränderungen im Bitumen stattfinden. Dies ist deshalb wichtig, da eine Alterung im PAV eine gute Abbildung der mechanischen Veränderungen im Vergleich zu langzeitgealterten Proben aus dem Feld hat, aber vor allem Unterschiede bei den chemisch strukturellen Veränderungen aufweist.

Literaturverzeichnis

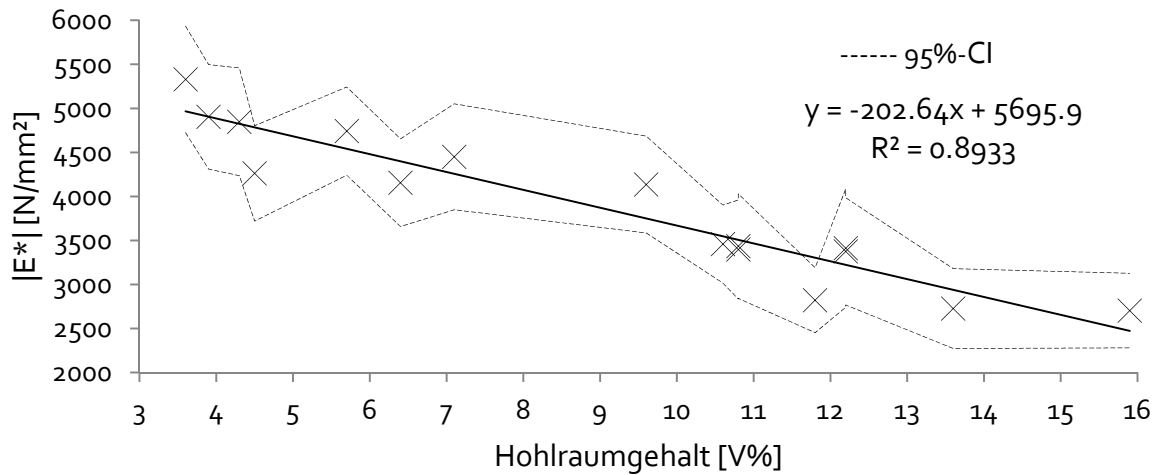
1. Loja Hartsteinwerk. [Online] [Zugriff: 02.04.2014]; Available from: <http://www.loja.at/>.
2. Bauer, E., *EU-Konformitätserklärung gemäß EN13043, ZA. 1a+1b) und ZA.2.2.* Hartsteinwerk Loja: Persenbeug, 2012.
3. Bell, C.A., et al., *Selection of Laboratory Ageing Procedures for Asphalt Aggregate Mixtures (SHRP-A-383)*, in *Strategic Highway Research Program*. National Reserach Counil: Washington, DC, 1994.
4. Benedix, R., *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. Wiesbaden, 2011: Vieweg+ Teubner Verlag | GWV Fachverlage GmbH. ISBN: 978-3-8348-0584-3.
5. Beuing, E.Southern, M. *Creating sustainable asphalt pavements*. in *Eurasphalt & Eurobitume Congress, 5th, 2012, Istanbul, Turkey*. 2012.
6. Buechler, S.Wistuba, M., *Braunschweiger Verfahren zur Alterung von Asphaltmischgut und deren Einfluss auf die Kaelte-und Ermuedungseigenschaften*. Strasse Und Autobahn, 2010. 61(1).
7. CEN, EN 1427: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des Erweichungspunktes - Ring- und Kugel-Verfahren. Brussels, 2007.
8. CEN, EN 12597: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Terminologie. Brussels, 2012.
9. CEN, EN 12697-3: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 3: Rückgewinnung des Bindemittels: Rotationsverdampfer. Brussels, 2013.
10. CEN, EN 12697-6. Asphalt—Prüfverfahren für Heißasphalt—Teil 6: Bestimmung der Raumdichte von Asphalt-Probekörpern. 2012.
11. CEN, EN 12697-33: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 33: Probestückvorbereitung mit einem Rollenverdichtungsgerät. Brussels, 2013.
12. CEN, EN 12697-35: Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 35: Labormischung. Brussels, 2007.
13. CEN, EN 14769: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Beschleunigte Langzeit-Alterung mit einem Druckalterungsbehälter (PAV). Brussels, 2012.
14. CEN, EN 14770: Bitumen und bitumenhaltige Bindemittel - Bestimmung des komplexen Schermoduls und des Phasenwinkels - Dynamisches Scherrheometer (DSR). Brussels, 2012.
15. Çetinkaya, R., *Bewertung der Einflussgrößen auf die thermisch-oxidative Alterung von Bitumen im Asphalt*. Schriftenreihe Lehrstuhl für Verkehrswegebau. Bochum; Germany, 2011: Europ. Univ.-Verl. ISBN: 978-3-89966-623-6.
16. Choi, Y.K., *Development of the saturation ageing tensile stiffness (SATS) test for high modulus base materials*. University of Nottingham, 2005.

