

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	2
1 Abbildungsverzeichnis	3
2 Allgemeines	4
2.1 Vorwort.....	4
2.2 Aufgabenstellung aus Antrag	4
2.3 Voraussetzung der Vorhabensdurchführung	4
2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens	5
2.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand gemäß Antrag	5
2.5.1 Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte.....	5
2.5.1.1 Verarbeitungsverfahren Spritzguss.....	5
2.5.1.2 FE-Modellbildung und Vorhersagemethoden	5
2.5.1.3 Schädigungsparameter und Betriebsfestigkeit.....	6
2.5.2 Fachliteratur, Informations- und Dokumentendienste.....	7
2.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	7
3 Eingehende Darstellung	8
3.1 Ergebnisse in den Arbeitspaketen	8
3.1.1 Arbeitspaket 1.1: Rohstoffe, Rezepturen	8
3.1.1.1 Naturkautschuk.....	8
3.1.1.2 Chloropren-Kautschuk).....	12
3.1.1.3 Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM).....	13
3.1.2 Arbeitspaket 1.2: Einfluss der Verarbeitung (Spritzguss)	14
3.1.2.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Lebensdauer.....	14
3.1.2.2 Spritzgusssimulation	20
3.1.3 Arbeitspaket 5: FE-Modellbildung	24
3.1.4 Arbeitspaket 6: Schädigungshypothesen und Verifikation.....	28
3.1.4.1 Schädigungsrechnung	28
3.1.4.2 Prüfzeitverkürzung.....	29
3.2 Nutzen.....	31
3.3 Fortschritt bei anderen Stellen.....	31
3.4 Veröffentlichungen im Projekt.....	32
4 Literaturverzeichnis	33

1 Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Idee „optimierte Rohstoffe“ (Folie Rheinchemie aus Projektsitzung).....	8
Bild 2	Rheometerkurven Mischung DIK-konventionell und DIK-spezial (RPA).....	9
Bild 3	Geometrie der Versuchswerkstücke (Puffer)	10
Bild 4	Kraft-Weg-Kennlinien der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv (links) und DIK-spez (rechts)	10
Bild 5	Amplitudengang der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv und DIK-spez	10
Bild 6	Lebensdauervergleich der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv und DIK-spez bei verschie- denen Vorlasten und Amplituden	11
Bild 7	Lebensdauervergleich der Puffer P0 mit den Mischungen CR-konv und CR-spez	12
Bild 8	Spritzgussform für Testpuffer	14
Bild 9	Verteilung mit Sensorik (Temperatur- und Drucksensorik)	15
Bild 10	Eingebaute Form mit Online-Datenvisualisierung	15
Bild 11	Statistischer Versuchsplan für die Untersuchungen (Folie aus Projektsitzung).....	16
Bild 12	Auswertung des statistischen Versuchsplans: Einflüsse und Wechselwirkungen (Folie aus Projektsitzung).....	17
Bild 13	Auswertung des statistischen Versuchsplans: Grafische Darstellung (Folie aus Projektsitzung) 17	17
Bild 14	Würfel aus DoE mit Lebensdauerwerten an den Ecken	18
Bild 15	Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit und Heiztemperatur auf die Lebensdauer bei einer Materialtemperatur von 65°C	18
Bild 16	Einfluss der Material- und Heiztemperatur auf die Lebensdauer bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 6 mm/s	19
Bild 17	Einfluss der Materialtemperatur und Einspritzgeschwindigkeit auf die Lebensdauer bei einer Heiztemperatur von 195°C	19
Bild 18	RPA-Vulkameterkurven bei unterschiedlichen Temperaturen (Mischung Phx-HS).....	20
Bild 19	Viertelmodell der Verteilung mit 2 Puffern.....	21
Bild 20	Steady State Simulation: Kanalbalancierung (asym. Verteilung) (Folie aus Projektsitzung)....	21
Bild 21	Transiente Simulation: Druck – Abgleich mit Realdaten im Kanal (Folie aus Projektsitzung) ..	22
Bild 22	Transiente Simulation: Befüllung und Abgleich mit Teilfüllungen (unten rechts)	22
Bild 23	Rheologisches Modell [1]	24
Bild 24	Dynamische Steifigkeit bei Probekörper (vgl. Simulation / Test) (Folie aus Vortrag [6])	24
Bild 25	Vergleich des Parameters Hystereseefläche mit Schäden am Probekörper	25
Bild 26	Typisches Ausfallbild einer Fahrwerksbuchse unter radialer und torsionaler Last	25
Bild 27	Beispiele unterschiedlicher Metallkerne (www.meyle.com)	26
Bild 28	FEM-Berechnung „Buchse mit zyl. Kern“	26
Bild 29	FEM-Berechnung „Buchse mit kont. Kern“	26
Bild 30	Lebensdauerergebnisse der beiden untersuchten Buchsen (Folie aus Vortrag [7])	27
Bild 31	Bemessung der Schädigung gegen Wöhlerlinie aus Probekörper (Folie aus Vortrag [7])	27
Bild 32	PC-Programm zur mehrdimensionalen Schädigungsrechnung (Folie aus Projektsitzung)	28
Bild 33	Grundidee Omissionsversuch (Folie aus Projektsitzung)	29
Bild 34	Beispiel Omissionsversuch (Folie aus Projektsitzung).....	30

2 Allgemeines

2.1 Vorwort

Die Vibracoustic GmbH & Co. KG (Vibracoustic) ist als Nachfolger der Intech Thüringen GmbH (Intech) zum 01.12.2004 in das Projekt eingestiegen (s. 2.3). Beide Unternehmen gehörten in der Projektlaufzeit zum Phoenix-Konzern. Es wurden die Ergebnisse der Intech im Rahmen des Vibracoustic-Antrages übernommen und weiterverwertet. Der vorliegende Bericht enthält somit auch Ergebnisse aus der Intech-Projektlaufzeit. Die Laufzeit des Vibracoustic-Projektes betrug 15 Monate, inklusive einer dreimonatigen kostenneutralen Verlängerung (s. auch 2.3).

Im folgenden wird bei den Arbeiten und Ergebnissen nicht explizit zwischen Vibracoustic, Intech und Phoenix-Konzern unterschieden. Die Gesellschaften werden im Bericht neutral als „Unternehmen“ bezeichnet.

Das Unternehmen hat im Rahmen des Projektes umfangreiche Veröffentlichungen (s. Anhang) durchgeführt und die Projektergebnisse bei Kundenbesuchen entsprechend kommuniziert und dargestellt. Daher werden einige Details im Bericht nicht explizit dargestellt sondern es wird auf die entsprechende Veröffentlichung hingewiesen.

2.2 Aufgabenstellung aus Antrag

Das Ziel des Gesamtvorhabens ist ein besseres Verständnis der Ermüdungs-, Verschleiß- und Alterungsmechanismen von Elastomeren und die Umsetzung dieser Kenntnisse in fertigungstechnische und konstruktive Maßnahmen.

Für den Spritzguss-Prozess ist das Ziel eine optimierte Prozess-Steuerung zur Erhöhung der Lebensdauer von Elastomer-Bauteilen und die Erarbeitung von zuverlässigen Vorhersagemethoden zur konstruktiven Verbesserung dieses Verfahrensschrittes, sowie der Auswahl der für die Lebensdauer der Artikel optimalen Prozess-Parameter.

Des weiteren soll durch das bessere Verständnis der Ermüdungsmechanismen der entscheidende Schädigungsparameter ermittelt werden. Aus den Messungen und den Analysen werden die für die Berechnungen (FEM) physikalischen Parameter in ein geeignetes Modell eingebaut. Mit diesen Daten wird ein zuverlässiges (dynamisches) FE-Modell aufgebaut, mit welchem Lebensdauerberechnungen unter stochastischen und realen gemessenen Belastungs-Zeit-Funktionen durchgeführt werden.

Die Prüfungen und Berechnungen sollen bei gleicher Aussagekraft verkürzt und vereinfacht werden. Hierzu werden die wichtigsten Punkte untersucht. Dazu gehören die geeignete Auswahl des Zählverfahrens, die Omission (Lastkollektiv) mit gleichem Schädigungsinhalt und die Reduzierung der Mehraxialität.

Alle diese Maßnahmen sollen produkt- und produktionsorientiert zu Energie- und Ressourceneinsparungen führen. Sie führen zu einer Entlastung der Umwelt, einhergehend mit einer Erhöhung der Verkehrssicherheit.

2.3 Voraussetzung der Vorhabensdurchführung

Aus dem Projektkonsortium ist die Intech Thüringen GmbH zum 31.12.2004 ausgeschieden. Die Vibracoustic GmbH & Co. KG hat als zum Phoenix-Konzern gehörende Gesellschaft die Position der Intech übernommen und die Ergebnisse weiterverwertet. Während das Projekt für

die anderen Partner im Rahmen einer Projektverlängerung für 1 Jahr weiterlief, hat die Vibracoustic hier einen Neuantrag gestellt.

Aufgrund der schon während der Intech-Projektlaufzeit eingebrachten innerbetrieblichen Leistungen der Vibracoustic in das Projekt und des Wechsels mehrerer Mitarbeiter von Intech zu Vibracoustic ist hier ein nahtloser Übergang möglich gewesen.

2.4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist im Konsortium mit den Partnern geplant worden. In den ersten konstitutiven Sitzungen wurden die Arbeitspakete geschnürt und die Meilensteine gesetzt. Gerade der hohe Querschnittscharakter des Vorhabens durch die Verzahnung der beteiligten Institute, eines Rohstofflieferanten und der Industriepartner hat zielführend zu den positiven Ergebnissen geführt.

In den regelmäßig durchgeführten Projektsitzungen wurden die Ergebnisse präsentiert und ausgetauscht. Hier ist die gemeinsame weitere Vorgehensweise festgelegt worden. Weiterhin gab es mehrere kleinere Treffen zwischen dem Unternehmen und den einzelnen Projektpartnern zu den entsprechenden Arbeitspaketen.

2.5 Wissenschaftlicher und technischer Stand gemäß Antrag

2.5.1 Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

2.5.1.1 *Verarbeitungsverfahren Spritzguss*

Die bisher eingesetzten Simulationswerkzeuge für den Spritzguss-Prozess sind 2 ½-dimensionale Programme. Durch die Vereinfachung auf zwei Dimensionen mit einer rechnerischen Dicke für den Temperaturverlauf (+ ½) kann es zu ungenügenden oder sogar falschen Ergebnissen kommen, siehe z.B. [12].

Die Spritzgussimulation ist ein zentraler Punkt in der Auslegung von Formen zur Fertigung von Metallgummiartikeln. Aufgrund der Mehrfachkavitäten in der Form ist die Dimensionierung des Verteilersystems eine Hauptaufgabe der Simulation [8][9][10][11][12]. Weiterhin haben die Prozessparameter einen Einfluss auf die Lebensdauer der Artikel. Im Unternehmen sind „echte“ 3-dimensionale Simulationsprogramme für CFD (Computational Fluid Dynamics) für die Auslegung des Verteilersystems und den Befüllungsvorgang im Einsatz. Die Erweiterung dieser Tools bzgl. der Optimierung der Prozessparameter hinsichtlich Lebensdaueraspekten war ein Ziel des Projektes.

2.5.1.2 *FE-Modellbildung und Vorhersagemethoden*

Das im Unternehmen vorhandene Materialmodell für dynamische Effekte bei Elastomerwerkstoffen bildet die Grundlage für die Ermittlung des im Vorhaben untersuchten Schädigungsparameters.

Für die Lebensdauervorhersage wird das Wöhlerkurvenkonzept mit dem örtlichen Konzept angewendet. Es werden Werkstoff-Wöhlerkurven mit dehnungsgeregelten Einstufen-Dauerschwingversuchen ermittelt. Mit Hilfe der FEM wird anschließend die maximale Werkstoffbeanspruchung für das vorliegende Bauteil berechnet. Um beim Praxisbauteil die Mehraxialität zu berücksichtigen, wird ein entsprechendes Schema für die Schädigungsrechnung angewendet [3]. Im Unternehmen wird zur Ermittlung der Wöhlerkurve der Walkschertest mit einem zylindrischen Probekörper verwendet [13][14].

Das Wöhlerkurvenkonzept ist sehr aufwändig in der Anwendung. Die ermittelte Wöhlerkurve ist nur für die aufgeprägte mittlere Probekörperbelastung gültig, da die Mittelbelastung bei

Elastomeren einen erheblichen Einfluss auf die Werkstoffermüdung ausüben kann. Aufgrund des viskoelastischen Werkstoffverhaltens sind die Wöhlerkurven zudem von der Prüffrequenz (Zeit) bzw. der Temperatur und der Belastungsform (harmonisch, gepulst, usw.) abhängig. Der Vertrauensbereich dieses Konzepts ist ungenügend und nicht optimiert, so dass die Bauteile mit zu hohen Sicherheiten ausgelegt werden [14].

Aufgrund der InkompRESSibilität der Elastomere sind die Verformungen (Dehnungen) geometrische Größen. Deswegen nimmt man zur Betrachtung der Schädigung aus der Dehnung ableitbare Hypothesen. Durch das Fehlen eines Materialgesetzes, welches Dehnungen in Spannungen umrechnet, sind andere Betrachtungen bisher nicht oder nur ungenügend untersucht worden.

2.5.1.3 Schädigungsparameter und Betriebsfestigkeit

Im Rahmen von aktuellen Entwicklungsprojekten hat das Unternehmen innerhalb des Konzerns Tools zur Lebensdauerberechnung geschaffen. Die Erweiterung und Absicherung dieser Verfahren war ein Ziel des Vorhabens.

Eine werkstoffseitige Optimierung speziell zur Steigerung der Lebensdauer einzelner Elastomerbauteile findet industrieseitig in der Regel keine Berücksichtigung. Zur Verbesserung der Lebensdauer werden üblicherweise Geometrie- und Konstruktionsoptimierungen eingesetzt. Die rechnerische Vorhersage der Lebensdauer von Elastomerbauteilen ist intensiver Gegenstand der Forschung. Unzureichend geklärt ist bisher die Frage nach relevanten Schädigungsparametern wie Spannung und/oder Dehnung und der Schadensakkumulation. Veröffentlichungen hierzu findet man bei [14]. Ungenügend geklärt ist auch die Abhängigkeit der Lebensdauer von der Mittellast (Haigh-Diagramm) und die Berücksichtigung multiaxialer Lasten.

Multiaxiale Lastfälle in der Betriebsfestigkeit gehören zu den bisher wenig in der Wissenschaft vertretenen Fragestellungen. Bearbeitet wurden sie z.B. von [23][24]. Typischerweise werden jedoch nur spezielle Lastfallkombinationen ohne Anspruch auf Allgemeingültigkeit betrachtet. Zusätzlich konzentrieren sich diese Arbeiten auf metallische Werkstoffe. Nur [22] liefert einen Beitrag speziell für Elastomerbauteile.

Forschungsarbeiten zur Prüfung von Elastomeren und insbesondere zur Prüfzeitverkürzung sind nicht bekannt. Bekannt ist lediglich ein Zusammenhang von Prüffrequenz und Temperatur durch die Williams-Landel-Ferry Gleichung [21][25], über deren erfolgreichen Einsatz zur Reduktion von Prüfzeiten jedoch keine Veröffentlichung berichtet. Gleiches gilt für die Anwendung von Omissionsverfahren.

