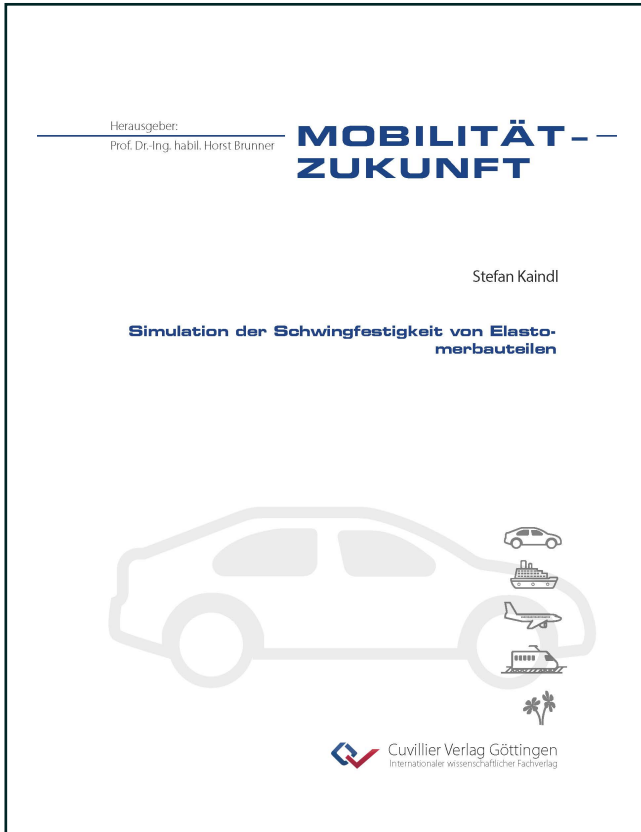




Stefan Kaindl (Autor)
**Simulation der Schwingfestigkeit von
Elastomerbauteilen**



<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8856>

Copyright:
Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany
Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

1 Einleitung

1.1 Elastomerbauteile in der Automobilindustrie

Elastomerbauteile spielen in der Automobilindustrie, wie auch im Maschinen- und Anlagenbau eine wichtige Rolle. So werden Elastomere zur Herstellung von Reifen, Schläuchen, Dichtungen, Riemen, Kupplungen, Bälgen usw. eingesetzt. Entscheidende Faktoren für den Einsatz von Elastomeren sind ihre Elastizitäts-, Dichtungs- und Reibungseigenschaften. Im automotiven Einsatz spielen Elastomerbauteile vor allem auch für die Schwingungsisolierung und -dämpfung eine wichtige Rolle. In dieser Funktion werden sie für Kupplungen, Schwingungsdämpfer, Fahrwerks- und Aggregatlager eingesetzt [100], [83]. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft einige Gummi-Metall-Lager. *Motor-* und *Getriebelager* haben die Aufgabe, den Motorgetriebeverband elastisch zu positionieren, die aus dem Motorbetrieb und der Fahrbananregung auftretenden Schwingungen aufzunehmen und Geräusche zu isolieren. Die dafür notwendigen Elastizitäten werden im Allgemeinen durch Elastomerfedern erreicht, welche funktionsbedingt vor allem bei Motorlagern sehr komplexe Geometrien aufweisen können und im Betrieb schwingenden Belastungen mit Amplituden bis zu 20 mm ausgesetzt sind [92]. Die Aufgabe von *Differentiallagern* ist neben der elastischen Lagerung des Differentialgehäuses vor allem analog zu Getriebelagern die Isolierung von durch Verzahnungen hervorgerufenen Geräuschen. *Fahrwerkslager* prägen die dynamischen Fahreigenschaften von Fahrzeugen durch speziell definierte Steifigkeiten, welche so eingestellt sind, dass ein möglichst guter Kompromiss zwischen Straßenlage und Komfort für ein Fahrzeug erreicht wird.

