



universitätsverlag
ilmenau

Feierabend, Martin; Griebel, Stefan; Zentner, Lena:

**Konzeptionierung und Konstruktion einer äquibiaxialen
Zugvorrichtung**

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-103-6

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142-103-6>

Erschienen in:

Mechanismentechnik in Ilmenau, Budapest und Niš : Technische Universität Ilmenau, 29. - 31. August 2012. - Ilmenau : Univ.-Verl. Ilmenau, 2012. - S. 103-114. (Berichte der Ilmenauer Mechanismentechnik ; 1)

ISSN: 2194-9476

ISBN: 978-3-86360-034-1 [Druckausgabe]

URN: urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142

URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:gbv:ilm1-2012100142>

KONZEPTIONIERUNG UND KONSTRUKTION EINER ÄQUIBIAXIALEN ZUGVORRICHTUNG

Martin Feierabend, Stefan Griebel*, Lena Zentner**

* TU Ilmenau, Fachgebiet Mechanismentechnik

Kurzfassung

Ziel dieses Beitrags ist die Konzeption und Konstruktion einer Vorrichtung, welche einen planaren äquibiaxialen Zugversuch unter Zuhilfenahme einer uniaxialen Zugmaschine ermöglicht. Die Wandlung der uniaxialen Bewegung in eine äquibiaxiale wird mittels eines Reckrahmens realisiert. Die Vorrichtung ist in eine handelsübliche uniaxiale Zugmaschine integrierbar. Die damit durchführbaren Versuche bilden, neben uniaxialen und pure shear Versuchen, die Grundlage zur Ermittlung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens von Silikon. Die so ermittelten Spannungs-Dehnungs-Kurven können anschließend zur Finiten-Elemente-Simulation komplexer Silikonstrukturen verwendet werden.

Abstract

The aim of this paper is the development and the design of a device achieving a planar equibiaxial tension test. The transformation of the uniaxial into an equibiaxial motion is realized by an stretching frame. The device can be integrated in a commercial uniaxial tension machine. Hereby, the possible equibiaxial test, in addition to uniaxial and pure shear tests, is fundamental for determination of the stress-strain behavior of silicone rubber. For this reason, the measured stress-strain curves can be used to simulate complex silicone structures by means of FEM.

1. Einleitung

Aufgrund der zunehmenden Komplexität von Bauteilen und der Vielzahl an Optimierungsmöglichkeiten, hat die Vorhersage von Bauteileigenschaften beziehungsweise dem Bauteilverhalten (Spannungs-Dehnungsverhalten, Verformungsverhalten u. a.) durch Simulationssoftware eine entscheidende Rolle eingenommen. Durch den frühzeitigen Einsatz von FE-Software, wie z. B. ANSYS®, im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess lassen sich kostspielige Versuche an Prototypen und der Aufwand für ihre Herstellung reduzieren. Ein großer Vorteil ist, dass ungünstige Konstruktionsvarianten bereits in einer frühen Phase des Konstruktionsprozesses verworfen werden können.

Um eine möglichst realitätsnahe Vorhersage über das Bauteilverhalten treffen zu können, sind drei Punkte ausschlaggebend:

- 1) Die numerischen Lösungsverfahren der eingesetzten Simulationssoftware,
- 2) ein ausreichend realitätsnahes Modell und
- 3) die korrekte Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens [1].

Um die mechanischen Eigenschaften (hyperelastisches Materialverhalten) von Silikon zu beschreiben, sind in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen zu finden (bspw. Ogden, Mooney-Rivlin u. a.). Die Materialmodelle beinhalten eine modellabhängige Anzahl an Materialparametern, die vor einer Simulation zunächst experimentell ermittelt werden müssen. Es liegt dabei in der Verantwortung des Anwenders, selbstständig zu entscheiden, welches Materialmodell benutzt wird und welche experimentellen Untersuchungen zur Bestimmung der Materialparameter notwendig sind, um realitätsnah simulieren zu können.

Wird ein Materialmodell nur an uniaxialen Werkstoffprüfungen kalibriert, so besteht die Gefahr, dass das eingesetzte Materialmodell mehraxiale Beanspruchungszustände nur unzureichend beschreiben kann. Aus diesem Grund beschäftigt sich dieser Beitrag mit der Entwicklung einer Vorrichtung zur Erhebung von äquibiaxialen Zugdaten. Ziel ist es dabei, eine uniaxiale Zugmaschine für die Datenerhebung zu verwenden.