Während einer Betriebsfestigkeitsprüfung ändern sich Verlustwinkel und Federrate des Materials zunächst nicht. Erst gegen Ende der Betriebsfestigkeit steigt der Verlustwinkel und die Federrate fällt. Im Augenblick ist die Änderung der Federrate und des Verlustwinkels das beste Ausfallkriterium. Dies findet sich auch in den Lastenheften der Automobilhersteller wieder. Rissbeurteilungen sind außerordentlich unsicher und führen häufig zu Fehlinterpretationen, da unrelevante kleine Anrisse bereits als Versagenskriterium herangezogen werden, oder die Anrisse lokale Dehnungen soweit schwächen, dass der Rissfortschritt zum Stehen kommt ohne eine kritische Größe zu erreichen [2].

Die Originalbeanspruchung des Bauteils liegt in einer Zeitfunktion der Belastung oder der Verformung vor. Die gesamte Zeitfunktion auf einem Prüfstand nachzufahren ist unmöglich, so dass man sich Zählverfahren bedient. Für die Beschreibung der Beanspruchungsfunktion von Elastomerbauteilen kommen drei Zählverfahren in Betracht. Das Level-Crossing-Zählverfahren, das Range-Pair-Zählverfahren und die Darstellung als Rainflow Matrix sind die für Elastomere üblichen Zählverfahren.

Die Raffungsmethoden durch eine Erhöhung der Amplitude, Frequenz und/oder Temperatur sind bisher nur ungenügend abgesichert.

2.5.2 Fachliteratur, Informations- und Dokumentendienste

Im Verlauf des Vorhabens sind regelmäßige Recherchen zu den behandelten Themen im Internet und in entsprechenden Bibliotheken durchgeführt worden.

2.6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Seitens des Unternehmens gab es keine Zusammenarbeit mit weiteren Stellen außerhalb des Konsortiums und des Phoenix-Konzerns.

Auf verschiedenen Fach-Kongressen und -Veranstaltungen sind die Themen mit anderen Firmen und Instituten diskutiert worden.

3 Eingehende Darstellung

3.1 Ergebnisse in den Arbeitspaketen

3.1.1 Arbeitspaket 1.1: Rohstoffe, Rezepturen

Das Ziel war hier durch optimierte Rohstoffe die Lebensdauer der Bauteile zu verbessern. Dies sollte durch ein homogeneres Netzwerk aufgrund einer feineren Dispersion der Chemikalien erreicht werden (Bild 1).

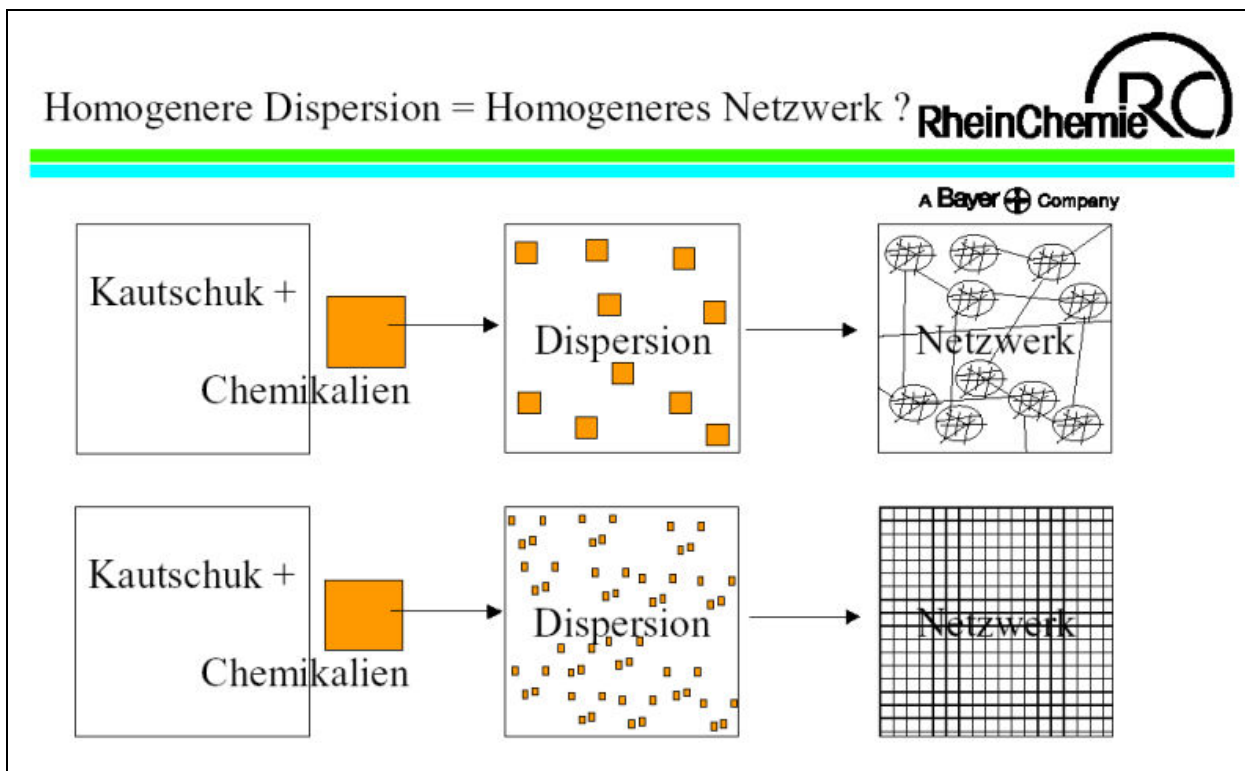


Bild 1 Idee „optimierte Rohstoffe“ (Folie Rheinchemie aus Projektsitzung)

Hierdurch soll der Einfluss der im Elastomer immer vorhandenen Fehlstellen auf die Lebensdauer reduziert werden.

3.1.1.1 Naturkautschuk

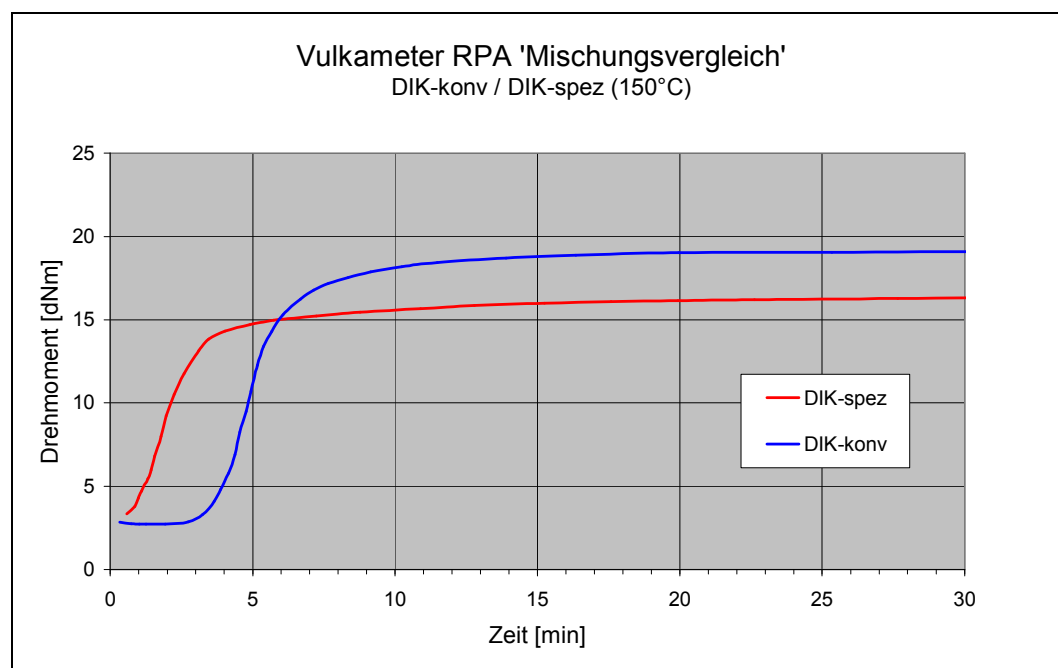
Im Rahmen des Projektes sind vom Unternehmen zwei Naturkautschuk-Mischungen untersucht worden. Die groben Rezepte sind in Tabelle 1 für die Mischungen „Phoenix-Mischung 1 (Phx-HS)“ und „Phoenix-Mischung 2 (Phx-LS)“. Hierbei ist Phx-HS eine hochbetriebsfeste Mischung, welche bis zu einem Temperaturbereich von 80°C einsetzbar ist. Das Einsatzgebiet ist typischerweise in Fahrwerksbuchsen. Phx-LS ist bis zu Temperaturen von 90°C einsetzbar und etwas „setzungsärmer“.

Erläuterungen zu den Abkürzungen in der Tabelle findet man in den Standardwerken der Elastomertechnik.

Tabelle 1: Mischungsgrundrezepturen der verwendeten 60 Shore - Mischungen

60 Shore High Sulphur (Phoenix-Mischung 1)		60 Shore Low Sulphur (Phoenix-Mischung 2)	
Bestandteile	pphr	Bestandteile	pphr
NR	100	NR	100
N 330 (Ruß)	24	N 550 (Ruß)	45
MT-LS (Ruß)	27		
Stearinsäure	n.b.	Stearinsäure	n.b.
Weichmacher (paraffinisch)	n.b.	Paraffinwachs	n.b.
IPPD (Alterungsschutzmittel)	n.b.	IPPD (Alterungsschutzmittel)	n.b.
TMQ (Alterungsschutzmittel)	n.b.	TMQ (Alterungsschutzmittel)	n.b.
ZnO	n.b.	ZnO	n.b.
Beschleuniger	X	Beschleuniger	X
Schwefel	n.b.	Schwefel	n.b.

Diese vom Projektpartner Rheinchemie optimierten Rohstoffe sind in die untersuchten Rezepturen eingebunden und beim DIK gemischt worden. Die Bezeichnungen lauten DIK-konv und DIK-spez. Dargestellt sind die Ergebnisse für die Mischung Phx-LS.

**Bild 2** Rheometerkurven Mischung DIK-konventionell und DIK-spezial (RPA)

Das Rheometer zeigt ein deutlich schnelleres Vernetzungsverhalten der Mischung DIK-spez im Vergleich zur DIK-konv.

Das Unternehmen hat hieraus Probekörper geheizt (Bild 3) und Untersuchungen durchgeführt.

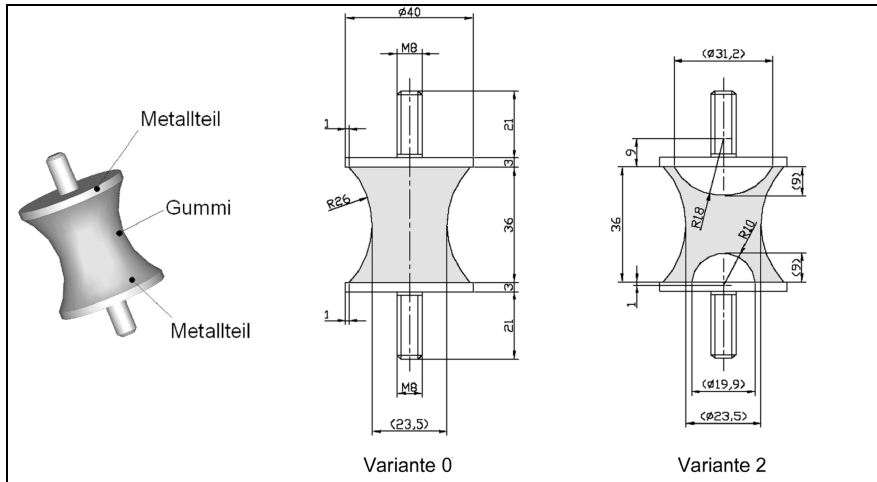


Bild 3 Geometrie der Versuchswerkstücke (Puffer)

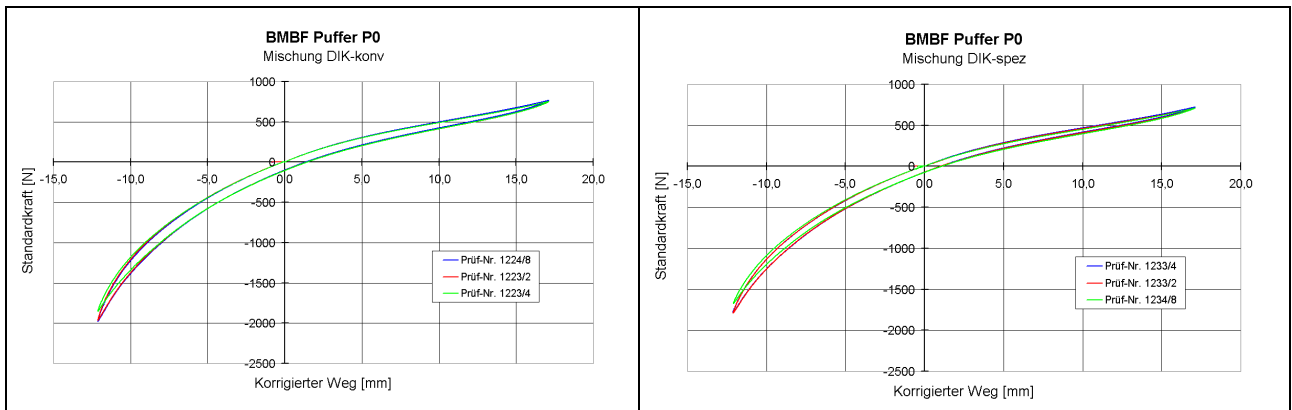


Bild 4 Kraft-Weg-Kennlinien der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv (links) und DIK-spez (rechts)

Die Kennlinien (Bild 4) zeigen fast identisches Verhalten der beiden Mischungen. Im Amplitudengangversuch zeigt die Mischung DIK-spez einen deutlich höheren Verlustwinkel und eine geringere Verhärtung hin zu kleineren Amplituden (Bild 5).

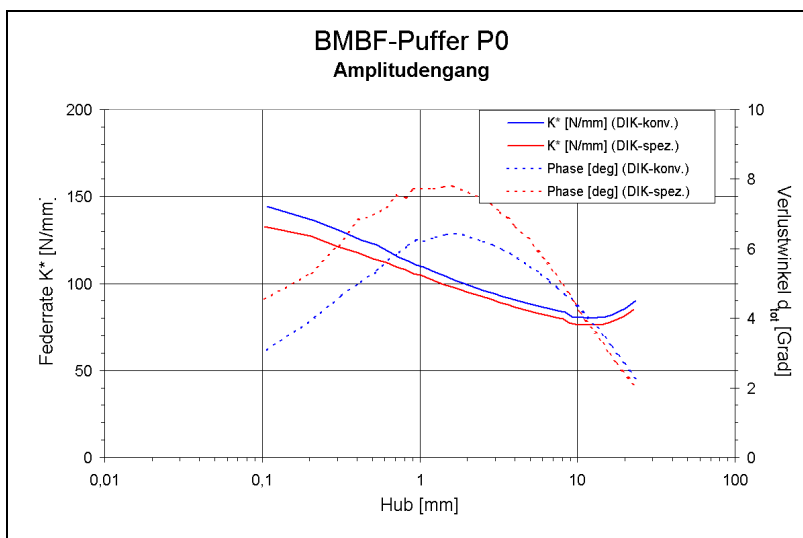


Bild 5 Amplitudengang der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv und DIK-spez

Anschließend sind mehrere Lebensdauerversuche an den Puffern im Wechsellastversuch gefahren worden (Bild 6). Im Rahmen der Statistik zeigt die Mischung DIK-spez auf Basis von Mischung Phx-LS keine Verbesserung der Lebensdauer. Vergleichbare Ergebnisse haben Untersuchungen des Projektpartners DIK mit dem Tear-Analyzer ergeben.

