

6 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird das Tragverhalten bewehrter Elastomerlager aus Chloropren- und Naturkautschuk unter kombinierten Druck- und einachsigen Verdrehbeanspruchungen untersucht. Der Schwerpunkt liegt dabei auf der experimentellen Ermittlung einzelner Einflussfaktoren auf die Höhe der Rückstellmomente sowie deren Sicherheitsniveau in Bezug auf die rechnerisch ermittelten Werte nach DIN EN 1337-3. Es werden die Abmessungen der Elastomerlager, der Schichtaufbau, die verwendete Kautschukmischung sowie die äußeren Belastungsgrößen Druckspannung, Verdrehwinkel und Temperatur experimentell untersucht. Die Versuche schaffen eine Datenbasis von 747 Einzelwerten, die neben den Verdrehbeanspruchungen auch die Belastungsrichtungen zentrischer Druck und horizontaler Schub beinhalten. In einem weiteren Schritt werden numerische Simulationen bewehrter Elastomerlager unter Verdrehbeanspruchungen und unter Berücksichtigung des nichtlinear viskoelastischen Materialverhaltens durchgeführt. Auf der Grundlage bisher vorliegender Modelle zur Bestimmung von Rückstellmomenten sowie einer umfassenden Bewertung der Versuchsergebnisse wird abschließend ein physikalisch motiviertes Modell mit empirischer Anpassung zur Berechnung von Rückstellmomenten entwickelt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass das Kraft-Verformungsverhalten bei zentrischer Druckbeanspruchung nichtlinear und durch Versteifungen bei höheren Pressungen gekennzeichnet ist. Die Berechnung der Einsenkung nach DIN EN 1337 erfolgt jedoch linear in Abhängigkeit von der Auflast und liefert im Vergleich zu den Versuchen durchgängig zu große Verformungen. Zusätzlich zur herkömmlichen Angabe des Druckmoduls als Sekantenmodul ist daher eine Berechnung in Form von Tangentenmodulen sinnvoll, um die sich ändernde Drucksteifigkeit in Abhängigkeit vom Belastungsniveau zu berücksichtigen.

Die Änderung des Schubmoduls für instationäre Verformungen bei tiefen Temperaturen ist von der verwendeten Kautschukmischung bzw. deren Glasübergangstemperatur T_g abhängig. Die in der europäischen Lagernorm genannte Anforderung $G_{RT} \leq 3 G_{TT}$ berücksichtigt diesen Parameter jedoch nicht. Die Schubmodule aller untersuchten NR- und CR-Mischungen liegen bei einer Prüftemperatur von -25°C unterhalb der Anforderung. Bei -40°C beträgt der Steifigkeitsanstieg einer CR-Mischung bereits das 6 bis 8-fache des bei Raumtemperatur ermittelten Wertes. Auf Grundlage der durchgeführten Schubversuche wird in dieser Arbeit eine Funktion aufgestellt, die den Einfluss tiefer Temperaturen ($<0^\circ\text{C}$) in Form eines Erhöhungsfaktors α_T in Abhängigkeit von der Glasübergangstemperatur der verwendeten Kautschukmischung bestimmt. Der Erhöhungsfaktor kann gleichermaßen zur Berechnung von Rückstellmomenten bei tiefen Temperaturen angewendet werden.

Anhand einer kombinierten Beanspruchung durch zentrischen Druck und einachsiger Verdrehung werden Rückstellmomente für 34 Elastomerlager mit vier unterschiedlichen Kautschukmischungen experimentell ermittelt. Dabei ist ein Einfluss des Versuchsaufbaus auf die Ergebnisse vorhanden, wenn der Rotationsmittelpunkt außerhalb des Prüfkörpers liegt. Die dadurch verursachten Schubverformungen erzeugen zusätzliche Rückstellmomente, die rechnerisch berücksichtigt werden. Der Einfluss außermittiger Rotationspunkte nimmt mit der Größe des Lagers ab und mit der Höhe des Hebelarms, der die Verdrehung einleitet, zu. Der Verdrehwinkel φ ist der Parameter, der die Höhe der Rückstellmomente eines Elastomerlagers primär beeinflusst. Die Beziehung zwischen Verdrehwinkel und Rückstellmoment verläuft dabei nichtlinear mit Abflachungen bei größeren Verdrehungen.