2. Stand der Technik

2.1. Materialprüfverfahren für hyperelastische Werkstoffe

Zur Prüfung hyperelastischer Materialien existieren eine Reihe von Prüfverfahren, mit denen Spannungs-Dehnungs-Kurven ermittelt werden können. Abbildung 1 zeigt prinzipielle Unterschiede zwischen drei Möglichkeiten der Materialprüfung auf. Zu sehen ist ein uniaxialer, pure shear und äquibiaxialer Zugversuch. Dabei beschreibt λ_i ($i = 1, 2, 3$) das Streckungsverhältnis in der jeweilige Hauptachsenrichtung. Die Verfahren unterscheiden sich in der Art der Verformung und der daraus resultierenden mechanischen Beanspruchung.

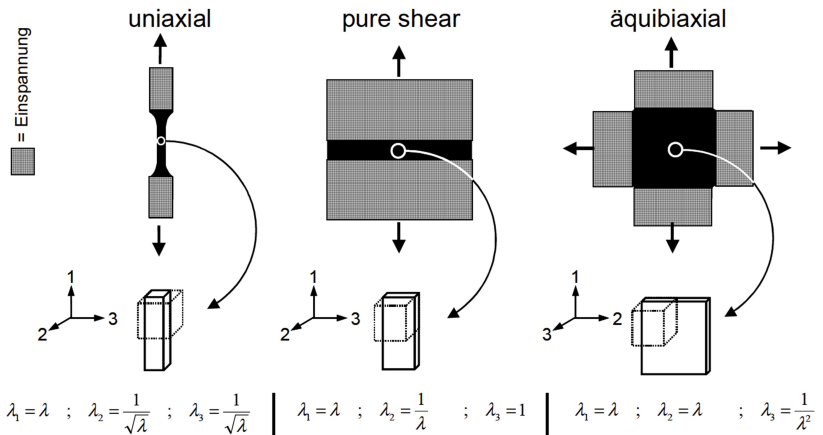


Abb. 1: Möglichkeiten der Materialprüfung durch Zugversuche – uniaxial, planar und äquibiaxial (v. l. n. r.) [1]

Unabhängig vom verwendeten Prüfverfahren ist der qualitative Verlauf der Spannungs-Dehnungs-Kurve (vgl. Abbildung 2, links) bei jeder Variante gleich. Die technische Spannung der Probe verringert sich bei wiederholter Be- und Entlastung. Diese Spannungserweichung wird durch den Mullins-Effekt beschrieben. Dabei stellt die jungfräuliche Kurve die Erstbelastung der Probe dar. Nach einigen (meistens 10) Belastungszyklen stabilisiert sich die Spannungs-Dehnungs-Kurve. Dieser Zustand wird als vorkonditioniert bezeichnet [2]. Die erreichten Spannungen unterscheiden sich jedoch

abhängig vom Prüfverfahren quantitativ (Abbildung 2, rechts). Dabei ist die Spannung beim uniaxialen Zug am geringsten und beim äquibiaxialen Zug am größten.

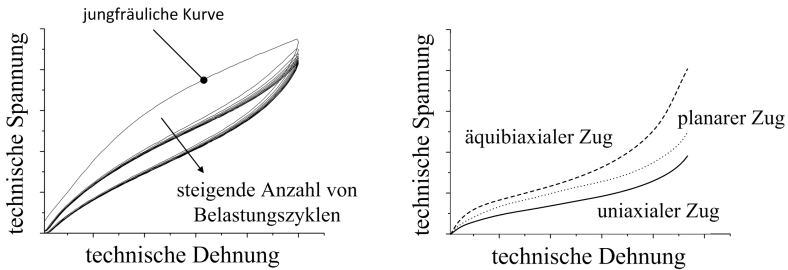


Abb. 2: Technische Spannungs-Dehnungs-Kurve von Silikon bei mehreren aufeinanderfolgenden Belastungszyklen (links) und quantitative Unterschiede der Prüfverfahren uniaxial, planar sowie äquibiaxial (rechts)

2.2. Äquibiaxiale Prüfverfahren

Äquibiaxiale Prüfverfahren können, wie in Abbildung 3 dargestellt, in planare und räumliche Prüfverfahren unterteilt werden. Bei den räumlichen Prüfverfahren gibt es drei wesentliche Verfahren: Lubricated Squeeze Rheometer, Bubble Inflation Rheometer sowie das Membran Inflation Rheometer [3]. Das Bubble Inflation Rheometer und das Membran Inflation Rheometer haben gemeinsam, dass durch Druckerhöhung in einem Medium eine dünne Membran aus dem zu prüfenden Material gedehnt wird.