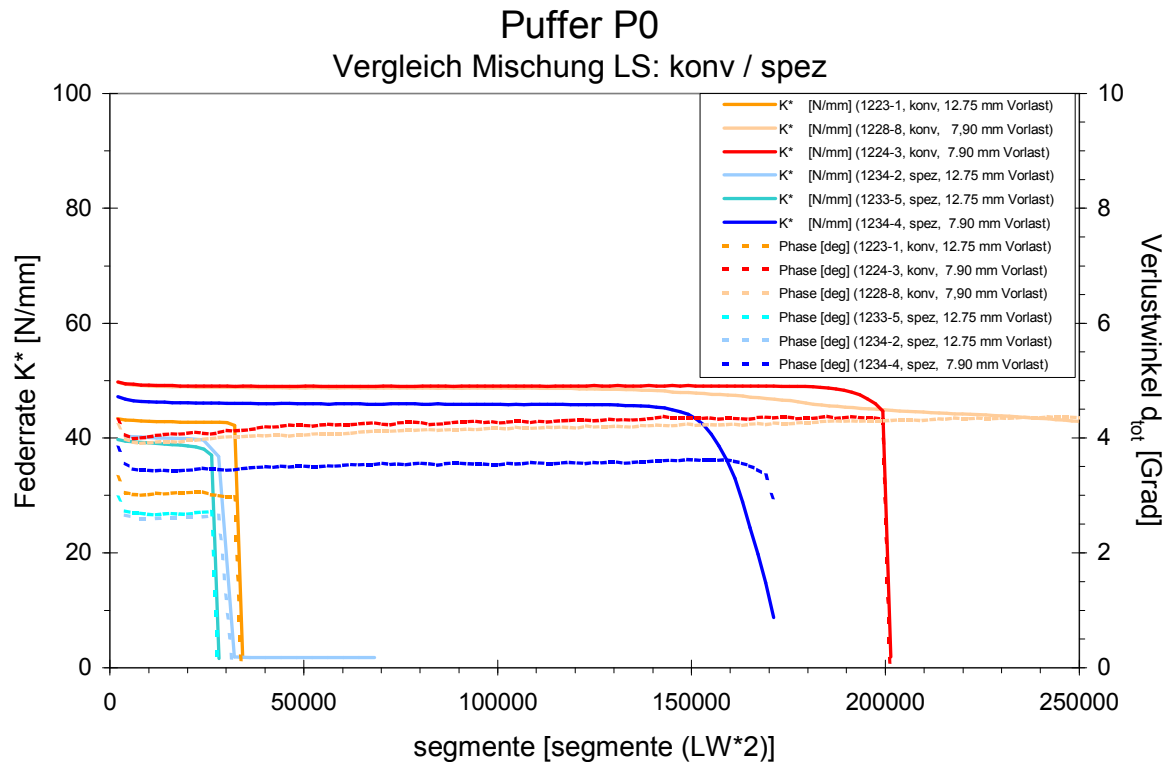


Bild 6 Lebensdauervergleich der Puffer P0 mit den Mischungen DIK-konv und DIK-spez bei verschiedenen Vorlasten und Amplituden

Die untersuchte Naturkautschukmischung scheint durch den Ersatz der mikrodispergierten Materialien keine verbesserte Ermüdungseigenschaft zu zeigen. Die Unterschiede der Laufzeiten bei gleichen Amplituden liegen im typischen Streubereich des Elastomers.

Aufgrund der erheblich beschleunigten Vernetzungsreaktion bieten die Zusätze aber ein großes Potential in der Reduzierung der Zykluszeiten bei der Vulkanisation der Artikel. In den durchgeführten Untersuchungen ergibt sich hierbei keine Verschlechterung der Lebensdauer.

3.1.1.2 Chloropren-Kautschuk)

Als weiteres Basiselastomer wurde Chloropren-Kautschuk (CR) untersucht. CR wird z.B. im Federbein bei der Luftfeder eingesetzt. Aufgrund der guten Eigenschaften dieser Elastomertypen bezüglich z.B. Gasdurchlässigkeit, Alterungsverhalten unter Temperatur und Ozonbeständigkeit wird der Werkstoff unter anderem bei der Herstellung von Luftfedern im Federbein eingesetzt.

Bild 7 zeigt die Ergebnisse des Einstufen-Ermüdungsversuchs am P0-Puffer bei Raumtemperatur im Wechsellastversuch. Die Puffer mit den speziellen Zusätzen halten hier mindestens einen Faktor drei länger als die Puffer mit den konventionellen Werkstoffen.

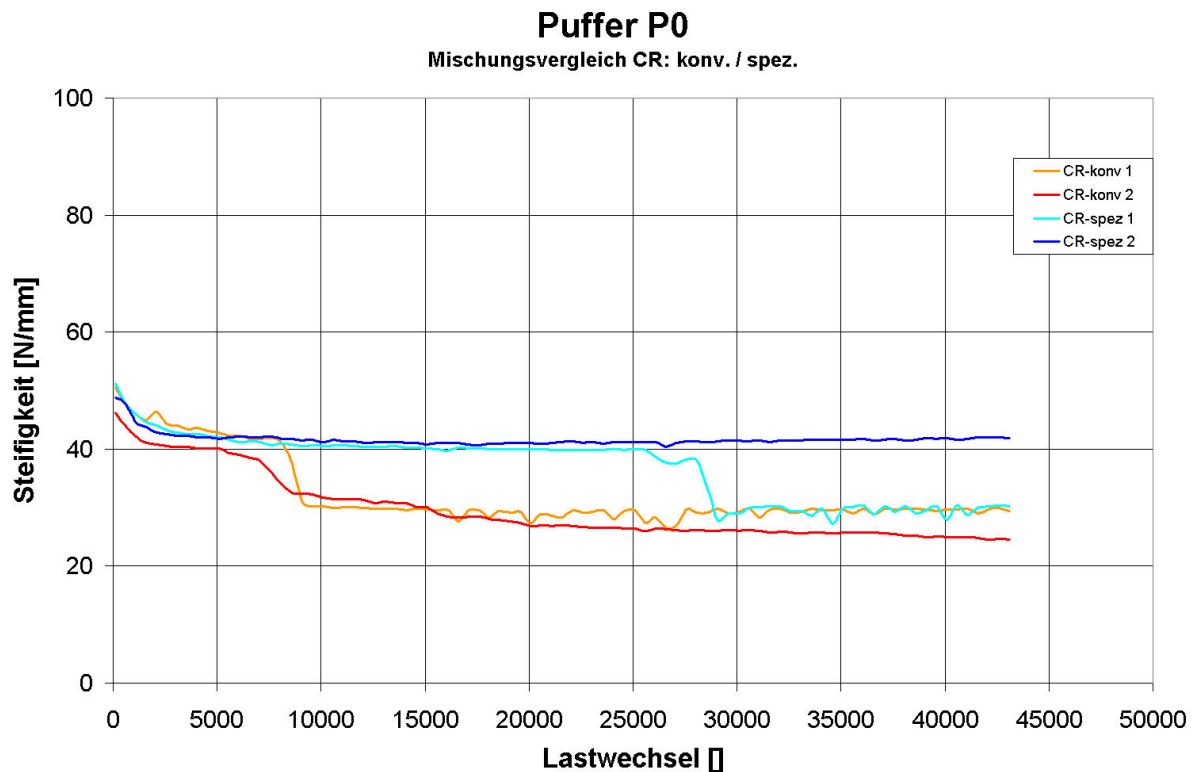


Bild 7 Lebensdauervergleich der Puffer P0 mit den Mischungen CR-konv und CR-spez

Zu bemerken ist hier, dass die Puffer im Spritzgussverfahren hergestellt worden sind.

Die Versuche an Bauteilen (Luftfedern) stehen noch aus. Aufgrund von Prozessschwierigkeiten - die Mischung ist erheblich niedrig-viskoser eingestellt gewesen - konnten keine Luftfederbälge für Lebensdauerprüfungen hergestellt werden. Hierzu gibt es weitere Versuche mit den vom Projektpartner Rheinchemie zur Verfügung gestellten Chemikalien.

3.1.1.3 Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk (EPDM)

Die folgende Tabelle zeigt bei einer Wechsellast von +/- 12,5 mm die Lebensdauern der unterschiedlichen Mischungen: EPDM mit konventionellen und speziellen Chemikalien und das oben beschriebene „Phx-LS“ – Elastomer auf Basis von Naturkautschuk

Vergleich der Lebensdauer von EPDM- und NR-Puffern (jeweils 3 Ergebnisse)

EPDM (konventionell)	EPDM (speziell)	NR (Phx-LS)
775.000 LW	680.000	230.000 LW
775.000 LW	2.100.000	245.000 LW
160.000 LW	290.000	235.000 LW

Aufgrund von Haftproblemen zu den Metallteilen gibt es von den Puffern mit EPDM bisher nur wenig Lebensdauerergebnisse.

Die Naturkautschukmischung zeigt wie erwartet eine geringe Streuung bei den Laufzeiten im Versuch. Gerade aufgrund der Frühausfälle z.B. bei „EPDM konventionell“ ist dieser Werkstoff trotz seiner guten Temperaturbeständigkeit bisher nicht eingesetzt worden. „EPDM speziell“ liegt hier – korrespondierend der Ergebnisse vom Projektpartner DIK - mindestens auf NR-Niveau. Es zeigen sich auch hier große Unterschiede in den Laufzeiten, die durch eine günstige Steuerung des Prozesses wahrscheinlich reduziert werden können. Hier liegt noch Optimierungspotenzial.

Bei der Einmischung der letzten Charge der vom Partner Rheinchemie gelieferten Chemikalien in die niedrigviskose EPDM-Mischung kam es zu „Stippenbildung“, d.h. die Chemikalien sind ungenügend in der Kautschukmatrix dispergiert. Daher konnten keine weiteren Untersuchungen durchgeführt werden.

3.1.2 Arbeitspaket 1.2: Einfluss der Verarbeitung (Spritzguss)

3.1.2.1 Einfluss der Prozessparameter auf die Lebensdauer

Zu diesem Thema wurde eine 8-nestrige Form konzipiert und zur Konstruktion und zum Bau in Auftrag gegeben. Die Form ist modular aufgebaut, so dass gegebenenfalls mit unterschiedlichen Verteilungen, Einsätzen und auch auf zwei Maschinentypen gefertigt werden kann (Bild 8).

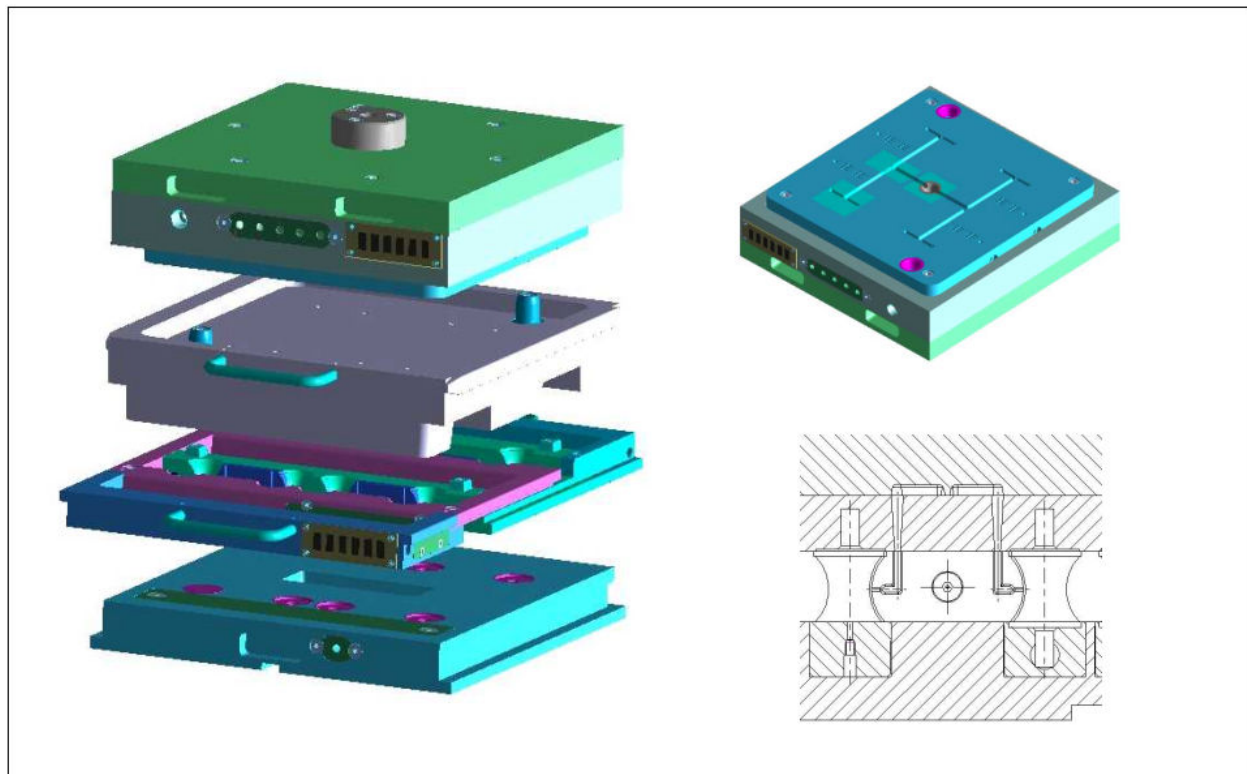


Bild 8 Spritzgussform für Testpuffer

In dieser Form werden auch die Versuchspuffer zur Verifikation der Modellbildung und der Schädigungshypothesen hergestellt (siehe aus Arbeitspaket 3.1.1. und weitere Arbeitspakete).

Eingebaut wurde umfangreiche Sensorik, um den Einspritzvorgang beim Spritzguss und den Temperaturverlauf während der Heizphase genau charakterisieren zu können. Die Lage der Sensoren ist in Bild 9 dargestellt. Bild 10 zeigt die eingebaute Form mit der angeschlossenen Online-Datenvisualisierung.

Anhand der aufgenommenen Messwerte wurde das eingesetzte Spritzguss-Simulationsprogramm COMET verifiziert und ein Abgleich mit den Materialparametern durchgeführt (s. Abschnitt 3.1.2.2). Des Weiteren wurde ein Versuchsplan aufgestellt, um die für die Lebensdauer optimalen Prozess-Parameter (Maschineneinstellungen, Form, ...) zu finden.