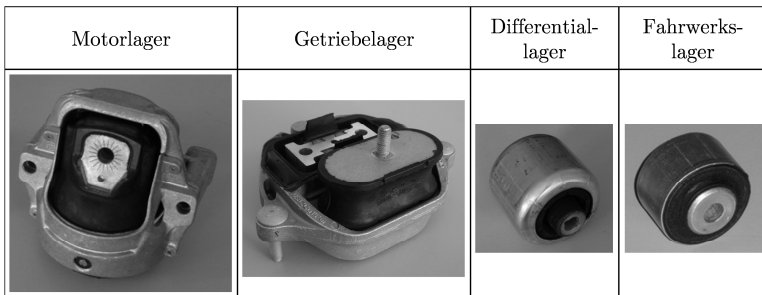


Abbildung 1.1: Elastomerbauteile im Automobilbau

Die Elastomerkomponenten ermöglichen bei den Lagern eine hohe Funktionsintegration auf vergleichsweise geringem Bauraum [64]. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren ausgenutzt, große Verformungen bei geringen Kräften elastisch aufnehmen zu können. Dafür steht eine Reihe von unterschiedlichen Elastomerwerkstoffen mit unterschiedlichem Materialverhalten zur Verfügung, welche gezielte Beeinflussungen des Schwingerverhaltens ermöglichen. Das komplexe Verhalten unterschiedlicher Werkstoffe stellt jedoch zugleich große Herausforderungen an die Bauteilauslegung. Neben dem nichtlinearen Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten sind auch chemische Eigenschaften und fertigungsbedingte Streuungen der Eigenschaften zu beachten [83].

Die Anforderungen an Elastomerbauteile werden zunehmend höher. Aufgrund der hohen Anzahl von Elastomerbauteilen insbesondere in Automobilen, sollen diese im Sinne des

Leichtbau möglichst leicht sein, um die Gesamtmasse zu reduzieren und damit Treibstoff und CO₂ Emissionen zu sparen. Weiterhin werden immer mehr Funktionen in Automobile integriert, wodurch die Anzahl der Bauteile steigt und die vorhandenen Bauräume tendenziell kleiner werden. Somit müssen die gewünschten Eigenschaften in immer kleiner werdenden Bauräumen realisiert werden, was zu erhöhten Kräften und lokalen Beanspruchungen in den Bauteilen führt.

Parallel dazu werden die Entwicklungszeiten kürzer, sodass der Zeitrahmen, welcher für die Erprobung der Bauteile zur Verfügung steht, kleiner wird. Weiterhin besteht bei Automobilherstellern der Wunsch, die vorgegebenen Eigenschaften von Lagern wie statische und dynamische Steifigkeit, Dämpfungs-, Kriech- und Alterungsverhalten und nicht zuletzt die Schwingfestigkeit für die Produktlebensdauer im Vorhinein gut prognostizieren zu können [25]. Dies ist nur zu gewährleisten, wenn durch den Einsatz von Simulationsmethoden ein besseres Verständnis der Bauteile gewonnen und damit eine Verringerung der Prüfumfänge ermöglicht werden kann. Diese Arbeit soll eine Methode liefern, die Schwingfestigkeit von Elastomerbauteilen bereits vor dem Bau erster Prototypen prognostizieren zu können um anschließend gemeinsam mit Versuchen eine zielgerichtete Optimierung im Laufe des Entwicklungsprozesses zu ermöglichen. Da sich eine derartige Simulationsmethode in den etablierten Entwicklungsablauf integrieren muss [20], wird im Folgenden auf den Entwicklungsprozess in der Automobilindustrie am Beispiel der Audi AG kurz eingegangen.

Der Entwicklungsprozess besteht grundsätzlich aus den zwei Phasen *Produktdefinition* und *Produktentstehung* (siehe Abbildung 1.2 links) [129] und endet mit bzw. kurz nach dem Produktionsstart (SOP – *Start of Production*), wobei im Laufe der Entwicklung einige wichtige Meilensteine des allgemeinen Prozessablaufs durchlaufen werden. Die Phase *Produktdefinition* beginnt in der Regel ca. 54 Monate vor SOP und endet mit dem Meilenstein *Project-Feasibility* (PF), bei dem die Machbarkeit eines Gesamtfahrzeugprojekts entschieden wird. Bereits innerhalb dieser Phase kann die *Komponentenentwicklung* ab dem Zeitpunkt der *Produkt-Definition* (PD) anlaufen. Die eigentliche Produktentwicklung findet jedoch in der Phase *Produktentstehung* statt. Diese führt zunächst zum *Konzeptentscheid* (KE) und später zum *Designentscheid* (DE). Zu diesem Zeitpunkt ist die *Komponentenentwicklungsphase* abgeschlossen und die Phase *Serienentwicklung* und *-vorbereitung* beginnt. Wichtige Meilensteine in dieser Phase sind die *Beschaffungsfreigabe* (BF), bei der die Werkzeuge für die Serienentwicklung angestoßen werden, und die *Vorserien-Freigabe-Fahrzeuge* (VFF), welche bereits mit Serienteilen bestückt werden sollen. Das bedeutet, dass zu diesem Zeitpunkt die Entwicklung der Bauteile abgeschlossen ist.

