Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist an der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt (http://www.ub.tuwien.ac.at).

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology (http://www.ub.tuwien.ac.at/englweb/).

D I P L O M A R B E I T

Master Thesis

Viskoelastische Eigenschaften von polymermodifizierten Asphalten unter zyklisch dynamischer Druckschwellbelastung

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

unter der Leitung von

O. Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab
und
Univ. Ass. Dipl.-Ing. Bernhard Hofko,
E230/3 Institut für Verkehrswissenschaften
Forschungsbereich für Straßenwesen

eingereicht an der Technischen Universität Wien,
Fakultät für Bauingenieurwesen,
von

Matthias Mader
E610/0225466
Fasangasse 16, 2285 Leopoldsdorf i.M.

Wien, 29.10.2010

Kurzfassung

Viskoelastische Eigenschaften von polymermodifizierten Asphalten unter zyklisch dynamischer Druckschwellbelastung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es Grundlagen für die Weiterentwicklung des triaxialen Druckschwellversuchs zur Ermittlung des Widerstandes von Asphalt gegen bleibende Verformungen im Hochtemperaturbereich zu schaffen. Bisher wird in diesem gebrauchsverhaltensorientierten (GVO) Standardversuch eine zyklisch-dynamische Axiallast aufgebracht, mit der die Verkehrslast simuliert wird. Der Einspannungszustand im Straßenkörper wird durch einen radialen Stützdruck modelliert. Derzeit wirkt dieser Stützdruck statisch, was jedoch nicht der realen Situation im Straßenaufbau entspricht. Um die Realität durch den Versuch besser anzunähern, soll ein zyklisch-dynamischer, radial wirkender Stützdruck eingeführt werden. Dazu müssen die Einflüsse von Temperatur, Belastungsfrequenz und Mischgutparameter auf die Phasenverschiebung zwischen axialer Belastung und radialer Verformung systematisch untersucht werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an polymermodifizierten Asphalten anhand von Reihenuntersuchungen an der Triaxialprüfmaschine die Phasenverschiebung bei variierenden Randbedingungen untersucht. Um die viskoelastischen Eigenschaften von Asphalten bestimmen zu können, wurde die radiale Dehnungsmessung mit direkt an den Probekörper applizierten Dehnungsmessstreifen eingeführt.

Matthias Mader

Summary

Viscoelastic properties of polymer modified asphalt under cyclic dynamical compression loading

The aim of this master thesis is to provide the basics for an enhanced triaxial cyclic compression test (TCCT) to determine the resistance of asphalt concrete (AC) to permanent deformation at high temperatures. Until now a cyclic, sinusoidal axial load is applied to a specimen to simulate traffic loading in this performance based test method. The confinement within the pavement structure is simulated by radial confining pressure. Currently this pressure is applied static, which is different to the real situation in the pavement. To simulate the situation in a more realistic way, a cyclic-dynamic confining pressure is to be introduced into an enhanced TCCT. This requires to study the impact of temperature, loading frequency and material parameters on the phase lag between axial loading and radial strain.

Within the master thesis a comprehensive test program on hot mix asphalt (HMA) with polymer-modified binder was carried out to investigate the main impact factors on the radial phase lag. To determine the viscoelastic properties of asphalt, the radial strain measurement was introduced by stain gauges applied directly to the specimen.

Matthias Mader

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Diplomarbeit am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich Straßenwesen, an der Technischen Universität Wien. Die Arbeit beschreibt mit der Analyse des Phasenversatzes ein bestimmtes Verformungsverhalten von zylindrischen Probekörpern aus polymermodifiziertem Asphalt in uniaxialen und triaxialen dynamischen Druckschwellversuchen bei gezielter Variation des Spannungszustandes, der Prüftemperatur und der Prüffrequenz.

Dem Leiter des Forschungsbereichs Straßenwesen, Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Ronald Blab, bin ich für die großzügige Förderung meiner Arbeit und die fachliche sowie finanzielle Unterstützung zu besonderem Dank verpflichtet.

Die Anregung für diese Arbeit kam von Univ. Ass. Dipl.-Ing. Bernhard Hofko. Ihm danke ich für das dadurch zum Ausdruck gebrachte Vertrauen und die stetige fachliche sowie menschliche Betreuung.

Herrn Dipl.-Ing. Dr. Karl Kappl, dem ehemaligen Leiter des Labors, danke ich für die Bereitstellung der Triaxialprüfmaschine, sämtlichen Arbeitsmaterials und ebenfalls für die stets fachliche Unterstützung.

Für die Unterstützung bei der Erstellung des Kapitels 5 möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Walter Fußeis danken.

Nicht unerwähnt darf das Team des Labors des Forschungsbereichs für Straßenwesen am Institut für Verkehrswissenschaften der TU-Wien bleiben, das mir stets bei den verschiedensten Tätigkeiten geholfen hat und für ein angenehmes Arbeitsklima sorgte. Namentlich sind dies Herr David Valentin, Herr Ing. Markus Gmeiner und Herr Thomas Riedmayer.

Mein letzter und größter Dank richtet sich an meine Eltern, OStR. Mag. Hemma und Dr. jur. Thomas Mader, die mir nicht nur mein Studium ermöglicht, sondern mich auch immer über all die Jahre meiner Ausbildung unterstützt haben. Ihnen möchte ich diese Arbeit widmen.

Matthias Mader

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG 1

2. ZYKLISCH, DYNAMISCHE PRÜFUNGEN 4
2.1 Triaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (TCCT) 5
2.2 Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT) 8

3. PRÜFANLAGE FÜR ZYKLISCHE, MEHRAXIALE PRÜFUNGEN 10
3.1 Regeleinheit WDCs 580 & PC 11
3.2 Regelsoftware GEOsys 12
3.3 Triaxialzelle mit Stahlmantel 13
3.4 Laststempel 14
3.5 Messgrößenaufnehmer 14
3.6 Radial- und Umfangsmesssystem 14

4. GRUNDLAGEN VON ELASTIZITÄTS- UND VISKOSITÄTSTHEORIE 15
4.1 Rheologische Grundlagen 15
4.2 Verhalten von viskoelastischen Materialien unter zyklisch-dynamischer Belastung 20
4.3 Einfluss der Temperatur auf die konstitutiven Beziehungen 22

5. GRUNDLAGEN DER VERSUCHSAUSWERTUNG 24
5.1 Signalverarbeitung 24
5.2 Auswertung von Materialkennwerten 28
5.2.1 Kurzbeschreibung des Programmablaufes 28
5.2.2 Anmerkungen zur Interpolation mit dem erweiterten Ansatz 33

6. DEHNUNGSMESSUNG 36
6.1 Messmethoden 36
6.1.1 Induktive Wegaufnehmer (LVDT) 36
6.1.2 Kettenextensometer 38
6.1.3 Radialmessbügel 38
6.1.4 Stahlfederband mit Dehnungsmessstreifen 40
6.1.5 Messring mit Dehnungsmessstreifen 40
6.1.6 Widerstandsdraht 41
6.1.7 Dehnungsmessstreifen 42
6.2 Spannungs- und Verformungsmessung mit Dehnungsmessstreifen 43
6.2.1 Dehnungsmessstreifen 43
6.2.2 Physikalisches Grundprinzip 46
6.2.3 Auswahlkriterien eines DMS 46
6.2.4 Messgrößenerfassung mit Dehnungsmessstreifen 52
6.2.5 Kalibrieren der Messeinrichtung 55
6.2.6 Kompensation von Störeffekten 57
6.2.7 Applikation von Dehnungsmessstreifen 60

7. PRÜFPROGRAMM/LABORPRÜFUNGEN 63
7.1 Materialbeschreibung 63
7.1.1 Gestein 63
7.1.2 Bitumen 64
7.1.3 Asphaltmischguttyp und Sieblinie 64
7.2 Probekörperherstellung und -vorbereitung 66
7.2.1 Mischen von Heißasphalt 66
7.2.2 Verdichten mittels Walzsegmentverdichter 67
7.2.3 Bohren und Schneiden der Probekörper 68

7.2.4 Applikation von Dehnungsmessstreifen ... 69
7.2.5 Vortemperieren der Probekörper ... 69
7.3 Überblick über die durchgeführten Laborprüfungen zum Verformungsverhalten ... 69

8. ERGEBNISSE DER LABORPRÜFUNGEN ZUM VERFORMUNGSVERHALTEN ... 72
8.1 Auswertemethodik ... 72
8.2 Allgemeine Analyse des Materialverhaltens ... 74
8.2.1 Vergleich des Materialverhaltens in axialer und radialer Richtung ... 74
8.2.2 Vergleich des Materialverhaltens von Asphalt und Bitumen ... 76
8.3 Analyse des Materialverhaltens bei Variation des Hohlraum- und Bindemittelgehaltes ... 78
8.3.1 Variation des Hohlraumgehaltes ... 78
8.3.2 Variation des Bindemittelgehaltes ... 79

9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 81

LITERATURVERZEICHNIS ... 83

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN ... 87

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 89

TABELLENVERZEICHNIS ... 93

ANHANG ... I
A 1 Tabellarische Zusammenfassung aller durchgeführter Versuche ... I
A 2 Graphische Darstellung der radialen Phasenwinkel aller durchgeführter Versuche ... II

1. EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Ziel dieser Diplomarbeit ist es Grundlagen für die Weiterentwicklung des triaxialen, zyklischen Druckschwellversuchs (triaxial cyclic compression tests - TCCT) laut EN 12697-25 zur Ermittlung des Widerstandes von Asphalt gegen bleibende Verformungen im Hochtemperaturbereich zu schaffen. Diese Triaxialprüfmethode dient als realitätsnahe Simulation der Spannungs- und Verformungszustände von flexiblen Asphaltstraßenaufbauten unter Verkehrsbelastung bei hohen Temperaturen. Bisher wird in diesem GVO-Standardversuch eine zyklisch-dynamische Axiallast aufgebracht, mit der die Verkehrslast simuliert wird (siehe Abbildung 1-1).

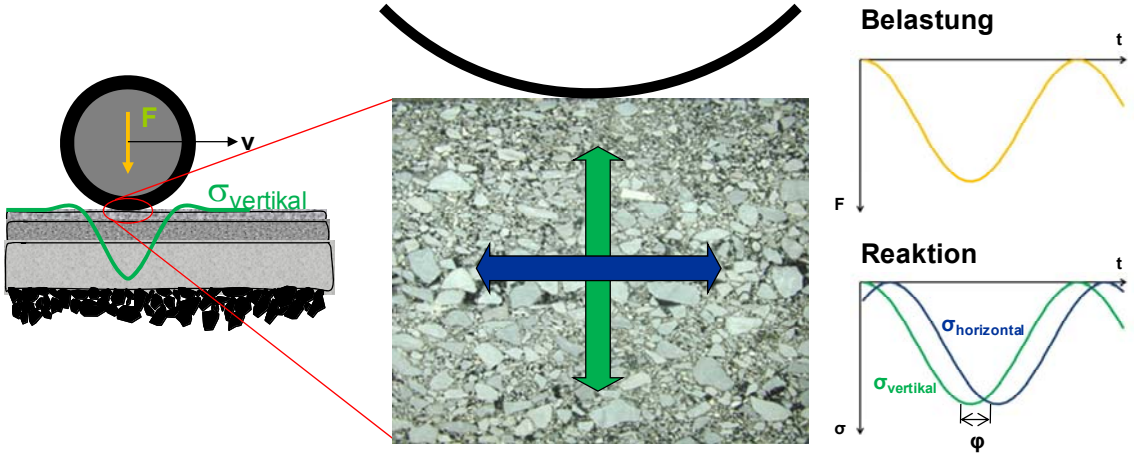


Abbildung 1-1: Simulation der Verkehrslast durch eine zyklisch, dynamisch Axiallast

Die Gegebenheit, dass bei der Überrollung die Beanspruchung an einem Querschnitt im Straßenaufbau zunächst stetig ansteigt, ihr Maximum zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Rad direkt über dem betrachteten Querschnitt befindet, erreicht und wieder abnimmt, wenn das Rad weiterrollt, kann gut durch eine cosinusförmige Funktion dargestellt werden. Die Abbildung 1-1 soll dies graphisch veranschaulichen.

Als Reaktion auf die Belastung entstehen in den Asphaltschichten in vertikaler Richtung Spannungen, die ebenfalls einen Cosinusverlauf aufweisen. Aufgrund der vertikalen Stauchung versucht der Asphalt sich horizontal auszudehnen, das wiederum horizontale Spannungen zur Folge hat. Dieser Einspannungszustand im Straßenkörper wird im Labor in Form von triaxialen Prüfmethoden modelliert, indem ein radialer Stützdruck auf den Probekörper aufgebracht wird (Abbildung 1-2). Bis dato wurde dieser Stützdruck statisch aufgebracht, was jedoch nicht der realen Situation im Straßenaufbau entspricht. Um die Realität durch den Versuch besser anzunähern, soll ein zyklisch-dynamischer, radial wirkender Stützdruck eingeführt werden. Diese oszillierenden Stützdruckschwingungen müssen dabei frequenzgleich zu den axialen Belastungen aufgebracht werden und die Schwingungsamplituden müssen in einem passenden Verhältnis zu jenen der axialen Schwingungsamplituden stehen.

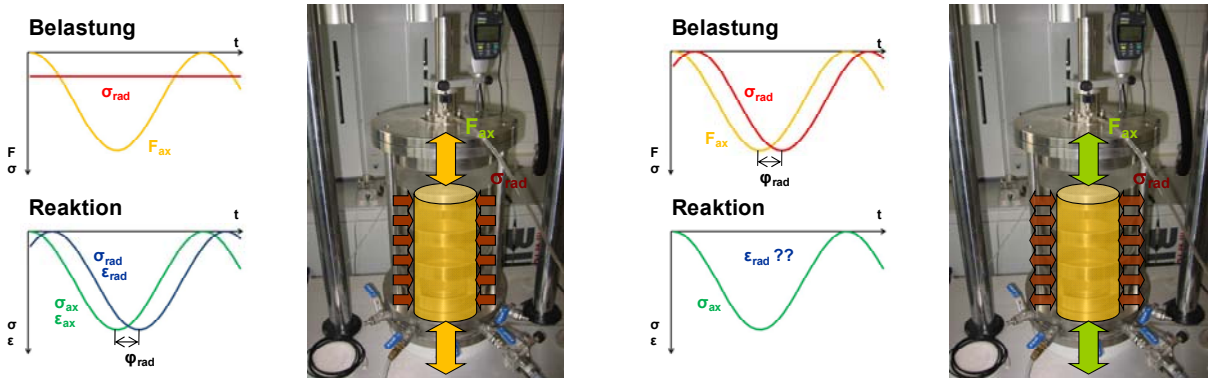


Abbildung 1-2: Simulation des Einspannungszustandes im Straßenkörper im Labor. Links: aktuell verwendeter statischer Stützdruck, rechts: gewünschter oszillierender Stützdruck

Es ist zu beachten, dass es zwischen den vertikalen Lasten und horizontalen Reaktionen zu einem Zeitversatz φ kommt, der vom viskoelastischen Materialverhalten des Asphaltes herrührt. Man spricht auch von einer sogenannten Phasenverschiebung, einem Phasenversatz oder Phasenwinkel. Um einen zyklischen, dynamischen Stützdruck in die Versuchssteuerung implementieren zu können, muss eben diese Phasenverschiebung, die zwischen den axialen Belastungsspannungen und den radialen Dehnungen auftritt, bekannt sein. Dazu müssen die Einflüsse von Temperatur, Belastungsfrequenz und Materialparameter auf die Phasenverschiebung systematisch untersucht werden.

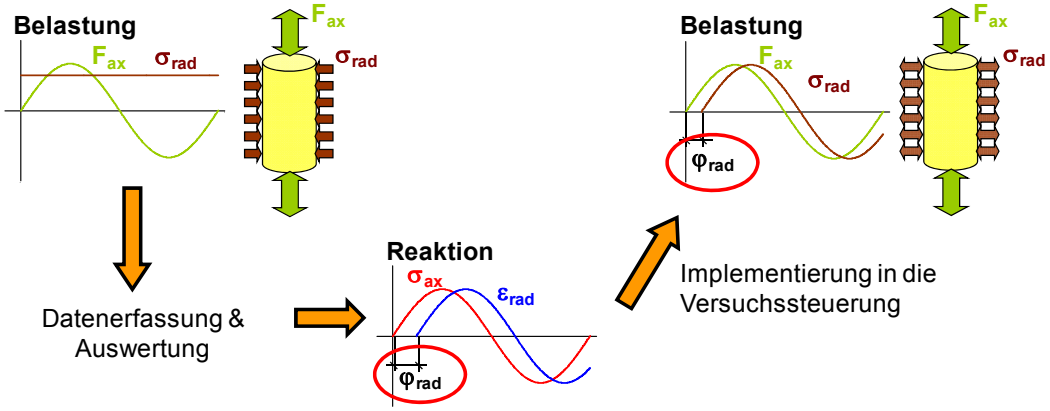


Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Weiterentwicklung des triaxialen, zyklischen Druckschwellversuchs TCCT

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an polymermodifizierten Asphalten anhand von Reihenuntersuchungen an der Triaxialprüfmaschine die Phasenverschiebung bei variierenden Randbedingungen untersucht. Um die viskoelastischen Eigenschaften von Asphalten bestimmen zu können, wurde die radiale Dehnungsmessung mit direkt an den Probekörper applizierten Dehnungsmessstreifen eingeführt.

In Kapitel 2 werden die zyklischen, dynamischen Druckschwellversuche beschrieben, indem die wesentlichsten normativen Grundlagen erläutert werden. Die wichtigsten Komponenten der Prüfeinrichtung werden in Kapitel 3 vorgestellt. Vor allem wird auf jene neuen Komponenten eingegangen, die im Sommer 2009 im Rahmen einer Aufrüstung ergänzt wurden.

Das Kapitel 4 beschäftigt sich mit dem viskoelastischen Materialverhalten von Asphalt. Es soll einen zusammenfassenden Einblick in die Elastizitäts- und Viskositätstheorie geben. Zur rechnerischen Ermittlung der zeitabhängigen Verformungsanteile von Asphalt haben rheologische Modelle Anwendung gefunden, die kurz beschrieben werden.

Einen wichtigen Punkt stellt bei allen durchgeführten Prüfungen immer die folgende Versuchsauswertung dar. Kapitel 5.1 zeigt zunächst auf, worauf bei der Signalverarbeitung zu achten ist. Anschließend wird im Kapitel 5.2 das Auswertungsprogramm beschrieben, das eigens für die GVO-Versuche am Institut für Verkehrswissenschaften (Forschungsbereich Straßenwesen) der TU Wien von Herrn Dipl.-Ing. Fußeis im Fortran-Code entwickelt wurde.

Ein wichtiges Thema in dieser Arbeit stellt die Dehnungsmessung dar, die im Kapitel 6 behandelt wird. Die exakte Messung der am Probekörper auftretenden Deformationen, vor allem die der radialen Deformationen, war bisher ein noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem in der triaxialen Versuchstechnik. Im Kapitel 6.1 werden zunächst neben den induktiven Wegaufnehmern, die für die axiale Verformungsmessung verwendet werden, mehrere radiale Messmethoden angeführt, die jedoch alle Schwächen aufweisen. Die Messeinrichtungen sind entweder zu groß, um innerhalb der Triaxialzelle appliziert zu werden, oder sie messen nur Durchmesser- anstatt Umfangsänderungen. Das Hauptproblem der radialen Verformungsmessung war jedoch bisher, dass die Messinstrumente nur auf der Gummimembran, die zur Abdichtung des Probekörpers notwendig ist, aufgebracht werden konnten. Dies hatte zur Folge, dass in die Messung immer ein unbekannter Einfluss der Gummimembran eingeflossen ist. Im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen der TU-Wien wurde jedoch mit der Einführung von Dehnungsmessstreifen zur Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalten erstmalig eine Messmethode angewendet, die aufgrund der direkten Applikation am Probekörper nicht mehr durch die Gummimembran beeinflusst wird. Das Kapitel 6.2 gibt einen ausführlichen Einblick in die Dehnungmessstreifentechnik.

Im Kapitel 7 wird das gesamte Prüfprogramm dieser Arbeit beschrieben. Es werden alle verwendeten Materialien angeführt, sowie die Probekörperherstellung und –vorbereitung erklärt. Im Unterkapitel 7.3 wird ein Überblick über alle im Rahmen dieser Arbeit durchgeführter Laborprüfungen gegeben.

Sämtliche Erkenntnisse und Aufschlüsse die bei der Analyse der Messwerte gemacht worden sind, sind im Kapitel 8 und im Anhang niedergeschrieben.

2. ZYKLISCH, DYNAMISCHE PRÜFUNGEN

Im Gegensatz zu statischen Prüfverfahren, bei denen die Lastaufbringung gleichmäßig linear ansteigend erfolgt und die Belastung anschließend bis zum Prüfungsende konstant gehalten wird, werden bei dynamischen Prüfungen in der Regel veränderliche, sich wiederholende Lasten (die sich in bestimmten Zyklen wiederholen) auf die Probekörper aufgebracht. Es wird zwischen „dynamischen“ (= sich wiederholenden) Lasten und „zyklisch-dynamischen“ Lasten (= mathematisch harmonische Funktionen) unterschieden.

Einfache „dynamische“ (sich wiederholende, impulsförmige) Belastungen können z.B. haversinusförmige Belastungsfunktionen mit Lastpausen oder dieser Funktion ähnliche, wie z.B. „sägezahnförmige“ oder „haifischflossenähnliche“ Belastungsfunktionen sein. Letztere besitzen in der Regel keine axialsymmetrische[1] Kurvenformen und weisen außerdem Lastpausen zwischen den Belastungsimpulsen auf.

Bei „zyklisch-dynamischen“ Belastungen wird der Probekörper einer harmonisch schwingenden Last ausgesetzt. Eine harmonische Schwingung zeichnet sich dadurch aus, dass die Zeitabhängigkeit ihrer veränderlichen Zustandsgrößen die Form eines Sinus hat. Zugleich ist ihre Schwingungsdauer T und Frequenz f unabhängig von der Amplitude. Zyklisch-harmonische Belastungsschwingungen sind generell axialsymmetrisch in ihrer Form und besitzen keine Lastpausen zwischen ihren Belastungsimpulsen (vergl. Abbildung 2-1).

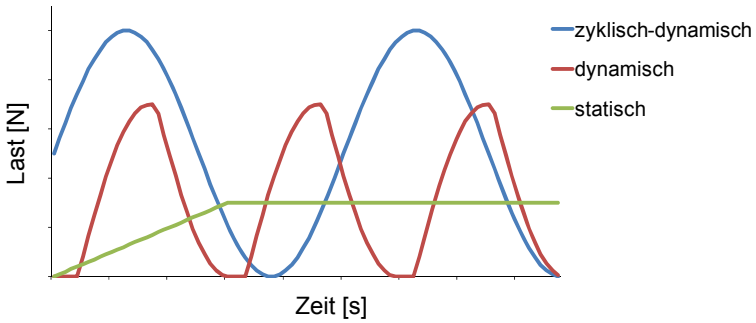


Abbildung 2-1: Beispiele für unterschiedliche Belastungsarten

Einer der Vorteile von dynamischen Prüfungen gegenüber statischen ist zweifellos die realitätsnahe Form der Belastung. Die Lasten werden nicht mit konstanter oder gleichbleibender Verformungs- oder Belastungsrate (quasi „ruhend“) auf die zu prüfenden Probekörper aufgebracht, sondern „dynamisch“, um so die auf den Straßen herrschenden Spannungszustände in den Asphaltschichten, die beim Überrollen durch die Fahrzeugräder entstehen, zu simulieren.

Bei den dynamischen Prüfungen wird versucht, die Spannungsmaxima mit Hilfe von dreiecks- oder halbsinusförmigen Lastimpulsen nachzubilden. Deren Größe richtet sich nach

1 axialsymmetrisch bezüglich der vertikalen Lastachse = Ordinate im Zeit-Belastungs-Diagramm

den tatsächlich auftretenden Spannungen und Umgebungseinflüssen wie Asphalttemperatur. Durch Lastpausen werden die Erholungsphasen, die zwischen den Überrollungen durch die einzelnen Fahrzeugräder stattfinden, simuliert.

Bei zyklischen Prüfungen werden zyklische Belastungen ohne Lastpause verwendet. Diese Art der Belastung hat zusätzlich den Vorteil, dass neben einfacheren Materialkennwerten (wie z.B. Querdehnungszahl nach Poisson) noch zusätzlich Kennwerte zum viskoelastischen Materialverhalten gewonnen werden können. Diese Kennwerte sind der dynamische E-Modul E^* und die Phasenverschiebung φ. [Kappl K., 2007]

2.1 Triaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (TCCT)

Grundlage der triaxialen zyklischen Druckschwellprüfungen (triaxial cyclic compression test) bildet die EN 12697-25:2005 „Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch“ Prüfverfahren B – Triaxialer Druckschwellversuch.

Mit diesem Prüfverfahren wird die Beständigkeit eines zylindrischen Asphalt-Probekörpers gegen bleibende Verformung bestimmt. Dabei wird der auf Prüftemperatur temperierte Probekörper einem triaxialen Spannungszustand ausgesetzt, der durch das Aufbringen eines zyklischen Axialdrucks $\sigma_a(t)$ und eines statischen Radialdrucks σ_c zur Behinderung der Querdehnung erzeugt wird. Der zyklische Axialdruck kann entweder haversine-impulsförmig oder blockimpulsförmig aufgebracht werden (Abbildung 2-2):

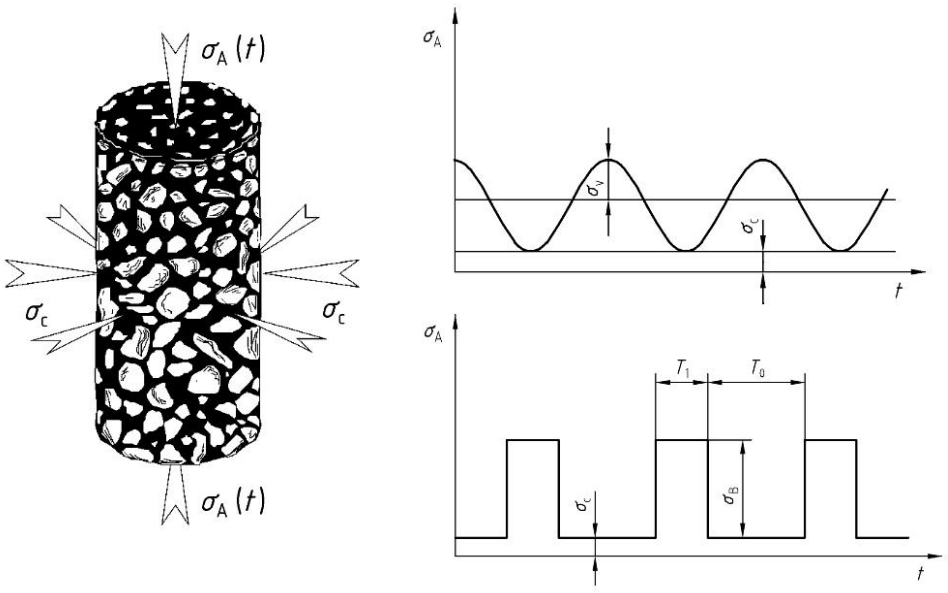


Abbildung 2-2: Darstellung der im Falle einer zyklischen haversine-impulsförmigen Belastung (oben) und einer zyklischen Blockimpulsbelastung (unten) auf den Probekörper ausgeübten Belastung [EN 12697-25:2005]

- Haversine[2]-impulsförmiger Axialdruck $\sigma_a(t)$ mit der Amplitude σ_V:
  Der Gesamtaxialdruck $\sigma_A(t)$ ergibt sich zu

$$\sigma_A(t) = \sigma_c + \sigma_a(t) = \sigma_c + \sigma_V \cdot (1 + \sin(2\pi \cdot f \cdot t)) \quad (1)$$

- Blockimpulsförmiger Axialdruck $\sigma_a(t)$ mit der Höhe σ_B:
  Der Gesamtaxialdruck $\sigma_A(t)$ ergibt sich zu

$$\sigma_A(t) = \sigma_c + \sigma_a(t) \quad (2)$$

Dabei ist

$\sigma_A(t)$ der Gesamtaxialdruck [kPa];

σ_c der Radialdruck zur Behinderung der Querdehnung [kPa];

$\sigma_a(t)$ der zyklische Axialdruck als Funktion der Zeit [kPa], im Fall eines haversine-impulsförmigen Druckes ist $\sigma_a(t)$ durch $\sigma_a(t) = \sigma_V \cdot (1 + \sin(2\pi \cdot f \cdot t))$ definiert, im Fall eines blockimpulsförmigen Druckes ist $\sigma_a(t) = \sigma_B$ während der Blockimpulsperiode T_1 und $\sigma_a(t) = 0$ während der Lastpause T_0;

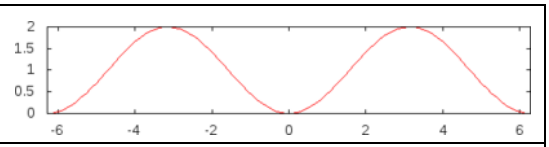
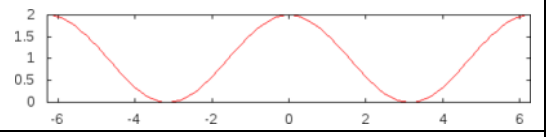
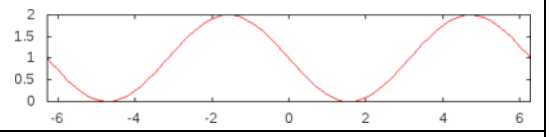
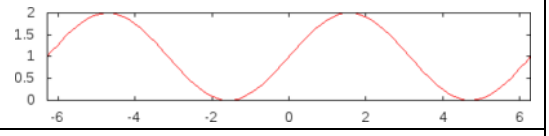
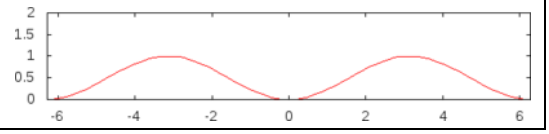
σ_V die Amplitude des haversine-impulsförmigen Druckes [kPa];

f die Frequenz [Hz];

t die Zeit

---

2 Bei der in der EN 12697-25:2005 angegebenen Funktion $1 + \sin(\theta)$ handelt es sich nicht um einen Haversinus, sondern um einen Covercosinus, wie folgende Gegenüberstellung aus [Wikipedia, 2010] verdeutlicht. Bei dem Graphen, der in der Norm angeführt wird (vergl. Abbildung 2-2), handelt es sich ebenfalls nicht um einen Haversinus, sondern um einen Vercosinus. In dieser Arbeit wird dennoch „Haversinus“ geschrieben, um mit der Norm konform zu bleiben.

$\mathrm{versin}(\theta) = 1 - \cos(\theta)$	
$\mathrm{vercosin}(\theta) = 1 + \cos(\theta)$	
$\mathrm{coversin}(\theta) = \mathrm{versin}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = 1 - \sin(\theta)$	
$\mathrm{covercosin}(\theta) = \mathrm{vercosin}\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = 1 + \sin(\theta)$	
$\mathrm{haversin}(\theta) = \frac{\mathrm{versin}(\theta)}{2} = \frac{1 - \cos(\theta)}{2}$	

Während der Prüfung wird die Änderung der Höhe des Probekörpers jeweils nach einer festgelegten Anzahl an Belastungszyklen gemessen. Daraus wird die Gesamtaxialverformung ε_N (bleibende Verformung) des Probekörpers als Funktion der Anzahl an Belastungszyklen bestimmt:

$$\varepsilon_N = 100\left(\frac{h_0 - h_n}{h_0}\right) \tag{3}$$

Dabei ist

ε_N die Gesamtaxialverformung der Probekörper nach *n* Belastungszyklen [%];

h_0 die Durchschnittshöhe, gemessen durch zwei Verformungsmesswertgeber nach der Vorbelastung der Probekörper [mm];

h_n die Durchschnittshöhe, gemessen durch zwei Verformungsmesswertgeber nach *n* Belastungszyklen [mm]

Zur Messdatenerfassung sind eine Kraftmessdose zur Aufzeichnung der aufgebrachten Belastungen, ein Drucksensor zur Aufzeichnung des Stützdruckes und zwei axiale Verformungsmesswertgeber, welche die Änderungen der Probekörperhöhe aufzeichnen, notwendig. Während des Versuchs müssen Versuchszeit, Lastwechselanzahl, Axialkraft, Stützdruck und axiale Verformungen aufgezeichnet werden. Diese Messdaten werden in einem an das Regelsystem angeschlossenen Computer gespeichert [Kappl K., 2007].

Das Ergebnis der Prüfung ist abhängig von den Belastungsbedingungen, der Prüftemperatur, der Frequenz und den Lastpausen sowie den Abmessungen des Probekörpers.

Die Prüfbedingungen für die Bestimmung der Verformungsdehnung bei triaxialer Druckbeanspruchung sind der Tabelle D.2 der EN 13108-20:2006 „Asphaltmischgut - Mischgutanforderungen - Teil 20: Erstprüfung“ zu entnehmen. Für haversine-impulsförmige Axialdruckbelastungen lauten die Prüfbedingungen:

Tabelle 2-1: Prüfbedingungen für triaxiale Druckbeanspruchungen (haversine-impulsförmig) [EN 13108-20:2006]

Schicht	Prüftemperatur	Druck mit behinderter Querdehnung	Axiallast	Frequenz
Deckschicht	50°C	150 kPa	300 kPa	3 Hz
Tragschicht	40°C	50 kPa	200 kPa	3 Hz

Das Axialbelastungssystem muss aus zwei Lastplatten aus Stahl bestehen, zwischen denen der Probekörper angeordnet wird. Der Druck zur Behinderung der Querdehnung und der zyklische Axialdruck sind mit Hilfe eines servohydraulischen, pneumatischen, elektromagnetischen oder sonstigen geeigneten Systems aufzubringen, das in der Lage ist, die geforderten seitlichen Stützdrücke aufzubringen. Dabei ist jedoch der Probekörper in geeigneter Weise vor dem Medium, welches den Stützdruck innerhalb der Triaxialzelle erzeugt (in der Regel Wasser, Öl oder Luft), zu schützen, um so etwaige Zerstörungen des Probekörpers zu verhindern. Meistens werden dazu Latexmembranen verwendet, die um die Probekörper gezogen werden (vergl. Abbildung 2-3) [EN 12697-25:2005].

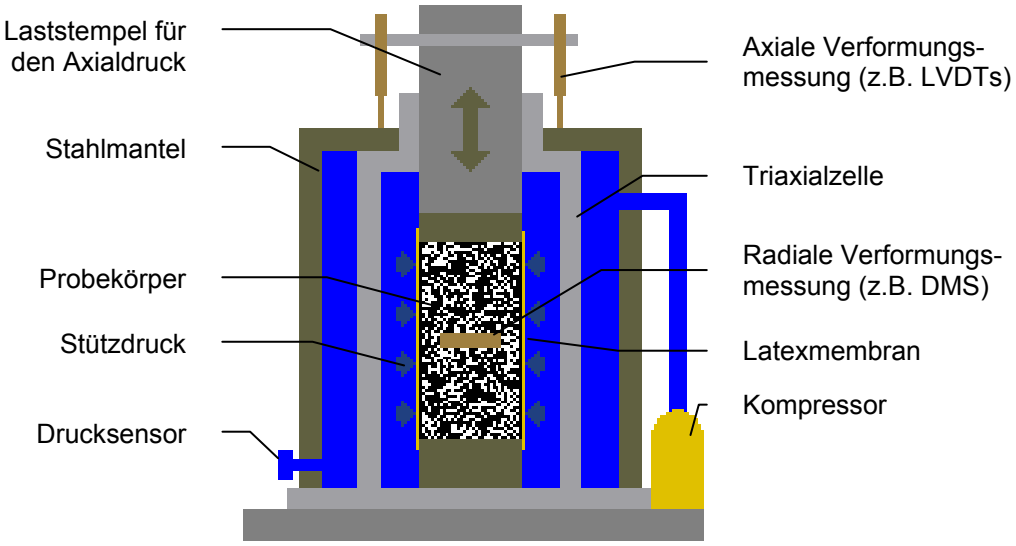


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen triaxialen Druckschwellversuch nach [EN 12697-25:2005]

2.2 Einaxiale, zyklische Druckschwellprüfungen (UCCT)

Beim einaxialen, zyklischen Druckschwellversuch UCCT (uniaxial cyclic compression test) wird in der Regel ein zylindrischer Probekörper mit einer zyklischen Druckbeanspruchung in Richtung der Zylinderachse belastet und die axialen Verformungen in Abhängigkeit von der Zeit oder von Lastwechsel gemessen.

Die zur funktionalen Prüfung des Verformungsverhaltens gemäß Erstprüfungsnorm EN 13108-20 erforderliche Prüfnorm ist EN 12697-25 „Asphalt - Prüfverfahren für Heißasphalt - Teil 25: Druckschwellversuch“ Prüfverfahren A – Einaxialer Druckschwellversuch mit Behinderung der Querdehnung.

Grundsätzlich ist ein rechteckförmiger Blockimpuls $\sigma_A(t)$ mit der Amplitude σ_B (Abbildung 2-2) als zyklische Belastung in dieser Prüfnorm vorgeschrieben. Um eine bestimmte Behinderung der Querdehnung zu erreichen, wird für die Lastplatte ein Durchmesser gewählt, der kleiner ist als der Durchmesser des Probekörpers. Die Behinderung der Querdehnung des Probekörpers ist erforderlich, um jene in flexiblen Straßenaufbauten herrschenden Spannungszustände realitätsnäher abbilden zu können.

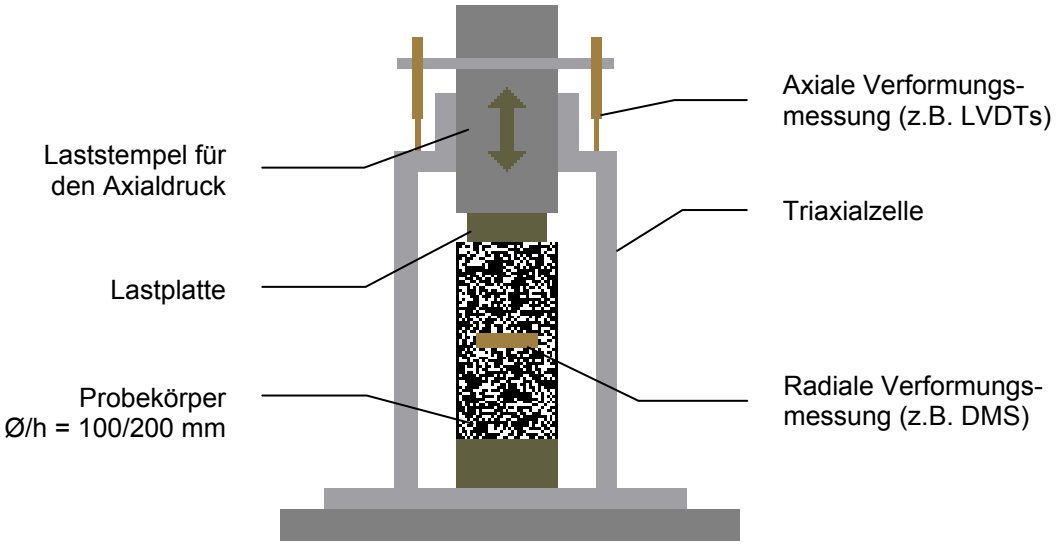


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen uniaxialen Druckschwellversuch mit Behinderung der Querdehnung

Um den Phasenwinkel zwischen der axialen Belastung und der radialen Ausdehnung des Probekörpers bestimmt zu können, muss die Prüfeinrichtung für den einaxialen, zyklischen Druckschwellversuch gemäß EN 12697-25 abgeändert werden. Nachdem die radialen Ausdehnungen nur an der Zylinderoberfläche gemessen werden können, würde die (teilweise) Behinderung der Querdehnung durch die Verwendung einer Lastplatte mit einem geringeren Durchmesser als dem des Probekörpers nicht den tatsächlichen Phasenwinkel ergeben. Aus diesem Grund werden die einaxialen Druckschwellversuche ohne einer Behinderung der radialen Ausdehnung mit Lastplatten mit einem Durchmesser wie jener des Probekörpers durchgeführt.

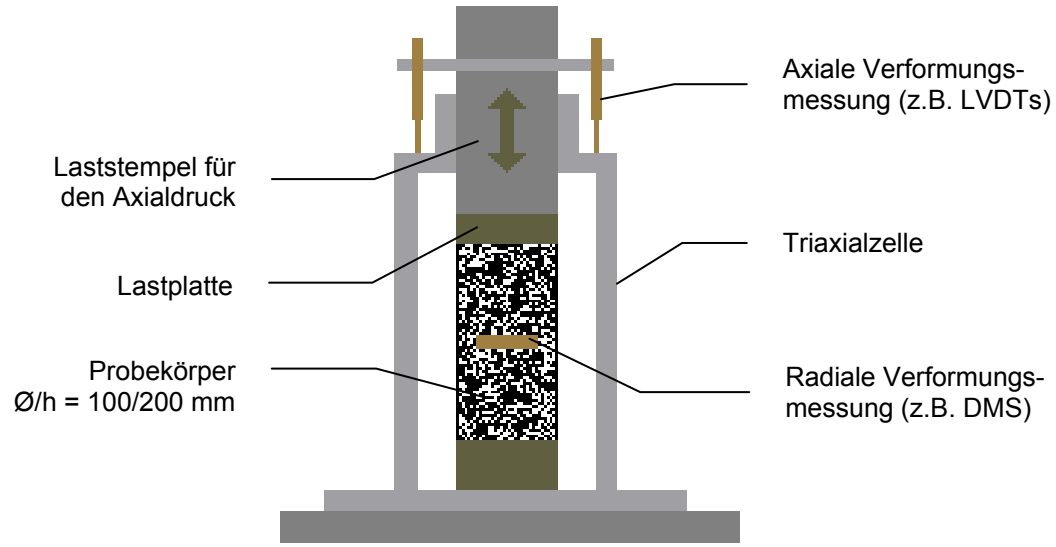


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen uniaxialen Druckschwellversuch ohne Behinderung der Querdehnung

3. PRÜFANLAGE FÜR ZYKLISCHE, MEHRAXIALE PRÜFUNGEN

Alle Versuche im Rahmen dieser Arbeit wurden mit Hilfe der Triaxialprüfmaschine des Straßenbaulabors der TU-Wien durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine 2-kreisige, servohydraulisch betriebene Druck- und Zugprüfmaschine, die zur Erzeugung von dynamischen und zyklischen Axiallasten sowie einem oszillierenden Stützdruck geeignet ist. Sie wurde im Jahr 2002 bei der Gründung des Christian-Doppler-Labors zur „gebrauchsverhaltensorientierten Optimierung flexibler Straßenaufbauten“ angeschafft. Dabei wurde besonders Wert darauf gelegt, dass sie alle Prüfmaschinenanforderungen laut EN 12697-25 erfüllt. In der Abbildung 3-1 sind schematisch die wichtigsten Komponenten der Triaxialprüfmaschine dargestellt.

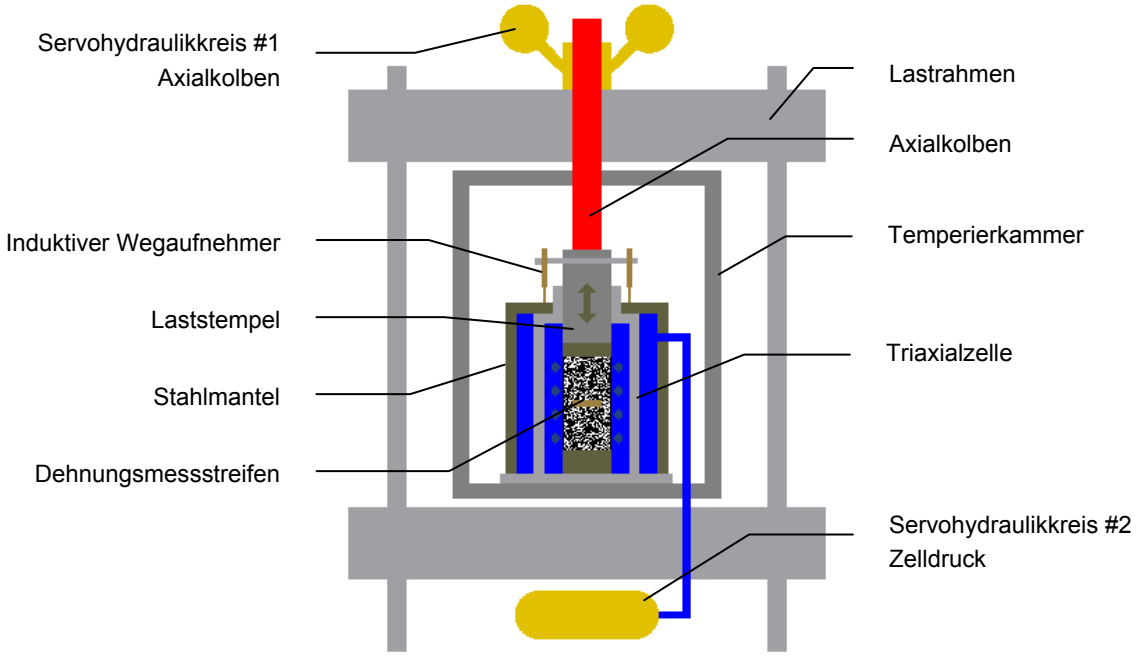


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der 2-kreisigen, servo-hydraulischen Triaxialprüfmaschine mit ihren wichtigsten Bestandteilen

Eine ausführliche Beschreibung der Prüfmaschine ist in [Kappl K., 2007] nachzulesen. In diesem Kapitel wird nur auf die wichtigsten Komponenten eingegangen sowie auf jene, die im Sommer 2009 im Rahmen einer Aufrüstung ergänzt wurden. Die folgende Tabelle gibt einen kurzen Überblick über die wichtigsten Kenndaten der Triaxialprüfmaschine vom Typ LFV 63/50 (K12595).