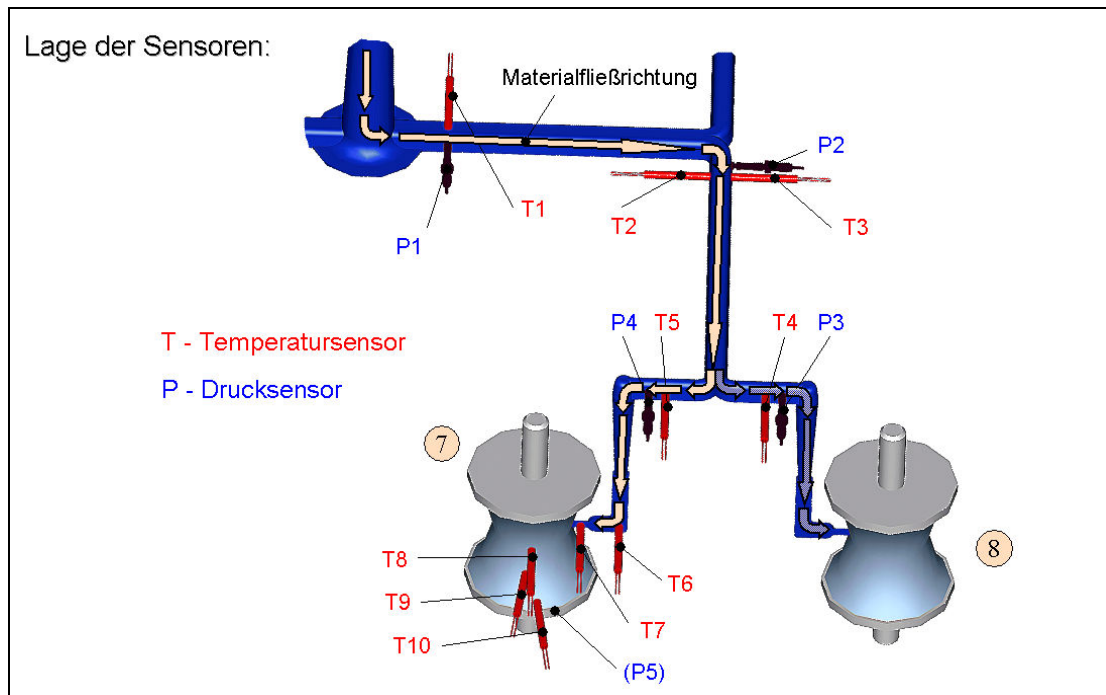


Bild 9 Verteilung mit Sensorik (Temperatur- und Drucksensorik)

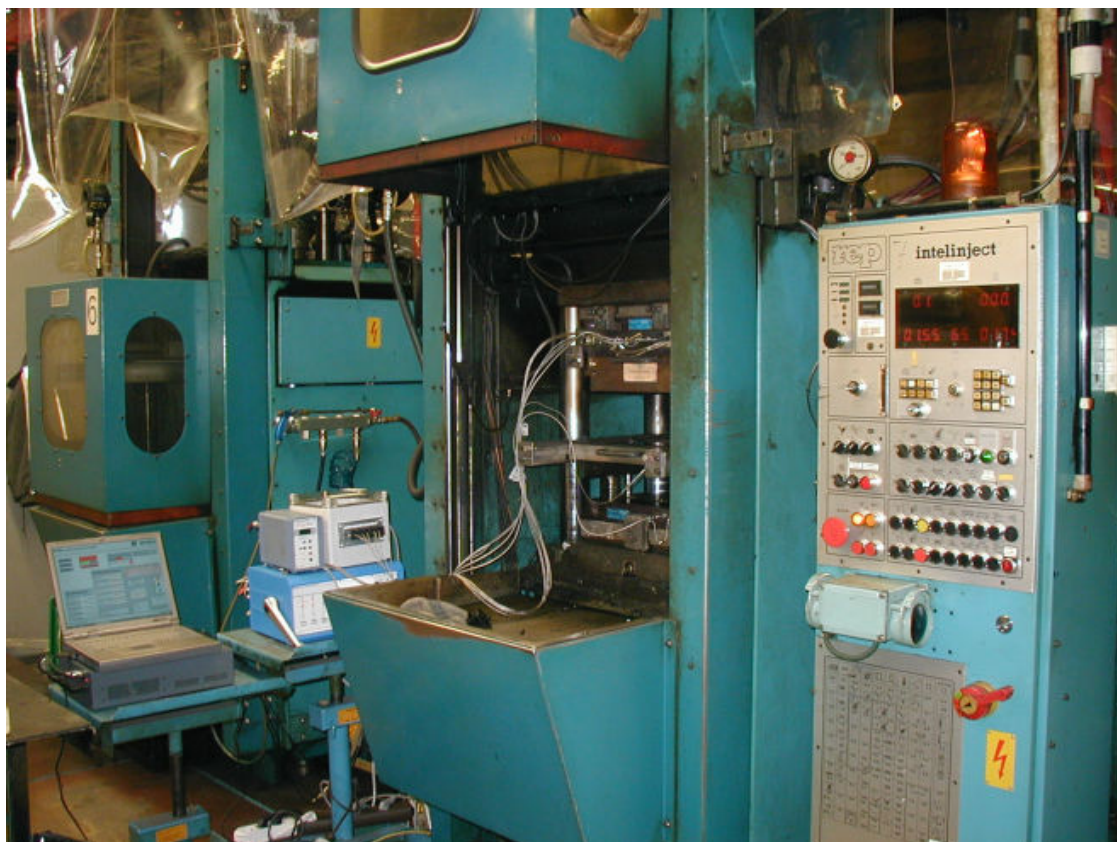


Bild 10 Eingebaute Form mit Online-Datenvisualisierung

Mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans wurden Untersuchungen an den festgelegten Mischungen Phx-LS und Phx-HS durchgeführt (Bild 11).

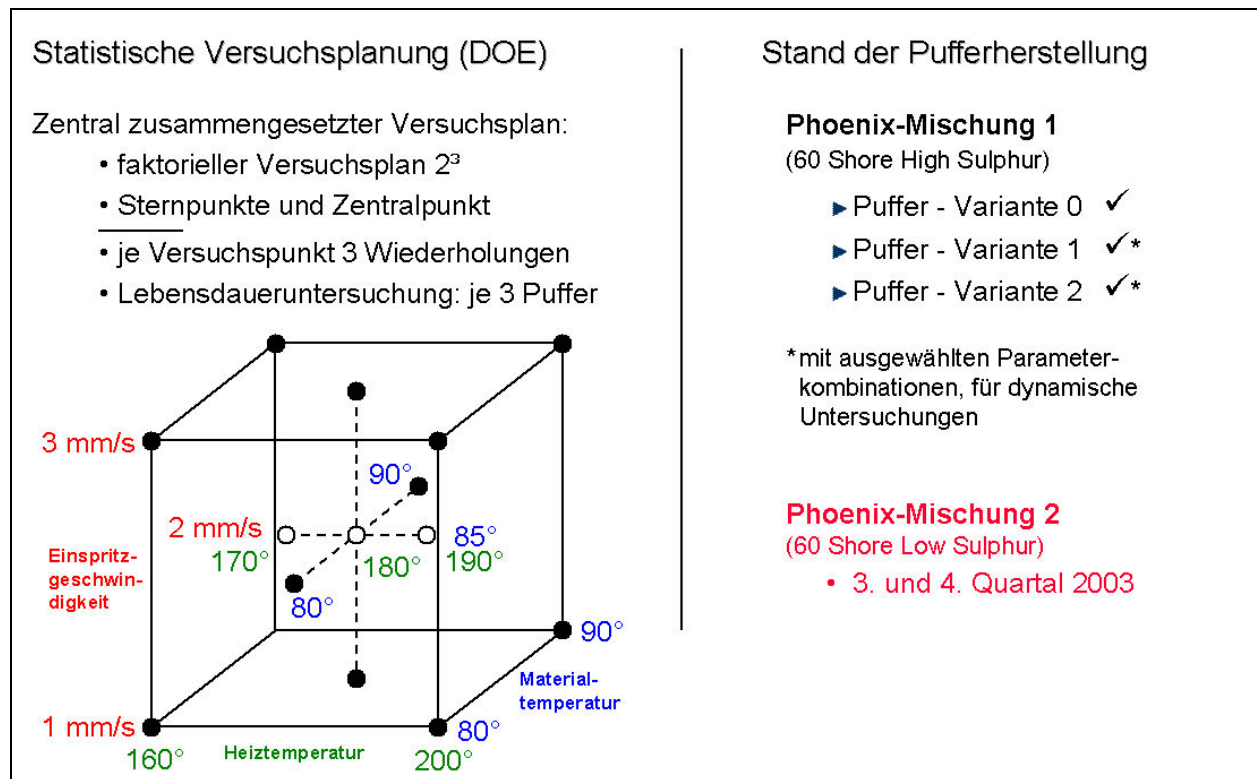


Bild 11 Statistischer Versuchsplan für die Untersuchungen (Folie aus Projektsitzung)

Hierbei sind die Prozessparameter Heiztemperatur, Einspritzgeschwindigkeit und Materialtemperatur untersucht worden. Die mit diesem Versuchsplan gefertigten Puffer wurden (Lebensdauer-) Prüfungen unterzogen und hinsichtlich der verschiedenen Prozessparameter des Formgebungsprozesses untersucht.

Die Untersuchungen der zweiten Mischung Phx-LS wurden auf einer Spritzgussmaschine eines anderen Typs durchgeführt.

Mischung 1: Phx-HS

Die Varianzanalyse aus dem statistischen Versuchsplan für die Mischung Phx-HS ist in Bild 12 dargestellt. Hier ist zu erkennen, dass nur der Parameter Heiztemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Lebensdauer hat. Die Variation der Einspritzgeschwindigkeit und der Materialtemperatur hat in den hier untersuchten Bereichen und für diese Mischung keinen Einfluss.

Weiterhin wird die Federrate und der Verlustwinkel der Bauteile von der Heiztemperatur beeinflusst.

Varianzanalyse – Betrachtung der Eckpunkte des Würfels

	Zielgröße	Haupteinfluss			2-Faktoren-Wechselwirkung		
		A	B	C	AB	AC	BC
Kenn- werte	Lebensdauer	* „-“					
	Federrate	** „-“			** „+“		
	Verlustwinkel	** „+“	** „-“		** „-“		

A - Heiztemperatur
 B - Einspritzgeschwindigkeit
 C - Materialtemperatur

* - signifikant (Aussagewahrscheinlichkeit zwischen 95 und 99%)
 ** - hochsignifikant (Aussagewahrscheinlichkeit > 99%)

Richtung „+“: Zielgröße steigt mit steigender Einflussgröße
 Richtung „-“: Zielgröße fällt mit steigender Einflussgröße

Bild 12 Auswertung des statistischen Versuchsplans: Einflüsse und Wechselwirkungen (Folie aus Projektsitzung)

Varianzanalyse – Betrachtung der Eckpunkte des Würfels

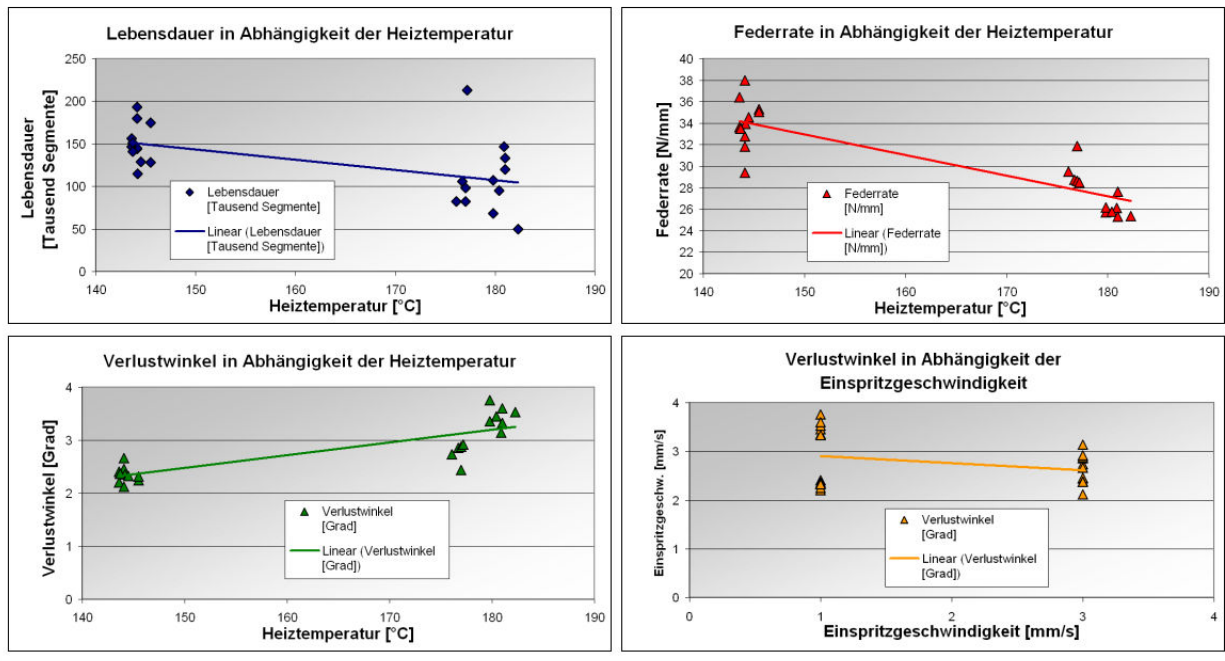


Bild 13 Auswertung des statistischen Versuchsplans: Grafische Darstellung (Folie aus Projektsitzung)

Mischung 2: Phx-LS

Bild 14 zeigt die Ermittlung der Lebensdauer anhand der gesamten Datenbasis des faktoriellen Versuchsplans (s. Bild 12).

