

HANSER

Lothar Köster, Hans Perz, Georg Tsiwikis

Praxis der Kautschukextrusion

ISBN-10: 3-446-40772-3

ISBN-13: 978-3-446-40772-5

Vorwort

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/978-3-446-40772-5>
sowie im Buchhandel

Vorwort

Das vorliegende Werk befasst sich vorrangig mit den praktischen Seiten bei der Herstellung von technischen Gummiwaren. Mit der Darlegung der elementaren Zusammenhänge bietet es nicht nur die Möglichkeit, das Zusammenwirken der verschiedenen Einflussgrößen bei der Kautschukextrusion und Profilverstellung besser zu durchschauen, sondern es enthält darüber hinaus eine Reihe von praktischen Empfehlungen für den Betreiber, um seine im alltäglichen Betrieb auftretenden Probleme lösen oder seine Fertigungsprozesse optimieren zu können. Der Inhalt basiert auf den umfangreichen, über Jahrzehnte gesammelten Erfahrungen der Autoren bei der Konzipierung, Auslegung, Inbetriebnahme und Wartung von entsprechenden Einrichtungen und Anlagen für und bei Kunden in nahezu allen Teilen der Welt. Weiterhin sind Erkenntnisse aus einer Vielzahl von Grundlagenuntersuchungen enthalten, die von den Autoren selbst unter praxisnahen Bedingungen an Versuchseinrichtungen oder an Produktionsanlagen bei Anlagenbetreibern durchgeführt wurden.

Zum besseren Verständnis verzichtet das Werk überwiegend auf umfangreiche theoretische Ausführungen und Berechnungen. Statt dessen wird auf in der Praxis bewährte einfache Modelle zurückgegriffen. Das gilt auch dann, wenn auf theoretische Ausführungen zum besseren Verständnis nicht verzichtet werden kann. Alle Zusammenhänge und Aussagen werden durch zahlreiche Bilder und Grafiken ausführlich und leicht verständlich erläutert und verdeutlicht. Insbesondere gilt dies für die Darlegung der Zusammenhänge zwischen den verschiedenen Einflussgrößen und deren Auswirkungen auf den Extrusionsprozess und die Produkteigenschaften. Durch die Darlegung ausgewählter Anwendungsfälle und Beispiele zur Aufgabenlösung bietet das Werk aber auch umfangreiche Hilfestellung zur korrekten Auslegung und Auswahl der zur Erfüllung vorgegebener Aufgaben benötigten Einrichtungen. Daneben enthält das Werk noch ausführliche Beschreibungen der verschiedenen Möglichkeiten zur Kautschukextrusion und Profilverstellung, zum Aufbau und zur Funktion der dazu zur Verfügung stehenden Einrichtungen sowie zu den hiermit verbundenen Vor- und Nachteilen. Dadurch ist das Werk gleichermaßen von Interesse sowohl für den praktisch versierten und erfahrenen Anlagenbetreiber als auch für den Anlagenkonstrukteur und schließlich ebenfalls für den Berufseinsteiger, der sich erstmals mit dem Gebiet der Kautschukextrusion auseinander zu setzen hat.

Da nahezu alle Ausführungen, Bilder und grafischen Darstellungen von den Autoren infolge ihrer langjährigen Berufstätigkeit und gesammelten Erfahrungen selbst erstellt wurden, konnte weitgehend auf Quellennachweise verzichtet werden. Lediglich bei den von Unternehmen aus dem Umfeld der Kautschukextrusion bereit gestellten Bildern wird auf den jeweiligen Urheber verwiesen. In diesem Zusammenhang richtet sich der Dank der Autoren an die Unternehmen Fa. Harburg-Freudenberger Maschinenbau GmbH (HFM), ehemals Fa. ThyssenKrupp Elastomertechnik GmbH, Hamburg-Harburg, Fa. Berstorff GmbH, Hannover, Fa. Paul Troester GmbH & Co. KG, Hannover, Fa. Gneuß Kunststofftechnik GmbH, Bad Oeynhausen, Fa. Uth GmbH, Fulda, Fa. Maag Pump Systems Textron AG, CH-Oberglatt/Zürich, Fa. gwK Gesellschaft Wärme Kältetechnik mbH, Kierspe, Fa. HSM GmbH, Alsdorf, ehemals Fa. Esch Anlagen & Maschinenbau, Stolberg, und Fa. Kelviplast GmbH & Co. KG, Großenhausen.