Tabelle 3-1: Überblick über die wichtigsten Kenndaten der Prüfanlage „Triaxialprüfmaschine LFV 63/50 (K12595)“ [Kappl K., 2007]

Merkmal	Bereich
Maximale statische Prüfkraft des Axialkolbens	± 63 kN
Maximale dynamische Prüfkraft des Axialkolbens	± 50 kN
Kolbenhub des Axialkolbens	± 125 mm
Frequenz des Axialkolbens	0 bis 40 Hz
Amplituden des Axialkolbens	± 0,5 mm
Prüfraumhöhe zwischen Adapter und Lasttisch (Kolben in Mittelstellung)	1310 mm
Maximaler Betriebsdruck des Hydraulikaggregates (Kreis 1) für den Axialkolben	25 MPa
Fördermenge der Hauptpumpe (Hydraulikaggregat Kreis 1)	7 l/min
Öltankinhalt (Hydraulikaggregat Kreis 1)	50 l
Statischer Stützdruck bei exakter Volumenmessung in Triaxialzelle	Bis 1 MPa
Statischer Stützdruck in Triaxialzelle	Bis 2 MPa
Oszillierender Stützdruck in Triaxialzelle	Bis 2 MPa
Maximaler Betriebsdruck des Hydraulikaggregates (Kreis 2) für dynamische und statische Druckerzeugung	2,5 MPa
Fördermenge der Hauptpumpe (Hydraulikaggregat Kreis 2)	4,5 l/min
Öltankinhalt (Hydraulikaggregat Kreis 2)	17 l
Maximaler Betreibsdruck des pneumatischen Druckerzeugers für exakte Volumenmessung	1,4 MPa
Klimakammer mit mechanischem Kühlaggregat	-20 °C bis 65 °C

3.1 Regeleinheit WDCs 580 & PC

Die WDC-Controller der Firma „DOLI“ sind speziell für die Datenerfassung und die Regelung von Materialprüfmaschinen entwickelt worden. Nahezu alle Typen von analogen und inkrementalen Aufnehmern sind über Steckkarten anschließbar. Die WDCs 580 besitzen mit einer 4FAD-Steckkarte eine Messverstärkerkarte mit einer Trägerfrequenz von 5 kHz und einen A/D-Wandler für Dehnungsmessstreifen, induktive Aufnehmer und Gleichspannungssignale. Sie ist für statische und dynamische Anwendungen bis zu einer Prüffrequenz von ca. 100 Hz und einer Messwerterfassungsrate von 2.500 Hz geeignet. Der A/D-Wandler arbeitet mit einer Auflösung von ± 180.000 Schritten bei einer Integrationszeit von 20 ms. Die Kommunikation des Systems mit dem PC wird über USB oder Ethernet realisiert. Zum Übermitteln der Daten und Befehle in beide Richtungen wird das gesicherte DPX Protokoll benutzt. Mit DoPE von DOLI kommuniziert der Anwender in SI-Einheiten. Wie in der Abbildung 3-2 zu sehen ist, gibt es sowohl für den Hydraulikkreis des Axialkolbens (Kreis 1) als auch für den Hydraulikkreis des Zelldruckes (Kreis 2) einen eigenen Controller. Diese beiden WDCs werden synchronisiert, indem alle notwendigen Signale über einen RS485-Bus geleitet werden.

Die SGS-Sensorstecker von DOLI bestehen aus Steckergehäusen mit SUB-D-Steckverbindungen und kleinen Leiterplatten zur Identifikation und Kalibrierung von Aufnehmern, wie z.B. Kraftmessdosen, Extensometern uvm. Sowohl die Kalibrierdaten als auch andere wichtige Daten werden im Sensorstecker gespeichert. So kann der WDC diese Daten direkt beim Einschalten oder je nach Bedarf auslesen [Doli, 2010].

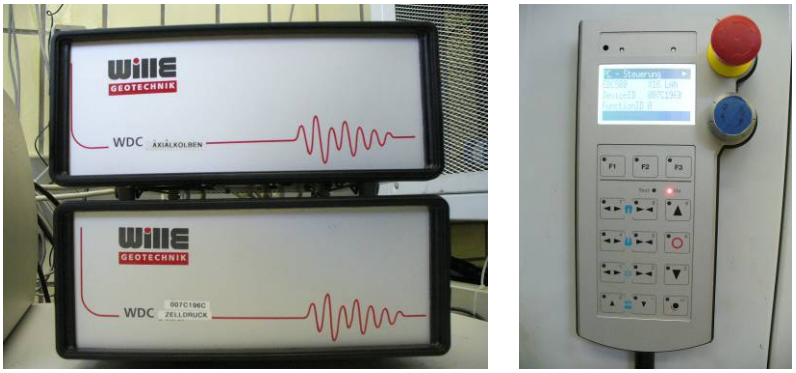


Abbildung 3-2: Frontansicht der beiden WDCs 580 (Hydraulikkreis 1 bzw. Hydraulikkreis 2) und dem Bedienpanel RMC7 zur Handsteuerung

3.2 Regelsoftware GEOsys

Bei der Regelsoftware GEOsys handelt es sich um eine vollautomatische mehrkanalige Steuerungs-und Datenerfassungssoftware der Firma „WILLE Geotechnik“ für statische und dynamische Versuche bis 400 Hz unter Windows XP und Vista. Sie ermöglicht digitale und adaptive PID[3] Parametrierungen für alle spannungs-, lage- und geschwindigkeitsgeregelten Versuchsabläufe mit komplexer Versuchsablaufsteuerung (Versuchseditor). Weiters bietet sie beliebig viele und frei wählbare Abbruch- und Verknüpfungskriterien (Formeleditor). Die menügeführte Software steuert, regelt und beobachtet sämtliche Funktionen der Anlagenkomponenten (Axiallast, Zelldruck, Messwertgeber, etc.) mit beliebig vielen Konsolidierungs-, Sättigungs-und Scherphasen (Mehrstufenversuche, periodische Belastungen) nach allen zeit- und messwertabhängigen Abbruchkriterien [Wille, 2010].

[3] PID steht für Proportional-Integral-Differential. Ein PID-Regler kann prinzipiell im Regelgesetz neben der Abweichung der Regelgröße von der Führungsgröße auch deren Integral und deren zeitliche Ableitung berücksichtigen.

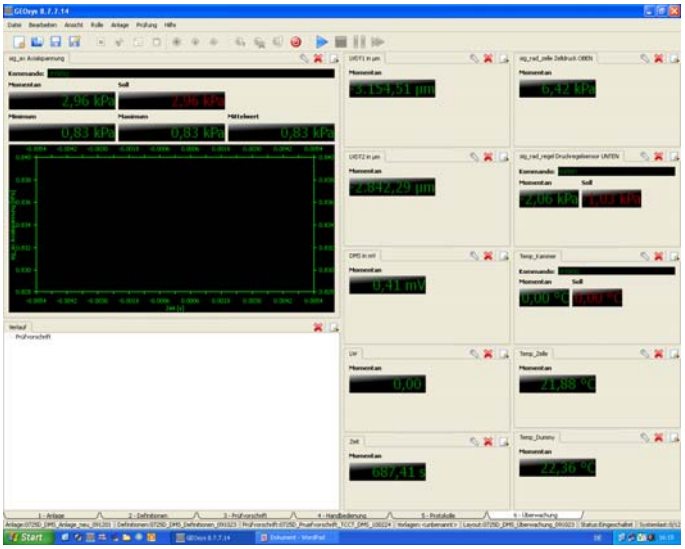


Abbildung 3-3: Bildschirmausdruck des Überwachungsfensters von GEOsys

3.3 Triaxialzelle mit Stahlmantel

Die Triaxialzelle besteht aus dem Zellboden mit acht druckbeständigen Kabeldurchführungen und vier Schnellschlusskupplungen, dem inneren Stützgerüst und dem Triaxialzelldeckel inklusive Laststempel-Gleitführung und Entlüftungsventilen (Abbildung 3-4). Für Triaxialprüfungen steht ein Stahlmantel zur Verfügung, der über die Triaxialzelle gestellt wird und durch das Befüllen mit Wasser einen Stützdruck ermöglicht. Der Stahlmantel hält Zelldruckbelastungen bis zu 2 MPa stand und verfügt über einen großen Druckeinlass, der besonders bei zyklischen Stützdrücken erforderlich ist, um rasch die notwendigen Wassermengen durchfließen zu lassen. Die Abmessungen der Zelle sind in folgender Tabelle angeführt:

Tabelle 3-2: Abmessungen der Triaxialzelle

Zellenhöhe (bei ganz ausgefahrenem Laststempel)	650 mm
Zelldurchmesser (mit Zellboden)	350 mm
Maximaler Laststempelhub (im Zellinneren ohne Stempelverlängerung)	100 mm

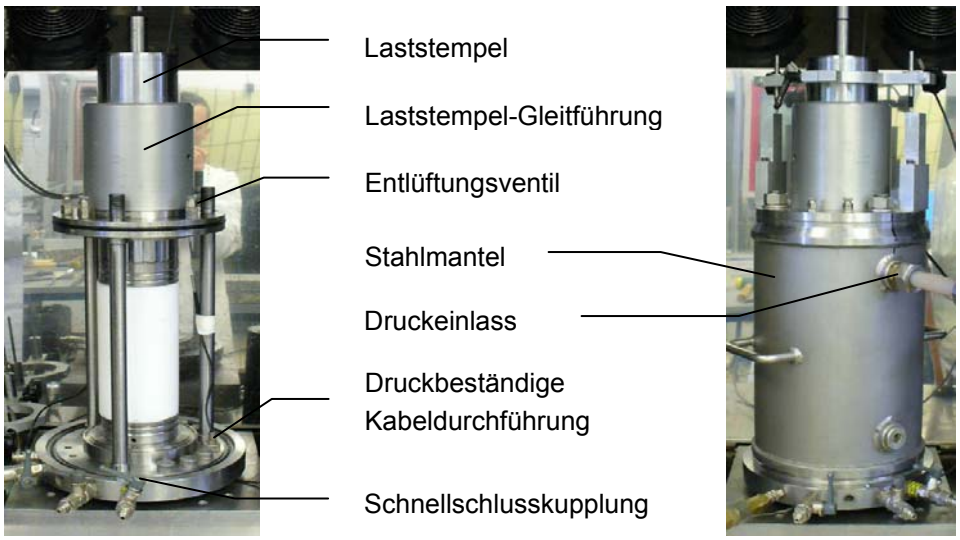


Abbildung 3-4: Ansicht der wesentlichen Elemente der Triaxialzelle

3.4 Laststempel

Wie bereits in Kapitel 2 erwähnt wurde, wurde für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit ein Laststempel verwendet, dessen Lastplatte den gleichen Durchmesser wie die Probekörper aufwies, um die radiale Ausdehnung an der Mantelfläche des Probekörpers nicht zu verfälschen. Damit der Zelldruck nur in radialer Richtung auf den Probekörper einwirken konnte, wurde eine Laststange mit dem gleichen Durchmesser wie der Probekörper und des Laststempels gewählt (Abbildung 3-4). Es wird dadurch verhindert, dass der Zelldruck in axialer Richtung auf die obere Lastplatte drücken kann und eine axiale Spannung in den Probekörper induziert.

3.5 Messgrößenaufnehmer

Zur Erfassung der axialen Verformungen des Probekörpers wurden an der Triaxialprüfmaschine induktive Wegaufnehmer verwendet. Eine Beschreibung des Funktionsprinzipes folgt in Kapitel 6.1.1.

3.6 Radial- und Umfangsmesssystem

Zur Erfassung der radialen Verformungen des Probekörpers wurden Dehnungsmessstreifen auf den Probekörpern appliziert. In Kapitel 6.2 folgt eine ausführliche Beschreibung der Spannungs- und Verformungsmessung mit Dehnungsmessstreifen.

4. GRUNDLAGEN VON ELASTIZITÄTS- UND VISKOSITÄTSTHEORIE

Asphalt ist als ein Dreiphasensystem zu betrachten, bestehend aus einer festen, einer flüssigen und einer gasförmigen Phase. Die feste Phase bildet zu etwa 95 Massen-% ein räumliches Mineralskelett. Gebunden wird dieses Mineralskelett durch eine Bitumenmastix (Bitumen + Füller). Bituminöse Bindemittel zeigen viskoelastisches Materialverhalten, welches sehr stark temperaturabhängig ist. Mit steigender Temperatur nimmt die viskose und mit sinkender Temperatur die elastische Verformungskomponente zu. Beide Elemente, Mastix wie auch Mineralskelett, setzen äußeren Beanspruchungen Widerstände (Spannungen) entgegen. Die gasförmige Phase – bestehend aus abgeschlossenen oder weitgehend zusammenhängenden Hohlräumen – weist zwar keine mechanische Festigkeit auf, ist aber dennoch für die Verformungsvorgänge von großer Bedeutung. Von ihr hängt es ab, ob sich in der viskosen Mörtelmastix lokal ein hydrostatischer Spannungszustand ausbilden kann oder nicht. Ab einem Hohlraumgehalt von ca. 3% kann davon ausgegangen werden, dass ein lokaler hydrostatischer Spannungszustand wegen der ausreichend vorhandenen Ausweichräume nicht zustande kommt. In diesem Fall werden sich unter äußerem Druck zunehmend direkte (trockene) Mineral-Kontaktstellen bilden und es kann so die erforderliche innere Reibung mobilisiert werden. Der Verformungswiderstand verringert sich erheblich, wenn der Hohlraumgehalt eines Asphaltbetons infolge steigendem Bindemittelgehalts auf weniger als ca. 3% absinkt. Die Mineralteilchen „schwimmen“ in der bituminösen Mastix, wodurch eine Konsolidierung und somit die Entwicklung von Reibungswiderstand nicht möglich ist [Huschek S., 1983].

Zur rechnerischen Ermittlung der zeitabhängigen Verformungsanteile von Asphalt haben rheologische Modelle Anwendung gefunden. Diese rheologischen Modelle bestehen aus beliebigen Kombinationen und Schaltungen von drei Grundelementen, der Hooke’schen Feder, dem St.-Venant-Element und dem Newtonschen Dämpfer. Die drei Elemente beschreiben jeweils die elastischen, plastischen und viskosen Verformungsvorgänge. In den folgenden Kapiteln werden dafür die wichtigsten Grundlagen erläutert, um das Verständnis der späteren Datenauswertung zu erleichtern.

4.1 Rheologische Grundlagen

Elastizität

Elastizität ist die Eigenschaft eines Körpers oder Werkstoffes seine Form unter einer Krafteinwirkung zu verändern und bei Wegfall der einwirkenden Kraft seine Ausgangsform wieder einzunehmen. Den einfachsten Fall stellt das linear-elastische Verhalten dar: Spannungen

und Dehnungen weisen dabei eine lineare Abhängigkeit auf, die auch als Hooke'sches[4] Gesetz bekannt ist (Abbildung 4-1). Aus der Steigung der Geraden wird ein wesentlicher Materialparameter abgeleitet, der Elastizitätsmodul, kurz E-Modul.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_l}$$ Hooke'sches Gesetz (4)

mit

$$\sigma = \frac{F}{A}$$ (5)

und

$$\varepsilon_l = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0}$$ (6)

Dabei ist

E der Elastizitätsmodul [N/mm^2]

σ die Spannung [N/mm^2]

F die Belastung [N]

A die Querschnittsfläche [mm^2]

ε$_l$ die Längsdehnung [-]

l die Länge zum Betrachtungszeitpunkt [mm]

l$_0$ die Ausgangslänge [mm]

Das linearelastische Materialverhalten wird durch eine Feder, auch Hook-Element genannt, ausgedrückt.

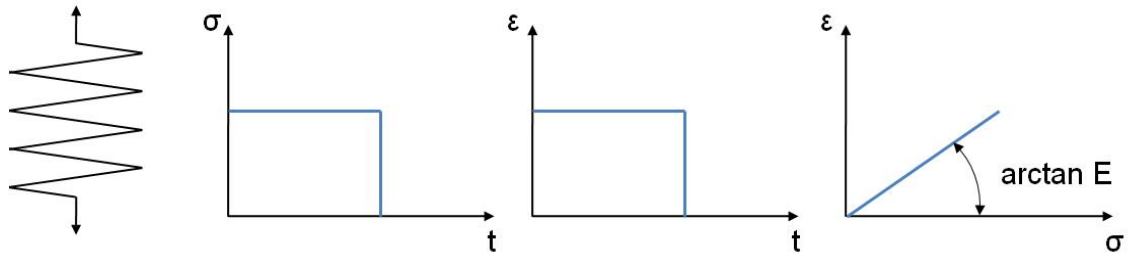


Abbildung 4-1: Hooke'sche Feder, Hooke'sches Gesetz

Plastizität

Plastizität ist die Eigenschaft von festen Stoffen, sich unter Belastung zu verformen und diese Form auch nach Entlastung beizubehalten. Meist setzt plastisches Verhalten jedoch erst

4 Robert Hook (1635 – 1703) veröffentlichte dieses Gesetz 1678 erstmalig in Form eines linearen Zusammenhangs zwischen Belastung und Längenänderung einer elastischen Feder. „Ut tensio, sic vis" – Wie die Dehnung, so die Kraft.

nach Überschreiten einer kritischen Schwellspannung ein. Darunter verhält sich der Stoff elastisch bzw. viskoelastisch.

Ein deformierbarer Stoff heißt plastisch, wenn er sich in einem unteren Spannungsbereich wie ein starrer, elastischer oder viskoelastischer Festkörper, in einem oberen Spannungsbereich dagegen wie eine Flüssigkeit verhält. Die Spannung, bei der dieser Übergang stattfindet, wird als Fließgrenze (auch Fließspannung) bezeichnet. Die Fließgrenze hängt vom Druck, von der Temperatur und häufig auch von der thermischen oder mechanischen Vorgeschichte des Stoffes ab. [DIN 1342-3:2003]

Viskosität

Die Viskosität ist die Eigenschaft eines fließfähigen Stoffsystems, unter Einwirkung einer Spannung zu fließen und irreversibel deformiert zu werden. Die bei der Verformung aufgenommene Spannung hängt dabei nur von der Verformungsgeschwindigkeit ab. [DIN 1342-2:2003]

Die Viskosität ist ein Maß für die Zähflüssigkeit eines Fluids. Je größer die Viskosität, desto dickflüssiger (weniger fließfähig) ist das Fluid; je niedriger die Viskosität, desto dünnflüssiger (fließfähiger) ist es. Teilchen zäher Flüssigkeiten sind stärker aneinander gebunden und somit unbeweglicher; man spricht daher auch von der inneren Reibung. Den Effekt innerer Reibung kann man sich vereinfacht durch die Bewegung zweier übereinander liegender, verzahnter Molekülschichten vorstellen. Beim Fließen gleiten die Moleküle aneinander vorbei und um die Verzahnung zu überwinden, benötigt man eine gewisse Kraft. Den Zusammenhang zwischen dieser Kraft und den Eigenschaften des vorliegenden Fluids definiert die Viskosität und kann mit dem sogenannten Zwei-Platten-Modell (Abbildung 4-2) veranschaulicht werden: Zwischen zwei parallelen Platten im Abstand *x* befindet sich eine Flüssigkeit, die an beiden Platten haften soll. Wird die Flüssigkeit geschert, indem die obere Platte mit einer konstanten Geschwindigkeit *v* bewegt wird, hat auch die an der bewegten Platte haftende Flüssigkeitsschicht die Geschwindigkeit *v*; die an der ruhenden Platte haftende Schicht ruht. Die dazwischen befindlichen Flüssigkeitsschichten müssen dann mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aneinander vorbeigleiten.

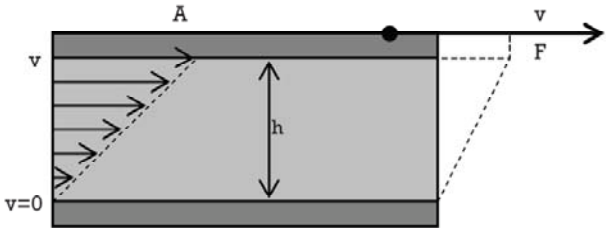


Abbildung 4-2: Skizze zum Zwei-Platten-Modell [Hofko B., 2006]

Bei strukturlinearer Viskosität stellt sich eine lineare Geschwindigkeitsverteilung ein. Es zeigt sich im Experiment, dass die Kraft *F*, die nötig ist, um die Platte zu bewegen, proportional ihrer Fläche *A* und ihrer Geschwindigkeit *v* und umgekehrt proportional dem Abstand *x* der Platten ist:

$F \sim A$ und $F \sim v$ und $F \sim \frac{1}{x}$

Daraus folgt

$$F = \eta \cdot \frac{A \cdot v}{x} \quad \text{[N]} \tag{7}$$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Scherspannung [N/m}^2\text{ = Pa]} \tag{8}$$

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dx} \quad \text{Schergefälle, Schergeschwindigkeit [1/s]} \tag{9}$$

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad \text{dynamische Viskosität [Ns/m}^2\text{]} \tag{10}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad \text{kinematische Viskosität [m}^2\text{/s]} \tag{11}$$

Viskoses Verhalten wird durch den Newtonschen[5] Dämpfer beschrieben:

$$\tau(t) = \eta \cdot \dot{\gamma}(t) \; bzw. \; \sigma(t) = \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \tag{12}$$

$\dot{\varepsilon}(t)$ zeitabhängige Dehnungsrate

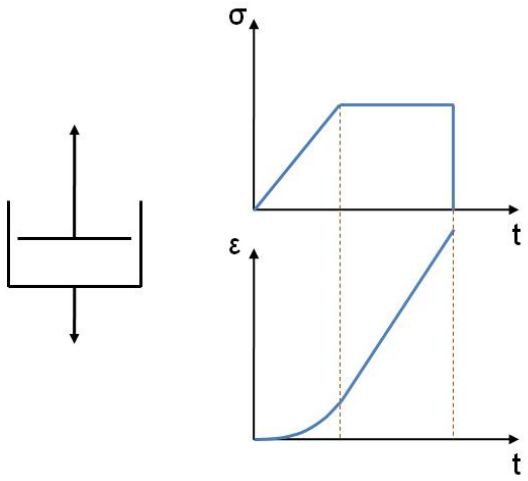


Abbildung 4-3: Newtonscher Dämpfer

Viskoelastizität

Viskoelastizität kennzeichnet ein unter anderem von Spannung, Zeit, Temperatur und Belastungsfrequenz abhängiges Verformungsverhalten von Stoffen. Die Viskoelastizität ist durch ein teilweise elastisches, teilweise viskoses Verhalten geprägt. Während der spontanelastische Teil einer Verformung zeitunabhängig ist und sich nach Belastungsänderung direkt auswirkt, ist der viskoelastische Teil einer Verformung zeitabhängig. Wird ein Körper aus viskoelastischem Material entlastet, geht der elastische Anteil der Dehnung sofort zurück.

5 Sir Isaac Newton (1642 – 1726), englischer Physiker, verfasste die „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica“ (Mathematische Prinzipien der Naturphilosophie), in denen er mit seinem Gravitationsgesetz die universelle Gravitation und die Bewegungsgesetze beschrieb, und damit den Grundstein für die klassische Mechanik legte.

Der viskose Anteil geht je nach Stoffart zeitverzögert zurück oder er bleibt als irreversible Verformung bestehen.

Materialen, die bei konstanter Spannung zunehmende Verformung erleiden (Kriechen) und bei konstanter Verformung einen Spannungsabfall zeigen (Relaxation), werden durch die Viskoelastizität charakterisiert.

Viskoelastisches Verhalten wird u.a. durch das sogenannte Maxwell-Modell und das Kelvin-Modell widergespiegelt, allerdings mit verschiedenen elastischen und viskosen – also zeitabhängigen und zeitunabhängigen – Anteilen.

Das Maxwell[6]-Modell besteht aus einer in Serie geschalteten Feder und einem Dämpfer, wodurch sich gut die Spannungsabnahme bei konstanter Dehnung (= Relaxation) abbilden lässt. Bei einer Belastung wird zunächst die Feder sofort gestaucht, gleichzeitig setzt die Verformungszunahme des Dämpfers ein. Nach Entlastung bleibt alleine die Verformung des Dämpfers zurück. Die Stoffgleichung für das Maxwell-Modell lautet [Hou X., 1996]:

$$\sigma(t) = \sigma + \frac{\eta}{E}\dot{\sigma}(t) = \sigma + \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \tag{13}$$

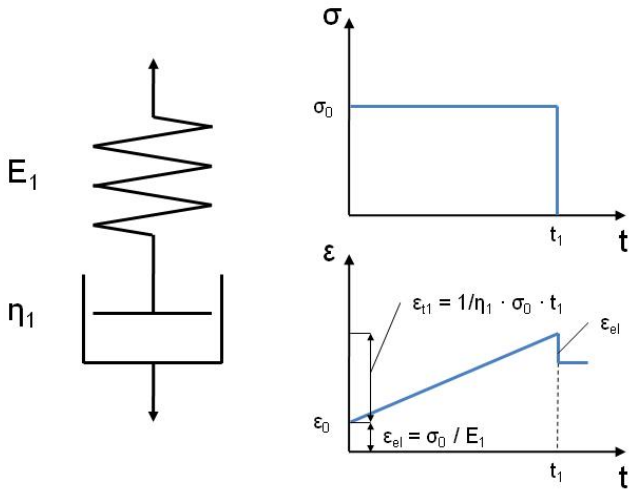


Abbildung 4-4: Maxwell-Modell

Beim Kelvin[7]-Modell sind eine Feder und ein Dämpfer parallel geschaltet. Durch einen gedachten starren Riegel ergibt sich die Gesamtverformung als Summe der beiden Einzelverformungen. Bei einer Belastung wird die Feder nicht sofort komplett gestaucht, sondern erst allmählich mit der zeitabhängigen Verformung des Dämpfers. Die Feder nimmt dabei immer mehr von der aufgebrachten Spannung auf, bis am Ende der Dämpfer spannungsfrei ist und

6 James Clerk Maxwell (1831 – 1879), schottischer Physiker, hatte 1867 die Serienschaltung einer elastischen Feder und eines viskosen Dämpfers als Modell für die Beschreibung des viskoelastischen Materialverhaltens vorgeschlagen

7 William Thomson, 1. Baron Kelvin (1824 – 1907), britischer Physiker, beschrieb das viskoelastische Materialverhalten durch eine Parallelschaltung einer elastischen Feder und eines viskosen Dämpfers

beide Elemente sich nicht mehr verformen. Nach genügend langer Zeit der Entlastung bleiben keine Verformungen zurück, da durch den Abbau der in der Feder gespeicherten Kraft der Dämpfer sich in seine Ausgangslage zurückzieht bzw. zurückziehen lässt. Das Kelvin-Modell beschreibt somit reversible viskose Verformungen [Albers B., 2008].

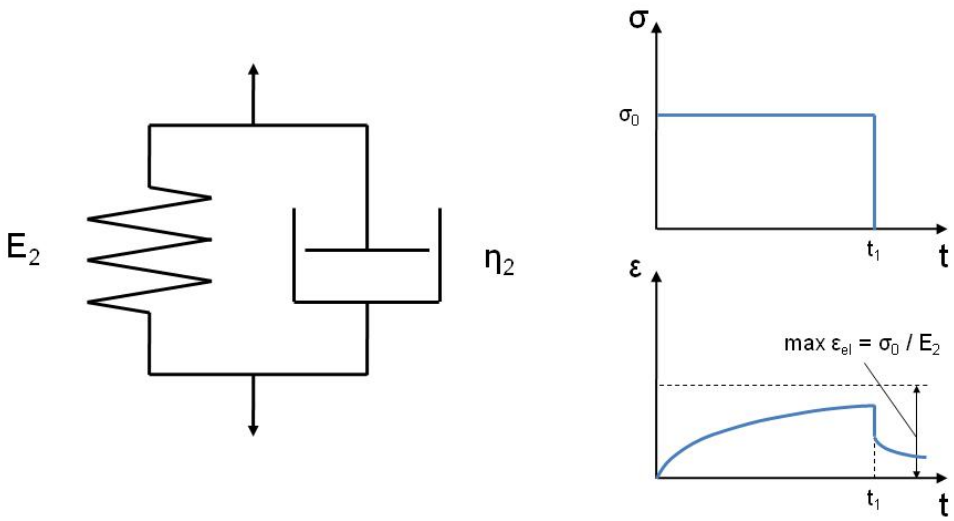


Abbildung 4-5: Kelvin-Modell

Die Stoffgleichung des Kelvin-Modells ergibt sich aus der Gleichgewichtsbedingung:

$$\sigma(t) = E \cdot \varepsilon(t) + \eta \cdot \dot{\varepsilon}(t) \tag{14}$$

4.2 Verhalten von viskoelastischen Materialien unter zyklisch-dynamischer Belastung

Wie bereits im Kapitel 2 erwähnt wird, stellen dynamische Prüfungen gegenüber statischen Prüfungen die realitätsnähere Form der Belastung dar. Es existieren daher zahlreiche Versuchsmethoden, in denen die Belastungen nicht konstant gehalten werden, sondern dynamisch oder zyklisch-dynamisch veränderlich sind. Dies können entweder Belastungen sein, die impulsförmig wirken, oder solche, die in Form einer zyklisch harmonischen Schwingung (z.B. Sinusschwingung) auf den Körper einwirken. Es ergeben sich, im Unterschied zu statischen Versuchen, veränderte Materialparameter, so genannte „komplexe“ oder „dynamische“ Steifigkeiten und Nachgiebigkeiten, die im Folgenden erläutert werden.

In Schwellversuchen wird ein Probekörper durch die Überlagerung einer konstanten Spannung σ_c mit einer haversinusförmig schwingenden Spannung der Amplitude σ_V und der Frequenz f belastet. Die Spannungsfunktion wird durch (1) definiert.

Werden elastische Stoffe durch eine sinusförmige Spannung beansprucht, wird auch die Materialreaktion in Form der Dehnung ε eine sinusförmige Schwingung darstellen. Bei beiden Sinusfunktionen treten die Maxima zum selben Zeitpunkt auf. Der E-Modul entspricht dem Quotienten aus der Amplitude der Spannungs-Sinusschwingung σ_V und der Amplitude der Dehnungs-Sinusschwingung ε_V.

Die viskosen Eigenschaften viskoelastischer Materialien bewirken eine Dämpfung der Dehnungsreaktion. Bei kontinuierlicher Beanspruchung durch eine sinusförmige Spannungsschwingung bewirkt die Dämpfung eine Phasenverschiebung der beiden Schwingungen. Die Dehnungsreaktion erfolgt gegenüber der Spannungs-Schwingung zeitverzögert. Diese Verzögerung wird durch den Phasenwinkel φ ausgedrückt. Bei viskoelastischen Stoffen wird der Quotient aus der Amplitude der Spannungs-Sinusschwingung σ_V und der Amplitude der Dehnungs-Sinusschwingung ε_V als absoluter E-Modul $|E|$ bezeichnet. Phasenwinkel und absoluter E-Modul in Kombination bilden den komplexen E-Modul E^* [Mollenhauer K., 2008].

Nach [Findley W. N., 1989] ergibt sich der komplexe oder dynamische Modul E^* zu:

$$E^* = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} e^{i\varphi} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} (\cos\varphi + i \sin\varphi) = E_1 + iE_2 = |E^*| e^{i\varphi} \tag{15}$$

Der erste Term $\sigma_0/\varepsilon_0 \cos\varphi$ auf der rechten Seite schwingt frequenz- und phasengleich zu den Dehnungen ε und stellt gleichzeitig auch den reellen Teil des komplexen Moduls E^* dar. Er wird auch häufig als „Speichermodul“ bezeichnet.

$$E_1 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} cos\,\varphi \tag{16}$$

Der zweite Term $(\sigma_0/\varepsilon_0) i \sin\varphi$ rechts ist der imaginäre Teil des dynamischen Moduls, oft auch als „Verlustmodul“ bezeichnet.

$$E_2 = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} sin\,\varphi \tag{17}$$

Unter Berücksichtigung der beiden Anteile des dynamischen Moduls E* können die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen folgendermaßen ausgedrückt werden:

$$\sigma = (E_1 + iE_2)\,\varepsilon \tag{18}$$

Außerdem kann der Phasenwinkel φ wie folgt bestimmt werden

$$\tan\varphi = \frac{E_2}{E_1} \tag{19}$$

Der Betrag des komplexen Moduls E^* ergibt sich zu

$$|E^*| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0} \tag{20}$$

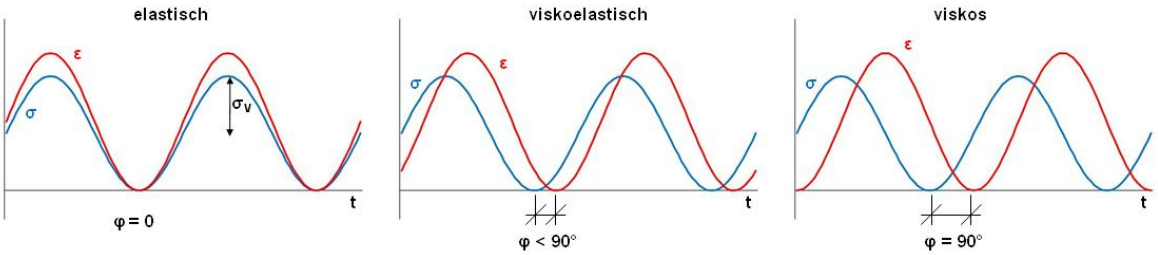


Abbildung 4-6: Darstellung der Belastungsspannung *σ(t)* und der Materialreaktion (Dehnung) *ε(t)* unter einer haversinusförmigen Belastung für ein elastisches (links), viskoelastisches (Mitte) und viskoses (rechts) Material.

Abbildung 4-6 zeigt Spannungen und Dehnungen für den Fall eines rein linear elastischen Materials, welches keine Phasenverschiebung (φ = 0°) zwischen Spannungen *σ(t)* und Dehnungen *ε(t)* aufweist, oder eine reine, viskose Flüssigkeit, die eine maximale mögliche Pha-

senverschiebung von φ = 90° aufweist. Viskoelastische Materialien, zu denen der Asphalt zu zählen ist, weisen einen Phasenwinkel von 0° < φ < 90° auf.

4.3 Einfluss der Temperatur auf die konstitutiven Beziehungen

In den bisherigen Betrachtungen und Herleitungen wurde der Einfluss der Temperatur auf die konstitutiven Beziehungen nicht beachtet. Das Materialverhalten von Asphalt ist jedoch im hohen Maße von der Temperatur abhängig. Der Temperatureinfluss lässt sich auf den Mechanismus des Fließens von viskosen Flüssigkeiten zurückführen und ist daher beim Asphalt den Fließeigenschaften des Bitumens zuzuschreiben. Wird der Temperatureinfluss auf die Materialreaktionen mit einbezogen, bedeutet dies, dass z.B. der komplexe E-Modul oder die Kriechnachgiebigkeit wie auch der Relaxationsmodul nicht nur Funktionen in Abhängigkeit der Zeit *t* sind, sondern auch von der Temperatur *T*. Thermorheologisch einfache Materialen zeigen bei Versuchen unter verschieden konstant gehaltenen Temperaturen denselben Verlauf der komplexen Module, die lediglich eine Parallelverschiebung in der Zeitskala aufweisen. Eine Erhöhung der Temperatur *T* führt dabei zu einer Verschiebung zu kürzeren Zeiten *t* oder höheren Frequenzen *f* [Kappl K., 2007]. Werden die Funktionen bei den unterschiedlichen Temperaturen auf eine Referenztemperatur T_0 bezogen, d.h. in Abhängigkeit von $lg(f/\psi(T))$ dargestellt, so schließen sie an die Funktion bei T_0 an und bilden eine sogenannte Masterkurve (Abbildung 4-7).

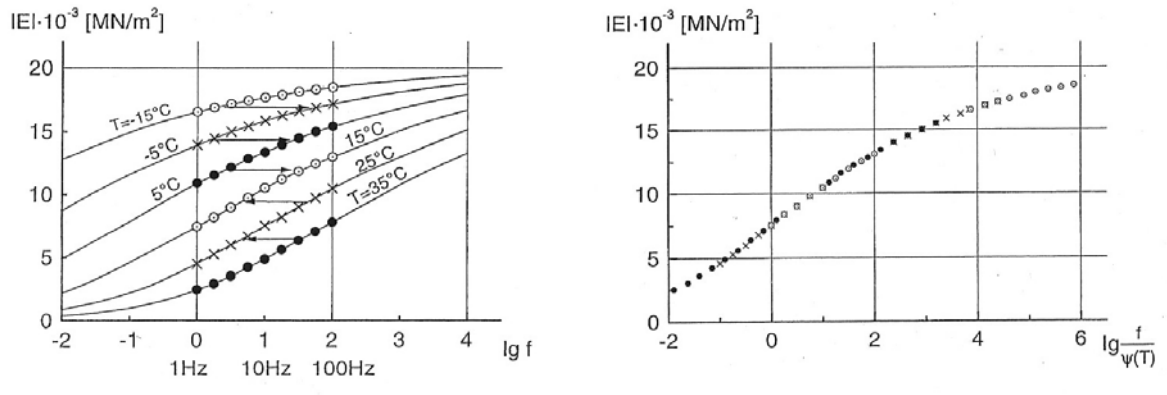


Abbildung 4-7: Ermittlung der Temperaturfunktion $\psi(T) = 1/\alpha_T$ aus dynamischen Versuchen (links) und Masterkurve $|E|$ in Abhängigkeit von $lg(f/\psi(T))$ (rechts) bei der Referenztemperatur T_0 = 15° [Hürtgen H., 2000]

Theorie und praktische Experimente zeigen, dass die Zeit und die Temperatur durch einen einzigen, kombinierten Parameter mit Hilfe des sogenannten Zeit-Temperatur-Superpositionsprinzips repräsentiert werden können:

$$|E^*(t,T)| = |E^*(\zeta,T_0)| = |E^*(\alpha_T)| \tag{21}$$

$$\zeta = \frac{t}{\alpha_T(T)} \tag{22}$$

|*E**| Relaxationsmodul [Pa]

t gemessene Zeit [s]

T gemessene Temperatur [°C]

T_0 Referenztemperatur [°C]

ζ reduzierte Zeit [-]

$\alpha_T(T)$ Temperaturverschiebungsfaktor [-]

Demnach beeinflusst eine Änderung der Temperatur oberhalb der gewählten Referenztemperatur T_0 das zeitabhängige Materialverhalten genauso wie eine Verlängerung der tatsächlich gemessenen Versuchszeit t und somit einer Verringerung der Frequenz f oder Kreisfrequenz ω. Umgekehrt kommt es zu einer Verkürzung der Zeit und Erhöhung der Kreisfrequenz bei einer Temperaturänderung unterhalb der Referenztemperatur [Findley W. N., 1989].

Für die Berechnung des Faktors α_T zur Temperaturverschiebung gibt es mehrere Ansätze. Die Gleichung

$$\alpha_T = e^{-\frac{c_1 \cdot (T - T_0)}{c_2 + (T - T_0)}} \tag{23}$$

geht auf die Untersuchungen von Williams, Landel und Ferry zurück [Williams N. D., 1955]. Sie ist mehr praktisch-formal und weniger theoretisch-physikalisch gestützt. Einen zweiten Ansatz stellt die Arrheniusgleichung dar:

$$\alpha_T = \frac{1}{e^{-m\left(\frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_0+273}\right)}} \tag{24}$$

mit

$m \cong 2{,}5 \cdot 10^4$ °C

Sie ist physikalisch durch die Theorie der Platzwechselvorgänge begründet. Beim Fließen einer viskosen Flüssigkeit bestehen gewisse formale Analogien zwischen Molekülbewegungen und einer chemischen Reaktion [Hürtgen H., 2000].

Zusammenfassend haben thermorheologisch einfache Materialien den Vorteil, für eine bestimmte Referenztemperatur T_0 eine Aussage über das Langzeitverhalten treffen zu können, ohne dafür lange und aufwendige Versuche durchführen zu müssen. Durch eine horizontale Verschiebung von n Einzelkurven für n Temperaturen T_i kann eine Masterkurve für die Referenztemperatur über ein großes Frequenzspektrum hinweg erstellt werden.

5. GRUNDLAGEN DER VERSUCHSAUSWERTUNG

5.1 Signalverarbeitung

Ein Signal ist die Darstellung von Informationen. Es ist gekennzeichnet durch den amplitudenmäßigen Wert oder Wertverlauf einer physikalischen Größe über eine Zeit oder eine andere physikalische Größe. Unter Signalverarbeitung werden ganz allgemein alle Bearbeitungsschritte zusammengefasst, die das Ziel haben, Informationen über Prozesse aus einem empfangenen bzw. gemessenen Signal zu extrahieren und eventuell zu reduzieren oder Informationen für die Übertragung von einer Informationsquelle zu einem Informationsverbraucher vorzubereiten. Dabei wird zwischen analoger und digitaler Signalverarbeitung unterschieden.

Ein analoges Signal ist dadurch gekennzeichnet, dass zu jedem beliebigen Zeitpunkt ein Signalwert definiert ist, der in einem vorgegebenen Wertebereich kontinuierlich variabel ist. Ein Beispiel für ein Analogsignal ist in der Abbildung 5-1 dargestellt. Vorzugsweise erzeugt man als Analogsignal ein elektrisches Signal, meistens die elektrische Spannung oder die elektrische Stromstärke. Es treten jedoch oft Probleme bei der Verarbeitung durch Rauschen und Nichtlinearität der Messumformer beim Auslesen der gespeicherten Analogsignale oder bei der Übertragung durch Überlagerung von Störungen auf. Unter Rauschen versteht die Physik allgemein eine Störgröße mit breitem unspezifischem Frequenzspektrum. Es kann als eine Überlagerung vieler Schwingungen oder Wellen mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz beziehungsweise Wellenlänge interpretiert werden.

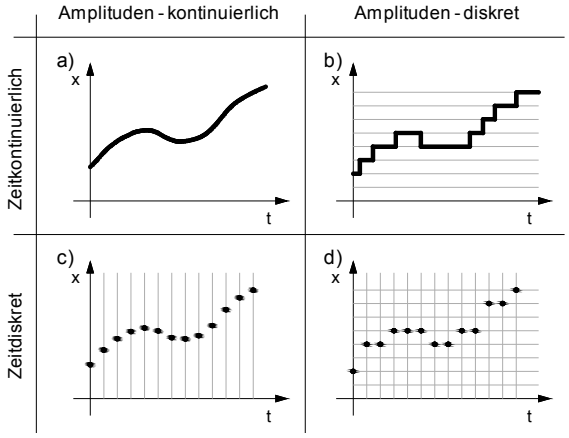


Abbildung 5-1: Klassifizierung der Signale: a) Amplituden- und zeitkontinuierliches Signal = rein analoges System, b) amplitudendiskretes, zeitkontinuierliches Signal, c) amplitudenkontinuierliches, zeitdiskretes Signal, d) amplituden- und zeitdiskretes Signal = digitales System [Best R., 1991]

Besteht im Gegensatz zum analogen Signal das Signal nur aus Zeichen, wobei jeweils ein Zeichen einem bestimmten Wertebereich des Signalparameters entspricht, dann spricht man von einem Digitalsignal. Zur Umsetzung in ein Digitalsignal muss das analoge Quellsignal zunächst zeitlich quantisiert (in festen Zeitintervallen) abgetastet werden. Dies erfolgt mit Hilfe einer Abtast-Halte-Schaltung in einem Analog-Digital-Wandler. Aus einer ursprünglich

zeitkontinuierlichen Kurve wird so eine zeitdiskrete Kurve des Signals (Abbildung 5-2), das nun von einem digitalen Signalprozessor verarbeitet werden kann.