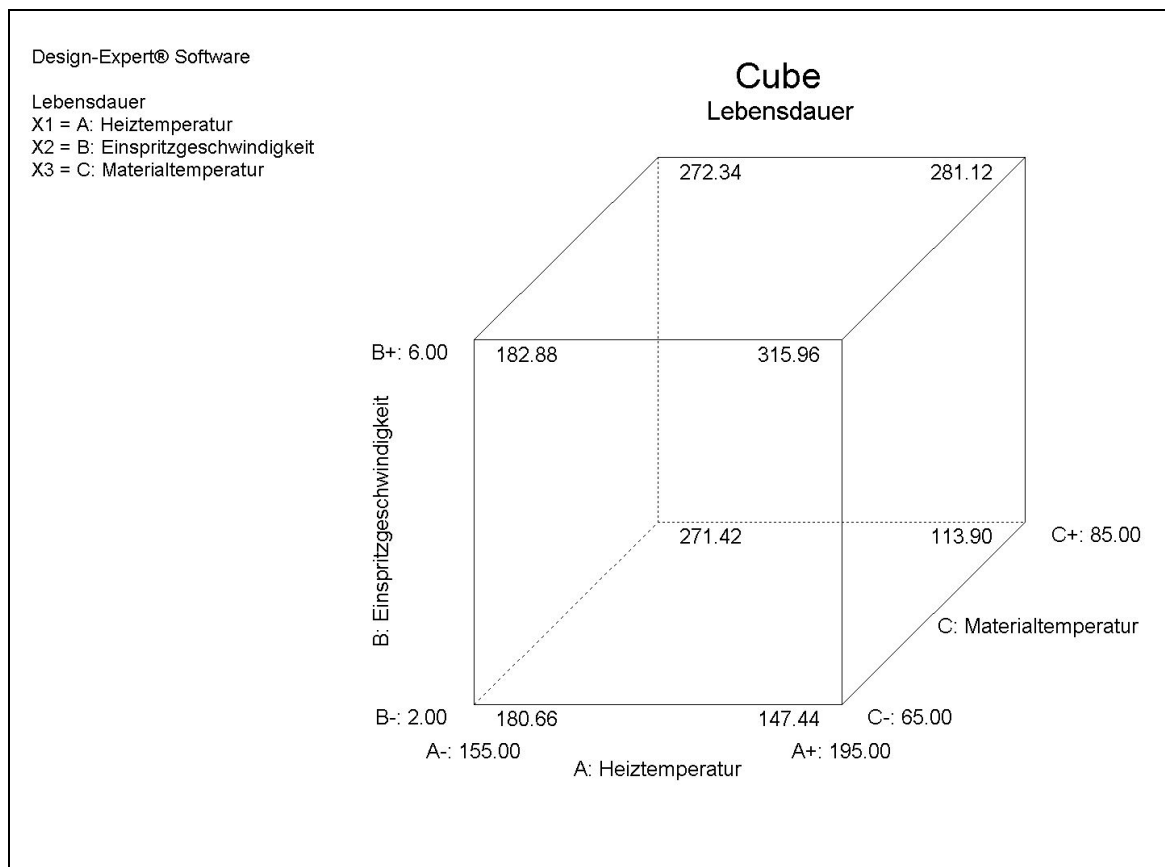


Bild 14 Würfel aus DoE mit Lebensdauerwerten an den Ecken

Die Einflüsse der Prozessparameter auf die Lebensdauer sind in den folgenden Grafiken dargestellt.

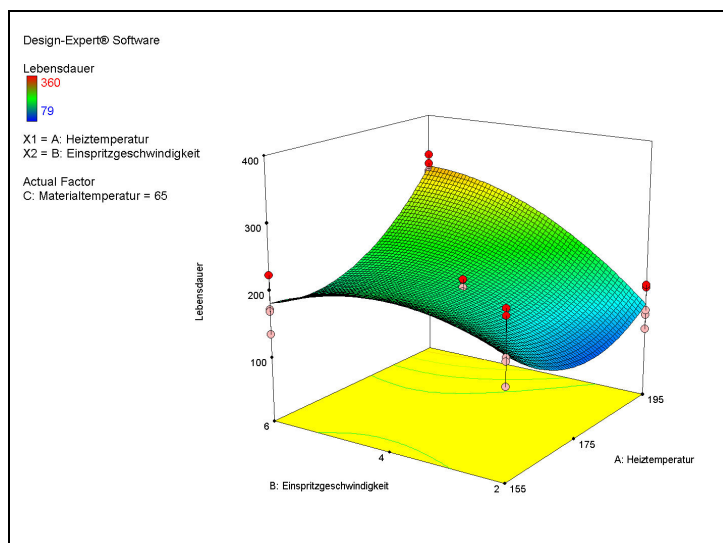


Bild 15 Einfluss der Einspritzgeschwindigkeit und Heiztemperatur auf die Lebensdauer bei einer Materialtemperatur von 65°C

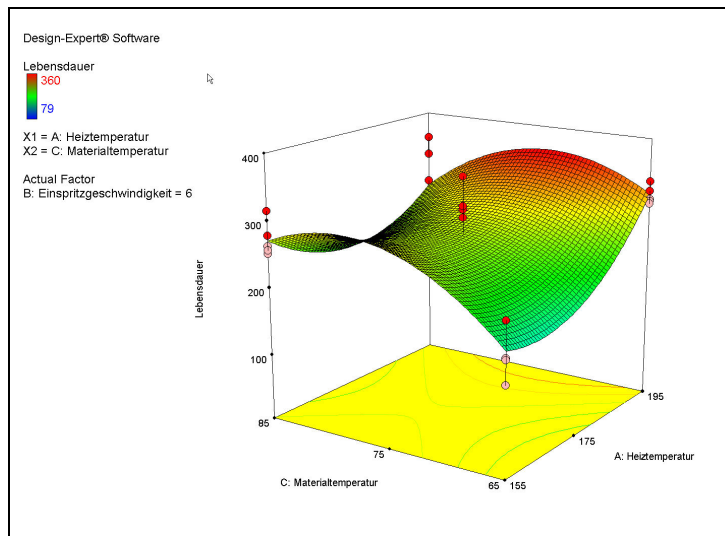


Bild 16 Einfluss der Material- und Heiztemperatur auf die Lebensdauer bei einer Einspritzgeschwindigkeit von 6 mm/s

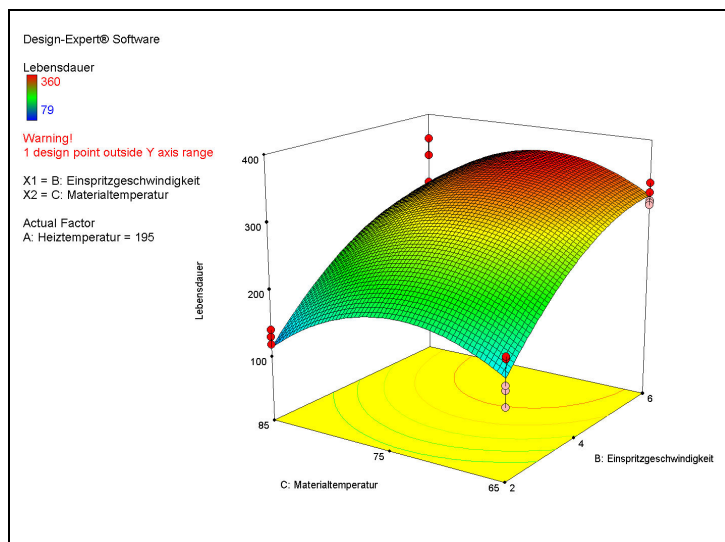


Bild 17 Einfluss der Materialtemperatur und Einspritzgeschwindigkeit auf die Lebensdauer bei einer Heiztemperatur von 195°C

Die Auswertungen zeigen eindeutig, dass eine zu kleine Einspritzgeschwindigkeit für die Lebensdauer der Probekörper ungünstig ist. Hier scheint sich der Temperaturunterschied und die Scherung in den Verteilerkanälen negativ auszuwirken. Bei einer höheren Einspritzgeschwindigkeit erwärmt sich die Mischung beim Einspritzen schneller, so dass die Viskosität und damit die Scherung beim Befüllen herabgesetzt wird.

Mit Hilfe eines statistischen Versuchsplans lassen sich somit günstige Prozessparameter bzgl.

- Robustheit der Fertigung und
- Lebensdauer der Artikel

ermitteln. Dieses Vorgehensweise wird inzwischen beim Unternehmen bei einer Vielzahl von Produktanläufen angewendet.

3.1.2.2 Spritzgusssimulation

Rheometer

Die Untersuchten Mischungen sind bezüglich der rheologischen Parameter (Dichte, spez. Wärmekapazität, Wärmeleitfähigkeit, Vernetzungsisothermen, Viskositäten, ...) charakterisiert worden.

Für die Vernetzungs(Heizzeit)-Simulation wurde ein neues Modell entwickelt und mit den Versuchsergebnissen abgeglichen. Die Übereinstimmung des Modells mit den Messungen im Vulkameter ist sehr gut. Gerade die bei vielen Elastomermischungen vorhandene Reversionsneigung, also das Absinken des im Rheometer gemessenen Drehmoments nach Erreichen des Maximums, wird hiermit sehr gut abgebildet. Hierzu sind umfangreiche Untersuchungen bei den Projektpartnern DIK und RWTH gemacht worden (s. 2. Projektsitzung)

Bild 18 zeigt die Messdaten und den Fit für die Vulkameterkurven der Mischung Phx-HS bei unterschiedlichen Temperaturen im RPA.

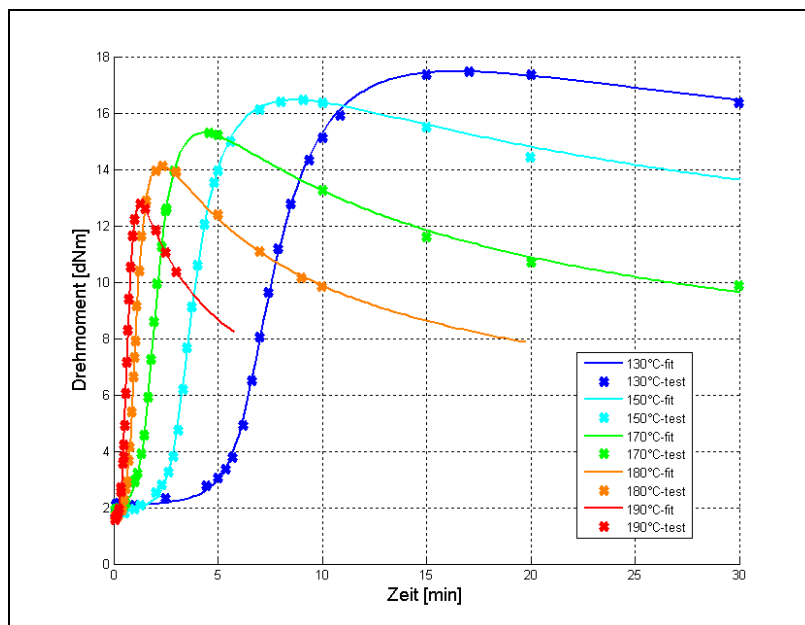


Bild 18 RPA-Vulkameterkurven bei unterschiedlichen Temperaturen (Mischung Phx-HS)

Computational Fluid Dynamics (CFD)

Mit Hilfe des beim Unternehmen eingesetzten FE-Vernetzungsprogramms Icem-CFD wurde ein Viertel der Form (Verteilung und Puffer) modelliert (Bild 19). Die entsprechenden Randbedingungen sind gemäß des Versuchsplans (s. Bild 11) eingegeben worden.



Bild 19 Viertelmodell der Verteilung mit 2 Puffern

Mit dem eingesetzten CFD-Programm und den Mischungsdaten wurde nun ein Vergleich zwischen Messung und Versuch durchgeführt.

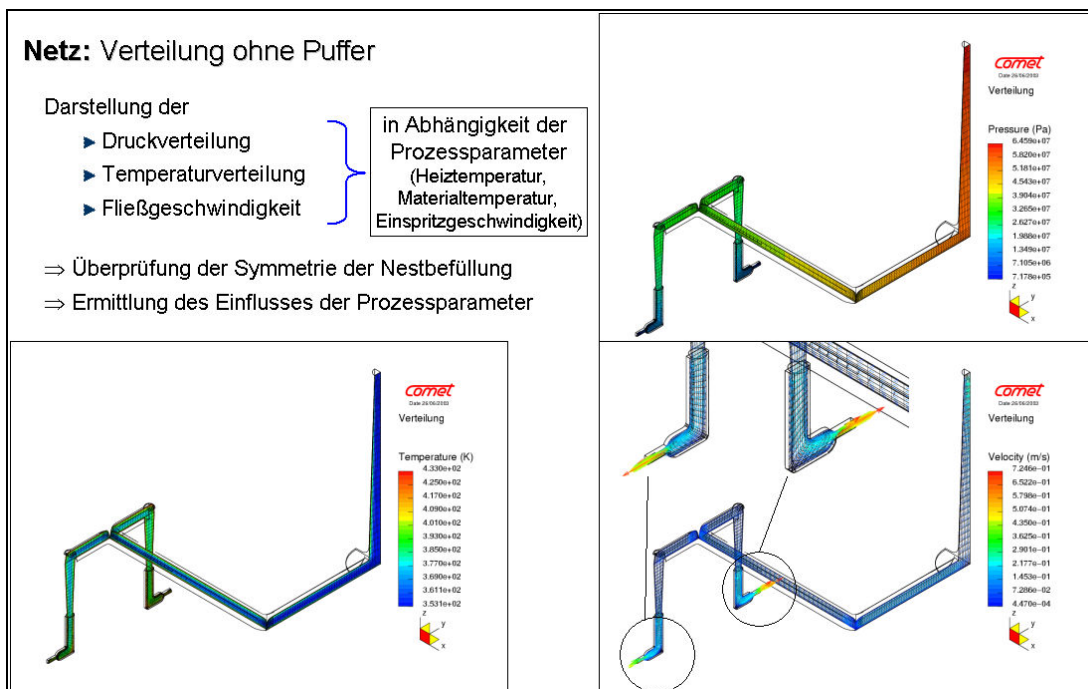


Bild 20 Steady State Simulation: Kanalbalancierung (asym. Verteilung) (Folie aus Projektsitzung)

Bild 20 zeigt in der „Steady State Simulation“ die Unterschiede in der Fließgeschwindigkeit an den Angusspunkten der beiden Puffer. Aufgrund der Friktion und der temperaturabhängigen Viskosität des Material wird trotz einer symmetrischen Verteilung das „innere“ Puffernest zuerst befüllt. Dieses Verhalten ist bei vielen Verteiler-Geometrien von Praxisbauteilen bekannt und

lässt sich nur mit 3D-CFD-Simulationen erfassen. Durch eine entsprechende Optimierung im Rechner lässt sich dies durch eine Änderung der Kanalquerschnitte oder des Angusses ausgleichen.

