

2. Herstellung von Kautschukmischungen

Die in den weiteren Ausführungen benutzten Begriffe wie Kautschuk, Elastomer oder Gummi sollen einleitend definiert werden:

Kautschuk ist nach DIN 53501 ein unvernetztes, aber vernetzbares Polymer, dessen Glasübergangstemperatur unter 0 °C, und damit unter der Gebrauchstemperatur liegt. Kautschuke können bei höheren Temperaturen und dem Einfluss von deformierenden Kräften formgebend verarbeitet werden. Durch irreversible, weitmaschige Vernetzung, auch als Vulkanisation bezeichnet, werden Kautschuke zu Elastomeren, die sich im Bereich der Gebrauchstemperatur entropieelastisch (gummielastisch) verhalten. Weiterhin werden für Elastomere synonyme Begriffe wie Vulkanisat oder Gummi verwendet [31-33].

Die Hersteller von Elastomerbauteilen, speziell im Bereich der Reifenfertigung, erzeugen die zu verarbeitenden Kautschukmischungen in ihren Betrieben selbst.

Aufgrund der unterschiedlichen Stoffeigenschaften der zugegebenen Mischungsbestandteile sind die dabei ablaufenden Mischvorgänge hoch komplex.

Die Bestandteile von Kautschukmischungen lassen sich in 4 Komponentengruppen zusammenfassen [32, 33]:

- Kautschuke
- Füllstoffe
- Weichmacher
- Chemikalien

Der in einer Rezeptur verwendete **Kautschuk** bestimmt die Grundeigenschaften des Elastomer-Werkstoffs wie Alterungsbeständigkeit, Kälteflexibilität, Verhalten gegenüber verschiedenen Medien, und das Niveau der mechanischen Eigenschaften wie z. B. Festigkeit und Elastizität [32-34].

Die Klassifizierung und Bezeichnung der Kautschuke erfolgt nach DIN/ISO 1629. Angaben zum Herstellungsverfahren sind der Abkürzung des Kautschuks vorangestellt. Dabei bedeutet E= Emulsionspolymerisat und L= Lösungspolymerisat.

Wichtige Kautschuke sind dabei u. a.:

- NR Isopren-Kautschuk (Naturkautschuk)
- E-SBR Styrol-Butadien-Kautschuk
- BR Butadien-Kautschuk
- NBR Acrylnitril-Butadien-Kautschuk
- CR Chloropren-Kautschuk
- EPDM Ethylen-Propylen-Kautschuk

Kautschuke liegen zu Beginn der Verarbeitung als Feststoff bzw. unterkühlte Schmelze, in der Regel in Form von Ballen vor.

Füllstoffe werden in aktive und inaktive Füllstoffe unterteilt [33]. Aktive oder verstärkende Füllstoffe sind spezielle, standardisierte Ruße und Kieselsäuren. Die eingemischten Füllstoffe verbessern durch die Anbindung der Kautschukmoleküle an die Oberfläche der Füllstoffe (Bound Rubber) die mechanischen Eigenschaften der Elastomere wie Festigkeit, Abriebbeständigkeit und Einreißwiderstand [35]. Inaktive Füllstoffe, wie Kreide oder Kaoline, dienen in erster Linie als billige Streckmittel, und bewirken keine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften des Kautschuks.

Ruße, Kreiden oder Kieselsäuren verändern die strukturviskosen Fließeigenschaften des Kautschuks stark.

Die als Überstrukturen vorliegenden Füllstoffe, z. B. Rußagglomerate müssen während des Mischens zerteilt, in den Kautschuk inkorporiert und gleichmäßig verteilt werden. Auf das Mischen von Polymeren mit Füllstoffen wird in Kapitel 2.2.2. ausführlich eingegangen.

Weichmacher [33, 36] stellen die flüssige Komponente im Gummi dar, und dienen der Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften, wie z. B. der Viskosität, und der Vulkanisateigenschaften, wie z. B. der Härte. Gleichzeitig werden die Mischungen durch Einsatz von Weichmachern kostengünstiger. Als Weichmacher werden kostengünstige Mineralöle sowie eine Reihe synthetischer Produkte verwendet.

In der Regel liegen die Weichmacher als mittel- bis niedrigviskose Flüssigkeiten oder Pasten vor, die während des Mischens in der Kautschukmatrix verteilt werden.

Chemikalien bestimmen und beeinflussen in ihrer Vielfalt die End Eigenschaften der Vulkanisate. Zu diesen Mischungsbestandteilen gehören u. a. Mastikationsmittel, Verarbeitungshilfsmittel, Haftmittel, Alterungsschutzmittel und Vernetzungschemikalien [33]. Die verschiedenen Chemikalien werden in Form von Pulver, Granulaten und Chips bis hin zu pastösen Massen oder Flüssigkeiten angeboten.

Da speziell die Vernetzungschemikalien temperaturempfindlich sind, und nur in kleinen Mengen der Mischung zugegeben werden, muss die Verwiege- und Dosiergenauigkeit hoch sein, und die Einarbeitung dieser Chemikalien in festgelegten Temperaturbereichen erfolgen [37-40].

In Tabelle 2-1 sind die einzelnen Bestandteile von Kautschukmischungen und die Größenordnungen der Zugabemengen an der Gesamt Rezeptur dargestellt. Ein theoretisches Mischungsrezept wird immer auf 100 Massenteile Gesamtkautschuk bezogen. Daher resultiert die in der Gummiindustrie gebräuchliche Bezeichnung phr (parts per hundred rubber), die für die Massenanteile der einzelnen Mischungsbestandteile steht [34, 41].

Tabelle 2-1 Bestandteile einer Kautschukmischung und ihre möglichen Anteile an der Gesamt Rezeptur

Mischungsbestandteil		Anteil in phr
• Kautschuk		100
• Füllstoffe		0-250
• Weichmacher		0-250
Chemikalien	Alterungsschutzmittel, etc.	0-10
	Verarbeitungshilfsmittel	0-10
	Farbstoffe, Treibmittel, etc.	0-10
	Aktivatoren	2-10
	Vernetzungsmittel	1-5
	• Vulkanisationsbeschleuniger	0-5
	Vulkanisationsverzögerer	0-2

Die Verfahren zur Herstellung von Kautschukmischungen lassen sich prinzipiell unterteilen in [38]:

- **diskontinuierliche**, chargenweise arbeitende Verfahren auf Walzwerken und in Innemischern und
- **kontinuierliche** Verfahren in Mischextrudern.

2.1. Diskontinuierliche Verfahren

2.1.1. Herstellung auf dem Walzwerk

Die Herstellung von Kautschukmischungen auf dem Walzwerk wurde in den Anfangsjahren der Kautschukindustrie im ersten Drittel des letzten Jahrhunderts durchgeführt [38, 42, 43]. Bei einer entsprechenden Arbeitsweise des Bedienungspersonals ist das Walzwerk ein sehr gutes und vielseitiges Misch- und Homogenisierungsaggregat, das jedoch aufgrund des offenen Verfahrens nur noch in speziellen Anwendungsfällen zum Mischen eingesetzt wird, und heute hauptsächlich als Folgemaschinen unter Innenmischern eine Bedeutung hat.

Mit zunehmender Anzahl von Kautschukprodukten unterschiedlichster Rezepturen in Verbindung mit steigenden Ausstoßmengen pro Zyklus wurde das Walzwerk durch Innenmischer mit geschlossener Mischkammer zur Herstellung von Kautschukmischungen abgelöst [38, 42, 43].

2.1.2. Herstellung im Innenmischer

Das in Bild 2-1 dargestellte Fließschema zeigt die Herstellung von Kautschukmischungen im Innenmischer mit den Komponenten Lagerung, Dosierung, Mischungsherstellung und Weiterverarbeitung. Dieser Aufbau erlaubt ein schnelles Umrüsten bei einem Mischungswechsel, und ist häufig in der Gummiindustrie zu finden [43].

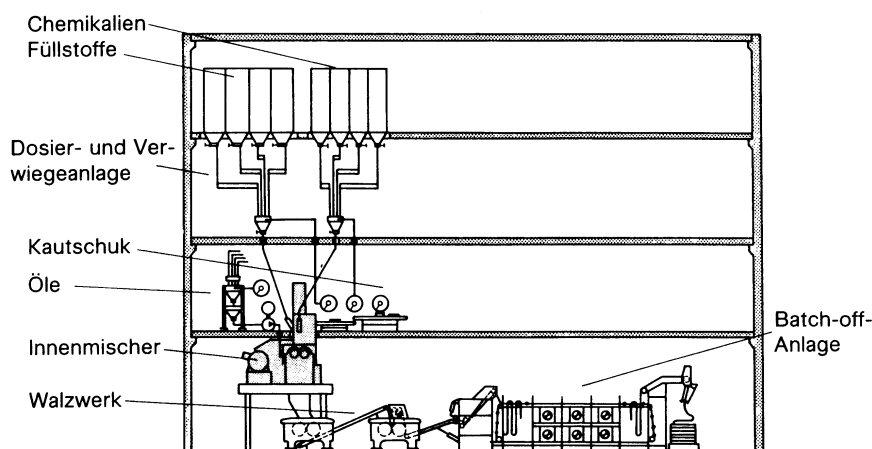


Bild 2-1 Schema des diskontinuierlichen Herstellungsverfahrens: Innenmischer, Walze, Batch-Off-Anlage [43]

Das zentrale Aggregat dieser Mischanlage ist der Innenmischer, in den die Mischungsbestandteile Kautschuk, Füllstoff, Weichmacher und Chemikalien manuell oder vollautomatisch über Dosier- und Verwiegeanlagen eingegeben werden. Die Arbeitsweise des Innenmischers ist aufgrund der geschlossenen Mischkammer diskontinuierlich, d.h., wenn eine Charge fertig gemischt ist, wird sie auf ein Walzwerk ausgestoßen und der Innenmischer für einen neuen Zyklus wieder befüllt.

