



Technische
Universität
Braunschweig



Verhalten von Bitumen und Asphalt diesseits und jenseits des linear-viskoelastischen Materialverhaltens

Michael P. Wistuba, Technische Universität Braunschweig

Inhalt

1. Feder-Experiment erster Teil
2. LVE Bereich
3. Feder-Experiment zweiter Teil
4. Verhalten außerhalb des LVE Bereichs
5. Erfahrungen am ISBS
6. Schlussfolgerungen

Feder-Experiment erster Teil

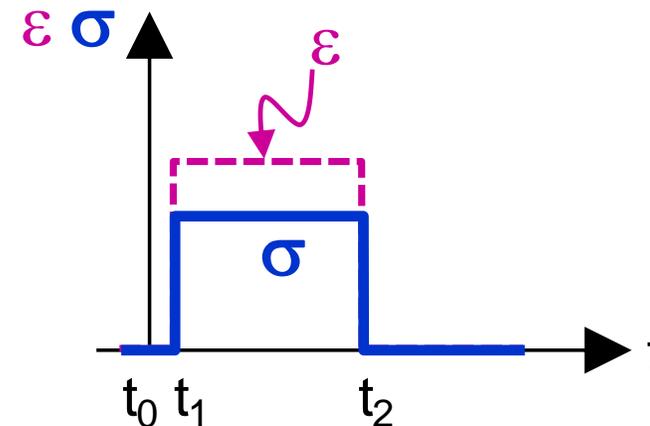
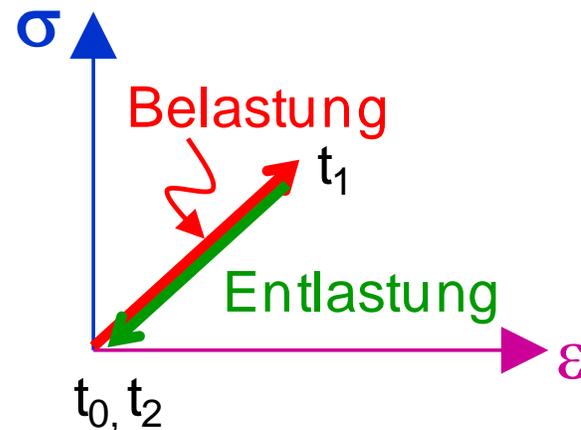
Linearität

- **Linearität** ist die Eigenschaft, auf die Veränderung der Kraft stets mit einer dazu proportionalen Änderung der Verformung zu reagieren.
- **Federmodell:**
 - Belastung → spontane (elastische) Verformung
 - Entlastung → spontane Rückstellung (reversibel, keine verbleibende Verformung, keine Energiedissipation)
- **Hooke'sches Gesetz:** Dehnung ε linear proportional zur wirkenden Spannung σ



$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

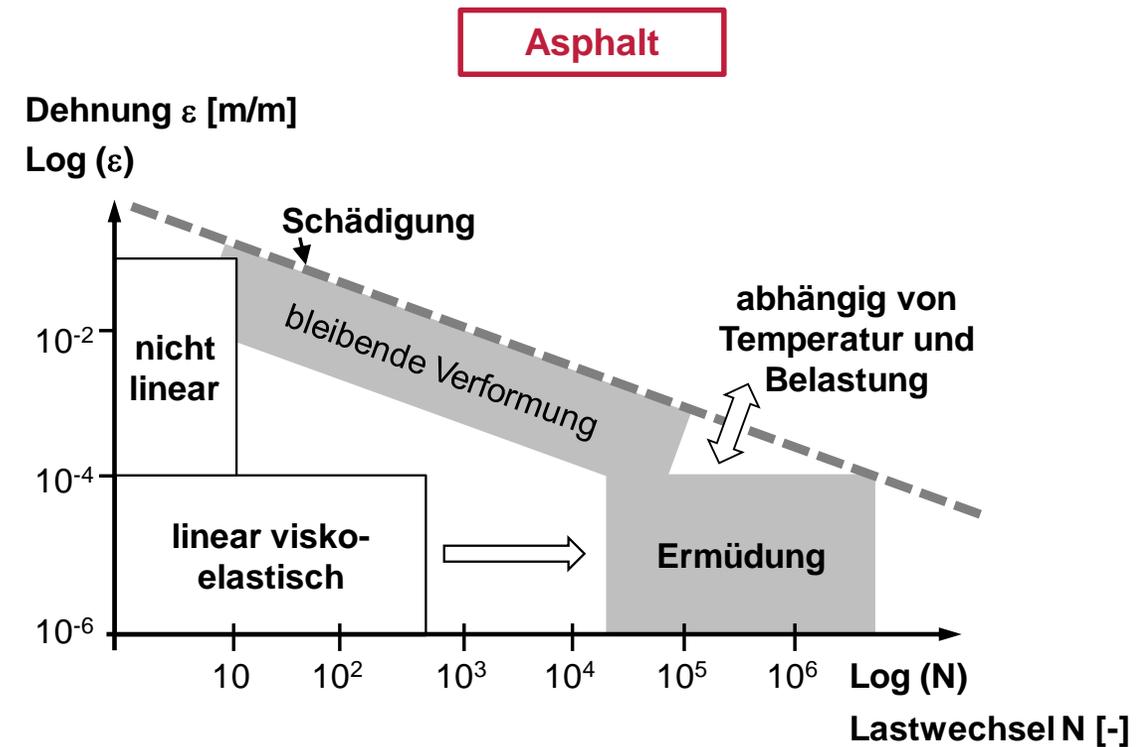
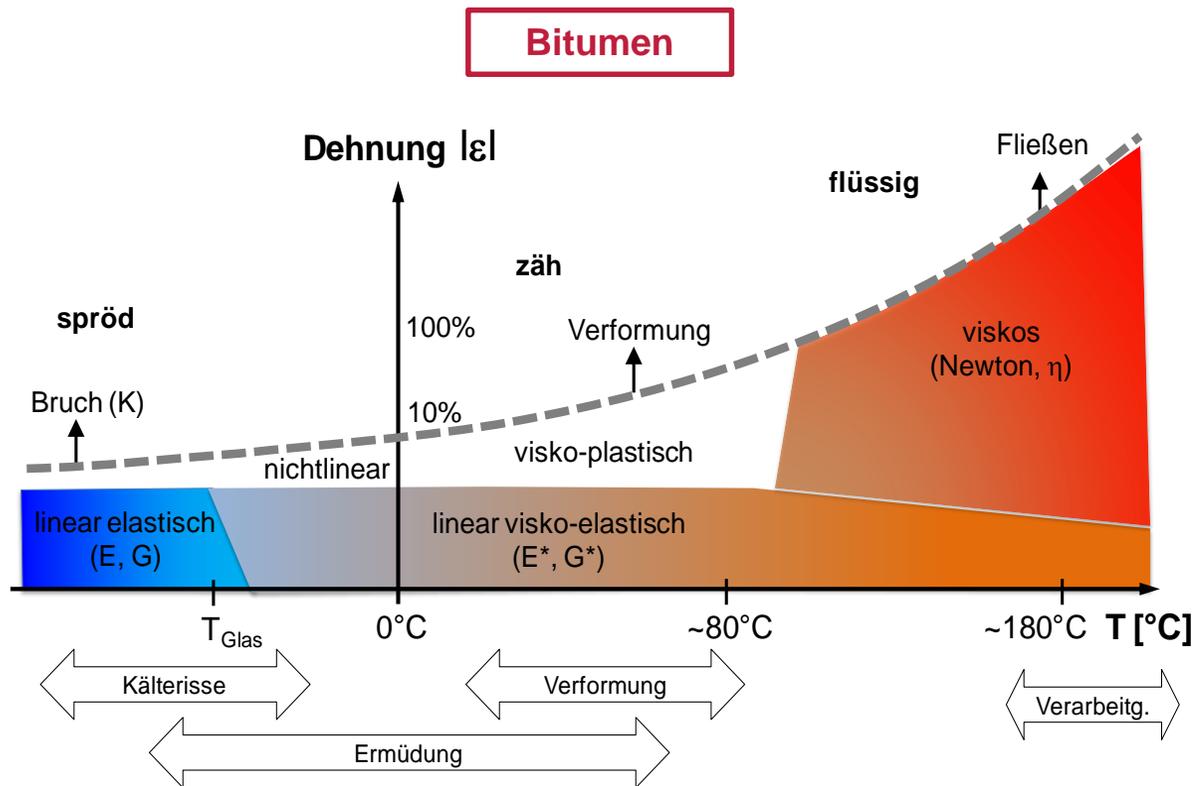
(Hooke)



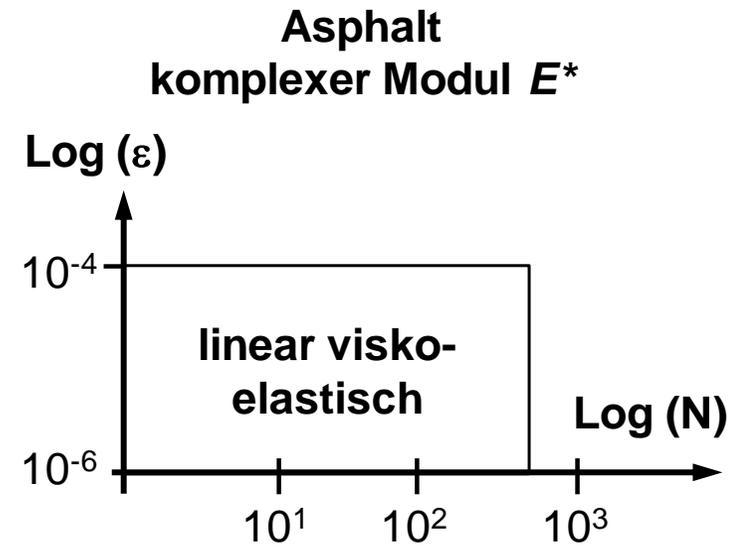
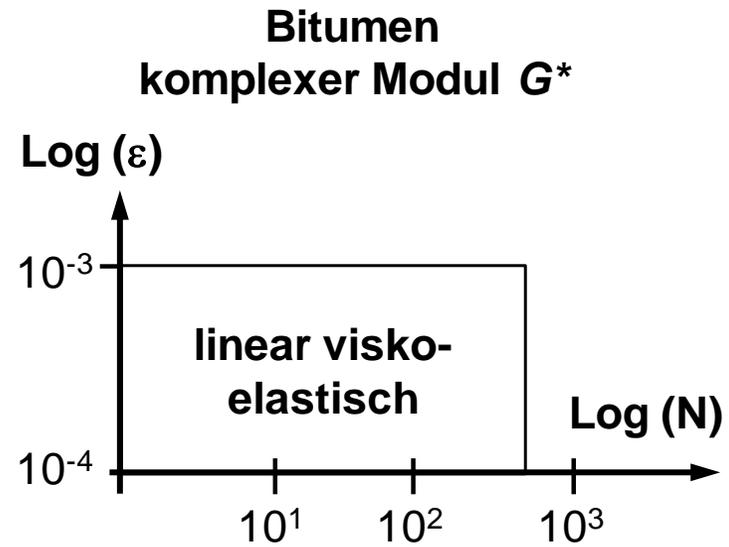
(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