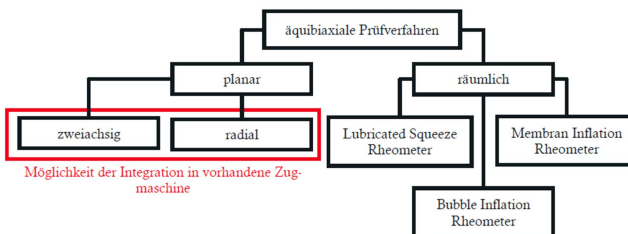


Abb. 3: Schematische Übersicht äquibiaxialer Prüfverfahren

Die planaren Prüfverfahren können in zweiachsig (vgl. [1], [3]-[5]) und radial [2] unterteilt werden. Diese beiden Prüfmethode bieten die Möglichkeit der Integration in eine uniaxiale Zugmaschine. Über den Verfahrenweg der Traverse wird eine Bewegung der Einspannelemente erzeugt, die zu der gewünschten Dehnung der Probe führt.

3. Konstruktion

Für den Entwurf einer äquibiaxialen Zugvorrichtung, unter Verwendung einer uniaxialen Zugmaschine, wird ein konstruktiver Entwicklungsprozess (KEP [6]) durchgeführt. Aufgrund der Forderung der Verwendung einer uniaxialen Zugmaschine, kommen ausschließlich planare Verfahren in Frage. Wie in [7] dokumentiert, wird nach dem Aufstellen einer Funktionsstruktur und eines Funktionsplans mit Hilfe einer Kombinationstabelle mögliche Varianten gebildet und diese mit Blick auf ihre Funktionalität und Herstellbarkeit bewertet. Die Variante mit der besten Bewertung (Reckrahmen) wird umgesetzt.

3.1. Funktionsprinzip

In Abbildung 4 ist das umzusetzende Funktionsprinzip zur Erzeugung eines äquibiaxialen Spannungszustands zu sehen. Die Aufteilung der uniaxialen Bewegung in zwei betragsmäßig gleiche zueinander senkrechte Bewegungen erfolgt über einen Reckrahmen. Die Einspannelemente für den aus Silikon bestehenden Prüfkörper werden am Rahmen mit Radialrillenkugellagern gelagert. Hierdurch wird die nötige Bewegung normal zur Krafteinleitungsrichtung gewährleistet. Die Einspannung wird über drei Einspannstellen pro Probenseite (insgesamt zwölf) realisiert. Der Reckrahmen besteht weiterhin aus einem oberen Winkel und einem unterem Winkel. Die Probe soll kreuzförmig ausgeführt werden.

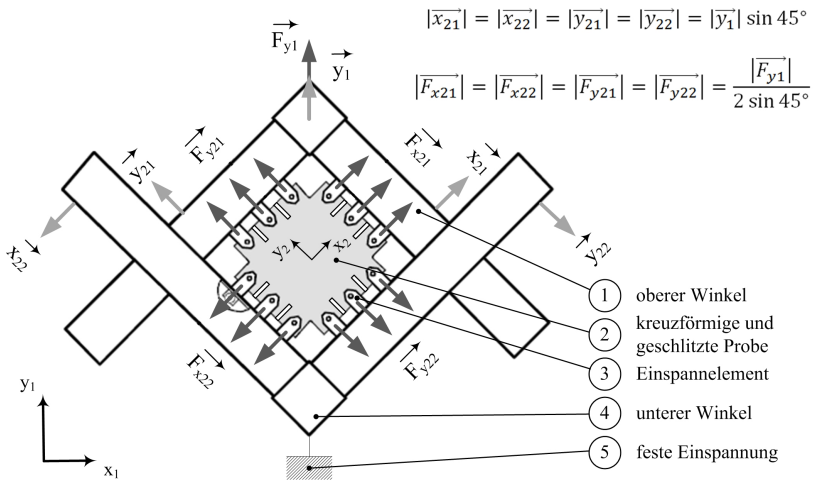


Abb. 4: Schematischer Aufbau eines Reckrahmens [1]