Die Mischung wird auf dem Walzwerk homogenisiert und abgekühlt. Je nach Weiterverarbeitung werden die sich auf der Walze bildenden Mischungsfelle als Platten abgenommen oder in Endlosstreifen geschnitten, und einer Fellkühlanlage (Batch-Off-Anlage) zugeführt. In dieser Anlage werden die Streifen endgültig abgekühlt und zur weiteren Lagerung mit Trennmittel behandelt.

2.1.2.1. Konstruktive Merkmale des Innenmischers

Der Innenmischer (Bild 2-2), oder auch Stempelknetzer, ist aus einer durch den Stempel und den Klappsattel geschlossenen temperierbaren Mischkammer aufgebaut. Die Mischleistung wird durch zwei Knetschaufeln (Rotoren) erbracht, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Rotorgeometrien in tangierende und ineinandergreifende Rotoren unterteilt werden.

Der Vorteil des ineinandergreifenden Rotorsystems liegt in der höheren Einbringung von Scherkräften und damit deutlich besserer dispersiver Mischwirkung als bei vergleichbaren tangierenden Systemen [38, 43].

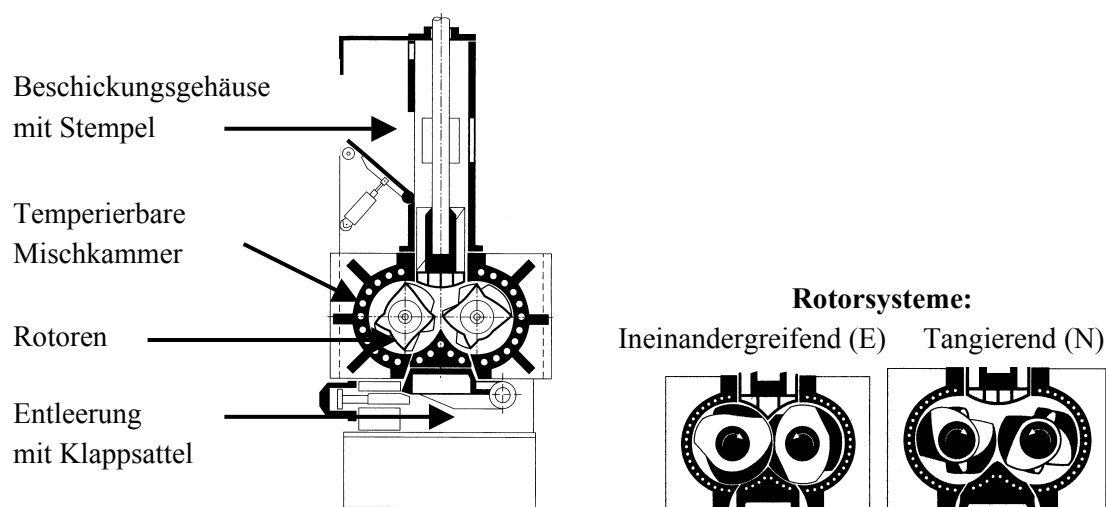


Bild 2-2

Prinzipische Skizze eines Innenmischers und Rotorsysteme

Die Baugrößen von Betriebsmischern sind Mischkammervolumen von 40 l bis zu Großknetern mit Mischkammervolumen von 700 l. Hiermit werden Chargengewichte von über 500 kg im Mischbetrieb von Reifenwerken erreicht.

Aufgrund der hohen benötigten Misch- und Scherwirkung liegen die erforderlichen Antriebsleistungen bei 6-10 kW je kg Mischung mit einer mittleren Dichte von 1,2 g/cm³ [43].

2.1.2.2. Mischungsherstellung

Speziell bei Mischungen mit hohen Füllstoffgehalten werden während des Mischvorgangs sehr hohe Temperaturen im Bereich von 140 °C bis 170 °C erreicht. Diese hohen Temperaturen lassen eine Zugabe der Vernetzungschemikalien wie Beschleuniger, Peroxide und Vulkanisierharze aufgrund ihrer Temperaturempfindlichkeit nicht zu. Für diese Mischungen wird eine zweite Mischstufe auf dem Walzwerk oder im Innenmischer nachgeschaltet. In dieser werden Temperaturen oberhalb 120 °C vermieden [33, 37, 38]. Diese zwei Stufen werden *Grundmischen* und *Fertigmischen* genannt.

Bei NR-Mischungen ist der Grundmischstufe evtl. eine *Mastikation* vorgeschaltet. Als Mastikation wird eine Molekulargewichtsreduzierung bezeichnet, die auf dem Walzwerk oder im Innenmischer, auch unter Zugabe von Abbauhilfsmitteln, zur Reduzierung der Viskosität durchgeführt wird.

Grundsätzlich wird das Grundmischen in 4 Schritten durchgeführt:

- Zerkleinerung des als Ballen zugeführten Kautschuks
- Einarbeiten von Füllstoffen und Weichmacher
- Zerteilung der Füllstoffagglomerate durch dispersives Mischen
- Verteilung der zerkleinerten Füllstoffe in der Kautschukmatrix

Der Ablauf des Grundmischprozesses bestimmt die Qualität des Gesamtverfahrens, da in diesem Verarbeitungsschritt das Maximum der Füllstoffdispersion erreicht werden muss.

Der spezifische Energieeintrag, der sich u.a. aus der Rotordrehzahl, dem Füllgrad und der Kammertemperatur ergibt, ist während des Mischens qualitätsbestimmend. In Bild 2-3 ist die eingetragene Energie als Funktion der Zeit dargestellt.

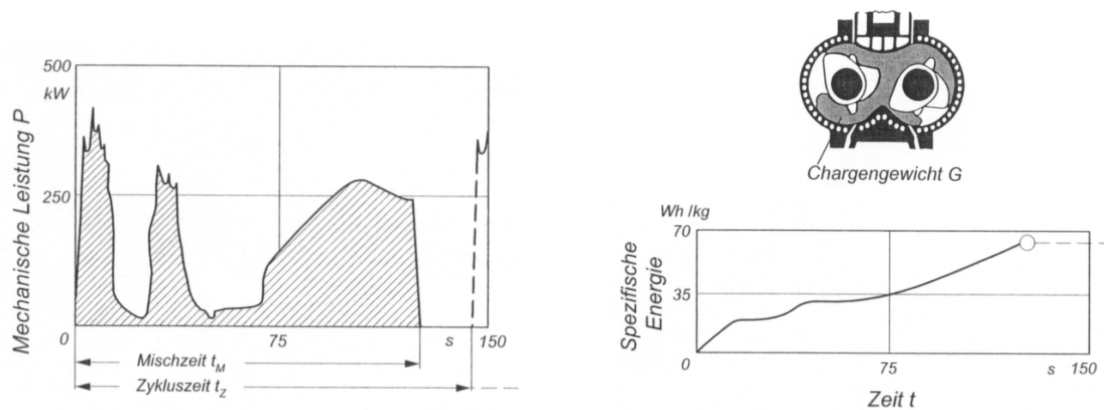


Bild 2-3 Spezifischer Energieeintrag bei der Mischungsherstellung im Innenmischer [38]

Der spezifische Energieeintrag e (Gleichung 2-1) ist als Leistungs-Zeit Integral definiert, und beinhaltet die gesamte mechanische Leistung P , die während der Mischzeit t_M über die Rotoren in die Mischung eingebracht wird.

$$e = \frac{1}{G} \int_{t=0}^{t_M} P \cdot dt \quad (2-1)$$

Der Durchsatz \dot{G} (Gleichung 2-2) bei der Mischungsherstellung im Innenmischer berechnet sich aus dem Chargengewicht G und der Zykluszeit t_Z , die sich aus der Mischzeit und der Zeit zum Entleeren, Abkühlen und Befüllen ergibt.

$$\dot{G} = \frac{G}{t_Z} \quad (2-2)$$

Die Herstellung der Fertigmischung kann innerhalb des Gesamtprozesses der Mischungsherstellung an verschiedenen Zeitpunkten stattfinden [33, 38, 43].

Das sogenannte **Einstufenverfahren** beinhaltet alle Abläufe, bei denen die Vernetzungschemikalien der Grundmischung ohne Abkühlung der Grundmischung auf Raumtemperatur und Zwischenlagerung über mehrere Stunden oder Tage zugegeben werden.

Zu diesem Bereich zählt z. B. das Gleichgewichtstemperaturmischen, in dem die Grundmischung bei hohen Drehzahlen und hohen Temperaturen hergestellt wird.

Mit einer anschließenden Erniedrigung der Drehzahl wird ein Temperaturniveau erreicht, in dem die Vernetzungschemikalien kurz vor dem Auswerfen zudosiert und eingemischt werden können.