17. Decker, J., *Nachhaltige Beschaffung im NÖ Straßendienst*. Amt der NÖ Landesregierung: St. Pölten, 2013.
18. Eberhardsteiner, L., et al., *Influence of Asphaltene Content on Bitumen Behavior - Experimental Investigation and Micromechanical Modeling*. Materials and Structures, 2014.
19. Eberhardsteiner, L., et al., *Aktuelle Erkenntnisse zum Alterungsverhalten von Bitumen und Asphalt*. Straße und Autobahn, 2014. 08/2014.
20. Englert, N., *Ozon als Luftschadstoff*. Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz, 2000. 43(7).
21. Erxleben, H., *Die Extraktion in der Fließanalyse mit Hilfe der Chromatomembran-Zelle*. 2000.
22. Findley, W.N., Davis, F.A., *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*, 2013: Courier Dover Publications. ISBN: 0486145174.
23. Handle, F., *Protokoll zum 9. Jour Fixe im Projekt "Ökophalt"*, T.U. Wien, Editor., 2013.
24. Hofko, B., Blab, R., Alisov, A., *Influence of Compaction Direction on Performance Characteristics of Roller-compacted HMA Specimens*. International Journal of Pavement Engineering, 2014. 15.
25. Hospodka, M., *Alterungsmechanismen von Bitumen und Simulation der Alterung im Labor*. Universität für Bodenkultur Wien: Wien, 2013.
26. Kappl, K., *Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von zyklischen Triaxialprüfungen: Assessment and modelling of permanent deformation behavior of bituminous mixtures with triaxial cyclic compression tests*. Mitteilungen des Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung, ed. R. Blab and J. Eberhardsteiner. Wien, 2008: Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung Technische Universität Wien. ISBN: 9783901912207.
27. Krzemien, R., *Gesteinskörnungen*, in *Gestrata Asphalt Handbuch*: Wien, 2002.
28. Kurzmann, G.E., *Ozonanwendung in der Wasseraufbereitung: Geschichte, Herstellung, Eigenschaften, Technologien, Reaktionen, Korrosion und Korrosionsschutz*. Ehningen bei Böblingen, 1993: expert verlag. ISBN: 3816909116.
29. Lesueur, D., *The colloidal structure of bitumen: Consequences on the rheology and on the mechanisms of bitumen modification*. Advances in colloid and Interface Science, 2009. 145(1).
30. Litzka, J., et al., *Gebrauchsverhaltensorientierte Bitumenprüfung*. Strassenforschung, 1999(479).
31. Müller, W., et al., *Asphalt im Straßenbau*, in *Gestrata Asphalt Handbuch*. GESTRATA: Wien, Austria, 2002.
32. Neumann, R., *Geologie für Bauingenieure*, 1964: Ernst.
33. OECD, *Entwicklungszusammenarbeit Bericht 2012*. Paris, 2012: OECD Publishing. ISBN: 978-92-64-20159-0.

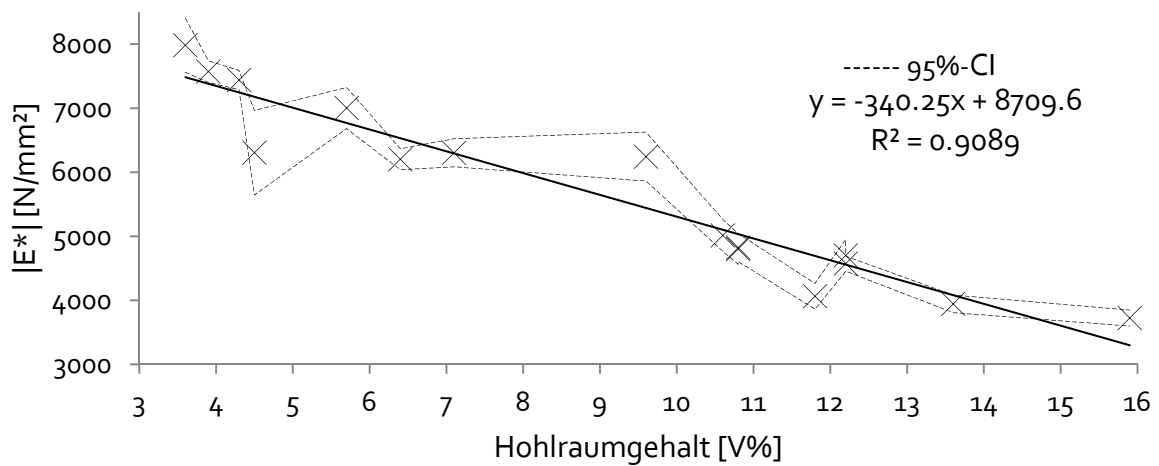
34. ONI, ÖNORM B 3580-1: Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 1: Asphaltbeton - Empirischer Ansatz - Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 13108-1. Wien, 2009.
35. Österreich, R., *BGBL. II Nr. 253/2001 idF BGBL. II Nr. 429/2011: Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über Grenzwerte für Arbeitsstoffe und über krebserzeugende Arbeitsstoffe (Grenzwerteverordnung 2011-GKV 2011)*. Anhang I/2011: Stoffliste, 2014.
36. Pfeiler, A., *Erhöhung der Griffigkeit von Asphaltstraßen: der Einfluß der Polierresistenz feiner Gesteinskörnungen auf das Griffigkeitsverhalten von Asphaltdeckschichten*. Wien, Austria, 2004. ISBN: 3901912150.
37. Povh, B., *Anschauliche Physik für Naturwissenschaftler*. Heidelberg, Germany, 2011: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011.
38. Read, J.Whiteoak, D., *The Shell bitumen handbook*, 2003: Thomas Telford. ISBN: 072773220X.
39. Roeper, M.Zellner, R., *Chemie ueber den Wolken*. Wiley-VCH Verlag: Weinheim, 2011.
40. Schaar, H., et al., *KomOzon-Technische Umsetzung und Implementierung einer Ozonungsstufe für nach dem Stand der Technik gereinigtes kommunales Abwasser Heranführung an den Stand der Technik*. Wien, Austria, 2011.
41. Schumann, W., *Steine und Mineralien. Ein Bestimmungsbuch*. Büchergilde Gutenberg Frankfurt/M, Wien, Zürich, 1975.
42. Stieger, S., *Skript: Chemie III*, K. Solothurn, Editor.: Solothurn, Switzerland, 2013.
43. Tappert, A.Weiland, N., *Verfahren zur Bestimmung der zugänglichen Hohlräume von Asphalt*. Bitumen, 1989. 51(4).
44. Thamfald, H., *Permanent deformation characterization of asphalt mixes by means of wheel track testing*. Technische Universität Wien: Wien, 1990.
45. Umweltbundesamt, *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich Statusbericht 2012*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft: Wien, 2012.
46. Verkehrswesen, F.F.f.S.-u., AL Sp-Asphalt 09. Arbeitsanleitung zur Bestimmung des Steifigkeits- und Ermüdungsverhaltens von Asphalten mit dem Spaltzug-Schwellversuch als Einganggröße in die Dimensionierung. 2009.
47. Vollenschaar, D., *Bitumenhaltige Baustoffe*, in *Wendehorst Baustoffkunde*. Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien: Wiesbaden, Germany, 2011. ISBN: 3663118304.