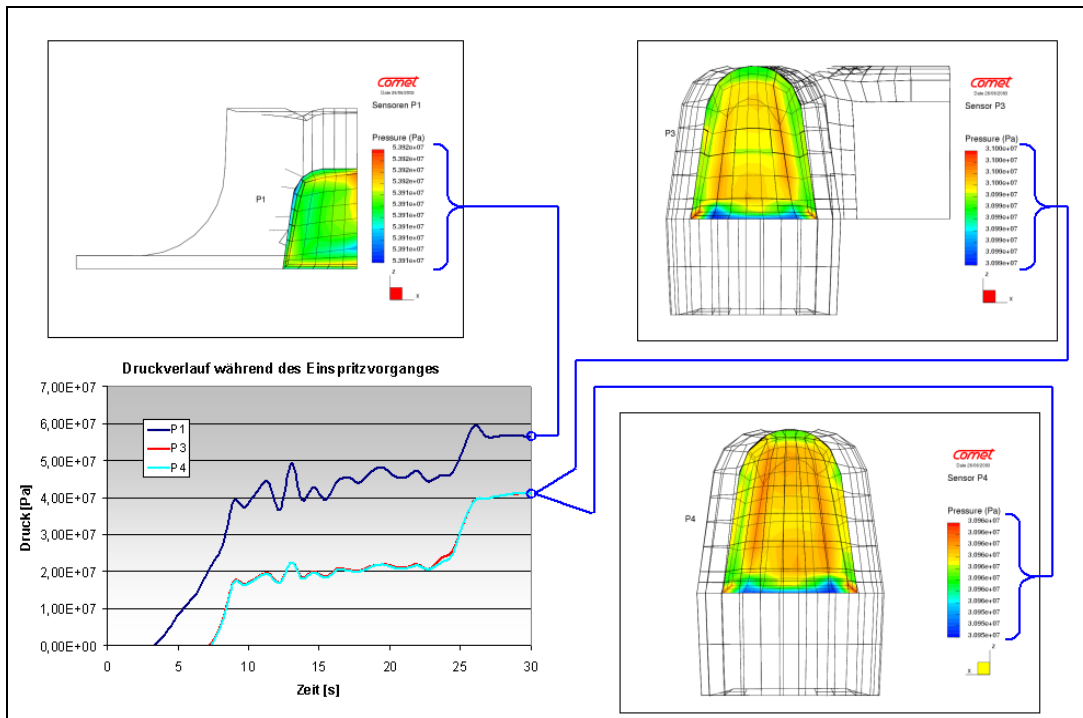


Bild 21 Transiente Simulation: Druck – Abgleich mit Realdaten im Kanal (Folie aus Projektsitzung)

In Bild 21 ist nun die berechnete Druckverteilung im Kanalquerschnitt an den Stellen der Sensoren dargestellt. Die Übereinstimmung der berechneten Werte mit den gemessenen ist sehr gut.

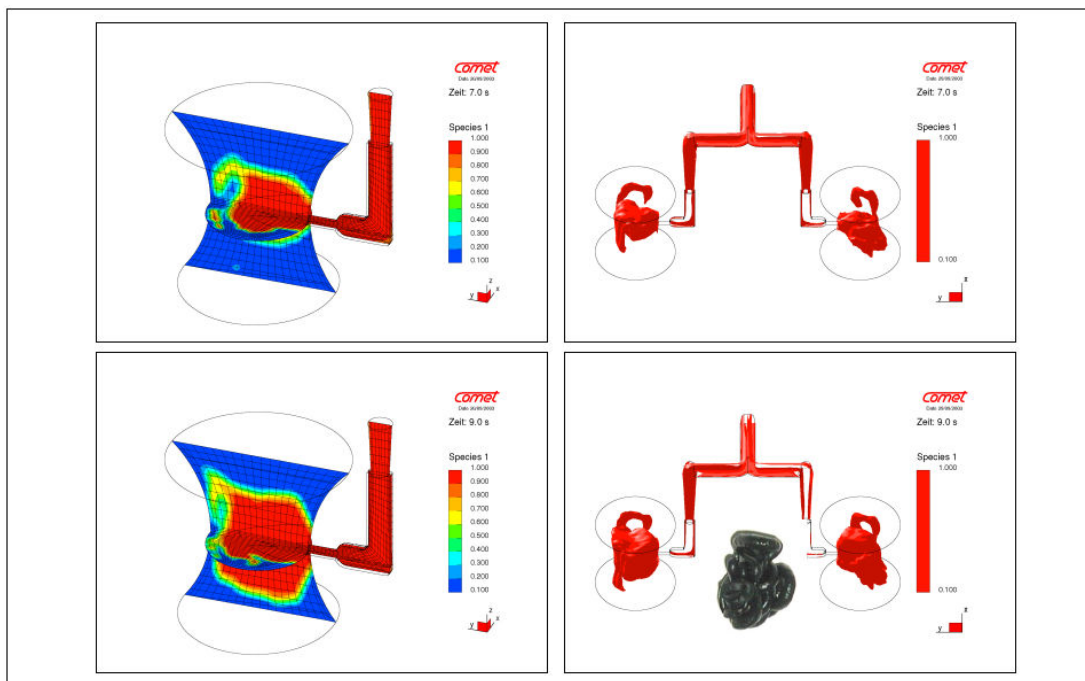


Bild 22 Transiente Simulation: Befüllung und Abgleich mit Teilfüllungen (unten rechts)

Bild 22 zeigt bei einer transienten Simulation den Befüllvorgang der beiden betrachteten Nester. Deutlich zu erkennen ist der Freistrah und die für Elastomere typische „Knäuelbildung“. Die Korrelation mit den durchgeführten Teilfüllungen ist sehr gut, auch für weitere Befüllungsschritte. Somit lassen sich auch Lufteinschlüsse in der Form konstruktiv vermeiden, in dem das Befüllungsverhalten des Nestes so gesteuert wird, dass die Luft z.B. in einer Formtrennebene entweichen kann.

Es konnten die in der Versuchsform aufgenommenen Temperaturen und Drücke in Abhängigkeit der Prozessparameter sehr gut nachgestellt werden.

Aufgrund der guten Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung lässt sich mit dem hier vorgestellten Verfahren in der Konstruktionsphase die Verteilung hinsichtlich Symmetrie balancieren. Die Angüsse an den Artikeln können ebenfalls bezüglich der Lebensdauer und Heizzeit optimal gestaltet werden.

Mit den Ergebnissen aus der CFD-Berechnung und dem oben vorgestellten Vulkanisationsmodell lässt sich der Prozess günstig einstellen. Hierbei wird die Anzahl der notwendigen Versuche zur optimalen Einstellung des Prozesses und der Heizzeit erheblich reduziert. Durch die Simulation lässt sich eine für die „optimale“ Ausheizung des Artikel geeignete Heizungsführung der Presse finden.

Über die Materialbeanspruchung (Scherung) während des Befüllungsvorganges gerade in der Andüsung des Artikels lassen sich mit dieser Methode maximal zulässige Grenzwerte für eine ausreichende Lebensdauer ermitteln.

3.1.3 Arbeitspaket 5: FE-Modellbildung

Die Grundlage bildet ein konstitutives Modell (Bild 23), welches den Payne-Effekt („dynamische Versteifung bei kleinen Amplituden“) unter harmonischen Belastungen beschreibt [1]. Dieses Modell ist für die Vorhersage der Steifigkeit von Elastomerbauteilen bei harmonischen Belastungen notwendig und wurde in das kommerzielle FEM-Programm MSC.Marc implementiert. Eine Erweiterung des hyperelastischen Elements macht das Modell auch für größere Verformungen anwendbar [2].

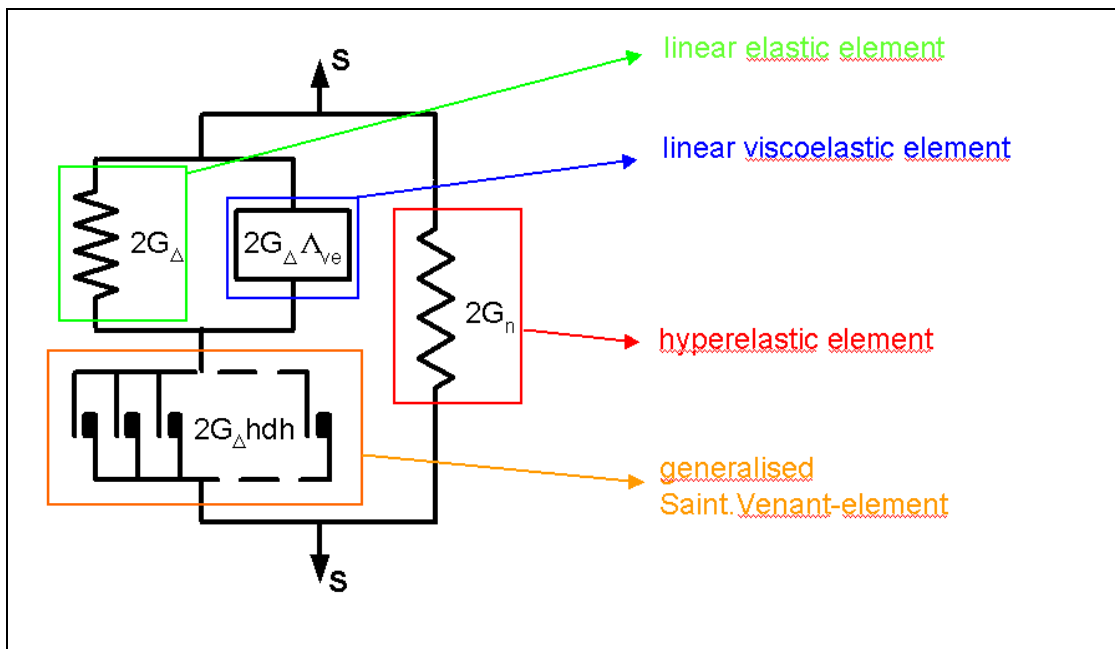


Bild 23 Rheologisches Modell [1]

Mit Hilfe dieses Modells lässt sich die komplexe Steifigkeit der untersuchten Probekörper simulieren. Die mathematische Formulierung und die Vorgehensweise bei der Implementierung findet man in [2]. Die Übereinstimmung mit der Messung ist sehr gut (s. Bild 24).

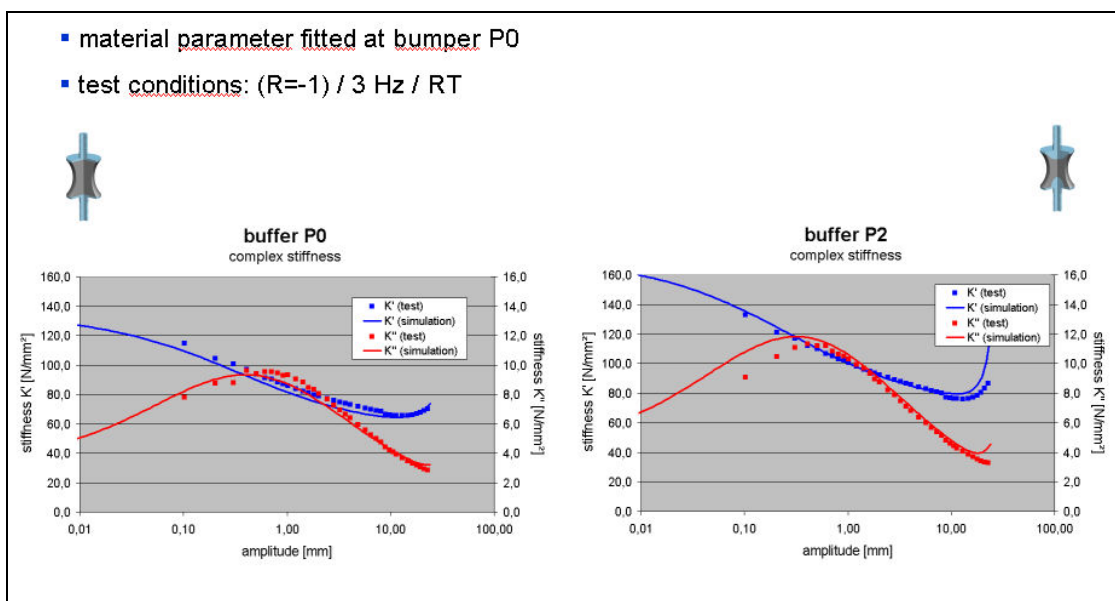


Bild 24 Dynamische Steifigkeit bei Probekörper (vgl. Simulation / Test) (Folie aus Vortrag [6])

Weiterhin wurde untersucht, in wie weit der Schädigungsparameter „Hystereseffläche“ aus diesem Modell für die Lebensdauervorhersage herangezogen werden kann (vgl. Arbeitspaket 6) [3][4][5]. Vergleiche mit Messungen an Probekörpern und Bauteilen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Realität. Bild 25 zeigt, dass der Schädigungsparameter „Hystereseffläche“ den Ort der Schädigung nach einem Lebensdauerversuch mit dem Lastverhältnis $R=0$ sehr gut wiedergibt. Gleiches gilt für Versuche im Druckschwellbereich.

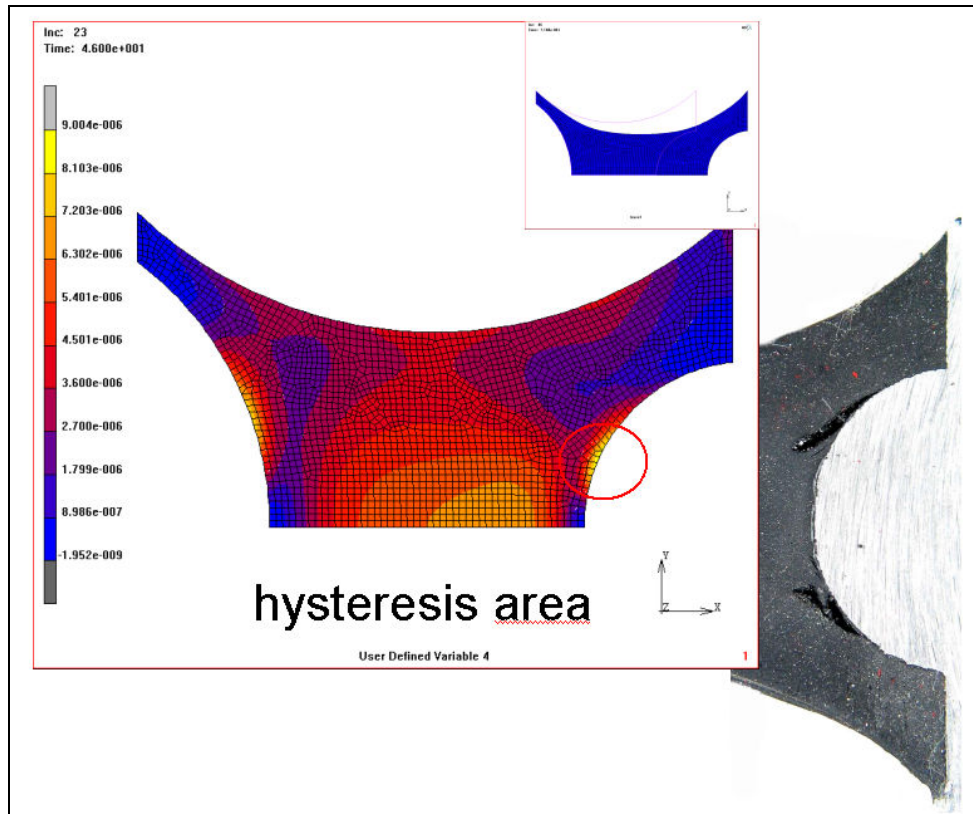


Bild 25 Vergleich des Parameters Hystereseffläche mit Schäden am Probekörper

Die Puffer-Probekörper sind so konstruiert worden, dass im Zugschwell- und auch im Druckschwellversuch der Ort des Schadens im Inneren in der Nähe der Haftzone liegt. Dies ist der typische Ausfallbereich einer Fahrwerksbuchse im Betriebslastennachfahrversuch (s. Bild 26).