Diese Art der Mischungsherstellung ist nur auf kleine Mischer beschränkt, da zur Temperaturabsenkung ein hohes Oberflächen- zu Volumenverhältnis benötigt wird.

Eine Alternative ist das in Bild 2-4 dargestellte Tandem-Mischverfahren, das durch einen Stempelknetter und einen darunter befindlichen stempellosen Knetter mit größerer Mischkammer gekennzeichnet ist. Die im Grundmischer erzeugte Mischung fällt direkt in den größeren Tandemmischer. Durch die größere Kühlfläche und niedrigere Drehzahl wird die Mischung auf ca. 100 °C abgekühlt. Nach etwa 50-70 % der Zykluszeit können die Vernetzungschemikalien in den Tandemmischer eingegeben werden [38].

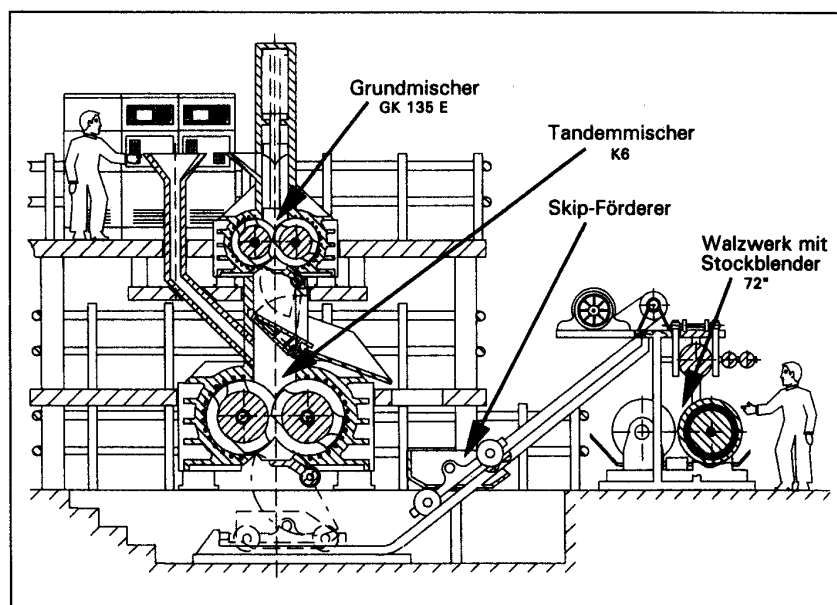


Bild 2-4 Tandem-Mischverfahren zur Herstellung einer Fertigmischung [44]

Das **Zweistufenverfahren** wird für Mischungen mit hohen Füllstoffanteilen, kleinen Weichmachermengen oder hochaktivem Ruß angewandt. Die Grundmischung wird nach dem Ausformen über mehrere Stunden zwischengelagert und abgekühlt, und dem Innenmischer in der Fertigmischstufe noch einmal zusammen mit den Vernetzungschemikalien zugeführt.

Hoch gefüllte Kautschukmischungen werden zum Teil einem sogenannten *Nachzwicken* unterworfen, bei dem die Mischungsviskosität nach dem Grundmischen in einem separaten Mischgang verbessert wird.

Die gesamte Mischungsherstellung erfolgt in diesem Fall im **Dreistufenverfahren**.

Ein weiteres Beispiel für ein Dreistufenverfahren ist die technisch sehr aufwendige Herstellung kieselsäurehaltiger Mischungen.

Das 1992 von einem großen Reifenhersteller eingeführte sogenannte "Grüne Reifen-Konzept" [45] mit einer hochgefüllten PKW- Laufflächenmischung basierend auf L-SBR, BR, hochaktiver Kieselsäure und einem bifunktionellen Organosilan als Kopplungsmittel (Si 69) führte zur Reduzierung des Rollwiderstandes und Verbesserung der Nassrutsch- und Wintereigenschaften.

Aufgrund der freien OH-Gruppen auf der Kieselsäureoberfläche und den damit hohen Bindungskräften zwischen den Partikeln und der Unverträglichkeit von Kieselsäure und Kautschuk müssen Silane verwendet werden, die die Dispergierbarkeit der Kieselsäure verbessern, und die unverträglichen Phasen (Kieselsäure und Kautschuk) über kovalente Bindungen miteinander verknüpfen [46].

Wird die Silanisierung während des Mischprozesses (in situ) durchgeführt, dient der Innenmischer als chemischer Reaktor. Die Reaktion startet ab ca. 130 °C, verläuft in einem Temperaturbereich von 140-150 °C und benötigt eine Reaktionszeit von 3-4 Minuten. Da sich der benötigte Temperaturbereich erst in den letzten 2 Minuten der ersten Mischstufe einstellt, erfolgt die Herstellung der Grundmischung 2 stufig. In beiden Mischstufen wird Ethanol frei.

Je nach eingesetztem Silantyp kann bereits ab 160 °C (Si 69) eine unerwünschte Vorvernetzung während des Mischprozesses erfolgen. Aus diesem Grund sollte bei großen Produktionsbatches eine Mischtemperatur von 155 °C nicht überschritten werden [33, 47].

Die Einmischung der Vernetzungschemikalien erfolgt in der 3. Stufe mit einer Temperatur von maximal 110 °C.

2.1.2.3. Nachfolganlagen

Wie in Abschnitt 2.1.1. beschrieben, werden zur Homogenisierung und Ausformung der heißen Mischung nach dem Innenmischer Walzwerke genutzt.

Speziell in den Mischsälen der Reifenwerke mit Chargengewichten von über 500 kg haben Extruder die Funktion des Walzwerkes übernommen [33, 38, 43].

In Bild 2-5 ist schematisch der Fertigungsablauf Innenmischer-Extruder-Kühlanlage dargestellt. Der Innenmischer entleert in einen Schacht, der mehrere Chargen aufnehmen kann. Dieser Mischungspuffer gestattet dem Extruder eine kontinuierliche Fahrweise. Die Aufgaben des Extruders bestehen in der Aufnahme, Abkühlung und Ausformung der Mischung.

Eingesetzt werden dabei Einschneckenextruder und kurze Doppelschneckenextruder.

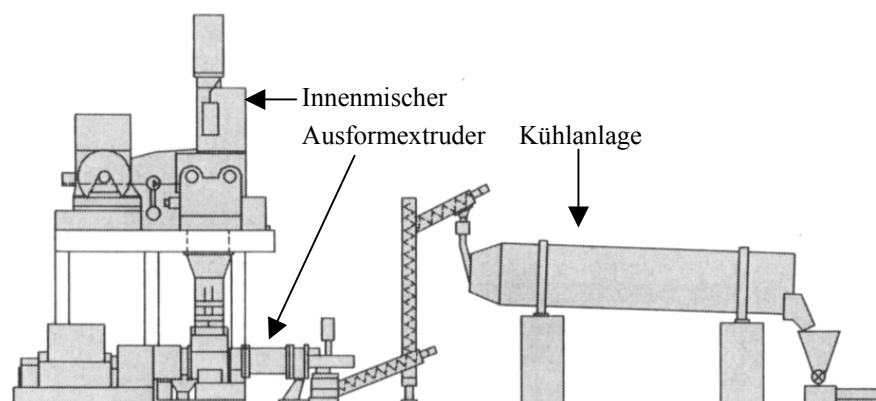


Bild 2-5 Fertigungsablauf: Innenmischer-Ausformextruder-Kühlanlage [43]

2.1.2.4. Vor- und Nachteile

Die Vor- und Nachteile der diskontinuierlichen und chargenweisen Herstellung von Kautschukmischungen im Innenmischer sind in Tabelle 2-2 dargestellt [4, 17, 23, 38, 48, 49].

Tabelle 2-2 Vor- und Nachteile der Herstellung von Kautschukmischungen im Innenmischer

	Innenmischerprozess
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> • hohe Flexibilität bei Rezepturwechsel • hohe Durchsätze
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Instationärer Prozess • Chargenweise Qualitätsstreuungen • Chargenweise Qualitätsüberwachung notwendig • Mehrstufige Herstellung • Temperaturinhomogenitäten • Hohe Leistungsspitzen • Energie-, lager-, transport- und arbeitsintensiv • Ausformapparate notwendig

Die chargenweise Herstellung von Kautschukmischungen im Innenmischer kann insbesondere zu einer Streuung der Mischungsqualität von einem Batch zum anderen führen. Bekannt ist ebenfalls der sogenannte "first batch-Effekt". Dieser Effekt tritt aufgrund einer zu geringen Kammertemperatur beim Anfahren des Innemischers auf und führt zu einer unzureichenden Mischungsqualität, die häufig zum Verwerfen der ersten bis zur vierten Mischung führt [5].

Aufgrund der geringen Kühlleistung und den daraus resultierenden hohen Mischungstemperaturen können die Vernetzungschemikalien häufig nur in separaten Stufen eingearbeitet werden. Dieses führt zu höheren Lager-, Transport- und Personalkosten. Nachteilig und kostenintensiv ist weiterhin die Notwendigkeit der Nutzung von Ausformapparaten wie Walzwerken oder Extrudern.