Anhang

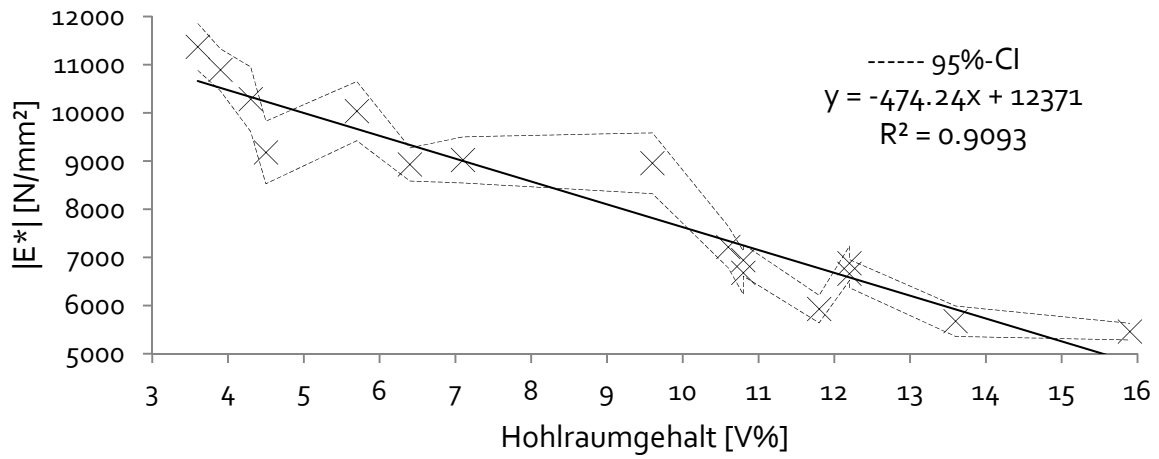
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=0,1 \text{ Hz}$



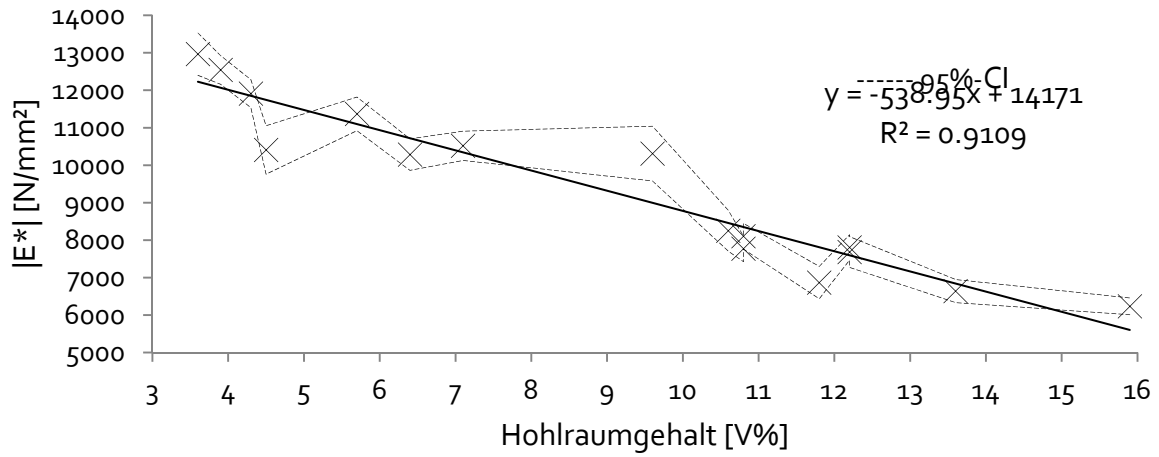
Einfluss Hohlraumgehalt- IT-CY 10 °C - $f=1 \text{ Hz}$



