

3.1.2 Einteilung der Füllstoffe

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Füllstoffe zu klassifizieren. Zweckmäßig ist die Einteilung entsprechend der Wechselwirkung mit dem Kautschuk in verstärkende (aktive) und inaktive Füllstoffe.

- *Verstärkende Füllstoffe* verändern durch die Wechselwirkung mit der Kautschukmatrix die viskoelastischen Eigenschaften. Sie erhöhen die Viskosität der Kautschuke und verbessern das Bruchverhalten der Vulkanisate, wie Reißfestigkeit, Weiterreißwiderstand und Abrieb.
- *Inaktive Füllstoffe* verdünnen die Matrix. Das bewirkt, dass bestimmte Eigenschaften, z. B. die Bruchenergie, abnehmen, andere Eigenschaften wie Verarbeitbarkeit oder Gasundurchlässigkeit, können positiv beeinflusst werden.

In Bild 3.1 ist der Einfluss aktiver und inaktiver Füllstoffe auf ausgewählte Eigenschaften schematisch dargestellt. Aktive und inaktive Füllstoffe unterscheiden sich auch in der Teilchengröße. Verstärkende Füllstoffe haben Partikeldurchmesser zwischen 10 und 100 nm (Nanoteilchen), inaktive Füllstoffe haben dagegen Partikeldurchmesser zwischen 500 und 1000 nm. Mäßige Verstärkungswirkung haben Füllstoffe mit einem Teilchendurchmesser zwischen 100 und 500 nm.

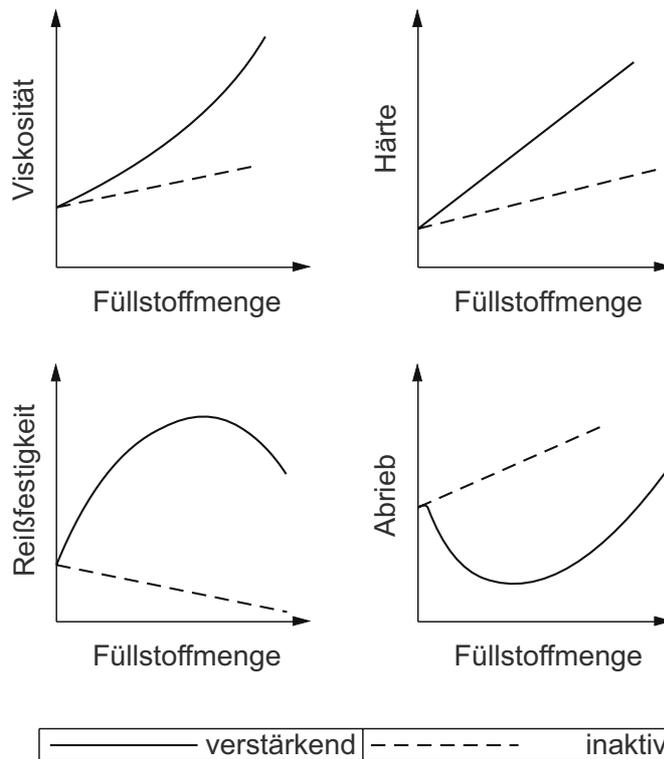


Bild 3.1

Schematische Darstellung der Wirkung aktiver und inaktiver Füllstoffe auf ausgewählte Eigenschaften eines amorphen Kautschuks

Tabelle 3.23 Eigenschaften ausgewählter Füllstoffe

Füllstoff	Teilchengröße (μm)	Oberfläche (m^2/g)	Dichte (g/cm^3)
Calciumcarbonat			
Trocken gemahlen	5 bis 20	1	2,70
Nass gemahlen	2 bis 5	1,2 bis 2,5	2,70
Gefällt	0,01 bis 0,35	10 bis 30	2,70
Kaolin ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)			
Weich	1 bis 5	< 10	2,62
Hart	0,3	20 – 30	2,62
Calciniert	1 bis 1,2	8 bis 12	2,60
Talkum (Mg-Silikat)			
	0,1 bis 15	k. A.	2,85
Aluminiumhydroxid			
	2 bis 10	1	2,40
Titandioxid			
	0,03	50	3,80
Zinkoxid			
	0,1 bis 0,3	4 bis 8	5,60
Bariumsulfat			
	10 bis 50	< 1	4,45

3.1.7 Nanomaterialien

In den letzten Jahrzehnten sind Nanomaterialien Gegenstand intensiver Untersuchungen und Forschung. Nanowerkstoffe werden in den unterschiedlichsten Bereichen – von Füllstoffen für Polymere, als Additive für Lacke bis hin zu antimikrobielle Ausrüstungen – eingesetzt.

Der Begriff Nano kommt aus dem Altgriechischen (nanos) und heißt Zwerg [3.54]. Entsprechend der Definition der OECD (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung) versteht man unter Nanomaterialien Werkstoffe, deren charakteristische Eigenschaften oder besondere Zusammensetzung gezielt erzeugt wurden, mit einem typischen Größenbereich von 1 bis 100 nm. Das Material muss entweder Nanoobjekt sein (d.h., es muss in einer, zwei oder drei Dimensionen nanoskalig sein) oder nanostrukturiert sein (d.h., es besitzt eine nanoskalige innere oder oberflächliche Struktur) [3.55]. Da sowohl Ruße als auch synthetische Kieselsäuren nanoskalige oberflächliche Strukturen aufweisen, fallen diese beiden Füllstoffe unter den Begriff Nanomaterialien. Beide sind schon sehr lange bekannt, wurden jedoch nicht als „Nanowerkstoffe“ bezeichnet.

Nanopartikel erzielen durch ihre extrem große spezifische Oberfläche völlig andere Eigenschaften als Partikel im μm -Maßstab. Je kleiner das Teilchen ist, desto größer wird der Anteil der Oberfläche, die reaktive Grenzfläche nimmt zu [3.54].

Die Zunahme der Oberfläche ist der Kernpunkt für die Eigenschaftsverbesserung durch Nanomaterialien, das bedeutet aber auch, dass die Dispergierung der Nanomaterialien in der Matrix essentiell ist. Das Dispergieren der Nanomaterialien in

der Schmelze oder Polymerlösung ist derzeit noch eine große Herausforderung bei der Herstellung von nanotechnologiebasierten Materialien, da die meisten Nanopartikel ausgeprägte Tendenzen zur Agglomeration aufweisen. Nanoobjekte können – wie oben beschrieben – in einer, zwei oder drei Dimensionen nanoskalig (Abmessung zwischen 1 und 100 nm) sein.

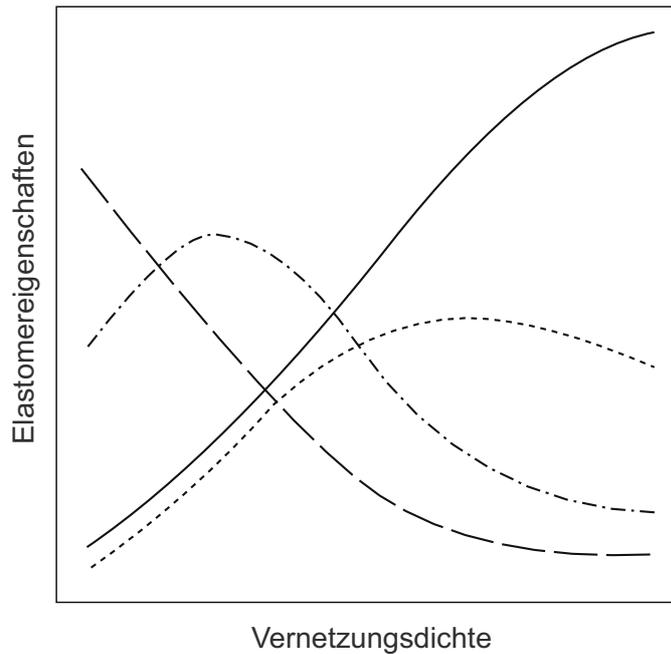
Bei *1D-Nanomaterialien* handelt es sich um dünne Filme bzw. Platten, derartige Materialien sind zum Beispiel Kaoline (Clays), Oberflächenbeschichtungen oder Graphene [3.54]. Auf Smektit basierende Kaoline bestehen aus Plättchen im Nanometerbereich mit einem Durchmesser von ca. 500 nm und einer Dicke von ca. 1 nm. Derartige polymere Nanocomposite auf Basis von Schichtsilikaten sind heute schon in vielen Anwendungen zu finden. Die Vorteile dieser Nanocomposite sind [3.55]:

- Signifikante Verbesserung der Eigenschaften bei niedrigen Füllgraden (5 bis 10%)
- Geringe Dichte im Vergleich zu herkömmlichen Compositen und natürlich im Vergleich zu Metallen – diese ermöglicht eine Gewichtsreduktion von Bauteilen (Transportbranche, Fahrzeugbau)
- Reduzierte Brennbarkeit
- Erhöhte Barrierewirkung gegenüber Gasen und Flüssigkeiten

Graphene sind Kohlenstoff-Monolagen, ähnlich wie Carbonanotubes, die man sich aus Graphenen „aufgerollte“ Röhren vorstellen kann – jedoch sind Graphene ebene eindimensionale Gebilde. Das Potenzial der Graphene wurden erst im letzten Jahrzehnt erkannt und nun gibt es Anstrengungen Graphene möglichst kostengünstig herzustellen und auch diese Materialien in der Nanotechnologie zum Einsatz zu bringen. Es gibt erste Anzeichen, dass Graphene die Nanoröhren bei vielen Neuentwicklungen überholen könnten. Graphene haben eine sehr gute Wärmeleitfähigkeit (fünffach höher als Kupfer). Die elektrische Leitfähigkeit ähnelt der des Kupfers. Die Festigkeit ist höher als die von Stahl, sie haben einen sehr hohen E-Modul und extrem geringe Gaspermeation.