2.2. Kontinuierliche Verfahren

Kontinuierliche Verfahren sind im Bereich der Kunststoffherzeugung und Verarbeitung, und bei der Herstellung dynamisch vulkanisierter thermoplastischer Elastomere Stand der Technik. Die Entwicklung und Optimierung der Maschinen- und Verfahrenskonzepte eröffnet auch der Kautschukindustrie die Möglichkeit ihre Mischungen mit geringeren Produktschwankungen und niedrigerem Energie- und Raumbedarf kontinuierlich herzustellen. Die Voraussetzungen hierfür sind die Verfügbarkeit und Bereitstellung dosierfähiger Materialien, die Entwicklung oder Anpassung von kontinuierlichen Mischaggregaten, eine betriebssichere Beschickungs- und Dosiertechnik, sowie eine Automatisierung des Betriebes durch Steuer- und Regelanlagen.

2.2.1. Stand der Technik

Seit über 60 Jahren werden Lösungsansätze zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen vorgeschlagen [50, 51,]. Die Entwicklung von kontinuierlich arbeitenden Kautschukmischern und Verfahren zur Bereitstellung und fortlaufenden Zuführung der Mischungsbestandteile, speziell der Kautschuke, wird durch die zahlreichen Patentanmeldungen der Maschinenbauunternehmen und der Gummiindustrie offenbar.

Hale [51] beschreibt in einem Patent aus dem Jahr 1943 das in Bild 2-6 dargestellte Verfahren, in dem granulierter Kautschuk verwendet wird.

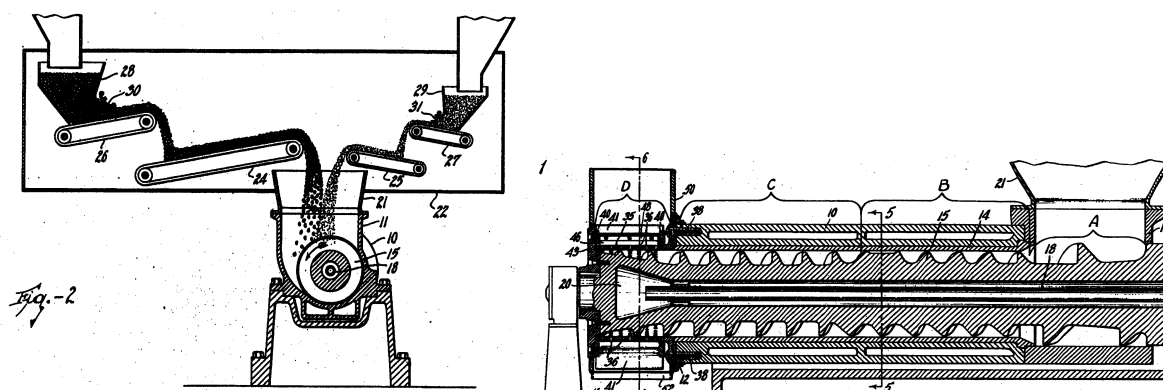


Bild 2-6 Prozess und Aggregat zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen [51]

Das Kautschukgranulat und der Ruß werden in separaten Stoffströmen einem kontinuierlichen Mischer zugeführt. Die Mischungsherstellung erfolgt in einer Schnecke, die in eine Zuführzone (A) und in eine Knet- und Mischzone (B) unterteilt ist. Die anschließende Ausstoßzone (C) mündet in einem Auslass (D), in dem eine Granulator eingebaut ist.

Zona [52] hat die gemeinsame Zuführung der Mischungsbestandteile in einen Mischextruder dadurch gelöst (Bild 2-7), dass der zu einem Streifen mit konstanten Abmessungen ausgewalzte Rohkautschuk (2) auf einem Trägerband (1) zu einem Mischextruder gefördert wird, während auf den Streifen die Zuschlagstoffe, wie Ruß (5) oder Chemikalien (6) aufgestreut werden. Vor dem Eintritt des Streifens in den Extruder werden die Ränder herumerollt, so dass ein endloser Schlauch (12) mit den Zuschlagstoffen als Füllung erhalten wird.

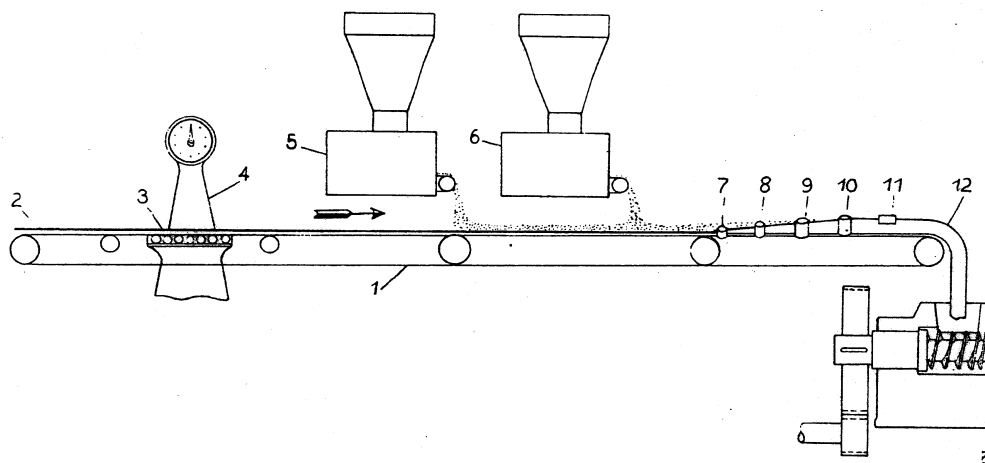


Bild 2-7 Verfahren zur fortlaufenden Zuführung von Mischungsbestandteilen [52]

Zur Verringerung der Staubbelastung beim Aufbringen der Ruße und der Chemikalien haben Nett und Waldrom [53, 54] ein in Bild 2-8 gezeigtes Verfahren entwickelt, in dem die in einem Trommelmischer (1) hergestellte Vormischung aus Ruß, Chemikalien und Öl in einen Querspritzkopf (2) eines Einschneckenextruders (3) gefördert und dort mit dem Rohkautschuk aus dem Extruder als Schlauch umspritzt wird.

Der mit den Zuschlagstoffen gefüllte Schlauch (4) gelangt über ein Förderband in den Mischextruder (5) und aus diesem in einen dritten Extruder (6), in dem die Vernetzungschemikalien zugemischt werden. Die Ausformung der Fertigmischung als Streifen erfolgt in einem weiteren Extruder (7).

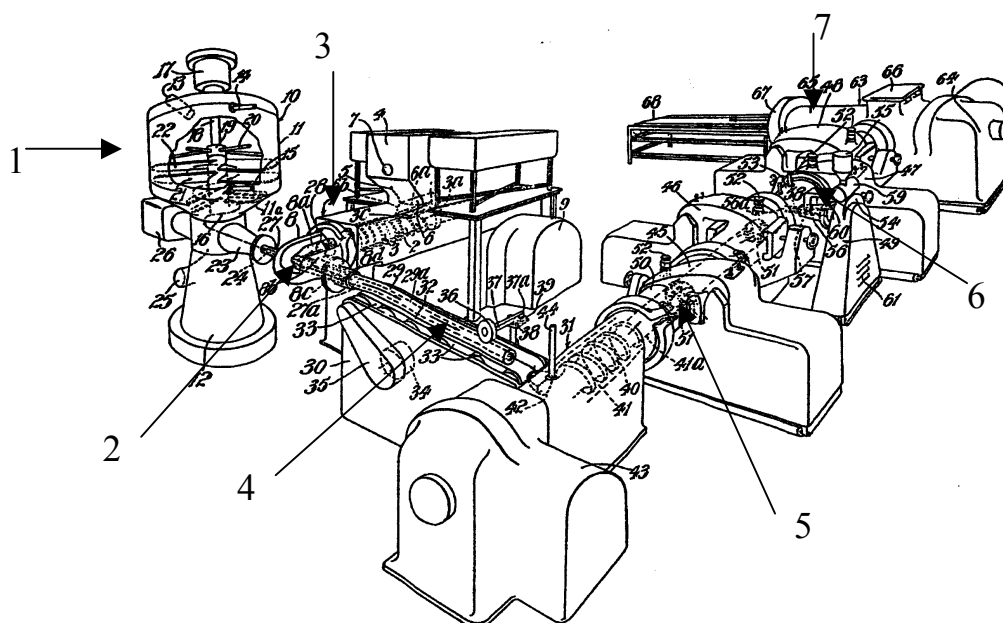


Bild 2 -8 Verfahren zur kontinuierlichen Herstellung einer Fertigmischung [53]

Perrone und Wade [55] stellen ein Konzept vor, in dem aus einem im Innenmischer hergestellten Batch aus Kautschuk und Füllstoff durch Pressen von sternförmigen Strängen (12) und anschließendem Hexeln Pellets (Fig. 1 und Fig. 2) mit vergrößerter Oberfläche hergestellt werden. Diese Pellets werden in einem Trommelmischer mit puderförmigen oder flüssigen Mischungsbestandteilen, wie z. B. Vernetzungschemikalien an der vergrößerten Oberfläche benetzt und einem kontinuierlich arbeitenden Mischer (24) zugeführt. Das Verfahren ist für die Fertigung von Kabelmänteln konzipiert.