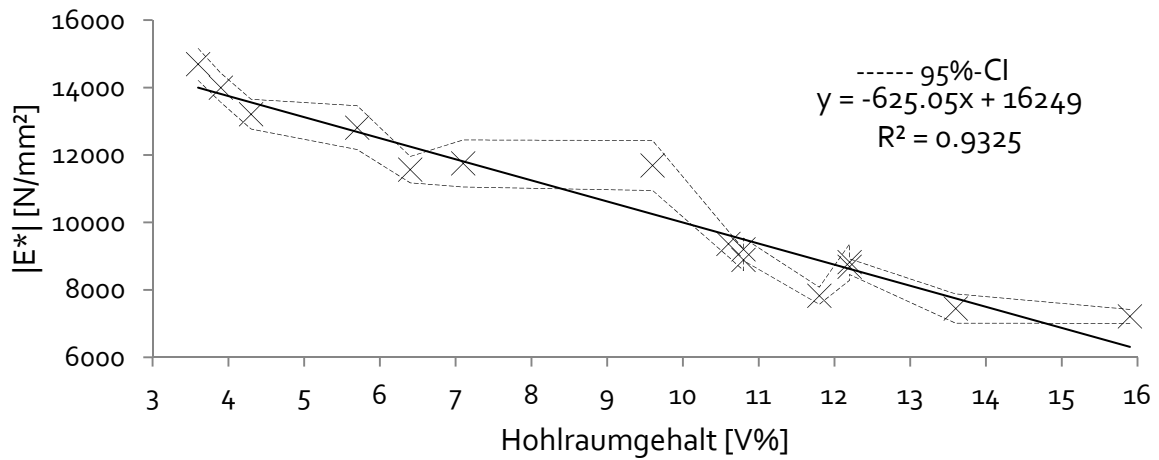
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=5 \text{ Hz}$



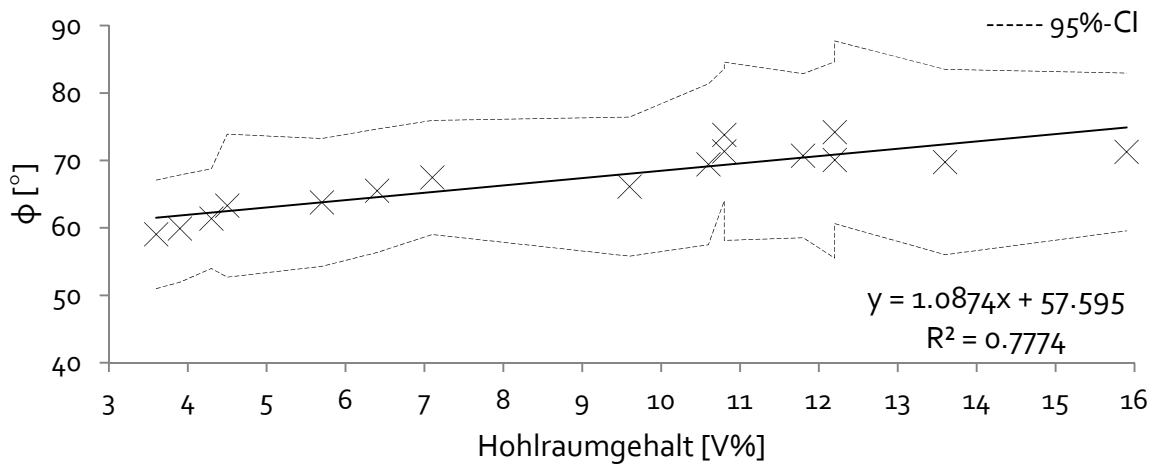
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=10 \text{ Hz}$



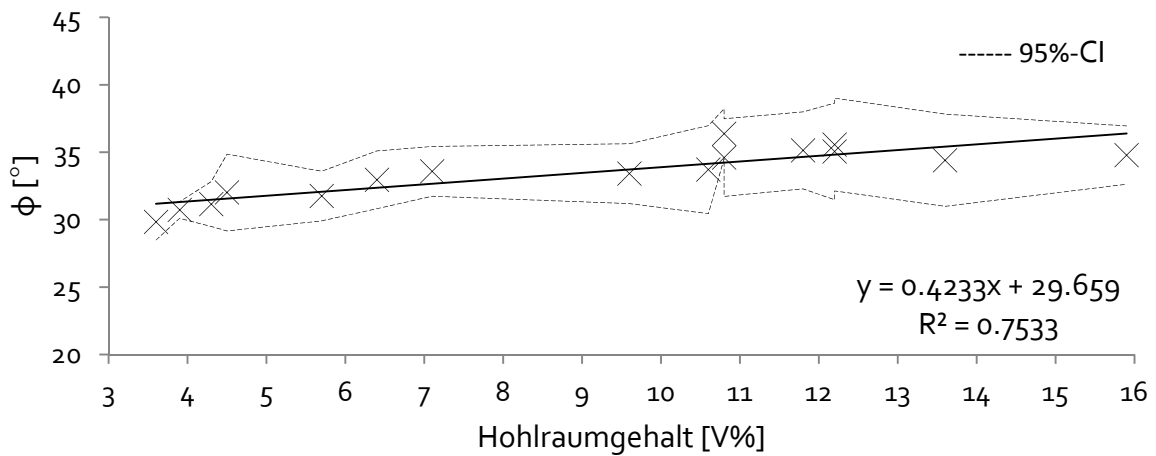
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=20 \text{ Hz}$