Der Prozessablauf für die Fachabteilungen zur Entwicklung der Bauteile bzw. Baugruppen [134] leitet sich vom allgemeinen Entwicklungsprozess ab. Zum Meilenstein *Project-Feasibility* (PF) wird ein Lastenheft an potentielle Lieferanten verteilt, was voraussetzt, dass zu diesem Zeitpunkt Bauräume und damit die maximalen Abmaße einzelner Komponenten bereits festgelegt sind. Genaue Lasten sind noch nicht vorhanden und müssen aus Vorgängerfahrzeugen und grundsätzlichen Auslegungsrechnungen abgeschätzt werden. Bis zum Konzeptentscheid findet auf Basis des Lastenhefts ein Konzeptwettbewerb mit unterschiedlichen Lieferanten (Konzeptphase) statt, welcher zum *Konzeptentscheid* mit Nominierung von Serienlieferanten (NL) führt. Erst ab diesem Zeitpunkt stehen die Lieferanten und somit Entwicklungspartner für einzelne Bauteile und Komponenten fest.

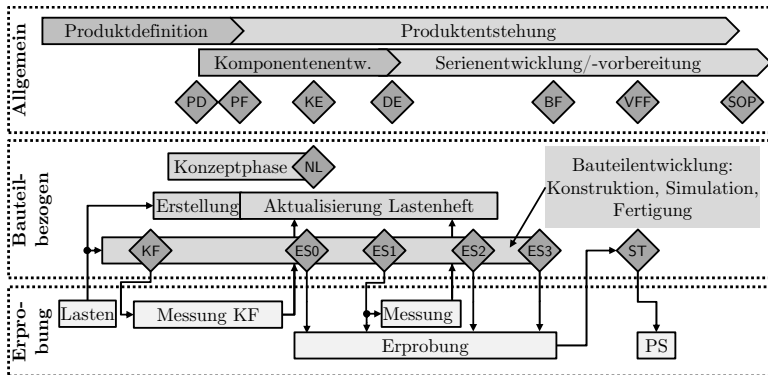


Abbildung 1.2: Ablauf Entwicklungsprozess mit Fokus Konstruktion und Simulation, nach [129], [134]

Für die Entwicklung der Bauteile bis zur Serienreife stehen im Prozess die Schleifen *Konzeptfahrzeug* (KF) und mehrere Entwicklungsstände (ES0 bis ES3 in Abbildung 1.2) zur Verfügung. Wie dem Prozessablauf in Abbildung 1.2 zu entnehmen ist, wird das Konzeptfahrzeug bereits in der frühen *Produktdefinitionsphase* aufgebaut. Es hat die Aufgabe, erste Lastmessungen zu ermöglichen, welche bis zum Konzeptentscheid vorliegen, um diese in die Entscheidung mit einfließen lassen zu können. Die Fachabteilungen haben die Aufgabe, das Konzeptfahrzeug zu bestücken, wobei die Entwicklung der Bauteile auf Basis von Abschätzungen in Kombination mit Daten von Vorgängerfahrzeugen erfolgen muss. Weiterhin wird meist ein weiterer Entwicklungsstand (ES0) noch vor dem *Konzeptentscheid* und damit noch vor der Nominierung von Serienlieferanten aufgebaut. Erst ab dem Entwicklungsstand ES1 sind die späteren Serienlieferanten intensiv eingebunden. Konstruktion und Simulation verlagern sich in dieser Phase zu den Serienlieferanten. Auch Messungen und Betriebsfestigkeitsprüfungen auf Bauteilebene werden von und bei den Lieferanten durchgeführt. Parallel dazu erfolgen Prüfstandserprobungen und Messungen an Versuchsfahrzeugen beim Automobilhersteller, deren Erkenntnisse laufend in das Lastenheft und damit in die Bauteilentwicklung einfließen. Mit der Abnahme des letzten Entwicklungssandes (ES3) kann die Beschaffungsfreigabe (BF) für die Serienwerkzeuge erteilt werden mit dem die ersten Serienteile (ST) erzeugt werden. Dieser Vorgang beschließt die Bauteilentwicklung. Die Teile aus den Serienwerkzeugen werden anschließend durch Prüfstandserprobungen (PS) abgesichert und im Rahmen der Qualitätssicherung laufend kontrolliert.