2D-Nanomaterialien sind Röhren wie beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren (Carbonanotubes, CNT) oder Nanofasern [3.56]. Carbonanotubes umfassen die sogenannte Multiwall Nanotubes (MWNT) als auch die Singlewall Nanotubes (SWNT) [3.57]. CNT zeigen besonders gute Eigenschaften bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit und der flammhemmenden Wirkung. Zur Gewichtsreduktion und Verstärkung von Sportartikel wie Tennisschläger, Fahrradrahmen, Skier, Snowboards, Golf- und Baseballschläger werden CNT derzeit schon verwendet. Auch im Fahrzeugbau sind nanoverstärkte Kunststoffe schon in Verwendung (Gewichtsreduktion und Leitfähigkeit von Bauteilen). Anwendungen in Elastomeren sind derzeit erst im Stadium der Entwicklung.

3D-Nanomaterialien enthalten synthetisch hergestellte nanoskalige Partikel aus Metalloxiden wie z. B. TiO_2 , ZnO , CeO_2 , Al_2O_3 aber auch SiO_2 , Fullerene und metallische Nanopartikel wie Ag und Cu. Silbernanopartikel werden zur antimikrobiellen



—	Härte, Speichermodul	— —	Verlustmodul
- - - -	Weiterreißwiderstand	- - - - -	Reißfestigkeit

Bild 3.9

Schematische Darstellung des Einflusses der Vernetzungsdichte auf ausgewählte Elastomereigenschaften

men ab, Weiterreißwiderstand und Zugfestigkeit durchlaufen ein Maximum. Einige Eigenschaften, wie z. B. die Gasdurchlässigkeit oder das Kälteverhalten, ändern sich durch die Vernetzung nicht oder nur in geringem Ausmaß. Die Abhängigkeit wichtiger Vulkanisateigenschaften von der Vernetzungsdichte ist in Bild 3.9 schematisch dargestellt.

Das Vernetzungssystem bestimmt die Verarbeitungseigenschaften, den chemischen Aufbau des Netzwerkes und die physikalischen Eigenschaften der Elastomere. Die wichtigsten Parameter sind in 3.26 zusammengefasst.

Tabelle 3.26 Einfluss des Vernetzungssystems auf ausgewählte Eigenschaften

Einfluss des Vernetzungssystems	
Reaktionskinetik	Induktionszeit Aktivierungsenergie Vernetzungsgeschwindigkeit
Netzstellen	Vernetzungsdichte Chemische Struktur
Physikalische Eigenschaften	Spannungs-Verformungsverhalten Bleibende Verformung Dynamische Eigenschaften
Chemische Eigenschaften	Thermische Stabilität Chemische Beständigkeit

Silanisierungsreaktion (ohne Silanisierung, konventionelle Silanisierung oder *in-situ*-Silanisierung) die Flokkulation der Silika-Aggregate, die sich in einer deutlichen Zunahme des Speichermoduls G' manifestiert. Das Maß der sich dabei wieder einstellenden Füllstoff-Füllstoff-Wechselwirkungen kann anschließend durch die mittlerweile klassische Messung des Payne-Effektes [6.32, 6.33], also der Amplitudenabhängigkeit des Speichermoduls G' , mittels eines Amplitudenweeps zwischen 1 und 70% charakterisiert werden. Aus dem Anstieg von $G'(t)$ während des Flokkulationsschrittes können Aussagen zur Kinetik der Flokkulation abgeleitet werden. Prinzipiell ist damit auch rezepturspezifisch die Ableitung charakteristischer Konstanten als Qualitätsparameter möglich und dies auch bereits nach wesentlich kürzeren Flokkulationszeiten. Damit ließe sich der Prüfaufwand auf ca. 15 bis 20 Minuten reduzieren.

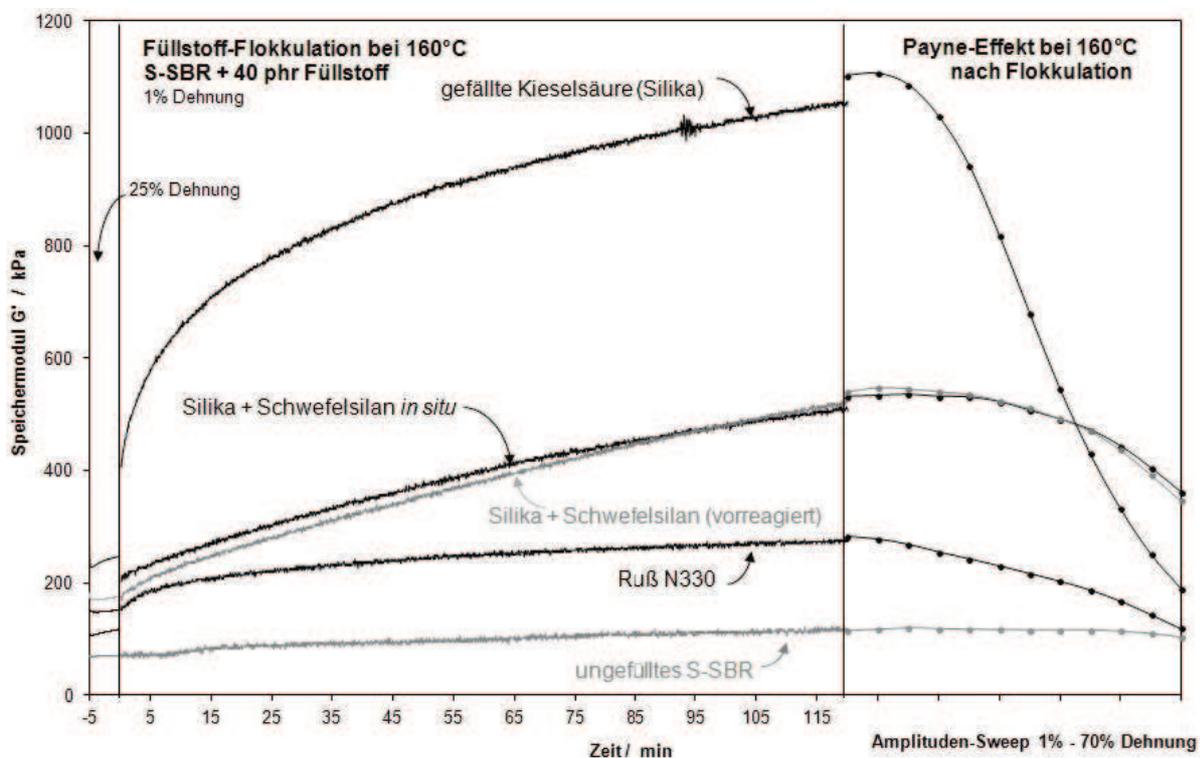


Bild 6.25 Flokkulationsuntersuchung und anschließender Amplituden-Sweep von mit 40 phr Silika gefülltem S-SBR, zusätzlich 40 phr Ruß N330 sowie ungefüllter S-SBR zum Vergleich, (nach [6.31], verändert)

6.6.1.4 Prozessfähigkeitscharakterisierung im Laborknetter

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass die zumindest qualitative Charakterisierung des Verarbeitungsverhaltens (vor allem von Rohkautschuken) auch in Labormessknetern mit spezifischen praxisnahen Rotorgeometrien erfolgen kann. Unter einschränkenden Randbedingungen kann der Knetter dabei als Kombination zweier benachbarter Coutte-Viskosimeter behandelt werden [6.34, 6.35]. Mittels geeigneter Approximationsmethoden können aus den Rotordrehzahlen und gemessenen Drehmomenten auch äquivalente Schubspannungen, Schergeschwin-

■ 6.7 Möglichkeiten der Simulation des Verarbeitungsprozesses und des Bauteilverhaltens in der Kautschuktechnologie

Edmund Haberstroh

Obwohl im vorliegenden Buch im Wesentlichen aus den physikalischen Grundgleichungen hergeleitete „Faustformeln“ für eine schnelle und orientierende Beantwortung verfahrenstechnischer Fragestellungen bereitgestellt werden, sollen an zwei typischen Beispielen die grundsätzlichen Möglichkeiten der Computersimulation für tiefer gehende Analysen aufgezeigt werden. Für die Durchführung entsprechender Berechnungen wird auf die zitierte Fachliteratur, sowie auf im Fachgebiet arbeitende Hochschulinstitute und Ingenieurbüros verwiesen.