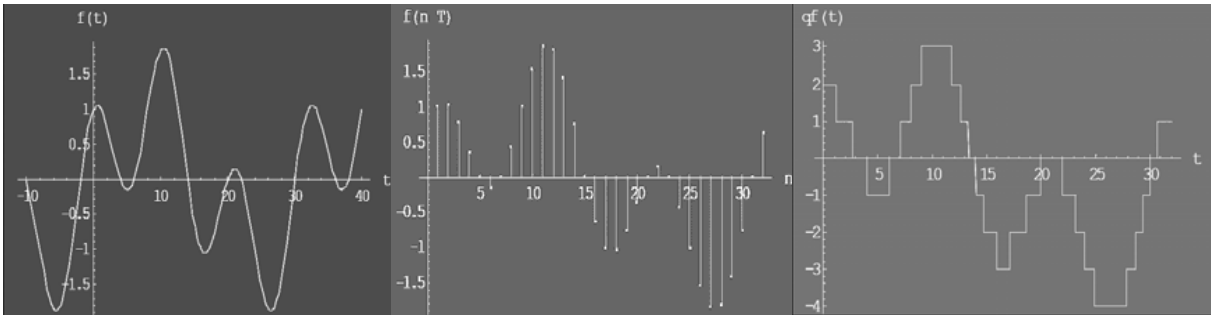


Abbildung 5-2: Idealisierte Darstellung der Wandlung eines analogen Signals (links) über die Signalabtastung (Mitte) in ein digitales Signal (rechts) [Kappl K., 2007]

Wenn ein kontinuierliches Signal mit einem digitalen Gerät verarbeitet werden soll, muss es in doppelter Hinsicht quantisiert werden, nämlich in der Zeit und in der Amplitude. Ein zeit- und amplitudendiskretes Signal ist in Abbildung 5-1 dargestellt. Das quantisierte Signal ist nur noch zu diskreten Zeitpunkten *0, T, 2T* …, definiert, wobei *T* als Abtastintervall bezeichnet wird. Seine Amplitude weist ferner nur noch eine begrenzte Anzahl von Pegeln auf, kann demnach durch eine Integer-Zahl (ganze Zahl) dargestellt werden [Best R., 1991].

Durch die zweifache Diskretisierung des Analogsignals entstehen zwei voneinander unabhängige Fehler. Die zeitliche Quantisierung führt zum sog. Abtastfehler. Details des Quellsignals, Änderungen zwischen den Abtastpunkten können nicht erfasst werden. Um das Ursprungssignal später wieder richtig herstellen zu können, muss die Abtastfrequenz größer als das Doppelte der maximal möglichen Eingangsfrequenz sein. Man spricht auch von der sogenannten Nyquist[8]-Frequenz. Abbildung 5-3 zeigt, was passiert, wenn ein kontinuierliches Ausgangssignal (schwarze Linie) mit einer ungeeigneten Abtastfrequenz, die kleiner als die Nyquist-Frequenz ist, diskretisiert wird. Aus den erhaltenen Messwerten (Kreise) entsteht durch Interpolation ein verfälschtes Signal mit viel zu großer Periode (rote Linie). Man spricht vom sog. „Aliaseffekt“.

8 Harry Nyquist (1889 – 1976), amerikanischer Physiker, stellte 1927 fest, dass ein analoges Signal mit mehr als der doppelten Signalfrequenz abgetastet werden muss, um aus dem digitalen Abbild des Signals das analoge Ausgangssignal rekonstruieren zu können.

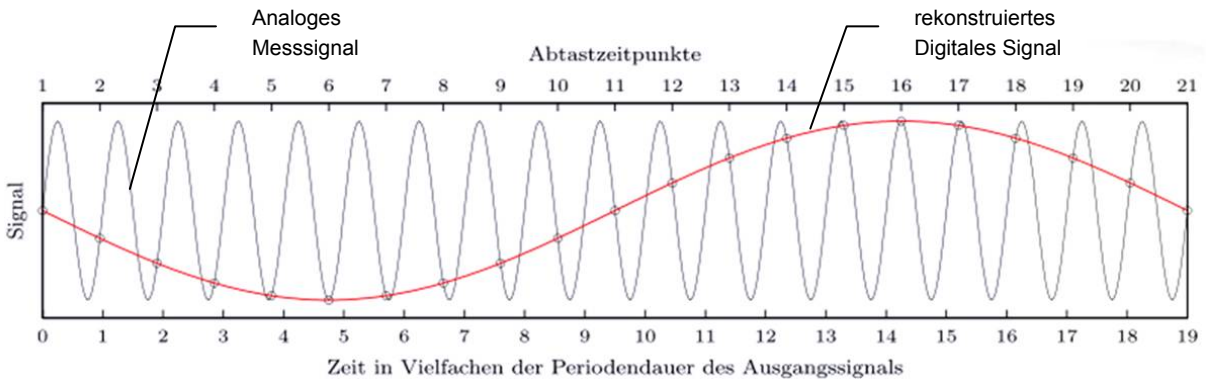


Abbildung 5-3: Aliaseffekt bei zu niedriger Abtastrate [Wikipedia, 2010]

Die Quantisierung der Amplitude führt zum sog. Quantisierungsfehler, auch Rundungsfehler genannt. Theoretisch könnte man die zeitliche sowie die amplitudenmäßige Quantisierung des Signals zwar beliebig fein machen, doch stößt man dabei rasch auf technische Grenzen. Die zeitliche Quantisierung ist limitiert durch die Arbeitsgeschwindigkeit der eingesetzten Mittel, also etwa durch die Anzahl der arithmetischen und logischen Operationen, die ein Mikroprozessor pro Sekunde ausführen kann. Die Amplitudenquantisierung andererseits ist gegeben durch die verfügbaren Signalwandler. Auch hier spielt wiederum der Zeitfaktor eine Rolle. Je höher die Auflösung eines Analog-Digital-Wandlers sein soll, desto mehr Zeit wird für die Umwandlung benötigt [Best R., 1991].

Beim Prozess der Wandlung des analogen Signals in ein digitales Format fließt auch das Rauschen mit ein. Die Abbildung 5-4 verdeutlicht dieses Rauschen am Beispiel eines über die Zeit gemessenen Kraftsignals der Axialkraftmessdose bei einem zyklisch-dynamischen Druckschwellversuch. Es ist zu erkennen, dass das Messsignal der Kraftmessdose erhebliches Rauschen aufweist und somit höhere Amplituden, als tatsächlich vorhanden, vorgibt. Diese Schwankungen haben jedoch sehr große Auswirkungen auf die Berechnung etwaiger Materialkenngrößen wie z.B. dynamischer Modul und Phasenverschiebung. Es muss daher eine einfache Methode gefunden werden, dieses Rauschen zu eliminieren oder zu verringern ohne die Messsignale in ihren Zeitbereichen zu beeinflussen oder zu verändern. Eine mögliche Methode stellt die Regressionsrechnung mittels Näherungsfunktionen dar. Dabei wird mittels mathematischer Verfahren eine Funktion ermittelt, so dass die Residuen (Fehler, Abweichungen vom gewünschten Ergebnis) minimal werden. Die Form der Funktion kann bereits weitgehend durch das verwendete Verfahren festgelegt werden. Eine lineare Regression betrachtet etwa nur lineare Funktionen, eine logistische Regression nur logistische Funktionen. Wie groß der Fehler wird, hängt ebenfalls vom verwendeten Verfahren ab. Bei der Methode der kleinsten Quadrate wird z.B. die Summe der Quadrate der Abweichungen minimiert, es gibt jedoch auch sogenannte robuste Verfahren, die den Betrag der Abweichung minimieren. In der Abbildung 5-4 ist zu sehen, wie im vorliegenden Beispiel das Messsignal der Kraftmessdose mit einem einfachen Sinusansatz approximiert wurde und somit das Filterrauschen eliminiert wurde.

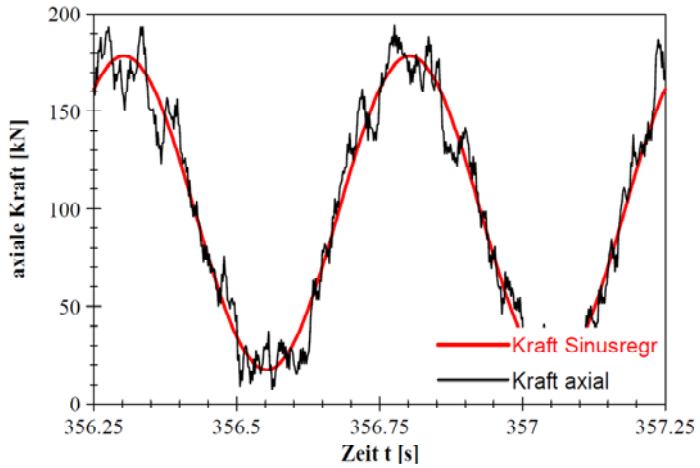


Abbildung 5-4: Darstellung des mit Rauschen behafteten Kraftmesssignals mit den einzelnen Messpunkten (schwarze Linie) und des mathematischen regressierten, sinusförmigen Belastungssignals (rote Linie) [Kappl K., 2007]

Im Zuge der Versuchsauswertung wurde diese mathematische Art der „Glättung“ an allen Messdaten durchgeführt. Dazu wurde ein Auswertungsprogramm am Institut für Verkehrswissenschaften (Forschungsbereich Straßenwesen) der TU Wien im Fortran-Code entwickelt. Über dessen Algorithmus soll das folgende Kapitel einen Einblick geben.

5.2 Auswertung von Materialkennwerten

5.2.1 Kurzbeschreibung des Programmablaufes

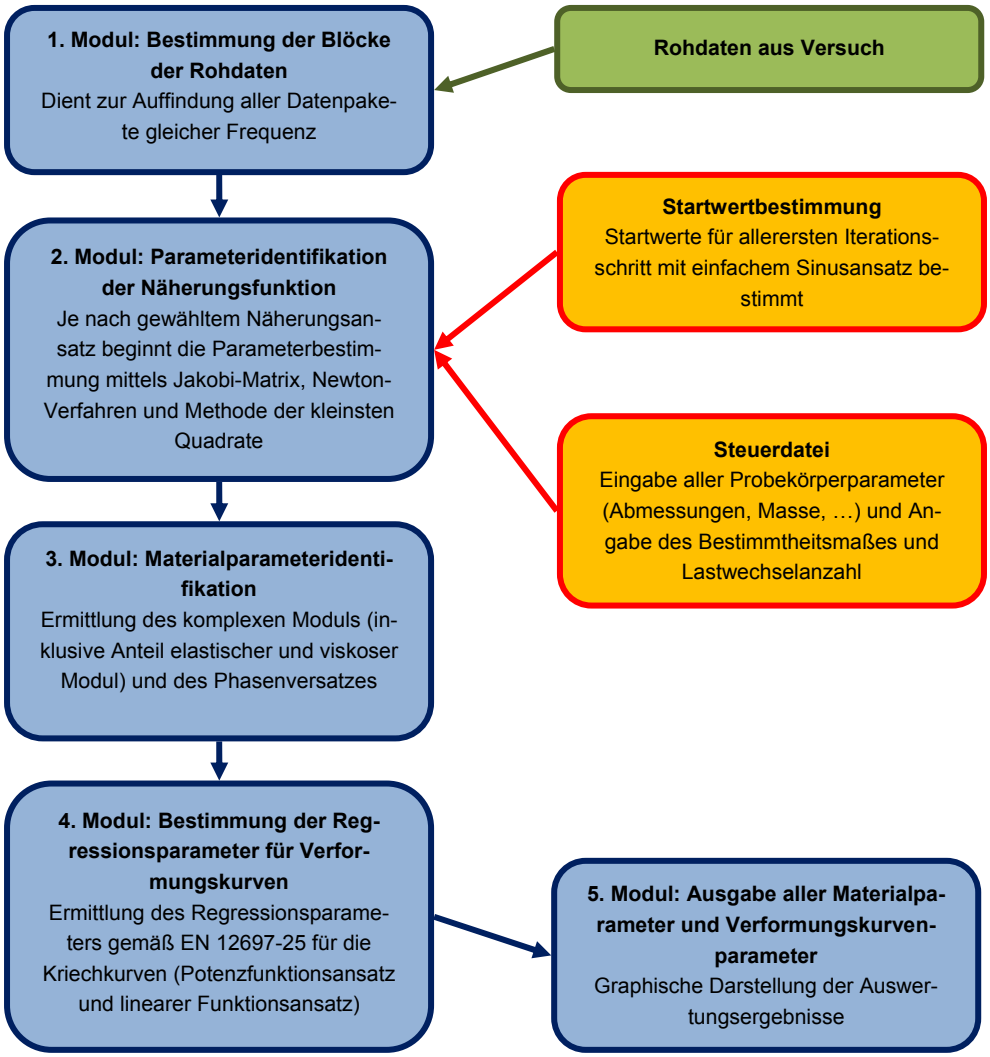


Abbildung 5-5: Schematische Darstellung des Auswertungsprogrammes zur Ermittlung sämtlicher Materialparameter der Triaxialprüfung

Die Abbildung 5-5 zeigt einen schematischen Überblick der einzelnen Schritte des Auswertungsprogramms. In diesem Kapitel wird auf diese einzelnen Schritte etwas näher eingegangen. Für einen detaillierten Einblick in das Funktionsprinzip des Programmes wird auf [Kappl K., 2007] verwiesen.

Im ersten Schritt „Bestimmung der Blöcke der Rohdaten“ wird das von den Prüfmaschinen erstellte Rohdatenfile (siehe Tabelle 5-1) nach zeitlichen Lücken in der Datenaufzeichnung untersucht. Innerhalb der kontinuierlich aufgezeichneten Daten werden die Lastwechselfrequenzen bestimmt. Bei unterschiedlichen Frequenzen innerhalb der Blöcke werden diese weiter in Datenpakete mit jeweils gleicher Frequenz unterteilt. Pro Block wird lediglich die fortlaufende Nummer der ersten Zeile (Record) und die Anzahl der Zeilen in den Rohdaten bestimmt, in denen jeweils die einer bestimmten Zeit zugeordneten Messwerte enthalten sind. Der Zweck der Unterteilung der Rohdaten in Blöcke mit kontinuierlicher Datenaufzeichnung und gleicher Frequenz ist, für die anschließende Interpolation der Messwerte möglichst

gute Startwerte berechnen zu können. In der Blockdatei ist zu jedem Datenpaket die Nummer des ersten Record, die Anzahl der Records und der Normlastwechsel, der Näherungswert für die Frequenz der Lastwechsel, die durchschnittliche Zahl der Messpunkte pro Lastwechsel und der Zählerstand am Beginn des Datenpaketes angegeben.

In den Rohdaten sind die einzelnen Messwerte, von denen ein Teil für diese konkrete Auswertung nicht benötigt wird, durch Tabulatoren getrennt. Zur schnelleren und einfacheren Verarbeitung umfangreicher Rohdaten werden die später verwendeten Messwerte in eine Datei (direct access file) geschrieben, auf die mit den Informationen aus der Blockdatei zugegriffen wird.

Tabelle 5-1: Auszug aus einem Rohdatenfile (*.txt) eines TCCT-Versuchs

Zeit	LW	Weg	Kraft	sig_ax	sig_ax (Soll)	s1_LVDT1	s2_LVDT2	eps_ax1	eps_ax2	eps_axmw	DMS	eps_rad
[s]		[mm]	[N]	[kPa]	[kPa]	[mm]	[mm]				[V]	
143,72	1	0,932	1204,434	155,523	156,304	0,853	0,820	0,0043	0,0041	0,0042	0,8554	0,0034
143,77	1	0,934	1191,897	153,904	154,522	0,851	0,817	0,0043	0,0041	0,0042	0,8518	0,0034
143,82	1	0,920	1190,133	153,676	153,033	0,849	0,815	0,0043	0,0041	0,0042	0,8492	0,0034
143,87	1	0,918	1163,295	150,210	151,846	0,847	0,813	0,0042	0,0041	0,0042	0,8462	0,0034
143,92	1	0,931	1171,044	151,211	150,951	0,845	0,811	0,0042	0,0041	0,0042	0,8431	0,0034
143,97	1	0,925	1164,492	150,365	150,341	0,843	0,810	0,0042	0,0041	0,0041	0,8406	0,0034
144,02	1	0,918	1159,137	149,674	150,031	0,842	0,808	0,0042	0,0041	0,0041	0,8381	0,0033
144,07	2	0,911	1158,570	149,600	150,040	0,840	0,807	0,0042	0,0040	0,0041	0,8360	0,0033
144,12	2	0,927	1160,901	149,901	150,349	0,839	0,806	0,0042	0,0040	0,0041	0,8346	0,0033
144,17	2	0,913	1172,241	151,366	150,959	0,839	0,805	0,0042	0,0040	0,0041	0,8329	0,0033
144,22	2	0,907	1169,847	151,056	151,870	0,838	0,805	0,0042	0,0040	0,0041	0,8316	0,0033
144,27	2	0,910	1190,700	153,749	153,058	0,838	0,804	0,0042	0,0040	0,0041	0,8308	0,0033
144,32	2	0,914	1207,962	155,978	154,554	0,837	0,804	0,0042	0,0040	0,0041	0,8298	0,0033

Mit Zeit = fortlaufende Versuchsdauer
LW = Lastwechselzähler
Weg = interner Weg des Hydraulikkolbens
Kraft = Messwert der Kraftmessdose
sig_ax = der auf die Querschnittsfläche des Probekörpers bezogene Messwert der Kraftmessdose
sig_ax (Soll) = der auf die Querschnittsfläche des Probekörpers bezogene Sollwert der Steuereinheit
s1_LVDT1 = Messwert des ersten LVDT
s2_LVDT2 = Messwert des zweiten LVDT
eps_ax1 = der auf die Höhe des Probekörpers bezogene Messwert des ersten LVDT
eps_ax2 = der auf die Höhe des Probekörpers bezogene Messwert des zweiten LVDT
eps_axmw = Mittelwert aus eps_ax1 und eps_ax2
DMS = Messwert des DMS
eps_rad = der auf den Umfang des Probekörpers bezogene Messwert des DMS

Im nächsten Modul „Parameteridentifikation der Näherungsfunktion“ werden zu den Messpunkten der Kraft und der Sensoren die Parameter der die Messpunkte interpolierenden Funktionen bestimmt. Dabei kann zwischen zwei unterschiedlichen Ausgleichsfunktionen gewählt werden:

Einfacher Sinusansatz

$$f(t) = a_1 + a_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t + a_3) \tag{25}$$

Ansatz zweier Sinusschwingungen mit einfacher und doppelter Frequenz und linearer Funktion

$$f(t) = a_1 + a_2 \cdot sin(2\pi \cdot f \cdot t + a_3) + a_4 \cdot t + a_5 \cdot sin(4\pi \cdot f \cdot t + a_6) \tag{26}$$

Mit

a_1 Offset (Versatzmaß auf der Ordinate) des Sinussignals

a_2 Amplitude (halbe Schwingweite) des Sinussignals

a_3 Phasenwinkel (Zeitversatz) der Schwingung [s]

f Frequenz der Schwingung [1/s]

t Zeitpunkt, bei dem ein Messwert aufgezeichnet wird

a_4 Steigung der linearen Funktion

a_5 Amplitude der Sinusfunktion mit der doppelten Frequenz (1. Harmonische)

a_6 Phasenwinkel der Schwingung mit der doppelten Frequenz [s]

Die einzelnen Parameter werden so bestimmt, dass sich die gewählte interpolierende Funktion bestmöglich an die Messpunkte anpasst. Dazu werden die Blöcke weiter unterteilt in die Messpunkte von nur wenigen Lastwechseln. Deren Anzahl kann ab 3 Lastwechseln frei gewählt werden. Ohne spezielle Wahl werden die Daten von 4 Lastwechseln verwendet. Diese Zahl könnte auch wesentlich größer gewählt werden, wodurch auch die Variation der später berechneten dynamischen Module für aufeinander folgende Messsequenzen geringer werden würde. Gleichzeitig würden auch die Veränderungen der Ergebnisse mit zunehmendem Lasteintrag weniger sichtbar.

In vereinfachter Darstellung läuft die Berechnung der Parameter der interpolierenden Funktionen für die Messwerte der ausgewählten Lastwechsel nach folgenden Schritten ab:

Genaue Bestimmung der Frequenz:

Die Frequenz wird aus den Messwerten der Kraft oder des Steuersensors unabhängig von der gewählten Ausgleichsfunktion durch die Bestimmung der vier Parameter a_1, a_2, a_3 und f für den einfachen Sinusansatz mit einem Newton-Verfahren nach der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt. Damit die verbleibende Summe der Abweichungsquadrate zwischen den Mess- und Funktionswerten dem globalen Minimum entspricht, sollten die Startwerte der Parameter möglichst den endgültigen Werten nahe sein. Als Startwert für a_1 wird der Mittelwert der Messwerte der ausgewählten Lastwechsel und für a_2 wird der halbe absolute Unterschied zwischen dem minimalen und maximalen Wert verwendet. Der Startwert für die Frequenz wurde schon bei der Bestimmung der Blöcke ermittelt. Zur Bestimmung des Startwertes für a_4 wird das Argument der Sinusfunktion um $\pm \pi f$ in Schritten variiert und jeweils die Summe der Abstände zwischen den Mess- und Funktionswerten berechnet. Der Startwert für a_4 ergibt sich aus der Verschiebung, für den die minimale Abstandssumme berechnet wurde.

Berechnung der Parameter der Ausgleichsfunktionen

Die aus den Messwerten der Kraft oder des Steuersensors ermittelte Frequenz wird unverändert zur Berechnung der Parameter der Ausgleichsfunktionen der Messwerte der übrigen Sensoren verwendet. Falls der einfache Sinusansatz gewählt wird, werden daher für die interpolierenden Funktionen der Messwerte der übrigen Sensoren nur mehr die drei Parameter a_1, a_2 und a_3 berechnet. Falls als interpolierende Funktion die um die 1. Harmonische und die lineare Funktion erweiterte Sinusfunktion gewählt wird, werden für alle Messwerte (auch für die Kraft oder den Steuersensor) die zu den Messwerten bestmöglich passenden Parameter

a_1 bis a_6 berechnet. Dabei wird für die Frequenz der aus den Messwerten der Kraft oder des Steuersensors gerechnete Wert unverändert übernommen.

Optional können auch zwei Sensoren gewählt werden, für deren mittlere Messwerte ebenfalls die Parameter der interpolierenden Funktion berechnet werden. Inklusive der Kraft und eines „mittleren“ Sensors können für fünf Messkanäle die Parameter der interpolierenden Funktionen berechnet werden. In den Rohdaten sind in den einzelnen Zeilen ein Wert der Zeit und die Messwerte für alle Sensoren angegeben. Bei der Auswertung der Daten wird daher angenommen, dass alle Werte pro Datenzeile im gleichen Zeitpunkt gemessen wurden. Die Zeitschritte können variieren.

Berechnung des Bestimmtheitsmaßes R^2

Als Maß für die Qualität der Anpassung der gewählten Funktion an die Messwerte wird gleichzeitig mit der Berechnung der Parameter auch das Bestimmtheitsmaß R^2 berechnet und mit vorgegebenen Mindestwerten verglichen. Dabei können für die Kraft bzw. den Steuersensor und die übrigen Sensoren unterschiedliche Grenzwerte vorgegeben werden. Die Ergebnisse der Interpolation werden in den weiteren Berechnungen nur dann verwendet, wenn die Bestimmtheitsmaße in allen Fällen über den vorgegebenen Mindestwerten liegen.

Berechnung der Phasenverschiebung zwischen dem Messwert der Kraft und den Messwerten der übrigen Sensoren

Bei der Analyse der Messdaten zeigte sich, dass der Lastwechselzähler an einem beliebigen Zeitpunkt innerhalb einer periodischen Schwingung zum nächsten Wert springen kann. Daher könnte auch der Fall auftreten, dass bei den ersten Messpunkten der analysierten Lastwechsel die Kraft den Maximalwert erreicht. Da bei der Auswertung der Versuche vereinzelt auch negative Verschiebungen zwischen der interpolierenden Funktion der Kraftmesswerte und den interpolierenden Funktionen der Sensormesswerte auftreten können, wird zur Berechnung der Verschiebungen zuerst das zweite Maximum der Kraft gesucht. Aus numerischen Gründen wird die Nullstelle der ersten Ableitung der gewählten interpolierenden Funktion beim Wechsel vom positiven in den negativen Bereich gesucht. Anschließend werden auf die gleiche Art die Maxima der interpolierenden Funktionen für alle Sensoren berechnet. Aus den Differenzen der Zeiten, die zwischen den Maxima der Sensoren und der Kraft bestehen, und der Dauer einer Periode ergeben sich die Phasenverschiebungen der Sensorsignale gegenüber der Kraft. Nach der gleichen Art wird die Phasenverschiebung zwischen dem Minimum des Kraftsignals und den Minima der Sensoren berechnet. Zusätzlich werden auch die entsprechenden Phasenverschiebungen zwischen den Wendepunkten in den ansteigenden und abfallenden Bereichen der Messsignale berechnet. Bei der konkreten Berechnung werden dabei die Nullstellen der zweiten Ableitungen der interpolierenden Funktionen bestimmt. Bei der Wahl des einfachen Sinusansatzes zur Interpolation der Messpunkte sind die für das Maximum, das Minimum und die Wendepunkte berechneten Phasenverschiebungen gleich.

Im anschließenden Modul „Materialparameteridentifikation“ werden aus den Regressionsparametern a_1 bis a_6, der Frequenz und den Phasenverschiebungswinkeln die dynamischen Module berechnet. Die in den vorangegangenen Modulen durchgeführten Berechnungen wurden für alle Prüfungsarten (Triax, 4-Punkt-Biegebalken, stehender Zylinder und stehendes Prisma) und Versuchsarten (Steifigkeits- oder Ermüdungsversuch) gleich durchgeführt.

In diesem Modul hängen die vorgenommenen Berechnungen von der Prüfungs- und Versuchsart ab. Die zur Berechnung des Formfaktors notwendigen Angaben zum Probekörper sind ebenfalls von der Prüfungsart abhängig. Die Formeln für den elastischen Modul E_1 und den viskosen Modul E_2 lauten für den TCCT/UCCT gemäß EN 12697-26 wie folgt:

$$E_1 = \gamma \left(\frac{F}{z} cos(\Phi) + \frac{\mu}{1000} \omega^2 \right) \tag{27}$$

$$E_2 = \gamma \left(\frac{F}{z} sin(\Phi) \right) \tag{28}$$

Mit

$$\gamma = \frac{4h}{D^2 \pi} \tag{29}$$

$$\mu = \frac{M}{2} + m \tag{30}$$

E_1 elastischer Anteil des dynamischen Modul E^* [MPa]

E_2 viskoser Anteil des dynamischen Modul E^* [MPa]

γ Formfaktor als Funktion der Größe und Form des Probekörpers

F gemessene Kraft im Probekörper [N]

z gemessene Auslenkung/Verformung des Probekörpers [mm]

Φ gemessener Phasenwinkel zwischen dem Verformungssignal und dem resultierenden Kraftsignal der Messgrößenaufnehmer [°]

μ Massefaktor als Funktion der Masse M des Probekörpers [kg] und der Masse m der beweglichen Teile [kg]

ω Kreisfrequenz $\omega = 2\pi f$ [rad/s]

Aus dem elastischen und viskosen Anteil des dynamischen Moduls werden jeweils auch der dynamische Modul und der Materialwinkel berechnet. Die dynamischen Module werden für alle Sensoren aus den entsprechenden Parametern berechnet, zusätzlich eventuell auch für den „mittleren“ Sensor, wenn aus den Rohdaten die Messwerte neben der Kraft von maximal zwei Sensoren ausgewählt wurden. Falls aus den Rohdaten die Messwerte von drei Sensoren ausgewählt wurden, werden aus den Parametern der Ausgleichsfunktion des dritten Sensors keine Werte für den dynamischen Modul berechnet.

Im letzten Modul „Bestimmung der Regressionsparameter für Verformungskurven“ werden die in der Norm EN 12697-25 vorgegebenen Berechnungen durchgeführt. Im Wesentlichen werden dabei die Kriechrate f_c der Funktion $\varepsilon_n = A_1 + f_c \cdot 10^4 \cdot n$ und die Parameter A_2 und B der Funktion $\varepsilon_n = A_2 \cdot n^B$ berechnet. Dazu wird zuerst der quasi-lineare Bereich der Kriechkurve bestimmt, indem nach den Vorgaben der Norm aus den gemessenen Lastwechseln vorgegebene Punkte ausgewählt werden. Im Bereich bis 100 Lastwechsel beträgt der Abstand der Stützpunkte 10 Lastwechsel, ab 1000 Lastwechsel dagegen 500 Zyklen. Zusätzlich zu den Vorgaben der Norm werden die Kriechrate f_c und die Parameter A_2 und B auch für eine äquidistante Auswahl der Stützpunkte berechnet, wobei die Stützpunkte im gesamten Bereich einen Abstand von 10 Zyklen haben.

5.2.2 Anmerkungen zur Interpolation mit dem erweiterten Ansatz

Wenn der Probekörper mit der Grundplatte und dem Laststempel durch Klebung fest verbunden ist und die Lasteinträge sinusförmig erfolgen, sind die Formen der von den Sensoren gemessenen Signale ebenfalls nahezu sinusförmig. Bei Triaxialversuchen gemäß der EN 12697-25 ist der Laststempel mit dem Probekörper nicht fest verbunden. Bei der Belastung reagiert der Probekörper wie bei einer festen Verbindung mit dem Laststempel. Bei der Entlastung des Probekörpers ist die Entspannung auch von der Elastizität des Materials abhängig. Dadurch unterscheiden sich auch bei exakter Sinusform des Krafteintrages die beiden Halbwellen der Sensormesswerte. In der Fourierzerlegung asymmetrischer Schwingungsformen dominieren gerade Harmonische der Grundschwingung. Daher wurde für den erweiterten Ansatz der Interpolationsfunktion der Term mit der doppelten Frequenz hinzugefügt. Der Term mit der doppelten Grundschwingung verbessert das Bestimmtheitsmaß vor allem im Bereich ab etwa 100 Lastwechsel. Am Anfang der Belastung zeigt sich im Bereich bis zu etwa 100 Lastwechseln in den Messwerten der Sensorsignale auch eine lineare Komponente. Daher wurde in den erweiterten Ansatz auch eine lineare Funktion eingefügt.

Die Abbildung 5-6 zeigt die Messwerte der Kraft und eines Sensors der ersten Lastwechsel eines Triaxialversuches. Zusätzlich ist die zu den Sensormesswerten berechnete Ausgleichsfunktion bei der Wahl des einfachen Sinusansatzes dargestellt. Dabei zeigt sich eine sehr schlechte Übereinstimmung der Ausgleichsfunktion mit den Messwerten.

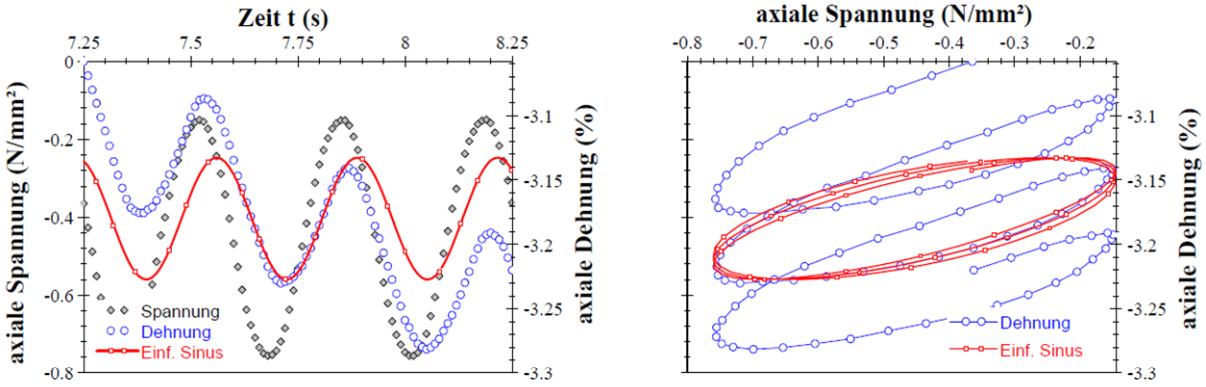


Abbildung 5-6: Darstellung der TCCT-Messwerte von der axialen Belastung σ_{ax}, den resultierenden Dehnungen ε_{ax} und der mathematischen Näherungsfunktion (einfacher Sinusansatz) in Abhängigkeit von der Zeit (links) und als Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts) [Kappl K., 2007]

Eine wesentlich bessere Übereinstimmung der Messwerte mit der Ausgleichsfunktion ergibt sich bei der Wahl des erweiterten Ansatzes. Die Abbildung 5-7 zeigt den gleichen Lastwechselbereich wie die Abbildung 5-6, jedoch mit der Ausgleichsfunktion nach dem erweiterten Ansatz. Dabei zeigt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung zwischen den Mess- und Funktionswerten. Dies gilt auch für den markierten Bereich der Scheitelpunkte. Daher wird bei der Auswertung von Triaxialversuchen ausschließlich der erweiterte Ansatz der Ausgleichsfunktion verwendet.

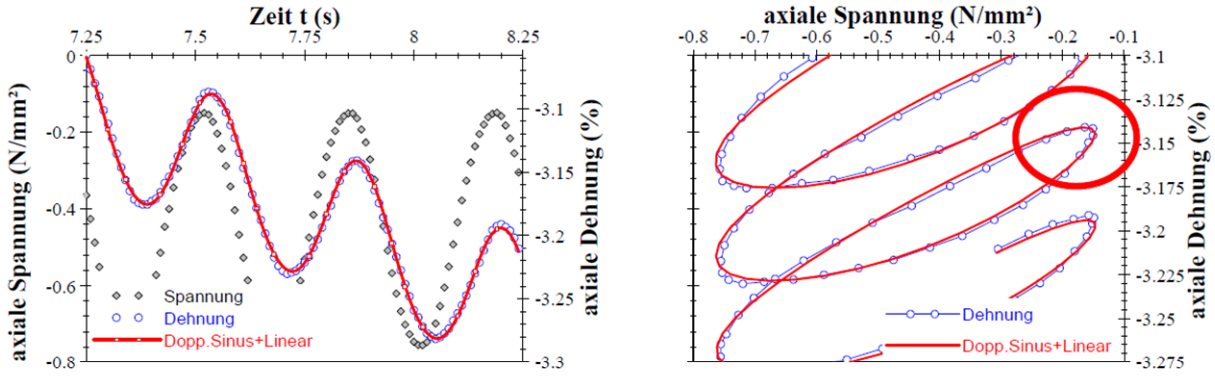


Abbildung 5-7: Darstellung der TCCT-Messwerte von der axialen Belastung σ_{ax}, den resultierenden Dehnungen ε_{ax} und der mathematischen Näherungsfunktion (doppelter Sinusansatz mit linearer Funktion) in Abhängigkeit von der Zeit (links) und als Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts) [Kappl K., 2007]

Die Abbildung 5-8 zeigt ein Spannungs-Dehnungs-Diagramm eines Triaxialversuches im Bereich hoher Lastwechsel mit den Ausgleichskurven des einfachen und erweiterten Ansatzes. Der geschlossene Verlauf zeigt, dass der lineare Term des erweiterten Ansatzes nur mehr einen vernachlässigbaren Beitrag zur besseren Anpassung der Ausgleichsfunktion an die Messpunkte leistet. Die Verbesserung beruht ausschließlich auf dem Term mit der doppelten Frequenz.

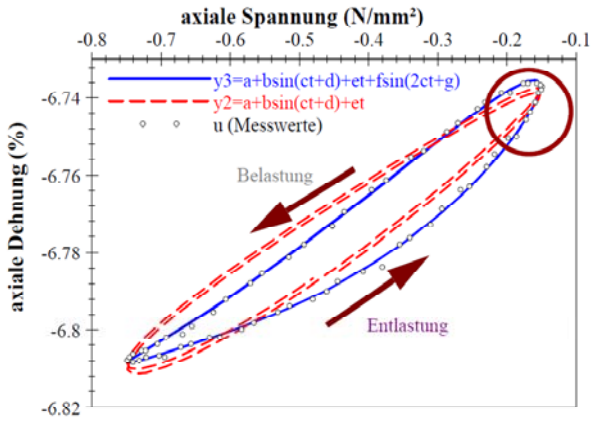


Abbildung 5-8: Vergleich des einfachen (rote Linie) und des doppelten (blaue Linie) Sinusansatzes im Kraft-Verformungsdiagramm für eine Schwingung am Beispiel der axialen Verformungen [Kappl K., 2007]

In der Abbildung 5-9 sind die Güten der beiden Regressionsansätze für die axialen Deformationen einer TCCT-Prüfung exemplarisch dargestellt. Wie darin ersichtlich, liegt das Bestimmtheitsmaß R^2 des einfachen Sinusansatzes gemäß (25) während der ersten 100 Lastwechsel unter 0,95. Während der ersten 10 Lastwechsel liegt R^2 sogar unter 0,5. Erst danach, am Beginn der sekundären Kriechphase, überschreitet jenes R^2 den Wert von 0,95. Beim erweiterten Regressionsansatz mit linearer Funktion und doppeltem Sinus gemäß (26) ist dagegen das Bestimmtheitsmaß über die gesamte Prüfdauer hoch gleichbleibend. Hier betragen die R^2-Werte im Durchschnitt 0,995 und höher [Kappl K., 2007]. In der Abbildung ist auch das Bestimmtheitsmaß für den einfachen Sinusansatz mit einer Erweiterung um eine lineare Funktion dargestellt. Dabei stimmt im Bereich bis etwa 10 Lastwechsel das Be-

stimmtheitsmaß mit dem erweiterten Ansatz überein. Ab etwa 100 Lastwechseln entspricht das Bestimmtheitsmaß etwa dem einfachen Sinusansatz.

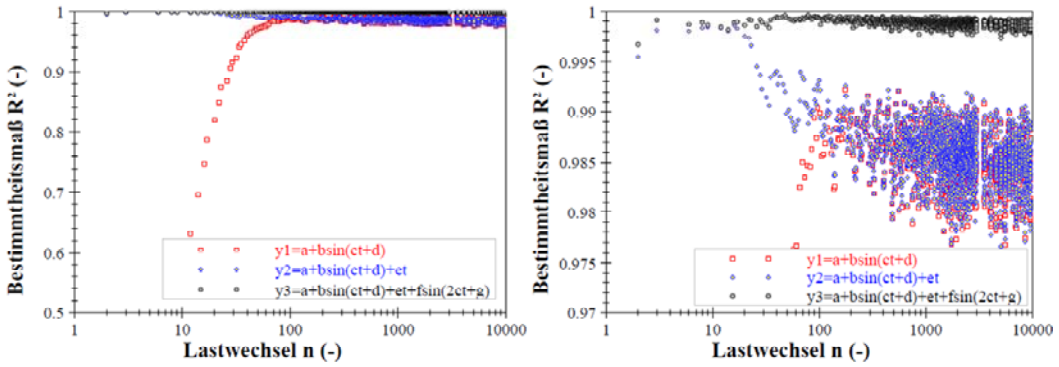


Abbildung 5-9: Vergleich der Bestimmtheitsmaße R^2 der drei Regressionsansätze bei den axialen Deformationen für die ersten 1000 Lastwechsel in einfach logarithmischer Skalierung [Kappl K., 2007]

6. DEHNUNGSMESSUNG

Um auf das Verformungsverhalten von Asphalt und seine Materialkennwerte schließen zu können, bedarf es neben der Messung der aufgebrachten Spannungen auch der Erfassung der daraus folgenden Deformationen. Die exakte Messung der am Probekörper auftretenden Deformationen, vor allem die der radialen Deformationen, war bisher ein noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem in der triaxialen Versuchstechnik. Die gängigste Methode zur Ermittlung der Axialverformung ist die Messung der Verschiebung des Kraftstempels relativ zur Zelle mit Hilfe eines Wegaufnehmers, wie sie auch in dieser Arbeit angewendet wurde. Zur Messung der Radialverformung wurden bereits verschiedene Methoden entwickelt, die jedoch allesamt Schwächen aufwiesen, wie in den folgenden Unterkapiteln gezeigt wird. In dieser Arbeit erfolgt erstmals die Messung der Radialdeformationen mittels Dehnungsmessstreifen. Dieses Kapitel soll einen Einblick in die verschiedenen Methoden zur experimentellen Erfassung von Deformationen geben.

6.1 Messmethoden

6.1.1 Induktive Wegaufnehmer (LVDT)

Induktive Wegaufnehmer (LVDT = linear variable displacement transformer) werden vorwiegend zur Erfassung der axialen Verformung eines Probekörpers verwendet. Dabei wird die Verschiebung des Laststempels relativ zur Zelle gemessen.

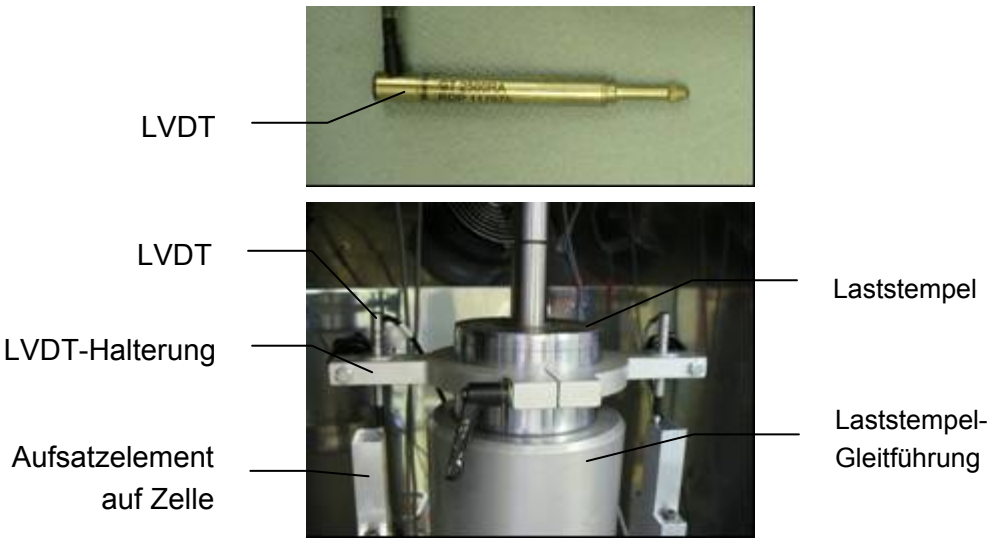


Abbildung 6-1: Induktive Wegaufnehmer (LVDT) (unten im eingebauten Zustand)

Innerhalb eines Spulenkörpers, der aus einer Primär- und zwei Sekundärspulen besteht, kann sich ein Kern aus ferromagnetischem Material bewegen. Die jeweilige Position des Kerns bewirkt eine entsprechende Induktivitätsverteilung in den Spulen, die durch eine integrierte Elektronik in ein wegproportionales Signal umgewandelt wird. Die Primärspule wird mit einer Wechselspannung gespeist, wodurch je nach Stellung des Kernes eine Wechselspannung unterschiedlicher Größe in den Sekundärspulen induziert wird (siehe Abbildung 6-2). Die Sekundärspulen sind in Serie geschaltet, so dass das Ausgangssignal der Differenzspannung der beiden Sekundärspulen entspricht. Wenn sich der Kern genau in Mittel-

stellung zwischen den Sekundärspulen und der Primärspule befindet, ist das Ausgangssignal genau 0 Volt. Wird der Kern in die eine oder andere Richtung bewegt, so entsteht eine Differenzspannung, die direkt proportional der Kernbewegung ist [Kappl K., 2007].

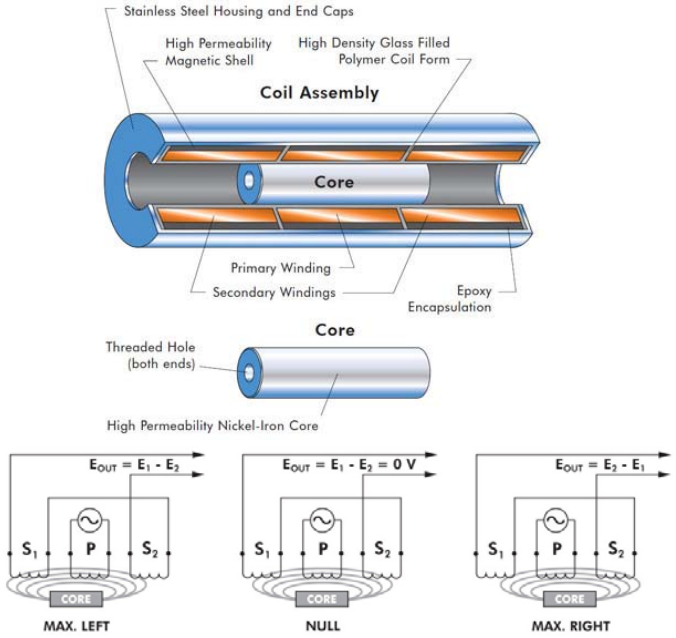


Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines LVDT [Macrosensors 2010]

Induktive Wegaufnehmer wurden auch schon für radiale Verformungsmessungen verwendet, wie am Versuchsaufbau für einen dynamischen Triaxialversuch an der TU Braunschweig in der Abbildung 6-3 zu sehen ist. Dabei wurden neun Wegaufnehmer innerhalb der Druckzelle eingebaut, die den Abstand der Gummimembran zur Druckzellenwand erfassten. Die radialen Dehnungen wurden in drei verschiedenen Höhen gemessen, wobei in jeder Höhe die Einzelmessungen der drei jeweils im Winkel von 120° zueinander stehenden Wegaufnehmer automatisch gemittelt und aufgezeichnet wurden.