HANSER

Lothar Köster, Hans Perz, Georg Tsiwikis

Praxis der Kautschukextrusion

ISBN-10: 3-446-40772-3

ISBN-13: 978-3-446-40772-5

Leseprobe

Weitere Informationen oder Bestellungen unter
<http://www.hanser.de/978-3-446-40772-5>
sowie im Buchhandel

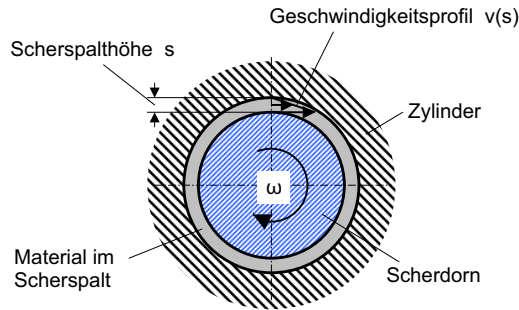


Bild 3.23: Prozessablauf im Scherspalt

Bild 3.23 zeigt den prinzipiellen Prozessablauf im Scherraum. Die Rotation des Scherdorns im relativ engen Scherspalt führt zu einem nahezu linear verlaufenden Geschwindigkeitsprofil über die Spalthöhe und damit zu einer intensiven Scherung des Kautschukmaterials. Der Scherkopf erzeugt somit die für den nachfolgenden Vulkanisationsprozess erforderliche Startenergie durch innere Reibung im Kautschuk selbst bis kurz vor dem Erreichen der Vernetzungsgrenze (Scorch).

Da die Vernetzungsgrenze (Scorch-Grenze) vom Mischprozess her gewissen Toleranzen unterworfen ist, muss der Scherkopf diesen Toleranzen folgen können, ohne Einfluss auf den Durchsatz und folglich auf die Geometrie des Produktes zu nehmen. Damit diese Hauptforderung und die damit verbundene Zusatzforderung nach immer engeren Toleranzvorgaben erfüllt werden können, darf der Scherdorn keine Eigenförderung haben. Das Kautschukmaterial muss demzufolge völlig unabhängig vom Durchsatz immer auf dem optimalen Temperaturpunkt gehalten werden. Hierzu wird die Drehzahl des Scherdornes über Temperatursensoren im Materialstrom entsprechend geregelt. Daraus ergibt sich dann automatisch die optimale Verweilzeit in der nachgeschalteten Vulkanisationsstrecke, die benötigt wird, um den im Scherkopf bereits begonnenen Vernetzungsprozess innerhalb des Extrudates zu vervollständigen, da dieser eine Funktion aus dem Zusammenwirken von Temperatur und Zeit ist.

Die folgende Übersicht zeigt eine Auswahl an Kautschuksorten, die sich für eine Verarbeitung auf Scherkopfanlagen als geeignet erwiesen haben:

- EPDM,
- Naturkautschuk (NR),
- Styrol-Butadien (SBR),
- Butyl-Kautschuk (IIR),
- Chlorbutadien (CR),
- Silikon-Kautschuk (SI),
- PVC-Nitril-Kautschuk.

Bei der Auslegung der Werkzeuge für Kautschukmischungen, die mit Einsatz der Scherkopftechnik verarbeitet werden sollen, muss die höhere Massetemperatur von 150 bis 180 °C berücksichtigt werden. Darüber hinaus muss das Extrusionswerkzeug folgende Konstruktions- und sonstige Merkmale aufweisen:

Prozessablauf

Vernetzungsgrenze

Massetemperatur von 150 bis 180 °C

4 Vulkanisation

4.1 Grundlagen

Unter Vulkanisation versteht man die Umwandlung des vorzugsweise plastischen Kautschuks in den elastischen Gummizustand. Diese Umwandlung erfolgt durch die Verbindung der einzelnen Kautschukmolekülketten miteinander zu einem räumlichen Netzwerk unter Zuhilfenahme von als Vulkanisationsmittel bezeichneten Fremdstoffen, die als Bindeglieder zwischen den einzelnen Molekülketten dienen. Die Verbindung entsteht dadurch, dass die einzelnen Kautschukmoleküle instabile Doppelbindungen enthalten, die unter Temperatureinwirkung aufbrechen und an die sich die Atome des Vulkanisationsmittels anlagern können. Dieser Prozess ist abhängig von der herrschenden Temperatur und der Zeitdauer ihrer Einwirkung, d. h. je höher die Temperatur ist, umso schneller erfolgt die Vernetzung.