Computersimulation zur Klärung verschiedenster Fragestellungen der Polymer-technologie ist bei der Produktentwicklung wie bei der Verfahrensentwicklung eine Selbstverständlichkeit geworden; dies gilt insbesondere für die Thermoplaste und die Faserverbundkunststoffe. In der Kautschuktechnologie ist Simulation begrenzt verbreitet. Das hängt auch damit zusammen, dass die Beschreibung der Werkstoffeigenschaften und des Vernetzungsprozesses eine besonders anspruchsvolle Aufgabe darstellt. Die Notwendigkeit der Modellierung sehr großer Verformungen sowie die Verknüpfung von chemischen Prozessen mit zeitlich veränderlichen Werkstoffeigenschaften der Elastomere führen zu Aufgabenstellungen von hoher Komplexität.

Häufig geht es darum, das Verhalten eines Bauteils unter Einsatzbedingungen oder Teilaspekte eines Fertigungsprozesses zu analysieren, schon bevor Prototypen zur Verfügung stehen bzw. bevor Messungen am realen Fertigungsprozess durchgeführt werden können. Im Folgenden wird anhand zweier relativ einfacher Beispiele die Anschaulichkeit von Simulationsergebnissen gezeigt, ohne dass auf die Randbedingungen und auf den Lösungsweg eingegangen wird. Es soll verdeutlicht werden, dass die Computersimulation typische Probleme der Kautschuktechnologie detailliert und dennoch übersichtlich darstellen kann. Das erste Beispiel behandelt die Heizphase beim Spritzgießen. Gezeigt werden die Dynamik des Temperaturfeldes in der Kavität eines Spritzgießwerkzeugs und der Verlauf des Vernetzungsprozesses über dem Querschnitt des Formteils. Das zweite Beispiel behandelt das Verformungsverhalten eines Gummi-Metall-Bauteils unter Last.

Für vertiefende Studien wird auf die Literatur [6.51 bis 6.53] verwiesen.

Als ein sehr einfaches Beispiel für ein Gummi-Metall-Bauteil mit Feder-Dämpfer-Funktion ist in Bild 6.31 ein Elastomerlager dargestellt, in dem der Wankstabilisator (Verbindungselement der gegenüberliegenden Radaufhängungen) eines Pkw an der Karosserie gelagert ist. Es soll hier nur die statische Belastung betrachtet werden. Die deutlich steiferen Metallkomponenten (Stabilisator-Welle, äußere Haltebügel, Aufstandsfläche) und die Kunststoffhülle werden bei der FE-Simulation als starr angenommen. Bild 6.32 zeigt die Verteilung der Dehnungen in der äußeren und in der inneren Gummispur. Die maximalen Dehnungen von 138% treten dort auf, wo die äußere Gummispur schon durch das Einspannen und zusätzlich noch durch die äußere Kraft stark komprimiert wird. Optimierungsziel kann hierbei sein, an dieser für das Versagen kritischen Stelle die Dehnung zu reduzieren.