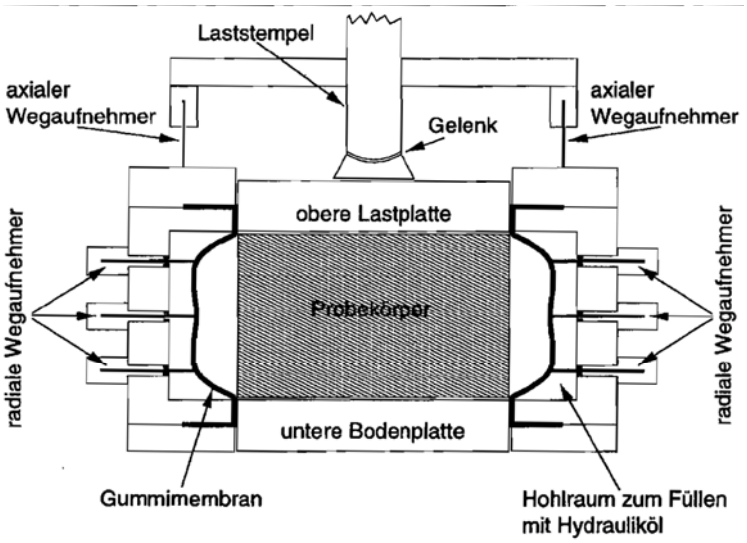


Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der radialen Verformungsmessung mittels LVDTs bei einem dynamischen Triaxialversuch an der TU Braunschweig [Leutner R., 2006]

6.1.2 Kettenextensometer

Der Kettenextensometer dient zur Messung der Änderung der radialen Ausdehnungen oder des Umfangs zylinderförmiger Probekörper. Ein Extensometer ist eigentlich ein Sensor zur Messung von Längenänderungen. Die Umfangsänderung wird jedoch erfasst, indem zwischen zwei Extensometerarmen eine Kette eingespannt wird. Statt der direkten Änderung des Probenumfangs wird die Änderung der Abstandsgeraden zwischen beiden Kettenenden gemessen und mit einer Näherungsformel in die radiale Änderung umgerechnet. Das Verhältnis aus Umfangsänderung ΔU, bezogen auf den initialen Umfang U_I, entspricht dem Verhältnis aus der Änderung des Radius Δr, bezogen auf den initialen Radius r_I, und liefert die Querdehnung ε_q [Trautwein U., 2005]:

$$\varepsilon_q = \frac{\Delta U}{U_I} = \frac{\Delta r}{r_I} \tag{31}$$

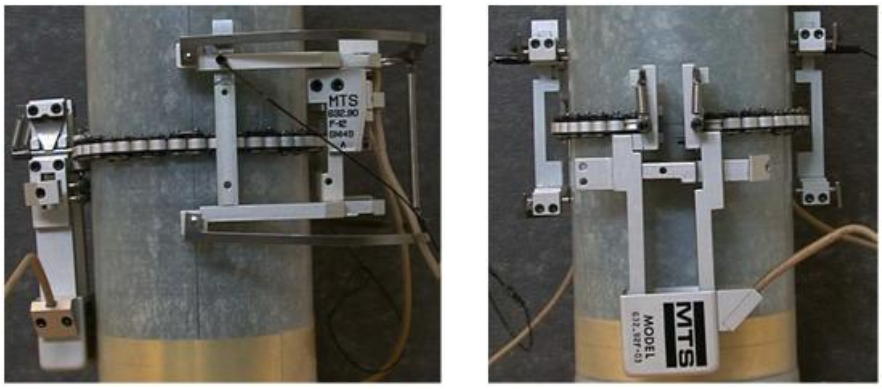


Abbildung 6-4: Kettenextensometer [Trautwein U., 2005]

Wie in Abbildung 6-4 ersichtlich ist, benötigt dieses Messwerterfassungssystem aufgrund seiner Abmessungen viel Platz, welcher in der vorhandenen Triaxialzelle der Triaxialprüfmaschine nicht zur Verfügung steht.

6.1.3 Radialmessbügel

Der Radialmessbügel wurde als ein System zur Erfassung der radialen Dehnungen entwickelt, das im begrenzten Platzangebot einer Triaxialzelle benutzt werden kann. Das Messsystem besteht aus einem druckbeständigen, wasserdichten, induktiven Wegaufnehmer, der an zwei Radialmessbügeln aus Aluminium befestigt ist. Die beiden Messbügel sind an beiden Enden jeweils über eine Vollwelle, die in linearen Kugelgleitlagern geführt ist, miteinander verbunden. Zwei seitlich an den Messbügeln montierte Stahlfedern sorgen für ein Schließen des Messbügels und für einen ordnungsgemäßen Halt des Radialmesssystems am Probekörper.

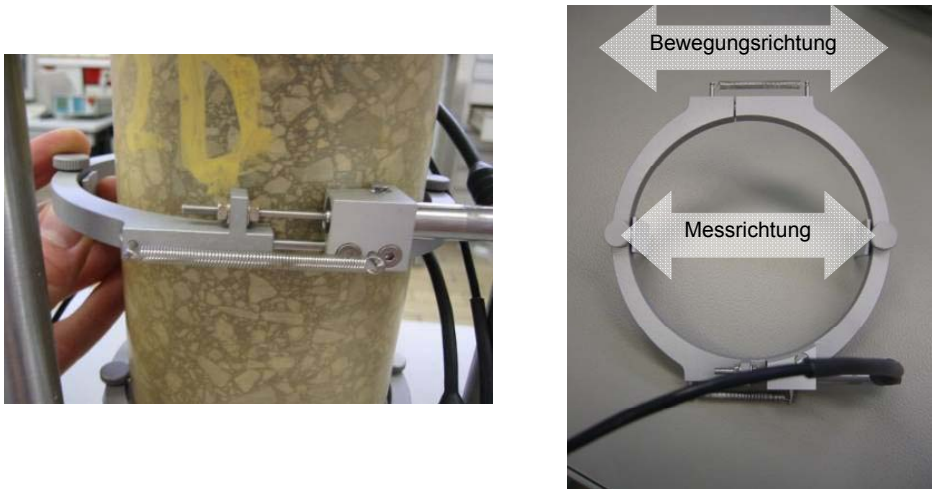


Abbildung 6-5: Radialmessbügel [Kappl K., 2007]

Der Nachteil dieser Messeinrichtung ist, dass dieses System nur Durchmesseränderungen in einer Richtung, nämlich in Richtung der Bewegungsrichtung der linearen Kugelgleitlager, erfassen kann. Wenn sich ein Probekörper nicht gleichmäßig kreisförmig ausbaucht, kann dieses Radialmesssystem nicht die maximale Durchmesseränderung ermitteln [Kappl K., 2007]. Ein weiterer Nachteil des Radialmessbügels ist, dass er nur über der Latexmembran angebracht werden kann und somit über diese unbekannte Anteile in die Umfangsmessung einfließen.

Zur Messung der Gesamtverformung mag der Radialmessbügel ausreichend sein. Er ist jedoch, wie in Abbildung 6-6 zu sehen ist, zur Bestimmung der Phasenverschiebung gänzlich ungeeignet. Die Abbildung zeigt die Messsignale bei einem zyklisch dynamischen Druckschwellversuch. Sowohl das Signal der aufgebrachten Last als auch das der Axialverformung lassen gut die sinusförmige Schwingung erkennen. Dagegen liefert der Radialmessbügel nicht annähernd ein brauchbares sinusförmiges Signal. Das macht es somit unmöglich, die Phasenverschiebung zwischen der Axial- und der Radialverformung zu bestimmen.

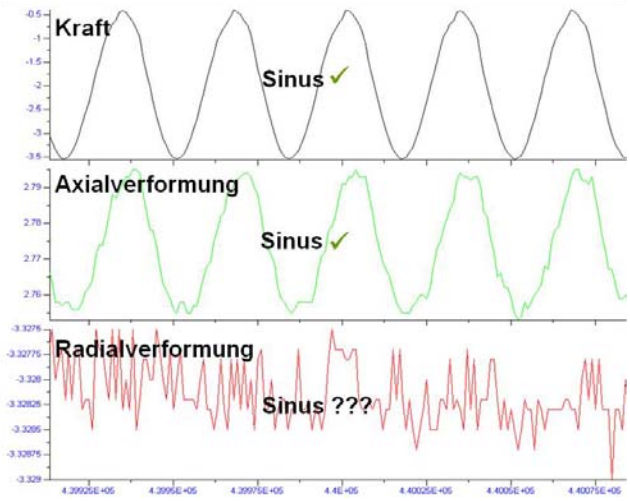


Abbildung 6-6: Graphische Darstellung der Messsignale bei einem zyklisch dynamischen Druckschwellversuch

6.1.4 Stahlfederband mit Dehnungsmessstreifen

Das Stahlfederband mit Dehnungsmessstreifen ist ein Prototyp, mit dem versucht wurde, ein Umfangsmesssystem zu entwickeln, das nicht nur die Durchmesseränderungen erfasst, sondern auch Änderungen im gesamten Umfang der Probekörperverformungen. Das Stahlfederband ist in Rosettenform kreisrund gebogen, um eine gewisse Vorspannung für den festen Halt des Systems am Probekörper zu erzeugen (Abbildung 6-7). Außerdem ermöglicht die Rosettenform eine entsprechende Ausdehnung des Stahlfederbügels mit größer werdendem Umfang. An der Außen- und Innenseite der einzelnen Bögen sind Dehnungsmessstreifen appliziert, welche die Durchbiegungen der Stahlfederbögen, die durch die Umfangsänderungen eines belasteten Probekörpers verursacht werden, erfassen können. Der Vorteil dieses Systems ist, dass es nicht mehr wie die oben genannten Radialmesssysteme von der Deformationsform abhängig ist. Es können somit auch ungleichmäßige Deformationen des Probekörpers gemessen werden.

Abbildung 6-7: Ansicht des Prototyps am unverformten und am deformierten Probekörper (links und Mitte) und des versiegelten ersten Testtyps (rechts) [Kappl K., 2007]

Der Prototyp wurde zu einem ersten Testtyp weiterentwickelt, der jedoch aufgrund von Problemen mit der Abdichtung der Dehnungsmessstreifen nicht für den Langzeiteinsatz weiter verwendet werden konnte. Größere Verformungen des Systems verursachten Risse in der Versiegelung des Stahlfederbügels an den Stellen der Dehnungsmessstreifen. Das hatte zur Folge, dass das bei Triaxialversuchen benötigte Zellwasser Kurzschlüsse des Messsignals verursachte, nachdem es in die Risse eingedrungen war [Kappl K., 2007].

6.1.5 Messring mit Dehnungsmessstreifen

Am Institut für Straßenbau und Eisenbahnwesen der Universität Karlsruhe wurde unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. H. G. Krebs im Jahre 1981 zur Erfassung des radialen Verformungsverhaltens eines Probekörpers ein Messring entwickelt. Dieser bestand, wie Abbildung 6-8 zeigt, aus einem Federstahlring, der über die den Probekörper umhüllende Gummimanschette angebracht wurde.

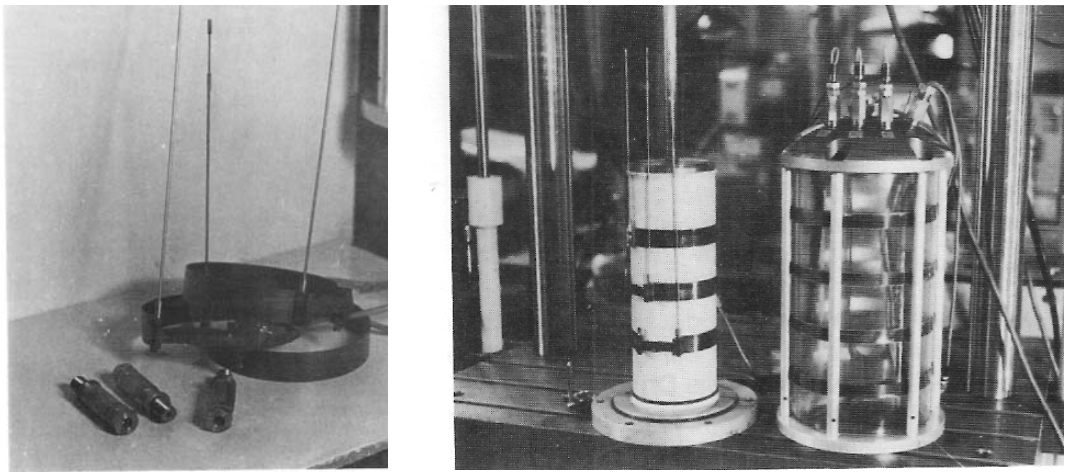


Abbildung 6-8: Dehnungsmessringe (links) und vorbereiteter Probekörper vor Aufsetzen der Zellhaube (rechts) [Krebs H. G., 1981]

Zwischen den Öffnungen des Messringes wurde ein zusätzliches Federelement angebracht, auf das zwei Dehnungsmessstreifen aufgeklebt wurden. Bei Änderung des Probekörperdurchmessers verformten sich die auf die Federsegmente aufgeklebten Dehnungsmessstreifen und gaben elektrische Signale ab, die über abgedichtete Kabel aus der Zelle weitergeleitet wurden. Zur Reduzierung der auftretenden Reibung zwischen der Gummimanschette und den Messringen wurden diese vor Montage mit Silikonöl geschmiert. An den Radialringen wurde zusätzlich zur Messung axialer Verformungen jeweils ein induktiver Wegaufnehmer befestigt, wodurch erreicht wurde, die Verformung einzelner Schichten des Probekörpers in horizontaler wie in vertikaler Richtung getrennt zu ermitteln. Es standen drei Messringe inklusive Wegaufnehmer zur Verfügung, die in den Viertelpunkten der Probekörperhöhe montiert wurden. Abgesehen von der getrennten Deformationsbestimmung in diesen drei Schichthöhen wurde noch die gesamte axiale Verformung der Probekörper mit Hilfe eines vierten induktiven Weggebers, der im Druckzylinder installiert wurde, aufgezeichnet [Krebs H. G., 1981].

6.1.6 Widerstandsdraht

Huschek bediente sich bei den Versuchen für seine Dissertation eines 0,05 mm starken Drahtes aus einer speziellen Chrom-Nickel-Legierung für die Messung der Querdehnung. Bei einer Dehnung und somit einer Querschnittsverengung des Drahtes bewirkt diese Legierung eine besonders große Änderung des elektrischen Widerstandes. Der Draht wurde mit 13 g vorgespannt und in acht Windungen über die gesamte Höhe um den Probekörper gewickelt (Abbildung 6-9). Hohlräume in der Mantelfläche des Prüfkörpers wurden zuvor mit Gips ausgefüllt und die Mantelfläche wurde mit Schmirgelpapier geglättet. Gegenüber der Dichtungshaut wurde der Draht durch einen gefetteten dünnen Naturgummiring geschützt. Die Zuleitungen blieben unter der Dichtungshaut und wurden durch eine mittige Öffnung im Sockel durch die Bodenplatte nach außen geführt [Huschek S., 1983].

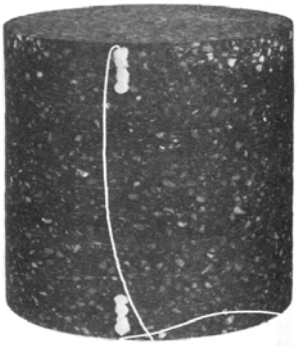


Abbildung 6-9: Widerstandsdraht in 8 Windungen über die gesamte Höhe um den Probekörper gewickelt [Huschek S., 1983]

6.1.7 Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen (DMS) zählen wegen ihrer Vielseitigkeit in der experimentellen Verzerrungsanalyse zu den weitest verbreiteten Punktmessverfahren. Aufgrund ihrer großen Messgenauigkeit werden Dehnungsmessstreifen nicht nur zur Messung von Verzerrungen selbst, sondern auch bei der Herstellung von Messgrößenaufnehmern zur Bestimmung physikalischer Größen (Kräfte, Momente, Drücke) verwendet. Die Wirkungsweise eines DMS ist die ähnlich der des Widerstandsdrahtes, den Huschek verwendete. Sie beruht darauf, dass sich der Ohm'sche Widerstand eines elektrischen Leiters ändert, wenn sich dessen Länge ändert.

Die Dehnungsmessstreifen werden an der Oberfläche von Bauteilen appliziert. Kommt es infolge äußerer oder innerer Krafteinwirkungen zu einer Gestaltänderung, so geht diese mit einer Verzerrung der Oberfläche einher. Diese Verzerrung wird dem DMS aufgezwungen, wodurch dieser seinen elektrischen Widerstand verändert. Diese Widerstandsänderung ist ein Maß für die auftretende Dehnung. Mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen kann man somit mechanische nichtelektrische Größen in eine elektrische Größe umwandeln und für eine elektrische Signalverarbeitung verwenden.

Im Labor für Straßenwesen der TU Wien wurde erstmalig versucht Dehnungsmessstreifen bei der Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalten zu verwenden, indem diese direkt an den Asphaltprobekörper appliziert wurden (Abbildung 6-10). Ziel dieser Diplomarbeit war es u.a. in diesem Bereich weitere Erfahrungen mit Dehnungsmessstreifen zu sammeln. Einen tieferen Einblick in die verwendete Dehnmessstreifentechnik soll Kapitel 6.2 liefern.

Abbildung 6-10: Dehnungsmessstreifen direkt auf Asphaltprobekörper appliziert

6.2 Spannungs- und Verformungsmessung mit Dehnungsmessstreifen

6.2.1 Dehnungsmessstreifen

Unter allen Dehnungsmessgeräten haben Dehnungsmessstreifen, kurz DMS, das breiteste Anwendungsgebiet und die größte Bedeutung.

Das messende Element eines DMS besteht aus einem dünnen elektrischen Leiter, der das sogenannte Messgitter bildet. Das Messgitter ist bei den Normalformen in einen foliendünnen Kunststoffträger eingebettet, der es gegen das Messobjekt elektrisch isoliert und die Dehnung auf das Messgitter überträgt, während die Kunststoffdeckschicht das Messgitter gegen Beschädigung schützt.

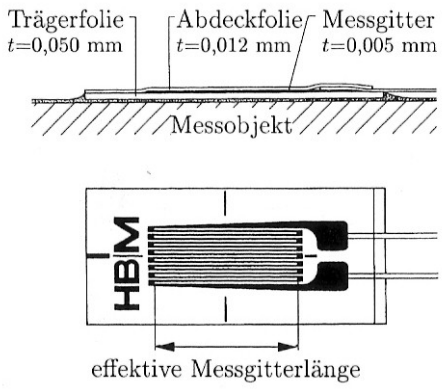


Abbildung 6-11: Schema eines Folien-DMS [Keil S., 1995]

DMS zeichnen sich durch kleine Abmessungen, sehr kleine Masse (etwa 10 mg bis 500 mg) und eine geringe Einwirkung auf das Messobjekt aus. Dadurch bleiben selbst kleine Messobjekte in ihrem statischen und dynamischen Verhalten praktisch unverändert, ein besonderer Vorteil des DMS gegenüber anderen Dehnungsmessgeräten. Jedoch sind nicht alle Bedingungen mit einem einzigen DMS-Typ zu erfüllen. Abgesehen von der Nutzung des physikalischen Effekts der dehnungsbedingten Widerstandsänderung, ergibt sich die Anwendungsbreite des Dehnungsmessstreifens vor allem aus den durch die Herstell- und Applikationsverfahren gebotenen Variationsmöglichkeiten [Profos P., 1994].

Neben unterschiedlichen Messgitterlängen findet man unterschiedliche Gestalt und Lage der Anschlüsse (Abbildung 6-12). Ferner unterscheidet man sogenannte Linear-DMS in einfacher und doppelter (paralleler) Anordnung, X-Rosetten mit unter 90° zueinander angeordneten Messgitterachsen, R-Rosetten mit jeweils 3 unter bestimmten Winkeln zueinander angeordneten Messgitterachsen, DMS-Ketten und zahlreiche andere Spezialformen.

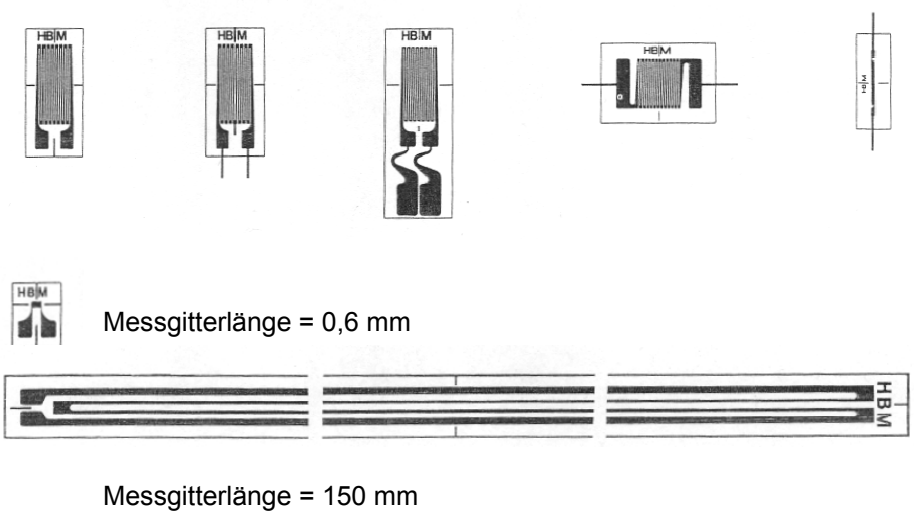


Abbildung 6-12: Einige typische Messgitterformen sogenannter „Linear-DMS“ [Hoffmann K., 1987]

Es werden DMS mit Messgitterlängen zwischen 0,4 mm und 150 mm angeboten. Die absolute Länge des DMS hat keinen Einfluss auf dessen Empfindlichkeit. Dies ist eine oftmals anzutreffende falsche Vorstellung. Das Messsignal eines metallischen DMS ist nämlich der relativen Längenänderung (= Dehnung) proportional und nicht der absoluten Längenänderung. Kleine DMS sollte man jedoch nur dort anwenden, wo eine technische Notwendigkeit dazu gegeben ist, wie z.B. bei Kerbspannungsuntersuchungen. Eher sollte man einen großen DMS durch Beschneiden des Messgitterträgers an den verfügbaren Platz anpassen. Dies ist möglich, soweit man die Mechanik der Dehnungseinleitung in das Messgitter kennt:

Dehnungseinleitung in das Messgitter

Die Dehnung des Messobjekts ε_{Objekt} muss über die Klebstoffschicht und den Messgitterträger auf das Messgitter übertragen werden. Dafür sind gewisse Einleitungsstrecken in den einzelnen Schichten notwendig. Die Länge der Einleitungsstrecken ist von der Dicke der einzelnen Schichten und von der Steifigkeit (dem E-Modul) ihres Werkstoffs abhängig.

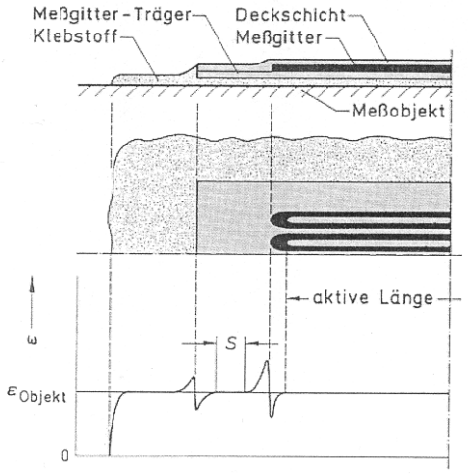


Abbildung 6-13: Schematische Darstellung der Dehnungseinleitung in das DMS-Messgitter [Hoffmann K., 1987]

In dem Diagramm in Abbildung 6-13 ist zu sehen, wie der Einleitungsphase eine Strecke folgt, in welcher die Messobjektdehnung und die Partialdehnung der DMS-Teile einander gleich sind. An den Übergangsstellen von einem DMS-Teil in den nächsten entstehen Dehnungsüberhöhungen, welche das Nachhinken des folgenden Teiles ausgleichen.

Ohne dass es Rückwirkungen auf die Eigenschaften des DMS hätte, kann der Messgitterträger nötigenfalls um die im Diagramm mit dem Buchstaben „S“ gekennzeichnete Strecke gekürzt werden. Sollte er mehr als um diese Strecke gekürzt werden, wird die Dehnungseinleitungsstrecke bis in den Bereich der „aktiven“ Messgitterlänge hineinreichen und hätte eine Verminderung der Dehnungsempfindlichkeit, die durch den k-Faktor (siehe Kapitel 6.2.2) ausgedrückt wird, zur Folge. Es ist zu beachten, dass, weil der E-Modul von Kunststoffen (Klebstoff, Messgitterträger) temperaturabhängig ist, die Einleitungsstrecken bei höheren Temperaturen länger werden und umgekehrt. Zumindest 1 bis 2 mm sollten für den Überstand der Trägerfolie über das Messgitter hinaus eingehalten werden.

Bei der Wahl der Messgitterlänge muss bedacht werden, dass der DMS den arithmetischen Mittelwert des unter seinem Messgitter vorhandenen Dehnungszustandes bildet. Bei inhomogenen Materialien, wie es auch der Asphalt ist, würde ein zu kurzer DMS lediglich Paritaldehnungen messen. Solch eine Partialdehnung wäre im Bereich eines Kornes kleiner, im Bereich der Bitumenmatrix größer als der Durchschnittswert, gemessen mittels eines langen Messgitters. Demnach sollte die Messgitterlänge, wenn der Mittelwert gesucht wird, mindestens das 5-fache des Größtkornes betragen, um einen ausreichend gemittelten Wert zu bekommen. Das Gegenteil gilt natürlich, wenn der Spitzenwert oder ein örtlicher Dehnungszustand gesucht wird. Hier würde ein langer DMS einen unerwünschten Mittelwert bilden.

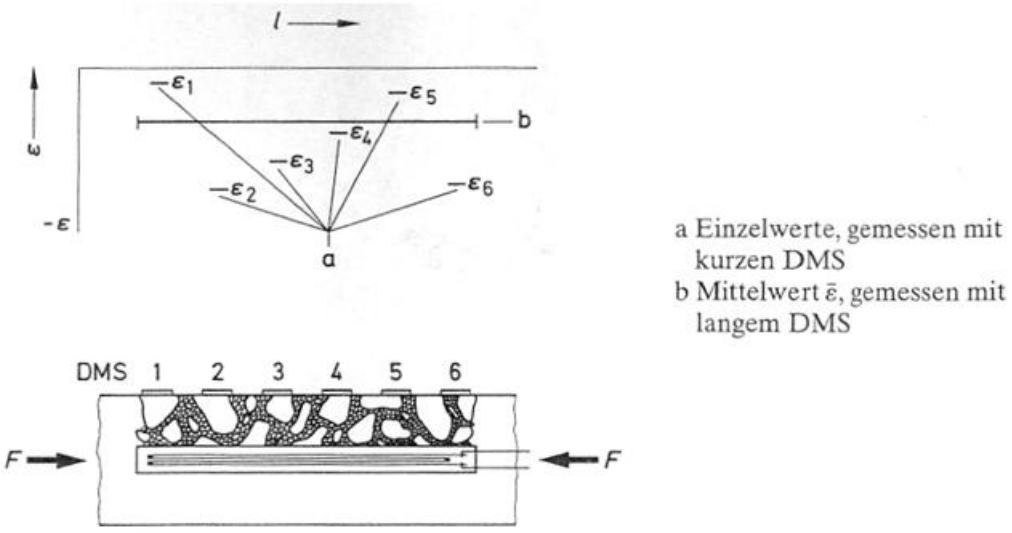


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung der Messwerte unterschiedlich langer Messgitter bei einem inhomogenem Material (Asphalt) [Hoffmann K., 1987]

6.2.2 Physikalisches Grundprinzip

Die Wirkungsweise eines DMS beruht darauf, dass sich der Ohm'sche[9] Widerstand eines elektrischen Leiters ändert, wenn sich dessen Länge ändert. Für den elektrischen Widerstand *R* eines mechanisch unbeanspruchten elektrischen Leiters mit kreisförmiger Querschnittsfläche *A* gilt allgemein:

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{4\rho l}{\pi a^2} \qquad [\Omega] \tag{32}$$

mit *ρ* als dem spezifischen Widerstand, *l* als der Länge und *a* als dem Durchmesser des Leiters.

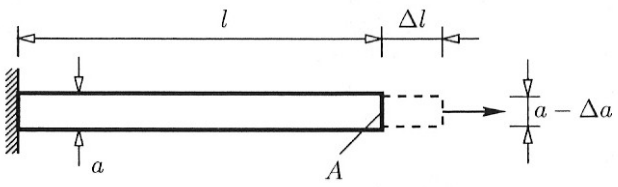


Abbildung 6-15: Elektrischer Leiter unter Längsbeanspruchung [Mang H., 2000]

Bei mechanischer Beanspruchung wird das Leiterstück um *Δl* verlängert und der Durchmesser um *Δa* verkleinert. Durch Anwendung des totalen Differenzials ergibt sich daraus die relative Widerstandsänderung

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - 2\frac{\Delta a}{a} \tag{33}$$

Unter Berücksichtigung von $\Delta l/l = \varepsilon$ und $\Delta a/a = -\nu\varepsilon$ mit der Querdehnzahl *v* sowie von $\Delta\rho/\rho = \beta_\rho \varepsilon$ mit β_ρ als Werkstoffkonstante für Leitermaterialien, die bei DMS verwendet werden, erhält man

$$\frac{\Delta R}{R} = \left(1 + 2\upsilon + \beta_\rho\right)\varepsilon = k\,\varepsilon \tag{34}$$

Die relative Widerstandsänderung $\Delta R/R$ ist also zur aufgebrachten Verzerrung *ε* proportional. Der Ausdruck $\left(1 + 2\upsilon + \beta_\rho\right)$ wird zum sogenannten k-Faktor zusammengefasst [Mang H., 2000], und ist als Maß für die DMS-Empfindlichkeit eine vom Hersteller experimentell ermittelte Kenngröße. Bei DMS aus Konstantan liegt die Grenze für den k-Faktor je nach Vorbehandlung zwischen ±1 und ±3 mm/m.

6.2.3 Auswahlkriterien eines DMS

Dieses Kapitel soll die Auswahl eines DMS in Hinblick auf besondere Anforderungen erleichtern, indem auf verschiedene DMS-Kenngrößen und DMS-Eigenschaften eingegangen wird.

Dehnungsempfindlichkeit

9 Georg Simon Ohm (1789 – 1854) entdeckte 1826 das nach ihm benannte Gesetz der Stromleitung. Der elektrische Widerstand wird nach diesem Gesetz bestimmt.

Die Dehnungsempfindlichkeit eines DMS wird, wie bereits in Kapitel 6.2.2 gezeigt wurde, durch das Verhältnis von relativer Widerstandsänderung zur Dehnung ausgedrückt, dem sogenannten k-Faktor (siehe Formel (34)).

Die folgende Tabelle zeigt mittlere k-Faktor-Werte üblicher Messgitterlegierungen:

Tabelle 6-1: Mittlere k-Faktoren von DMS mit verschiedenen Messgitterwerkstoffen [Hoffmann K., 1987]

Messgitterwerkstoff (Handelsname)	Richtanalyse [%]	Mittlerer k-Faktor ca.
Konstantan	57 Cu, 43 Ni	2,05
Karma	73 Ni, 20 Cr, Rest Fe + Al	2,1
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr	2,2
Platin-Wolfram	92 Pt, 8 W	4,0

Querempfindlichkeit

DMS sollten eigentlich nur in Richtung ihrer Messachse mit einer Widerstandsänderung auf eine Dehnung reagieren. Die Richtung der Messachse, die „aktive“ Richtung des DMS, ist durch die Richtung der Drähte oder drahtähnlichen Leiterteilen des Messgitters bestimmt.

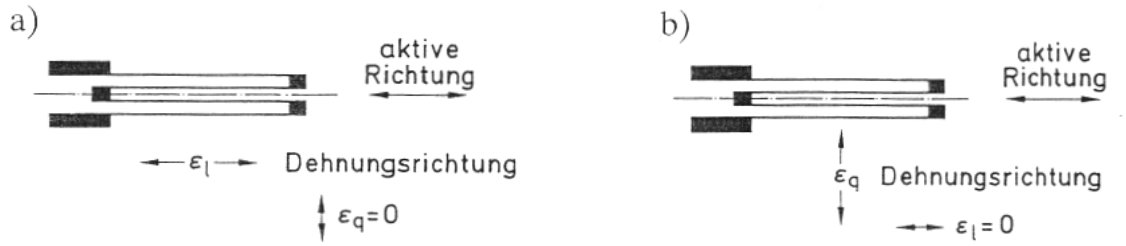
Eine Widerstandsänderung, wenn auch gering, kann jedoch bei einer Belastung quer zur „aktiven“ Richtung beobachtet werden, welche der Querempfindlichkeit entspricht. Diese Querempfindlichkeit q ist definiert als der Quotient aus der Dehnungsempfindlichkeit quer und längs zur Messrichtung:

$$q = \frac{k_q}{k_l} \tag{35}$$

mit

$$k_l = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_l} \tag{36}$$

$$k_q = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon_q} \tag{37}$$



ε_l Dehnung in der Längsrichtung des DMS

ε_q Dehnung in der Querrichtung des DMS

Abbildung 6-16: Zur Definition der Querempfindlichkeit: a) DMS in seiner aktiven Richtung einachsig beansprucht, b) DMS quer zu seiner aktiven Richtung einachsig beansprucht [Hoffmann K., 1987]

Temperaturgang einer DMS-Messstelle

Unter dem Temperaturgang ε_T einer Messstelle versteht man die temperaturabhängige Veränderung des Messsignals trotz völliger Abwesenheit oder völliger Konstanz mechanischer Beanspruchung des Messobjekts. Der Temperaturgang macht sich nur bemerkbar, wenn während der Messdauer die Temperatur des Prüfobjektes oder seiner Umgebung variiert. Wenn sich die ursprünglichen Temperaturbedingungen an der Messstelle wieder einstellen, verschwindet der Temperaturgang wieder – er ist also reversibel.

Der Temperaturgang hängt ab von

α_B der Wärmedehnung des Bauteilwerkstoffes

α_M der Wärmedehnung des Messgitterwerkstoffes des DMS

α_R dem Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstandes des Messgitterwerkstoffes und

ΔT der Temperaturänderung als auslösende Größe

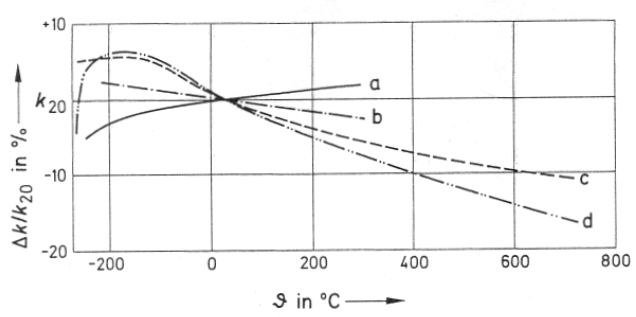
Nachdem diese Parameter temperaturabhängig sind, gilt näherungsweise für einen begrenzten Temperaturbereich [Hoffmann K., 1987]:

$$\varepsilon_T = \left(\frac{\alpha_R}{k} + \alpha_B - \alpha_M\right) \Delta T \tag{38}$$

Tritt während einer mechanischen Beanspruchung eine Temperaturänderung auf, so geht in das Messergebnis neben der mechanischen Dehnung auch die thermische Dehnung ein, und verfälscht dieses somit. Diesen fehlerhaften Anteil kann man durch selbstkompensierende DMS oder durch Kompensationsverfahren (siehe Kapitel 6.2.6) beseitigen. Temperaturkompensierende DMS können in einem begrenzten Temperaturbereich den Temperaturgang unterdrücken, indem ihr Wärmeausdehnungskoeffizient an den des Bauteils angepasst wird. Werden Versuche bei konstanter Temperatur durchgeführt tritt kein Temperaturgang auf, der das Messergebnis beeinflusst.

Temperaturabhängigkeit der Empfindlichkeit

Wie bereits oben erwähnt wurde, wird die Empfindlichkeit eines DMS durch den k-Faktor ausgedrückt. Man muss wissen, dass sich der vom Hersteller angegebene Wert für den k-Faktor lediglich auf die Raumtemperatur bezieht. Dieser ändert sich jedoch bei abweichender Temperatur je nach verwendetem Messgitterwerkstoff (siehe Abbildung 6-17).



a Konstantan
b Karma
c Nichrome V
d PtW 8

Abbildung 6-17: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors verschiedener Messgitterlegierungen [Hoffmann K., 1987]

Statische Dehnbarkeit

Die maximale Dehnbarkeit eines DMS hängt von der Konstruktion und von den Werkstoffen des Dehnungsmessstreifens ab. Es gibt Ausführungen, die maximal ± 2 cm/m (± 20.000 µm/m) beansprucht werden können, während andere einen maximalen Dehnungsbereich von bis zu ± 20 cm/m (± 200.000 µm/m) aufweisen.

Bei großen Dehnungen können Nichtlinearitäten auftreten, die jedoch mit Linearitätsabweichungen der Viertelbrückenschaltung weitgehend kompensiert werden können.

Die volle Belastbarkeit eines DMS kann überhaupt nur dann erreicht werden, wenn es dessen Befestigung zulässt. Das setzt zum einen eine ausreichende Dehnbarkeit und Bindefestigkeit des Klebstoffs und zum anderen eine einwandfreie Applikationsarbeit voraus.

Dynamische Dehnbarkeit

Aufgrund ihrer geringen Masse haben Dehnungsmessstreifen keinen spürbaren Einfluss auf das Schwingungsverhalten des Messobjektes, weshalb sie sich sehr gut zur Messung dynamischer Dehnungsvorgänge eignen.

Bei DMS mit metallischem Messgitter kann es infolge einer Dauerschwingbeanspruchung zu einer Werkstoffermüdung kommen, die sich auf zweierlei Weise äußert. Einerseits entsteht in Abhängigkeit von der Amplitude und der Lastspielzahl eine Zunahme des elektrischen Widerstandes, die sich als dynamische Nullpunktdrift äußert. Andererseits entstehen mit zunehmender Werkstoffzerrüttung an den Korngrenzen des Messgittermetalls Mikrorisse, die sich langsam vergrößern und bis zu einem Dauerbruch führen können.

Dehnungsmessstreifen können nicht gleichzeitig ein hohes Dauerschwingverhalten und eine hohe statische Dehnbarkeit aufweisen. Die maximale statische Dehnbarkeit von DMS mit hohem Dauerschwingvermögen endet bei ca. 1 – 2 cm/m (10.000 - 20.000 µm/m), während sogenannte Hochdehnungs-DMS nur sehr bescheidenes Dauerschwingverhalten besitzen [Hoffmann K., 1987].

Bei sinusförmigen Schwingungsvorgängen spielt das Verhältnis der DMS-Länge l_{DMS} zur Wellenlänge λ bzgl. der Abbildungstreue eines Vorganges eine wesentliche Rolle. Sollte die DMS-Länge gleich der Wellenlänge einer sinusförmigen Schwingung sein, dann wird der DMS als Mittelwert aus den positiven und negativen Schwingungsanteilen den Wert Null liefern, obwohl die Spitzenwerte sehr groß sein können. Man muss deshalb bestrebt sein, das Verhältnis $l_{DMS} : \lambda$ möglichst klein zu halten, um ein hinreichend genaues Messergebnis zu bekommen.

Elektrische Belastbarkeit

Aufgrund des kleinen Querschnitts der Leiterbahnen des Messgitters eines DMS ergibt sich bei einer elektrischen Belastung eine sehr hohe Stromdichte, die eine Wärmeentwicklung zur Folge hat. Durch das günstige Verhalten von Querschnittsfläche zur Mantelfläche bei kleinen

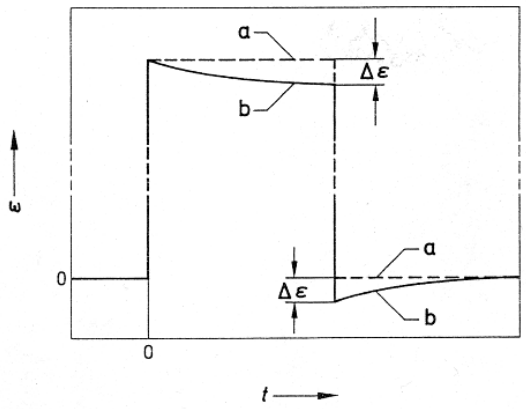
Leiterquerschnitten kann die durch den Stromfluss entstehende Joulesche[10] Wärme an die Umgebung abgegeben werden. Damit die Temperaturerhöhung am DMS in vertretbaren Grenzen bleibt, muss die Leistungszufuhr und die Leistungsabfuhr in Einklang gebracht werden. Beeinflussende Parameter dafür sind:

- die Höhe der Brückenspeisespannung,
- der elektrische Widerstand des Messgitters,
- die Größe und Geometrie des DMS-Messgitters,
- die Umgebungstemperatur,
- die Wärmeleitfähigkeit des Bauteilwerkstoffs,
- die Wärmekapazität und das Abstrahl- bzw. Kühlvermögen des Bauteils.

Für jeden DMS-Typ wird vom Hersteller die höchstzulässige Speisespannung angegeben, die bei Raumtemperatur und einer Applikation an gut wärmeleitenden Objekten gilt. Bei einer höheren Umgebungstemperatur, schlechter Wärmeleitfähigkeit und niedriger Wärmekapazität des Bauteils ist die Speisespannung zu reduzieren.

Kriechen

Die Ursache des Kriechens liegt im rheologischen Verhalten der dehnungsübertragenden Schichten des Klebstoffs und des Messgitterträgerwerkstoffs. Das gedehnte Messgitter wirkt ähnlich einer gespannten Feder. Im Bereich der Umkehrstellen des Messgitters erzeugt die Federkraft Schubspannungen an den Berührungsflächen zwischen Messgitter und Träger. Diese Schubspannungen und die aus der Dehnung resultierende Normalspannung bewirken eine Relaxation der Kunststoffe des DMS und des Klebstoffs, d.h. die Gegenkraft erlahmt und das Messgitter zieht sich zurück. Es entsteht dadurch ein negativer Fehler.

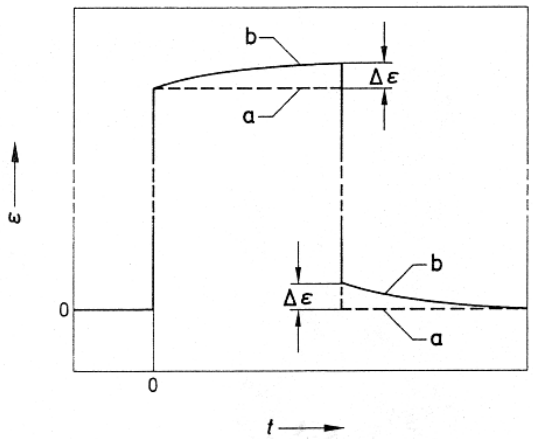


a Bauteildehnung
b DMS-Messwert

Abbildung 6-18: Zeitlicher Verlauf des Messwertes eines DMS nach spontaner Belastung eines Bauteils und nach dessen spontaner Entlastung (schematisch) [Hoffmann K., 1987]

10 James Prescott Joule (1818 – 1889), britischer Physiker, widmete sich 1840 der Untersuchung der Wärmewirkungen des Stromes und bemerkte dabei die Erwärmung des stromdurchflossenen Leiters. Er formulierte das Joulesche Gesetz, nach dem die Wärme proportional dem Produkt aus dem Quadrat der Stromstärke und dem Widerstand des Stromkreises ist ($P = I^2 \cdot R$).