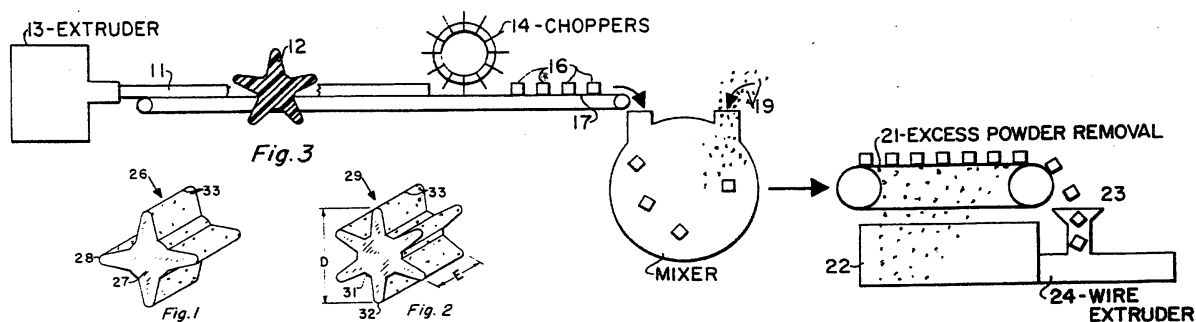


Bild 2-9 Kontinuierliche Herstellung und Weiterverarbeitung von Pellets [55]

In einem weiteren Konzept wird von Dahn, Langan und Meyer [56] ein Teilschritt zur kontinuierlichen Mischungsherstellung vorgeschlagen, in dem die Vernetzungschemikalien mit Wachs oder einem ähnlichen Stoff vorgemischt und anschließend granuliert werden. In einen Mischextruder wird dann ein Streifen, bestehend aus vorgemischtem Kautschuk und Füllstoff, eingeführt und gleichzeitig das Granulat aus den Vernetzungschemikalien dosiert zugegeben.

Parallel zu den maschinenbaulichen Entwicklungen zur kontinuierlichen Zuführung der Mischungsbestandteile und der Entwicklung von kontinuierlich arbeitenden Mischaggregaten wurde von den Rohstofflieferanten die Möglichkeit untersucht, Kautschuke in "frei fließender" Form herzustellen.

Ein Verfahren besteht in der Granulation von Ballenkautschuken [57, 58]. Auf diese Weise lassen sich aus einer Vielzahl von handelsüblichen Kautschuken wie NR, SBR, CR oder EPDM dosierfähige Granulate erzeugen. Infolge der hohen Klebrigkeit der Granulate ist das Aufbringen von Trennmitteln wie z. B. Talkum, Kreide, Ruß, Kieselsäure oder ähnlichen Materialien zur Desaktivierung der Adhäsionskräfte notwendig [22, 59].

Mit Hilfe weiterer Verfahren werden mit speziellen Fäll- und Koagulierverfahren Kautschuke in Krümelform hergestellt [60]. Stanton und Legge [61] beschreiben die Möglichkeit der Vormischung verschiedener Kautschukemulsionen und der Ausfällung zu rieselfähigen Kautschukblends. Die Klebrigkeit der Krümel oder Pulver wird z. B. durch das Aufbringen von filmbildenden polymeren Substanzen verhindert, die die Kautschukoberflächen abschirmen [62]. Buchanan, Katz, Russel und Rist [63] beschreiben ein Verfahren, in dem durch gemeinsames Ausfällen von Latexpartikeln, Stärke und Mehlderivate als Umhüllungsmittel dienen, und pulverförmige SBR- und NBR Kautschuke gewonnen werden. Diese können im kontinuierlichen Mischverfahren eingesetzt werden. Sie wurden zu Preisen produziert, die denen von konventionellen ballenförmigen Kautschuken entsprachen.

Morrell [64] und Engel [65] haben sich damit beschäftigt den Kautschuk in flüssiger Latexform einzusetzen. Untersucht wurden dabei flüssige SBR- und NBR-Typen. Die in einem kontinuierlichen Verfahren hergestellten rußverstärkten Mischungen wurden in einem Spritzgussverfahren direkt zu Reifen gegossen [66]. Aufgrund der schlechten Fließeigenschaften der flüssigen Kautschuke beim Fördern in Rohrleitungen und der unzureichenden physikalischen Vulkanisateigenschaften wurden die Entwicklungsarbeiten nicht weitergeführt.

Von der Chemischen Werke Hüls AG wurde 1963 das "Kautschuk-Pulver-Verfahren" [67] entwickelt. In diesem Verfahren wird durch eine spezielle Fälltechnik ein Copräcipitat aus Synthesekautschuk, in diesem Fall SBR, und Kieselsäure hergestellt, das als feinteiliges trockenes Pulver anfällt und sich zu Stäbchen verdichten lässt. Es können Verhältnisse von bis zu 100 Teilen Kieselsäure auf 100 Teile Kautschuk erreicht werden. Den Kautschuk-Kieselsäure-Batchen (KS-Batch) werden in einem Rührsystem die weiteren Mischungsbestandteile wie ZnO, Weichmacher und Vernetzungschemikalien zugemischt. Die so erzeugte Vormischung wurde auf Zwei- und Mehrschneckenextrudern und im Spritzgussverfahren kontinuierlich verarbeitet, und direkt zu Profilen ausgeformt [68-70]. Ein ähnlicher Ansatz zur Herstellung kieselsäurehaltiger SBR-Kautschuke in Granulatform ist in [71] zu finden.

Das Potential der Anfang der siebziger Jahre verfügbaren granulat- oder pulverförmigen Kautschuke mit und ohne Füllstoff und der entsprechenden kontinuierlichen Verarbeitungsmaschinen spiegelt sich im Ergebnis der "Delphi-Studie" [19] wider. Diese Studie wurde 1972 von der Du Pont in Form einer Umfrage nach der Delphi- Methode in 29 Unternehmen der europäischen und amerikanischen Kautschukindustrie zum Thema: "Was hat die Kautschukindustrie in technologischer Hinsicht von der Zukunft zu erwarten?" durchgeführt.

In dieser Studie wird vorausgesagt, dass der Anteil von Kautschuken in Pulver-, Krümel- oder Granulatform 1980 ca. 10 bis 15 % der Rohmateriallieferung für die Reifenherstellung betragen wird und dass der Anteil im Bereich der technischen Gummiartikel sogar bei 20 bis 25 % liegen wird. Weiterhin wird eingeschätzt, dass die Herstellung von Kautschukmischungen mit kontinuierlich arbeitenden Maschinen innerhalb von 15 bis 20 Jahren diejenige der batchweise arbeitenden Mischer übertreffen wird [20, 21].

Als Folge dieser Studie wurden von den Kautschukproduzenten und von der verarbeitenden Industrie weitergehende Entwicklungsarbeiten durchgeführt, die Palette der frei fließenden dosierbaren Kautschuke zu erweitern, und die Technik der kontinuierlichen Mischungsherstellung zu optimieren.

Das "Kautschuk-Pulver-Verfahren" wurde ab 1973 von der Chemischen Werke Hüls AG erfolgreich auf rußgefüllte SBR Kautschuke angewandt, auf deren Grundlage Mischungen für PKW- Reifenlaufflächen im Innenmischer und in "Spezialextrudern" hergestellt wurden [65, 72].

Koch gibt 1971 [73] und 1974 [74] einen Überblick über den Stand der Einsatzmöglichkeiten von kontinuierlichen Knetmaschinen in der Kautschukverarbeitung. Er beschreibt als geeignete Mischaggregate den "Farrel-Continuous Mixer" (FCM) und zwei Einschneckenextruder mit Mischzonen.

Beim "Farrel-Continuous Mixer" [75] handelt es sich entsprechend Bild 2-10 um einen zweiwelligen gegenläufigen Mischer mit tangierenden Knetwellen, die in ihrer Form den Innenmischerrotoren ähnlich sind. Die Regelung des Füllgrades erfolgt über eine Auslassklappe am Ausgang des Extruders. Eine Ausformung der Mischung zu Zwischenprodukten wie z. B. Strängen ist nur durch einen nachgeschalteten Extruder erreichbar.

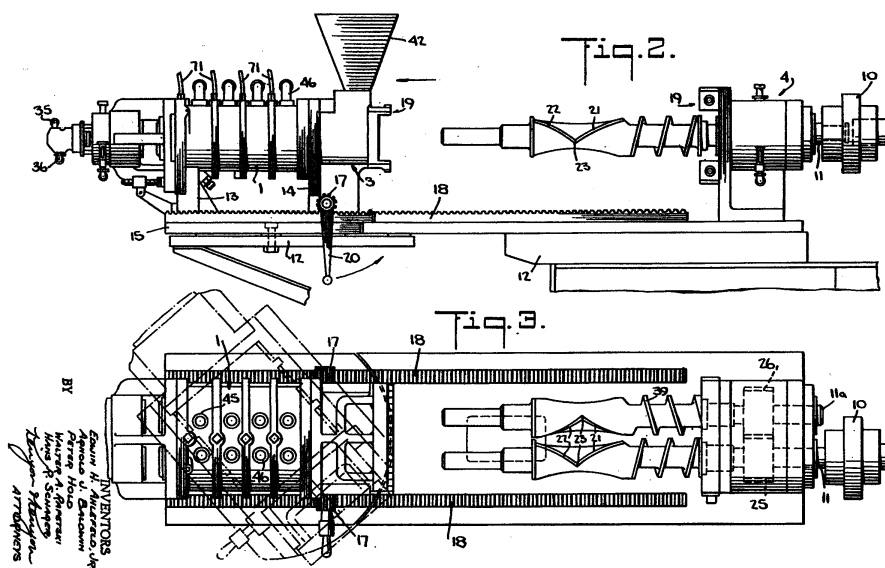


Bild 2-10

Farrel-Continuous Mixer (FCM) [75]

Als geeignete Einschneckenextruder mit Mischwirkung werden von Koch der Transfarmixextruder und der einwellige Misch- und Knetextruder (EVK) der Firma Werner & Pfleiderer genannt.