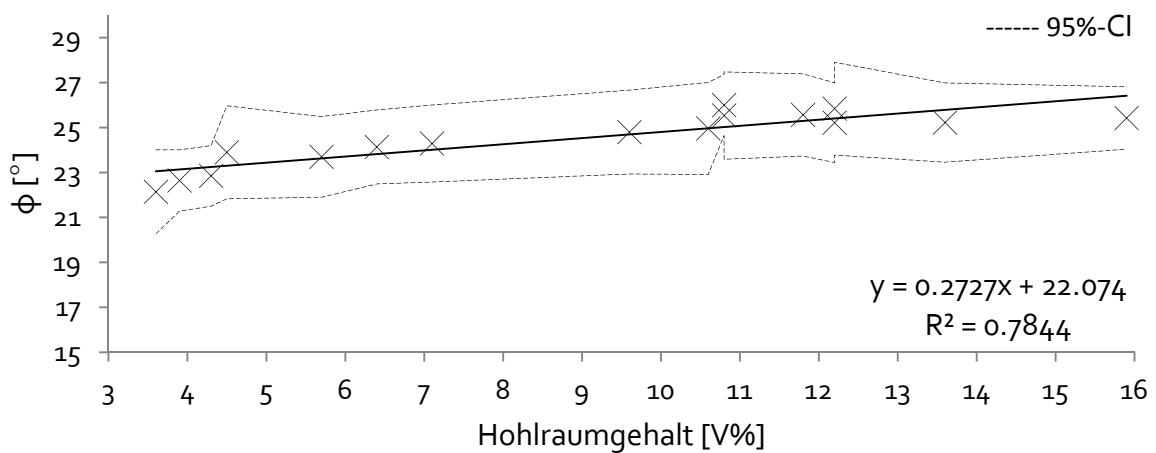
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=0,1 \text{ Hz}$



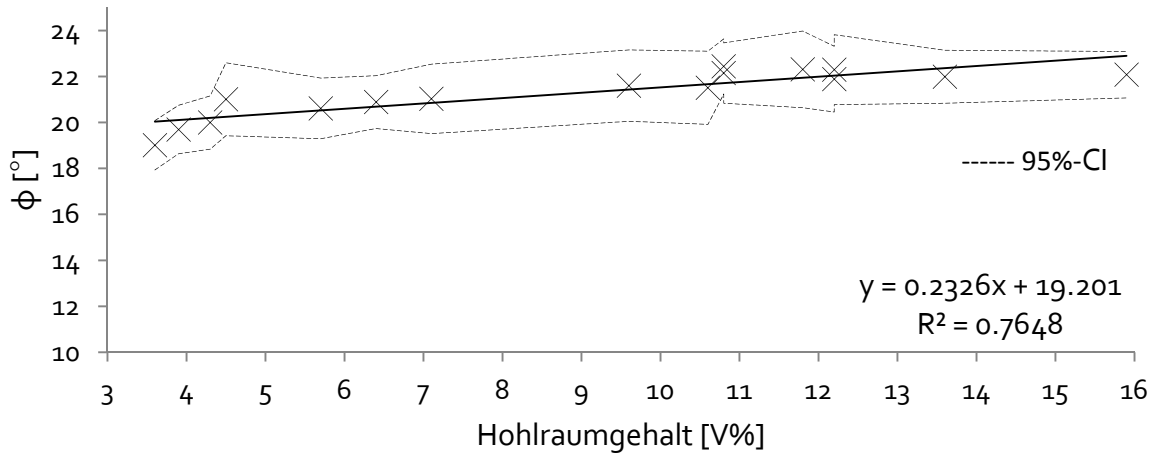
Einfluss Hohlraumgehalt- IT-CY +10 °C - $f=1 \text{ Hz}$