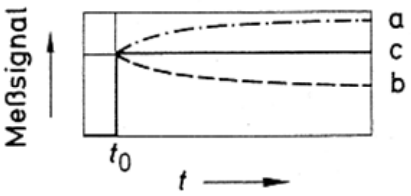
Infolge von Relaxationseigenschaften des Messobjektes treten neben der spontanen Dehnung zusätzlich zeitabhängige, asymptotisch verlaufende Dehnungen auf, die man als „elastische Nachwirkung“ bezeichnet. Diese elastische Nachwirkung liefert einen positiven Fehler.



a Bauteilbelastung
b Bauteildehnung

Abbildung 6-19: Zeitlicher Verlauf der Dehnung eines Bauteils während konstanter Belastung und nach vollständiger Entlastung (elastische Nachwirkung) [Hoffmann K., 1987]

Nachdem das DMS-Kriechen und die elastischen Nachwirkungen entgegengesetzte Vorzeichen haben, heben sich diese im günstigsten Fall auf.



a elastische Nachwirkung des Bauteilwerkstoffs
b kriechender DMS
c Messsignal

Abbildung 6-20: Schema der Kriech-Kompensation [Hoffmann K., 1987]

Den Einfluss der Temperatur auf das Kriechen zeigt folgende Abbildung 6-21. Es sind die Kriechkurven eines Probekörpers zu sehen, der bei Raumtemperatur, bei 60 °C und bei 100 °C jeweils 24 Stunden lang belastet und danach 24 Stunden lang entlastet wurde. Während bei Raumtemperatur die Anpassung besser als 0,05 % vom Sollwert ist, erreicht der positive Fehler bei 60 °C nach einer elastischen Nachwirkung etwa 0,2 % in den ersten 24 Stunden. Bei 100 °C kommt es zu einem nichtreversiblen Fließen des DMS und des Klebstoffs, wie an dem positiven Anstieg des Signals in den ersten Stunden zu sehen ist, das zu einem bleibenden Nullpunktversatz nach der Entlastung führt. Es können demnach nur in einem begrenztem Zeit-/Temperatur-/Genauigkeitsbereich Kriechkompensationen durchgeführt werden [Hoffmann K., 1987].

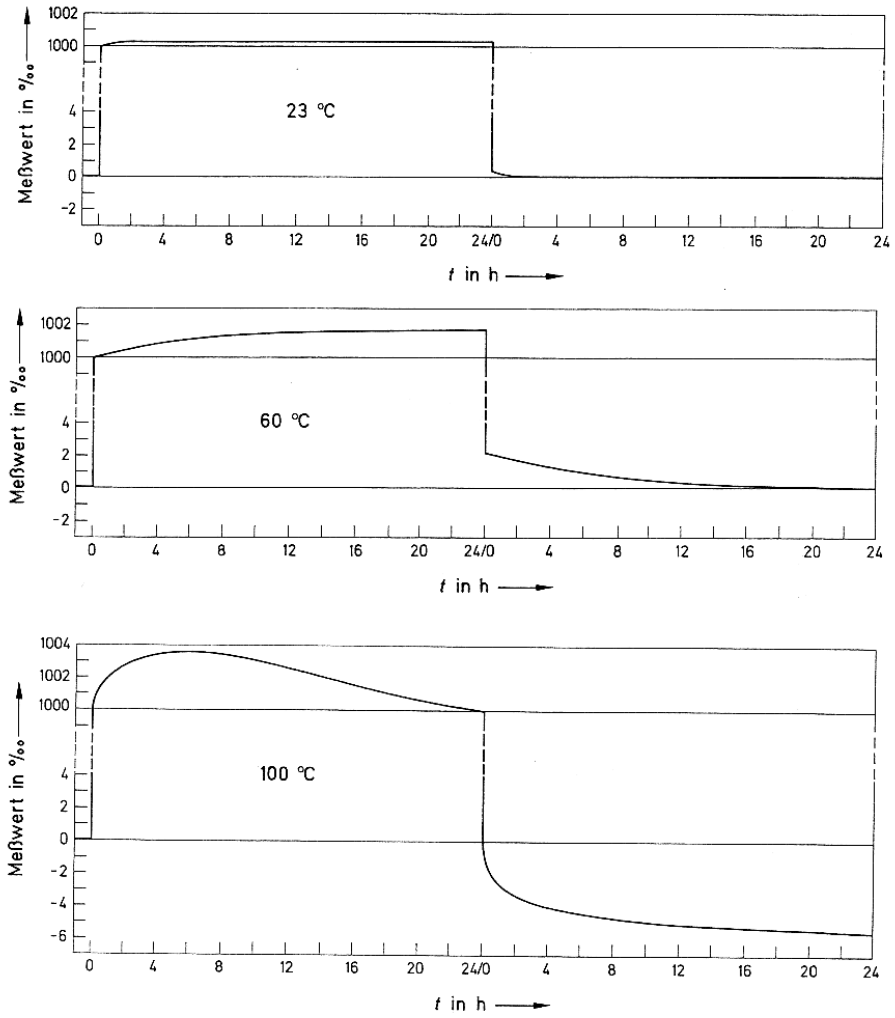


Abbildung 6-21: Zeit- und temperaturabhängiges Kriechen eines mit DMS versehenen Messobjektes [Hoffmann K., 1987]

6.2.4 Messgrößenerfassung mit Dehnungsmessstreifen

Wie bereits oben erwähnt wird, wird bei einer Gestaltänderung des Messobjektes dem Dehnungsmessstreifen die Verzerrung aufgezwungen, die dieser in eine Widerstandsänderung umformt. Aus dieser Widerstandsänderung erhält man mit Hilfe einer Brückenschaltung eine Spannungs- und Stromänderung. Diese elektrische Größe ist jedoch meist noch nicht für eine Messwertausgabe (Anzeige, Registrierung) geeignet. Erst durch eine Messwertverstärkung eignet sie sich zur Ausgabe oder Weiterverarbeitung.

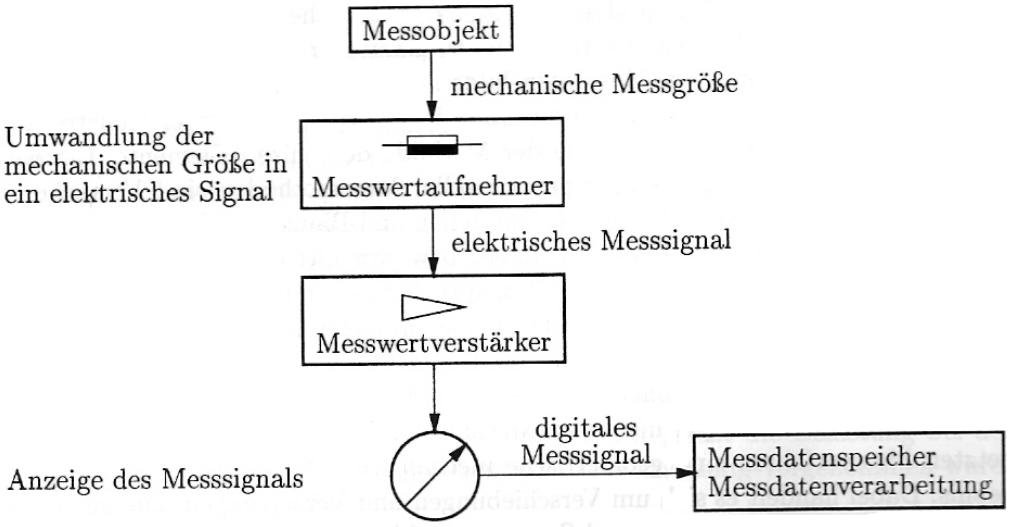


Abbildung 6-22: Schematischer Aufbau einer Messeinrichtung [Mang H., 2000]

Der DMS formt demnach eine nichtelektrische Größe in eine elektrische um. Bei der Energie-Umformung durch einen DMS handelt es sich um eine passive Umwandlung, bei der nicht eine elektrische Größe erzeugt (aktive Umwandlung), sondern beeinflusst wird. Durch die für den Betrieb eines DMS benötigte Hilfsenergie (externe Spannungsquelle) ist bereits eine elektrische Größe vorhanden, die durch die Widerstandsänderung beeinflusst wird.

Die Brückenschaltung, mit deren Hilfe die genaue Messung elektrischer Widerstände möglich ist, ist unter dem Namen „Wheatstone'sche[11] Brückenschaltung" bekannt. Sie kann zur Bestimmung des Absolutwertes eines Widerstandes durch Vergleich mit einem Widerstand bekannter Größe, oder, wie in der DMS-Technik, zur Bestimmung relativer Widerstandsänderungen verwendet werden.

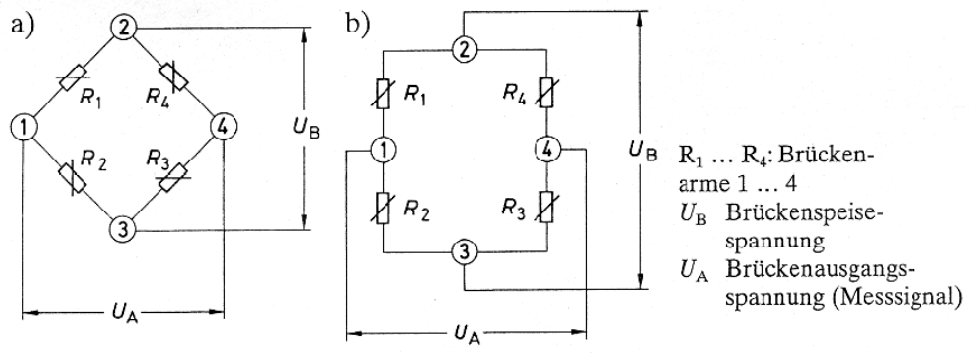


Abbildung 6-23: Wheatstone'sche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellungsweise [Hoffmann K., 1987]

11 Sir Charles Wheatstone (1802 – 1875), englischer Naturwissenschaftler, erkannte 1843 die Bedeutung der von Samuel Hunter Christie erfundenen Brückenschaltung für die exakte Messung elektrischer Widerstände und setzte sich für ihre Verbreitung ein, weshalb sie auch als Wheatstone-Brücke bekannt wurde

Abbildung 6-23 zeigt zwei verschiedene, jedoch elektrisch identische Darstellungen der Wheatstone'schen Brückenschaltung. Die vier Arme (oder Zweige) der Brückenschaltung werden durch die Widerstände R_1 bis R_4 gebildet. Die Brückeneckpunkte 2 und 3 bezeichnen die Anschlüsse für die Brückenspeisespannung U_B, an den Eckpunkten 1 und 4 steht die Brückenausgangsspannung U_A an, das Messsignal. Die Brückeneinspeisung erfolgt überwiegend mit einer eingeprägten Gleich- oder Wechselspannung.

Der Nachteil des Gleichspannungsverfahrens ist, dass Störeinstreuungen durch elektrische oder magnetische Felder sowie im Messkreis entstehende Thermospannungen und galvanische Spannungen voll verstärkt werden und als Fehler in das Messergebnis eingehen. Elektrische oder magnetische Abschirmungen sind daher erforderlich, um die Störeinstreuungen möglichst gering zu halten. Indem man die Speisespannung umpolt, kann man die Thermospannungen erkennen und rechnerisch korrigieren.

Beim Trägerfrequenzverfahren ist der Verstärker so ausgelegt, dass er nur relativ schmale Seitenbänder neben der Frequenz der Speisespannung verstärkt und andere darunter oder darüber befindliche Frequenzen nicht annimmt. Dadurch werden alle störenden Gleichspannungsanteile am Messsignal (z.B. Thermospannungen, die sich im Messkreis bilden) völlig ausgeschieden.

Wirkungsweise der Wheatstone'schen Brückenschaltung

Wird an die beiden Brückenspeisepunkte 2 und 3 eine Brückenspeisespannung U_B angelegt, so teilt sich diese in den beiden Brückenhälften R_1:R_2 und R_4:R_3 jeweils im Verhältnis der Brückenwiderstände auf. Jede Brückenhälfte bildet demnach einen Spannungsteiler.

Mit Hilfe des Ohm'schen Gesetzes und der Kirchhoff'schen[12] Gesetze erhält man

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \tag{39}$$

Für die beiden Sonderfälle $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ und $R_1/R_2 = R_4/R_3$ ergibt sich eine abgeglichene Brückenschaltung. Sie ist durch $U_A/U_B = 0$ gekennzeichnet.

Bei der Arbeit mit DMS wird dieser abgeglichene Zustand praktisch kaum erreicht. Aus diesem Grund enthalten speziell für das Messen mit DMS ausgelegte Geräte Ausgleichsschaltungen, mit welchen die Anzeige im Ausgangszustand genullt werden kann.

Ändern sich die Widerstände R_1 bis R_4, etwa im Zuge einer Verzerrungsmessung, so wird die Brücke verstimmt und am Ausgang erscheint die Spannung U_A. Unter der in der Regel zutreffenden Voraussetzung gleich großer Nennwiderstände $R_i = R$ und sehr kleiner Widerstandsänderungen $\Delta R_i \ll R_i$ erhält man die Beziehung

$$\frac{U_A}{U_B} \approx \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R} - \frac{\Delta R_2}{R} + \frac{\Delta R_3}{R} - \frac{\Delta R_4}{R}\right) \tag{40}$$

Mit Gleichung (34) erhält man weiter

12 Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887), deutscher Physiker, hatte sich insbesondere um die Erforschung der Elektrizität verdient gemacht. 1845 fand er die Gesetze der Stromverzweigung

$$\frac{U_A}{U_B} \approx \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \tag{41}$$

Die Widerstandsänderungen bzw. die sie verursachenden Dehnungen haben demnach mit unterschiedlichem Vorzeichen an der Brückenverstimmung und damit am Messsignal Anteil. Somit ergibt sich am Messgerät eine positive Anzeige, wenn $\varepsilon_1 > \varepsilon_2$ und/oder $\varepsilon_3 > \varepsilon_4$, bzw. eine negative Anzeige, wenn $\varepsilon_1 < \varepsilon_2$ und/oder $\varepsilon_3 < \varepsilon_4$. Die Änderungsbeträge der in der Schaltung benachbart liegenden DMS subtrahieren sich, wenn sie gleiches Vorzeichen haben; sie addieren sich, wenn die Vorzeichen verschieden sind.

Entsprechend den Erfordernissen des jeweiligen Messproblems können ein oder mehrere miteinander verschaltete DMS an der Messstelle und eine entsprechende Anzahl an ergänzenden Festwiderständen (*R = konst*) verwendet werden. Abhängig von der Zahl der aktiven Widerstände (DMS) werden derartige Messanordnungen als Viertel-, Halb- oder Vollbrücke bezeichnet (Abbildung 6-24).

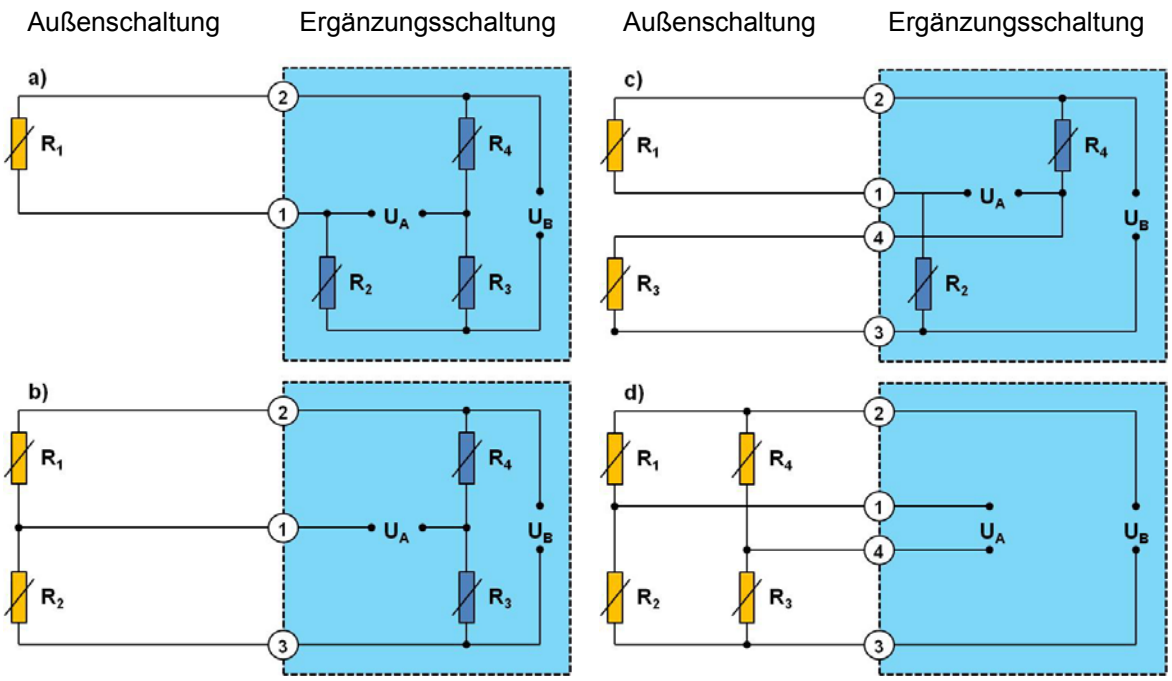


Abbildung 6-24: Anwendungsformen der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der DMS-Technik: a) Viertelbrücke, b) Halbbrücke, c) Zweiviertel- oder Diagonalbrücke, d) Vollbrücke [Hoffmann K., 1987]

6.2.5 Kalibrieren der Messeinrichtung

Wird an den Verstärker eine aus einem oder auch aus mehreren DMS gebildete Brückenschaltung angeschlossen, so wird infolge unvermeidlicher, geringfügiger Widerstandsunterschiede der Brückenarme bereits eine Brückenverstimmung vorliegen. Der Verstärker erhält dadurch bereits eine Brückenausgangsspannung zugeführt, obwohl noch gar nicht die Messgröße (Dehnung, Drehmoment, …) einwirkt. Dieses Signal wird „Tarasignal" oder „Nullsignal" genannt. Das Tarasignal kann mit Hilfe einer Abgleicheinrichtung, Nullpunkts-, Betrags- oder R-Abgleich genannt, beseitigt werden.

In der DMS-Technik ist eine direkte Art der Kalibrierung nicht möglich, da sich eine Dehnung als Referenzwert für die Bestimmung des Kalibrierfaktors nur sehr schwer erzeugen lässt. Stattdessen finden andere Verfahren Anwendung:

- Kalibrieren mit einem vom Messverstärker gelieferten Signal,
- Kalibrieren mit einem Kalibriergerät,
- Direkte Nebenschlusskalibrierung (Shunt-Kalibrierung)

Verstärkereigenes Kalibriersignal

Einige Messverstärker enthalten Einrichtungen, mit denen ein definiertes Signal in den Messkreis eingespeist werden kann. Der Betrag des Kalibriersignals kann entweder im Dehnungsmaß µm/m oder in Brückenverstimmung mV/V angegeben sein. Da die Einspeisung erst am Verstärkereingang erfolgt, bezieht sich der gewonnene Kalibrierfaktor nicht auf die gesamte Messkette, sondern nur auf den Verstärkerteil ohne DMS und Zuleitungen.

Kalibriergerät

Um bei der Kalibrierung den Einfluss der Zuleitungen von der Messstelle zur Brücke zu erfassen, den die erste Kalibrierart unberücksichtigt lässt, kann man anstelle des DMS ein im Handel erhältliches Kalibriergerät in die Messkette einfügen. Derartige Geräte simulieren Dehnungsänderungen durch Widerstandsänderungen. Sie sind auf Standard-Widerstandswerte (z.B. 120 Ω) festgelegt und erlauben die Vorgabe einzelner Stufen durch einfaches Umschalten. Eine Messreihe, bei der zu vorgewählten Widerstandsänderungen die zugehörigen Verstärkerausgangsspannungen registriert werden, liefert hier die Basis zur Bestimmung des Kalibrierfaktors, beispielsweise mittels linearer Regression. Dieser ist eventuell noch zu korrigieren, wenn nämlich der k-Faktor des DMS nicht mit dem des Kalibriergerätes von $k = 2$ übereinstimmt. Nach der Kalibrierung wird das Gerät aus der Messkette entfernt und der DMS angeschlossen [Eberle K., 2010].

Shunt-Kalibrierung

Auch diese Kalibrierung arbeitet mit Widerstandsänderungen zur Simulation von Dehnungen. Sie erfolgt aber direkt am DMS durch Parallelschaltung eines genau bekannten Nebenschluss-Widerstandes (Shunts) R_P.

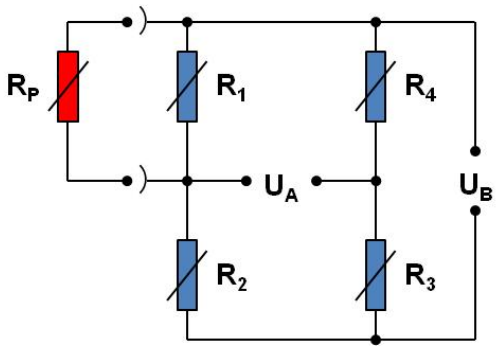


Abbildung 6-25: Prinzip der Shunt-Kalibrierung

Bei der Viertelbrückenschaltung sind $\Delta R_2/R_2 = \Delta R_3/R_3 = \Delta R_4/R_4 = 0$. Aus Gleichung (40) folgt somit

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4}\frac{\Delta R_1}{R} = \frac{1}{4} k\,\varepsilon \tag{42}$$

Ferner gilt

$$R_P \parallel R_1 \rightarrow R_r \tag{43}$$

$$R_r = \frac{R_1 \cdot R_P}{R_1 + R_P} \tag{44}$$

$$\Delta R_1 = R_r - R_1 \tag{45}$$

Die Parallelschaltung des Shunts R_P zum DMS-Widerstand R_1 ergibt einen resultierenden Widerstand R_r, und daraus berechnet sich eine Widerstandänderung von ΔR_1. Diese erzeugt einen Messwert U_{Ap} am Verstärkerausgang und entspricht einer Stauchung ε_P. Aus dem mittels ΔR_1 simulierten Wert ε_P und der gemessenen Ausgangsspannung U_{Ap} berechnet sich dann der Kalibrierfaktor *KF*, der nur für die bei der Kalibrierung eingestellte Speisespannung U_B gilt:

$$\varepsilon_P = \frac{1}{k} \cdot \frac{\Delta R_1}{R_1} = \frac{1}{k} \cdot \frac{-R_1}{R_1 + R_P} \tag{46}$$

$$KF = \frac{\varepsilon_P}{U_{Ap}} \tag{47}$$

6.2.6 Kompensation von Störeffekten

Störeinflüsse sind u.a. Temperatur, Feuchtigkeit, hydrostatischer Druck, Vakuum, Magnetfelder und Kernstrahlung (vergl. Abbildung 6-26). Die DMS sollten so weit als möglich gegen die Störeinflüsse abgeschirmt werden. Verbleibende Störeffekte müssen durch Kompensation beseitigt werden.

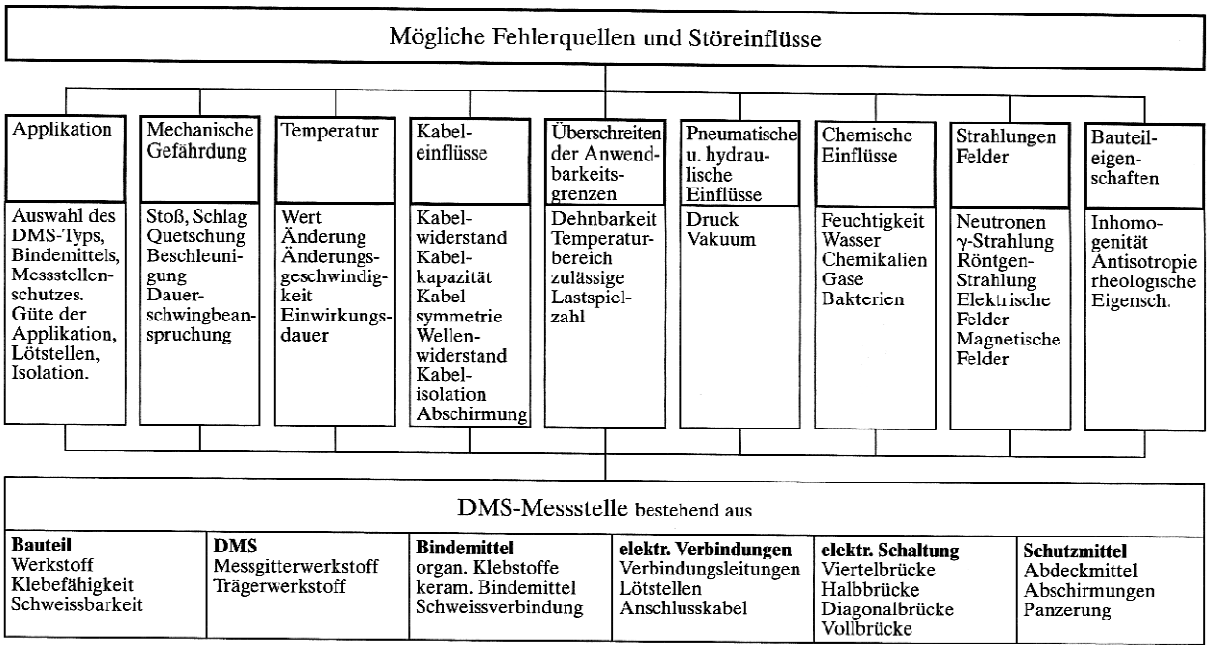


Abbildung 6-26: Mögliche Fehlerquellen und Störeinflüsse auf eine DMS-Messstelle [Hoffmann K., 1987]

Widerstandsänderungen, die in benachbarten Brückenarmen mit gleichem Vorzeichen auftreten, subtrahieren sich in ihrer Wirkung auf das Brückenausgangssignal. Wenn es durch geschickte Anordnung der DMS am Messobjekt gelingt, dass die in der Schaltung benachbart liegenden DMS in gleicher Weise von der Störung betroffen werden, dann hebt sich ihre Wirksamkeit auf. Die Kompensation gelingt nur in dem Maße, in dem die Übereinstimmung erzielt wird [Hoffmann K., 1973].

Temperaturgangkompensation

Ein Temperaturgang kann, wie schon im Kapitel 6.2.3 erwähnt, nur entstehen, wenn sich die Temperatur am Messobjekt, an den Verbindungskabeln und/oder an der übrigen Messeinrichtung während einer Messung ändert. Das Messsignal setzt sich dann aus zwei Anteilen zusammen, dem erwünschten aus der mechanischen Beanspruchung ε_M und dem unerwünschten aus der Wärmedehnung ε_W:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \cdot (\varepsilon_M + \varepsilon_W) \tag{48}$$

Installiert man eine Vollbrücke, so erfahren alle vier DMS die gleiche thermische Ausdehnung, vorausgesetzt, dass jeder DMS der gleichen Temperaturänderung unterliegt. Mit Gleichung (37) erhält man somit:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4}[(\varepsilon_M + \varepsilon_W)_1 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_2 + (\varepsilon_M + \varepsilon_W)_3 - (-\varepsilon_M + \varepsilon_W)_4] = \frac{k}{4} \cdot 4\varepsilon_M \tag{49}$$

Die Störgröße ε_W ist verschwunden.

Auf die gleiche Weise gelingt die Kompensation mit der Halbbrückenschaltung.

Um auch bei einer Viertelbrückenschaltung Störgrößen eliminieren zu können, wird diese mit Hilfe eines „Kompensations-DMS“ zu einer Halbbrücke ergänzt. Dafür muss der Kompensations-DMS die gleichen physikalischen Eigenschaften wie der „aktive“ DMS aufweisen, muss so appliziert werden, dass er von der gleichen Störgröße betroffen ist und darf außer der Störgröße keine anderen Beeinflussungen erleiden. In vielen Fällen findet sich jedoch am Messobjekt keine Stelle, die diesen Forderungen genügt. Man kann sich dadurch helfen, indem man den Kompensations-DMS an ein Stück des gleichen Materials wie das des Messobjekts klebt und in nächster Nähe des aktiven DMS unterbringt. Damit soll erreicht werden, dass die Kompensationsstelle zwar von der Störgröße, infolge der fehlenden kraftschlüssigen Verbindung, aber nicht von der Messgröße betroffen ist.

Kompensation von Leitungsfehlern

In Schaltbildern werden die Verbindungen zwischen den einzelnen Schaltungselementen als widerstandsfrei angesehen. In der Realität ist diese Betrachtungsweise nur bedingt zulässig, nämlich nur dann, wenn die Kabel kurz und ihr Widerstand um wenigstens zwei oder drei Größenordnungen kleiner ist als der des DMS bzw. der Brückenschaltung und deshalb vernachlässigt werden kann. Die Voraussetzung trifft bei langen Kabelverbindungen jedoch nicht mehr zu. Bei Verwendung dünner Kabeladern oder von Leitungen aus Werkstoffen mit hohem spezifischem Widerstand können schon ziemlich kurze Kabelstrecken zu beachtlichen Messfehlern führen. Maßgeblich ist nicht die Länge des Kabels, sondern dessen Widerstand [Hoffmann K., 1987].

Wenn man die verschiedenen Schaltungsmöglichkeiten (Abbildung 6-24) betrachtet, erkennt man: Die ins Gewicht fallenden Kabel liegen bei der Vollbrückenschaltung außerhalb der Brückenschaltung, bei den übrigen Schaltungen innerhalb der (durch die geräteseitigen Widerstände ergänzten) Brückenschaltung.

In dieser Arbeit wird nur auf die rechnerische Korrektur bei der Viertelbrückenschaltung eingegangen. Für die Fehlerkorrektur bei einer anderen Schaltung wird auf [Hoffmann K., 1987] verwiesen.

Bei der Viertelbrückenschaltung bildet der DMS zusammen mit den Anschlussleitungen den Brückenarm 1. Die Festwiderstände R_2, R_3 und R_4 vervollständigen die Brückenschaltung. Wie in der Abbildung 6-27 zu sehen ist, setzt sich der Widerstand des Brückenarms 1 aus dem DMS-Widerstand R_{DMS} und den Widerständen der Hinleitung $R_{K1.1}$ und der Rückleitung $R_{K1.2}$ zusammen.

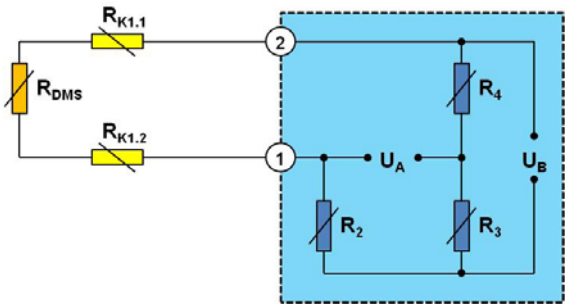


Abbildung 6-27: Einfluss der Kabelwiderstände bei der Viertelbrückenschaltung

Bei der Dehnungsmessung mit DMS geht man zunächst davon aus, dass die Brückenverstimmung ein Maß für die Dehnung ist:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R}{R}\right)_{DMS} \tag{50}$$

Die relative Widerstandsänderung des DMS ist der verursachenden Dehnung proportional:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{DMS}} = \varepsilon \cdot k \tag{51}$$

Die Brückenschaltung misst jedoch die Widerstandsänderung ΔR des DMS relativ zum Gesamtwiderstand des Brückenarms 1 und damit eine kleinere relative Widerstandsänderung, weshalb das Messsignal zu klein wird:

$$\frac{\Delta R_{DMS}}{R_{K1.1} + R_{DMS} + R_{K1.2}} < \varepsilon \cdot k \tag{52}$$

Mit Hilfe des Diagramms in Abbildung 6-28 lässt sich leicht das falsche Ergebnis nach folgender Beziehung korrigieren:

$$\varepsilon = \varepsilon_a \frac{100\%}{Restanzeige\%} \tag{53}$$

mit

ε dem richtigen Messwert

ε_a dem angezeigten falschen Messwert

R_k dem gesamten innerhalb des Brückenarms mit dem DMS in Serie liegenden Leitungswiderstand

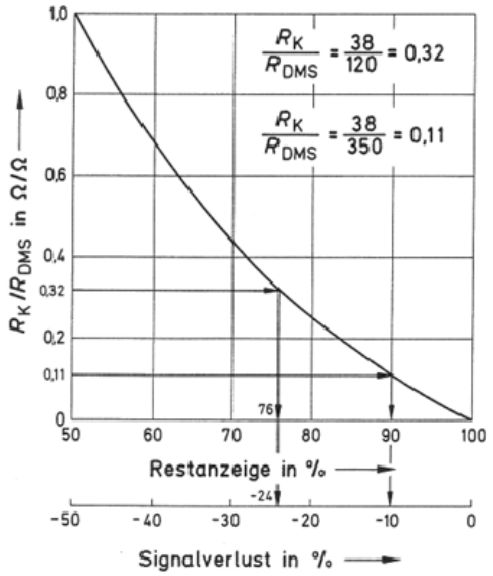


Abbildung 6-28: Diagramm zur Ermittlung der Restanzeige bzw. des Signalverlustes infolge von Leitungswiderständen [Hoffmann K., 1987]

Sollte die Justiermöglichkeit des Messverstärkers zum Nullpunktabgleich nicht mehr ausreichen, weil der Gesamtwiderstand des Brückenarms 1 zu groß ist, muss der Ergänzungswiderstand R_2 angepasst werden, indem er auf den Gesamtwiderstand R_1 erhöht wird.

6.2.7 Applikation von Dehnungsmessstreifen

Dieses Kapitel soll nur einen allgemeinen Einblick in die Thematik der Applikation von Dehnungsmessstreifen geben. Für die genaue Vorgehensweise einer Applikation auf einen Asphaltprobekörper wird auf die Arbeitsanweisung [AA542, 2010] verwiesen. Bezüglich der Anwendung der verschiedenen Befestigungsmittel sei auf die jeweilige Gebrauchsanleitung verwiesen.

Es bedarf zwischen dem DMS und dem Messobjekt einer innigen Verbindung, damit die zu messenden Dehnungen einwandfrei und verlustlos auf ihn übertragen werden. Die geforderte innige flächenhafte Verbindung wird am besten durch spezielle Klebstoffe erfüllt. Andere Bindemittel und –methoden sind meist auf Sondergebiete beschränkt, wie z.B. das Punktschweißen bei Anwendungen im Stahlbau.

Die Auswahl eines Befestigungsmittels hängt zum einen von den Arbeitsbedingungen am Applikationsort und zum anderen von den unterschiedlichen Anforderungen an das Leistungsvermögen des Bindemittels, vor allem hinsichtlich der Gebrauchstemperatur, ab. Hinsichtlich der Anwendungstechnik unterscheidet man kalthärtende und heißhärtende Klebstoffe sowie das Punktschweißen. Das bevorzugte Anwendungsgebiet der kalthärtenden Klebstoffe ist aufgrund ihrer leichten Anwendung die experimentelle Spannungsanalyse. Heißhärtende Klebstoffe sind nur dort anwendbar, wo das Messobjekt auf die geforderte Härtungstemperatur gebracht werden kann. Sie bieten dadurch aber einen größeren Anwendungsbe-

reich in Richtung höherer Temperaturen als die kalthärtenden Kleber. Das Punktscheißverfahren setzt einen schweißbaren Werkstoff voraus. Weiters werden dafür Spezial-DMS benötigt, die nur in geringer Typenzahl angeboten werden, weshalb das Punktschweißen eher selten zur Anwendung kommt.

Bei den Klebstoffen muss besonders Acht gegeben werden, dass die Dehnung des Messobjekts korrekt auf den DMS übertragen wird. Infolge der Elastizität der Klebstoffe stellt sich nämlich eine Verzerrung der Kleberschicht ein, die an den äußeren Rändern, in Dehnungsrichtung gesehen, am größten ist und zur Mitte hin abnimmt. Dies hat zur Folge, dass bei dicken Schichten aus weichen Klebstoffen die Dehnung auf der dem DMS zugewandten Seite kleiner ist als auf der mit dem Messobjekt in Kontakt stehenden Seite (Abbildung 6-29). Bei dünnen Klebstoffschichten aus harten Klebern wird diese Verzerrung vernachlässigbar klein.

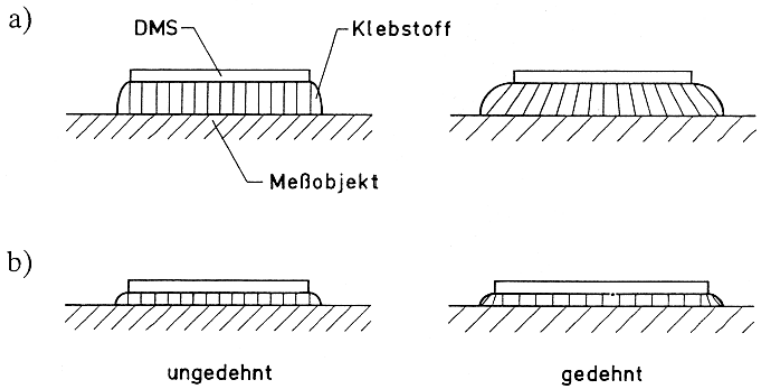


Abbildung 6-29: Dehnungsübertragung vom Bauteil auf den DMS durch den Klebstoff: a) ungeeigneter (zu weicher) Klebstoff und zu dicke Schicht, b) geeigneter Klebstoff in dünner Schicht [Hoffmann K., 1987]

Dehnungsmessstreifen lassen sich an nahezu allen festen Werkstoffen befestigen. Voraussetzung dafür ist eine geeignete und sorgfältige Vorbereitung der Applikationsstelle. Dies ist von Bindemittel zu Bindemittel verschieden und auch vom Material des jeweiligen Messobjekts abhängig. Das Reinigen der späteren Klebefläche ist jedoch immer unerlässlich. Jede offene Fläche muss prinzipiell als verunreinigt angesehen werden, auch dann, wenn sie dem Auge rein erscheint. Ablagerungen von Staub, Oxydation, Absorption von Feuchtigkeit, Dämpfen und Gasen erfolgen ständig und verunreinigen die Fläche stets wieder aufs Neue, wodurch die Bindefähigkeit mit den Klebstoffen gemindert wird [Hoffmann K., 1979]. Deshalb soll die Klebung so bald wie möglich nach der Reinigung der Klebstelle erfolgen. Zur Grobreinigung stark verschmutzter Teile eignen sich mechanische Reinigungsverfahren und handelsübliche Haushalts-Reinigungsmittel. Zur Feinreinigung dienen vorzugsweise organische Lösungsmittel, wie z.B. Aceton.

Bei der Befestigung der Anschlusskabel an den DMS gibt es mehrere Methoden. Zum einen gibt es Klemmverbindungen, die aber aufgrund veränderlicher Übergangswiderstände Nullpunktwanderungen auslösen, zum anderen Steckverbindungen, die jedoch noch kritischer sind. Die beste und überwiegend angewandte Art der elektrischen Verbindung zwischen DMS und Messleitung (Messkabel) ist das Löten. Nachdem mittlerweile DMS mit bereits angelöteten Anschlusskabeln angeboten werden, wird hier nicht näher auf die Löttechnik eingegangen und auf z.B. [Hoffmann K., 1979] verwiesen.

Nach einer erfolgreichen Applikation müssen DMS-Stellen noch gegen mechanische und chemische Einwirkungen geschützt werden. Leichte Beeinträchtigungen der Messstelle, z.B. durch Einwanderung von Feuchtigkeit infolge Diffusion, wirken sich in erster Linie in Veränderungen des Nullpunktes aus. Schwere Beeinträchtigungen der Messstelle entstehen durch Diffusion von ätzenden oder leitenden Stoffen sowie durch Korrosion. Korrosion wird besonders bei Anwendung einer Gleichspannungsspeisung gefördert. Dabei können sich galvanische Elemente ausbilden, deren Spannung sich dem Messsignal überlagert und so große Messfehler verursacht [Hoffmann K., 1979]. Ebenso unterschiedlich wie die Einwirkungen auf die Messstelle sind die verschiedenen Schutzabdeckungen. Bei der Auswahl der Schutzstoffe ist zu beachten:

- die Umgebungstemperatur
- die Dauer der Messung bzw. die geforderte Lebensdauer der Messstelle
- die geforderte Messgenauigkeit
- das Messobjekt darf nicht in unzulässiger Weise versteift werden
- der mit der Messstelle einschließlich dem Anschlusskabel in Kontakt kommende Stoff muss sehr hohen Isolationswiderstand besitzen und darf keine chemischen Reaktionen oder Korrosion auslösen

7. PRÜFPROGRAMM/LABORPRÜFUNGEN

7.1 Materialbeschreibung

7.1.1 Gestein

Bei dem für diese Arbeit verwendeten Gestein handelt es sich um Porphyrit vom „Hartsteinwerk Loja“ in A-3680 Persenbeug. Seine Eigenschaften gemäß EN 13043 bzw. ÖN B3130 sind in folgender Tabelle dargestellt. Die Werte stammen aus der EU-Konformitätserklärung des Herstellers gemäß EN 13043, ZA.1a+1b und ZA.2.2.

Tabelle 7-1: Übersicht über die Gesteinseigenschaften von Loja gemäß ÖNORM B3130 und EN 13043

Eigenschaft	Anmerkungen	Prüfverfahren	**EBK 0/2**	**EBK 2/4**	**EBK 4/8**	**EBK 8/11**
Korngruppen	---	---				
Korngrößenverteilung	---	EN 933-1	G_F85, $G_{TC}20$	G_C 90/15	G_C 90/15	G_C 90/15
Gehalt an Feinanteilen	< 0,063	EN 933-1	f_{10}	f_1	f_1	f_1
Reinheit Qualität der Feinanteile	---	EN 933-9	MB_F NPD	MB_F NPD	MB_F NPD	MB_F NPD
Kornform	> 2 mm	EN 933-4	---	SI_{15}	SI_{15}	SI_{15}
Anteil gebrochen. Körner	---	EN 933-5	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$	$C_{100/0}$
Kantigkeit D < 2 mm		EN 933-6	$E_{CS}35$	---	---	---
Widerstand gegen Zertrümmerung	LA 8/11	EN 1097-2, Abschn. 5	LA_{20}	LA_{20}	LA_{20}	LA_{20}
Widerstand gegen Polieren	PSV 8/11	EN 1097-8	PSV_{50}	PSV_{50}	PSV_{50}	PSV_{50}
Widerstand gegen Oberflächenabrieb	AAV bei Deckschichten	EN 1097-8 Anhang A	AAV NPD	AAV NPD	AAV NPD	AAV NPD
Widerstand gegen Verschleiß	---	EN 1097-1	M_{DE} NPD	M_{DE} NPD	M_{DE} NPD	M_{DE} NPD
Widerstand gegen Abrieb durch Spikereifen	bei Deckschichten	EN 1097-8 Anhang A	A_N NPD	A_N NPD	A_N NPD	A_N NPD
Rohdichte	ofentrocken ρ_{rd} [Mg/m^3]	EN 1097-6	2,81-2,87	2,81-2,87	2,81-2,87	2,81-2,87
Wasseraufnahme	---	EN 1097-6	$WA_{24}1$	$WA_{24}1$	$WA_{24}1$	$WA_{24}1$
Frostwiderstand	falls erforderl.	EN 1367-1	F_1	F_1	F_1	F_1
Widerstand gegen Hitzebeanspruchtt	---	EN 1367-5	NPD	NPD	NPD	NPD
Affinität zu bit. Bindemittel Wasserlagerung bei 40 °C	Anzahl Steine	EN 12697-11 Punkt B	≤ 1	≤ 1	≤ 1	≤ 1
	Bedeckung in %		≥ 80	≥ 80	≥ 80	≥ 80
Sonnenbrand von Basalt	nur bei Verdacht	EN 1367-3 EN 1097-2	kein Basalt	kein Basalt	kein Basalt	kein Basalt
Chem. Zusammensetzung	---	EN 932-3	NPD	NPD	NPD	NPD
Grobe org. Verunreinigung	D > 2 mm	EN 1744-1 Abs. 14.2	M_{LPC} NPD	M_{LPC} NPD	M_{LPC} NPD	M_{LPC} NPD

In allen in dieser Arbeit untersuchten Asphaltmischguttypen wurde Kalksteinmehl als Fremdfüller verwendet. Dieser Fremdfüller (Korndurchmesser muss gemäß EN 13043 kleiner als 0,063 mm sein) stammt von der „Wopfinger Baustoffindustrie GmbH“ aus A-2754 Waldegg/Wopfing. Kalksteinmehl ist feingemahlener Rohkalkstein (chemische Formel: $CaCO3$), der durch gezielte Produktionsabläufe aus besonderen Kalksteinqualitäten hergestellt wird. Kalksteinmehl wird aus gewaschenem, gemahlenem und feuergetrocknetem Kalkstein, der weniger als 0,1 % Feuchte beinhaltet, hergestellt. Verwendet wurde ein Kalksteinfüller mit einer Kornverteilung, bei der 80 % feiner als 0,09 mm sind.