1.2 Zielsetzung, Zieldefinition

Für die Entwicklung einer Methode zur Betriebsfestigkeitssimulation von Elastomerbauteilen ergeben sich aus dem Entwicklungsprozess aus Kapitel 1.1 folgende Randbedingungen:

- Die Bauräume müssen in einem sehr frühen Entwicklungsstadium definiert werden. Erprobungs- und Messergebnisse von Bauteilen sind in dieser Phase noch nicht oder nur in sehr geringem Maße vorhanden. Trotzdem besteht naturgemäß der Wunsch,

die Definition der Bauräume auf eine möglichst breite Basis zu stellen. Hier soll die Simulation der Betriebsfestigkeit Entscheidungsgrundlagen liefern.

- Im Zuge des Konzeptwettbewerbs entwickeln unterschiedliche Lieferanten Konzepte, welche auch im Hinblick auf die Betriebsfestigkeit verglichen und beurteilt werden sollen. Durch den straffen Ablauf des Entwicklungsprozesses ist eine Beurteilung in Hardware nicht möglich. Hier soll die Betriebsfestigkeitssimulation ein Werkzeug liefern, um unterschiedliche Geometrien vergleichend bewerten zu können.
- Während der Entwicklungsphase der Entwicklungsstände ES1 bis ES3 laufen Konstruktion und Simulation hauptsächlich beim Lieferanten. In dieser Phase werden die Entwicklungsfortschritte durch Prüfstandserprobungen laufend beobachtet und beurteilt. Dabei soll die Betriebsfestigkeitssimulation unterstützend wirken. Während die Prüfstandserprobung einen Zusammenhang zwischen den äußeren Lasten und möglichen Ausfällen herstellen kann, soll die Simulation die Ergreifung von Ausfallsursachen durch die Berechnung der lokalen Beanspruchungen ermöglichen. So soll das Zusammenspiel von Prüfstand und Simulation eine methodische und zielgerichtete Entwicklung sicherstellen, um teure und zeitaufwändige Entwicklungsschleifen in Hardware einzusparen.
- Eine abschließende Betriebsfestigkeitssimulation parallel zur Prüfstandserprobung des Entwicklungsstands ES3 für die Beschaffungsfreigabe ermöglicht eine saubere Dokumentation des Serienbauteils hinsichtlich Schwingfestigkeit.

Die hier genannten Einsatzanforderungen erfordern, dass die Methode so gestaltet sein soll, dass sie

- in unterschiedlichen Detaillierungstiefen eingesetzt werden kann (von einer einfachen Grundausslegung bis zur „Abnahmesimulation“).
- von Berechnungsingenieuren mit kurzer Einschulung angewendet werden kann, da nicht davon auszugehen ist, dass im gesamten Entwicklungszeitraum von ca. 4 Jahren die Methode vom gleichen Berechnungsingenieur angewendet wird.
- mit unterschiedlicher Genauigkeit der Eingangsdaten funktioniert. Zu Beginn der Entwicklung stehen weder die genauen Materialdaten noch die Lasten zur Verfügung. Auch im späteren Entwicklungsstadium ist nicht gesichert, dass umfangreiche Materialdaten zur Verfügung stehen, da Elastomerhersteller sie sehr oft unter Verschluss halten. Grundsätzliche Aussagen sollten also auf Basis von „Master-Materialdaten“ möglich sein.

1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist abgesehen von Einleitung und Fazit grundsätzlich in drei Abschnitte unterteilbar, welche als

- Grundlagen (Kapitel 2 und 3),
- Entwicklung von Simulationsmethoden (Kapitel 4 und 5) und deren
- Anwendung an Elastomerbauteilen (Kapitel 6 bis 8)

bezeichnet werden können. In Kapitel 2 sind die Grundlagen aus der Literatur und der Stand der Technik hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von Elastomeren zusammengefasst. Der Fokus liegt hierbei auf Elastomerwerkstoffen auf Naturkautschukbasis, bedingt durch die große Bedeutung in der Schwingungstechnik im

Automobilbau. Zu Beginn werden die grundlegenden Eigenschaften, der Herstellprozess und das globale Verformungsverhalten behandelt. Anschließend werden Möglichkeiten der mathematischen Beschreibung mit unterschiedlichen Materialmodellen aus der Literatur zusammengefasst. Ziel dieses Kapitels ist eine möglichst breite Aufstellung um daraus eine geeignete Auswahl treffen zu können, welche Modelle im industriellen Einsatz praktikabel einsetzbar sind. Voraussetzungen dafür sind zum einen eine ausreichende Genauigkeit, zum anderen müssen aber auch die Randbedingungen, welche sich durch den Entwicklungsprozess ergeben, berücksichtigt werden. Bezüglich der Genauigkeit gilt es die Frage zu klären, welche aus der Literatur bekannten Phänomene berücksichtigt werden müssen und welche im Sinne einer ingenieurmäßigen Herangehensweise vernachlässigt werden können.