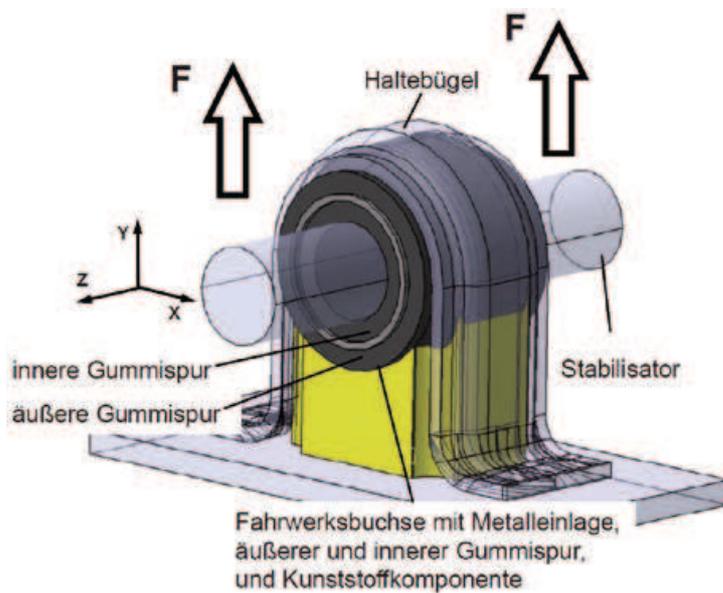


Bild 6.31
Zweischichtiges Elastomerlager
für einen Wankstabilisator

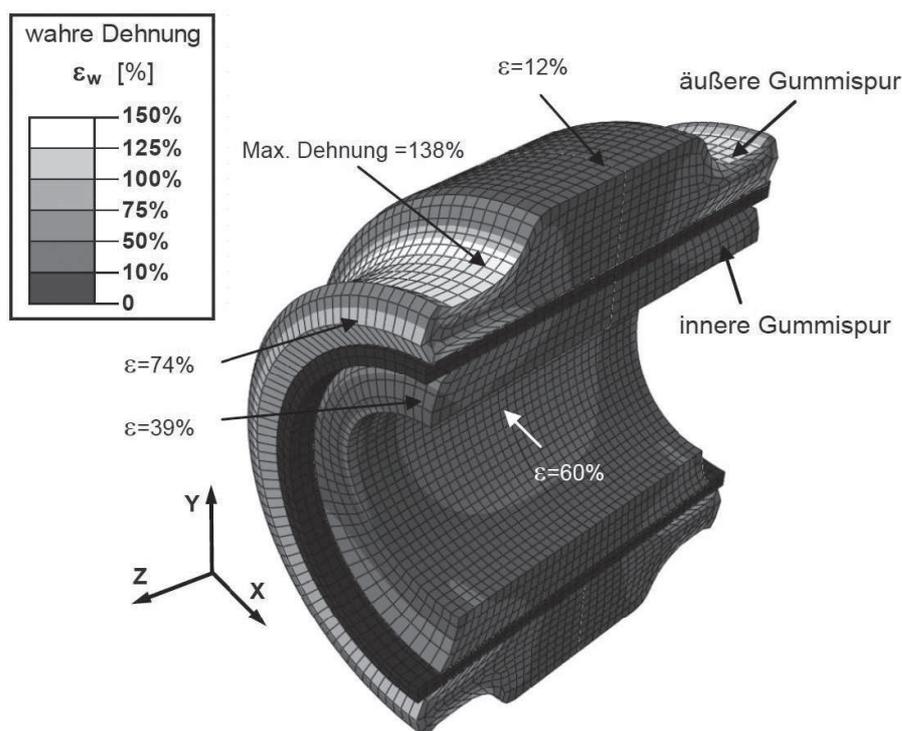


Bild 6.32
Finite-Elemente-
Analyse eines
Elastomerlagers
unter Radiallast

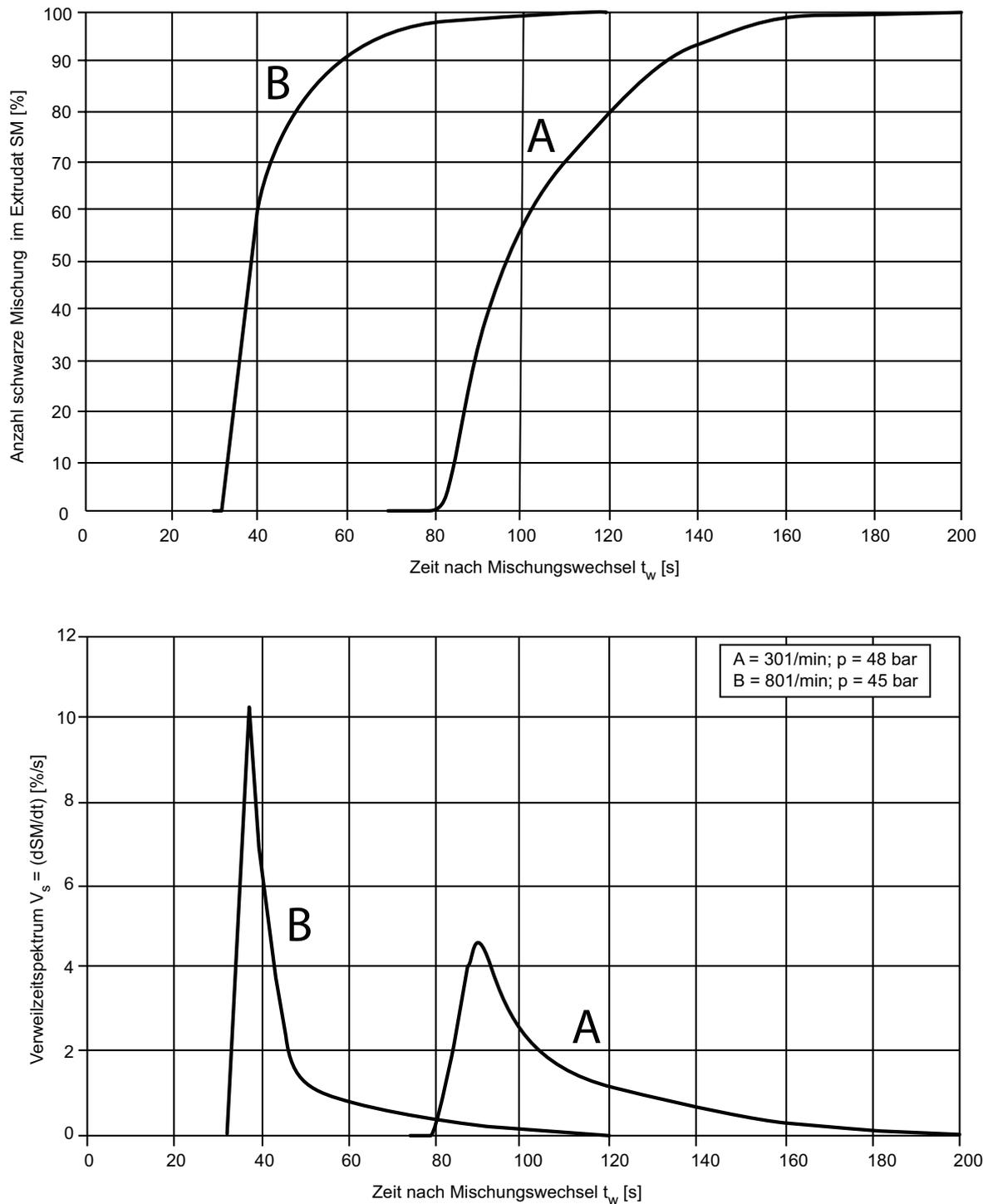


Bild 10.15 Verweilzeitspektren einer Zweistufen-Minderleistungsschnecke mit $D = 60$ mm, $H/D = 0,13$ bzw. $0,08$, $L/D = 12$, $\Phi = 12^\circ$ bzw. 14°

In Bild 10.16 sind außerdem gemessene mittlere Verweilzeiten für einige Extruder als Funktion des Volumendurchsatzes und des Schneckendurchmessers angegeben. Man erkennt das starke Absinken der Verweilzeit mit dem Durchsatz. Andererseits steigt die Verweilzeit bei konstantem Durchsatz stark mit dem Durchmesser an. Im Folgenden sollen die grundlegenden Abhängigkeiten der Extrudattemperatur von den wesentlichen Verfahrensparametern behandelt werden.

■ 13.6 Reifen – Anisotrope Verbundkörper

Gerhard De Vries

Reifen stellen mit Sicherheit in der Kautschukindustrie mengenmäßig den weitaus größten Anteil der Produkte, die durch den Begriff „anisotrope Verbundkörper“ gekennzeichnet werden können. Bevor man sich den Fertigungsprozessen zuwendet, ist es sicherlich sinnvoll zunächst eine Definition der wichtigsten Reifengruppen durchzuführen.

13.6.1 Reifengruppen

Entsprechend dem Reifenaufbau unterscheidet man zwischen

- Diagonalreifen und
- Radialreifen.

Diagonalreifen leiten sich vom Aufbau der Schläuche ab. Der Festigkeitsträger besteht aus mindestens zwei unter einem Winkel von 30 bis 40° gekreuzten Cordgewebelagen. Diagonalreifen sind einfacher herzustellen, erfüllen aber nicht mehr die Anforderungen, die heute an Kraftfahrzeugreifen gestellt werden. Die Verwendung beschränkt sich auf Karrenreifen, Industriereifen, Fahrradreifen und Reifen für landwirtschaftliche Geräte.

Radialreifen bestehen aus einer Karkasse und einem Gürtel, der in Umfangsrichtung angebracht ist und dadurch eine wesentlich bessere Stabilität im Kontakt mit der Fahrbahn bringt, als der Diagonalreifen. Die Festigkeitsträger der Karkasse verlaufen – wie der Name sagt – radial (90°) zur Umfangsrichtung. Der Festigkeitsträger der Karkasse besteht bei Pkw-Radialreifen aus Textilkorden, bei Lkw-Radialreifen aus Stahlkorden. Der Gürtel besteht aus mindestens zwei Stahlcordlagen, die im Winkel von 18 bis 22° gegenüber der Umfangsrichtung gekreuzt sind.

Bezüglich ihrer Verwendung lassen sich Reifen in folgende Haupt-Gruppen einteilen, die sich hinsichtlich ihrer Konstruktionsmerkmale zum Teil erheblich unterscheiden:

- Pkw-Reifen (PCR – Tires)
- Lkw-Reifen (TBR – Tires)
- OTR-Reifen (Off The Road – Tires)
- Reifen für Erdbewegungsmaschinen (EM-Reifen)
- Reifen für die Landwirtschaft (Farm Tires)
- MPT-Reifen (Multi Purpose – Tires)
- Kraftradreifen (Motorrad, Mofas, Roller)

- Minimierter Rollwiderstand (Energiesparen)
- Hohe Tragkraft
- Robustheit gegen Beschädigungen

Es ist niemals auch nur ansatzweise gelungen, diese Anforderungen mit einem isotropen Reifen ohne Festigkeitsträger (Verbundwerkstoffe) zu einem brauchbaren Kompromiss zusammenzubringen. Nur dadurch, dass bestimmte geforderte Eigenschaften von speziellen Bauteilen (Lauffläche, Gürtel, Karkasse) im Reifen übernommen werden, ist es möglich, Reifen herzustellen, die den oben erwähnten Anforderungen entsprechen. Diese speziellen Bauteile werden auf Reifenaufbaumaschinen zu einem kompletten Reifen konfektioniert. Daraus resultiert das aufwendige Produktionsverfahren für Reifen. Nach dem aktuellen Stand der Technik wird dabei mit Radialreifen das beste Ergebnis erzielt.

13.6.3 Aufbau eines Radialreifens

In Bild 13.1 ist der Aufbau eines Pkw-Radialreifens dargestellt. Für die Bauteile sind in der Reifenindustrie weltweit englische Bezeichnungen üblich. Daher sind die Bauteile in Bild 13.1 mit den englischen Begriffen gekennzeichnet und auf eine Übersetzung in Deutsch wurde verzichtet. Nachfolgend werden die Bauteile erläutert.

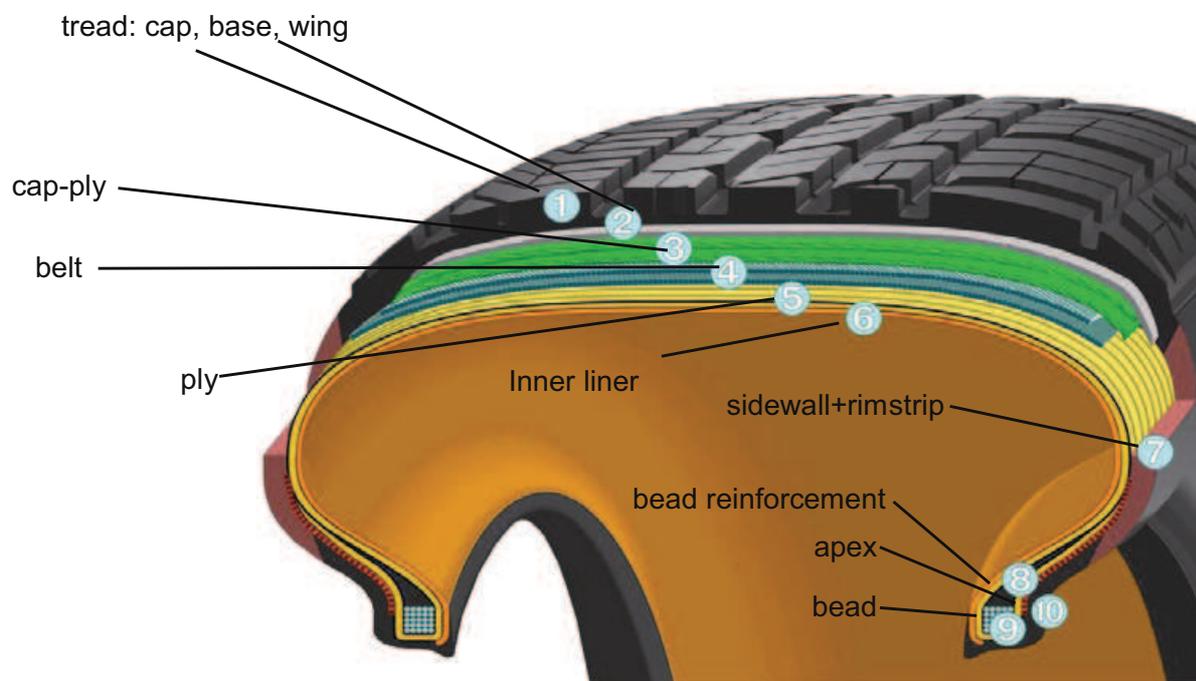


Bild 13.1 Aufbau eines Pkw-Radialreifens

1 Lauffläche (Tread)

Sie besteht bei einem Pkw-Radialreifen aus mindestens drei verschiedenen Komponenten (cap = Laufsteifen, base = Basis Laufflächenpolster, wing = Schul-

13.6.4 Reifenbauverfahren

Meist fertigen die Marktführer der Reifenindustrie ihre Reifenaufbaumaschinen selbst oder lassen sie exklusiv für sich fertigen. In den Reifenaufbaumaschinen und den zugehörigen Prozessen steckt ein Großteil des Kern-Know-hows der Firmen. Somit kann auch hier nicht auf die Details der Reifenaufbaumaschinen eingegangen werden, sondern es werden die allgemeinen Funktionsweisen und Prinzipien des Prozesses erläutert.