7.1.2 Bitumen

Als Bindemittel wurde in dieser Arbeit das polymermodifizierte Bitumen PmB 25/55-65 gemäß ÖNORM EN 14023 eingesetzt. Die wichtigsten Eigenschaften und Kennwerte sind in folgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 7-2: Übersicht über die Bitumenkennwerte von PmB 25/55-65

Eigenschaft	Prüfverfahren	**PmB 25/55-65**
Penetration PEN [0,1 mm]	EN 1426	46,0
Ring & Kugel [°C]	EN 1427	73,0
Brechpunkt nach Fraaß [°C]	EN 12593	max. -10
Duktilität 13 °C [cm] [a)]	ÖNORM C 9218	min. 30
Elastische Rückstellung 25 °C [% relativ] [a)]	EN 13398	min. 50
BBR m-Wert (-18 °C) A-Alterung [-]	EN 14771	0,320
BBR S-Wert (-18 °C) A-Alterung [MPa]	EN 14771	65
BBR m-Wert (-18 °C) C-Alterung [-]	EN 14771	0,243
BBR S-Wert (-18 °C) C-Alterung [MPa]	EN 14771	264
DSR dynam. Schermodul G* (+64 °C) A-Alterung [Pa]	EN 14770	8290
DSR Phasenwinkel δ (+64 °C) A-Alterung [°]	EN 14770	63,2
G*/sin(δ) (+64 °C) A-Alterung [Pa]	EN 14770	9290
RV (+135 °C) A-Alterung [MPas]	EN 13302	1629
PG exakt [°C]	SHRP	> 82-19
Δ PG [°C]	SHRP	> 101

[a)] Werte stammen aus den Lieferspezifikationen der OMV Aktiengesellschaft

7.1.3 Asphaltmischguttyp und Sieblinie

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Asphaltmischgut handelt es sich um *AC 11 deck PmB 25/55-65, A2, G1 (Loja)*, das gemäß der ÖNORM B 3580-1 zusammengesetzt wurde. Dabei wurde sowohl der Hohlraumgehalt als auch der Bindemittelgehalt variiert. Tabelle 7-3 gibt einen Überblick über die unterschiedlichen geprüften Asphaltmischungen.

Tabelle 7-3: Übersicht über die Variation des Asphaltmischgutes

AC 11 deck PmB 25/55-65, A2, G1 (Loja)							
Bindemittelgehalt	[M-%]	-	4,8	5,3	5,8	5,3	5,3
Hohlraumgehalt	[V-%]	EN 12697-8	3,0	3,0	3,0	5,0	8,0
Rohdichte ρ_R	[g/cm^3]	EN 12697-5	2,564	2,542	2,534	2,552	2,552
Raumdichte ρ_{SSD}	[g/cm^3]	EN 12697-5	2,508	2,454	2,458	2,426	2,340

Die Sieblinie wurde jeweils aus Lieferkörnungen der Korngruppen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/11 zusammengesetzt. Während des längeren Zeitraumes, in dem die Probekörper hergestellt wurden, kam es zu mehreren neuen Liefereingängen der verschiedenen Korngruppen. Nachdem es immer leichte Schwankungen der Sieblinie zwischen den unterschiedlich gelieferten Korngruppen gibt, erhält jede neu eingelangte Korngruppe einen eigenen Laborcode. Die Tabelle 7-4 listet genau nach den jeweiligen Laborcodes auf, welcher Probeköper aus welchen Korngruppen zusammengemischt wurde. Die schwankenden Sieblinien der Korngruppen haben auch jeweils eine leichte Änderung der Gesamtsieblinie des Asphaltmischgutes zur Folge. Eine Zuordnung der einzelnen Probekörper zu gleichen Gesamtsieblinien findet sich ebenfalls in der Tabelle 7-4.

Tabelle 7-4: Überblick über die einzelnen Probekörper und ihrer Zuteilung der verschiedenen Korngruppen mit den jeweiligen Laborcodes (weiß) sowie einer Zuteilung der dadurch unterschiedlichen Gesamtsieblinien (färbig)

	Laborcode					
	PK	**Füller**	**0/2**	**2/4**	**4/8**	**8/11**
1	T370	F019	G406	G333	G366	G335
2	T371	F019	G406	G333	G407	G335
	T372	F019	G406	G333	G407	G335
3	T373	F019	G406	G333	G407	G408
	T374	F019	G406	G333	G407	G408
	T375	F019	G406	G333	G407	G408
	T378	F019	G406	G333	G407	G408
	T379	F021	G406	G333	G407	G408
	T380	F021	G406	G333	G407	G408
	T381	F021	G406	G333	G407	G408
	T382	F021	G406	G333	G407	G408
	T383	F021	G406	G333	G407	G408
4	T390	F021	G468	G469	G407	G408
	T391	F021	G468	G469	G407	G408
	T392	F019	G468	G469	G407	G408
	T393	F019	G468	G469	G407	G408
	T394	F019	G468	G469	G407	G408

Eine Gegenüberstellung der unterschiedlichen Gesamtsieblinien ist in der Tabelle 7-5 und in der Abbildung 7-1. Es ist erkennbar, dass alle Gesamtsieblinien nicht nur nahe beieinander liegen, sondern auch alle innerhalb der Grenzen nach der ÖNORM B 3580-1 liegen.

Tabelle 7-5: Tabellarische Gegenüberstellung der verschiedenen Sieblinien

	Sieblinien [M-%]					
Korngröße	SOLL		IST			
[mm]	min	max	1	2	3	4
< 0,063	6,00	10,00	9,29	9,22	9,19	9,02
< 0,125			11,98	11,91	11,89	11,88
< 0,25			14,49	14,41	14,39	14,91
< 0,5	12,00	25,00	18,01	17,93	17,92	19,12
< 1,0			23,78	23,70	23,68	24,96
< 2,0	32,00	47,00	36,67	36,61	36,59	34,82
< 4,0			54,48	54,59	54,55	54,27
< 8,0	72,00	88,00	78,06	78,40	77,35	78,06
< 11,2	90,00	100,00	97,56	97,56	96,47	96,63
< 16,0	100,00		100,00	100,00	100,00	100,00
< 22,4			100,00	100,00	100,00	100,00
< 31,5			100,00	100,00	100,00	100,00
< 63,0			100,00	100,00	100,00	100,00

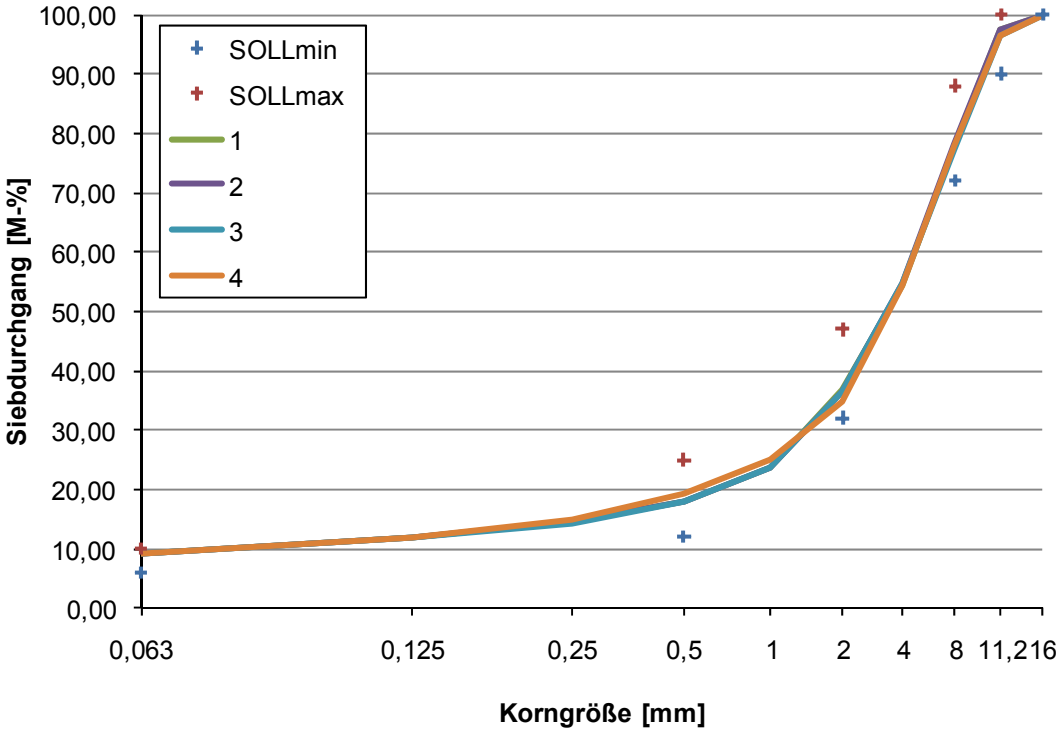


Abbildung 7-1: Graphische Gegenüberstellung der verschiedenen Sieblinien

7.2 Probekörperherstellung und -vorbereitung

7.2.1 Mischen von Heißasphalt

Alle in dieser Arbeit erwähnten Mischgutsorten wurden mit einem Gegenlaufzwangsmischer „GZM 30+“ im Labor gemischt (Abbildung 7-2). Dieser besteht aus einer mittels Heizstäben erhitzbaren (bis 200 °C) Mischtrommel mit ca. 35 l Fassungsvermögen und einem Mischwerkzeug, welches eine zur Mischtrommel gegenläufige Rotationsbewegung ausführt. Die-

ses schaufelförmige Mischwerkzeug kann eigens geregelt und zwischen 25 °C bis 200 °C temperiert werden. Das bereits eingewogene, erhitzte Gestein wird mit heißem Bindemittel laut ÖN B3580-1 für 5 min bei 160 bis 200°C zu einem homogenen Asphaltheißmischgut durchmischt.

Abbildung 7-2: Darstellung des Gegenlaufzwangsmischers GZM 30+ im offenen Zustand mit Mischwerkzeug, Mischtrommel, Steuereinheit und Wärmeisolier-einhausung [Kappl K., 2007]

7.2.2 Verdichten mittels Walzsegmentverdichter

Nachdem das Asphaltmischgut ausreichend durchmischt wurde, wurde es in einem sogenannten Walzsegmentverdichter zu rechteckförmigen Platten verdichtet. Dieser Walzsegmentverdichter besteht im Wesentlichen aus einem horizontal beweglich gelagerten Tisch mit zwei Formkästen, wobei der obere abmontierbar ist und der untere fix am Tisch befestigt ist. Die Grundfläche der Formkästen beträgt 50x26 cm und die maximale Höhe 22 cm. Weiters besteht der Verdichter aus einem vertikal beweglich gelagerten Walzsegment mit Hydraulikstempel, Kraftmessdose und Wegaufnehmer sowie einer biegesteifen 4-säuligen Rahmenkonstruktion (Abbildung 7-3).

Das Walzsegment ist getrennt regulier- und beheizbar (bis 150 °C). Sein Radius von 55 cm entspricht dem einer Straßenwalze. Es kann in einem kraft-, verformungsgeregelten Modus oder einer Mischform aus beiden betrieben werden. Der untere Tisch mit beiden Formkästen ist ebenfalls bis ca. 150 °C beheizbar. Beim Verdichtungsvorgang wird das Walzsegment mittels Hydraulikzylinder in die Formkästen mit dem heißen Mischgut gepresst. Nach Erreichen einer beliebig einstellbaren Vorlast wird der untere Tisch mit den Formkästen durch einen zweiten Hydraulikzylinder in horizontale Bewegungen versetzt und das Heißmischgut so „knetend“ oder „walkend gewalzt“. Diese beiden Bewegungen sollen den Verdichtungsvorgang, der bei Walzenzügen auf Straßen stattfindet, realitätsnah simulieren [Kappl K., 2007].

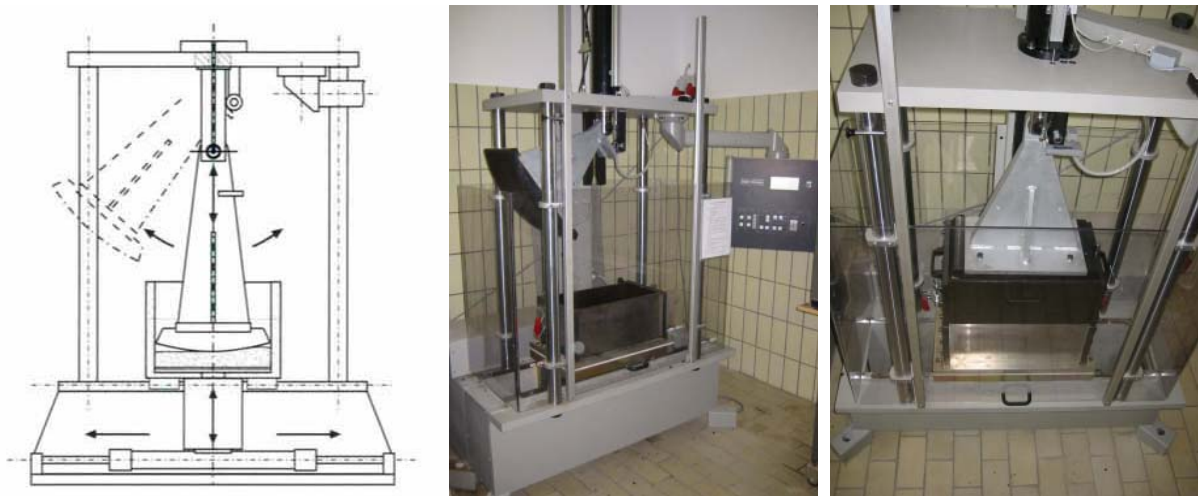


Abbildung 7-3: Darstellung des im Labor verwendeten Walzsegmentverdichters (Mitte, rechts) und schematische Skizze des Verdichtungsprinzips (links) [Kappl K., 2007]

Die Probeplatten wurden weggeregelt auf eine Zielhöhe von 13,0 cm verdichtet, wobei sie in zwei Lagen eingebaut wurden. Bei einem einlagigen Einbau würde es zu einem zu großen Dichteunterschied zwischen der obersten und der untersten Lage kommen. Die unteren Lagen wären zu wenig verdichtet, die oberen Lagen wären überverdichtet. Über die bekannte Rohdichte und den Zielhohlraumgehalt wird die Zielraumdichte festgelegt. Aus der Zielraumdichte und dem angestrebten Plattenvolumen ergibt sich die Einwaagemenge.

7.2.3 Bohren und Schneiden der Probekörper

Aus den abgekühlten Asphaltplatten wurden anschließend vier Bohrkerne mit einem Durchmesser von 10 cm horizontal liegend herausgebohrt. Horizontal gebohrt bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Verdichtungsrichtung der Platte (vertikal) und die Bohrrichtung der entnommenen Bohrkerne um 90° zueinander versetzt sind (Abbildung 7-4). Im Anschluss wurden die Probekörper an den beiden Enden noch auf eine Höhe von 20 cm gekürzt.

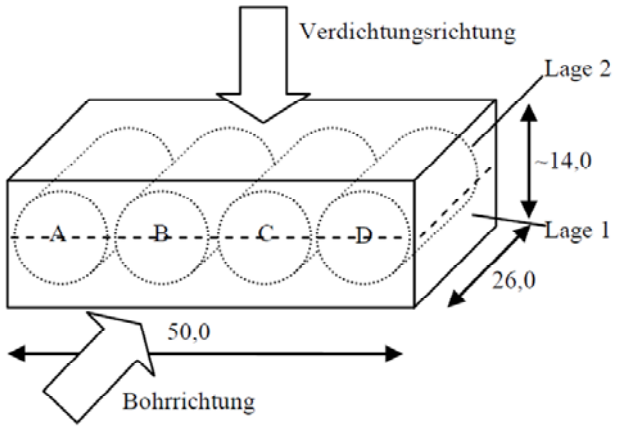


Abbildung 7-4: Schematische Darstellung des Bohrschemas für vier horizontal gebohrte Bohrkerne

Kappl untersuchte in Vorversuchen an wenigen Bohrkernen die mit der Herstellung vertikal oder horizontal gebohrter Bohrkerne verbundene Problematik ungleichförmiger Probekörper-

verformungen. Dabei konnten keine wesentlichen Unterschiede zwischen horizontal und vertikal gebohrten Bohrkernen in den Lastwechsel-Dehnungskurven bzw. den daraus ermittelten Materialkennwerten Kriechraten f_c festgestellt werden. Es ist jedoch durchaus möglich, dass diese Problematik im Falle der Verwendung von plattigen Zuschlagskörnern (Kornformkennzahl ist wesentlich ungünstiger als 3:1) durchaus Auswirkungen besitzen kann [Kappl K., 2007].

7.2.4 Applikation von Dehnungsmessstreifen

Wie bereits in Kapitel 3.6 erwähnt wurde, wurden in dieser Arbeit die radialen Verformungen mittels Dehnungsmessstreifen gemessen. Demnach musste nach der Probekörperherstellung auf allen Probekörpern ein DMS appliziert werden. Eine ausführliche Beschreibung der Vorgehensweise bei der Applikation von Dehnungsmessstreifen findet sich in der Arbeitsanweisung [AA542, 2010].

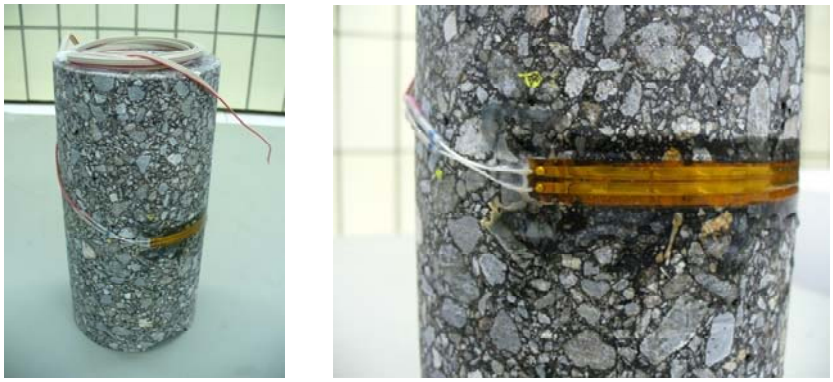


Abbildung 7-5: Applizierter Dehnungsmessstreifen zur Messung radialer Verformungen

7.2.5 Vortemperieren der Probekörper

Vor jeder Versuchsdurchführung sind die Probekörper auf die jeweilige Versuchstemperatur zu temperieren. Die EN 12697-25 schreibt vor, dass der Probekörper für eine Dauer von mindestens 4 h, jedoch nicht länger als 7 h, mit einer Abweichung von ± 1,0 °C auf die Prüftemperatur zu konditionieren ist. Im Labor für Straßenwesen der TU Wien bedient man sich hierfür eines Trockenschrankes.

7.3 Überblick über die durchgeführten Laborprüfungen zum Verformungsverhalten

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zyklisch, dynamische Druckschwellversuche in Anlehnung an die EN 12697-25 durchgeführt. In der Tabelle 7-6 sind die unterschiedlichen Versuchsbedingungen der durchgeführten Prüfungen zusammengefasst.

In Vorversuchen stellte sich heraus, dass weder der hydrostatische noch der deviatorische Spannungszustand einen Einfluss auf die viskoelastischen Materialparameter hat und somit auch nicht auf den Phasenversatz zwischen der Belastung und der Dehnungsreaktion [Hofko et al., 2010]. Es wurden daher, wenn möglich, uniaxiale Druckschwellversuche durchgeführt, da diese wesentlich rascher und einfacher in der Durchführung sind. Lediglich bei

50 °C, wenn die Asphaltprobekörper schon sehr viskos sind, ist ein Versuch ohne Stützdruck nicht möglich, da die Probekörper schon bei geringen Druckspannungen zerstört werden.

Aus diesem Grund wurden bei Prüftemperaturen von 50 °C triaxiale, zyklische Druckschwellversuche durchgeführt, die bis auf die Frequenz mit den Prüfbedingungen der EN 13108-20 (siehe Tabelle 2-1) übereinstimmten. Bei den Versuchsreihen, wo die Prüftemperatur 30 °C bzw. 10 °C betrug, wurden uniaxiale, zyklische Druckschwellversuche durchgeführt. Für diese wurden, wie in Kapitel 2.2 erwähnt, Lastplatten mit Durchmessern wie dem des Probekörpers verwendet, um eine Behinderung der radialen Ausdehnung zu verhindern. Die Prüfbedingungen für die beiden UCCT wurden zusätzlich so festgelegt, dass sich die Probekörper stark genug verformten, um eindeutige Messwerte zu bekommen.

Beide Versuchsarten, TCCT und UCCT, wurden nach der jeweiligen Arbeitsanweisung ([AA543, 2010] bzw. [AA544, 2010]) durchgeführt.

Tabelle 7-6: Überblick über die durchgeführten zyklischen, dynamischen Druckschwellversuche

Versuchsart	Temperatur [°C]	Mittelspannung [kPa]	Spannungsamplitude [kPa]	Stützdruck [kPa]
TCCT	50	450	300	150
UCCT	30	250	150	0
UCCT	10	600	500	0

Die Versuche wurden weiter insofern modifiziert, indem sie nicht wie in der Norm nur bei einer Belastungsfrequenz von 3 Hz durchgeführt wurden, sondern jeweils mehrere Frequenzpakete durchlaufen wurden (siehe Abbildung 7-6 und Abbildung 8-1). Zwischen den jeweiligen Frequenzpaketen wurde für 3 Sekunden die Unterspannung gehalten.

In der Abbildung 7-6 ist schematisch der Versuchsablauf dargestellt. Zu Beginn eines Versuches schreibt die EN 12697-25 eine 2-minütige Vorbelastungsphase vor. Diese hat 2 % der Summe von Mittelspannung und Spannungsamplitude zu betragen. Unmittelbar danach musste bei den TCCT-Versuchen der Stützdruck aufgebracht werden. Anschließend erfolgte die zyklische Axialbelastung mit den unterschiedlichen Frequenzpaketen. Die Anzahl der Lastwechsel der jeweiligen Frequenzen ist ebenfalls der Abbildung zu entnehmen. Am Ende eines jeden Versuches folgte noch eine 10-minütige Entlastungsphase.

Anders als in der Norm wurden die Verformungen des Probekörpers durchgehend über den gesamten Versuchsablauf gemessen. Die Aufzeichnungsrate betrug bei allen Frequenzen 200 Punkte pro Lastwechsel (Periode), mit Ausnahme bei 20 und 30 Hz, wo maschinentechnisch nur 100 Punkte pro LW aufgezeichnet werden konnten (siehe Abbildung 7-6).

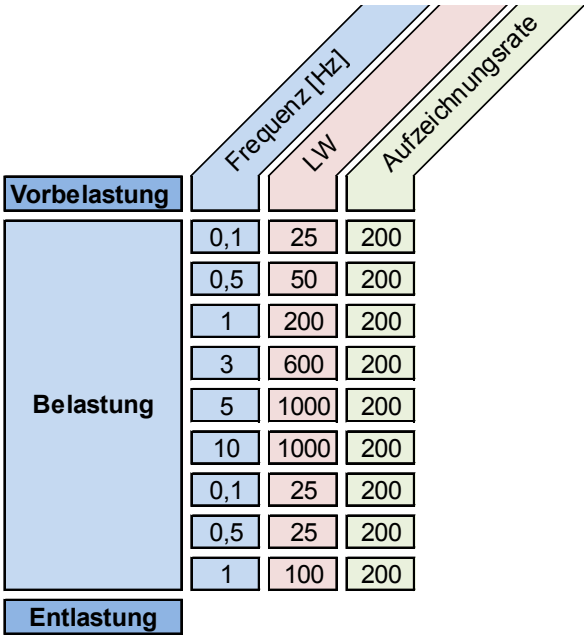


Abbildung 7-6: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

Bei allen Versuchen wurde, wie in Kapitel 3 erwähnt, die axiale Verformung des Probekörpers mittels zweier induktiver Wegaufnehmer und die radiale Verformung mittels eines Dehnungsmessstreifens gemessen. Da es sich bei Asphalt um ein viskoelastisches Material handelt, kommt es, wie schon oben erwähnt, zwischen den aufgebrachten Spannungen und den daraus folgenden Dehnungsreaktionen zu einem Phasenversatz (vgl. Kapitel 4.2). Ziel dieser Arbeit war es nun, diesen Phasenversatz bei dem polymermodifizierten Asphalt *„AC 11 deck PmB 25/55-65, A2, G1 (Loja)“* zu bestimmen und dessen Verhalten bei Variation des Hohlraum- bzw. Bindemittelgehaltes sowie der Versuchsbedingungen (Temperatur, Frequenz) zu analysieren.

8. ERGEBNISSE DER LABORPRÜFUNGEN ZUM VERFORMUNGSVERHALTEN

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse zu ermittelter Phasenwinkel *φ* erläutert, die aus den durchgeführten zyklischen, dynamischen Druckschwellprüfungen mittels Datenauswertungssoftware berechnet wurden. Alle Versuche erfolgten in Anlehnung an die EN 12697-25. In der Tabelle 7-6 sind die unterschiedlichen Versuchsbedingungen der durchgeführten Prüfungen zusammengefasst. Bei den unterschiedlichen Asphaltzusammensetzungen wurden pro Prüfbedingung zwei Probekörper getestet, um die Wiederholbarkeit zu gewährleisten. Tabelle 7-3 gibt einen Überblick über die durch die Variation des Hohlraum- und Bindemittelgehaltes unterschiedlichen Asphaltmischungen.

Zunächst erfolgt im Unterkapitel 8.1 die Erläuterung der Auswertemethodik, in Kapitel 8.2 eine allgemeine Analyse des Materialverhaltens des verwendeten polymermodifizierten Asphalts *AC 11 deck PmB 25/55-65, A2, G1 (Loja)*. Anschließend folgt im Unterkapitel 8.3 eine Analyse des festgestellten Materialverhaltens bei Variation des Hohlraum- und Bindemittelgehaltes.

Sämtliche Werte in den folgenden Diagrammen stellen Mittelwerte aus den jeweils zwei geprüften Probekörpern dar. Zusätzlich sind zu allen Werten die Standardabweichungen angegeben. Im Anhang A 1 befindet sich eine tabellarische Übersicht über alle durchgeführten Prüfungen. Es sind dort alle Probekörper mit ihren Probekörperdaten, die Prüfbedingungen, denen sie jeweils ausgesetzt wurden, und die Ergebnisse aufgelistet. Weiters ist im Anhang A 2 zu jedem Versuch ein Diagramm mit den Medianwerten und einigen Quantilwerten zu finden.

8.1 Auswertemethodik

Bei den Phasenwinkeln, die für diese Arbeit analysiert wurden, handelt es sich um die Phasenverschiebung zwischen dem Minimum des Kraftsignals und den Minima der Sensoren.

Wie bereits im Kapitel 5.2.1 angeführt wurde, werden im Modul „*Parameteridentifikation der Näherungsfunktion*“ des Auswertungsprogrammes die einzelnen Parameter der gewählten Ausgleichsfunktion so bestimmt, dass sich die interpolierende Funktion bestmöglich an die Messpunkte anpasst. Dazu werden blockweise die Messpunkte von nur wenigen Lastwechseln betrachtet. In dieser Arbeit wurde die Standardeinstellung von 4 Lastwechseln pro Block beibehalten, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen. Eine Erhöhung der Anzahl der Lastwechsel pro Block würde die Variation der Ergebnisse zwischen den aufeinander folgenden Messsequenzen verringern.
Die folgende Tabelle 8-1 zeigt zum einen die Anzahl der Lastwechsel pro Frequenzpaket, und zum anderen die Anzahl der Lastwechsel, die für die Analyse des Materialverhaltens verwendet wurden:

Tabelle 8-1: Anzahl der Lastwechsel pro Frequenzpaket und Anzahl der analysierten Lastwechsel

Frequenz [Hz]	0,1	0,5	1	3	5	10	0,1	0,5	1
Anzahl LW	25	50	200	600	1000	1000	25	25	100
Anzahl analysierter LW	-	-	-	200	280	280	25	25	100

Die Daten aus den ersten drei Frequenzpaketen (0,1/ 0,5/ 1 Hz) wurden nicht für die Analyse herangezogen, da sich diese noch in der Konsolidierungsphase befinden (siehe Abbildung 8-1). Aufgrund der starken Nachverdichtung in dieser Phase eignen sich die aus der Auswertung erhaltenen Daten nicht für eine aussagekräftige Analyse. Um auch für diese Frequenzen brauchbare Werte zu bekommen, wurden diese nochmals an den Schluss des Versuchsablaufs gereiht. Ein Vergleich der Phasenwinkel zwischen den Frequenzpaketen in der Konsolidierungsphase und im eingeschwungenen Zustand (Abbildung 8-2) zeigt sehr deutlich, dass die Phasenwinkel zu Beginn des Versuches (rot) einer starken Streuung unterliegen und sich von den Werten der eingeschwungenen Phase klar unterscheiden. Erst bei der Frequenz von 1 Hz, die am Ende der Konsolidierungsphase liegt, zeigt sich eine gute Wiederholbarkeit für den ermittelten Phasenwinkel.

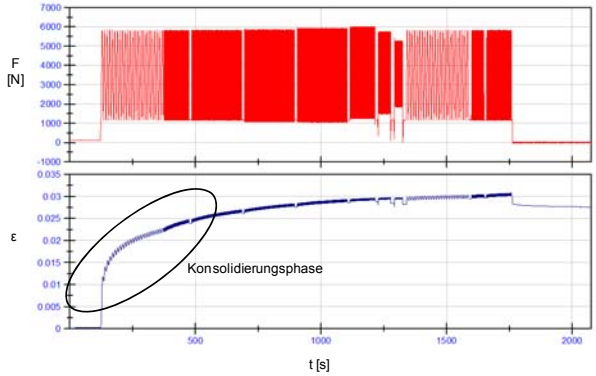


Abbildung 8-1: Darstellung des Versuchsablaufs bei einer Belastung mit mehreren Frequenzen (rot) und seiner Kriechkurve (blau)

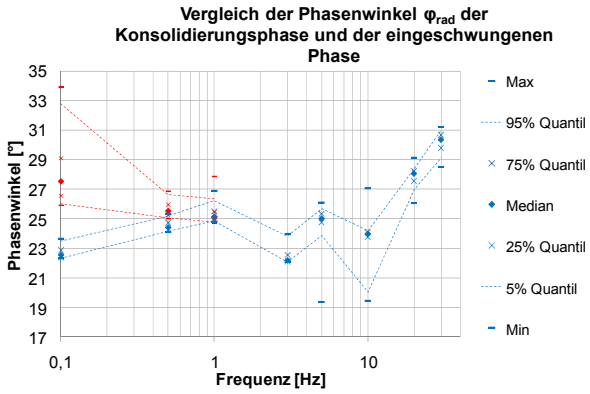


Abbildung 8-2: Vergleich der Phasenwinkel φ_{rad} der Konsolidierungsphase (rot) und der eingeschwungenen Phase (blau)

Bei den nachfolgenden drei Frequenzen (3/ 5/ 10 Hz) wurde jeweils ca. das letzte Drittel der aufgebrachten Schwingungen zur Analyse verwendet. Zu Beginn eines neuen Frequenzpaketes hat der Probekörper eine gewisse Einschwingphase, in der die Messdaten schwanken können. Indem nur das letzte Drittel für die Analyse berücksichtigt wird, soll gewährleistet

sein, dass sich der Probekörper sicher in einem eingeschwungenen Zustand befindet und somit wiederholbare Messergebnisse liefert. Bei den letzten drei Frequenzpaketen (0,1/ 0,5/ 1 Hz) werden jedoch alle aus der Prüfung gewonnenen Daten analysiert. Es handelt sich hier um sehr niedrige Frequenzen, bei denen der Probekörper nur eine sehr kurze Einschwingphase durchläuft. Außerdem liegen hier nur sehr wenige Daten vor, die alle benötigt werden, um eine aussagekräftige statistische Analyse durchführen zu können.

8.2 Allgemeine Analyse des Materialverhaltens

Für die erste allgemeine Analyse des Materialverhaltens in diesem Kapitel wird eine Asphaltmischung mit 5,3 M-% Bindemittelgehalt und 3,0 V-% Zielhohlraumgehalt betrachtet.

8.2.1 Vergleich des Materialverhaltens in axialer und radialer Richtung

In diesem Kapitel wird der Phasenwinkel in zwei unterschiedlichen „Richtungen“ in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz analysiert. Einerseits wurden jene Phasenwinkel φ_{rad}, die zwischen axialen Belastungsspannungen und radialen Dehnungen auftreten, ermittelt. Andererseits wurden auch die Phasenverschiebungswinkel φ_{ax} zwischen axialen Belastungsspannungen und axialen Dehnungen ausgewertet (siehe Abbildung 8-3 und Abbildung 8-4). Da zur axialen Verformungsmessung zwei Wegaufnehmer (LVDTs) verwendet und deren Messdaten gemittelt wurden, handelt es sich auch bei den daraus gewonnen axialen Phasenwinkeln um Mittelwerte.

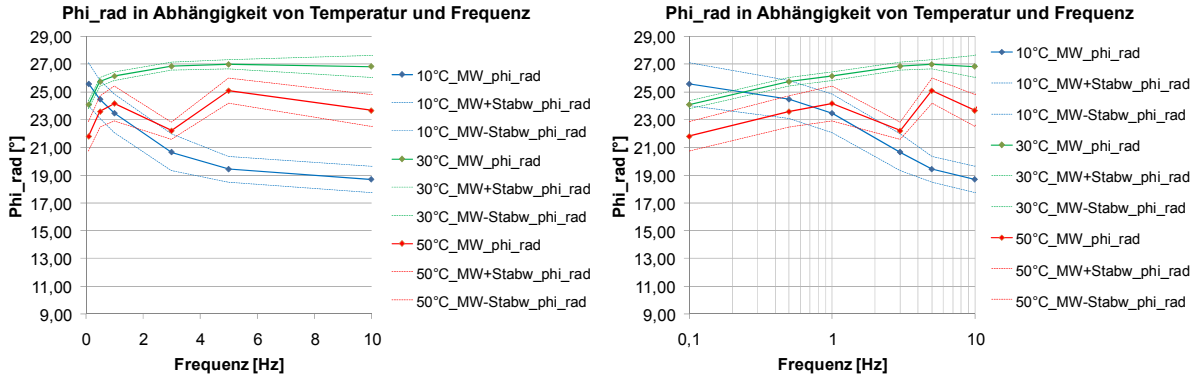


Abbildung 8-3: Radiale Phasenwinkel φ_{rad} in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz (rechts in halblogarithmischer Darstellung)

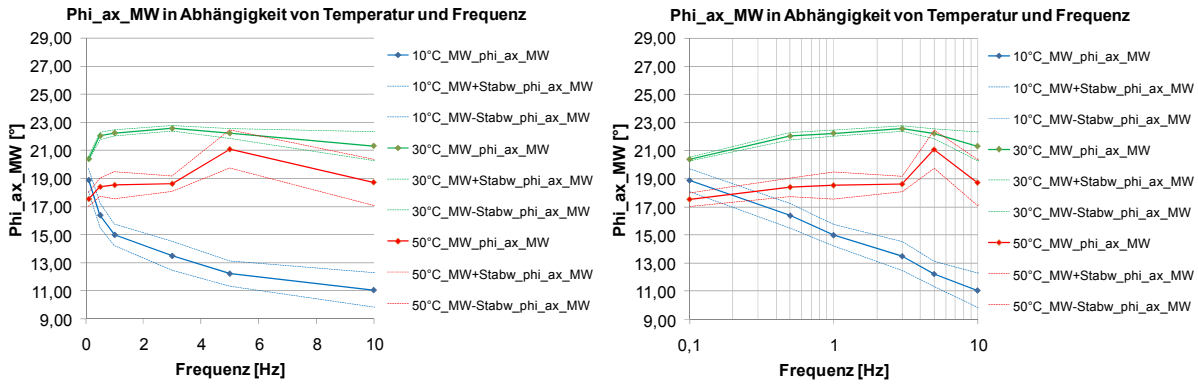


Abbildung 8-4: Gemittelte axiale Phasenwinkel φ_{ax_MW} in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz (rechts in halblogarithmischer Darstellung)

Bei einem Vergleich der Abbildung 8-3 mit der Abbildung 8-4 ist erkennbar, dass sich der Asphalt in axialer und radialer Richtung qualitativ gleich verhält. Die Phasenwinkel unterscheiden sich lediglich in ihrer Größe, wobei der radiale Phasenwinkel stets höher ist als der axiale. Weshalb es zu unterschiedlichen Phasenwinkel in axialer und radialer Richtung kommt und vor allem warum der radiale Phasenwinkel größer ist als der axiale, ist noch nicht bekannt. Um dieses Phänomen erklären zu können, müssen noch weitere Versuche folgen.

Weiters ist erkennbar, dass bei sehr niedrigen Belastungsfrequenzen (z.B. 0,1 Hz) die Phasenwinkel bei unterschiedlichen Prüftemperaturen relativ ähnlich sind. Mit einer Steigerung der Frequenz verhält sich der Asphalt jedoch unter verschiedenen Temperaturen anders. Während der Phasenwinkel bei einer Prüftemperatur von 10 °C mit der Erhöhung der Frequenz sinkt, steigt dieser bei höheren Temperaturen von 30 °C und 50 °C an. Zu beachten ist hierbei vor allem auch, dass der Verlauf der 50 °C-Kurve unter der 30 °C-Kurve liegt. Der Grund für diese unterschiedlichen Entwicklungen liegt im viskoelastischen Materialverhalten des Bitumens, wie das folgende Kapitel 8.2.2 zeigt.

Vergleicht man den Verlauf der 30 °C-Kurve mit dem der 50 °C Kurve fällt auf, dass die beiden Kurven annähernd parallel in einem Abstand von 2° liegen. Es scheint jedoch bei der 50 °C-Kurve bei 3 Hz der radiale und bei 5 Hz der axiale Phasenwinkel auszubrechen. Da es sich hierbei um einen TCCT handelt, wird vermutet, dass der Einfluss des inhomogen aufgebrachten Stützdrucks die Ursache dafür ist. In den folgenden Abbildung 8-5 und Abbildung 8-6 ist zu sehen, wie sich der Stützdruck (blau) bei den einzelnen Frequenzen verhält.

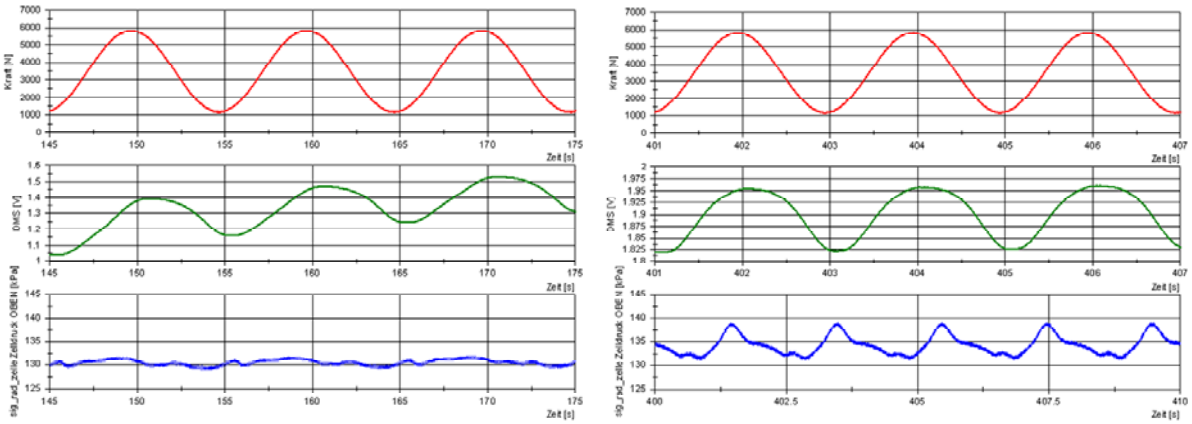


Abbildung 8-5: Verhalten des Stützdruckes (blau) bei Frequenzen von 0,1 Hz (links) und 0,5 Hz (rechts)

Während der Stützdruck bei der niedrigen Frequenz von 0,1 Hz noch den gewünschten konstanten Verlauf aufweist, beginnt er bei 0,5 Hz zu schwingen. Bei 0,5 Hz sieht man, wie die Hydraulik den Druck noch versucht nachzuregeln (Abbildung 8-5 rechts). Ab der Frequenz von 1 Hz scheint die Hydraulik jedoch zu träge zu sein, um einen konstanten Druck aufrecht halten zu können. Der Druck beginnt in eine Sinusschwingung überzugehen. Bei 3 Hz schwingt der Stützdruck bereits phasengleich zu den radialen Ausdehnungen, die in der Abbildung 8-6 durch das DMS-Signal (grün) dargestellt sind.

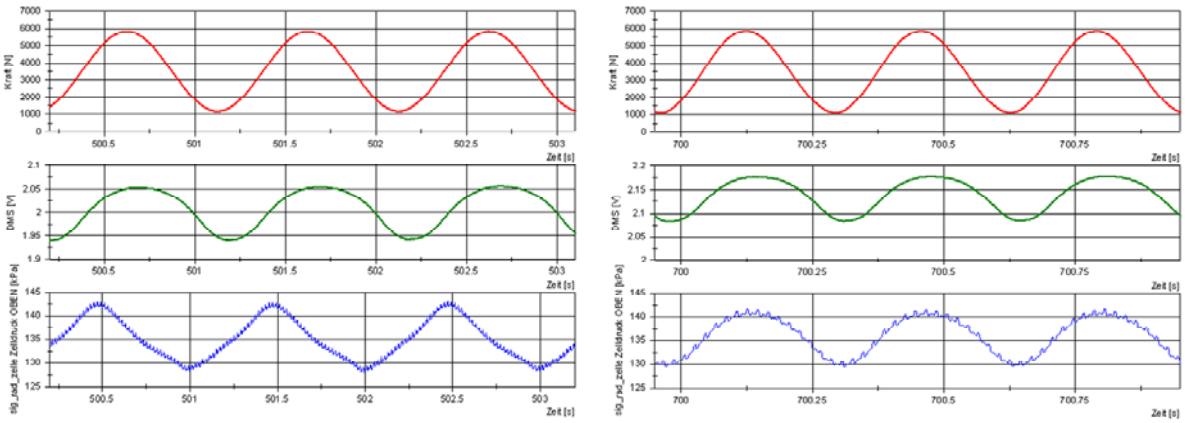


Abbildung 8-6: Verhalten des Stützdruckes (blau) bei Frequenzen von 1 Hz (links) und 3 Hz (rechts)

8.2.2 Vergleich des Materialverhaltens von Asphalt und Bitumen

Um das Phänomen, dass der Phasenwinkel bei tieferen Temperaturen sinkt während er bei höheren Temperaturen ansteigt, erklären zu können, wurden die Phasenwinkel des Asphalts mit denen des reinen Bitumens verglichen. Bei dem reinen Bitumen handelt es sich um ein PmB 25/55-65, das auch für die Asphaltmischungen verwendet wurde. Die Werte für dessen Phasenwinkel wurden an einem DSR-Versuch (Dynamisches Scherrheometer) ermittelt.

In der Abbildung 8-7 ist das Materialverhalten des Asphaltes und des Bitumens bei 10°C Prüftemperatur dargestellt. Der Phasenwinkel des Bitumens verläuft bei Erhöhung der Frequenz in einem logarithmischen Verlauf gegen 0°. Das Bitumen verhält sich demnach im hohen Frequenzbereich bei niedrigen Temperaturen fast rein elastisch (vergl. Abbildung 4-6). Aufgrund der hohen Steifigkeit des Bitumens im Niedrigtemperaturbereich (siehe Abbildung 8-8) hat das Bindemittel bei dieser Temperatur einen hohen Anteil am Tragverhalten des Mischguts, weshalb der Phasenwinkel des Asphalts parallel zu dem des Bindemittels ebenfalls einen sinkenden Verlauf aufweist. Beim Asphalt scheinen der Füller, das Mineralskelett und der Hohlraumgehalt zusätzlich einen gewissen Einfluss auf das Materialverhalten zu haben. Aus welchem Grund der Phasenwinkel des Dreiphasensystems Asphalt höher liegt als der des Bitumens ist noch nicht geklärt und muss anhand weiterer Versuche untersucht werden.

