

Werner Sobek, Walter Haase  
Christian Kelleter, Jens Schneider, Michael Drass

# **Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau**

**F 3003**

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2016

ISBN 978-3-8167-9848-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00  
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

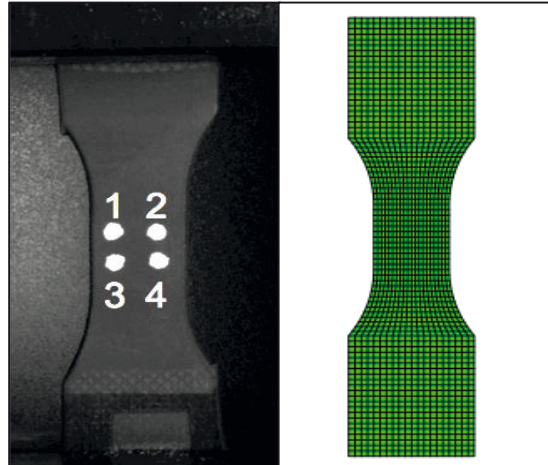
E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/bauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/bauforschung)

## Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau

Endbericht für den Zeitraum vom 01.01.2014 bis 15.01.2016



Universität Stuttgart

Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Prof. Dr.-Ing. Balthasar Novák

Jun.-Prof. Dipl.-Ing. Dirk A. Schwede, PhD



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Institut für Statik und Konstruktion

Prof. Dr.-Ing. Ulrich Knaack

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

Prof. Dr.-Ing. Johann-D. Wörner

Forschungsprojekt: Untersuchungen zum Tragverhalten von kleinteiligen Elastomerlagern im Glasbau

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart (Antragsteller)  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)  
Pfaffenwaldring 7 und 14  
70569 Stuttgart

TU Darmstadt (Mitforschende Stelle)  
Institut für Statik und Konstruktion (ISM + D)  
Franziska-Braun-Straße 3  
64287 Darmstadt

Förderstelle: Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. (Aktenzeichen: II 3-F20-10-1-168 / SWD – 10.08.18.7-13.16) Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren

Förderkennzeichen: SWD – 10.08.18.7-13.16

Projektleiter: Dr.-Ing. Walter Haase (ILEK)

Mitarbeiter: Dipl.-Ing. Christian Kelleter (ILEK)  
Dipl.-Ing. Michael Drass (ISM + D)

Bearbeitungsbeginn: Januar 2014

Berichtszeitraum: 01.01.2014 bis 15.01.2016

Abbildung auf der Titelseite: Uniaxiale Zugprobe und Finite-Elemente-Rechenmodell

Dieser Bericht umfasst 201 Seiten.

Stuttgart, den

---

Dr.-Ing. Walter Haase

---

Dipl.-Ing. Christian Kelleter

Darmstadt, den

---

Prof. Dr.-Ing. Jens Schneider

---

M.Eng. Michael Drass

# Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                              |           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Einleitung.....</b>                                                                       | <b>9</b>  |
| 1.1      | Motivation .....                                                                             | 9         |
| 1.2      | Ziel des Forschungsvorhabens .....                                                           | 9         |
| 1.3      | Methodische Vorgehensweise .....                                                             | 9         |
| <b>2</b> | <b>Recherche und Stand der Technik .....</b>                                                 | <b>9</b>  |
| <b>3</b> | <b>Grundlagen von Kunststoffen .....</b>                                                     | <b>12</b> |
| 3.1      | Vernetzung von Molekülketten .....                                                           | 13        |
| 3.2      | Thermoplaste .....                                                                           | 14        |
| 3.3      | Elastomere .....                                                                             | 14        |
| 3.4      | Thermoplastische Elastomere .....                                                            | 14        |
| 3.5      | Duroplaste.....                                                                              | 14        |
| 3.6      | Mechanische Eigenschaften von Kunststoffen .....                                             | 14        |
| 3.7      | Kunststoffhärte .....                                                                        | 17        |
| 3.8      | Untersuchte Kunststoffe .....                                                                | 18        |
| 3.8.1    | Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk.....                                                         | 18        |
| 3.8.2    | Silikon .....                                                                                | 19        |
| 3.8.3    | Thermoplastisches Elastomer .....                                                            | 19        |
| 3.8.4    | Thermoplastisches Polyurethan .....                                                          | 19        |
| <b>4</b> | <b>Voruntersuchungen.....</b>                                                                | <b>19</b> |
| 4.1      | Versuchsaufbau .....                                                                         | 20        |
| 4.2      | Versuchsprogramm.....                                                                        | 22        |
| 4.3      | Ergebnisse .....                                                                             | 23        |
| 4.3.1    | Pressung .....                                                                               | 24        |
| 4.3.2    | Formfaktor.....                                                                              | 25        |
| 4.3.3    | Härte.....                                                                                   | 25        |
| 4.3.4    | Belastungsgeschwindigkeit .....                                                              | 25        |
| <b>5</b> | <b>Materialcharakteristik und Experimentelle Untersuchungen .....</b>                        | <b>27</b> |
| 5.1      | Allgemeines .....                                                                            | 27        |
| 5.1.1    | Materialien .....                                                                            | 27        |
| 5.1.2    | Vorbemerkungen zum experimentellen Versuchsprogramm .....                                    | 27        |
| 5.1.3    | Anmerkungen zu den Spannungszuständen unterschiedlicher experimenteller Untersuchungen ..... | 29        |
| 5.1.4    | Anmerkungen zum Energieeintrag.....                                                          | 31        |
| 5.1.5    | Anmerkungen zur optischen Versuchsauswertung.....                                            | 34        |