Kapitel 3 widmet sich dem Stand der Forschung auf dem Gebiet der Lebensdaueruntersuchungen von Elastomeren. Nach der Abgrenzung des Begriffs Schwingfestigkeit von der Alterung werden die zwei grundlegenden Konzepte zur Berechnung der Schwingfestigkeit aus der Literatur

- Kollektiv-Wöhlerlinien-Konzept
- Bruchmechanikkonzept

beschrieben. Weiterhin werden Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Elastomeren und Anwendungsbeispiele aus der Literatur zusammengefasst. Ziel dieses Kapitels ist die Schaffung einer Basis für den Konzeptentscheid, welcher am Ende dieses Kapitels unter Einbeziehung zusätzlicher Randbedingungen aus dem Entwicklungsprozess vorgenommen wird.

Kapitel 4 zeigt die Vorgehensweise und die Versuche zur Materialparameterabstimmung. Auf Basis der Erkenntnisse aus der Literatur (Kapitel 2) wurden eine Reihe von Probekörperversuchen zur Aufnahme von Kraft-Weg bzw. Spannungs-Dehnungs Kennlinien definiert und abgearbeitet, wobei unterschiedliche Einflüsse wie Temperatur und Wärmealterung exemplarisch abgeprüft wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen führen zur Auswahl von geeigneten hyperelastischen Materialmodellen für den Einsatz in der Schwingfestigkeitssimulation. Weiterhin zeigt Kapitel 4 die Entwicklung eines Verfahrens zur Berücksichtigung der Spannungserweichung, des sogenannten Mullins-Effekts und die Verifikation mit Messungen auf Probekörperebene.

In Kapitel 5 erfolgt die Entwicklung der Methode zur Berechnung der Schwingfestigkeit unter multiaxialer Belastung. Diese beruht basierend auf dem Konzeptentscheid am Ende des 3. Kapitels grundsätzlich auf dem örtlichen Kollektiv-Wöhlerlinien-Konzept, welches im Wesentlichen örtliche Beanspruchungen mit werkstoff-spezifischen Beanspruchbarkeiten vergleicht. Um geeignete Materialkennwerte hinsichtlich der Schwingfestigkeit zu erhalten, wurden Einstufenversuche an Probekörpern für unterschiedliche Mittellasten und Lastniveaus durchgeführt, deren Ergebnisse in Kapitel 5 dokumentiert sind. Der Großteil der Untersuchungen erfolgte bei Raumtemperatur, wobei exemplarisch auch Temperatur- und Alterungseinflüsse untersucht wurden. Die Ergebnisse der Untersuchungen liefern Beanspruchbarkeiten für die untersuchten Elastomerwerkstoffe, welche als Basis für spätere Schwingfestigkeitsberechnungen dienen. Für die Simulation der Beanspruchungen von Elastomerbauteilen ist es erforderlich mehr-achsige stochastische Belastungen berücksichtigen zu können, weil in der Regel erst die Überlagerung unterschiedlicher Richtungskomponenten zum Ausfall führt. Durch die hochgradig nichtlineare Eigenschaften von Elastomeren ist jedoch eine häufig bei Metallen angewandte Methode nicht möglich, bei der Einheitslastfälle berechnet und durch Signalverläufe skaliert und

superponiert werden. Auch eine separate Betrachtung unterschiedlicher Richtungskomponenten ist nicht zielführend. Die Berechnungsmethode muss daher diese nichtlinearen elastomerspezifischen Eigenschaften berücksichtigen können. Je nach Art von Belastungssignalen können unterschiedliche Abläufe vorteilhaft sein, sodass in Kapitel 5 zwei Wege dokumentiert sind.

Kapitel 6 zeigt die Verifikation der Berechnungsmethode an Motorlagern mit einkomponentiger Belastung. Dazu wurden Schwingfestigkeitsversuche an drei unterschiedlichen Motorlagern durchgeführt und parallel dazu simulativ untersucht. Die Ergebnisse zwischen Versuch und Simulation werden für jede der drei Lagertypen gegenübergestellt und diskutiert. Es zeigt sich, dass die Berechnungsmethode Rissstellen grundsätzlich gut prognostizieren kann.