Vernetzung

Das auch heute noch am häufigsten zur Vernetzung der meisten Kautschuksorten benutzte Vulkanisationsmittel ist der Schwefel. Bei den besonders im Bereich der technischen Profile eingesetzten EPDM-Kautschukmischungen werden statt dessen überwiegend Peroxyde als Vulkanisationsmittel eingesetzt. Diese können die Vulkanisationsdauer erheblich verkürzen, so dass sie besonders geeignet sind für kontinuierliche Vulkanisationsverfahren, bei denen die zur Verfügung stehende Vulkanisationszeit von der Geschwindigkeit der Extrusionslinie und von der Länge der Vulkanisationseinrichtung abhängt. Daneben gibt es für bestimmte Sonderanwendungen eine Vielzahl weiterer Vulkanisationsmittel.

**Peroxyde
Vulkanisations-
mittel**

Um die Reaktionsgeschwindigkeit zu erhöhen und damit die Zeitdauer der Vulkanisation zu verkürzen, werden den Kautschukmischungen weitere Fremdstoffe wie z. B. Stearinsäure als Vulkanisationsbeschleuniger und Zinkoxyd als Aktivator beigemischt. Die Auswahl der eingesetzten Vulkanisationsbeschleuniger und Aktivator sowie der Anteil an der Gesamtmischung richtet sich nach dem Vulkanisationsverfahren und dem jeweiligen Anwendungsfall. Die Gesamtheit aller am Vulkanisationsprozess beteiligten Fremd- und Zusatzstoffe wird als Vulkanisationssystem bezeichnet.

**Vulkanisations-
system**

Die Vulkanisationsdauer ist so auf den Anwendungsfall abzustimmen, dass keine Bereiche über- oder untervulkanisiert sind, um Ungleichmäßigkeiten in den Produkteigenschaften zu vermeiden. Besonders bei Profilen mit unterschiedlichen Wanddicken ist darauf zu achten, dass dünnwandige Bereiche wie z. B. Dichtlippen nicht übervulkanisiert werden, während dickwandige Bereiche noch nicht hinreichend vernetzt sind. Hierdurch würde sich nicht nur ein unterschiedliches Schrumpfverhalten ergeben, das zu Einfallstellen bzw. Verformungen und Dimensionsabweichungen führen kann, sondern es würden sich auch die physikalischen Eigenschaften des fertigen Gummiprofils wie Flexibilität, Elastizität, Abriebeigenschaften usw. ändern.

**Vulkanisations-
dauer**

4.2 Vulkanisationsverfahren

Die zunehmenden Anforderungen der Kunden speziell aus der Fahrzeug- und Bauindustrie an die Produkteigenschaften und die Produktqualität wie z. B. an Witterungsbeständigkeit, Geräuschkämpfung, Toleranzen und Fähigkeiten usw. führten seitens der kautschukverarbeitenden Industrie und ihrer Zulieferer zur Entwicklung einer Vielzahl individuell auf die Produkthanforderungen zugeschnittenen unterschiedlichen Vulkanisationsverfahren.

4.2.1 Diskontinuierliche Vulkanisation im Druckkessel

Druckkessel Die Vulkanisation im Druckkessel mit Dampf als Wärmeträger und Druckerzeuger ist die ursprüngliche Art der Vulkanisation. Sie ist nicht geeignet für kontinuierliche Fertigungsprozesse, spielt jedoch immer noch eine Rolle bei der Herstellung von druckfesten Schläuchen und Kühlerschläuchen für den Kfz-Bereich, da der Zwischenraum solcher Produkte zwischen den Kautschuklagen und den Gewebeeinlagen absolut frei sein muss von Feuchtigkeit und Lufteinschlüssen. Dieses kann nur durch entsprechenden hohen Druck bei der Vulkanisation gewährleistet werden. Wegen seines hohen Energiegehaltes ist Wasserdampf als Energieträger und Druckvermittler besonders geeignet. Durch die Kondensation des Nassdampfes bei der Wärmeabgabe ergibt sich ein sehr intensiver Wärmeübergang zum Vulkanisationsgut. Nachteilig ist lediglich, dass der für die Ausformung benötigte Druck in einem engen physikalischen Zusammenhang mit der Temperatur steht und deswegen nicht beliebig erhöht werden kann.