Grundsätzlich lässt sich der Aufbauprozess eines Radialreifens in zwei Fertigungsschritten aufteilen. Beide Verfahrensschritte können dabei sowohl auf einer Maschine erfolgen oder auf zwei räumlich getrennten Maschinen. Erfolgen beide Verfahrensschritte auf einer Maschine, spricht man von einem Einstufenprozess und im anderen Fall von einem Zweistufenprozess. An dieser Stelle sollte allerdings angemerkt werden, dass diese Begriffe etwas irreführend sind, denn auch wenn der komplette Aufbauprozess auf einer räumlich zusammenhängenden Maschine erfolgt, sind auch hier zwei Fertigungsschritte erforderlich.

13.6.4.1 Fertigungsschritt 1: Aufbau der Karkasse

Unabhängig davon, ob für die Reifenkonfektionierung eine Einstufen-Reifenaufbaumaschine oder eine Zweistufen-Reifenaufbaumaschine eingesetzt wird, beginnt der erste Fertigungsschritt mit dem Aufbau der Reifenkarkasse. In Bild 13.3 ist die Funktionsweise der ersten Stufe einer Zweistufen-Reifenaufbaumaschine schematisch dargestellt.

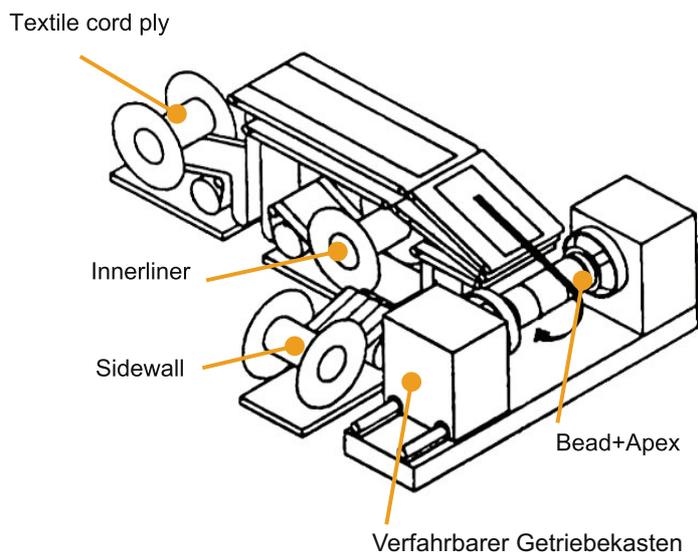


Bild 13.3

Schematische Darstellung der ersten Stufe einer Reifenaufbaumaschine

kombiniert werden? Den Messwerten aus dem Thermofühler im Sattel wird im Allgemeinen die größere Genauigkeit zugesprochen.

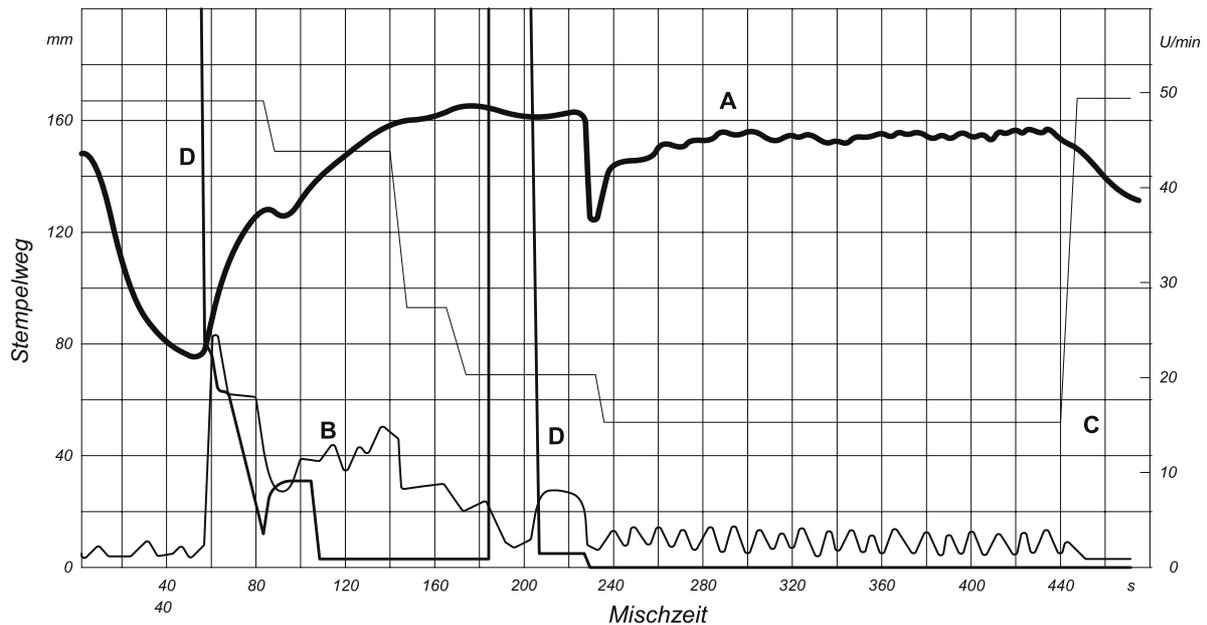


Bild 15.10 Mischersteuerung nach Temperaturbelastung unter Einhaltung eines Temperaturbandes (Silicamischung) am Beispiel eines GK320E; A Mischungstemperatur, B Leistung, C Rotordrehzahl, D Stempelweg (nach Siemens)

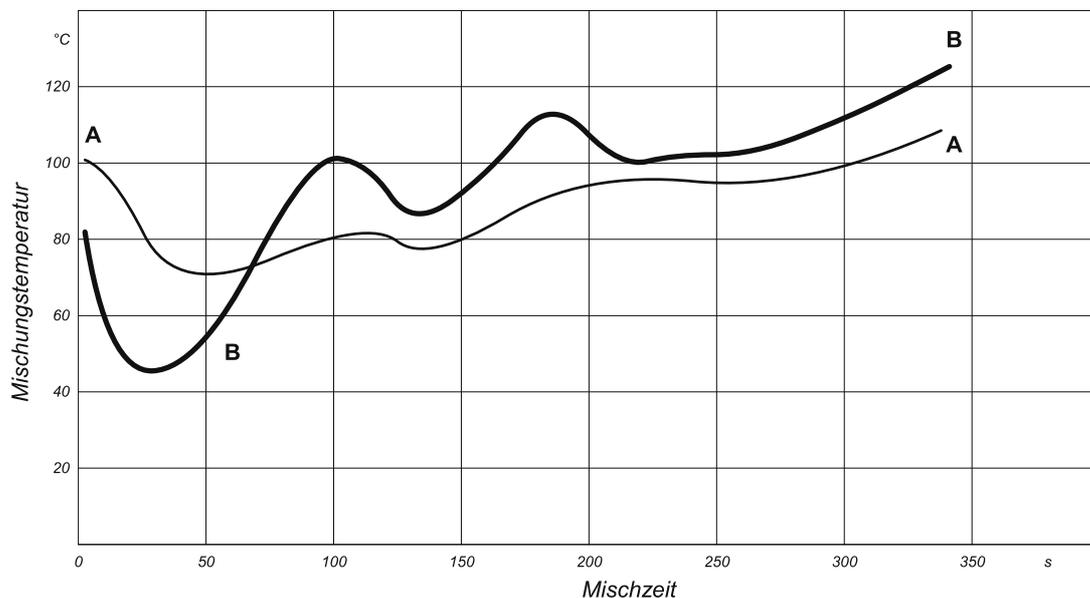


Bild 15.11 Temperaturmessungen im Innenmischer GK255N, ZZ2-Rotoren; A Temperaturfühler im Sattel, B Temperaturfühler in der Seitenwand

Beim *Fertigmischen* zeigen sich im Gegensatz zum Grundmischen bei den Zeit- und Überrollmarken die kleinsten Streuwerte, Bild 15.9. Es ist vorstellbar, dass bei hochbeschleunigten Fertigmischungen eine Steuerung nach Reaktionswertmarken unter Einhaltung von Temperaturgrenzen einer reinen Zeitsteuerung überlegen ist.