Verhalten von Bitumen und Asphalt diesseits und jenseits des linear-viskoelastischen Materialverhaltens

- Unglaublich weites Spektrum an verschiedenen Verhaltenszuständen
- Reaktion auf innere oder äußere Last ändert sich gravierend in Abhängigkeit von der Größenordnung der Beanspruchung (Lastamplitude, Belastungsfrequenz, Anzahl an Belastungswiederholungen, Temperaturbedingungen)



(Abbildungen nach Di Benedetto, 1990)



LVE Bereich

Viskoelastizität

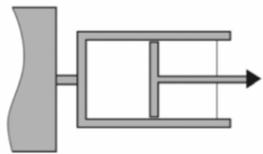
Viskose Verformung = zeitabhängige Verformung unter Lasteinwirkung (zähe Flüssigkeit, Dämpfer-Modell, Türschließer)

Viskoelastizität = Reaktion tw. elastisch und tw. viskos (zeitabhängig)

- Strebt unter konstanter Last einem Grenzwert zu
- Nach Entlastung zeitabhängig, aber vollständig rückstellbar

Linearer Dämpfer:

- Spannung σ linear proportional zur Deformationsgeschwindigkeit $\dot{\epsilon}$:



$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon}$$

- Proportionalitätsfaktor (Dämpfungskoeffizient) = dynamische Viskosität η [Pa·s]

viskoelastisch

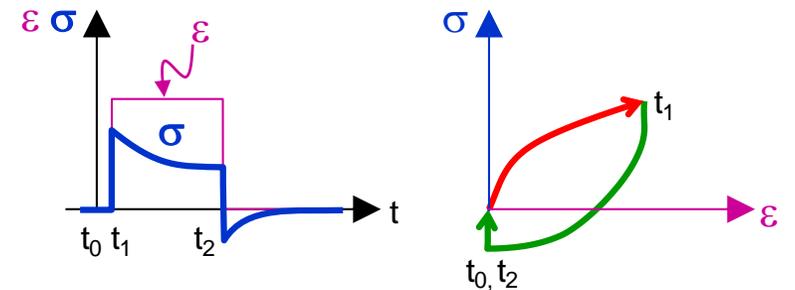
$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{\sigma}{\eta}$$

(Maxwell)

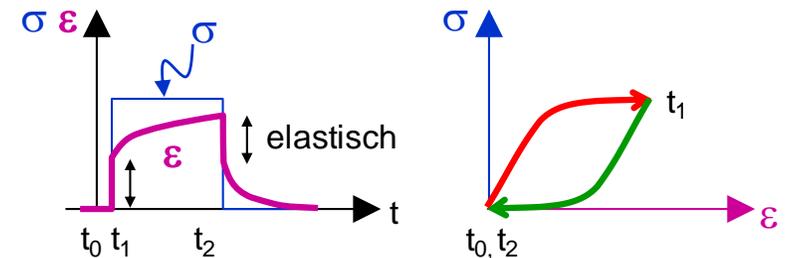
$$\sigma = \eta \cdot \dot{\epsilon} + E \cdot \epsilon$$

(Kelvin-Voigt)

dehnungsgesteuert
(Spannungsrelaxation)



spannungsgesteuert
(Druckkriechen)



(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

LVE Bereich

Superpositionsprinzip nach Boltzmann

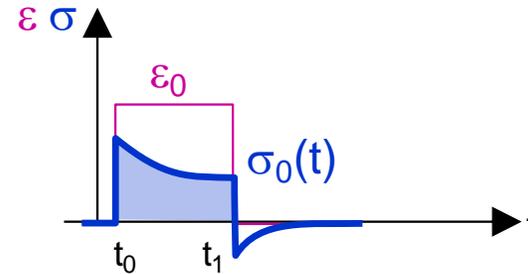
Lineares Materialverhalten trifft zu, wenn das **Überlagerungsprinzip** nach Boltzmann eingehalten ist:

Belastung: $a \cdot \varepsilon_1(t) + b \cdot \varepsilon_2(t)$
 → Antwort: $a \cdot \sigma_1(t) + b \cdot \sigma_2(t)$

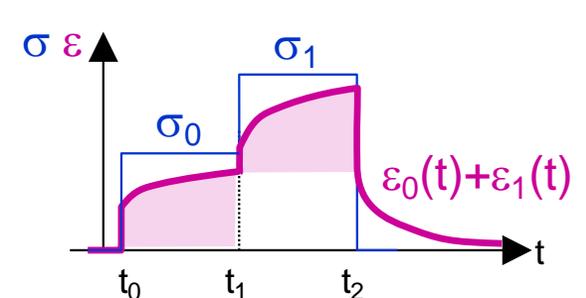
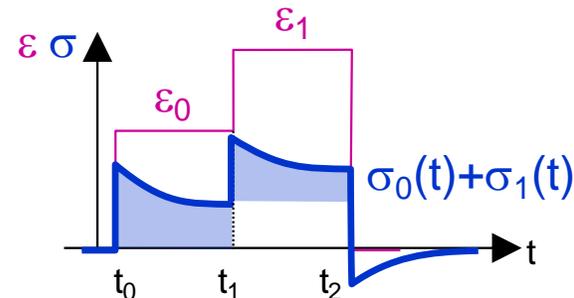
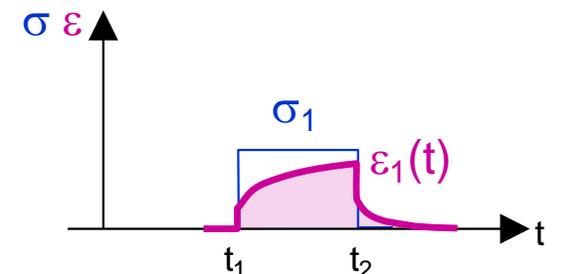
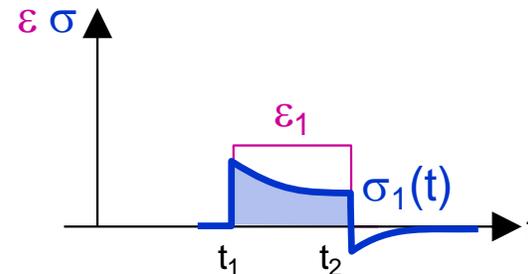
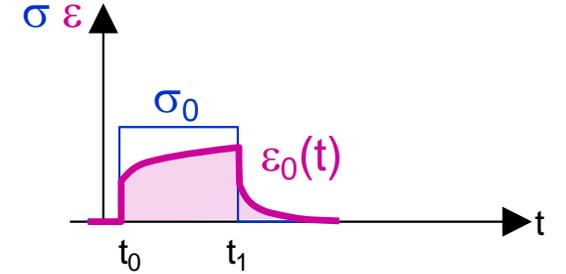
Belastung: $a \cdot \sigma_3(t) + b \cdot \sigma_4(t)$
 → Antwort: $a \cdot \varepsilon_3(t) + b \cdot \varepsilon_4(t)$

- Relaxation: Spannungsreaktion auf überlagerte aufgebrachte Dehnungen ist gleich der Superposition der individuellen Spannungsreaktionen auf jede Dehnung
- Kriechen: Dehnungsreaktion auf überlagerte aufgebrachte ist gleich der Superposition der individuellen Dehnungsreaktionen auf jede Spannung

Relaxation



Kriechen



LVE Bereich

LVE Verhalten im Zeitbereich

- **Zeitkonstante Spannung $\sigma_0 \rightarrow$ Dehnung $\varepsilon(t)$ wächst wegen Materialfließen allmählich an**

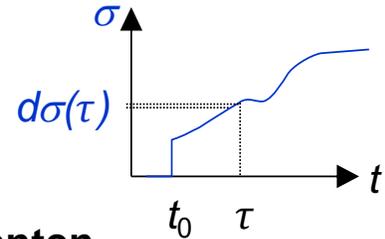
$$\varepsilon(t) = D(t_0, t) \cdot \sigma_0$$

Kriechrate

$$D(t_0, t) = \frac{\varepsilon(t)}{\sigma_0}$$

- **Zeitveränderliche inkrementelle Spannungsänderung zum (variablen) Zeitpunkt τ**

$\rightarrow \sigma(t)$ wird zu $d\sigma(\tau)$: $d\varepsilon(t) = D(\tau, t) \cdot d\sigma(\tau)$



- **Boltzmann'sche Superposition: Dehnung $\varepsilon(t)$ als überlagerte Reaktion aller Spannungskomponenten**

$$\varepsilon(t) = \underbrace{D(0)}_{\text{spontan elastisch}} \cdot \sigma(t) + \int_{t_0}^t \underbrace{D(t - \tau)}_{\text{zeitverzögert viskos}} \cdot \frac{\partial \sigma}{\partial \tau}(\tau) d\tau$$

Faltungsintegral unbequem \rightarrow Laplace-Carson-Transformation zur Umwandlung in algebraische Gleichungen mit der Bauform eines tensoriellen Produkts:

$$\varepsilon = D \otimes \sigma$$

Bauform wie Hooke'sches Gesetz \rightarrow Erleichterung (**elastisch-viskoelastisches Korrespondenzprinzip**): wenn viskoelastische Deformationen sehr klein, Lösungen aus der Elastizitätstheorie auch im linear-viskoelastischen Bereich nutzbar

- **Ähnliche Formulierung für Relaxationsversuch möglich**

$$\sigma(t) = J(0) \cdot \varepsilon(t) + \int_{t_0}^t J(t - \tau) \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau}(\tau) d\tau \rightarrow \sigma = J \otimes \varepsilon$$