Anmerkung: F_{y1} entspricht der gemessenen Kraft an der Zugmaschine, F_{x2i} bzw. F_{y2i} ($i = 1, 2$) der Kraft an der Probenkante; y_1 entspricht dem Verfahrensweg der Traverse und x_{2i} bzw. y_{2i} ($i = 1, 2$) dem in die Probe eingeleiteten Weg

3.2. Probenauslegung

Hauptaugenmerk liegt neben der passenden Konstruktion auf der Erzeugung eines homogenen äquibiaxialen Spannungszustands. Um qualitative Aussagen über den Spannungszustand in der Probe zu treffen, werden Simulationen in ANSYS® Classic durchgeführt. Um zu prüfen, ob eine Verschiebungsaufprägung einer idealen Einspannung und eine Kraftaufprägung einer realen Einspannung entsprechen, wird dies über die Aufbringung unterschiedlicher Randbedingungen geprüft. Die Probe wird innerhalb einer ersten Simulationen mit den äußeren Kräfte F_{Ai} und in einer zweiten Simulation durch aufgeprägte Verschiebungen u_{Ai} belastet. Weiterhin wird die Möglichkeit geprüft, Versuche ohne videooptische Auswertung durchzuführen.

Die Probe wird zwischen den Einspannstellen geschlitzt (vgl. Abbildung 4). Da ein Zusammenhang zwischen Schlitzbreite s und Homogenität des Spannungszustands vermutet wird, wird dieser Parameter im Bereich von

0,1 bis 4,0 mm variiert. Da keine Materialdaten aus äquibiaxialen Zugversuchen vorliegen, wird die Simulation mit einem linearen, isotropen und homogenen Material durchgeführt. Um ein gutes Verhältnis zwischen Aufwand bei der Einspannung der Probe und der Ausdehnung der Probe senkrecht zur Probekante zu gewährleisten, werden drei Einspannstellen pro Probenseite (insgesamt zwölf) gewählt. Der E-Modul wird mit 2 MPa sehr klein gewählt und die Poissonzahl auf 0,4999 gesetzt, um das nahezu inkompressible Verhalten von Silikon abzubilden. Die Probe ist kreuzförmig und hat eine gleichseitige Länge von 100 mm, wobei des Probenzentrum (Probe ohne Einspannlaschen) 50 mm im Quadrat misst. Die Dicke beträgt einen Millimeter. Um die Berechnungszeit, trotz einer feinen gleichförmigen Vernetzung, möglichst kurz zu halten, wird die Probensymmetrie genutzt und nur ein Viertel simuliert (vgl. Abbildung 5). Die Viertelprobe wird mit ca. 22.000 Solid186 Elementen vernetzt.

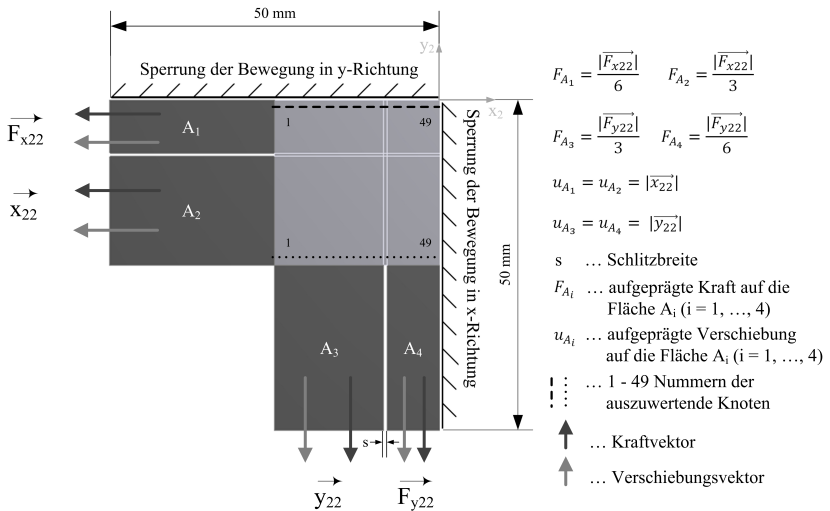


Abb. 5: ANSYS-Viertelmodell der geschlitzten Probe mit Randbedingungen und zwei Belastungsarten (Verschiebung und Kraft)

In Abbildung 6 sind die normierten Verschiebungen in y₂-Richtung entlang der gepunkteten Linie (vgl. Abbildung 5) bei Kraftaufprägung (oben) bzw. Verschiebungsaufprägung (unten) zu sehen. Variiert wird die Schlitzbreite s. Die maximale Auslenkung wird als Referenz verwendet. Es werden normierte Werte ausgewertet.