Da Prozessregelungen beim Mischen im hier definierten Sinn noch nicht standardmäßig verfügbar sind, können die relevanten Zielgrößen nur durch eine Messung

16

SPC – Prozess- überwachung und Produktbeurteilung

Mischa Lucyshyn

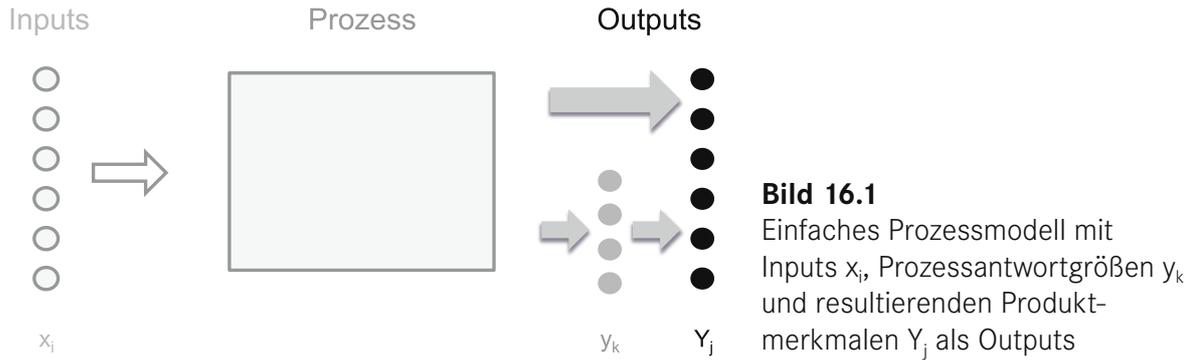
In der Kautschuktechnologie ist die statistische Prozessüberwachung (Statistical Process Control, SPC) immer wichtiger geworden, sodass ihr schon in den früheren Auflagen dieses Buches über Kautschuktechnologie ein Kapitel gewidmet war. Für diese Neuauflage wurde das Kapitel auf der Basis der von Henner Helmers in der ersten Auflage erarbeiteten Ausführungen durch Mischa Lucyshyn grundlegend überarbeitet und aktualisiert. Verschiedene in der ersten Auflage angeführte und vorwiegend manuelle Verfahren werden mittlerweile in der Regel durch eine Vielzahl am Markt verfügbarer Softwarepakete erledigt – ihre Beschreibung entfällt daher komplett.

Zudem existiert eine große Auswahl an Literatur zu diesem Thema, weshalb der Schwerpunkt dieser Überarbeitung auf die Vermittlung des Verständnisses der grundlegenden und für die meisten praktischen Fälle ausreichenden, unmittelbar einsetzbaren Funktionsweisen und Werkzeuge gelegt wird. Die Beispiele und Abbildungen wurden alle ausschließlich mithilfe von Microsoft Excel ausgearbeitet. Unter dem Weblink www.mlpqi.co.uk/MPQI-de/Beispiele.html kann die Datei mit allen verwendeten Daten und nötigen Excel-Befehlen bezogen werden, indem einfach auf das Coverbild des Buches geklickt wird.

■ 16.1 Das Prozessmodell

Wenn man von *statistischer Prozessüberwachung* spricht, ist es vorteilhaft, sich eine Vorstellung von dem Begriff *Prozess* zu machen, wie er der Idee von SPC zu Grunde liegt. Bild 16.1 zeigt ein einfaches Prozessmodell mit Eingängen (Input) und Resultaten (Output). Ein Prozess wird darin als System von definierten Aktionen interpretiert, im Zuge dessen verschiedene Inputs x_i zu den von Kunden gewünschten Resultaten Y_j verarbeitet werden.

Unter dem Begriff der Inputs werden sowohl Materialien und Informationen als auch diverse Prozessstellgrößen (wie z. B. Drücke, Temperaturen, Bearbeitungszeiten, Umschaltpunkte) zusammengefasst. In der Literatur verwendet man für diese



Gruppe an Inputs die Begriffe: Stell- oder Steuergrößen. Es handelt sich dabei um Größen, die von den Betreibern des Prozesses aktiv *gestaltet* oder eben *gesteuert* (controlled) werden. Daneben gibt es noch *ungesteuerte* (uncontrolled) Einflüsse (*Störgrößen*), die auch den Prozess *lenken* können. Die bekanntesten Störgrößen sind wohl die Umwelteinflussfaktoren, wie Lufttemperatur oder Luftfeuchte (sofern diese nicht im Rahmen einer Raumklimasteuerung auch zu gesteuerten Größen gemacht werden). Aber auch die durch den Menschen verursachten Faktoren, wie z. B. Ausbildung, Müdigkeit, Motivation sind dazuzuzählen.

Die Prozessresultate oder Outputs Y_j werden in den angeführten Beispielen technische Dimensionen (Länge, Breite, Dichte, Winkel, Festigkeiten) von Produkten sein. Diese Y_j sind jene Merkmale, die das von den Kunden gewünschte Produkt charakterisieren und die in der Regel mit Angabe von einem Zielwert und Toleranzgrenzen entweder direkt vom Kunden vorgegeben oder aber aus einer „Übersetzung“ eines Kundenwunsches in eine technische Spezifikation durch die zuständigen Produktentwicklungsteams entstanden sind. Eine vorgelagerte Gruppe von Prozess-Outputs y_k sind die Prozessantworten von Anlagen, wie etwa Massetemperatur oder Fließgeschwindigkeit, die einerseits eine Folge der gewählten (oder sich ergebenden) Inputgrößen sind und andererseits die am Produkt feststellbaren Resultate Y_j hervorrufen können.

Bei der Übertragung dieses Bildes auf die jeweils spezifische Realität einer Produktionsumgebung wird sehr rasch deutlich, dass es bei der Vielzahl von Einflussgrößen x_i kaum zu erwarten ist, dass die resultierenden Y_j von Produkt zu Produkt exakt dieselben Werte erreichen werden. Vielmehr werden die Resultate von Produkt zu Produkt schwanken, also einer Variation oder Streuung unterliegen.

Aus diesem Umstand ergeben sich drei für die Praxis relevante Fragen.

Die Frage nach der Prozessfähigkeit

Diese Frage: Wie gut kann der Prozess bzw. die Anlage mit ihren Inputs x_i die Kundenanforderungen erfüllen, ist die Frage nach der Fähigkeit eines Prozesses, die vorgegebenen Toleranzgrenzen einzuhalten (siehe Abschnitt 16.6 „Prozessfähigkeit“). Von einem Hersteller wird heute der lückenlose Nachweis erwartet, dass praktisch alle ausgelieferten Produkte die Spezifikation des Kunden in allen Punkten erfüllen.

■ 16.6 Prozessfähigkeit

Bevor die Frage nach der Fähigkeit eines Prozesses beantwortet werden kann, muss zunächst einmal festgestellt werden, ob überhaupt ein stabiler Prozess vorliegt. Ein instabiler Prozess kann durchaus auch als eine Folge sich unterscheidender, aber in sich stabiler Prozessabschnitte interpretiert werden, wie das bei den im Bild 16.9 dargestellten Werten möglich wäre. Die Bewertung der Prozessfähigkeit für instabile Prozesse ist aber nicht möglich. Die Behandlung dieses Abschnitts setzt also voraus, dass die Frage der Prozessstabilität bereits geklärt ist.

Unter Prozessfähigkeit versteht man die Fähigkeit eines Prozesses, die von Kunden gewünschten Spezifikationen einzuhalten. Wie schon bei der statistischen Charakterisierung von Prozessen in Abschnitt 16.4 „Statistische Charakterisierung von Prozessen“ werden auch zur Feststellung der Prozessfähigkeit Kennzahlen verwendet. Zur Beschreibung wurden zwei sogenannte Fähigkeitsindices entworfen, die sich auf die statistischen Kennzahlen zur Prozesscharakterisierung stützen und diese mit den Toleranzgrenzen verknüpfen.

Der erste Fähigkeitsindex wird mit C_p (*process capability*) oder *Prozessfähigkeit* bezeichnet. Er ist wie folgt definiert:

$$C_p = \frac{T}{6s} \quad (16.5)$$

mit $T = OTG - UTG$ und $s = s_g$, die globale Standardabweichung.

Der C_p -Wert wird umso größer sein, je größer die Toleranzbreite T (Abstand von oberer Toleranzgrenze zu unterer Toleranzgrenze) und je kleiner die Standardabweichung s ist. Die Standardabweichung ist ein Maß für die Prozessbreite. Der Fähigkeitsindex C_p vergleicht also die vom Kunden akzeptierte Toleranzbreite mit der vom Prozess gegebenen Prozessbreite.