Kriechnachgiebigkeit

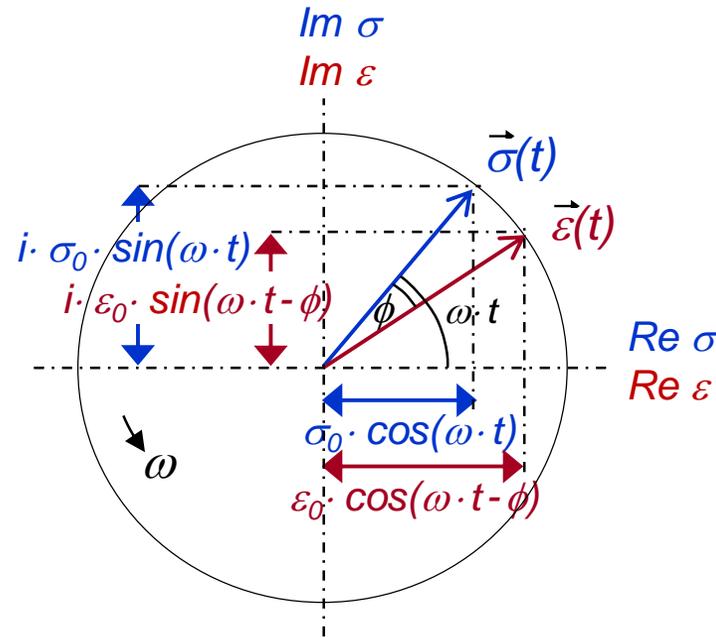
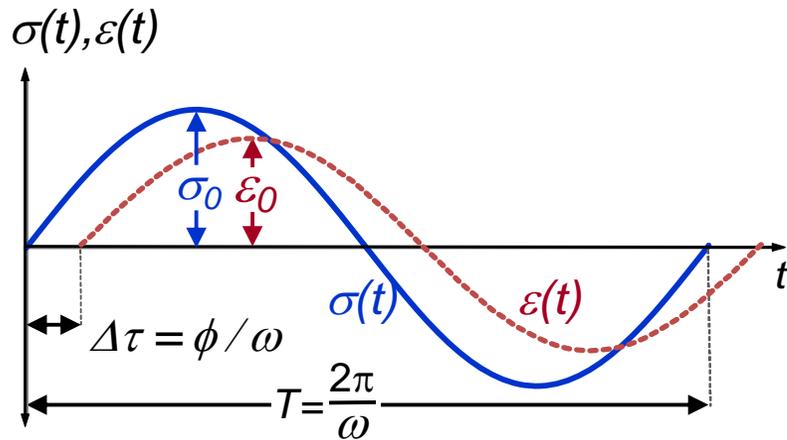
Kriechfunktion D und Relaxationsfunktion J stehen in direktem Zusammenhang

$$J \otimes D = D \otimes J = 1$$

LVE Bereich

LVE Verhalten im Frequenzbereich: Komplexer Steifigkeitsmodul E^*

- Frequenzabhängigkeit zeigt sich in einem zyklischen Versuch mit **oszillatorischer Erregung**
- **Grundprinzip von zyklischen Prüfungen:** Wird ein LVE Material oszillatorisch beansprucht, so reagiert es ebenfalls oszillatorisch und zwar mit derselben Frequenz aber aufgrund der Viskoelastizität zeitlich etwas verzögert (innere Reibung)



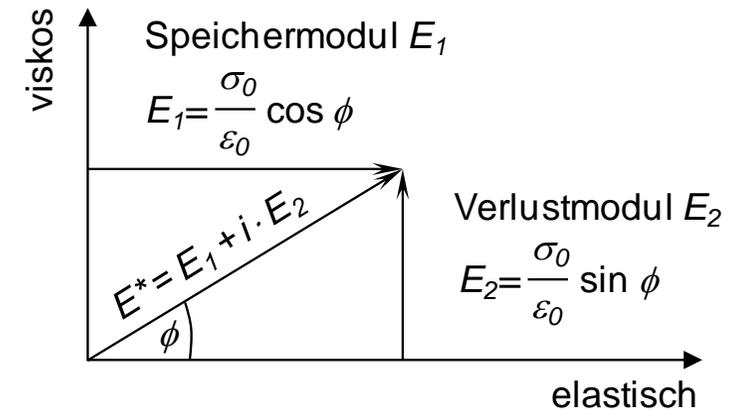
$$\sigma(t) = \sigma_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) + i \cdot \sigma_0 \cdot \sin(\omega \cdot t)$$

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cdot \cos(\omega \cdot t - \phi) + i \cdot \varepsilon_0 \cdot \sin(\omega \cdot t - \phi)$$

LVE Bereich: Weil viskoelastischen Deformationen sehr klein, gilt das *elastisch-viskoelastische Korrespondenzprinzip* →

$$E^* = f(E_1, E_2, \phi) = \frac{\sigma(t)}{\varepsilon(t)}$$

Weil Materialverhalten zeit- und frequenzabhängig, ist E^* eine komplexe Zahl



(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

LVE Bereich

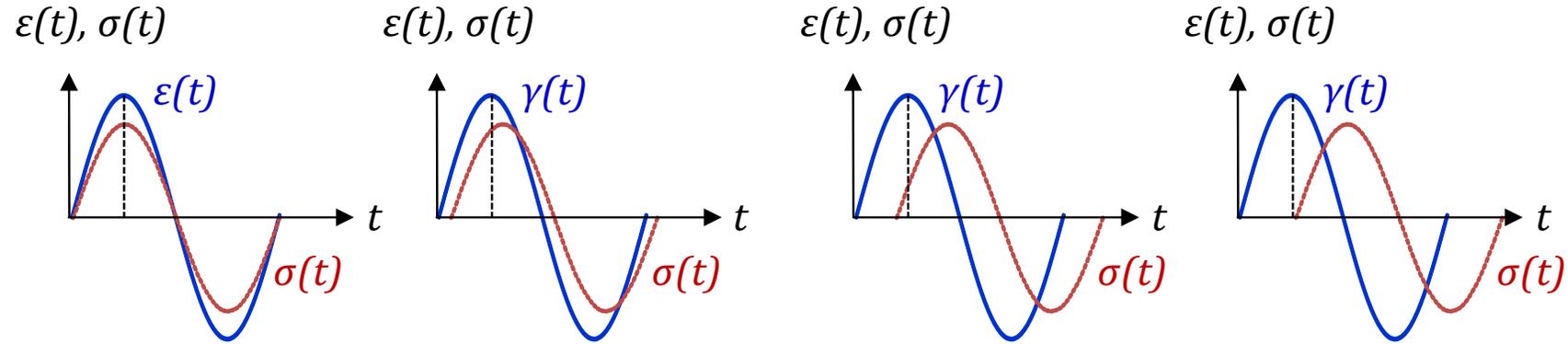
Elastisches, viskoelastisches und viskoses Materialverhalten in Abhängigkeit vom Phasenwinkel ϕ

Materialverhalten

elastisch \longleftrightarrow viskoelastisch \longleftrightarrow viskos

Wegregelung:

Amplitude $\varepsilon(t)$
Frequenz f [Hz]



Probenantwort:
Spannung $\sigma(t)$

Phasenwinkel ϕ

$\phi = 0^\circ$

$\phi < 45^\circ$

$\phi = 45^\circ$

$\phi > 45^\circ$

$\phi = 90^\circ$

Materialmodell

idealelastischer
Festkörper

viskoelastischer
Festkörper

viskoelastisches
Fluid

idealviskoses
Fluid

Komplexer

E-Modul:

$$E^* = \sigma(t) / \varepsilon(t)$$

$$E^* = E_1 + i E_2$$

Speichermodul E_1

$E_1 > E_2$

$E_1 = E_2$

$E_2 > E_1$

Verlustmodul E_2

„crossover“

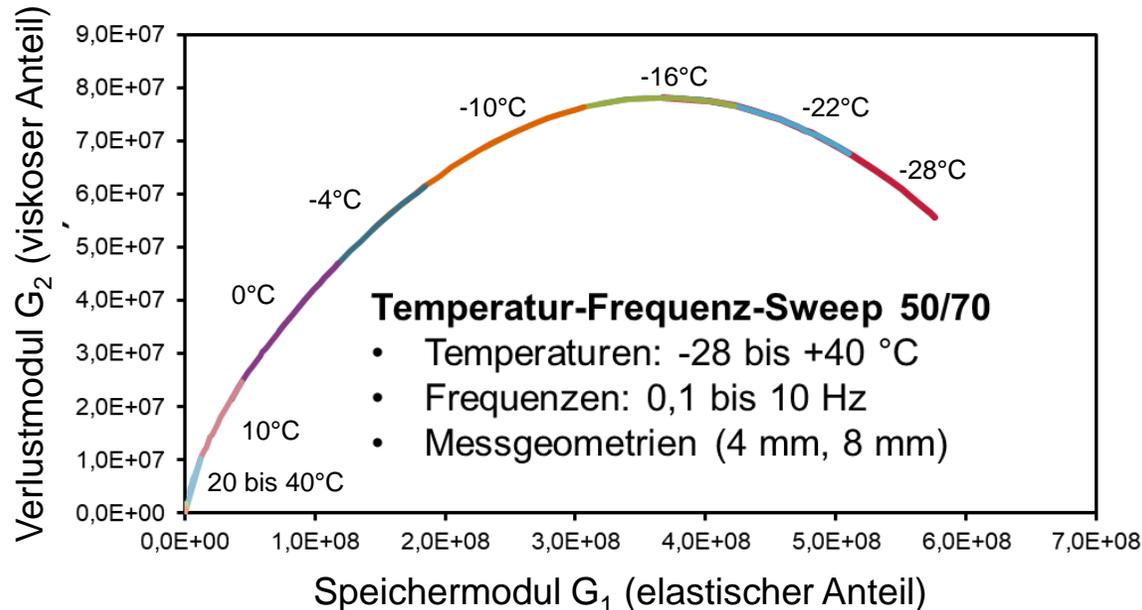
(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

LVE Bereich

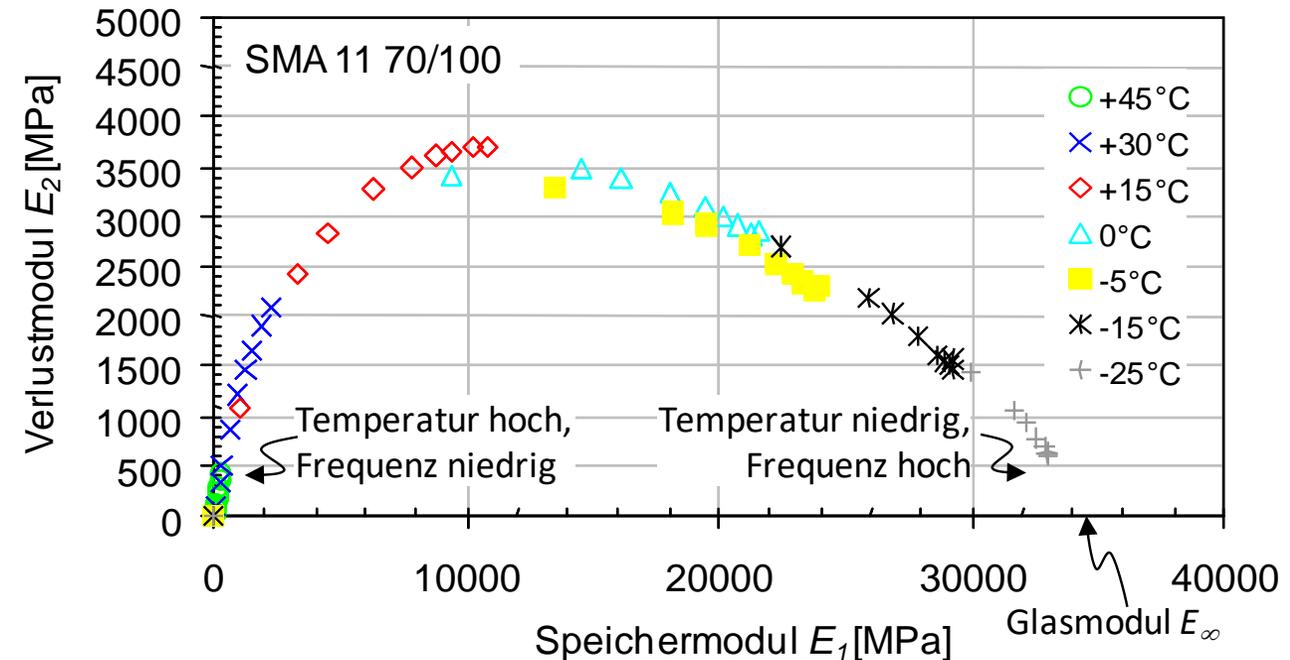
Cole-Cole-Diagramm

- **Vorgehen:** viele Werte des komplexen Moduls (E^* oder G^*) für mehrere Temperaturen bei einer konstanten Frequenz ermittelt (Temperatur-Sweep) oder für mehrere Frequenzen bei einer Temperatur (Frequenz-Sweep)
- **Ergebnisdarstellung:** Abszisse = elastischer Realteil (Speichermodul), Ordinate = viskoser Imaginärteil (Verlustmodul)
- **Nutzen:** Bewertung der Messung (Durchgängigkeit wegen T-f-Äquivalenz); Bewertung der Viskoelastizität (Verhältnis von Viskosität zu Elastizität)