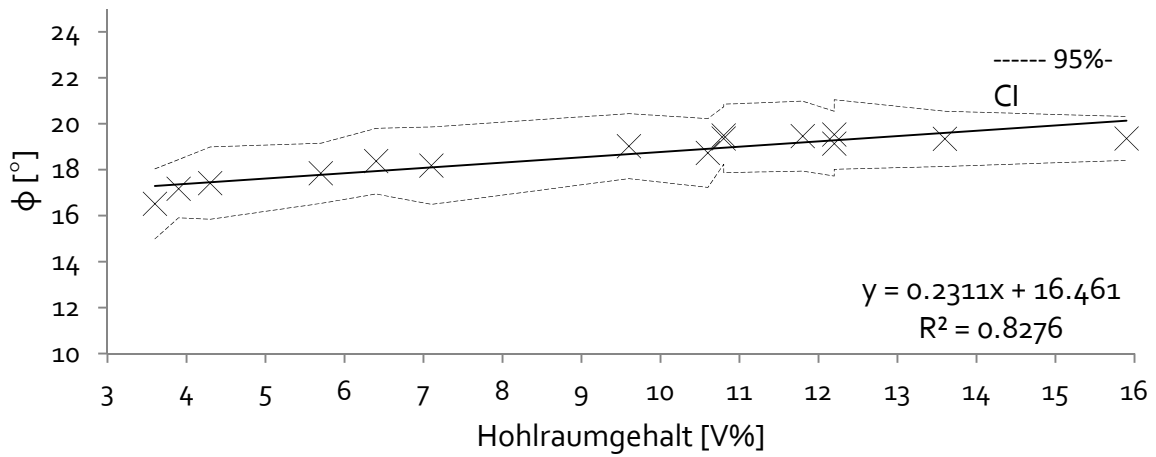
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - $f=5 \text{ Hz}$



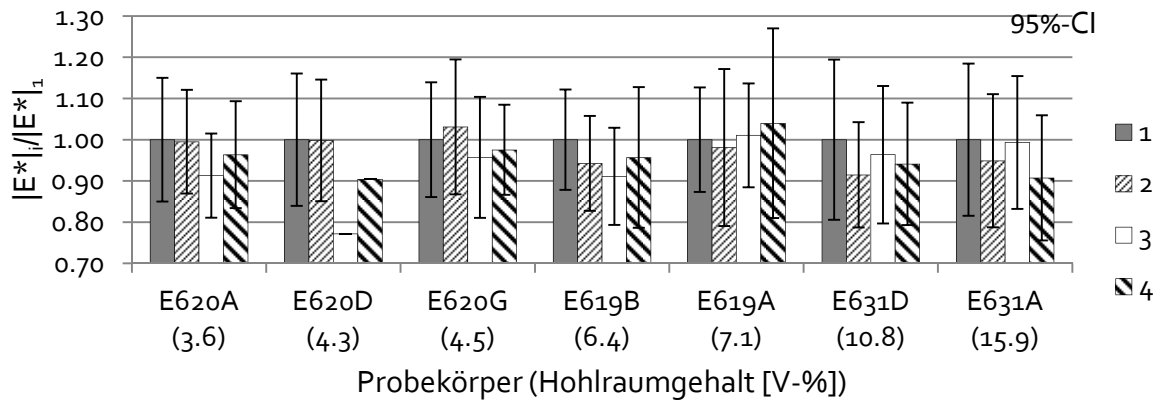
Einfluss Hohlraumgehalt - IT-CY +10 °C - f=10 Hz



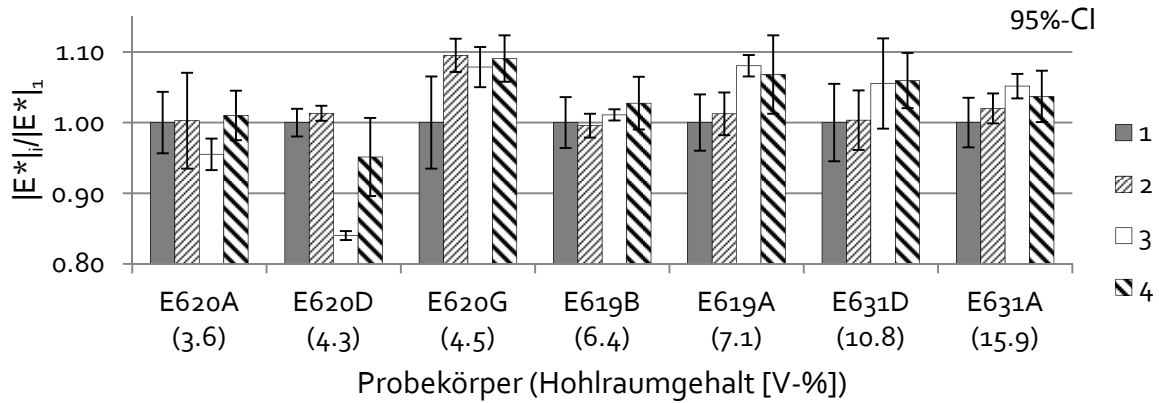
Einfluss Hohlraumgehalt- IT-CY +10 °C - f=20 Hz



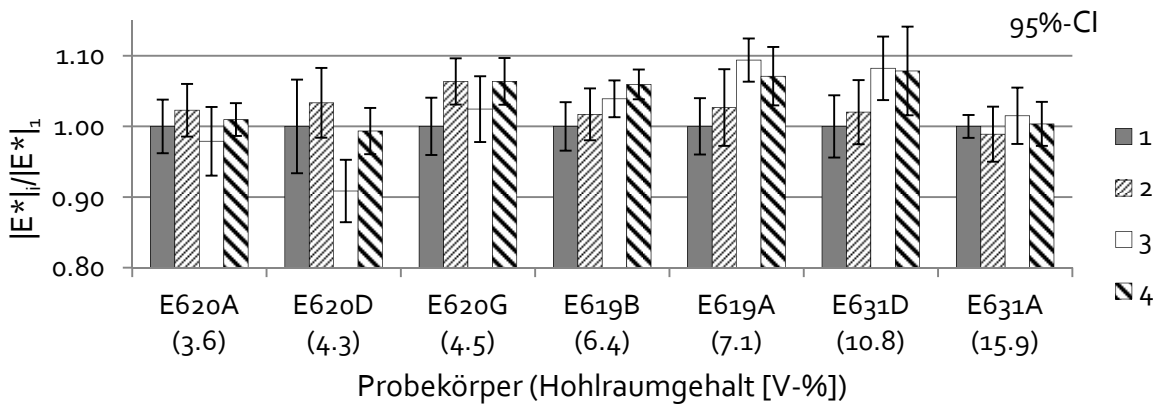
*Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=0,1 Hz*