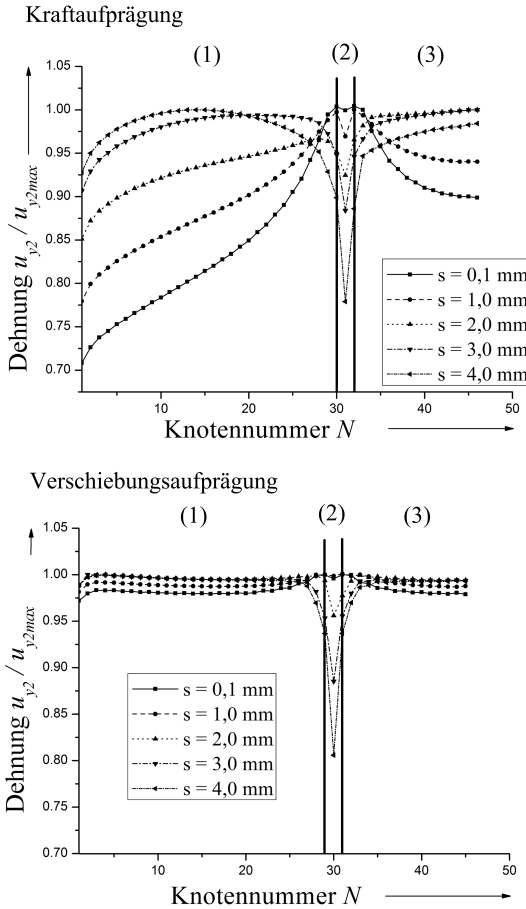


Abb. 6: Abhängigkeit der normierten Verschiebung von der Schlitzbreite s über die Knoten entlang der gepunkteten Linie bei aufprägter Kraft (oben) und aufprägtem Weg (unten) in Abhängigkeit der Knotennummer N

Die in Abbildung 6 dargestellten Diagramme lassen sich in drei Abschnitte unterteilen:

Abschnitt (1): Bis zu einer Schlitzbreite kleiner gleich 2 mm ist bei aufprägter Kraft eine kontinuierliche Erhöhung der normierten Dehnung festzustellen, wobei sich mit steigender Schlitzbreite die maximale

Abweichung vom Maximalwert der Verschiebung verringert. Die sich verkleinernden Abweichungen resultieren aus der Verringerung der Fläche der Einspannelemente, auf welche eine gleichgroße Kraft aufgeprägt wird. Ab einer Schlitzbreite größer 2 mm fällt die Verschiebung bereits vor Erreichen von Abschnitt (2) ab.

Bei aufgeprägter Verschiebung ist eine gleichmäßige Dehnung der Probe zu erkennen, wobei sich mit steigender Schlitzbreite die maximale Abweichung vom Maximalwert der normierten Dehnung verringert. Auch hier wird der Einfluss mit steigender Schlitzbreite auf die benachbarten Schlitzknoten von Abschnitt (2) größer. Es kommt ab $s \geq 2$ mm zu einem Abfall der Verschiebung vor Erreichen von Abschnitt (2). Ab einer Schlitzbreite von $s \geq 2$ mm ist die Abweichung zum Maximalwert der normierten Dehnung hinreichend klein.

Abschnitt (2): Im Schlitz kommt es bei Kraftaufprägung, abhängig von der Breite des Schlitzes s , zu einer deutlichen Verringerung der normierten Dehnung, da die Kräfte an dieser Stelle nicht direkt in die Probe eingeleitet werden. Je größer der Schlitz ist, umso stärker ist der Dehnungsabfall im Betrag und Anzahl der betroffenen Knoten in Schlitznähe. Der in beiden Diagrammen zu sehende Peak entspricht nicht der Realität und ist allein der Erzeugung eines gleichmäßigen Netzes bei akzeptablen Berechnungszeiten geschuldet. Auch bei Verschiebungsaufprägung kommt es bei größeren Schlitzbreiten zu immer ausgeprägteren Minima der normierten Dehnung.