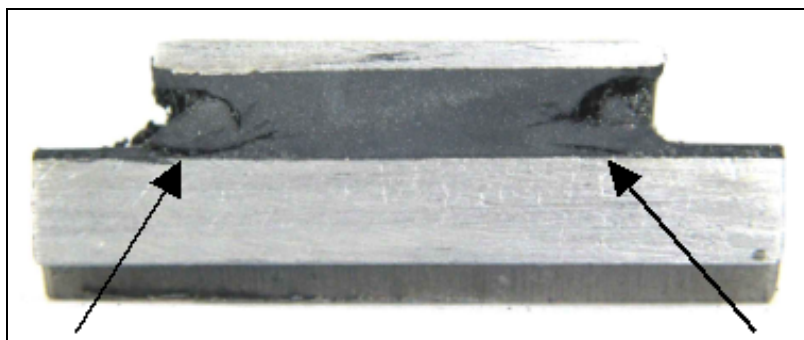


Bild 26 Typisches Ausfallbild einer Fahrwerksbuchse unter radialer und torsionaler Last

Beispiel zum Schädigungsparameter

Im folgenden soll die Anwendung des Schädigungsparameters bei einem Praxisbauteil gezeigt werden. Dieses Beispiel wurde auf einem DIK-Seminar präsentiert [7].

Übertrifft OE Ausführung
Für alle Volvo Modelle mit V60 2000/2000 oder 2000/2000 Motor

MEYLE Germany
MEYLE Products

Querlenkerbuchsensatz	MEYLE Nr.: 312 030 0009/HD		
	Referenz Nr.: 377 857		
Querlenker	MEYLE Nr.: 316 030 0015/HD	rechts	
	Referenz Nr.: 863 495	316 030 0016/HD	362 496

Querlenkerbuchsensatz
passend für
Volvo 850, C70, S70, V70

Die Volvos dieser Baureihen haben Frontantrieb und ein zulässiges Gesamtgewicht von fast 2 t. Hierfür muss die Vorderachse sehr stabil ausgelegt sein. Wenn man den Querlenkersatz betrachtet, ist schwer vorstellbar, dass diese kleinen Querlenkerbuchsen für ein so massives Fahrzeug ausgelegt wurden. Selbst nach wiederholtem Austausch der Buchsen stellen sich schon nach kurzer Zeit erneut störende Geräusche ein.

wie OE-Version **MEYLE-Version**

Um eine akzeptable, verlängerte Lebensdauer der Buchsen zu erreichen, muss ihre Steifigkeit erhöht und eine geschickte Veränderung der Gummi-Geometrie vorgenommen werden. Daher haben wir ein gemeinsames Entwicklungsprojekt mit dem Technologiespezialisten für Schwingungstechnik im Automobil, Vibracoustic GmbH & Co. KG, ins Leben gerufen. Prüfstandversuche weisen darauf hin, dass wir für die MEYLE-Querlenkerbuchsen im Vergleich zur OE-Version eine mindestens doppelt so lange Lebensdauer garantieren können. Um die Entwicklung abzurunden, wird auch bei diesem Querlenker das neue MEYLE-Hightech-Fett aus der Schifffahrt und Windenergieforschung eingesetzt.

MEYLE - Miles in Motion
© MEYLE Products® - Wulff Gaaßmeier Autoparts AG - 110 3000
Merkurring 111 • 22143 Hamburg • Germany
contact@meyle.com • www.meyle.com

Bild 27 Beispiele unterschiedlicher Metallkerne
(www.meyle.com)

Im Fahrwerksbereich werden Buchsen mit unterschiedlich konturierten Metallkernen eingesetzt (s. Bild 27). Aufgrund der unterschiedlichen Kerengeometrie ergeben sich an der Haftzone zwischen Metallkern und Elastomerspur verschiedene Materialbeanspruchungen. Mittels herkömmlicher Methoden konnten die auf dem Prüfstand ermittelten Unterschiede in der Lebensdauer bisher nicht nachvollzogen werden.

Untersucht wurden zwei Praxisbauteile (s. Bild 28 und Bild 29). Die Belastungen auf dem Prüfstand wurden so eingestellt, dass die Materialbeanspruchungen, also die Amplitude der Hauptnormaldehnung, an den jeweils kritischen Punkten gleich ist. Dementsprechend sollten auch die Laufzeiten im Versuch größenordnungsmäßig gleich sein.

Das Lastverhältnis wurde als $R=0$ gewählt.

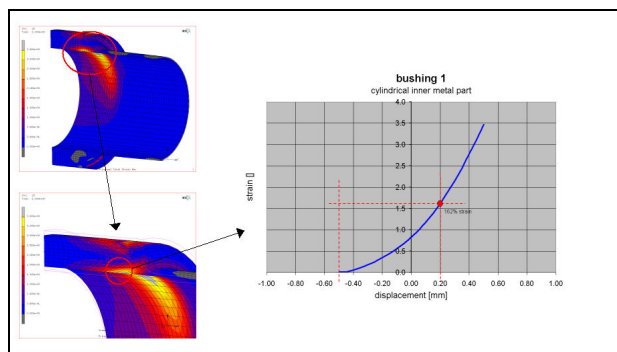


Bild 28 FEM-Berechnung „Buchse mit zyl. Kern“

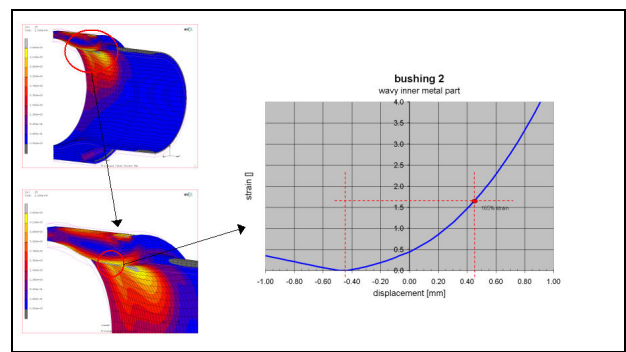


Bild 29 FEM-Berechnung „Buchse mit kont. Kern“

Auf dem folgenden Bild 30 ist der Verlauf der radialen Steifigkeit über der Lastwechselzahl dargestellt. Die gelbe Linie ist die typischerweise Grenzwertlinie für einen 10%.

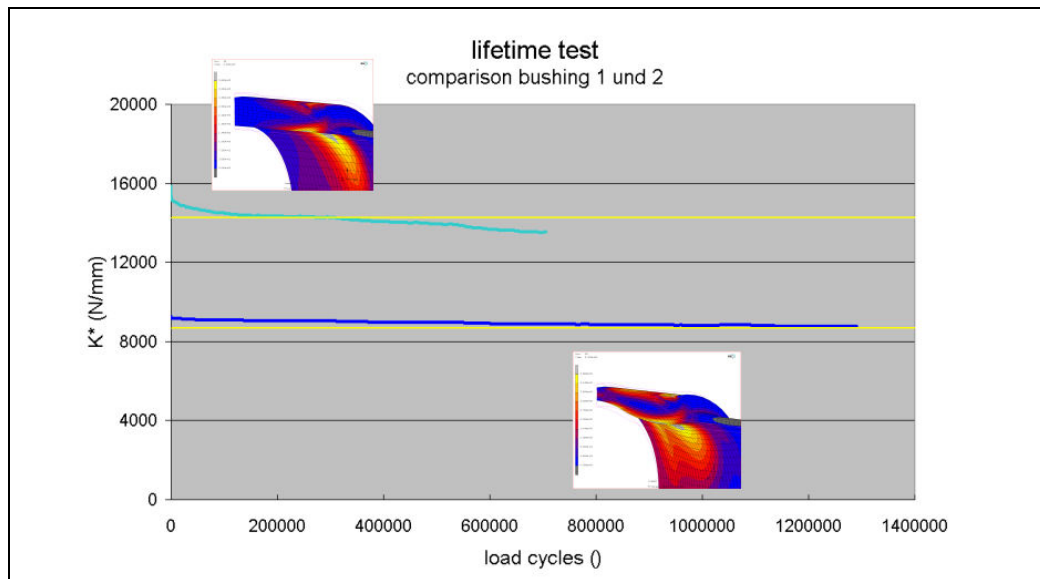


Bild 30 Lebensdauerergebnisse der beiden untersuchten Buchsen (Folie aus Vortrag [7])

Die Laufzeit der Buchse mit dem konturierten Kern ist ca. um den Faktor 5 länger. Hierbei wurde die ertragbare Lastwechselzahl auf 1.500.000 extrapoliert, da der Versuch vorher beendet wurde.

Wendet man nun den Schädigungsparameter Hystereseffläche auf dieses Beispiel an, so findet man mit dieser Mischung und der im Projekt ermittelten Wöhlerlinie am P2-Puffer (s. Bild 31 oben rechts) in etwa diesen Faktor in der Lebensdauer wieder.

Der Unterschied in den absoluten Laufzeiten kann u.a. durch die Vorlast erklärt werden, die sich im Bauteil durch die Kalibrierung der Buchsen ergibt.

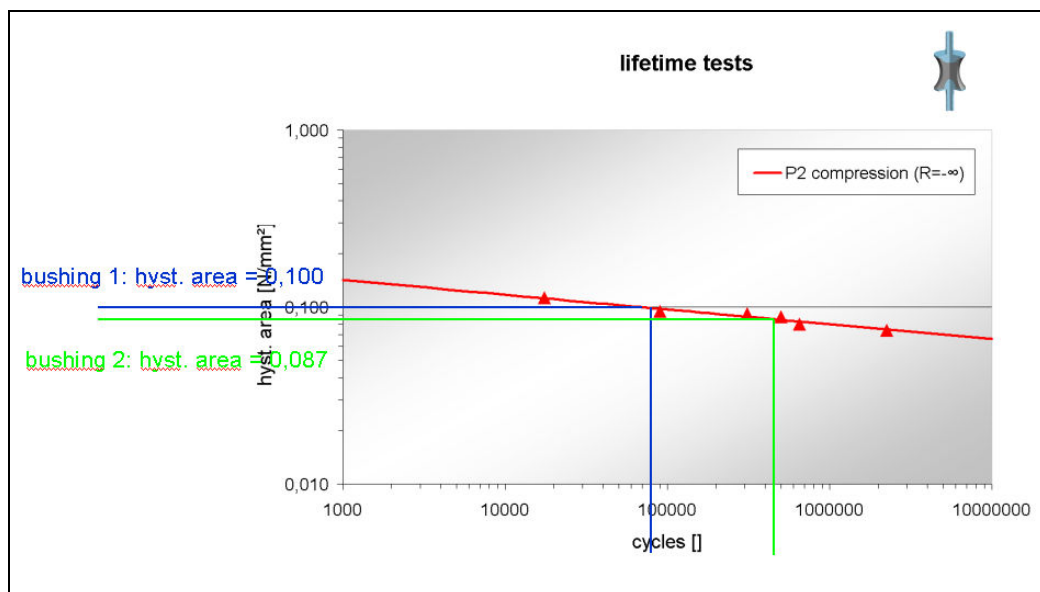


Bild 31 Bemessung der Schädigung gegen Wöhlerlinie aus Probekörper (Folie aus Vortrag [7])

3.1.4 Arbeitspaket 6: Schädigungshypothesen und Verifikation

3.1.4.1 Schädigungsrechnung

Beim Unternehmen wird im Augenblick die Schädigungsrechnung nach dem Ablaufplan „standardisierte Schädigungsrechnung“ durchgeführt [3]. Die Berechnung legt dabei den vom Kunden vorgegebenen Belastungszeitverlauf am Bauteil zugrunde. Dieser wurde entweder gemessen oder mit Hilfe der Simulation (MKS) ermittelt. In seltenen Fällen wird auf „angepasste“ Standardsignale, z.B. Carlos, zurückgegriffen.

Der Schädigungsparameter ist die „Hauptnormaldehnung“, bzw. die Hystereseffläche zur Lokalisierung des Ortes maximaler Schädigung. Dieser Beanspruchungs-Zeit-Verlauf und die Wöhlerlinie, bzw. das Haigh-Diagramm der eingesetzten Mischung sind die Eingabewerte für das Zählen, Klassifizieren und die lineare Schadensakkumulationsrechnung.

Ein benutzerfreundliches Software-Tool zur Visualisierung der relativen Schädigung im FE-Modell wurde entwickelt und in aktuellen Entwicklungsprojekten eingesetzt (Bild 32).

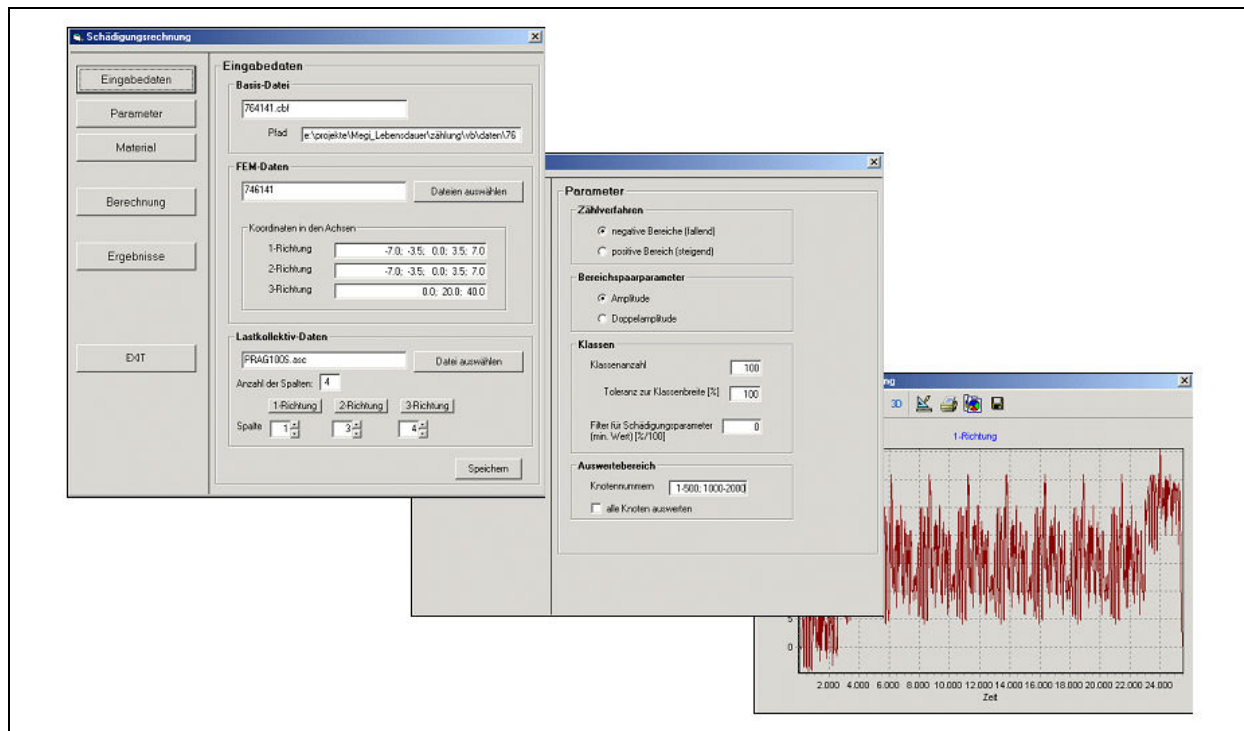


Bild 32 PC-Programm zur mehrdimensionalen Schädigungsrechnung (Folie aus Projektsitzung)

3.1.4.2 Prüfzeitverkürzung

Im Rahmen des Projektes wurde eine neues Verfahren erprobt und abgesichert, die Betriebsfestigkeit eines Federelementes durch eine Versuchsreihe abzusichern, die möglichst kurze Prüfzeiten erfordert und deren Betriebsfestigkeitsprognose ohne Schädigungsrechnung erfolgen kann. Die Basis dieses Omissionsverfahrens ist eine an der TUHH entwickelte Methode, welche den Belastungsvektor nach einer Rainflowfilterung an allen belassenen Umkehrpunkten in der unveränderten Richtung und Größe darstellt („phasentreue Omission“). Dieses Verfahren optimiert gleichzeitig die Bewegungsgeschwindigkeit auf den gewählten Prüfstand. Es verändert damit allerdings die Geschwindigkeiten und das Frequenzspektrum des Bemessungssignales.