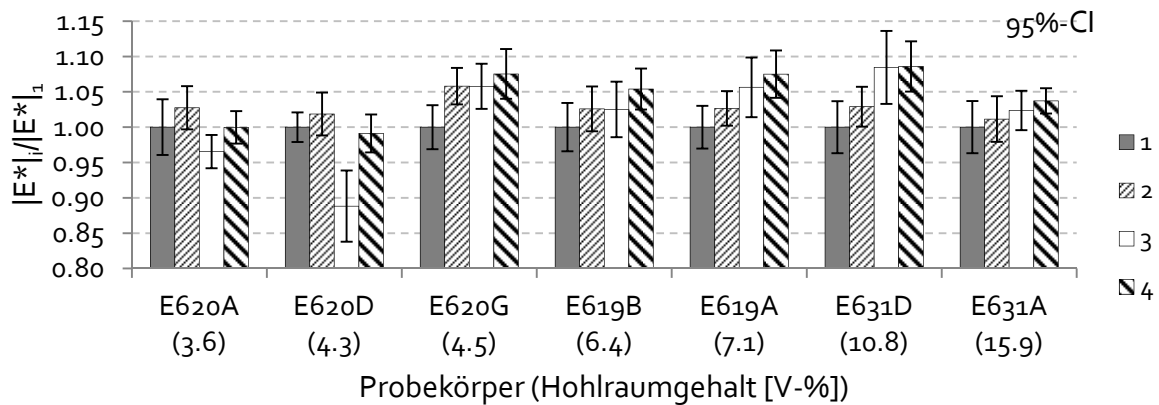
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=1 Hz



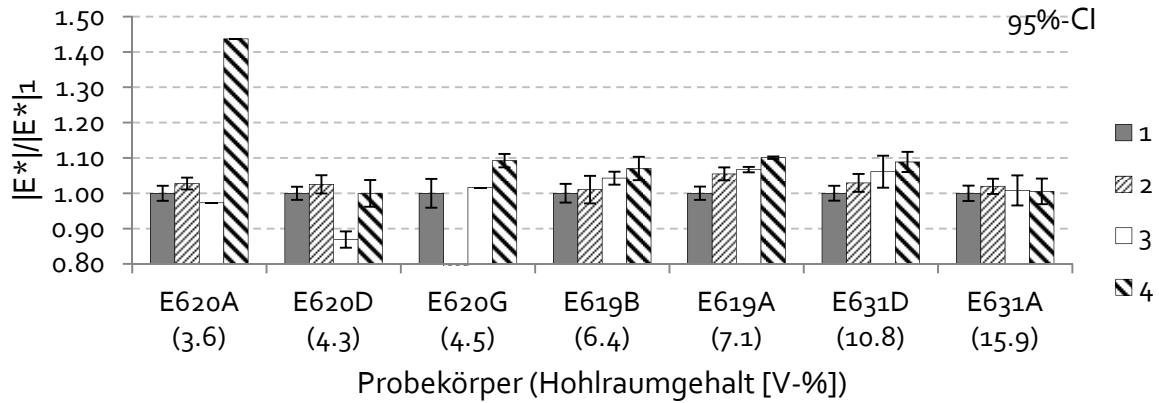
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=5 Hz



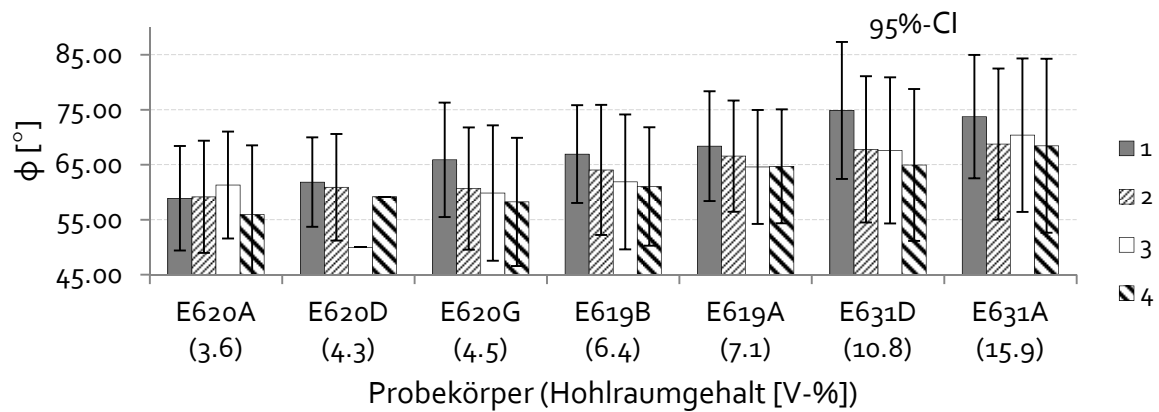
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=10 Hz