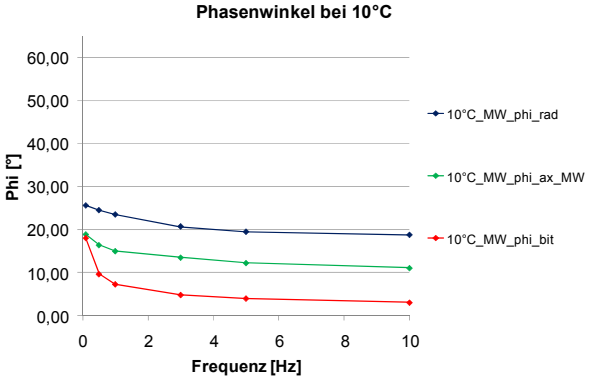


Abbildung 8-7: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 10 °C Prüftemperatur

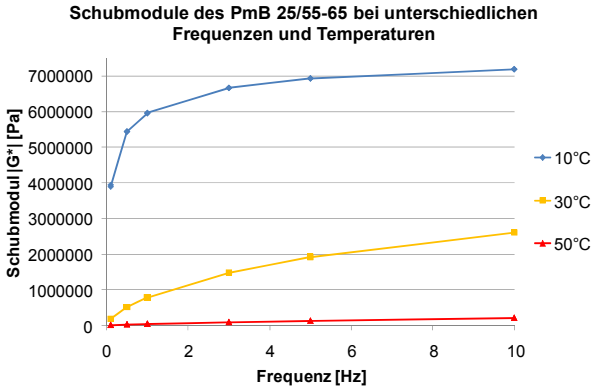


Abbildung 8-8: Schubmodule des polymermodifizierten Bitumen PmB 25/55-65 bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen

Bitumen verhält sich zunehmend viskoser, je höher die Temperatur ist. In Abbildung 8-9 ist zu sehen, dass daher bei 30 °C die Phasenwinkel des Bitumens bereits deutlich höher liegen als noch bei 10 °C in der Abbildung 8-7. Bemerkenswert ist, dass der Phasenwinkel hier nun auch über dem des Asphalts liegt. Im niedrigen Frequenzbereich ist das Bitumen so weich, dass sich das Gestein im Asphalt vermehrt an der Tragwirkung beteiligt, weshalb der Asphalt niedrigere Phasenwinkel aufweist als das Bitumen. Mit dem Anstieg der Frequenz verhält sich Bitumen jedoch zunehmend steifer (siehe Abbildung 8-8) und beteiligt sich immer mehr an der Tragwirkung. Der Phasenwinkel des Asphalts steigt somit bei einer Erhöhung der Frequenz an. Es kommt zu einer Annäherung der Phasenwinkel des Asphalts und des Bitumens. Bei einer Prüftemperatur von 30 °C und 10 Hz weisen sowohl der Asphalt in radialer Richtung als auch sein Bindemittel ungefähr den gleichen Phasenwinkel auf.

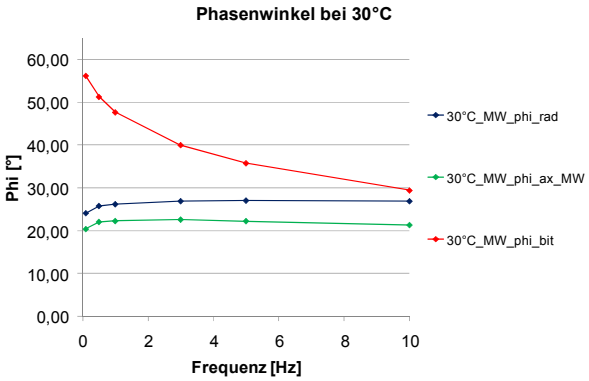


Abbildung 8-9: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 30 °C Prüftemperatur

In hohen Temperaturbereichen ist das Bitumen zu weich, um noch einen maßgebenden Einfluss auf die Tragwirkung zu haben. Es trägt hauptsächlich das Gesteinsgerüst, weshalb die Phasenwinkel des Asphalts bei 50 °C Prüftemperatur niedriger sind als bei 30 °C. Der Phasenwinkel des Bitumens variiert bei einer Temperatur von 50 °C so gut wie gar nicht mehr bei unterschiedlichen Belastungsfrequenzen. Er liegt mit 60° weit über dem Phasenwinkel des Asphaltes (Abbildung 8-10).

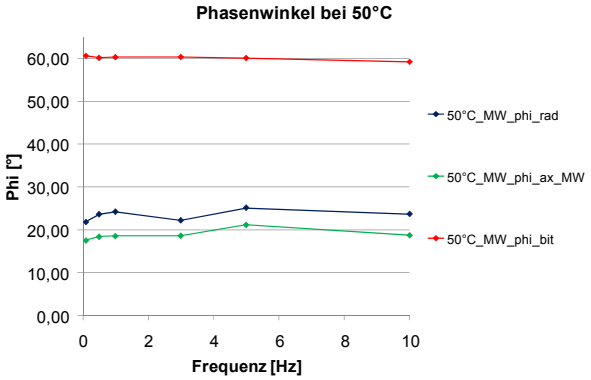


Abbildung 8-10: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 50 °C Prüftemperatur

8.3 Analyse des Materialverhaltens bei Variation des Hohlraum- und Bindemittelgehaltes

In diesem Kapitel wird untersucht wie sich der radiale Phasenwinkel des polymermodifizierten Asphalts *AC 11 deck* PmB *25/55-65, A2, G1 (Loja)* bei Variation des Hohlraum- und Bindemittelgehaltes verhält. Es werden hier die beiden Extrema der im Rahmen dieser Arbeit aufgebrachten Frequenzen, 0,1 Hz und 10 Hz, sowie die in der Norm geforderte Belastungsfrequenz von 3 Hz miteinander verglichen.

8.3.1 Variation des Hohlraumgehaltes

Der Bindemittelgehalt aller in diesem Unterkapitel analysierter Probekörper beträgt 5,3 M%. Die Zielhohlraumgehälter waren 3,0 V%, 5,0 V% und 8,0 V% (vergl. Tabelle 7-3). Es wurden, wie auch schon für die allgemeine Analyse, Versuche bei drei unterschiedlichen Temperaturniveaus durchgeführt, nämlich bei 10 °C, 30 °C und 50 °C. Der blaue Balken stellt das nach Marshall optimierte Mischgut mit 5,3 M% Bindemittelgehalt und 3,0 V% Zielhohlraumgehalt dar.

In den Abbildung 8-11, Abbildung 8-12 und Abbildung 8-13, die jeweils den Verlauf der radialen Phasenwinkel bei unterschiedlichen Prüftemperaturen darstellen, ist zu sehen, dass die Unterschiede der Phasenwinkel bei verschiedenem Hohlraumgehalt bei den einzelnen Temperaturen in allen Frequenzbereichen praktisch konstant bleiben.

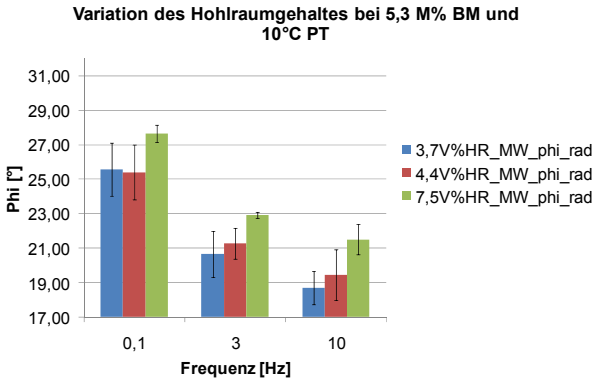


Abbildung 8-11: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 10 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes

Im Niedrigtemperaturbereich (10 °C) ist der Phasenwinkel umso größer, je höher der Hohlraumgehalt ist (Abbildung 8-11). Anders sieht es jedoch bei 30 °C aus - in der Abbildung 8-12 ist zu erkennen, dass hier der mittlere Hohlraumgehalt den größten Phasenwinkel aufweist.

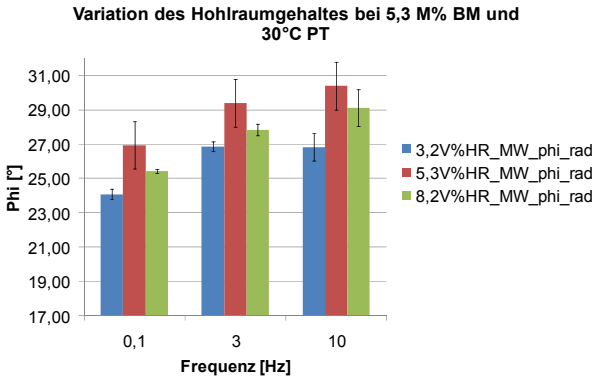


Abbildung 8-12: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 30 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes

Eine Betrachtung der Phasenwinkel bei 50 °C bringt die Erkenntnis, dass hier der Phasenwinkel wiederum umso höher ist, je höher der Hohlraumgehalt ist. Die Differenzen zwischen den Phasenwinkeln sind jedoch nur mehr minimal.

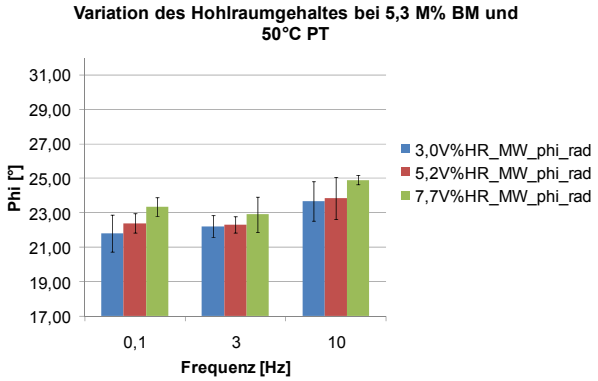


Abbildung 8-13: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 50 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes

8.3.2 Variation des Bindemittelgehaltes

Der Zielhohlraumgehalt betrug für alle in diesem Unterkapitel analysierten Probekörper 3,0 V%. Der Bindemittelgehalt wurde mit 4,8 M%, 5,3 M% und 5,8 M% und damit der Hohlraumauffüllungsgrad zwischen 78,9 %, 80,5 % und 81,9 % variiert. Die Versuchsreihen erfolgten wiederum bei 10 °C, 30 °C und 50 °C. Der blaue Balken in den folgenden Diagrammen stellt das nach Marshall optimierte Mischgut mit 5,3 M% Bindemittelgehalt und 3,0 V% Zielhohlraumgehalt dar.

Abbildung 8-14 zeigt, dass bei einer Prüftemperatur von 10 °C die Phasenwinkel der Probekörper mit 4,8 M% und 5,3 M% bei den jeweiligen Belastungsfrequenzen nahezu ident sind. Die Phasenwinkel der Probekörper mit 5,8 M% liegen jedoch jeweils um ca. 3° darüber.

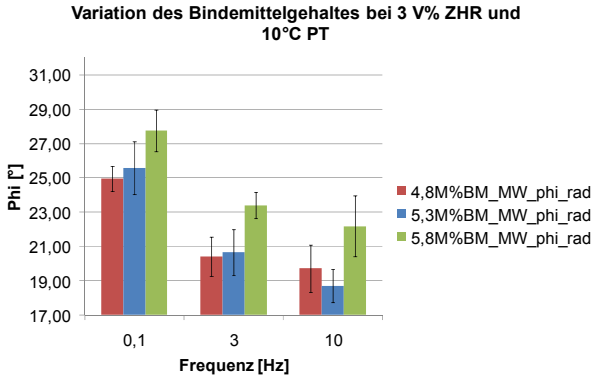


Abbildung 8-14: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 10 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes

Bei einem Temperaturniveau von 30 °C ergibt sich ein anderes Bild als bei 10 °C (siehe Abbildung 8-15). Hier weisen nun die Probekörper mit 4,8 M% und 5,8 M% Bindemittelgehalt die gleichen Phasenwinkel auf. Die Probekörper, die mit ihren 5,3 M% Bindemittelgehalt dazwischen liegen, ergeben einen um ca. 3° niedrigeren Phasenwinkel.

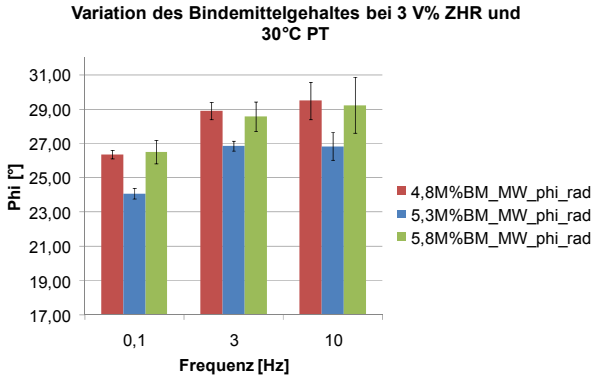


Abbildung 8-15: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 30 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes

In hohen Temperaturbereichen dürfte der Bindemittelgehalt keinen maßgeblichen Einfluss mehr haben, wie folgende Abbildung 8-16 zeigt. Die Phasenwinkel erreichen bei allen drei Bindemittelgehältern und allen drei Frequenzen annähernd den gleichen Wert. Sie liegen alle in einem Bereich von 22° bis 24°.

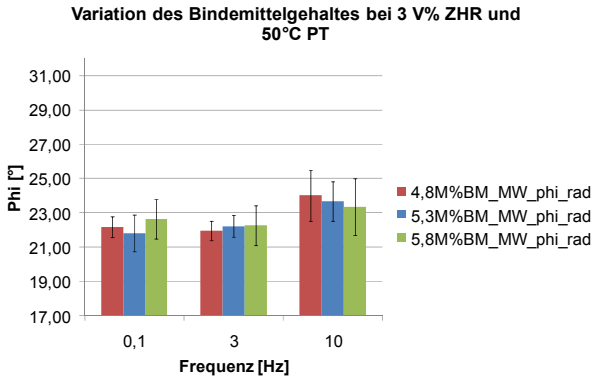


Abbildung 8-16: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 50 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes

9. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde an polymermodifizierten Asphalten anhand von Reihenuntersuchungen an der Triaxialprüfmaschine die Phasenverschiebung φ_{rad}, die zwischen axialen Belastungsspannungen und radialen Dehnungen auftritt, bei variierenden Randbedingungen untersucht. Die Kenntnis der radialen Phasenverschiebung stellt eine wichtige Grundlagen für die Weiterentwicklung des triaxialen, zyklischen Druckschwellversuchs (triaxial cyclic compression tests - TCCT) laut EN 12697-25 zur Ermittlung des Widerstandes von Asphalt gegen bleibende Verformungen im Hochtemperaturbereich dar.

Diese Triaxialprüfmethode dient als realitätsnahe Simulation der Spannungs- und Verformungszustände von flexiblen Asphaltstraßenaufbauten unter Verkehrsbelastung. Dabei wurde der Einspannungszustand im Straßenkörper bis dato modelliert, indem ein radialer, statischer Stützdruck auf den Probekörper aufgebracht wurde. Ein statischer Stützdruck entspricht jedoch nicht der realen Situation im Straßenaufbau. Um die Realität durch den Versuch besser anzunähern, soll ein zyklisch-dynamischer, radial wirkender Stützdruck eingeführt werden. Dafür ist die Kenntnis der radialen Phasenverschiebung wichtig, da die oszillierenden Stützdruckschwingungen frequenzgleich und phasenverschoben zu den axialen Belastungen aufgebracht werden müssen.

Die exakte Messung der am Probekörper auftretenden radialen Deformationen war bisher ein noch nicht zufriedenstellend gelöstes Problem in der triaxialen Versuchstechnik. Das Hauptproblem der radialen Verformungsmessung war, dass die verschiedenen Messinstrumente, die man bislang entwickelt hatte, nur auf der Gummimembran, die zur Abdichtung des Probekörpers notwendig ist, aufgebracht werden konnten. Dies hatte zur Folge, dass in die Messung immer ein unbekannter Einfluss der Gummimembran eingeflossen ist. Im Labor des Forschungsbereichs für Straßenwesen der TU-Wien wurde jedoch mit der Einführung von Dehnungsmessstreifen zur Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalten erstmalig eine Messmethode angewendet, die aufgrund der direkten Applikation am Probekörper nicht mehr durch die Gummimembran beeinflusst wird. Im Rahmen dieser Arbeit konnte diese Messmethodik für die Messung radialer Ausdehnungen zylindrischer Asphaltprobekörper bei Druckschwellversuchen standardisiert werden.

In dieser Arbeit wurden die radialen Phasenverschiebungen des polymermodifizierten Asphalts *AC 11 deck PmB 25/55-65, A2, G1 (Loja)* bei unterschiedlichen uniaxialen und triaxialen zyklischen Versuchsbedingungen ermittelt. Für dieses Asphaltmischgut kann nun ein Prüfprogramm entwickelt werden, in dem ein oszillierender Stützdruck implementiert ist.

Die Messung radialer Verformungen mittels Dehnungsmessstreifen bei Prüfungen im Druckschwellbereich hat sich bewährt. Inwieweit jedoch Dehnungsmessstreifen anderwärtig eingesetzt werden können, muss noch untersucht werden. Um sie z.B. für die axiale Verformungsmessung einsetzen zu können, muss ein Zusammenhang zwischen den axialen Stauchungen und den radialen Dehnungen gefunden werden. Der DMS erfährt nämlich aufgrund der axialen Beanspruchung des Probekörpers eine Stauchung, aber gleichzeitig, aufgrund der radialen Ausdehnung des Probekörpers, auch eine Dehnung. Es muss ebenfalls beachtet werden, dass Dehnungsmessstreifen nur kleine Stauchungen messen können. Ihr Ein-

satz z.B. bei Druck-Zug-Versuchen ist wahrscheinlich nicht möglich, wenn es zu großen Verformungen des Probekörpers kommt.

Die Kenntnis über den radialen Phasenwinkel ist jedoch nur ein kleiner Schritt das Materialverhalten des Asphalts besser zu verstehen. Der Grund für das Auftreten unterschiedlicher Phasenwinkel in axialer und radialer Richtung und vor allem warum der radiale Phasenwinkel größer ist als der axiale, ist noch nicht bekannt. Um dieses Phänomen erklären zu können, müssen noch weitere Versuche folgen.

Inwieweit der Füller, das Mineralskelett und der Hohlraumgehalt beim Asphalt einen Einfluss auf den Phasenwinkel haben, ist noch unbekannt. Aus welchem Grund der Phasenwinkel des Dreiphasensystems Asphalt höher als der des Bitumens liegen kann, wie es sich in dieser Arbeit bei der Prüftemperatur von 10°C ergeben hat, ist noch nicht geklärt und muss ebenfalls anhand weiterer Versuche untersucht werden.

LITERATURVERZEICHNIS

[Albers B., 2008] ALBERS B. (2008): *Technische Mechanik B – Einführung in die Kontinuumsmechanik*. Skriptum der TU Dresden, WS 2007/2008

[Best R., 1991] BEST R. (1991): *Digitale Meßwertverarbeitung*. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1991

[Eberle K., 2010] EBERLE K. (2010): *Versuchstechnik*. Vorlesungsskriptum des Instituts für Statik und Dynamik der Luft- und Raumfahrtkonstruktionen, Fakultät für Luft- und Raumfahrttechnik und Geodäsie, Universität Stuttgart, 2010

[Findley W.N., 1989] FINDLEY W. N., LAI J. S., ONARAN K. (1989): *Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials*. Dover Publications Inc., New York, 1989

[Hoffmann K., 1973] HOFFMANN K. (1973): *Die Anwendung der Wheatstoneschen Brückenschaltung*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM, Darmstadt, 1973

[Hoffmann K., 1979] HOFFMANN K. (1979): *Hinweise zur Installation von Dehnungsmessstreifen (DMS)*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM, Darmstadt, 1979

[Hoffmann K., 1987] HOFFMANN K. (1987): *Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen*. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH HBM, Darmstadt, 1987

[Hofko B., 2006] HOFKO B. (2006): *Rheologische Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Asphalten*. Diplomarbeit am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung an der TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, 2006

[Hofko et al., 2010] HOFKO B., BLAB R. (2010): *Assessment of Permanent Deformation Behavior of Asphalt Concrete by Improved Triaxial Cyclic Compression Testing*, 11th International Conference on Asphalt Pavements, Nagoya 2010

[Hou X., 1996] HOU X. (1996): *Analyse der bleibenden Verformungen des Asphaltes unter statischer und dynamischer Belastung zur Vorhersage von Spurrinnen*. Dissertation an der Technischen Hochschule Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen, Darmstadt, 1996

[Hürtgen H., 2000] HÜRTGEN H. (2000): *Methoden zur Beschreibung der thermomechanischen Eigenschaften von Asphalt (Asphalt-Rheologie)*. Heft 20 der Schriftenreihe Mitteilungen, Fachgebiet Konstruktiver Straßenbau

im Institut für Verkehrswirtschaft, Straßenwesen und Städtebau, Universität Hannover, 2000

[Huschek S., 1983] HUSCHEK S. (1983): *Zum Verformungsverhalten von Asphaltbeton unter Druck*. Dissertation am Institut für Straßen-, Eisenbahn- und Felsbau der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, 1983

[Kappl K., 2007] KAPPL K. (2007): *Bewertung und Modellierung des Verformungsverhaltens von Asphalten mit Hilfe von zyklischen Triaxialprüfungen*. Dissertation am Institut für Straßenbau und Straßenerhaltung an der TU Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, 2007

[Keil S., 1995] KEIL S. (1995): *Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmeßstreifen*. Cuneus-Verlag, Zwingenberg a.d. Bergstr., 1995

[Krebs H. G., 1982] KREBS H. G., JÄGER W. (1981): *Mechanisches Verhalten von Asphaltprobekörpern*. Heft 334 der Schriftenreihe Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Bundesminister für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Bonn-Bad Godesberg, 1981

[Leutner R., 2006] LEUTNER R., LORENZL H., SCHMOECKEL K. (2006): *Stoffmodelle zur Voraussage des Verformungswiderstandes und Ermüdungsverhaltens von Asphaltbefestigungen*. Heft S 45 der Schriftenreihe Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Wirtschaftsverlag NW, Bergisch Gladbach, 2006

[Mang H., 2000] MANG H., HOFSTETTER G. (2000): *Festigkeitslehre*. Springer-Verlag, Wien, 2000

[Mollenhauer K., 2008] MOLLENHAUER K. (2008): *Dimensionierungsrelevante Prognose des Ermüdungsverhaltens von Asphalt mittels einaxialer Zug-Schwellversuche*. Dissertation an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, TU Braunschweig, 2008

[Profos P., 1994] PROFOS P., PFEIFER T. (1994): *Handbuch der industriellen Messtechnik*. R. Oldenbourg Verlag GmbH, München, 1994

[Sachs L., 1989] SACHS L. (1989): *Angewandte Statistik*. Springer-Verlag, Berlin, 1989

[Schindler K., 2008] SCHINDLER K. (2008): *Untersuchung des Verformungsverhaltens von Asphalt zur Bestimmung von Materialkennwerten für die Dimensionierung*. Dissertation an der Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften, TU Braunschweig, 2008

[Trautwein U., 2005] TRAUTWEIN U. (2005): *Poroelastische Verformung und petrophysikalische Eigenschaften von Rotliegend Sandsteinen*. Dissertation an der Fakultät VI, TU Berlin, 2005

[Williams N. D., 1995] WILLIAMS N. D., LANDEL R. F., FERRY J. D. (1955): *The Temperature Dependence of Relaxation Mechanisms in Amorphous Polymers and other Glass-Forming Liquids*. Journal of the American Chem. Soc. 77, 1955

Normen

DIN 1342-1 (2003): *Viskosität – Teil 1: Rheologische Begriffe*. Deutsches Institut für Normung DIN, Berlin, 2003

DIN 1342-2 (2003): *Viskosität – Teil 2: Newtonsche Flüssigkeiten*. Deutsches Institut für Normung DIN, Berlin, 2003

DIN 1342-3 (2003): *Viskosität – Teil 3: Nicht-newtonsche Flüssigkeiten*. Deutsches Institut für Normung DIN, Berlin, 2003

EN 12697-25 (2005): *Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 25: Druckschwellversuch*. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, 2006-05-01

EN 12697-26 (2004): *Asphalt – Prüfverfahren für Heißasphalt – Teil 26: Steifigkeitsversuch*. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, 2004-12-01

EN 13108-20 (2006): *Asphaltmischgut – Mischgutanforderungen Teil 20: Erstprüfung*. Europäisches Komitee für Normung CEN, Brüssel, 2006-07-01

Arbeitsanweisungen

AA542 (2010): *Applikation von Dehnungsmessstreifen auf zylindrischen Asphaltprobekörpern zur Messung radialer Verformungen*. Arbeitsanweisung am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, 2010

AA543 (2010): *Triaxialer dynamischer Druckschwellversuch mit konstantem Stützdruck und Radialmessung mittels DMS*. Arbeitsanweisung am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, 2010

AA544 (2010): *Uniaxialer dynamischer Druckschwellversuch mit Radialmessung mittels DMS*. Arbeitsanweisung am Institut für Verkehrswissenschaften, Forschungsbereich für Straßenwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, TU Wien, 2010

www

DOLI (2010): *Elektronik für Materialprüfmaschinen*. DOLI Elektronik GmbH, München, http://2007.doli.de/web/index.php?option=com_content&task=view&id=22&Itemid=20, Abruf am 27.05.2010

MACROSENSORS (2010): *Macro Sensors LVDT: Tutorial*. http://www.macrosensors.com/lvdt_tutorial.html, Abruf am 04.05.2010

WIKIPEDIA (2010):
Signalverarbeitung. Abgerufen am 14.05.2010,
http://de.wikipedia.org/wiki/Signalverarbeitung
Analogsignal. Abgerufen am 14.05.2010,
http://de.wikipedia.org/wiki/Analogsignal
Analog-Digital-Umsetzer. Abgerufen am 14.05.2010,
http://de.wikipedia.org/wiki/Analog-Digital-Umsetzer
Alias-Effekt. Abgerufen am 14.05.2010,
http://de.wikipedia.org/wiki/Alias-Effekt
Versine. Abgerufen am 30.05.2010,
http://en.wikipedia.org/wiki/Versine

WILLE (2010): *Software*. APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH, WILLE Geotechnik, Göttingen, http://www.wille-geotechnik.de/85.0.html, Abgerufen am 27.05.2010

ABKÜRZUNGEN UND FORMELZEICHEN

AC	asphalt concrete (Asphaltbeton)
CEN	Comitė Europėen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
DMS	Dehnungsmessstreifen
DSR	Dynamisches Scherrheometer
EN	Europäische Norm
GVO	gebrauchsverhaltensorientiert
LVDT	linear variable displacement transformer (induktive Wegaufnehmer)
TCCT	triaxial cyclic compression test (Triaxiale zyklische Druckschwellprüfung)
UCCT	uniaxial cyclic compression test (Uniaxiale zyklische Druckschwellprüfung)

Schwingungen

T	Schwingungsdauer
f	Frequenz
φ	Phasenverschiebung
ω	Kreisfrequenz
λ	Wellenlänge
LW	Lastwechsel

Materialeigenschaften

E	Elastizitätsmodul
E^*	dynamischer Elastizitätsmodul
E_1	Speichermodul, elastischer Anteil des dynamischen Modul E*
E_2	Verlustmodul, viskoser Anteil des dynamischen Modul E*
η	dynamische Viskosität
v	kinematische Viskosität
ρ	Dichte
T	Temperatur
T_0	Referenztemperatur
R	Relaxationsmodul
f_c	Kriechrate
R	elektrischer Widerstand
ΔR	Widerstandsänderung
ρ	spezifischer Widerstand
U_A	Brückenausgangsspannung
U_B	Brückenspeisespannung

Spannungen

$\sigma_{A(t)}$	Gesamtaxialdruck
σ_c	Druck zur Behinderung der Querdehnung
$\sigma_{a(t)}$	zyklischer Axialdruck als Funktion der Zeit
σ_V	Amplitude des haversine-impulsförmigen Druckes

τ	Scherspannung

Verformungen

ε_N	Gesamtaxialverformung der Probekörper nach n Belastungszyklen
ε_l	Längsdehnung
ε_q	Querdehnung
ε_T	Temperaturgang
ΔU	Umfangsänderung
Δr	Änderung des Radius
Δl	Längenänderung
Δa	Änderung des Durchmessers
q	Querempfindlichkeit
k	k-Faktor; Dehnungsempfindlichkeit eines Dehnungsmessstreifens
k_q	Dehnungsempfindlichkeit quer zur Messrichtung
k_l	Dehnungsempfindlichkeit längs zur Messrichtung
α_B	Wärmedehnung des Bauteilwerkstoffes
α_M	Wärmedehnung des Messgitterwerkstoffes des DMS
α_R	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes des Messgitterwerkstoffes

Zustandsgrößen

h_0	Durchschnittshöhe nach der Vorbelastung der Probekörper
h_n	Durchschnittshöhe nach n Belastungszyklen
A	Querschnittsfläche
l	Länge zum Betrachtungszeitpunkt
l_0	Ausgangslänge
a	Durchmesser
v	Geschwindigkeit

Einflussgrößen

F	Kraft

Sonstige

t	Zeit

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Simulation der Verkehrslast durch eine zyklisch, dynamisch Axiallast 1
Abbildung 1-2: Simulation des Einspannungszustandes im Straßenkörper im Labor. Links: aktuell verwendeter statischer Stützdruck, rechts: gewünschter oszillierender Stützdruck 2
Abbildung 1-3: Schematische Darstellung der Weiterentwicklung des triaxialen, zyklischen Druckschwellversuchs TCCT 2
Abbildung 2-1: Beispiele für unterschiedliche Belastungsarten 4
Abbildung 2-2: Darstellung der im Falle einer zyklischen haversine-impulsförmigen Belastung (oben) und einer zyklischen Blockimpulsbelastung (unten) auf den Probekörper ausgeübten Belastung [EN 12697-25:2005] 5
Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen triaxialen Druckschwellversuch nach [EN 12697-25:2005] 8
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen uniaxialen Druckschwellversuch mit Behinderung der Querdehnung 9
Abbildung 2-5: Schematische Darstellung der Prüfeinrichtung für einen uniaxialen Druckschwellversuch ohne Behinderung der Querdehnung 9
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der 2-kreisigen, servo-hydraulischen Triaxialprüfmaschine mit ihren wichtigsten Bestandteilen 10
Abbildung 3-2: Frontansicht der beiden WDCs 580 (Hydraulikkreis 1 bzw. Hydraulikkreis 2) und dem Bedienpanel RMC7 zur Handsteuerung 12
Abbildung 3-3: Bildschirmausdruck des Überwachungsfensters von GEOsys 13
Abbildung 3-4: Ansicht der wesentlichen Elemente der Triaxialzelle 13
Abbildung 4-1: Hooke'sche Feder, Hooke'sches Gesetz 16
Abbildung 4-2: Skizze zum Zwei-Platten-Modell [Hofko B., 2006] 17
Abbildung 4-3: Newtonscher Dämpfer 18
Abbildung 4-4: Maxwell-Modell 19
Abbildung 4-5: Kelvin-Modell 20
Abbildung 4-6: Darstellung der Belastungsspannung *σ(t)* und der Materialreaktion (Dehnung) *ε(t)* unter einer haversinusförmigen Belastung für ein elastisches (links), viskoelastisches (Mitte) und viskoses (rechts) Material 21
Abbildung 4-7: Ermittlung der Temperaturfunktion $\boldsymbol{\psi T = 1 \alpha T}$ aus dynamischen Versuchen (links) und Masterkurve $\boldsymbol{E}$ in Abhängigkeit von $\boldsymbol{lg f \psi T}$ (rechts) bei der Referenztemperatur T_0 = 15° [Hürtgen H., 2000] 22
Abbildung 5-1: Klassifizierung der Signale: a) Amplituden- und zeitkontinuierliches Signal = rein analoges System, b) amplitudendiskretes, zeitkontinuierliches Signal, c) amplitudenkontinuierliches, zeitdiskretes Signal, d) amplituden- und zeitdiskretes Signal = digitales System [Best R., 1991] 24
Abbildung 5-2: Idealisierte Darstellung der Wandlung eines analogen Signals (links) über die Signalabtastung (Mitte) in ein digitales Signal (rechts) [Kappl K., 2007] 25

Abbildung 5-3: Aliaseffekt bei zu niedriger Abtastrate [Wikipedia, 2010] 26
Abbildung 5-4: Darstellung des mit Rauschen behafteten Kraftmesssignals mit den einzelnen Messpunkten (schwarze Linie) und des mathematischen regressierten, sinusförmigen Belastungssignals (rote Linie) [Kappl K., 2007] 27
Abbildung 5-5: Schematische Darstellung des Auswertungsprogrammes zur Ermittlung sämtlicher Materialparameter der Triaxialprüfung 28
Abbildung 5-6: Darstellung der TCCT-Messwerte von der axialen Belastung σ_{ax}, den resultierenden Dehnungen ε_{ax} und der mathematischen Näherungsfunktion (einfacher Sinusansatz) in Abhängigkeit von der Zeit (links) und als Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts) [Kappl K., 2007] 33
Abbildung 5-7: Darstellung der TCCT-Messwerte von der axialen Belastung σ_{ax}, den resultierenden Dehnungen ε_{ax} und der mathematischen Näherungsfunktion (doppelter Sinusansatz mit linearer Funktion) in Abhängigkeit von der Zeit (links) und als Spannungs-Dehnungsdiagramm (rechts) [Kappl K., 2007] 34
Abbildung 5-8: Vergleich des einfachen (rote Linie) und des doppelten (blaue Linie) Sinusansatzes im Kraft-Verformungsdiagramm für eine Schwingung am Beispiel der axialen Verformungen [Kappl K., 2007] 34
Abbildung 5-9: Vergleich der Bestimmtheitsmaße R^2 der drei Regressionsansätze bei den axialen Deformationen für die ersten 1000 Lastwechsel in einfach logarithmischer Skalierung [Kappl K., 2007] 35
Abbildung 6-1: Induktive Wegaufnehmer (LVDT) (unten im eingebauten Zustand) 36
Abbildung 6-2: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines LVDT [Macrosensors 2010] 37
Abbildung 6-3: Schematische Darstellung der radialen Verformungsmessung mittels LVDTs bei einem dynamischen Triaxialversuch an der TU Braunschweig [Leutner R., 2006] 37
Abbildung 6-4: Kettenextensometer [Trautwein U., 2005] 38
Abbildung 6-5: Radialmessbügel [Kappl K., 2007] 39
Abbildung 6-6: Graphische Darstellung der Messsignale bei einem zyklisch dynamischen Druckschwellversuch 39
Abbildung 6-7: Ansicht des Prototyps am unverformten und am deformierten Probekörper (links und Mitte) und des versiegelten ersten Testtyps (rechts) [Kappl K., 2007] 40
Abbildung 6-8: Dehnungsmessringe (links) und vorbereiteter Probekörper vor Aufsetzen der Zellhaube (rechts) [Krebs H. G., 1981] 41
Abbildung 6-9: Widerstandsdraht in 8 Windungen über die gesamte Höhe um den Probekörper gewickelt [Huschek S., 1983] 42
Abbildung 6-10: Dehnungsmessstreifen direkt auf Asphaltprobekörper appliziert 42
Abbildung 6-11: Schema eines Folien-DMS [Keil S., 1995] 43
Abbildung 6-12: Einige typische Messgitterformen sogenannter „Linear-DMS“ [Hoffmann K., 1987] 44

Abbildung 6-13: Schematische Darstellung der Dehnungseinleitung in das DMS-Messgitter [Hoffmann K., 1987] 44
Abbildung 6-14: Schematische Darstellung der Messwerte unterschiedlich langer Messgitter bei einem inhomogenem Material (Asphalt) [Hoffmann K., 1987] 45
Abbildung 6-15: Elektrischer Leiter unter Längsbeanspruchung [Mang H., 2000] 46
Abbildung 6-16: Zur Definition der Querempfindlichkeit: a) DMS in seiner aktiven Richtung einachsig beansprucht, b) DMS quer zu seiner aktiven Richtung einachsig beansprucht [Hoffmann K., 1987] 47
Abbildung 6-17: Temperaturabhängigkeit des k-Faktors verschiedener Messgitterlegierungen [Hoffmann K., 1987] 48
Abbildung 6-18: Zeitlicher Verlauf des Messwertes eines DMS nach spontaner Belastung eines Bauteils und nach dessen spontaner Entlastung (schematisch) [Hoffmann K., 1987] 50
Abbildung 6-19: Zeitlicher Verlauf der Dehnung eines Bauteils während konstanter Belastung und nach vollständiger Entlastung (elastische Nachwirkung) [Hoffmann K., 1987] 51
Abbildung 6-20: Schema der Kriech-Kompensation [Hoffmann K., 1987] 51
Abbildung 6-21: Zeit- und temperaturabhängiges Kriechen eines mit DMS versehenen Messobjektes [Hoffmann K., 1987] 52
Abbildung 6-22: Schematischer Aufbau einer Messeinrichtung [Mang H., 2000] 53
Abbildung 6-23: Wheatstone'sche Brückenschaltung in unterschiedlicher Darstellungsweise [Hoffmann K., 1987] 53
Abbildung 6-24: Anwendungsformen der Wheatstone'schen Brückenschaltung in der DMS-Technik: a) Viertelbrücke, b) Halbbrücke, c) Zweiviertel- oder Diagonalbrücke, d) Vollbrücke [Hoffmann K., 1987] 55
Abbildung 6-25: Prinzip der Shunt-Kalibrierung 56
Abbildung 6-26: Mögliche Fehlerquellen und Störeinflüsse auf eine DMS-Messstelle [Hoffmann K., 1987] 57
Abbildung 6-27: Einfluss der Kabelwiderstände bei der Viertelbrückenschaltung 59
Abbildung 6-28: Diagramm zur Ermittlung der Restanzeige bzw. des Signalverlustes infolge von Leitungswiderständen [Hoffmann K., 1987] 60
Abbildung 6-29: Dehnungsübertragung vom Bauteil auf den DMS durch den Klebstoff: a) ungeeigneter (zu weicher) Klebstoff und zu dicke Schicht, b) geeigneter Klebstoff in dünner Schicht [Hoffmann K., 1987] 61
Abbildung 7-1: Graphische Gegenüberstellung der verschiedenen Sieblinien 66
Abbildung 7-2: Darstellung des Gegenlaufzwangsmischers GZM 30+ im offenen Zustand mit Mischwerkzeug, Mischtrommel, Steuereinheit und Wärmeisolier-einhausung [Kappl K., 2007] 67
Abbildung 7-3: Darstellung des im Labor verwendeten Walzsegmentverdichters (Mitte, rechts) und schematische Skizze des Verdichtungsprinzips (links) [Kappl K., 2007] 68

Abbildung 7-4: Schematische Darstellung des Bohrschemas für vier horizontal gebohrte Bohrkerne 68
Abbildung 7-5: Applizierter Dehnungsmessstreifen zur Messung radialer Verformungen 69
Abbildung 7-6: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs 71
Abbildung 8-1: Darstellung des Versuchsablaufs bei einer Belastung mit mehreren Frequenzen (rot) und seiner Kriechkurve (blau) 73
Abbildung 8-2: Vergleich der Phasenwinkel φ_{rad} der Konsolidierungsphase (rot) und der eingeschwungenen Phase (blau) 73
Abbildung 8-3: Radiale Phasenwinkel φ_{rad} in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz (rechts in halblogarithmischer Darstellung) 74
Abbildung 8-4: Gemittelte axiale Phasenwinkel φ_{ax_MW} in Abhängigkeit von der Temperatur und der Frequenz (rechts in halblogarithmischer Darstellung) 74
Abbildung 8-5: Verhalten des Stützdruckes (blau) bei Frequenzen von 0,1 Hz (links) und 0,5 Hz (rechts) 75
Abbildung 8-6: Verhalten des Stützdruckes (blau) bei Frequenzen von 1 Hz (links) und 3 Hz (rechts) 76
Abbildung 8-7: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 10 °C Prüftemperatur 76
Abbildung 8-8: Schubmodule des polymermodifizierten Bitumen PmB 25/55-65 bei unterschiedlichen Frequenzen und Temperaturen 77
Abbildung 8-9: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 30 °C Prüftemperatur 77
Abbildung 8-10: Radialer und axialer Phasenwinkel im Vergleich mit dem Phasenwinkel des polymermodifizierten Bitumens PmB 25/55-65 bei 50 °C Prüftemperatur 78
Abbildung 8-11: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 10 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes 78
Abbildung 8-12: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 30 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes 79
Abbildung 8-13: Radiale Phasenwinkel bei 5,3 M% Bindemittelgehalt (BM), 50 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Hohlraumgehaltes 79
Abbildung 8-14: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 10 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes 80
Abbildung 8-15: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 30 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes 80
Abbildung 8-16: Radiale Phasenwinkel bei 3 V% Zielhohlraumgehalt (ZHR), 50 °C Prüftemperatur (PT) und Variation des Bindemittelgehaltes 80

TABELLENVERZEICHNIS

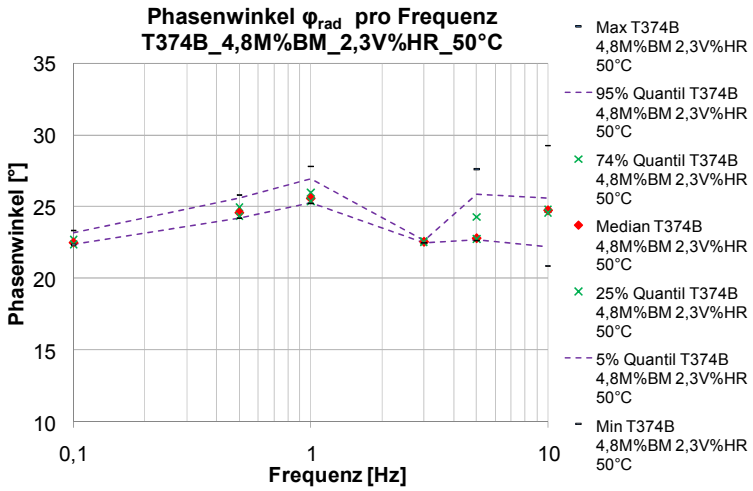
Tabelle 2-1: Prüfbedingungen für triaxiale Druckbeanspruchungen (haversine-impulsförmig) [EN 13108-20:2006] 7
Tabelle 3-1: Überblick über die wichtigsten Kenndaten der Prüfanlage „Triaxialprüfmaschine LFV 63/50 (K12595)“ [Kappl K., 2007] 11
Tabelle 3-2: Abmessungen der Triaxialzelle 13
Tabelle 5-1: Auszug aus einem Rohdatenfile (*.txt) eines TCCT-Versuchs 29
Tabelle 6-1: Mittlere k-Faktoren von DMS mit verschiedenen Messgitterwerkstoffen [Hoffmann K., 1987] 47
Tabelle 7-1: Übersicht über die Gesteinseigenschaften von Loja gemäß ÖNORM B3130 und EN 13043 63
Tabelle 7-2: Übersicht über die Bitumenkennwerte von PmB 25/55-65 64
Tabelle 7-3: Übersicht über die Variation des Asphaltmischgutes 65
Tabelle 7-4: Überblick über die einzelnen Probekörper und ihrer Zuteilung der verschiedenen Korngruppen mit den jeweiligen Laborcodes (weiß) sowie einer Zuteilung der dadurch unterschiedlichen Gesamtsieblinien (färbig) 65
Tabelle 7-5: Tabellarische Gegenüberstellung der verschiedenen Sieblinien 66
Tabelle 7-6: Überblick über die durchgeführten zyklischen, dynamischen Druckschwellversuche 70
Tabelle 8-1: Anzahl der Lastwechsel pro Frequenzpaket und Anzahl der analysierten Lastwechsel 73

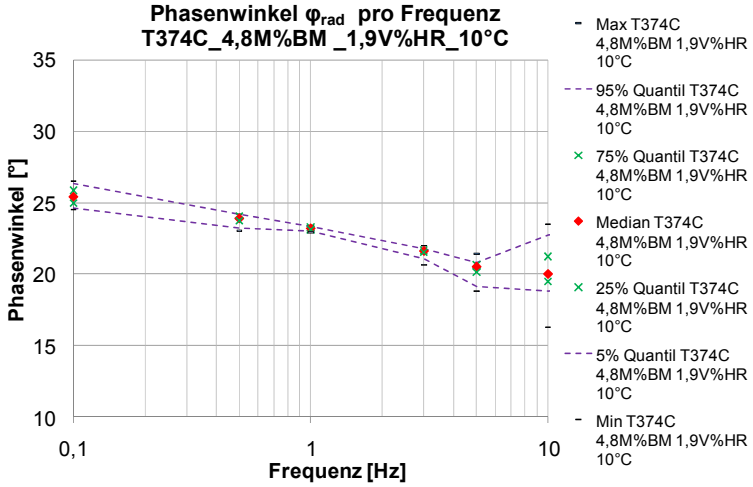
ANHANG

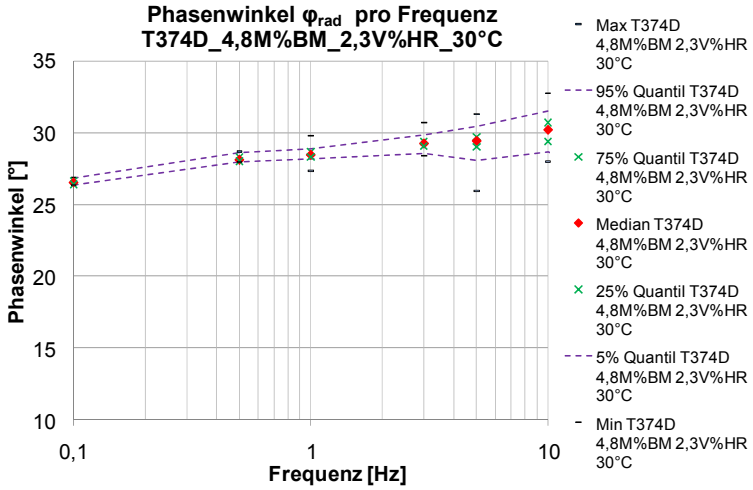
A 1 Tabellarische Zusammenfassung aller durchgeführter Versuche