Die Festlegung der Prozessbreite mit $6s$ hat mit der Annahme einer theoretischen Verteilung zur Modellierung der realen Prozessdaten zu tun. Unter der Voraussetzung, dass die gemessenen Werte – wenigstens annähernd – einer Normalverteilung entsprechend auf der Y-Achse verteilt sind, kann man die charakteristischen Eigenschaften der Normalverteilung nützen. Bei der Normalverteilung befinden sich 99,73% aller Werte in einem Bereich vom Mittelwert ausgehend von +/- drei Mal der Standardabweichungen. Auf dieser Strecke von $6s$ Breite ($3s$ links und $3s$ rechts vom Mittelwert) befindet sich fast der gesamte Prozess-Output (99,73%).

Entsprechend Gleichung 16.5 ist für den Fall, dass die Prozessbreite ($6s$) gleich der Toleranzbreite T ist, der Fähigkeitsfaktor $C_p = 1$. Das genügt nicht um die Kundenanforderungen mit Sicherheit erfüllen zu können, daher werden häufig C_p -Werte von 1.33 ($= 8s/6s$) oder 1.67 ($= 10s/6s$) gefordert. Das bedeutet, dass der Prozess von der Mittellinie noch vier bzw. fünf Standardabweichungen Platz bis zur nächsten

Toleranzgrenze hat. Der C_p -Wert berücksichtigt nur die Streuung des Prozesses, gibt aber keine Auskunft über die Lage des Prozesses im Toleranzfeld. Abweichungen vom Sollwert (Mittelwert) werden nicht angezeigt.

Um die Lage der Messwerte im Toleranzfeld zu berücksichtigen, wurde der C_{pk} -Index eingeführt, der auch die Mittelwertabweichung berücksichtigt. Er beschreibt den Abstand des Prozessmittelwertes zur nächstgelegenen Toleranzgrenze und ist als der kleinere der Werte den Gleichungen 16.6 und 16.7 definiert:

$$C_{pko} = \frac{(OTG - \bar{x})}{3s} \quad (16.6)$$

$$C_{pku} = \frac{(\bar{x} - TG)}{3s} \quad (16.7)$$

Durch die Ermittlung des C_{pk} -Wertes wird die Abweichung des Prozessmittelwertes vom Sollwert berücksichtigt. Sobald der Prozess sich von der Mitte in Richtung einer der beiden Toleranzgrenzen bewegt, reagiert der Zähler in der Definition des Fähigkeitsindex (das k steht für das japanische Wort *katayori*, was sich mit *Abweichung* übersetzen lässt). Der Nenner ist im Vergleich zum C_p -Wert halbiert, was sich daraus ergibt, dass die Abweichung der Prozessmitte vom Zielwert in einer Hälfte der Toleranzgrenze ($6/2 = 3$) liegt.

Der Wert $C_{pk} = 1$ bedeutet, dass keine Abweichung des Prozessmittelwertes vom Sollwert vorliegt. Eine Abweichung des Prozessmittelwertes vom Sollwert ist daran erkennbar, dass C_{pk} kleiner als C_p ($C_{pk} < C_p$) ist. Seitens der Kunden werden vielfach C_{pk} -Indices von 1,33 (+/-4s) gefordert, häufig in Verbindung mit einem C_p -Wert von 2,00 (+/-6s).

Beide Indices C_p und C_{pk} werden in handelsüblichen Softwarelösungen berechnet, sind aber ebenso einfach mit Excel-Berechnungen zu erhalten.

Der Vergleich der beiden Indizes erlaubt im Falle eines niedrigen C_{pk} -wertes eine rasche Einschätzung der möglichen Handlungsstrategien:

$C_{pk} < C_p > 1.00$ (oder je nach Anforderung $>1,33$ oder $>1,67$)

Der Prozess ist *nicht zentriert*. Durch Zentrieren bringt man den C_{pk} auf den Level von C_p .

$C_{pk} < C_p < 1.00$

Der Prozess ist *nicht zentriert* und weist der Prozess zusätzlich eine *zu große Streubreite* auf.

$C_{pk} = C_p < 1.00$

Der Prozess ist zwar *zentriert*, weist aber *zu hohe Streuung* auf.

17.8.3 Aufbau eines Hydraulikschlauchs

Der prinzipielle Aufbau eines Hydraulikschlauches ist in Bild 17.71 dargestellt. Hydraulikschläuche bestehen aus einer Seele, einem Verstärkungsmaterial, das als Druckträger wirkt und einer Decke. Ist der Schlauch aus mehreren Verstärkungslagen aufgebaut, werden diese durch eine Zwischenplatte voneinander getrennt.

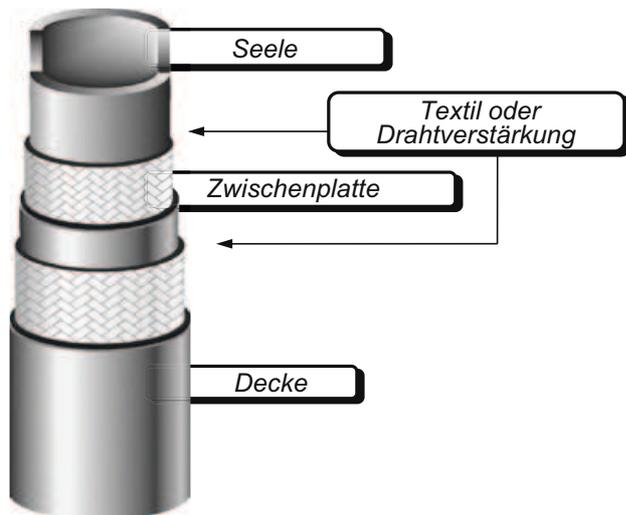


Bild 17.71

Prinzipieller Aufbau eines Hydraulikschlauches

Der Platzdruck eines Schlauchs wird durch Art und Aufbau der Festigkeitsträgerschicht und deren Durchmesser bestimmt. Er hängt von der Anzahl der Festigkeitsträgerlagen (zwei Lagen, vier Lagen), dem Winkel, mit dem die Stahldrähte aufgebracht sind und von der Drahtfestigkeit ab. Das Erreichen des vorgeschriebenen Betriebsdrucks stellt aber in keiner Weise sicher, dass der Schlauch auch den dynamischen Anforderungen gerecht wird. Hierzu bedarf es eines optimierten Produktdesigns und eines abgestimmten Schlaucharmatursystems. Dies ist auch im Lichte immer engerer Biegeradien und höheren Systemdrücken von großer Wichtigkeit.

Die Produkteigenschaften der Schläuche werden einerseits durch die für Seele, Decke und Zwischenplatte verwendeten Elastomerwerkstoffe und andererseits durch den Aufbau der Verstärkungslagen (Drahtanzahl, Drahtanordnung und Drahtfestigkeiten) bestimmt. Bei der Auswahl des Elastomerwerkstoffs für die Seele ist die Hydraulikölbeständigkeit das wichtigste Kriterium. Für die Decke muss der Elastomerwerkstoff den Beanspruchungen durch die von außen einwirkenden Medien (Wasser, Treibstoffe, Mineralöle, Chemikalien) und Belastungen (Witterung, Temperatur, Abrieb, Flammwidrigkeit und andere mehr) entsprechen.

Die Verbesserung der dynamischen Eigenschaften erfolgt durch die Optimierung der Drahteigenschaften, sowie der konstruktiv bedingten Verminderung der Beanspruchung der Elastomerschicht zwischen den Drähten. Die Wechselwirkung zwischen Gummi und Draht, sowie der Einfluss des Biegeradius auf die mechanischen Zustände des Gummis bestimmen dabei sein dynamisches Pulsationsverhalten. Zusätzlich wird die Materialentwicklung der Seele dahingehend weiterge-

■ 19.2 Umwelt- und Arbeitsschutzaspekte von Rohmaterialien

Compounding und Herstellung von Gummiwaren bedeuten auch Umgang mit chemischen Stoffen, Anfall von Neben- und Reaktionsprodukten, Umgang mit Fabrikationshilfsmitteln und letztlich auch den Umgang mit Gummiabfällen [19.1 bis 19.7]. Die Grundlage für eine erfolgreiche Bewältigung der Umwelt-, aber auch der Arbeitsplatzproblematik liegt in einer genauen Charakterisierung der Stoffe nach ihren Eigenschaften, nach der Einsatzart und nach deren Toxikologie. Eine solche Stoffinformation ist gleichermaßen bedeutend für die Grundstoffindustrie, die Gruppe der Weiterverarbeiter, aber auch die zuständigen Regierungsstellen und Aufsichtsbehörden.