Bitumen 50/70



Asphalt SMA 11 70/100

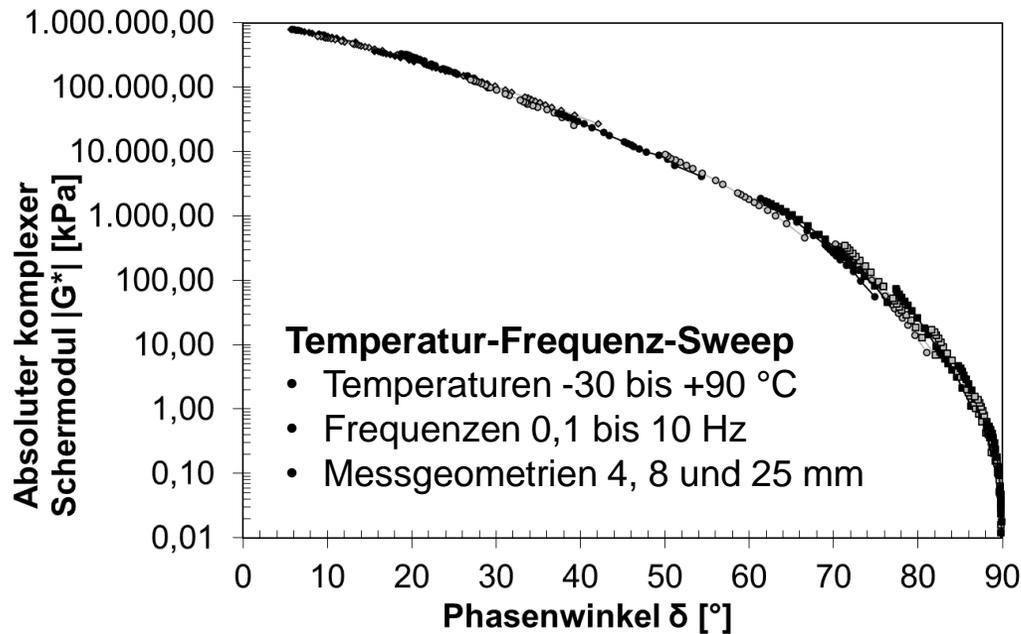


LVE Bereich

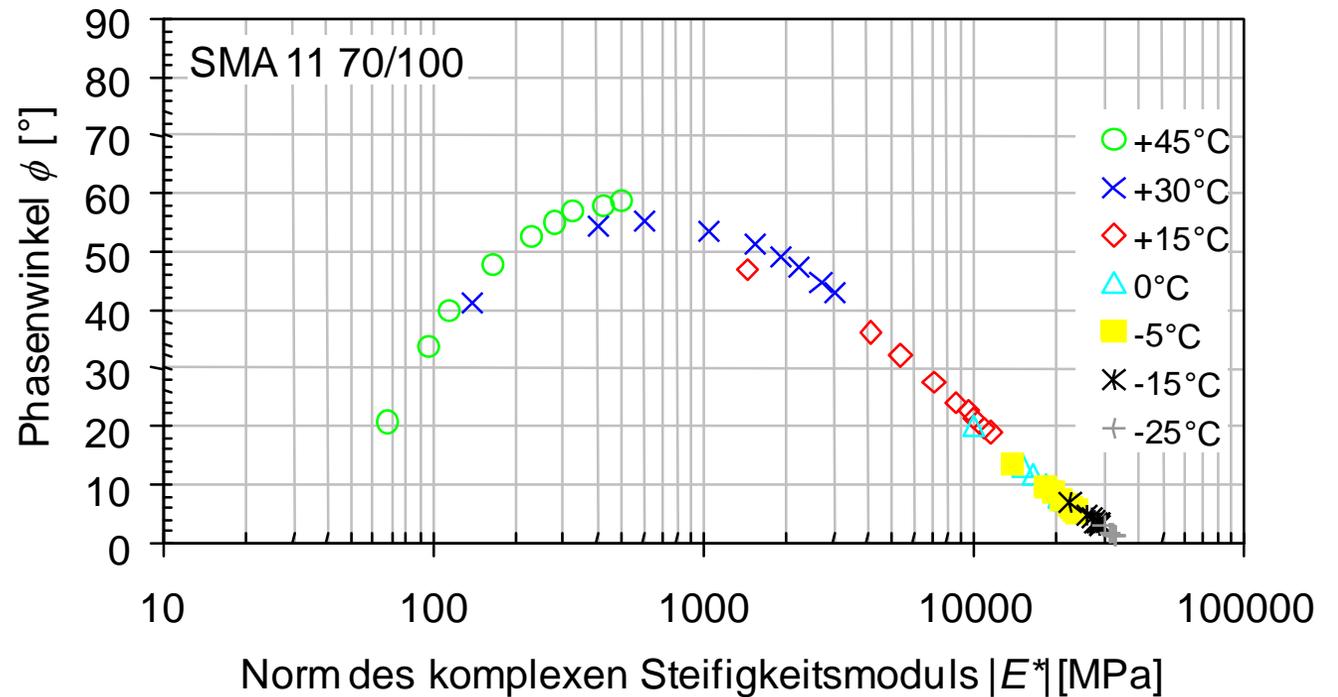
Black-Diagramm

- Zusammenhang von Phasenwinkel und der Norm des komplexen Steifigkeitsmoduls
- Cole-Cole- und Black-Diagramme sehr aussagekräftig, weil die dargestellten Kurven für alle Temperaturen und Frequenzen gelten

Bitumen 50/70



Asphalt SMA 11 70/100



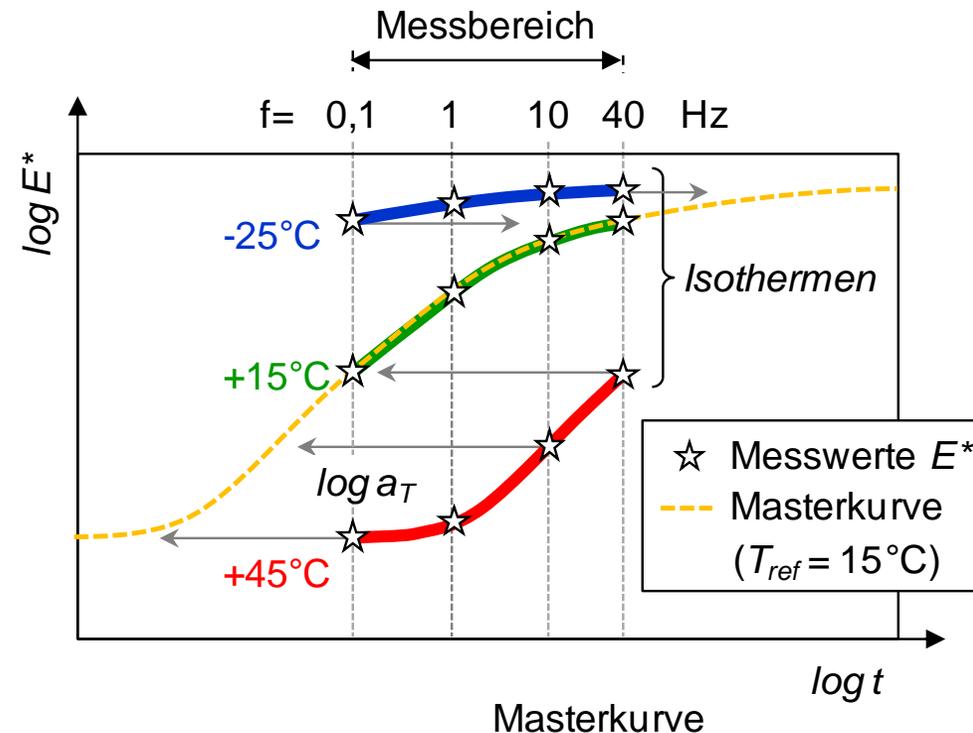
(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