Kapitel 7 zeigt die Anwendung der Schwingfestigkeitsberechnung an Fahrwerkslagern mit zweikomponentiger Belastung. Auch hier werden die Ergebnisse einer Versuchsreihe mit Simulationen verglichen, wobei eine Fahrwerkslagergeometrie mit drei unterschiedlichen Werkstoffen untersucht wurde. Die Simulation kann hier die Ausfälle erklären, wobei die Simulationsergebnisse zeigen, dass hierbei kein klassisches Schwingfestigkeitsproblem vorliegt, sondern es bei großen Verformungen zu einem Aufschneiden des Elastomers durch die Außenhülse kommt.

In Kapitel 8 erfolgt die Anwendung der Lebensdauersimulation an Motorlagern mit dreikomponentigen stochastischen Belastungsverläufen, welche sowohl Motor- als auch Fahrbananregungen enthalten. Als Referenz für die Lebensdauersimulation dienen Ergebnisse von durchgeführten Prüfstandsläufen von den drei Lagertypen aus Kapitel 6. Die Ergebnisse der parallel zu den Versuchen durchgeführten Schwingfestigkeitssimulationen der Lager sind den Prüfstandsergebnissen gegenübergestellt.

Kapitel 9 fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick über mögliche weitere Untersuchungen.

2 Stand der Technik, Grundlagen

2.1 Eigenschaften von Elastomeren

Die Eigenschaften der Elastomere ergeben sich aus ihrem molekularen Aufbau, den ihnen zugegebenen Füllstoffen und dem Herstellprozess. Im folgenden Kapitel werden daher zunächst die wesentlichen strukturellen Merkmale und die daraus resultierenden mechanischen Eigenschaften dargestellt.

2.1.1 Einteilung und globales mechanisches Verhalten

Elastomere gehören zu den polymeren Werkstoffen. Diese werden nach DIN 7724 [47] aufgrund ihres molekularen Aufbaus und dem daraus resultierenden Verhalten klassifiziert. Es wird zwischen Thermoplasten, Duroplasten, Elastomeren und thermoplastischen Elastomeren unterschieden. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die grundlegenden Strukturen der einzelnen Werkstoffgruppen. Allen gemein ist, dass sie aus langen Makromolekülen bestehen. Während Thermoplaste und thermoplastische Elastomere keine chemische Verbindung zwischen den Makromolekülen aufweisen, sind Duroplaste und Elastomere chemisch „vernetzt“, sodass die Bewegung der einzelnen Molekülketten zueinander eingeschränkt ist. Die engmaschige Vernetzung der Duroplaste macht sie zu einem im Vergleich zu den übrigen Kunststoffen harten und nicht schmelzbaren Werkstoff [49].


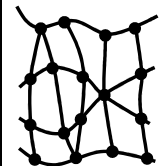
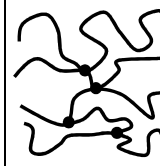
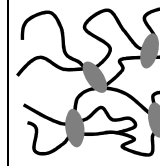
Thermoplast	Duroplast	Elastomer	thermo- plastisches Elastomer
unvernetzt	engmaschig chemisch vernetzt	weitmaschig chemisch vernetzt	weitmaschig physikalisch vernetzt
			

Abbildung 2.1: Einteilung der Polymere nach DIN 7724 [47]

Elastomere sind hingegen nur sehr weitmaschig vernetzt, sodass die einzelnen Kettensegmente zwischen den Vernetzungsstellen sehr beweglich sind. Die Kettenmoleküle liegen im spannungsfreien Zustand stark geknäult vor. Dies ergibt sich daraus, dass thermodynamisch-statistisch betrachtet eine maximale Unordnung der Molekülketten am wahrscheinlichsten ist, weil dabei die Entropie ein Maximum besitzt¹ [117]. Bringt man von außen eine erzwungene Verformung auf, werden diese Knäuelstrukturen gereckt. Bei Entlastung kehren die Kettenmoleküle wieder in den Zustand der maximalen Entropie zurück. Dieser Vorgang ist im Allgemeinen reversibel, sodass elastische Verformungen die

¹ Eine thermodynamische Herleitung zur Entropieelastizität befindet sich in Kapitel 2.2.3.