Abschnitt (3): Ab der Mitte des Schlitzes steigen die normierten Dehnungen wieder an. Ob und wie stark sie nach dem Anstieg wieder abfallen, ist abhängig von der Schlitzbreite. Für eine Schlitzbreite größer gleich zwei Millimeter werden die aufgebrachten Kräfte und die daraus resultierenden Verschiebungen in die Probe übertragen und haben nur geringen Einfluss auf die benachbarten Knoten. Je kleiner der Schlitz ist, umso stärker ist der Abfall der Verschiebungen nach dem Schlitz. Auch bei aufgeprägter Verschiebung steigt die normierte Dehnung mit steigenden Knotennummern wieder an. Wie in Abschnitt (1) verringert sich die Abweichung vom Maximalwert mit steigender Schlitzbreite. Ab einer Schlitzbreite größer gleich zwei Millimeter ist die Abweichung hinreichend klein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine Probe mit drei Einspannstellen pro Seite und einer Schlitzbreite von $s = 2$ mm die besten Ergebnisse verspricht und deshalb genutzt werden sollte. Wie vermutet entspricht die Verschiebungsaufprägung einer idealen Einspannung und die

Kraftaufprägung einer realen Einspannung. Abbildung 7 zeigt die Abweichung der Spannungen in den ersten beiden Hauptachsenrichtungen bei Kraftaufprägung.

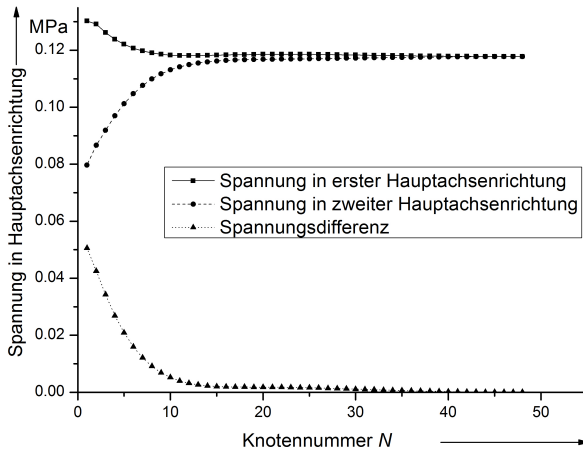


Abb. 7: Vergleich der Spannung in den ersten beiden Hauptachsenrichtungen bei einer Schlitzbreite von $s = 2$ mm, entlang der gestrichelten Linie bei Kraftaufprägung

Bei einer äquibiaxialen Beanspruchung müssen die Streckungsverhältnisse in den ersten beiden Hauptachsenrichtungen (λ_1, λ_2) gleich groß sein. Da zur Simulation ein lineares, isotropes und homogenes Material verwendet wird, können diese Spannungen in Hauptachsenrichtung ausgewertet werden. Werden die Spannungen in der ersten und zweiten Hauptrichtung entlang der gestrichelten Linie (vgl. Abbildung 5) ausgewertet, ist auffällig, dass die Abweichungen umso größer werden, je weiter außen (kleine Knotennummern) ausgewertet wird. Zur Auswertung der Spannungen ist im äquibiaxialen Zugversuch also nur ein Teilbereich der Probe tauglich. Wie groß dieser ausfällt, ist abhängig von den tolerierten Abweichungen. Folglich sind bei dieser Probenabmessung und der gewählten Schlitzbreite nur die inneren 60 % (ca. ab Knotennummer 15) der Probe tauglich. Aus diesem Grund ist es erforderlich videoptisch auszuwerten, falls die Dehnungen exakt ermittelt werden soll.

3.3. Konstruktive Umsetzung

Bei der Gestaltung des Reckrahmens ist neben der Funktion auch das gewählte Herstellungsverfahren zu berücksichtigen. Die Wahl des Herstellungsverfahrens hängt wesentlich von der Form und Größe der Einzelteile und dem verwendeten Material ab. Aus praktischen Gründen werden bei der Umsetzung vorrangig Kaufteile in Form von L-Profilen (DIN 1029 - S235JR – 20 x 10 x 3 mm) verwendet. Weiterhin dürfen zulässige Werkstoffbeanspruchungen im Betrieb nicht überschritten werden. Um dies zu gewährleisten wird die Stellen kritischer Beanspruchung überprüft (vgl. [7]). Geeignet ist rostfreier oder brüniertes Stahl. Abbildung 8 zeigt den Aufbau des Reckrahmens mit eingespannter Probe nach Abschluss der Detailentwicklung.