4.2.2 Heißluftvulkanisation

Heißluft Bei der Heißluftvulkanisation hingegen wird die zur Vernetzung benötigte Wärmeenergie mittels turbulenter Heißluft über die Profiloberfläche in das Extrudat eingebracht. Die wärmeübertragenden Luftmoleküle sorgen durch extrem hohe Luftgeschwindigkeiten und Turbulenzen unmittelbar an der Extrudatoberfläche für einen bestmöglichen Wärmeübergang. Durch Modifikation der Luftbewegung über die Gesamtlänge der Anlage wird ein linearer Wärmeübergang während der gesamten Verweilzeit des Profils in der Anlage erreicht.

Vorvulkanisationsanlagen Wegen der relativ geringen Wärmeleitfähigkeit des Kautschukmaterials, und um Übervulkanisation dünnwandiger Teilbereiche zu vermeiden, sowie um die Baulänge der Anlagen zu begrenzen, werden solche Anlagen häufig mit Vorvulkanisationsanlagen wie z. B. Scherköpfen oder UHF-Anlagen kombiniert.

Bild 4.1 zeigt den Aufbau eines Einzelmoduls einer gasbeheizten Heißluftvulkanisationsanlage.

Die Länge der einzelnen Module beträgt ca. 3 m. Für den Anwender besteht damit die Möglichkeit, vorhandene Anlagen zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund eventuell geänderter Anforderungen zu erweitern. Üblicherweise betragen die Baulängen bestehender Heißluftanlagen ca. 9–21 m. Es handelt sich hierbei um Hochgeschwindigkeitskanäle mit einem Transportband aus hitzebeständigem Material zum Transport der extrudierten Profilstränge.

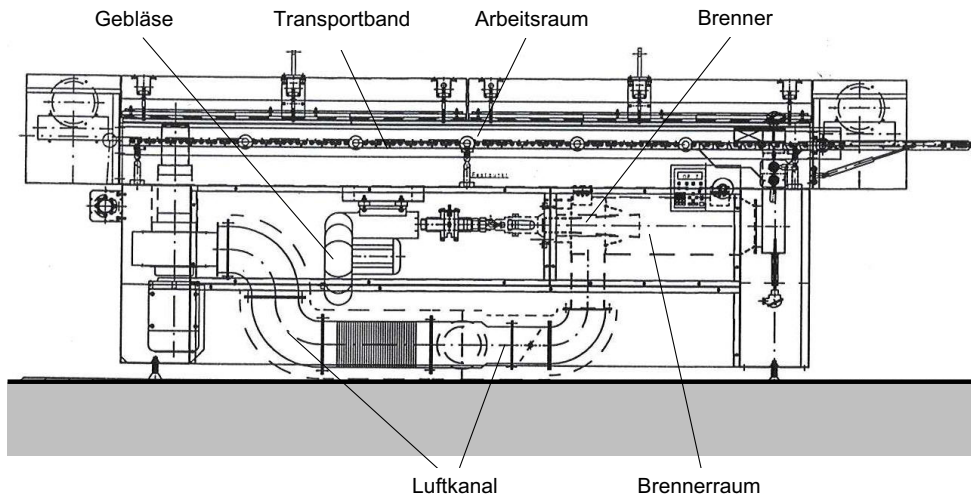


Bild 4.1: Gasbeheizter Heißluftkanal (Einzelmodul) zur Vulkanisation von Gummiprofilen (Zeichnung: Fa. HSM GmbH)

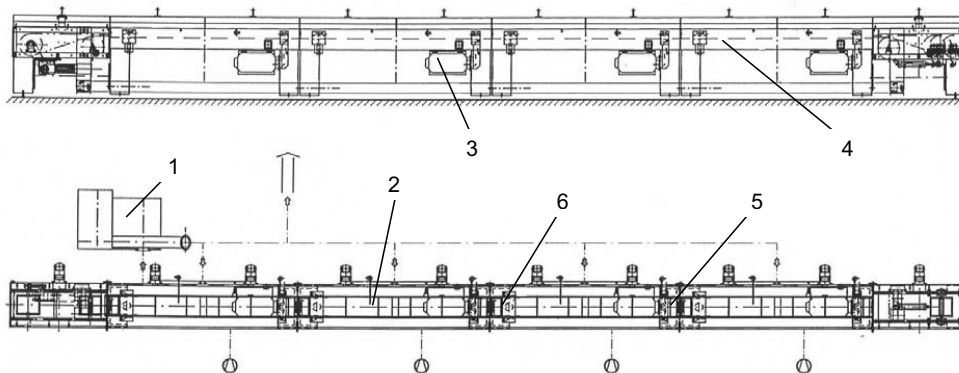


Bild 4.2: 1-Band-Heißluftvulkanisationsanlage in Modulbauweise (Zeichnung: Fa. HSM GmbH)