Folge sind. Man spricht durch dieses elastische Verhalten, welches von der Entropie abhängt, von entropie-elastischem Verhalten. Da die Rückstellkräfte auf Basis der Entropieänderung im Vergleich zu energie-elastischem Verhalten verhältnismäßig klein sind, besitzen Elastomere sehr geringe Steifigkeiten [179]. Bereits kleine Kräfte führen zu großen Deformationen bis zu mehreren hundert Prozent Dehnung.

2.1.2 Herstellprozess von Naturkautschuk

Im Bereich der Fahrwerks- und Aggregatelagerung im Automobilbereich sind überwiegend Schwefel vernetzte mit Ruß gefüllte Naturkautschukmischungen zu finden. Aus diesem Grund sollen hier Aufbau und Herstellprozess am Beispiel von Naturkautschuk erläutert werden.

Naturkautschuk (NR) wird aus dem Harz des Latexbaums mit dem Namen *Hevea brasiliensis* hergestellt [159]. Die sehr zähe Flüssigkeit besteht aus dem chemischen Grundbaustein Polyisopren in der *cis*-Form, siehe Abbildung 2.2. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zur *trans*-Form stark gekrümmte Polymerketten aufweist, die eine dichte Packung verhindern und eine amorphe, gummiartige Substanz ergeben [10]. Die einzelnen Kettenmoleküle sind nicht miteinander verbunden. Dies führt dazu, dass bei einwirkenden Spannungen die Ketten aneinander vorbeigleiten können. Das Material zeigt somit thermoplastisches Verhalten und ist deshalb technisch nicht nutzbar.

Dieses plastische Verhalten lässt sich durch Quervernetzung der Ketten mittels Vulkanisieren² unterdrücken. Dabei werden die einzelnen Kettenmoleküle durch Schwefelbrücken miteinander verbunden. Abbildung 2.2 unten zeigt die Wirkweise des Mechanismus, welcher unter Druck bei Temperaturen ab 140°C abläuft [49]. Dabei werden Schwefelbrücken durch Aufbruch von Doppelbindungen und Umlagerung von H-Atomen erzeugt. Die Elastizität des vernetzten Gummis hängt von der Dichte der Vernetzungsstellen und damit vom Schwefelgehalt ab, welcher üblicherweise zwischen 0.5 und 5% liegt [10]. Ein geringerer Schwefelanteil ergibt einen weichen und flexiblen Gummi. Mit zunehmendem Schwefelgehalt wird der Gummi härter, starrer und auch spröder.

² Neben der Schwefelvernetzung beim Vulkanisieren wird auch die Peroxidvernetzung eingesetzt. Diese spielt bei Naturkautschuk jedoch eine untergeordnete Rolle und wird hier deshalb nicht näher beschrieben. An dieser Stelle sei auf die Literatur verwiesen, z.B. [3], [49], [159], [176].

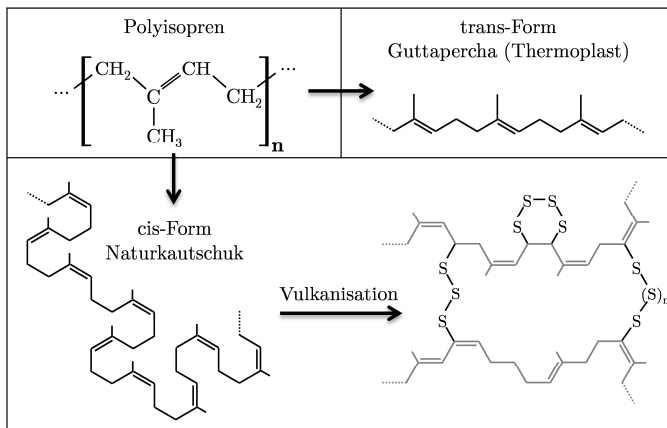


Abbildung 2.2: Chemische Zusammensetzung des Polyisopren in *cis*- und *trans*-Form, Vulkanisation durch Schwefelbrücken, mod. nach [10], [49], [176]

Aber auch andere Eigenschaften werden von der Vernetzungsdichte beeinflusst. Abbildung 2.3 zeigt den Einfluss der Vernetzungsdichte auf Weiterreißfestigkeit und Ermüdung, Shore-A Härte, Zugfestigkeit, Fläche der Hysterese (Dämpfung), Setzverhalten, Reibungskoeffizient und Reißdehnung. Die Weiterreißfestigkeit besitzt ein Maximum bei moderaten Vernetzungsdichten. Die Shore-A Härte und die Zugfestigkeit steigen mit zunehmender Vernetzungsdichte tendenziell, die viskoelastischen Eigenschaften, wie Dämpfung (Fläche der Hysterese) und Setzverhalten nehmen mit zunehmender Vernetzungsdichte ab.