LVE Bereich

Temperatur-Frequenz-Äquivalenz und Masterkurve

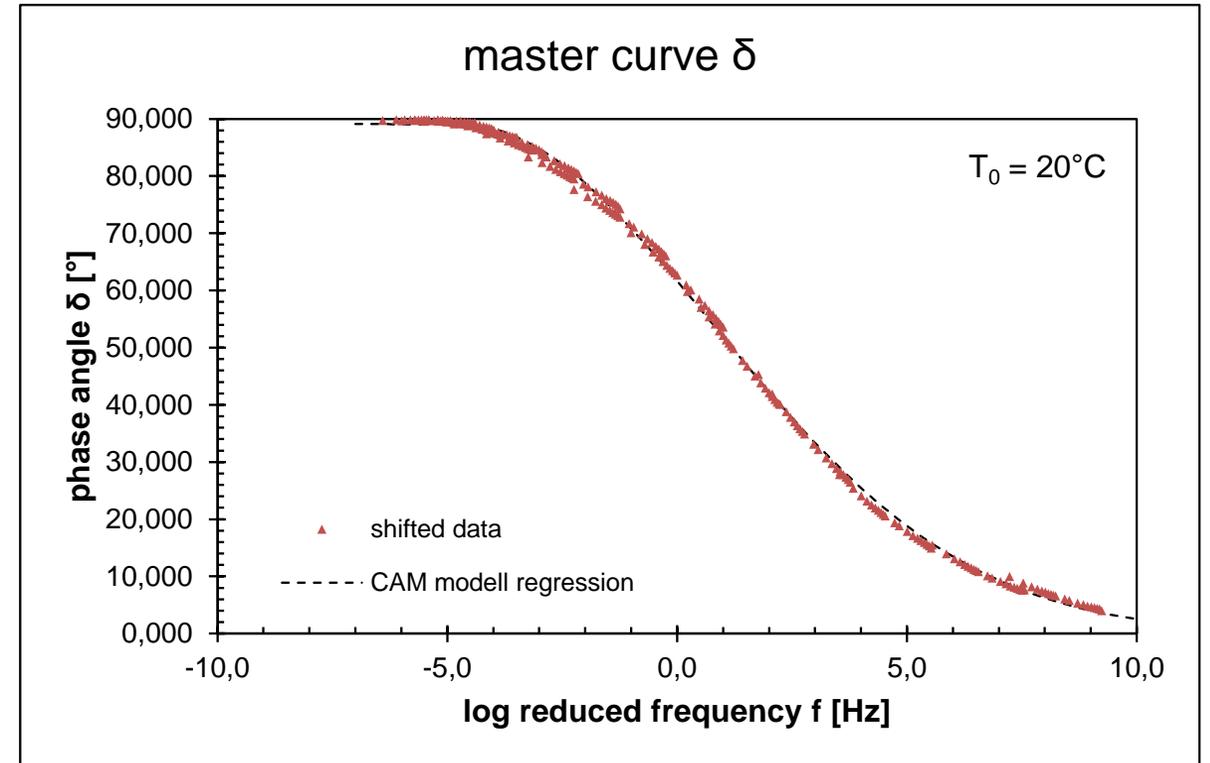
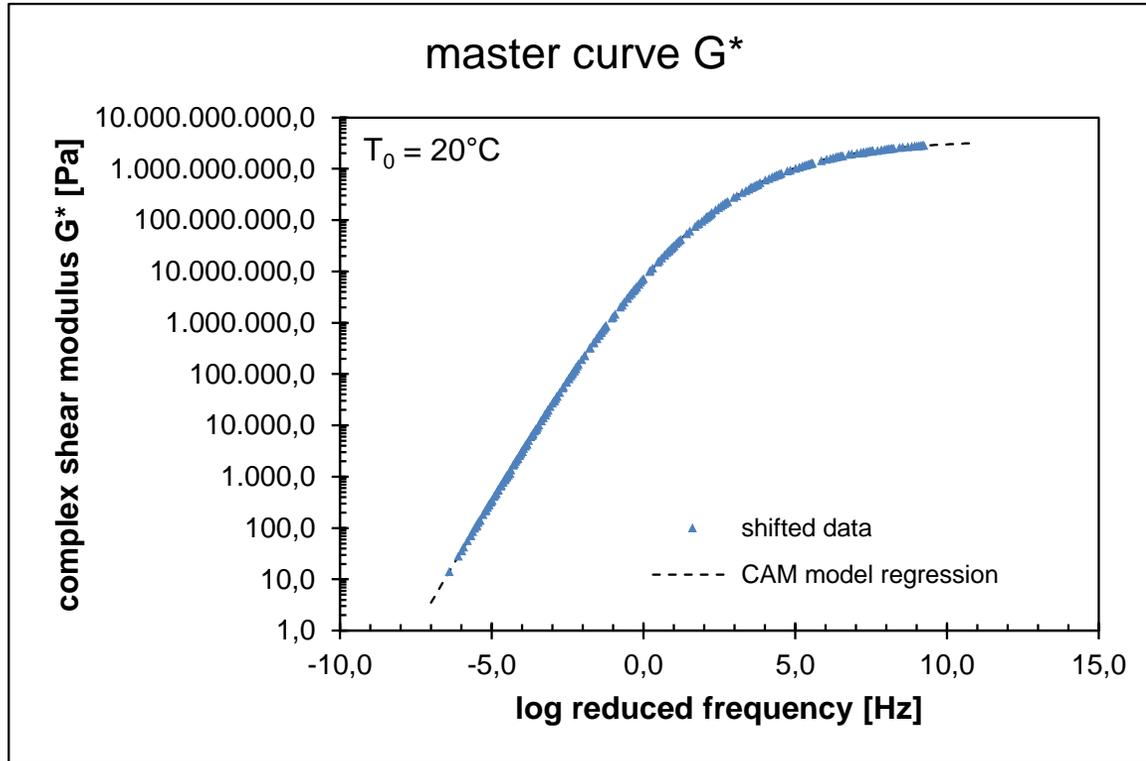
- Ein bestimmter Steifigkeitsmodul E^* (oder G^* oder ν^*) ist immer durch 2 unterschiedliche Temperatur-Frequenz-Paare definiert:

$$E^*(T_1, \omega_1) = E^*(T_2, \omega_2) \text{ mit } (T_1, \omega_1) \neq (T_2, \omega_2)$$
- Abhängigkeit des Moduls von Temperatur und Frequenz durch eine einzige Variable beschrieben:
 $E^*(\omega, f(t)) \rightarrow$ **Temperatur-Frequenz-Äquivalenz (oder Temperatur-Zeit-Gesetz)**
- Extrapolation (Vorhersage) des Steifigkeitsmoduls über eigentlichen Messbereich hinaus über gesamten T-f-Bereich



(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

Masterkurven (Beispiele)

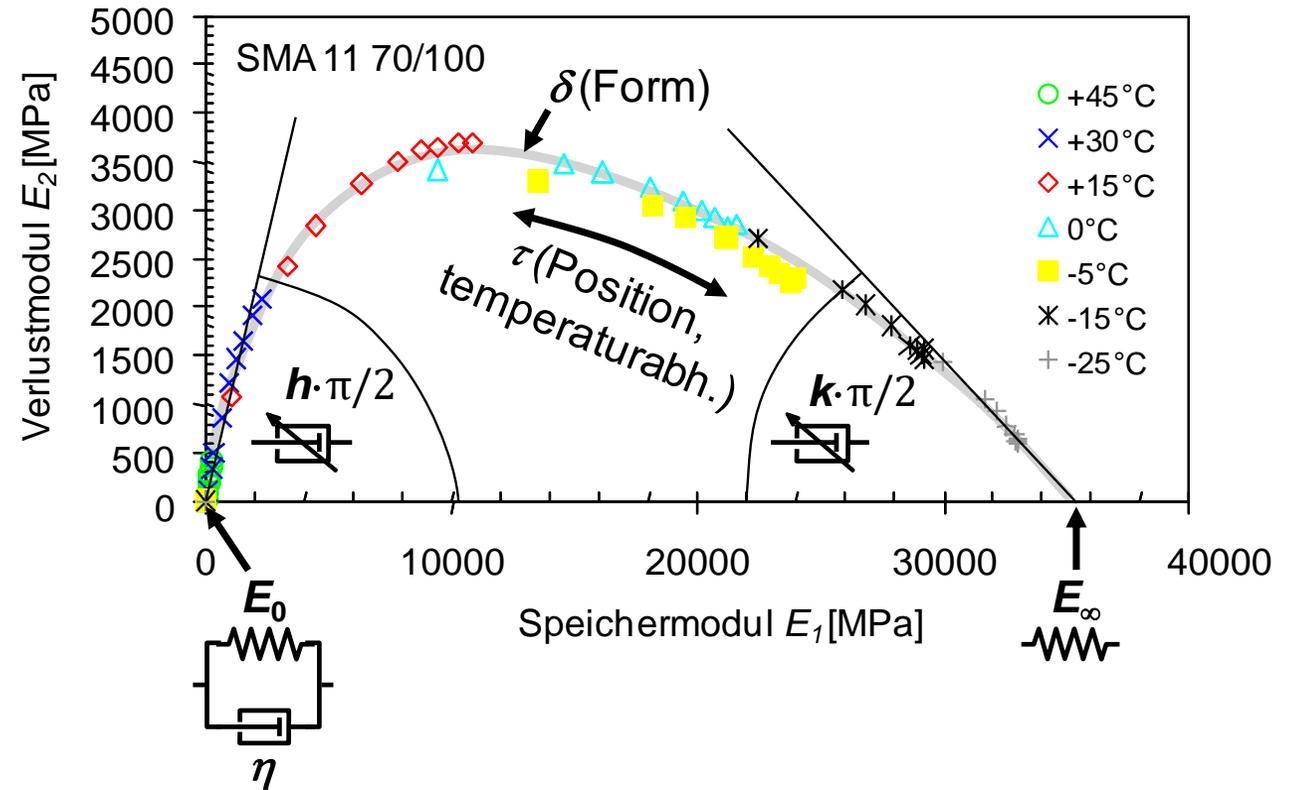
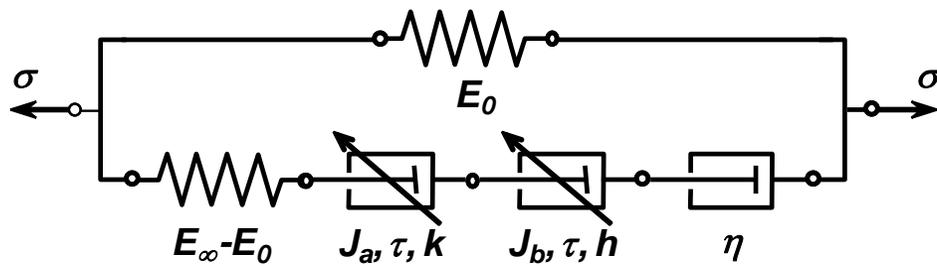


(aus: Wistuba, *Straßenbaustoff Asphalt*, 2019)

LVE Bereich

Modellierung

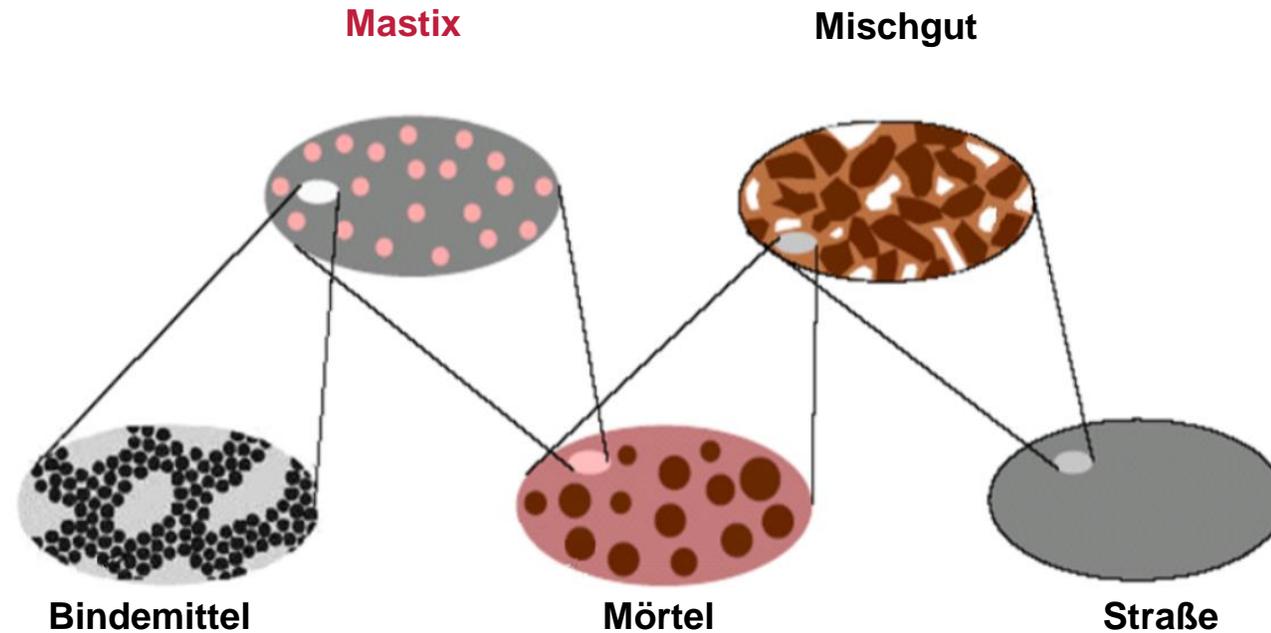
- 2S2P1D Modell (9 Parameter-Model):



(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

Alle Betrachtungsebenen stehen in einem rheologischen Zusammenhang

Betrachtungsebenen (Mehrskalenmodell)