Die Beheizung erfolgt durch Erd- oder Flüssiggas. Die Temperatur der Heißluft beträgt üblicherweise 300–350 °C.

Das Konzept einer aus mehreren Modulen bestehenden kompletten 1-Band-Heißluftvulkanisationsanlage zur kontinuierlichen Vulkanisation von Gummiprofilen bei hoher Produktionsgeschwindigkeit zeigt Bild 4.2.

Über den Absaugventilator 1 wird die Abluft aus dem Arbeitskanal abgesaugt und zu ca. 80 % über den Luftleitkanal 2 zum Gasbrenner 3 geleitet. Nachdem die Luft erneut auf eine Temperatur von 320–350 °C erwärmt worden ist, gelangt sie über Einblasstutzen 5 zurück in den Arbeitskanal 4. Der Abstand der Einblasstutzen voneinander beträgt ca. 3 m. Die Mengen der an den einzelnen Einblasstutzen eingeblasenen Heißluftströme sind unterschiedlich. Die bereits



Bild 4.3: Heißluftvulkanisationsanlage (Foto: Fa. HSM GmbH)

Energie- rückgewinnung

verbrauchte und zum Teil abgekühlte Abluft wird an den Absaugstutzen über den Abluftkanal 6 vom Absaugventilator abgesaugt und erneut dem Brenner zugeführt.

Zur Energierückgewinnung und zur Verringerung der Umweltbelastung wird die Heißluft zu ca. 80 % im Kreislauf umgewälzt. Die mit Schadstoffen angereicherten verbleibenden ca. 20 % der Abluft werden nachträglich über eine Nachverbrennungsanlage entsorgt und gereinigt. Die Abgasnachverbrennung kann entweder thermisch durch übliche Brenntechnik bei hohen Temperaturen oder katalytisch durch geeignete Katalysatortechnik bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen erfolgen. Die Luftmengendifferenz wird als Frischluft wieder in die Anlage eingespeist. Ein Verbrennungsluftventilator je Modul sorgt für ausreichende Frischluftzufuhr für den Brenner.

Bild 4.3 zeigt die Gesamtansicht einer 1-Band-Heißluftvulkanisationsanlage im geschlossenen Zustand.

Andere Ausführungen mit drei Transportbändern übereinander zur Verringerung der Anlagenlänge verlangen eine zweifache Umlenkung der Profile, wodurch Verformungen der Profile nicht ausgeschlossen werden können. Neuere Anlagen verzichten daher aus Qualitätsgründen auf eine Umlenkung und werden als 1-Bandanlagen konzipiert, was allerdings den Nachteil einer größeren Baulänge hat.

4.2.3 Schock-Heißluftanlage

Eine Sonderbauart von Heißluftvulkanisationsanlagen zur Verbesserung der Produktqualität ist die so genannte Schock-Heißluftanlage mit einer nur geringen Länge von ca. 3 bis 6 m, jedoch mit einer effektiven Luftführung und hoher Luftgeschwindigkeit. Die Temperatur der Heißluft beträgt ca. 500–600 °C, wodurch eine sehr hohe Wärmeeinbringung erreicht wird.