|          |                                                                |           |
|----------|----------------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.6    | Anmerkungen zur statischen Auswertung .....                    | 34        |
| 5.2      | Monotone, uniaxiale Zugversuche .....                          | 36        |
| 5.2.1    | Allgemeines .....                                              | 36        |
| 5.2.2    | Probenherstellung .....                                        | 36        |
| 5.2.3    | Versuchsdurchführung .....                                     | 38        |
| 5.2.4    | Versuchsauswertung .....                                       | 38        |
| 5.3      | Zyklische, uniaxiale Zugversuche .....                         | 42        |
| 5.3.1    | Allgemeines .....                                              | 42        |
| 5.3.2    | Probenherstellung .....                                        | 43        |
| 5.3.3    | Versuchsdurchführung .....                                     | 43        |
| 5.3.4    | Versuchsauswertung .....                                       | 43        |
| 5.4      | Monotone, uniaxiale Druckversuche .....                        | 46        |
| 5.4.1    | Allgemeines .....                                              | 46        |
| 5.4.2    | Probenherstellung .....                                        | 48        |
| 5.4.3    | Versuchsdurchführung .....                                     | 50        |
| 5.4.4    | Versuchsauswertung .....                                       | 52        |
| 5.5      | Dynamisch-Mechanische Thermoanalyse .....                      | 55        |
| 5.5.1    | Allgemeines .....                                              | 55        |
| 5.5.2    | Probenherstellung .....                                        | 56        |
| 5.5.3    | Versuchsdurchführung .....                                     | 57        |
| 5.5.4    | Versuchsauswertung .....                                       | 58        |
| <b>6</b> | <b>Numerische Simulation .....</b>                             | <b>61</b> |
| 6.1      | Regressionsmodell .....                                        | 61        |
| 6.1.1    | Formänderungsenergie .....                                     | 62        |
| 6.1.2    | Dehnungen .....                                                | 63        |
| 6.2      | Formänderungsenergiedichtefunktionen .....                     | 63        |
| 6.2.1    | Ansatz nach Arruda-Boyce .....                                 | 63        |
| 6.2.2    | Reduzierter Polynom Ansatz .....                               | 64        |
| 6.2.3    | Polynomansatz .....                                            | 64        |
| 6.2.4    | Ansatz nach Ogden .....                                        | 64        |
| 6.3      | Kurvenanpassung (Curve-Fitting) .....                          | 64        |
| 6.3.1    | Allgemeines .....                                              | 64        |
| 6.3.2    | Gauß-Newton-Verfahren .....                                    | 64        |
| 6.3.3    | Levenberg-Marquardt-Algorithmus .....                          | 65        |
| 6.4      | Anpassungsgüte der Materialmodelle .....                       | 66        |
| 6.4.1    | Grundlagen zur Ermittlung des Determinationskoeffizients ..... | 66        |
| 6.5      | Anpassungsgüte des uniaxialen Zugversuches .....               | 66        |
| 6.5.1    | Überprüfung der Anpassungsgüte über eine FEM-Simulation .....  | 68        |
| 6.6      | Anpassungsgüte der uniaxialen Druckversuche .....              | 73        |
| 6.6.1    | Überprüfung der Anpassungsgüte über FEM-Simulationen .....     | 75        |

|           |                                                                                   |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>7</b>  | <b>Semi-Analytisches Berechnungsverfahren .....</b>                               | <b>79</b>  |
| 7.1       | Ableitung materieller Kennwerte auf Basis von Indentation und Shore-Härten .....  | 79         |
| 7.2       | Analyse des Modells nach BATTERMANN und KÖHLER für geklemmte Systeme .....        | 80         |
| 7.3       | Entwicklung eines mechanischen Modells auf Basis von Druckversuchen .....         | 81         |
| 7.3.1     | Darstellung des mechanischen Modells .....                                        | 82         |
| 7.3.2     | Verifizierung des MISO-Material-Modells .....                                     | 84         |
| 7.3.3     | Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (I) .....   | 87         |
| 7.3.4     | Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (II) .....  | 89         |
| 7.3.5     | Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (III) ..... | 90         |
| 7.3.6     | Validierung des MISO-Material-Modells unter Simulation eines Bauteils (IV) .....  | 90         |
| 7.4       | Fazit zur Modellierung geklemmter Punkthaltersysteme im Glasbau .....             | 91         |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung .....</b>                                                      | <b>93</b>  |
| <b>9</b>  | <b>Verzeichnisse .....</b>                                                        | <b>95</b>  |
| 9.1       | Abbildungsverzeichnis .....                                                       | 95         |
| 9.2       | Tabellenverzeichnis .....                                                         | 98         |
| <b>10</b> | <b>Literatur .....</b>                                                            | <b>99</b>  |
| <b>11</b> | <b>Anlagen .....</b>                                                              | <b>102</b> |
| 11.1      | Beispielrechnung nach dem Gauß-Newton Verfahren .....                             | 102        |
| 11.2      | Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Zugversuch .....             | 105        |
| 11.3      | Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Zugversuch .....             | 111        |
| 11.4      | Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Zugversuch .....            | 117        |
| 11.5      | Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Zugversuch .....         | 123        |
| 11.6      | Erstellte Materialmodelle für TPU aus dem uniaxialen Druckversuch .....           | 129        |
| 11.7      | Erstellte Materialmodelle für TPE aus dem uniaxialen Druckversuch .....           | 147        |
| 11.8      | Erstellte Materialmodelle für Silikon aus dem uniaxialen Druckversuch .....       | 165        |
| 11.9      | Erstellte Materialmodelle für EPDM aus dem uniaxialen Druckversuch .....          | 183        |
| 11.10     | Daten zur Vereinfachten Modellierung von Klemmhaltern .....                       | 201        |