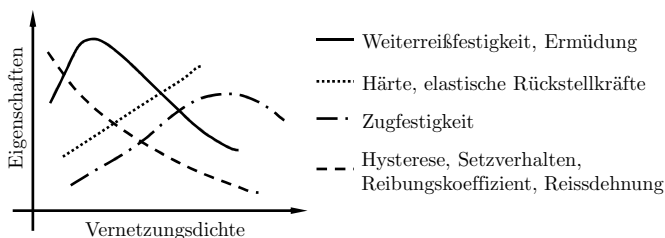


Abbildung 2.3: Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Vernetzungsdichte, nach [49], [155]

Neben Schwefel werden bei der Vulkanisation noch weitere Zusatzstoffe verwendet. Es handelt sich dabei um Hilfsstoffe wie Vulkanisationsbeschleunigern und -verzögerern, Weichmachern und Alterungsschutzmitteln und Füllstoffe. Tabelle 1 zeigt gängige Mischverhältnisse dieser Stoffe und deren Einfluss auf die Eigenschaften des Elastomers. Vor allem Füllstoffe prägen die mechanischen Eigenschaften des Gummis entscheidend, sodass im folgenden Kapitel näher darauf eingegangen wird.

Tabelle 1: Übliche Bestandteile von Elastomermischungen, nach [176]

Bestandteilgruppe	Masse in [phr] ³	Einfluss auf
Polymer (Kautschuk)	100	Elastisches Verhalten, Alterung
Vernetzungskemikalien	<1 – 12	Dynamische Eigenschaften, Alterung
Füllstoffe	20 – 200	Festigkeit, Härte, (Alterung)
Weichmacher	2 – 100	Härte, Kälteeignung
Verarbeitungshilfen	1 – 20	Homogenität, Verarbeitung
Treibmittel	1 – 20	Dichte, Härte
Innere Haftmittel	5 – 15	Bindung zu Metall, Textil

2.1.3 Füllstoffe

Füllstoffe werden zugegeben, um die mechanischen Eigenschaften von Elastomeren zu verbessern. Grundsätzlich kann zwischen aktiven bzw. verstärkenden und inaktiven Füllstoffen unterschieden werden.

- Aktive Füllstoffe wechselwirken mit der Kautschukmatrix und beeinflussen so maßgeblich Eigenschaften wie Steifigkeit, Reiffestigkeit, Weiterreißwiderstand und Abrieb. Durch Art, Menge und Teilchengröße lassen sich dem Verwendungszweck angepasste Eigenschaften erzielen [49]. Zu den aktiven Füllstoffen zählen Ruß und Kieselsäure. Die Füllpartikel haben üblicherweise eine Größe von 10 bis 100 nm und weisen eine Oberfläche von bis zu mehreren hundert Quadratmetern pro Gramm auf [176].
- Inaktive Füllstoffe haben keine Wechselwirkung mit der Kautschukmatrix. Die Durchmesser der Partikel liegen im Bereich von 500 bis 1000 nm [159]. Ihre Hauptaufgabe ist es, das Volumen des Werkstoffs zu vergrößern und ihn damit zu verbilligen. Als inaktive Füllstoffe finden z. B. Kieselkreide, Talkum und Kaolin Anwendung [176]. Aber auch Ruße verhalten sich bei diesen Partikelgrößen nur noch sehr schwach aktiv [49].

Die Auswirkung von aktiven und inaktiven Füllstoffen auf Härte⁴, Viskosität⁵ und Reiffestigkeit ist in Abbildung 2.4 schematisch dargestellt.

³ Die Massen der Zuschläge werden in der Kautschukindustrie auf 100 Teile Kautschuk (parts per hundred rubber [phr]) bezogen

⁴ Die Härte ist ein Maß für die Steifigkeit es Werkstoffs und wird meist in Shore-A, aber auch Shore-D nach DIN 7743 [43] oder IRHD nach DIN ISO 48 [42] bestimmt und angegeben. Für kleine Dehnungen ist es möglich, die Shore-Härte direkt in einen Schubmodul umzurechnen [17], [42], [64].

⁵ Die Viskosität beschreibt den viskosen Anteil der viskoelastischen Materialeigenschaften von Elastomeren. Zur Messung von rheologischen Eigenschaften siehe z.B. [150].