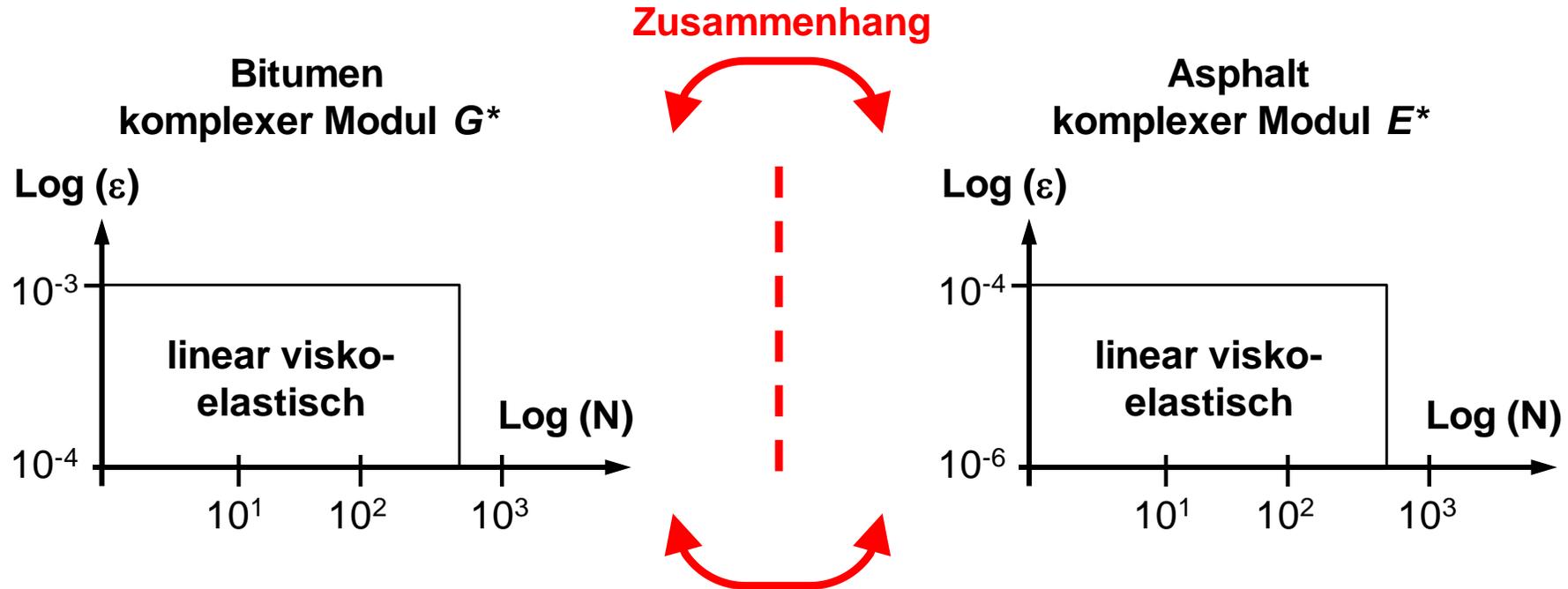


(siehe: Lackner, R., Blab, R., Jäger, A., Spiegl, M., Kappl, K., Wistuba, M. P., Gagliano, B., Eberhardsteiner, J. 2004. Multiscale modeling as the basis for reliable predictions of the behavior of multi-composed materials. Int J on Progress in Engineering Computational Technology, Saxe-Coburg Publications, ISBN 1-874672-22-9)

LVE Bereich

Alle Betrachtungsebenen stehen in einem rheologischen Zusammenhang

Im LVE Bereich korrelieren der komplexe E^* -Modul von Asphalt und der komplexe G^* -Modul des zugehörigen Bindemittels im gesamten Temperatur- und Frequenzbereich



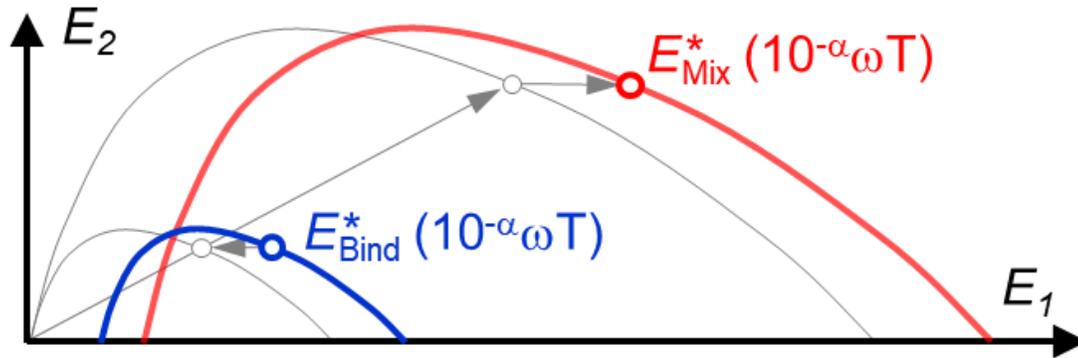
LVE Bereich

Alle Betrachtungsebenen stehen in einem rheologischen Zusammenhang

Im Cole-Cole-Diagramm visualisiert:

Bitumen & Asphalt

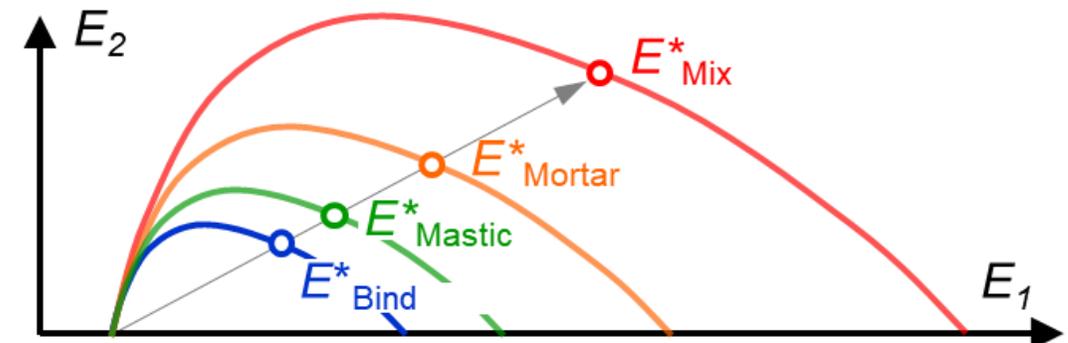
Shift-Homothety-Shift in time-Shift (SHStS): Bestimmung des Asphaltmoduls nach dreifacher Verschiebung des Bindemittelmoduls im Cole-Cole Diagramm



(siehe: Olard, F., and Di Benedetto, H. 2003. General "2S2P1D" Model and Relation Between the Linear Viscoelastic Behaviours of Bituminous Binders and Mixes. RMPD, 4/2, 185-224, Taylor & Francis)

Bitumen & Mastix & Mörtel & Asphalt

Zentrische Streckung des Moduls entlang der Betrachtungsebenen Bitumen-Mastix-Mörtel-Asphaltmischgut

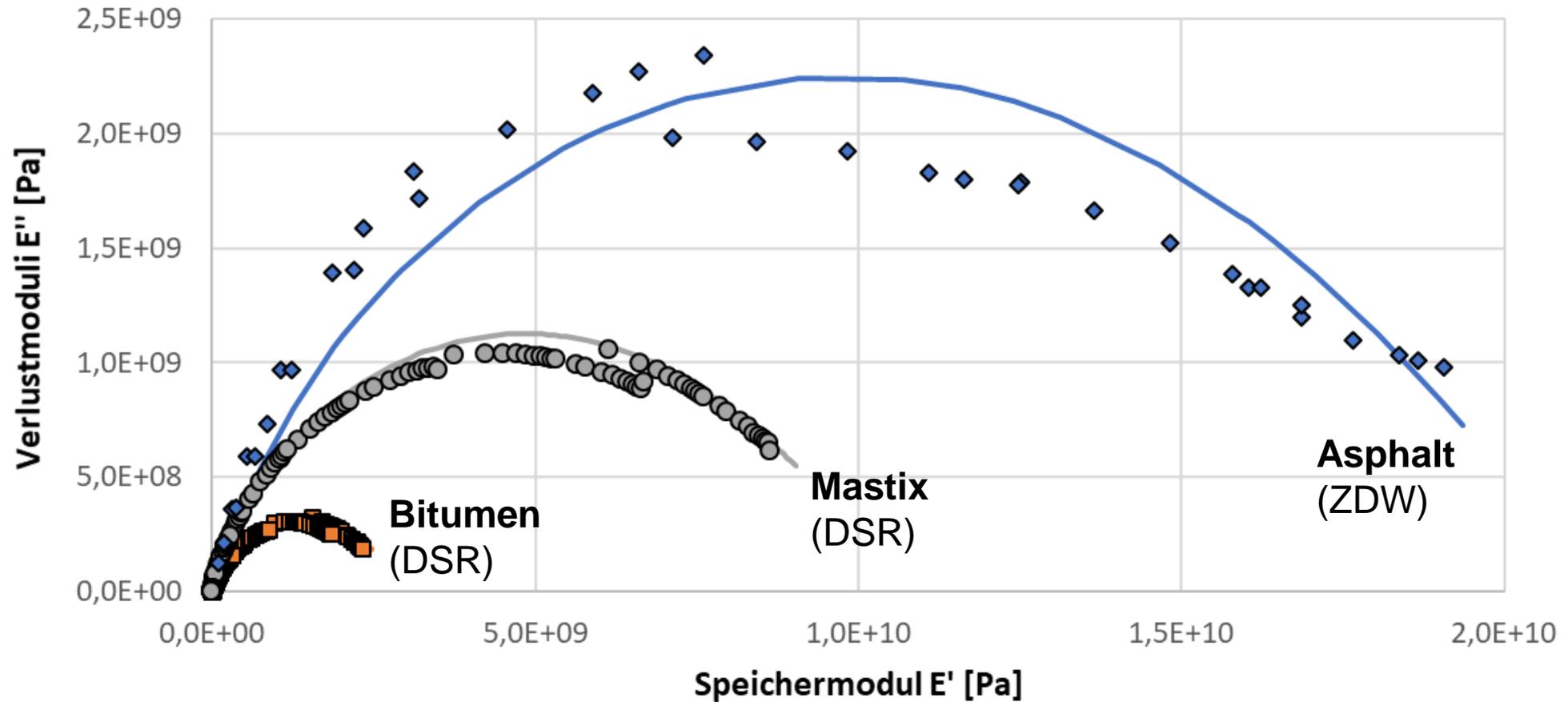


(siehe: Riccardi, C., Cannone Falchetto, A., Losa, M. and Wistuba, M. P. 2018. Development of simple relationship between asphalt binder and mastic based on rheological tests. RMPD, 19/1, 18-35, Taylor & Francis)