Ein Einfluss der zentrischen Druckspannung σ_z auf das Rückstellmoment ist bei allen Versuchen festzustellen. Er ist geringer als der Einfluss der Verdrehung und wirkt sich nahezu linear auf die Verdrehsteifigkeit aus. Weiterhin beeinflussen die geometrischen Abmessungen, der Schichtaufbau und die Mischung der verwendeten Polymersorte die Höhe des Rückstellmomentes.

Die rechnerische Simulation der Verdrehversuche mit der Software ABAQUS erfolgt in Kapitel 4 über ein paralleles Modell mit hyperelastischen und nichtlinear viskoelastischen Materialeigenschaften. Zur Parameteridentifikation waren ein- und biaxiale Versuche an Materialproben notwendig. Da diese grundsätzlich separat vulkanisiert werden, liegt hier eine Unsicherheit in der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die realen Probekörper vor. Dennoch zeigen die Ergebnisse der FEM-Berechnungen hinsichtlich der Höhe der Rückstellmomente und des viskoelastischen Materialverhaltens gute Übereinstimmung mit den experimentellen Untersuchungen. Abweichungen zeigen sich in Bezug auf den Einfluss der zentrischen Druckspannung. Dieser wird in den Berechnungen zwar abgebildet, ist in den Versuchen jedoch deutlich größer. Die Überprüfung der Spannungszustände in den Elastomerschichten ergibt eine gute Übereinstimmung mit der Theorie. Der parabelförmige Spannungsverlauf bei zentrischer Druckspannung verschiebt sich durch eine eingetragene Verdrehung einseitig, was mit einer leichten Erhöhung des Spannungsmaximums einhergeht. Die Spannungen in den einvulkanisierten Bewehrungsblechen bleiben auch bei hohen Beanspruchungen ($\sigma_z = 18 \text{ N/mm}^2$, $\varphi_y = 10 \text{ ‰}$) im elastischen Bereich mit deutlichen Reserven in Bezug auf die Streckgrenze eines Stahls der Güte S355. Durch die Variation der Lagergeometrien wird der experimentell untersuchte Parameterbereich mit Hilfe der FEM-Berechnungen erweitert, so dass Rückstellmomente auch für Zwischengrößen und für besonders klein- und großformatige Elastomerlager angegeben werden können.

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen durchgängig große Diskrepanzen zwischen den experimentell ermittelten und den nach DIN EN 1337-3 berechneten Rückstellmomenten rechteckiger Elastomerlager. Im ungünstigsten Fall wird der im Versuch ermittelte Wert um den Faktor 11 unterschätzt. Die Ursachen dafür liegen in der Annahme der linearen Elastizitätstheorie sowie kleiner Verformungen und

inkompressiblen Materialverhaltens. Weiterhin bleibt der Einfluss zentrischer Druckspannungen unberücksichtigt.

In Kapitel 5 dieser Arbeit wird ein Berechnungsmodell zur Ermittlung der Rückstellmomente bewehrter Elastomerlager auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen vorgestellt. Es berücksichtigt neben dem nichtlinearen Einfluss des Verdrehwinkels φ auf das Rückstellmoment auch den jeweils wirkenden Druckspannungszustand. Dieser sollte in einem Druckversuch ermittelt werden, da das nichtlineare Druckstauchungsverhalten bewehrter Elastomerlager nach derzeitigem Kenntnisstand rechnerisch nicht ausreichend genau erfasst werden kann. In diesem Punkt besteht weiterer Forschungsbedarf, um in Zukunft sowohl das Last-Verformungsverhalten bewehrter Elastomerlager unter zentrischem Druck realitätsnah erfassen zu können, als auch eine rein rechnerische Angabe von Rückstellmomenten mit hinreichender Genauigkeit zu ermöglichen.