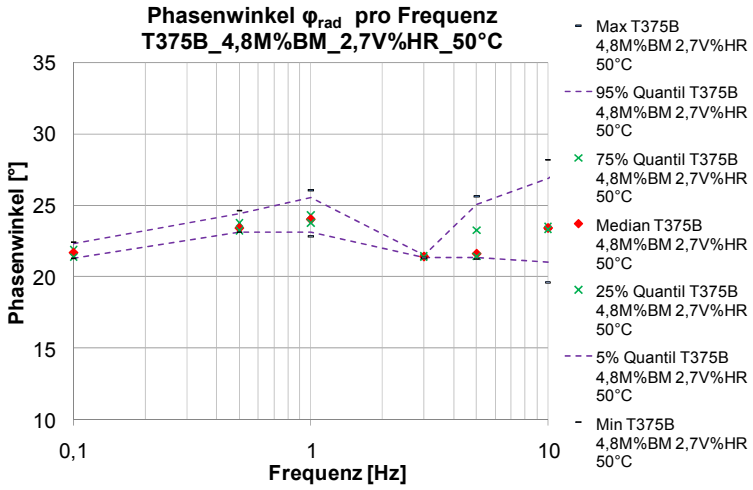
Probekörper	Höhe	Ø	Masse tr.	Masse u. W.	Masse feu.	Raumdichte	Rohdichte	Hohlraumgehalt	Bindemittelgehalt	Prüfprogramm	Prüftemperatur	Mediane der radialen Phasenwinkel φ_{rad}						
	mm	mm	g	g	g	kg/m3	kg/m3	%	%		°C	0,1	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0	0,1	0,5	1,0
T374B	199,3	99,4	3859,9	2325,7	3861,8	2505,5	2564,0	2,3	4,80	TCCT	50		26,13	25,91	22,55	22,80	24,73	22,50	24,56	25,55
T374C	199,1	99,4	3875,0	2340,9	3876,7	2515,8	2564,0	1,9	4,80	UCCT	10	25,08	24,16	23,10	21,60	20,51	20,00	25,40	23,89	23,19
T374D	199,4	99,4	3860,6	2325,6	3862,7	2504,3	2564,0	2,3	4,80	UCCT	30	29,66	29,25	29,05	29,23	29,41	30,18	26,55	28,11	28,45
T375B	201,6	99,3	3892,2	2339,0	3894,3	2495,3	2564,0	2,7	4,80	TCCT	50	27,12	25,35	24,57	21,41	21,61	23,41	21,68	23,40	24,01
T375C	202,2	99,3	3925,1	2367,2	3927,1	2509,0	2564,0	2,1	4,80	UCCT	10	24,97	22,26	20,67	19,29	18,82	18,88	24,59	22,91	21,70
T375D	202,1	99,3	3863,3	2308,7	3866,6	2472,6	2564,0	3,6	4,80	UCCT	30	28,13	28,73	28,52	28,57	28,09	28,70	26,13	27,63	27,91
T378B	199,2	99,3	3757,8	2227,0	3760,5	2443,4	2534,0	3,6	5,80	UCCT	30	28,32	28,96	28,88	29,45	29,59	30,43	26,95	28,35	28,73
T378C	199,7	99,3	3815,4	2279,4	3817,2	2473,9	2534,0	2,4	5,80	UCCT	10	28,13	27,59	26,48	24,17	23,38	23,95	29,00	27,24	25,98
T378D	199,5	99,3	3788,9	2254,0	3791,6	2457,0	2534,0	3,0	5,80	TCCT	50	24,05	25,29	25,67	23,02	24,52	24,82	23,42	25,57	26,30
T379B	200,2	99,3	3811,0	2271,6	3814,0	2463,7	2534,0	2,8	5,80	TCCT	50	27,95	24,31	23,17	20,62	20,28	22,51	21,48	22,96	23,25
T379C	195,6	99,3	3738,9	2234,9	3741,0	2475,3	2534,0	2,3	5,80	UCCT	10	28,75	26,09	24,64	22,65	21,56	20,54	26,70	24,81	23,78
T379D	196,0	99,3	3707,3	2203,2	3711,1	2451,5	2534,0	3,3	5,80	UCCT	30	27,14	27,52	27,54	27,73	27,81	28,02	25,87	26,89	27,15
T381B	198,8	99,2	3707,6	2184,9	3713,0	2419,2	2552,5	5,2	5,30	UCCT	30	28,81	29,11	29,11	29,63	29,52	31,07	27,14	28,64	29,00
T381C	199,1	99,2	3741,9	2215,5	3746,3	2437,3	2552,5	4,5	5,30	UCCT	10	23,85	22,99	22,16	20,40	19,57	18,50	23,83	22,84	22,20
T381D	198,7	99,2	3713,0	2190,1	3718,2	2422,8	2552,5	5,1	5,30	TCCT	50		25,00	24,44	22,27	23,84	24,33	22,42	24,15	24,58
T382B	199,1	99,2	3716,0	2188,0	3720,9	2417,1	2552,5	5,3	5,30	TCCT	50		25,23	24,64	22,09	23,25	24,22	22,04	24,11	24,55
T382C	199,0	99,2	3754,1	2225,6	3757,8	2443,0	2552,5	4,3	5,30	UCCT	10	26,18	25,63	24,35	22,15	21,17	20,45	26,95	25,10	23,77
T382D	198,9	99,2	3697,7	2173,4	3702,7	2410,9	2552,5	5,5	5,30	UCCT	30	28,23	29,05	29,05	29,46	29,21	29,63	26,77	28,38	28,68
T383B	199,5	99,3	3623,1	2099,8	3634,0	2354,7	2552,5	7,8	5,30	UCCT	10	28,12	26,70	25,05	23,07	22,07	21,24	27,32	25,37	24,67
T383D	201,0	99,3	3649,7	2115,7	3660,7	2355,4	2552,5	7,7	5,30	TCCT	50		26,68	25,64	23,28					
T390B	199,1	99,4	3638,0	2114,8	3649,9	2363,0	2552,5	7,4	5,30	UCCT	10	28,46	27,22	25,48	22,79	21,51	21,31	28,08	26,07	24,62
T390D	198,5	99,4	3613,4	2099,5	3628,0	2357,2	2552,5	7,7	5,30	TCCT	50	30,06	26,01	25,27	22,29	21,77	24,86	23,21	25,09	26,20
T391B	200,6	99,4	3624,2	2090,9	3635,8	2339,1	2552,5	8,4	5,30	UCCT	30	27,30	27,73	27,42	28,16	28,27	29,49	25,45	26,68	26,99
T391C	201,3	99,4	3647,0	2108,6	3657,3	2348,0	2552,5	8,0	5,30	UCCT	30	26,01	26,91	26,99	27,51	27,64	28,61			
T393B	199,7	99,4	3813,3	2273,5	3818,3	2461,3	2542,2	3,2	5,30	UCCT	30	25,16	26,43	26,19	26,59	26,71	26,97	23,99	25,54	25,89
T393C	199,2	99,4	3808,6	2273,3	3813,1	2466,3	2542,2	3,0	5,30	TCCT	50	27,53	25,52	25,08	22,19	25,01	23,99	22,56	24,41	25,14
T394B	199,6	99,4	3790,6	2251,9	3795,1	2449,2	2542,2	3,7	5,30	UCCT	10	25,06	24,72	23,93	21,96	20,45	19,15	27,00	25,70	24,76
T394C	199,1	99,4	3800,0	2264,9	3803,9	2462,0	2542,2	3,2	5,30	UCCT	30	25,78	26,97	26,85	27,12	27,23	27,38	24,05	25,81	26,20
T394D	199,8	99,4	3786,1	2248,2	3791,5	2446,1	2542,2	3,8	5,30	UCCT	10	25,30	22,91	21,46	19,33	18,54	17,95	24,22	22,95	22,01
T373A	196,3	99,7	3773,0	2250,6	3775,7	2466,8	2542,2	3,0	5,30	TCCT	50		23,88	23,22	21,70	25,59	24,20	20,76	22,47	22,85

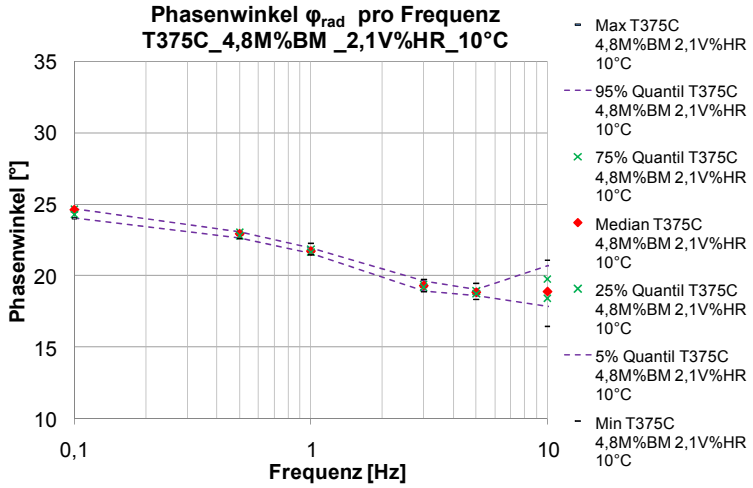
A 2 Graphische Darstellung der radialen Phasenwinkel aller durchgeführter Versuche

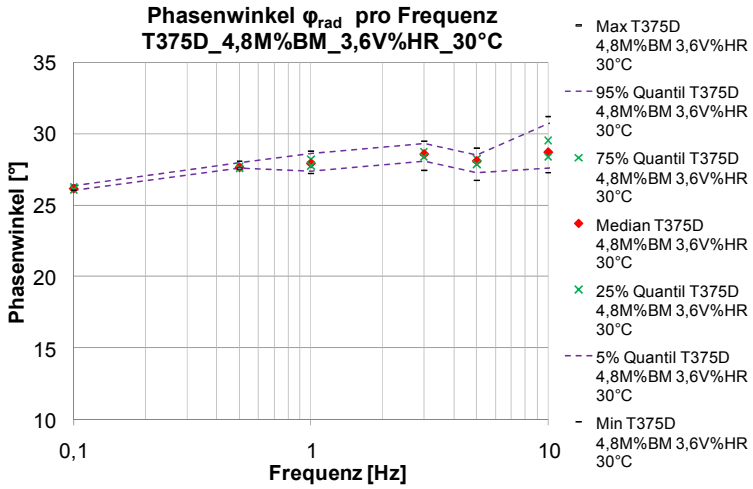


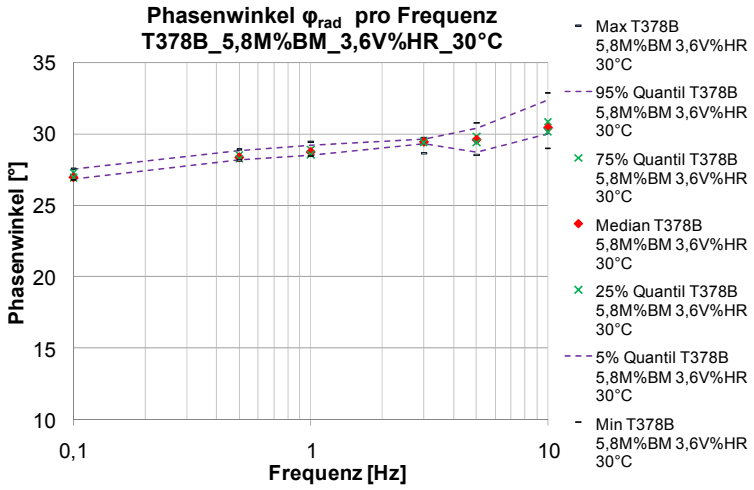


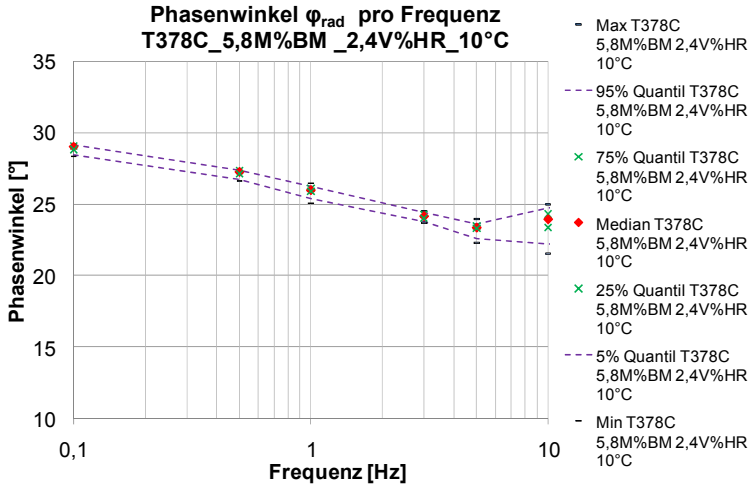


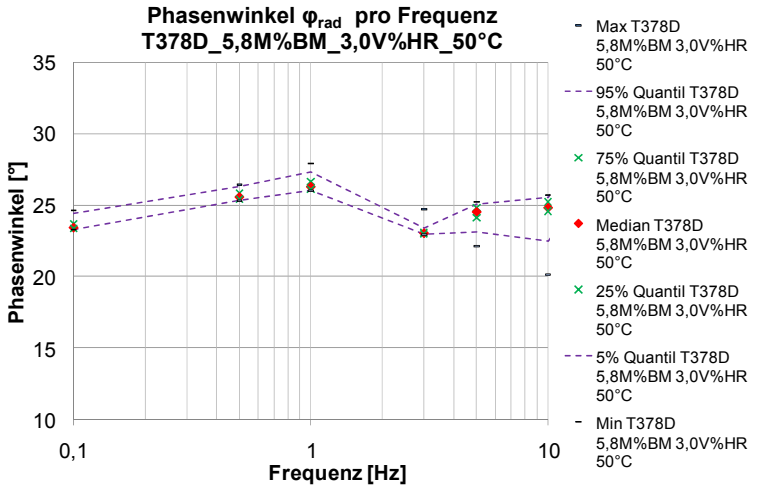

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T375B_4,8M%BM_2,7V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
95% Quantil T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
75% Quantil T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
Median T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
25% Quantil T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
5% Quantil T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C
Min T375B 4,8M%BM 2,7V%HR 50°C

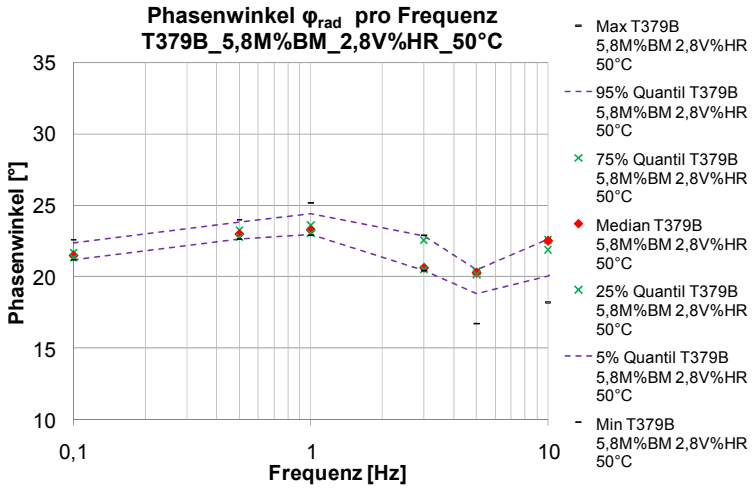

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T375C_4,8M%BM _2,1V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
95% Quantil T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
75% Quantil T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
Median T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
25% Quantil T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
5% Quantil T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C
Min T375C 4,8M%BM 2,1V%HR 10°C

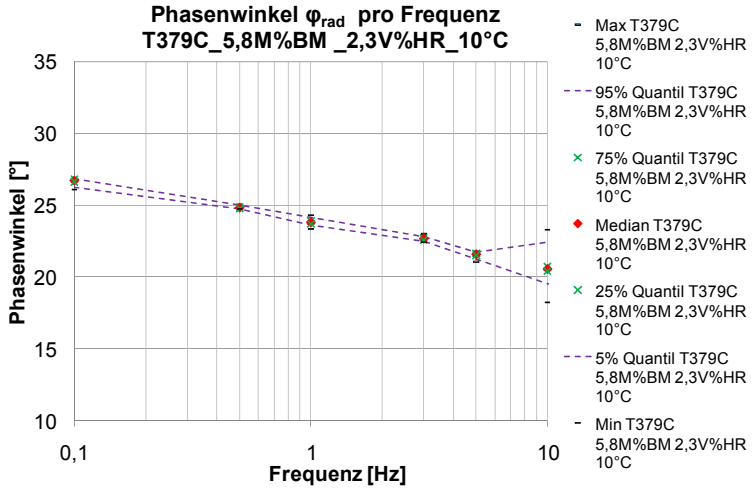

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T375D_4,8M%BM_3,6V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
95% Quantil T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
75% Quantil T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
Median T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
25% Quantil T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
5% Quantil T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C
Min T375D 4,8M%BM 3,6V%HR 30°C

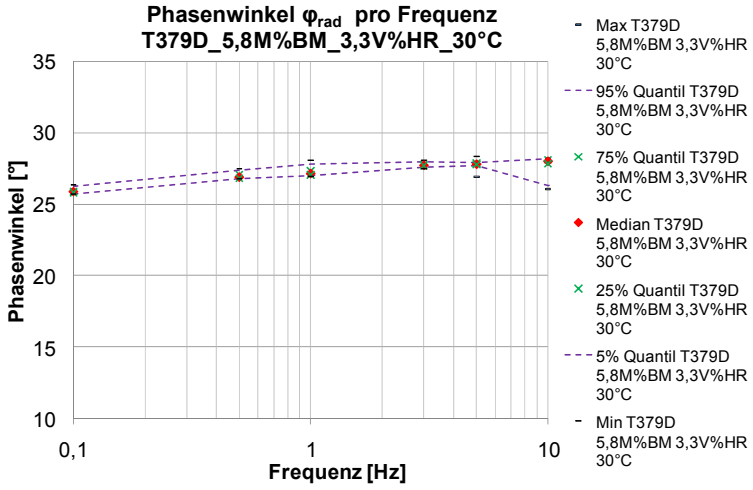

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T378B_5,8M%BM_3,6V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
95% Quantil T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
75% Quantil T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
Median T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
25% Quantil T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
5% Quantil T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C
Min T378B 5,8M%BM 3,6V%HR 30°C

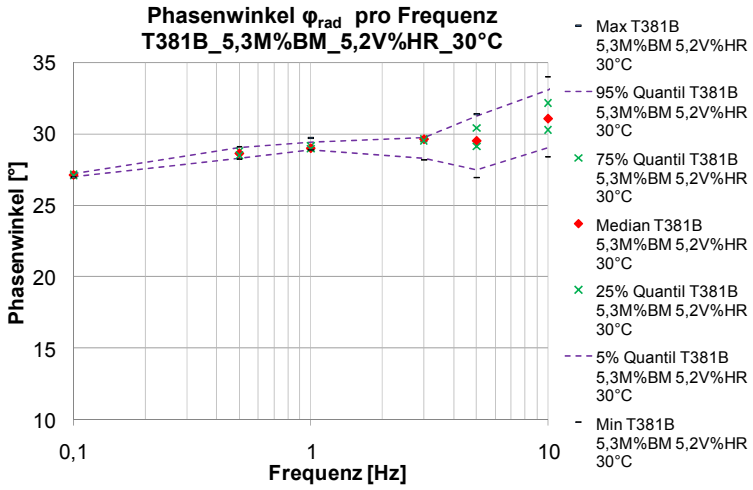

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T378C_5,8M%BM _2,4V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
95% Quantil T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
75% Quantil T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
Median T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
25% Quantil T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
5% Quantil T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C
Min T378C 5,8M%BM 2,4V%HR 10°C

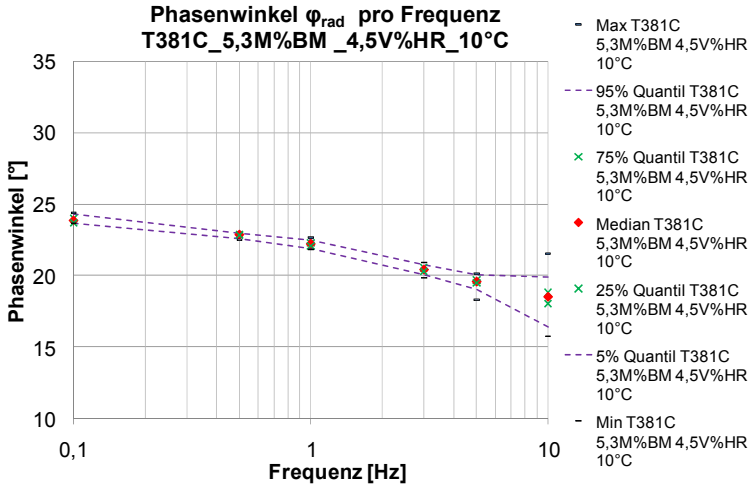

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T378D_5,8M%BM_3,0V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
95% Quantil T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
75% Quantil T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
Median T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
25% Quantil T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
5% Quantil T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C
Min T378D 5,8M%BM 3,0V%HR 50°C

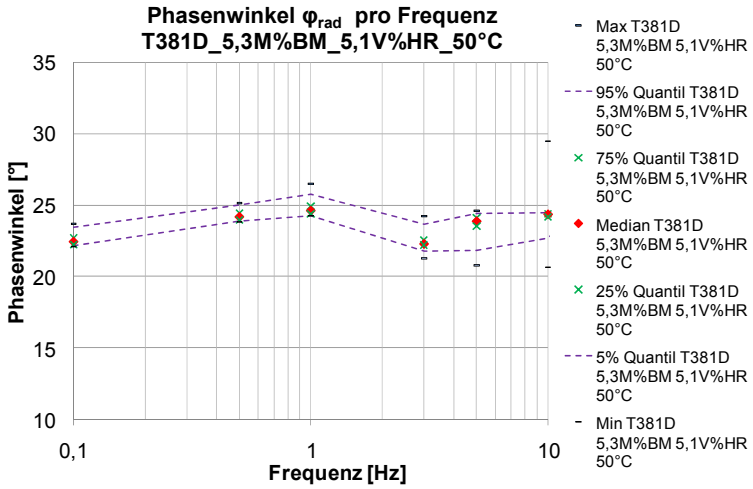

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T379B_5,8M%BM_2,8V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
95% Quantil T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
75% Quantil T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
Median T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
25% Quantil T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
5% Quantil T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C
Min T379B 5,8M%BM 2,8V%HR 50°C

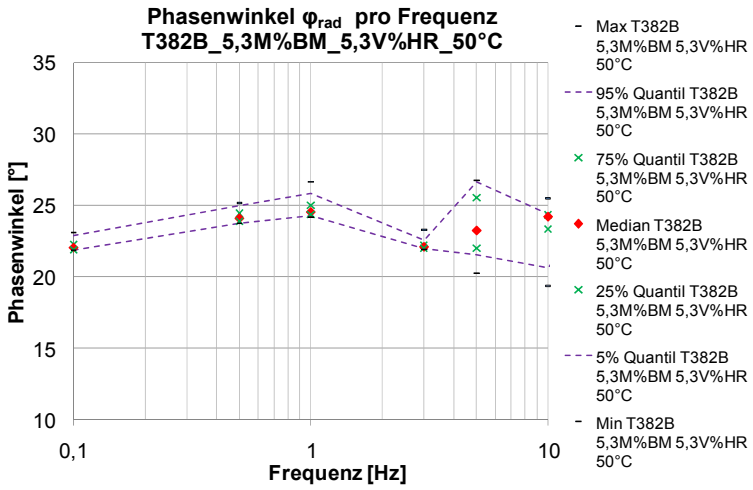

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T379C_5,8M%BM _2,3V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
95% Quantil T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
75% Quantil T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
Median T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
25% Quantil T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
5% Quantil T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C
Min T379C 5,8M%BM 2,3V%HR 10°C

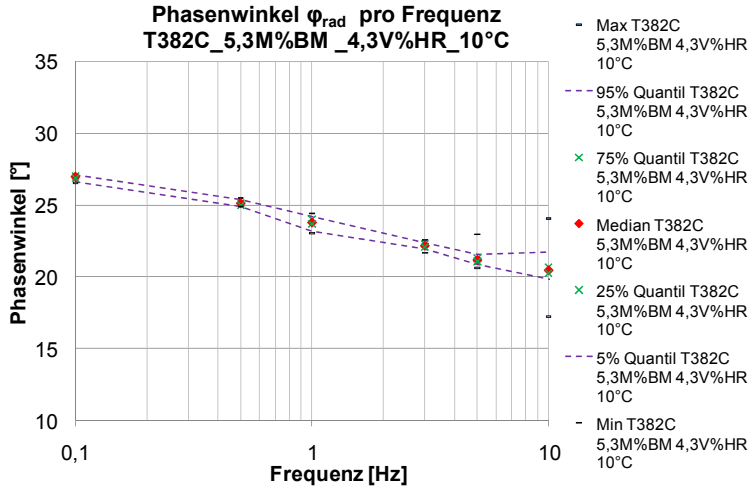

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T379D_5,8M%BM_3,3V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
95% Quantil T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
75% Quantil T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
Median T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
25% Quantil T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
5% Quantil T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C
Min T379D 5,8M%BM 3,3V%HR 30°C

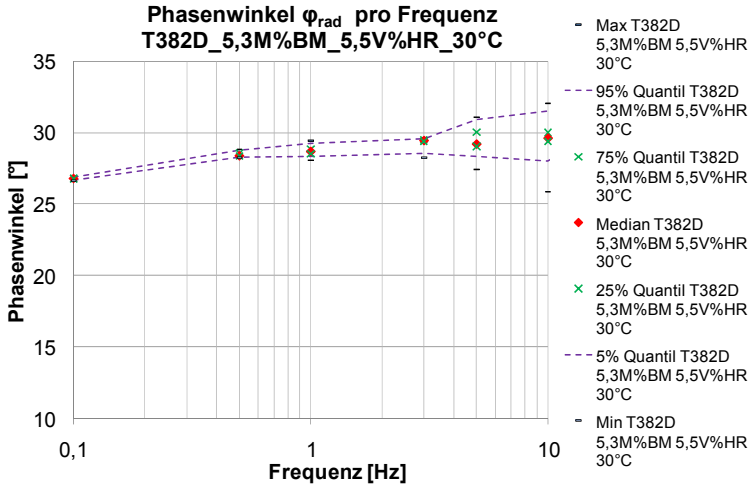

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T381B_5,3M%BM_5,2V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
95% Quantil T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
75% Quantil T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
Median T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
25% Quantil T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
5% Quantil T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C
Min T381B 5,3M%BM 5,2V%HR 30°C

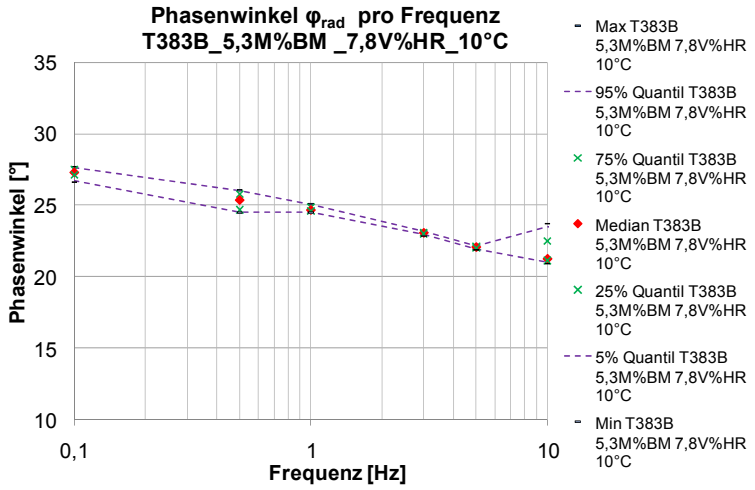

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T381C_5,3M%BM _4,5V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
95% Quantil T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
75% Quantil T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
Median T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
25% Quantil T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
5% Quantil T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C
Min T381C 5,3M%BM 4,5V%HR 10°C

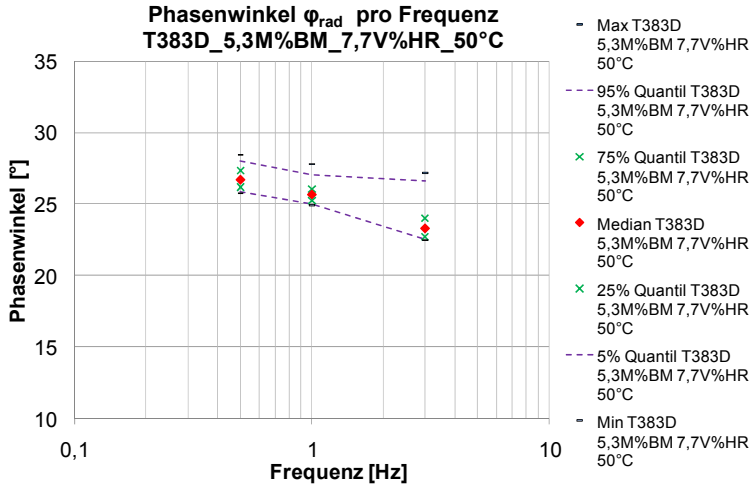

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T381D_5,3M%BM_5,1V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
95% Quantil T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
75% Quantil T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
Median T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
25% Quantil T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
5% Quantil T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C
Min T381D 5,3M%BM 5,1V%HR 50°C

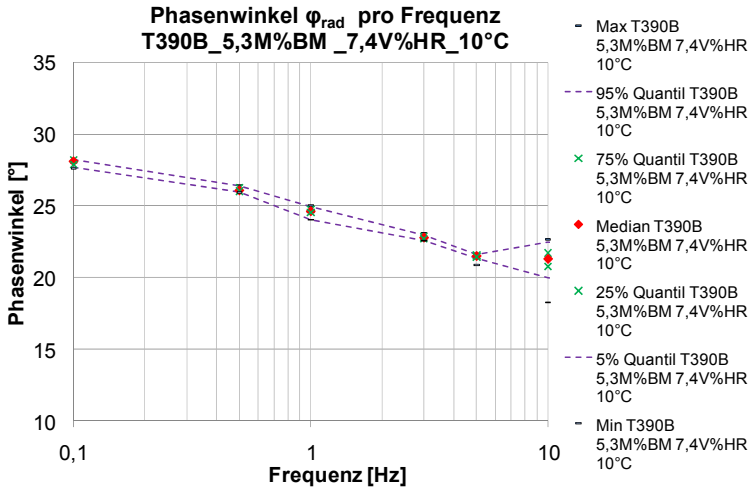

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T382B_5,3M%BM_5,3V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
95% Quantil T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
75% Quantil T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
Median T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
25% Quantil T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
5% Quantil T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C
Min T382B 5,3M%BM 5,3V%HR 50°C

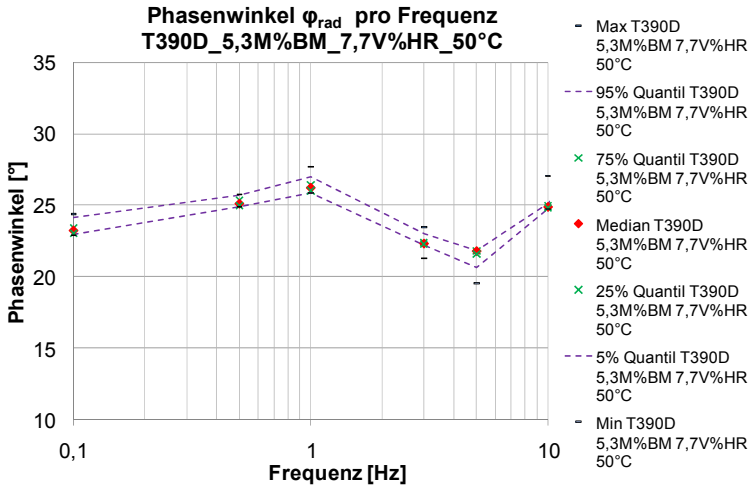

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T382C_5,3M%BM _4,3V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
95% Quantil T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
75% Quantil T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
Median T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
25% Quantil T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
5% Quantil T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C
Min T382C 5,3M%BM 4,3V%HR 10°C

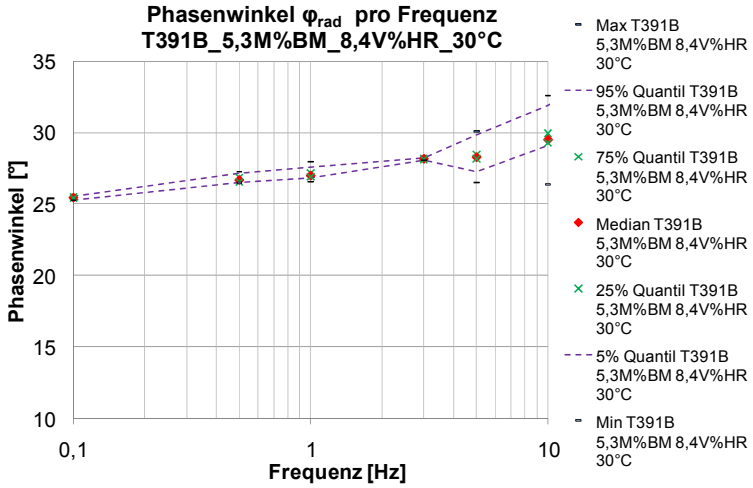

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T382D_5,3M%BM_5,5V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
95% Quantil T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
75% Quantil T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
Median T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
25% Quantil T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
5% Quantil T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C
Min T382D 5,3M%BM 5,5V%HR 30°C

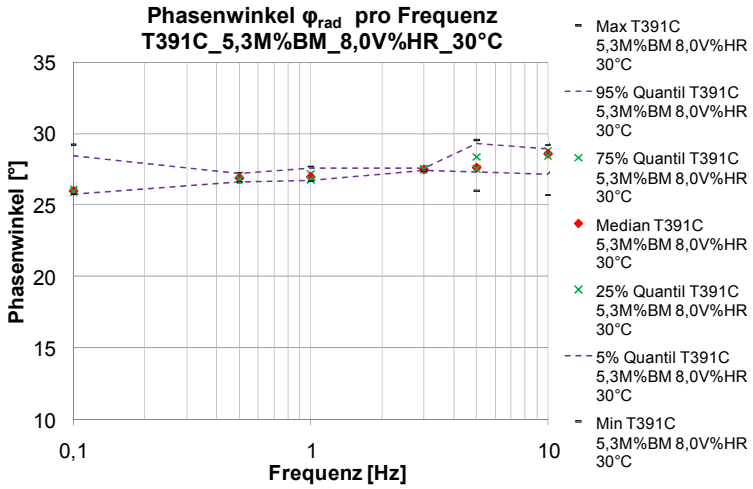

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T383B_5,3M%BM _7,8V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
95% Quantil T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
75% Quantil T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
Median T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
25% Quantil T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
5% Quantil T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C
Min T383B 5,3M%BM 7,8V%HR 10°C

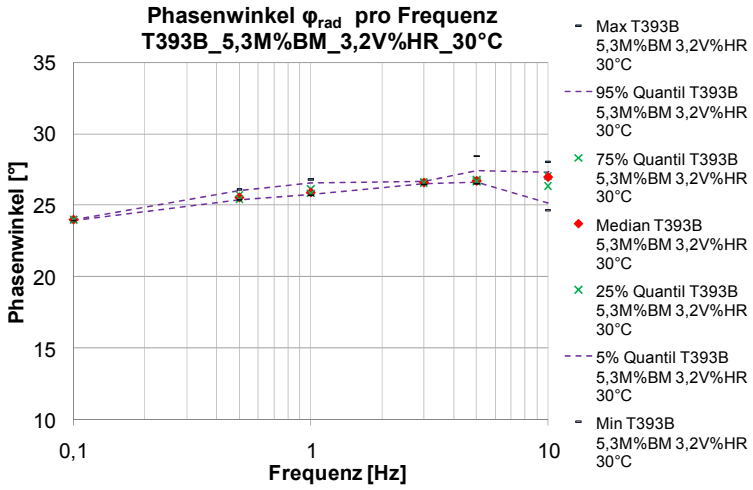

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T383D_5,3M%BM_7,7V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
95% Quantil T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
75% Quantil T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
Median T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
25% Quantil T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
5% Quantil T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
Min T383D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C

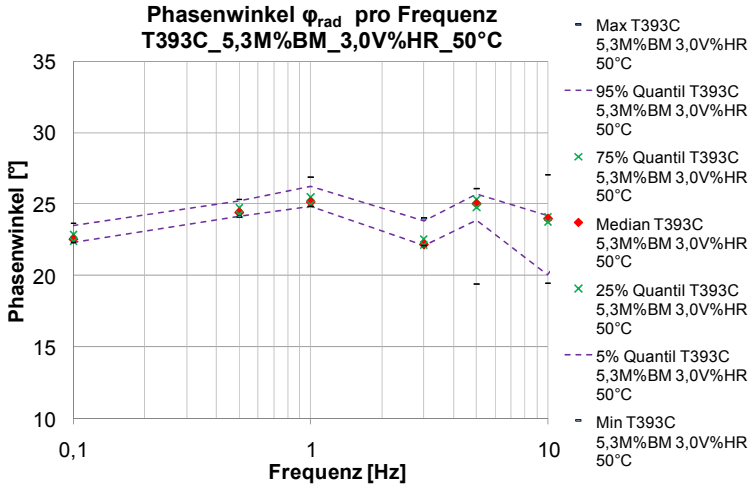

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T390B_5,3M%BM _7,4V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
95% Quantil T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
75% Quantil T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
Median T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
25% Quantil T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
5% Quantil T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C
Min T390B 5,3M%BM 7,4V%HR 10°C

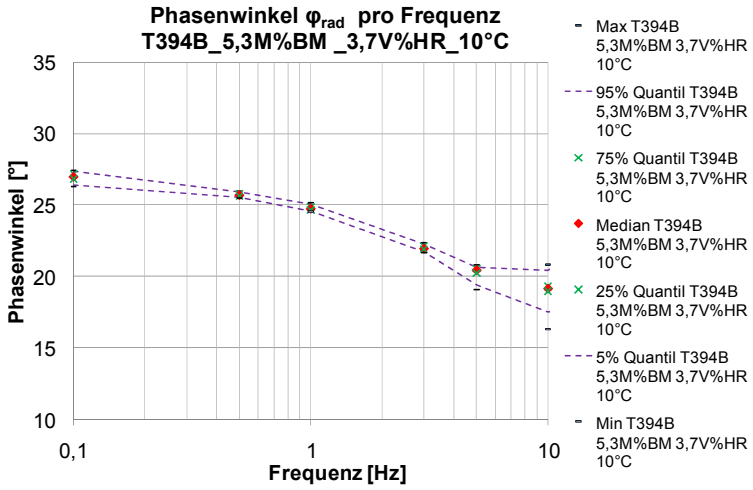

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T390D_5,3M%BM_7,7V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
95% Quantil T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
75% Quantil T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
Median T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
25% Quantil T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
5% Quantil T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C
Min T390D 5,3M%BM 7,7V%HR 50°C

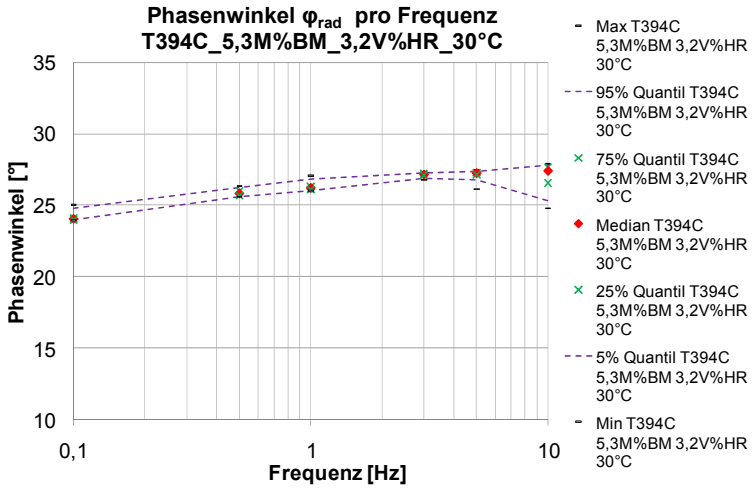

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T391B_5,3M%BM_8,4V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
95% Quantil T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
75% Quantil T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
Median T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
25% Quantil T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
5% Quantil T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C
Min T391B 5,3M%BM 8,4V%HR 30°C

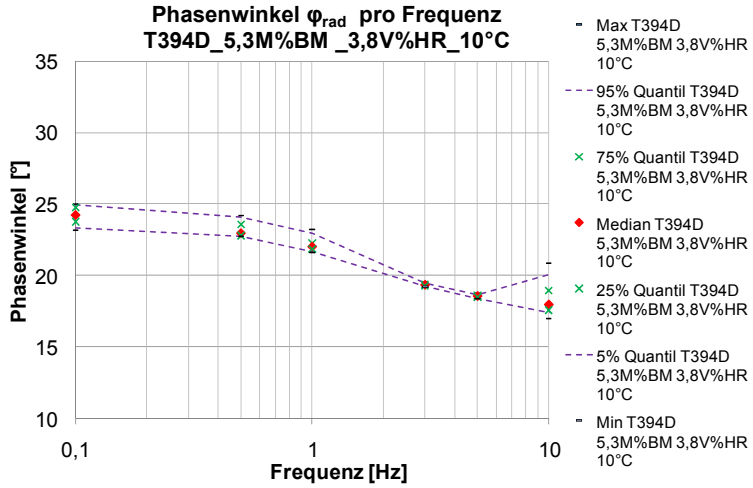

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T391C_5,3M%BM_8,0V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
95% Quantil T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
75% Quantil T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
Median T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
25% Quantil T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
5% Quantil T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C
Min T391C 5,3M%BM 8,0V%HR 30°C

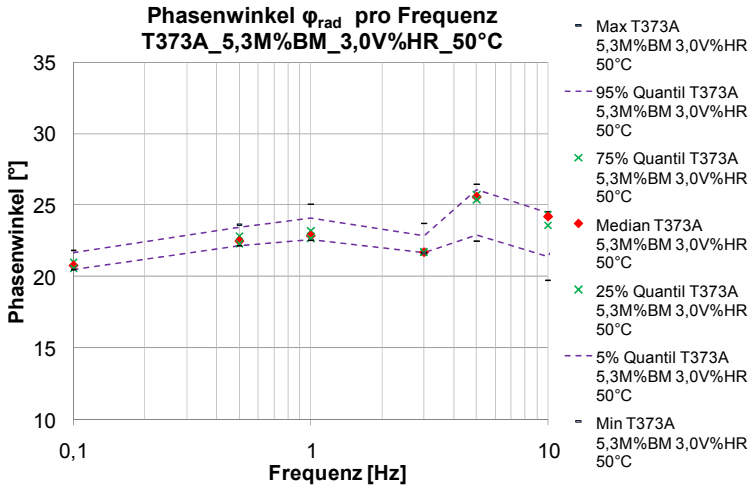

Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T393B_5,3M%BM_3,2V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
95% Quantil T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
75% Quantil T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
Median T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
25% Quantil T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
5% Quantil T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
Min T393B 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C


Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T393C_5,3M%BM_3,0V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
95% Quantil T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
75% Quantil T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
Median T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
25% Quantil T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
5% Quantil T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
Min T393C 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C


Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T394B_5,3M%BM _3,7V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
95% Quantil T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
75% Quantil T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
Median T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
25% Quantil T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
5% Quantil T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C
Min T394B 5,3M%BM 3,7V%HR 10°C


Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T394C_5,3M%BM_3,2V%HR_30°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
95% Quantil T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
75% Quantil T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
Median T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
25% Quantil T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
5% Quantil T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C
Min T394C 5,3M%BM 3,2V%HR 30°C


Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T394D_5,3M%BM _3,8V%HR_10°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
95% Quantil T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
75% Quantil T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
Median T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
25% Quantil T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
5% Quantil T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C
Min T394D 5,3M%BM 3,8V%HR 10°C


Phasenwinkel φrad pro Frequenz
T373A_5,3M%BM_3,0V%HR_50°C
Phasenwinkel [°]
35
30
25
20
15
10
0,1
1
10
Frequenz [Hz]
Max T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
95% Quantil T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
75% Quantil T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
Median T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
25% Quantil T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
5% Quantil T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C
Min T373A 5,3M%BM 3,0V%HR 50°C