Die neue Anwendung dieses Omissionsverfahrens schließt aus einer Reihe von Versuchen mit unterschiedlichen Omissionsstufen auf die Lebensdauer für das nicht omittierte Signal (Bild 33). Gelingt die Extrapolation der Funktion „Durchlaufzahl gegen Omissionsstufe“ auf die Omissionsstufe 0, ist eine Entscheidung, ob das Bemessungskollektiv vom Bauteil ertragen wird, ohne Schädigungsrechnung möglich. Werden die Versuche mit großen Omissionsstufen begonnen und schrittweise die Stufen gesenkt, kann bei ausreichender Aussagesicherheit die Versuchsreihe abgebrochen werden. Der Versuchsaufwand kann so auf den Sollwert und Aussagesicherheit des Ergebnisses angepasst werden.

Die neue Anwendungsform der phasentreuen Rainflowfilterung wurde unter anderen an einem Differentiallager erprobt (Bild 34). Das Bemessungskollektiv war 1-achsig, 6 h lang und musste 806 mal wiederholt werden um die gesamte Belastung / Schädigung darzustellen.

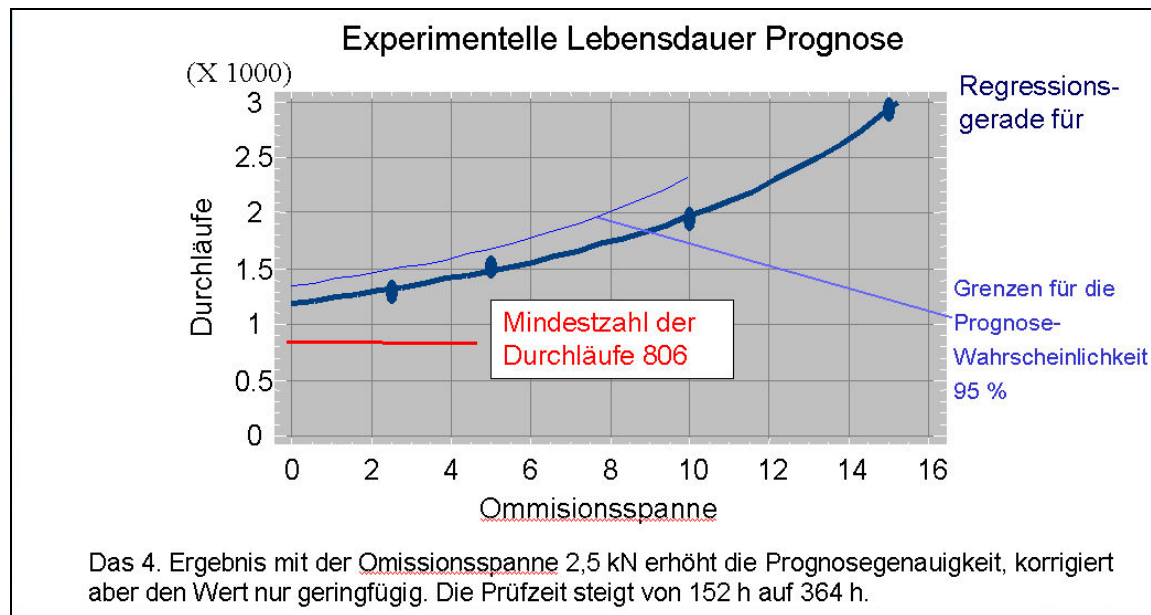


Bild 33 Grundidee Omissionsversuch (Folie aus Projektsitzung)

Omittiert wurden in zunächst 3 dann 4 Stufen alle Spannen kleiner 15 kN, 10 kN, 5 kN und 2,5 kN aus dem Originalsignal. Die prüfbar Signallängen verkürzten sich dadurch von 21600 s auf 5,2 s, 33 s, 203 s und 700 s.

Bereits nach den ersten 3 Versuchen lies sich mit einem Hyperbelansatz die Funktion auf die Omissionsstufe 0 extrapolieren. Die Planung der Omissionsstufen wird durch eine relative Schädigungsrechnung unterstützt. In einem letzten Schritt wurde geprüft, wie schnell die für die Planung benutzte relative Schädigungsrechnung zu stabilen Ergebnissen für das Bemessungssignal führt.

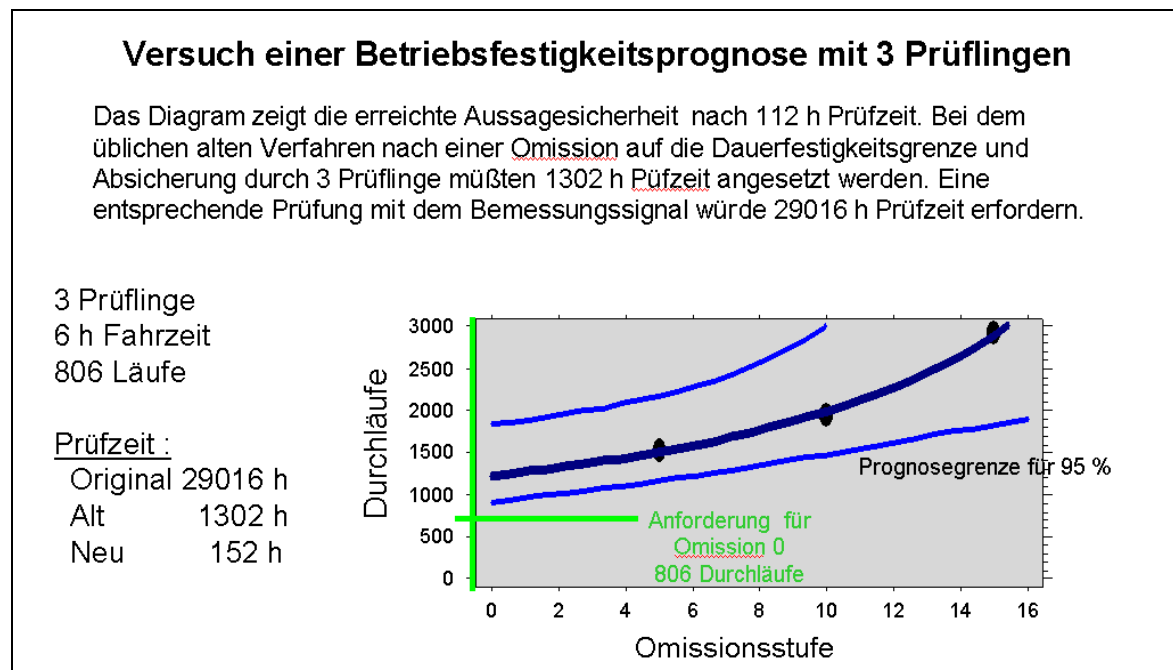


Bild 34 Beispiel Omissionsversuch (Folie aus Projektsitzung)

Die Kombination der Versuche mit einer relativen Schädigungsrechnung gestattet es danach, bei groben Abweichungen der Anforderungen des Bemessungskollektives von der Lebensdauer des Bauteiles, bereits nach sehr kurzer Zeit den Versuch abzubrechen.

3.2 Nutzen

In den untersuchten Arbeitspaketen wurde ein hoher Nutzen in der (Vor-)Entwicklung und Produktion erzielt. Mit den entwickelten Methoden und Tools lässt sich der Entwicklungs- und Prüfaufwand erheblich reduzieren. Dies führt zu geringerem Energieverbrauch und schont die Ressourcen. Im Teilprojekt des Unternehmens wurde in Zusammenarbeit mit den Projektpartnern die gesamte Kette vom Rohstoff zum Bauteil hinsichtlich der Zielstellung „Umwentlastung durch Lebensdauererlängerung“ bearbeitet. Die einzelnen Glieder sind im folgenden noch einmal grob aufgelistet:

- Rohstoff (optimierte Mischungszusätze)
- Fertigung (Spritzgusssimulation)
- Konstruktion (Materialmodell zur Vorhersage der Bauteileigenschaften)
- Schädigungsrechnung (Belastungszeitfunktionen, Schädigungsparameter)
- Prüfzeitverkürzung (Omission)

Elastomerbauteile können in Zukunft vorhersagegenauer und zielgerichteter bezüglich der Lebensdauer im Einsatzfall konstruiert werden.

3.3 Fortschritt bei anderen Stellen

Unter anderem auch aufgrund der Veröffentlichungen der Projektergebnisse sind die Methoden inzwischen im Markt anerkannt und akzeptiert. Die Rückmeldungen von unseren Kunden sind ausnahmslos positiv, so dass die im Projekt erarbeiteten Tools und Methoden in aktuellen und zukünftigen Entwicklungsprojekten Anwendung finden sollen.

Auch partizipieren die Projektpartner im Konsortium von den erzielten Resultaten.

3.4 Veröffentlichungen im Projekt

- [1] Rabkin, M. & Brüger, T., "A constitutive model of elastomers in the case of cyclic load with amplitude-dependent internal damping": 73-78. In D. Besdo, R. H. Schuster & J. Ihlemann.(eds.), *Constitutive models for rubber II; Proc. of the second europ. conf. on const. models for rubber, 10-12 September 2001, Hannover*. Rotterdam: Balkema
- [2] Brüger, T. & Rabkin, M., „Material model and experimental testing of rubber components under cyclic deformation“: 319-324. In J.J.C. Busfield & A.H. Muhr, *Constitutive models for rubber III; Proc. of the third europ. conf. on const. models for rubber, 15-17 September 2003, London*. Rotterdam: Balkema
- [3] Brüger, T. & Rabkin, M., „A Concept for Fatigue Life Calculations of elastomeric Components“. *Haus der Technik, Tagung „Lebensdauer Elastomere“, 30.09.-01.10.2003, Essen*
- [4] Rabkin, M. & Brüger, T., „Anwendung eines mikroplastischen Modells bei der Prognose des Übertragungsverhaltens und der Lebensdauer von Elastomerbauteilen“. *VDI-Tagung „Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau“, 29.09.-30.09.2004, Würzburg*
- [5] Brüger, T. & Rabkin, M., „Application of a dynamical material model on the damage prediction“. *DIK Rubber Fall Colloquium, 2004, Hannover*
- [6] Brüger, T., Rabkin, M. & Weltin, U., „Hysteresis area calculated from a dynamic material model: A new damage parameter for lifetime estimations?“: *Constitutive models for rubber IV; Proc. of the fourth europ. conf. on const. models for rubber, 27-29 Juni 2005, Stockholm*. Rotterdam: Balkema
- [7] Brüger, T., „Ein dynamisches Materialmodell zur Vorhersage der Schädigung“. *DIK Fortbildungsseminar „Lebensdauererlängerung: Alterungsschutz, innovative Prüfung, Vorausberechnung“, 15.11.-16.11.2005, Hannover*

4 Literaturverzeichnis

- [8] Jan Gogolin, „Mathematisches Modellieren von Materialgesetzen für Gummi“, DIK Workshop: „Mechanische und dynamische Eigenschaften von Werkstoffen und Bauteilen aus Elastomeren“, Hannover 1995.
- [9] Jan Gogolin, „Rechnergestützte Werkzeugauslegung und Prozeßoptimierung mit FILLCALC für Spritzgieß-, Preß- und Extrusionsverfahren“, Kunststofftechnisches Seminar, Technische Universität Hamburg-Harburg, Hamburg 1997.
- [10] Jan Gogolin, „Motorlager als Spritzgießartikel. Serienwerkzeuge und ihre Auslegung“, DKG Berufseinsteiger Seminare, Hannover 1997 u. 1998.
- [11] Jan Gogolin, „Werkzeugauslegung mittels Füllsimulation“, DKG Hochschul-Professoren-Tag, Fulda 1999
- [12] Jan Gogolin, „Möglichkeiten zur Simulation des Spritzgießprozesses“, VDI-Praxisseminar: Spritzgießen von Elastomeren, Weinheim 2000
- [13] Peter Hinsch, „Versuch und Berechnung zur Lebensdauervorhersage von Elastomerbauteilen“, Vortrag im Haus der Technik, September 1996
- [14] Peter Hinsch, „Lebensdauern von Elastomerfedern“, Vortrag beim DIK Seminar Juli 1999
- [15] Peter Hinsch, „Einige Untersuchungen zum Messen dynamischer Moduln von Elastomeren“, Kautsch. Gummi Kunstst. 42, 9 (1989)
- [16] Peter Hinsch, „Dynamische Elastomerkenngößen, ihre Ermittlung und Nutzung zur Charakterisierung des dynamischen Eigenschaftsbildes von Federelementen“, Kautsch. Gummi Kunstst. 37, 11 (1984)
- [17] Peter Hinsch, „Körperschall in Gummifedern – eine Untersuchung“, Kautsch. Gummi Kunstst. 41, 4 (1988)
- [18] Steinweger, T., „Lebensdaueruntersuchungen an Elastomerbauteilen“, Tagung Elastische Lagerungen im Automobilbau, Haus der Technik, Essen 2000
- [19] G. Theobald, "Lebensdauer von Metall-Gummibauteilen in Abhängigkeit von verschiedenen Parametern", Vortrag zur 11. Sitzung des Arbeitskreis Betriebsfestigkeit des DVM, Köln 1985
- [20] G. Bremer, "Betriebsfestigkeit von Metall-Gummilagern", Dissertation TU Clausthal, 1995
- [21] Korte, W., Stojek, M., Stommel, M., "Entwicklung einer berechnungsgestützten Vorgehensweise zur Abschätzung der Lebensdauer mechanisch-thermisch belasteter Elastomerbauteile", DKG-Abschlußbericht, Institut für Kunststoffverarbeitung (IKV), Aachen 1998
- [22] G. Bremer, "Betriebsfestigkeit von Metall-Gummilagern", Dissertation TU Clausthal, 1995
- [23] H. Zenner, J. Liu, "Berechnung der Dauerfestigkeit bei mehrachsiger Beanspruchung", Materialwissenschaften und Werkstofftechnik, Band 24 (1993) Heft 7
- [24] V.B. Köttgen, K. Dreßler, Tools for Fatigue Evaluation of nonproportional Loading, Fatigue Design '95, Helsinki 1995
- [25] M. Williams, R. Landel, J. Ferry, J. Am. Chem. So. **77**, 7, 1955