19.2.1 Gesetzliche Vorgaben

Die *REACH-Verordnung* (EG) Nr. 1907/2006 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18. Dezember 2006 [19.8] zentralisiert und vereinfacht das Chemikalienrecht in der Europäischen Union und ist am 01. Juni 2007 in Kraft getreten. REACH steht für Registration, Evaluation, Authorisation of Chemicals (Registrierung, Bewertung und Zulassung von Chemikalien). Diese Verordnung löst u. a. das Altstoffverfahren nach der EU-Altstoffverordnung ab.

Schwerpunkt der REACH-Verordnung ist eine allgemeine Registrierungspflicht für alle in der EU hergestellten oder eingeführten Stoffe bei der Europäischen Chemikalienagentur (ECHA). Die Registrierungsfristen waren bzw. sind wie folgt:

1. Registrierungsphase endete am 01.12.2010 → Stoffe ab 1000 t/a, umweltgefährliche Stoffe ab 100 t/a, CMR-Stoffe (Kat. 1 + 2) ab 1 t/a
2. Registrierungsphase bis 01.06.2013 → Stoffe ab 100 t/a
3. Registrierungsphase bis 01.06.2018 → Stoffe ab 1 t/a

Nach Ablauf der Registrierungsfrist dürfen die entsprechenden Stoffe ohne vorherige Registrierung nicht hergestellt oder importiert werden: „*no data - no market*“.

Verschiedene Naturstoffe müssen nicht registriert werden, hierunter fällt auch Naturkautschuk. Polymere müssen nicht registriert werden, stattdessen aber die entsprechenden Monomere, auch wenn die Herstellung außerhalb der EU erfolgt und nur das Polymer in die EU importiert wird.

Weiterhin erfolgt eine Bewertung dieser Stoffe durch die Mitgliedstaaten der EU und die weitergehende Regulierung bestimmter gefährlicher Stoffe. Diese werden entweder in bestimmten Anwendungen beschränkt (Anhang XVII der Verordnung, z. B. Eintrag 50: Verbot von hocharomatischen Weichmacherölen für die Herstellung von

Reifen) oder einem neuen europäischen Zulassungsverfahren (Anhang XIV der Verordnung) unterworfen.

Der Ablauf im Zulassungsverfahren ist wie folgt [19.9]:

Ein Mitgliedstaat oder eine Agentur erstellt ein Dossier über besonders besorgniserregende Stoffe „*Substances of very high concern*“ (SVHC). Anschließend erfolgen Vorschläge zur Aufnahme von in Frage kommender Stoffe in die sogenannte Kandidatenliste.

Sobald ein Stoff auf der Kandidatenliste steht, muss der Hersteller seinen Kunden bei Vorhandensein des Stoffes in Produkten in einer Menge von mehr als 0,1 Gew.% von sich aus informieren.

Anschließend erfolgen Vorschläge zur Übernahme entsprechender Stoffe in den Anhang XIV der REACH-Verordnung. Sobald ein Stoff in Anhang XIV aufgenommen ist, darf er nach einer Übergangsfrist ohne Zulassung nicht mehr hergestellt oder verwendet werden. Dabei gelten folgende Fristen:

Application Date – Letzter Tag an dem eine Zulassung beantragt werden kann – 18 Monate vor *Sunset Date*.

Sunset Date – Letzter Tag an dem der Stoff ohne Zulassung genutzt oder hergestellt werden darf.

Im Sinne von REACH sind *Hersteller von Elastomererzeugnissen* überwiegend als nachgeschaltete Anwender von Stoffen (downstream user) zu betrachten.

In den EU-Mitgliedstaaten koordinieren zuständige Behörden die Aufgaben der Mitgliedstaaten nach dieser Verordnung. Sie wirken mit bei Stoffbewertungen, Beschränkungs- und Zulassungsverfahren sowie bei den neuen Ausschüssen der ECHA (z. B. Ausschuss der Mitgliedstaaten – MSC). Sie führt bei den oben genannten REACH-Verfahren die fachliche Bewertung der Stoffidentität und der physikalisch-chemischen Eigenschaften durch. Nationale Auskunftsstellen informieren und beraten die von REACH betroffenen Unternehmen.

Für Deutschland wurde mit der Änderung des Chemikaliengesetzes (ChemG) vom 02.07.2008 die BAuA, Bundesstelle für Chemikalien, per Gesetz als zuständige Behörde und nationale Auskunftsstelle zur Durchführung der REACH-Verordnung benannt.

Für die Erstellung von allgemeinen Expositionsszenarien als Bestandteil der Registrierungs dossiers stellen im Auftrag der Mitgliedsfirmen der europäische Verband (European Tyre and Rubber Manufacturers' Association ETRMA, www.etrma.org) bzw. nationale Verbände (für Deutschland der Wirtschaftsverband der deutschen Kautschukindustrie WdK, www.wdk.de) den Stoffherstellern entsprechende Daten zur Verfügung.

■ 18.2 Recycling vulkanisierter Abfälle und/oder Produkte

Vulkanisierte Abfälle und gebrauchte Elastomerprodukte insbesondere aus Altfahrzeugen müssen entsorgt werden. Dies ist ein großer Nachteil vernetzter Elastomere gegenüber thermoplastischen Kunststoffen, die wieder aufbereitet, aufgeschmolzen und verarbeitet werden können, siehe hierzu auch Abschnitt 19.5 „Entsorgung gebrauchter Produkte“.

Die *Automobilindustrie* verstärkt die Bemühungen, den hohen Anteil an Thermoplasten und Elastomeren durch Demontage und Materialrecycling zu verwerten, Bild 18.2 und [18.1]. In diese Bemühungen werden die Zulieferer verstärkt eingebunden:

- Verringerung der Polymervielfalt,
- Verringerung der Mischungsvielfalt,
- Verringerung der Produktionsabfälle,
- Vermeidung von Gefahrstoffen in den Mischungen,
- Ersatz schwer zu entsorgender Polymere durch andere Werkstoffe, z. B. CR durch TPE,
- Vermeiden von Verbundteilen wo immer möglich,
- Zerlegbarkeit von Bauteilen zur Werkstofftrennung,
- Einführung einer Werkstoffkennzeichnung.

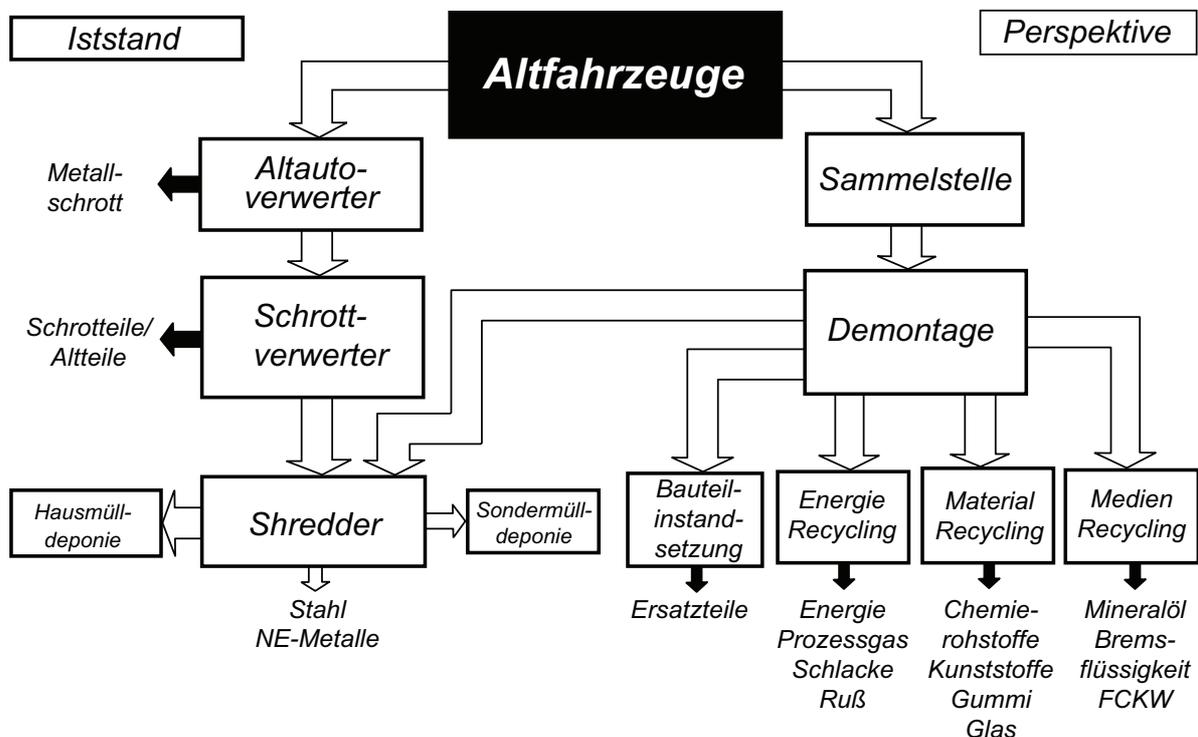


Bild 18.2 Altfahrzeugentsorgung: Ist-Stand 1991 und Perspektive (nach [18.1])