Das Funktionsprinzip des Transfarmixextruders [76, 77] ist in Bild 2-11 dargestellt. Die Konstruktion dieses Extruders weist Fördergänge in Schnecke und Zylinder auf, die in ihren geometrischen Abmessungen kontinuierlich und gegenläufig bis auf einen maximalen Querschnitt zu- bzw. bis auf Null abnehmen. Der Gesamtquerschnitt bleibt hierbei erhalten. Auf diese Weise wird die Mischung fortlaufend von der Schnecke in den Zylinder bzw. umgekehrt "transferiert". Der Mischeffekt wird somit nach dem Prinzip der fortlaufenden Stromteilung und Umlegung erzeugt.

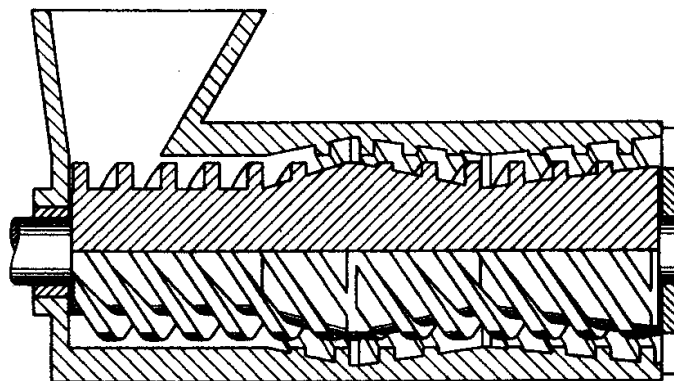


Bild 2-11 Funktionsprinzip des Transfarmixextruder

Das Funktionsprinzip des einwelligen Misch- und Knetextruder (EVK) ist in Bild 2-12 dargestellt. Die mehrgängige Schnecke besitzt Längs- und Querstege. Die Stege sind so angeordnet, dass der aufgestaute Werkstoff einer starken Scherung unterworfen wird, wobei der Mischeffekt durch die Aufteilung in Teilströme und deren Zusammenführung gesteigert wird. Die Mischqualität hängt von der Anzahl der Scherspalt und deren Weiten ab [78, 79].

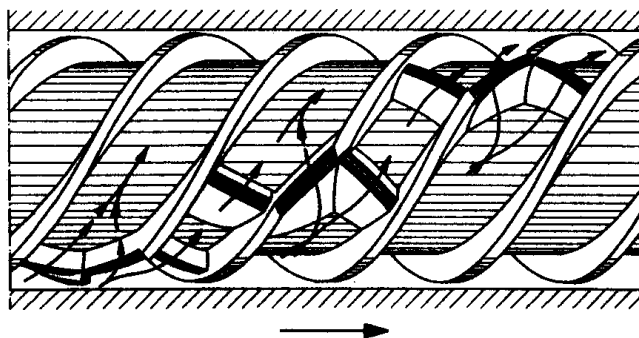


Bild 2 -12 Funktionsprinzip des Misch- und Knetextruder (EVK)

Die weiteren Versuche zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen wurden bis Anfang der 90'er Jahre hauptsächlich unter Verwendung von Einschneckenextrudern mit verschiedenen Ausführungen von Mischzonen durchgeführt [22-24, 80-85].

Allgemeine Vorgehensweise war dabei Schnellmischer einzusetzen, in denen die füllstoffhaltigen oder ungefüllten Kautschuke in Pulverform einschließlich Weichmacher und Vernetzungschemikalien vermischt werden. Dieses als "Dry-Blend" bezeichnete pulverförmige Gemenge wurde dann auf den beschriebenen Mischextrudern oder in Spritzgießautomaten [23, 86] mit geeigneter Mischschnecke direkt verarbeitet.

Teilweise wurde dabei festgestellt, dass die gewünschte Zerteilung und Verteilung der Füllstoffe bei der Verwendung der konventionellen oben beschriebenen Mischaggregate und Schnecken nicht erreicht werden konnte. Ebenfalls erwies sich die Kühlleistung der Einschneckenextruder durch die kleine Zylinderoberfläche und die tief geschnittenen Gänge als unzureichend [22, 87].

In den weiteren Untersuchungen wurden aus diesen Gründen zunehmend Doppelschneckenextruder eingesetzt.

Verschiedene Autoren [88-91] beschreiben die Herstellung von rußgefüllten EPDM-Mischungen an gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextrudern, wobei in allen Fällen von granuliertem EPDM-Ballenkautschuk ausgegangen wurde. Capelle [6] beschreibt die kontinuierliche Herstellung einer EPDM-Schlauchmischung mit einer Mooney-Viskosität von 90 Mooney-Punkten (ML_{1+4}) am Berstorff Doppelschneckenextruder ZE 90 A. Dabei wird bei Drehzahlen von 100 bis 110 1/min eine Durchsatzleistung von 500 bis 600 kg/h Fertigmischung mit einem spezifischen Energieeintrag von 0,18 kWh/kg und Ausstoßtemperaturen von 130 bis 135 °C erreicht. Capelle berechnet, dass für Mischkapazitäten von 2-2,5 t/h ein Doppelschneckenextruder mit einem Schneckendurchmesser von 192 mm (ZE 180 A) in Betracht kommt.

Ein wesentlicher Beitrag im Bereich der EPDM-Mischungen wurde von der Union Carbide durch die Entwicklung von frei fließendem granulatförmigen EPDM geliefert [92, 93]. Im Gegensatz zur Ballenform wird bei der Polymerisationstechnik im Gasphasenfluidbett der EPDM-Kautschuk in Granulatform hergestellt. Die Granulatteilchen besitzen eine mittlere Partikelgröße zwischen 0,6 und 0,8 mm und sind mit 20 bis 25 phr Ruß teilbenetzt. Die kontinuierliche Herstellung von Mischungen auf der Basis dieser Materialien am gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextruder wird von Italiaander [7] beschrieben.

Einen besonderen Meilenstein bildet das 2002 entwickelte CCM-System (Continuous Compound System) der Pirelli [9, 94, 95]. Das CCM-System stellt einen kontinuierlichen Herstellungsprozess von Kautschukmischungen mit einer vollautomatischen Materialbeschickung dar. In einer Pilotanlage können 2 Extrusionslinien jeweils bis zu 250 kg/h kieselsäuregefüllte Reifenmischungen herstellen. Die Silanisierungsreaktion wird während der Extrusion durchgeführt. Aufgrund der langen Reaktionszeit zur Silanisierung und des unterschiedlich benötigten Temperaturniveaus entlang des Verfahrens besteht jede Extrusionslinie aus zwei durch ein Puffersilo gekoppelten Doppelschneckenextrudern. Der erste Extruder arbeitet in einem Temperaturbereich von 150-200 °C. Die Grundmischung wird granuliert und im Puffersilo zwischengelagert. Die Zugabe der Vernetzungskemikalien erfolgt im 2. Extruder mit einer maximalen Ausstoßtemperatur von 120 °C. Weiterhin werden online nicht näher definierte Mischungseigenschaften erfasst [96, 97].

Eswaran et al. beschreiben in einem Patent der Firma Goodyear [98] ebenfalls mehrere Konzepte zur Herstellung kieselsäuregefüllter Kautschukmischungen unter Verwendung von Doppelschnecken- und Einschneckenextrudern, und auch Kopplungen der Maschinen zur Verweilzeiterhöhung.

In den letzten Jahren sind zunehmend Versuche zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen unter Verwendung von Mehrwellenextrudern, wie dem Ringextruder [13] und dem Planetwalzenextruder [99], oder auch speziell entwickelten Einschneckenextrudern [100, 101] durchgeführt worden.

Weitere Entwicklungen zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen sind in [102-106] beschrieben.

2.2.2. Prozessschritte und Grundlagen

Die zentrale Einheit der kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen ist der Mischextruder.

Der Gesamtprozess (Bild 2-13) gliedert sich dabei in die Verfahrensschritte:

- Dosierung der Mischungsbestandteile in den Extruder
- Mischen der Komponenten
- Austragen und Ausformen des Extrudates.

Eine besondere Charakteristik des dargestellten Verfahrens ist, dass das Grundmischen und das Fertigmischen, d. h. die Zugabe der Vernetzungschemikalien direkt in einem Arbeitsvorgang erfolgt. Aufgrund der in der Kautschukmischung enthaltenen Vernetzungschemikalien beträgt die maximal zulässige Ausstoßtemperatur 120 °C.