LVE Bereich

Alle Betrachtungsebenen stehen in einem rheologischen Zusammenhang

Beispiel: Messergebnisse und 2S2P1D-Modell



Feder-Experiment zweiter Teil: Verhalten außerhalb des LVE Bereichs

LVE Bereich überschritten

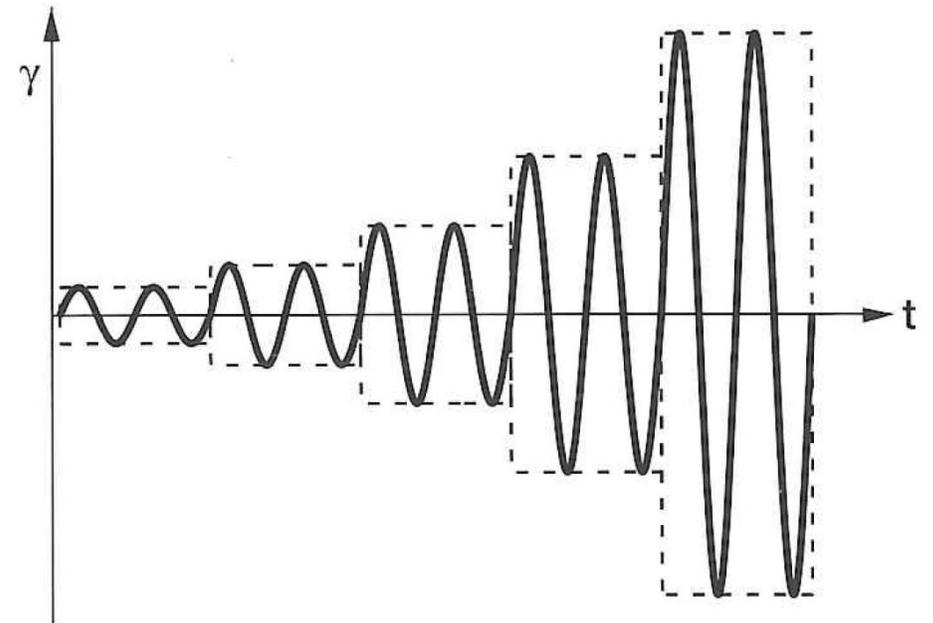
- **Feder außerhalb des LVE Bereichs beansprucht**
 - ausgeprägtes nichtlineares Materialverhalten: plastische (bleibende) Verformung, Materialschädigung / -versagen
 - alle linearen Modellannahmen und die Grundgesetze der Rheologie wie Viskositäts- und Elastizitätsgesetze (Newton, Hooke) verlieren Gültigkeit
 - Modellierung (bei fortgeschrittener Schädigung) nicht mehr zuverlässig möglich
- **Die *Grenze der Linearität* ist eine entscheidende Größe für Werkstoffprüfung und -modellierung, weil sich an ihr das Materialverhalten gravierend ändert.**

Messungen im Dynamischen Scher-Rheometer (DSR)

Bitumen und Mastix

Amplitudentest: Suche nach der Grenze des LVE Bereichs

- **Messung im Oszillationsmodus grundsätzlich innerhalb des LVE Bereichs** → man muss sicher wissen, ab wann mit irreversibler Strukturveränderung gerechnet werden muss
- **Amplitudensweep-Test** (bei jeder unbekanntenen Messprobe)
 - Stufenweise Erhöhung der Scheramplitude (Regelung kann durch Vorgabe von γ oder σ erfolgen: stress sweep test oder strain sweep test)
 - Solange Vorgabe- und Messgröße sich linear zueinander verhalten, dann sind die anregenden Amplituden ausreichend klein gewählt
 - Proportionale Antwortamplituden → messen im LVE Bereich der Probe sichergestellt



Steifigkeitsprüfungen mittels DSR im LVE Bereich

Bitumen und Mastix

- Durchführung von T-f-Sweeps im Oszillationsmodus (stufenweiser Anstieg von Temperatur und Frequenz)
- Temperaturen von -30 bis +90 °C; Frequenzen von 0,1 bis 10 Hz

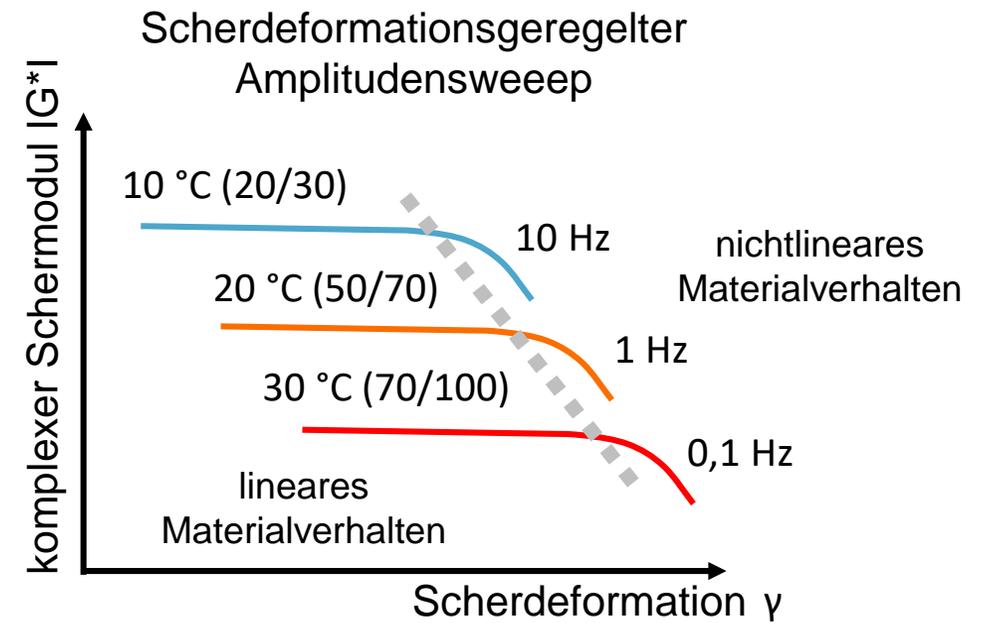
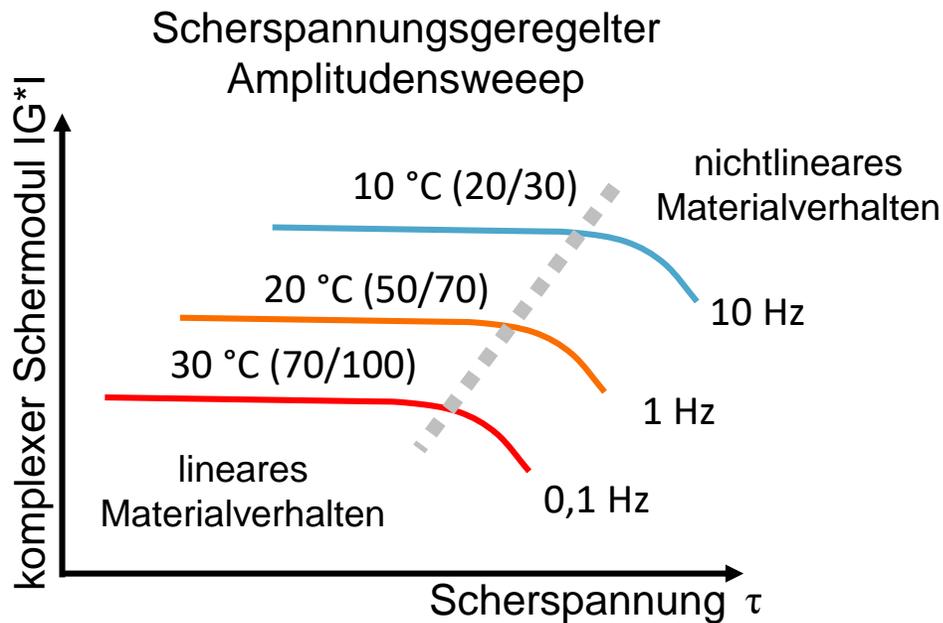
| Temperaturbereich | Plattendurchmesser | Plattenabstand | Frequenzbereich | Belastung |
|--|--------------------|----------------|-----------------|------------------------|
| Bitumen: -30 bis 0°C Mastix: -30 bis 20°C | 4 mm | 2mm | 0,1 bis 10 Hz | σ (LVE-Bereich) |
| Bitumen: -10 bis 40°C Mastix: 10 bis 60°C | 8 mm | 2 mm | | γ (LVE-Bereich) |
| Bitumen: 30 bis 90°C Mastix: 50 bis 90°C | 25 mm | 1 mm | | γ (LVE-Bereich) |

Erfahrungen am ISBS

Steifigkeitsprüfungen mittels DSR im LVE Bereich

Bitumen und Mastix

Im LVE-Bereich bleibt die Struktur zerstörungsfrei → komplexer Schermodul IG^* ist weitgehend unabhängig von der aufgetragenen Scherspannung bzw. Scherdeformation

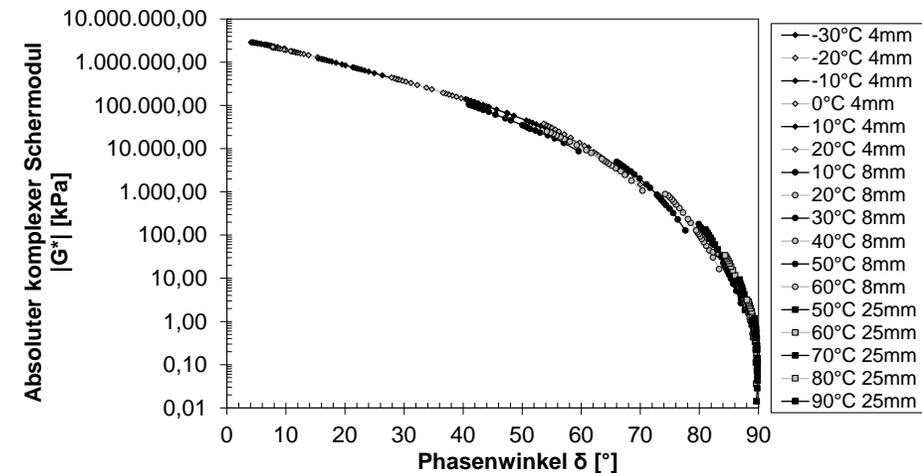
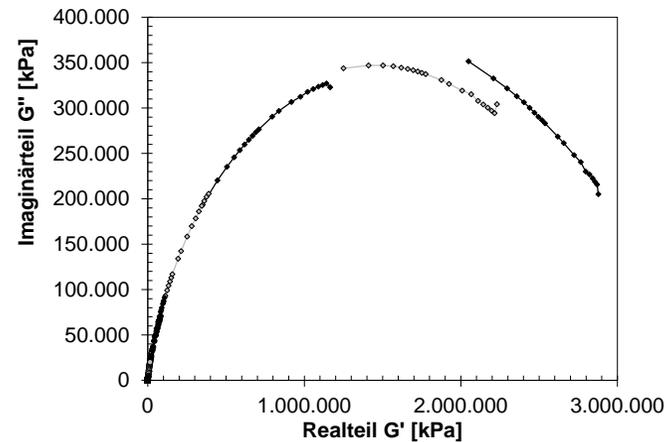
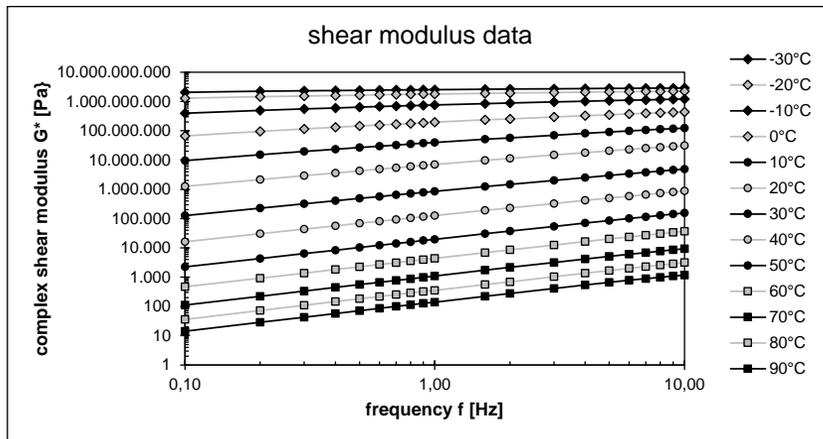