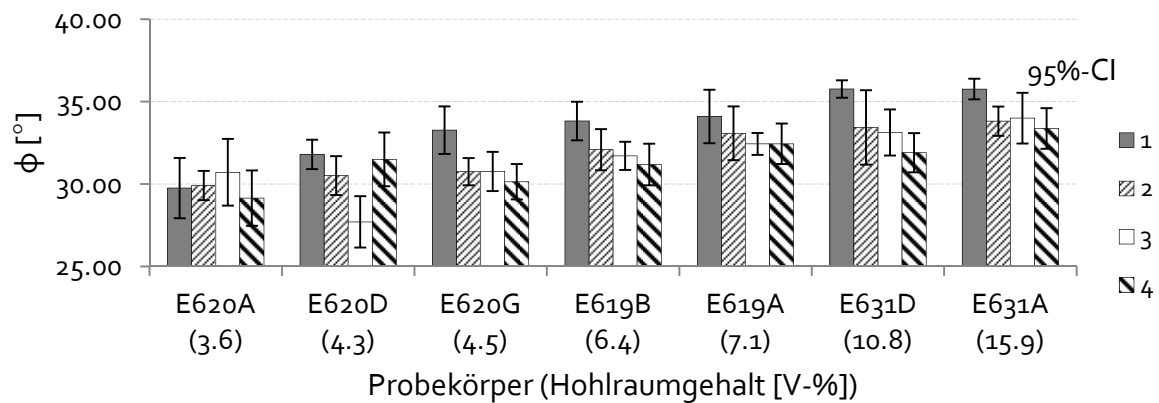
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=20 Hz



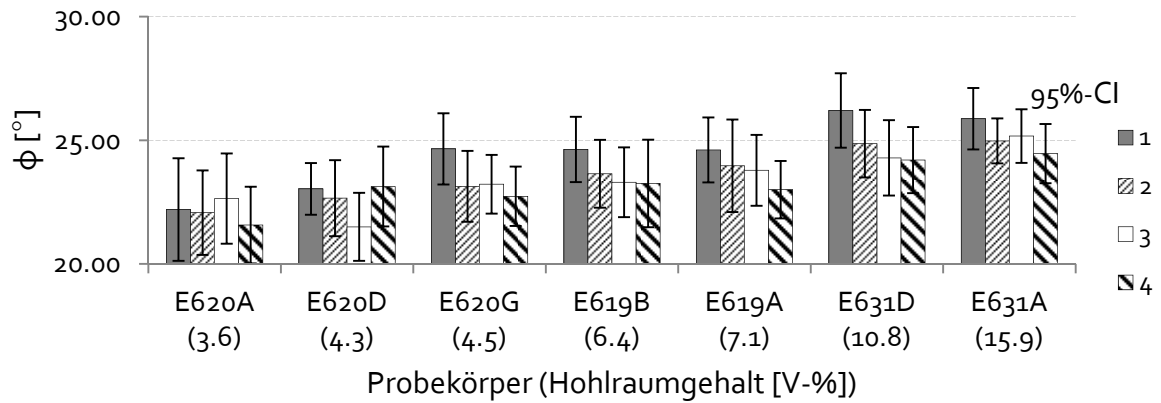
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=0,1 Hz



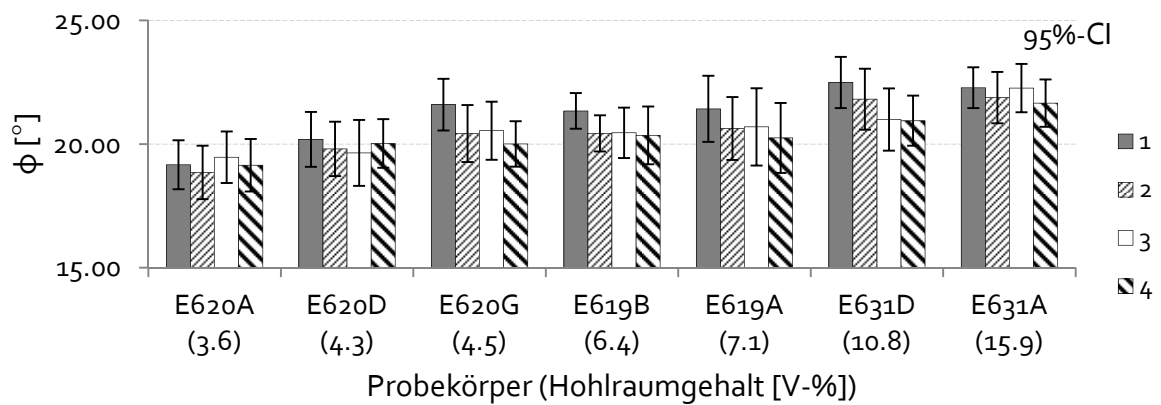
Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=1 Hz



Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=5 Hz



Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=10 Hz



Wiederholungsprüfung
IT-CY +10 °C - f=20 Hz