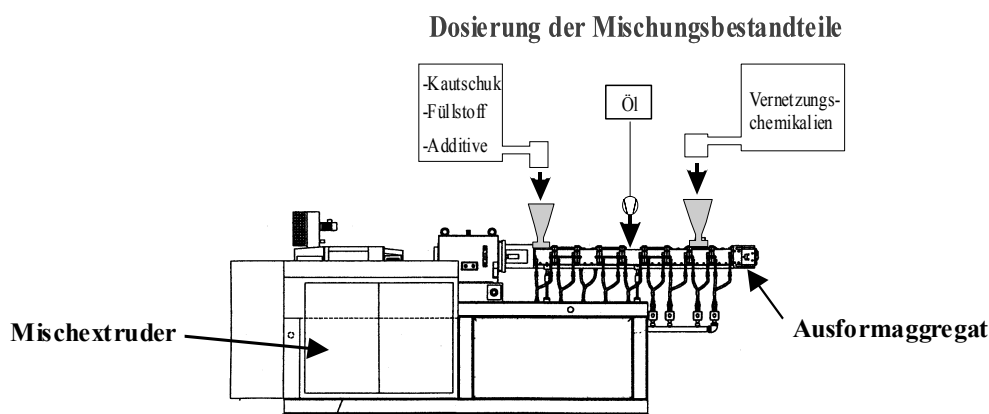


Bild 2-13 Prinzipieller Verfahrensaufbau zur kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen

2.2.2.1. Dosieren

Die Grundvoraussetzung der kontinuierlichen Mischungsherstellung ist die Zugabe der Mischungsbestandteile in einem konstanten Mengenverhältnis pro Zeiteinheit (kg/h). Wie aus Tabelle 2-1 ersichtlich, beinhalten Kautschukmischungen eine Vielzahl unterschiedlicher Chemikalien in kleinen Mengen, woraus sich für die Dosieraggregate hohe Anforderungen hinsichtlich der Genauigkeit ergeben. Die Mischungsbestandteile fallen als grobe oder feine Granulate, als Pulver oder Chips, und im Fall von Öl als viskose Flüssigkeit an.

Die Einteilung der Dosierer erfolgt in volumetrische und gravimetrische Dosiersysteme [107, 108].

In Bild 2-14 sind verschiedene volumetrische Dosiersysteme dargestellt. Es handelt sich um einfach aufgebaute und damit preiswerte Systeme. Die Erzeugung von konstanten Dosierströmen erfolgt z. B. mit Hilfe von drehenden Schnecken, umlaufenden Bändern oder vibrierenden Rinnen. Der Dosierstrom lässt sich durch die Variation der Antriebsgrößen wie Drehzahl oder Vibrationsfrequenz einstellen; ist aber aufgrund der fehlenden Rückkopplung einer Messgröße nicht regelbar.

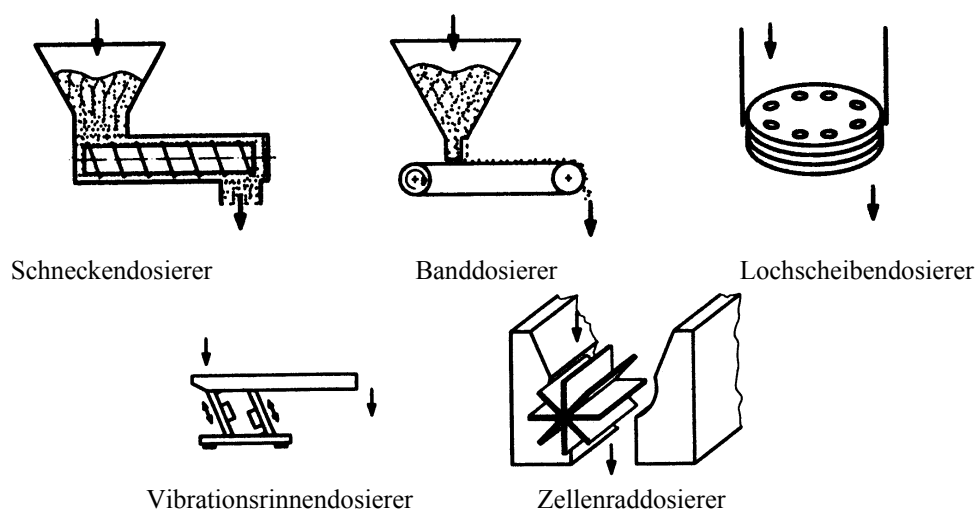


Bild 2-14 Volumetrische Dosiersysteme [120]

Da eine Überwachung und Regelung der mit volumetrischen Systemen erzeugten Dosierströme nicht möglich ist, sollten zur Qualitätssicherung bei der kontinuierlichen Herstellung von Kautschukmischungen gravimetrische Dosiersysteme genutzt werden.

Während einer gravimetrischen Dosierung wird das Gewicht des zudosierten Massestroms gemessen. Gravimetrische Dosierer werden in Dosierbandwaagen und Differentialdosierwaagen unterschieden (Bild 2-15). In geschwindigkeitsgeregelten Bandwaagen wird der Massestrom mit Hilfe einer Messzelle unter dem Transportband und der Bandgeschwindigkeit geregelt. Der Massestrom in gewichtsgeregelten Dosierbandwaagen lässt sich mit Hilfe der Variation des Trichteröffnungsgrades bei konstanter Bandgeschwindigkeit ändern.

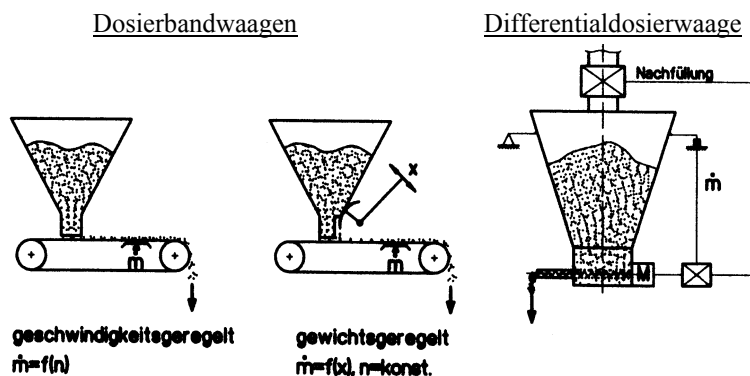


Bild 2-15 Gravimetrische Dosiersysteme [120]

In Differentialdosierwaagen wird die Gewichtsabnahme des gesamten Vorratsbehälters pro Zeiteinheit ermittelt und geregelt. Unter Verwendung von Austragshilfen, wie bewegte Seitenwände, Rührwerke oder Vibrationsböden werden Dosierprobleme wie Brückenbildung oder Haften an Behälterwänden verhindert [107, 109, 120]. Je nach produktspezifischen Eigenschaften lassen sich die verwendeten Ausstragsschnecken variieren. Die Prozessdaten der Differentialdosierwaagen wie Behältergewicht, Istwert und Regelabweichungen werden online angezeigt und in die Prozesskontrolle des Gesamtverfahrens integriert [110].

Da es sich bei einem Großteil der pulverförmigen Kautschukchemikalien, wie z. B. Zinkoxid, Schwefel und Beschleuniger um adhäsive und schwer rieselfähige Schüttgüter handelt, sollte die Dosierung dieser Mischungsbestandteile mit Differentialdosierwaagen erfolgen.

Die Dosierung der Weichmacheröle erfolgt über Dosierpumpen. Eingesetzt werden Verdrängerpumpen wie Membran-, Kolben- oder Zahnradpumpen. Zur Erhöhung der Fließfähigkeit der viskosen Öle ist eine Temperierung des Dosieraggregates und der Leitungen vorzusehen [108, 111].

2.2.2.2. Mischen

Ziel des Mischens ist es, in einem Mehrkomponenten- System durch Verteilen und ggf. auch Zerteilen örtlich gleiche Konzentrationsverteilungen der Bestandteile zu schaffen. Für das Mischen von Polymeren mit Füllstoffen wird dieser Prozess in drei Bereiche unterteilt. Unterschieden wird nach Michaeli [112] zwischen:

- distributivem Mischen,
- laminarem Mischen und
- dispersivem Mischen.

Die drei Mischvorgänge sind in Bild 2-16 schematisch dargestellt.

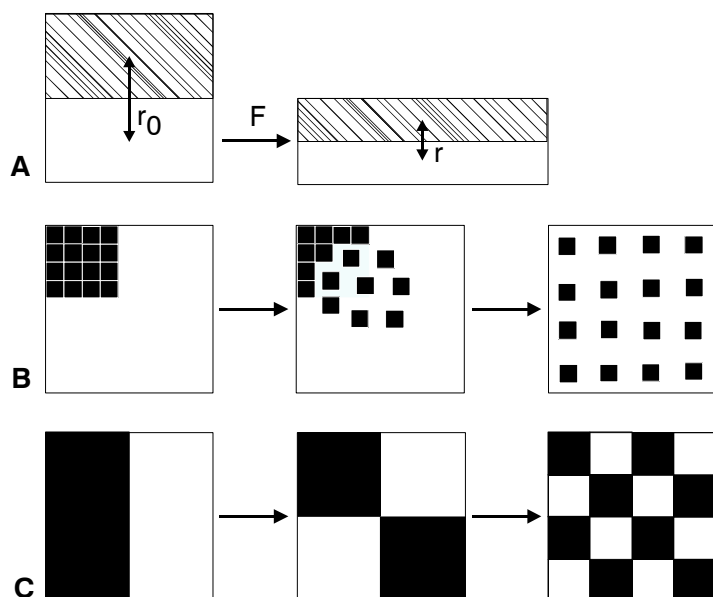


Bild 2-16 Grundarten des Mischens [112, 115]

- A Laminares Mischen
- B Distributives Mischen
- C Dispersives Mischen

Werden die als Flüssigkeiten oder deformierbare Substanzen in einer Mischung vorliegenden Komponenten durch Einwirkung von Scher- oder Dehnbelastungen deformiert, wird die Dicke und der Abstand der Schichten voneinander verringert, und die Oberfläche vergrößert. Dieser Vorgang wird als laminares Mischen bezeichnet (Bild 2-16 A). Sind die zu vermischenden Komponenten ineinander lösliche Flüssigkeiten oder Feststoff/Feststoff-Systeme, werden diese anfangs getrennt vorliegenden Komponenten durch einfache distributive Vorgänge in der Mischung verteilt (Bild 2-16 B). Überschreiten die auf die Mischung einwirkenden Kräfte die kritische Schubspannung der vorhandenen Feststoffagglomerate, werden diese nach Bild 2-16 C durch dispersives Mischen aufgebrochen und bis in ihre kleinsten Einheiten zerteilt.