Steifigkeitsprüfungen mittels DSR im LVE Bereich

Bitumen und Mastix

Zuverlässige Ergebnisse:

- Durchgängige temperatur- und frequenzabhängige Verläufe von G^* und δ
- Plausible Informationen zu Steifigkeit und viskoelastischem Verhalten: Cole-Cole-Diagramm, Black-Diagramm, Masterkurve



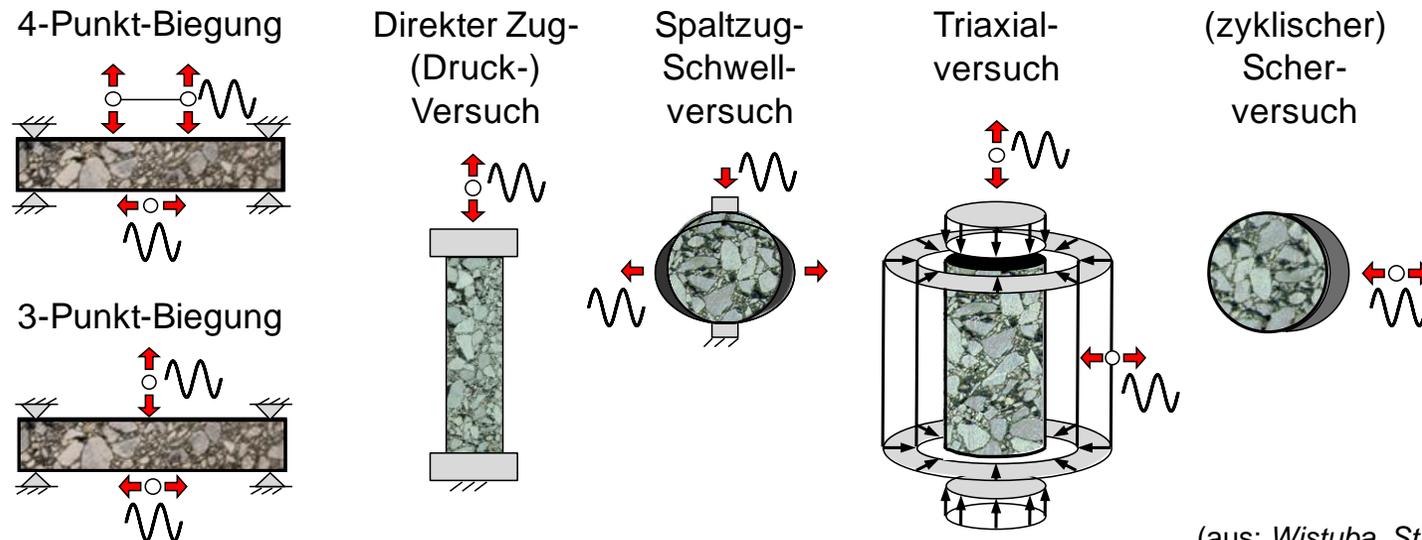
Erfahrungen am ISBS

Steifigkeitsprüfungen im LVE Bereich

Asphalt

- Prüfverfahren mit homogener Beanspruchung (z. B. einaxialer Zug-Druck-Wechsel-Versuch)
 - Temperaturen von -20 bis +40 °C; Frequenzen von 0,1 bis 10 Hz
- Informationen zur Steifigkeit und zum viskoelastischen Verhalten
 - Modellierung mit rheologischen Modellen einwandfrei
 - Modellierung hilfreich wegen (meist) geringer Probekörperanzahl (statistische Auswertung kaum sinnvoll)

Beispiele für zyklische Asphaltprüfungen



(aus: Wistuba, Straßenbaustoff Asphalt, 2019)

Steifigkeitsprüfungen im LVE Bereich

Alternative: Dynamische Prüfung mittels Schwingungsanalyse von Festkörpern

- **Impulserregungstechnik** zur Bestimmung der elastischen Materialeigenschaften:
 - Körper mittels elastischem Stoß mit minimaler Energie und kurzer Dauer (< 2 Sekunden) zum Schwingen angeregt
 - Messung des resultierende Schwingungssignals mittels eines piezoelektrischen Aufnehmers
 - Bestimmen der Frequenz des Schwingungssignals (z. B. über Fourier-Analyse)
- Zerstörungsfreies Prüfverfahren mit hoher Prüfpräzision: rasch, ökonomisch und einfach in der Durchführung, komplexe Körpergeometrien analysierbar
- Dehnungen sehr klein (rund 10^{-8} m/m) und Frequenzen sehr hoch (rund 500 bis 25.000 Hz) und daher Annahme von linearem Materialverhalten noch zutreffender
- Bisher vielversprechende Ergebnisse, Dissertation am Laufen

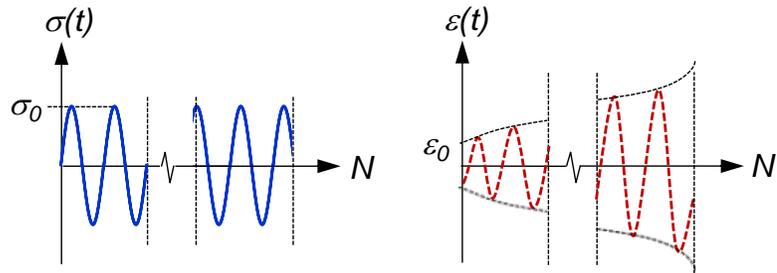
Erfahrungen am ISBS

Prüfung außerhalb des LVE Bereichs

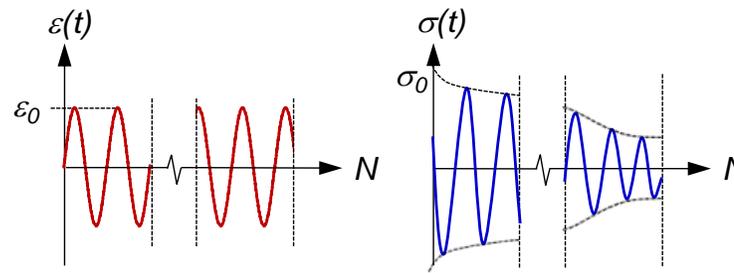
Asphalt

- Möglichst realitätsnahe Simulation des realen Material- und Strukturverhaltens unter kontrollierten Laborbedingungen: Vielzahl an unterschiedlichen Prüfverfahren
- Ziele: Beurteilung von (neuen) Asphaltrezepturen, Leistungsfähigkeit überprüfen, Eignungsnachweis für den Gebrauchszweck, Abschätzung der Lebensdauer
- Während der Prüfung allmähliche Veränderung von innerer Struktur und Beanspruchung

Beispiel Ermüdungsprüfung bei Spannungsregelung:

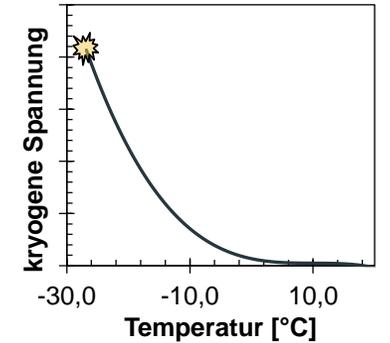


bei Dehnungsregelung:

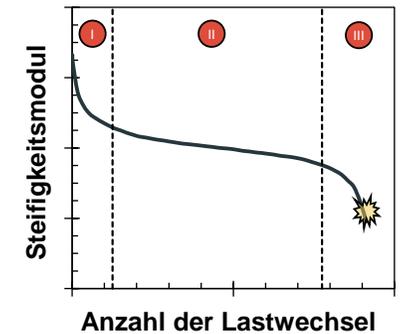


- Umso mehr Einflüsse aus Material-Inhomogenitäten, je grober die Struktur ist
- Modellierung unzuverlässig/nicht möglich
- Prüfergebnisse abhängig von Beanspruchung, von Prüfmethode, von Prüfgerät
- Zuverlässigkeit, Wiederholbarkeit? → viele Einzelprüfungen und statistische Auswertung

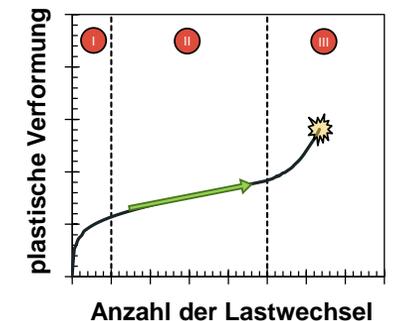
Bsp. Abkühlversuch



Bsp. Ermüdungsversuch



Bsp. Kriechversuch



Gebrauchstemperatur



Erfahrungen am ISBS

Prüfung außerhalb des LVE Bereichs

Bitumen und Mastix im DSR

- Nichtlinearer Bereich
- Messantwort im zyklischen Versuch nicht mehr streng sinusförmig, aber weitgehend periodisch
- Akzeptable Wiederholbarkeit

➔ siehe nachfolgender Vortrag von Dr.-Ing. Johannes Büchner:
Prüfung von Bitumen und Mastix im DSR

Schlussfolgerungen

- **LVE-Bereich muss bekannt sein, wenn es um die Interpretation von Prüfergebnissen geht.**
- **Innerhalb des LVE-Bereichs:**
 - Proportionalität: Prüfergebnisse können lückenlos interpretiert werden, unabhängig von Beanspruchung, Prüfmethode, Prüfgerät
 - Durchgängige „einfache“ Modellierung/Simulation/Prognose des Materialverhaltens von bitumen-haltigen Baustoffen: lineare Abhängigkeit von Bitumen-Mastix-Mörtel-Asphalt-Verhalten
 - Gute Erfahrungen mit dem Prüfen und Modellieren im LVE Bereich
 - Einfachste Prüfmethode (Steifigkeits-Modul): Bitumenprobe im DSR mittels T-f-Sweep unter sehr kleiner Beanspruchung
- **Außerhalb des LVE-Bereichs:**
 - Feder kaputt: Linearität gilt nicht → nicht lineares Materialverhalten infolge Material-schädigung/Versagen
 - Erfahrungen mit Performanceprüfungen (unter zunehmender Schädigung):
 - auf Asphalt-Ebene schwierig (zu viele Inhomogenitäten u. a. Einflüsse)
 - auf Bitumen/Mastix-Ebene mit DSR möglich; gute Erfahrungen am ISBS (siehe nachfolgender Vortrag)

Vielen Dank!

m.wistuba@tu-braunschweig.de