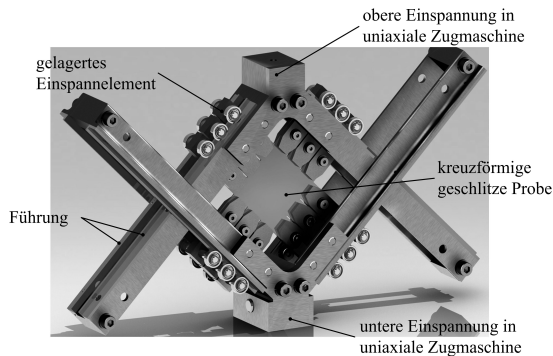


Abb. 8: Prototyp der äquibiaxialen Zugvorrichtung mit eingespannter Probe nach Abschluss der Detailentwicklung

Wie in Abschnitt 3.1 gefordert, wird die uniaxiale Bewegung einer Zugmaschine über einen Reckrahmen senkrecht in eine kreuzförmige Probe eingeleitet. Die Einspannelemente werden profiliert, um das Herausrutschen der Probe während des Zugversuchs zu minimieren. Weiterhin werden jedes Einspannelemente über zwei Radialrillenkugellager (Typ 695ZZ) gelagert, welche auf jeweils einer Aluminiumschiene (L-Profil 10 x 10 x 2 mm) laufen.

4. Zusammenfassung

Ziel war es, eine äquibiaxiale Zugvorrichtung zu konzipieren und zu konstruieren, welche in eine uniaxiale Zugmaschine integriert werden kann.

Wichtigstes Kriterium war die Erzeugung eines homogenen äquibiaxialen Spannungszustandes. Um dies beurteilen zu können, wurden FE-Simulationen durchgeführt. Da noch keine äquibiaxialen Zugdaten vorhanden waren, wurde mit einem linearem, isotropen und homogenen Material (E-Modul 2 MPa und Poissonzahl 0,4999) gerechnet. Die Spannungen in einer kreuzförmigen Probe mit einer Spaltbreite s von 2 mm erwiesen sich hierbei als günstig. Nach der Auslegung einer Kreuzprobe mit drei Einspannstellen pro Probenseite (insgesamt zwölf Einspannstellen) wurde ein Reckrahmen konstruiert, welcher die Probe aufnehmen und äquibiaxial beanspruchen kann. Durch die Simulationen konnte bestätigt werden, dass eine Verschiebungsaufprägung einer idealen Einspannung und die Kraftaufprägung einer realen Einspannung entspricht. Weiterhin hat sich die Vermutung bestätigt, dass eine videoptische Auswertung der Probe während des Versuchs nötig ist.

Literatur

- [1] Grambow, A.: Bestimmung der Materialparameter gefüllter Elastomere in Abhängigkeit von Zeit, Temperatur und Beanspruchungszustand. RWTH Aachen. Fakultät MW, Dissertation, 2002
- [2] Day, J., Miller, K.: (2000) Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of Experimental Technique. [[http://www.axelproducts.com/downloads/ BiaxialExtension.pdf](http://www.axelproducts.com/downloads/BiaxialExtension.pdf)] Zugriff am 9.10.2008
- [3] Hegemann, B.: Deformationsverhalten von Kunststoffen beim Thermoformen – experimentelle und virtuelle Bestimmung. Universität Stuttgart. Fakultät MB, Dissertation, 2004
- [4] Vezer, Sz.; Major, Z.: Development of an in-plane biaxial test setup for monotonic and cyclic tests of elastomers. Polymer Competence Center Leoben GmbH. 2008
- [5] Duncan, Bruce; Crocker, Louise: Characterisation of flexible adhesives for design. National Physical Laboratory. Teddington. 2001
- [6] Richtlinie VDI 2221 : Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf. 1993
- [7] Feierabend, M.: Praktische Bestimmung der Materialparameter von Silikon im Zugversuch. TU Ilmenau. Studienarbeit. 2008