Die drei beschriebenen Arten des Mischens sind nicht voneinander zu trennen und laufen während des Mischvorgangs parallel ab [113-115].

Eines der zentralen Themen der Herstellung von Kautschukmischungen ist die Einarbeitung von Füllstoffen, wie Ruß und Kieselsäure in den Kautschuk.

Eine besondere Eigenschaft der Ruße und Kieselsäuren ist die Neigung dieser Füllstoffe zur Bildung von Agglomeraten. Eine Prinzipdarstellung des hierarchischen Aufbaus von Ruß ist in Bild 2-17 dargestellt.

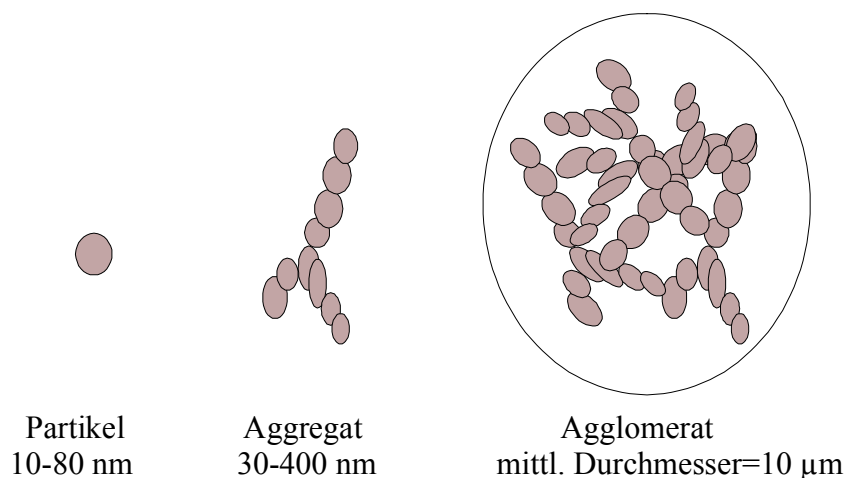


Bild 2-17 Hierarchischer Aufbau von Ruß [38]

Ruß wird über die unvollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen hergestellt. Im Verlauf des Herstellungsprozesses lagern sich die gebildeten Partikel zu Aggregaten zusammen, deren mittlere Durchmesser je nach Rußtyp zwischen 30 und 400 nm liegen. Die aus bis zu 300 Partikeln bestehenden Aggregate werden aufgrund der starken Bindungskräfte zwischen den Partikeln während des Mischprozesses nicht aufgebrochen und bilden die kleinste Verstärkungswirkung bestimmende Füllstoffeinheit.

Durch van-der-Waal'sche Wechselwirkungen lagern sich die Ruß-Aggregate zu Agglomeraten mit einem mittleren Durchmesser von 10 µm zusammen [114-116]. Die Rußagglomerate werden zur Verbesserung der Rieselfähigkeit vom Hersteller zu größeren Perlen zusammengeschlossen.

Die Funktion des Mischprozesses besteht darin, die in makroskopischen Dimensionen vorliegenden Rußpellets oder Agglomerate durch Einwirkung mechanischer Kräfte dispersiv zu mikroskopischen Einheiten abzubauen und diese distributiv in der Mischung zu verteilen. Erfolgt eine unzureichende Verteilung der Füllstoffe während des Mischens oder werden die Agglomerate nicht ausreichend zerstört, liegen potentielle Fehlerstellen in der Mischung vor, die die physikalischen Eigenschaften des Elastomerproduktes beeinflussen.

Die Dispersion und Verteilung des Rußes oder der Kieselsäure im Kautschuk stellt ein Maß für die Güte des kontinuierlichen Mischprozesses dar.

Dispersives Mischen

Shiga und Furuta [117] beschreiben ein Modell, in welchem der Abtrag des Rußes an der Agglomeratoberfläche in Form konzentrischer Kugelschalen erfolgt. Der im Scherfeld abgetragene Volumenanteil ist proportional zur Oberfläche des Agglomerats, zur übertragenen Schubspannung im Fluid und zur Verweilzeit (Belastungsdauer). Damit wird der Volumenverlust (ΔV_A) eines Agglomerats bezogen auf das Agglomeratvolumen (V_A) zu

$$\frac{\Delta V_A}{V_A} = K \frac{t \tau_{xy}}{d_A} \quad (2-3)$$

Hierin ist τ_{xy} die Schubspannung, t die Verweilzeit, K eine Konstante und d_A der Agglomeratdurchmesser.

Der durch dispersives Mischen erreichbare Agglomeratdurchmesser ist somit von der Höhe der Schubspannung und von der Verweilzeit abhängig

$$d_A = f(\tau, t) \quad (2-4)$$

Um eine Zerteilung der Agglomerate zu erzielen ist außer einer Mindestschubspannung auch eine Mindestverweilzeit erforderlich. Oberhalb der Mindestwerte sind Schubspannung und Verweilzeit austauschbar um den gleichen Zerteilerfolg zu erzielen [118-120].

In effektiven Mischteilen entstehen hohe Schubspannungen und die Masse hat lange Verweilzeiten.

Die Höhe des Zerteilvorgangs steht in direktem Zusammenhang mit dem spezifischen Energieeintrag e . Darunter wird nach Schuler [121] die pro Materialvolumeneinheit aufgewendete mechanische Energie als Folge der Schubspannungsverteilung im Scherfeld des Schneckenkanals eines Doppelschneckenextruders verstanden (Gleichung 2-5).

$$e = \frac{P}{\dot{m}} = \tau \cdot \bar{t} \cdot \frac{\dot{\gamma}}{\rho} = \frac{\bar{t}}{\rho} \cdot \eta \cdot \dot{\gamma}^2 \quad (2-5)$$

P : dissipierte Antriebsleistung

τ : Schubspannung

ρ : Dichte der Mischung

\dot{m} : Massedurchsatz

$\dot{\gamma}$: Schergeschwindigkeit

η : Viskosität

2.2.2.3. Austragen und Ausformen

Zum Ausformen der im Extruder hergestellten Kautschukmischungen werden Ausformwerkzeuge wie Düsen oder Granuliertorrichtungen genutzt. Sind diese Ausformwerkzeuge direkt an den Mischextruder angeschlossen, muss der benötigte Druck zum Überwinden des Werkzeugwiderstandes vom Extruder erzeugt werden. Der Druckaufbau vor dem Ausformwerkzeug eines Doppelschneckenextruder führt zu einem Rückstau des Materials in den Schneckenraum und damit zu einer oft unzulässigen Temperaturerhöhung im Bereich der schnell drehenden Schnecken. Nach Schuler [121] erhöht sich die Temperatur bei der Extrusion von z. B. Polypropylen am gleichsinnig drehenden Doppelschneckenextruder und einem Austragsdruck von 100 bar um 33 bis 62 °C.

Dieser unerwünschte Temperaturanstieg lässt sich durch eine Entkopplung der Verfahrensschritte Mischen und Austragen verhindern. Im Kunststoffbereich werden daher wie im Bild 2-18 dargestellt zum Druckaufbau kurze, langsam laufende, einwellige Austragsextruder nachgeschaltet.

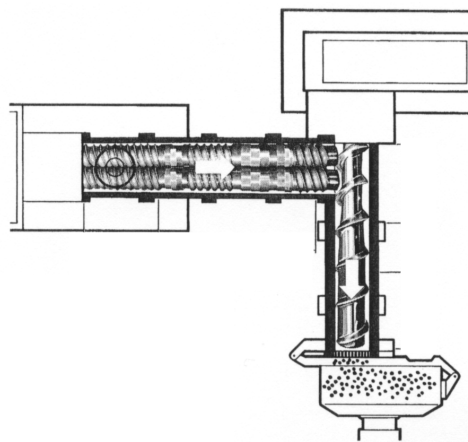


Bild 2-18 Aufbereitung von PVC mittels Doppelschneckenextruder und einwelligem Austragsextruder zum Druckaufbau [122]

Als Druckaufbauaggregate werden ebenfalls Zahnradpumpen eingesetzt, die direkt an den Doppelschneckenextruder gekoppelt sind [123].

Von Schuler [121] wird für die Extrusion von Polypropylen mit einer Zahnradpumpe und einem Austragsdruck von 100 bar eine Temperaturerhöhung von 8 bis 12 °C beschrieben.

Im Bereich der Kautschuktechnologie werden Zahnradpumpen derzeit schon vielfach zum Druckaufbau oder zur Vergleichmäßigung des Druckes vor Extrusionswerkzeugen eingesetzt [124, 125-129].