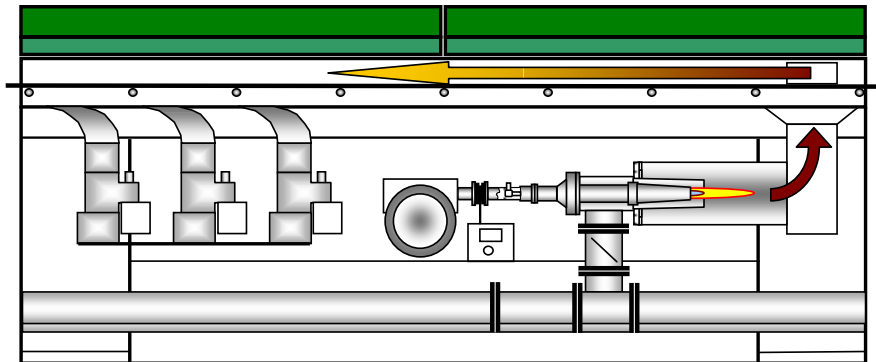


Bild 4.4: Kombination aus UHF-Vulkanisationsanlage mit integrierter Schock-Heißluftstrecke (Zeichnung: Fa. HSM GmbH)

Diese Art von Anlagen werden speziell für solche Profile eingesetzt, bei denen eine schnelle Oberflächenvernetzung erforderlich ist. Besonders bei der Vernetzung von Moosgummi kommt es darauf an, zunächst einmal ein gutes Schäumungsbild über den gesamten Querschnitt des Profils zu erhalten und gleichzeitig die Profiloberfläche möglichst glatt zu halten. Natürlich hängen beide Kriterien in erheblichem Maße von den Eigenschaften der verarbeiteten Kautschukmischung ab.

Durch die spezielle Ausführung der Transporteinrichtung mit einer angetriebenen Rollenstrecke wird eine schonende Profilabstützung beim Transport sicher gestellt, so dass besonders bei Moosgummi und anderen empfindlichen Profilen Bandabdrücke vermieden und eine sehr gute Oberflächenqualität erreicht werden kann.

Die Beheizung erfolgt über Erd- oder Flüssiggas, wobei die Heißluft zur besseren Energieausnutzung im Umwälzverfahren immer wieder erwärmt wird. Das Verfahren ist sehr energieintensiv, da große Luftmengen erhitzt werden und gleichzeitig mit einem sehr hohen Druck in die Vulkanisationswanne eingeblasen werden müssen.

Bild 4.4 zeigt den Aufbau einer Kombination aus UHF-Anlage mit integrierter gasbeheizter Schock-Heißluftstrecke.

schnelle Oberflächenvernetzung

4.2.4 UHF-Anlagen (Mikrowellen-Anlagen)

4.2.4.1 Grundprinzip

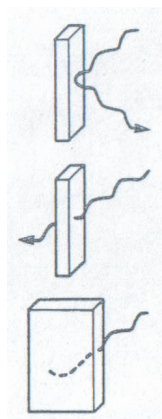
Ultrahochfrequenz-(UHF)-Anlagen sind Anlagen zur gezielten Erzeugung von ultrahochfrequenten Mikrowellen. Sie können überall dort eingesetzt werden, wo es darum geht, in möglichst kurzer Zeit eine Erwärmung geeigneter Werkstoffe zu erreichen. Die häufigste industrielle Anwendung ist die bei der kontinuierlichen Vulkanisation von endlos extrudierten Gummiprofilen. Hierbei gilt es, in möglichst kurzer Zeit den frisch extrudierten, noch unvulkanisierten Profilstrang durch Passieren eines UHF- bzw. Mikrowellenfeldes auf die erforderliche Vulkanisationstemperatur zu bringen und den Vernetzungsvorgang einzuleiten.

Mikrowellen

4.2.4.2 Wirkungsweise

Eigenschaften

Strahlungsenergie	Mikrowellen sind nicht sichtbare ultrahochfrequente (UHF) elektromagnetische Wellen, die von bestimmten Stoffen absorbiert werden können, d. h. dass die in einem Energiefeld vorhandene Strahlungsenergie im Inneren der Stoffe direkt in Wärme umgewandelt wird.
Wellenlänge	Die charakteristische Kenngröße ist die Wellenlänge bzw. die Frequenz des Energiefeldes. Für industrielle Anwendungen werden die UHF-Frequenzen 915 bzw. 2450 Mhz benutzt. Die hiermit erzielbaren Leistungen liegen für industrielle Anlagen zwischen 1 kW für Vorwärmanlagen und ca. 50 kW für Großanlagen. Die Wirkungsweise der Mikrowellen besteht darin, dass diese abhängig von den reaktiven Eigenschaften der im Strahlungsfeld befindlichen Stoffe entweder durchgelassen, reflektiert oder absorbiert werden (vgl. Bild 4.5).
Reflektion	An metallischen Oberflächen werden Mikrowellen nahezu vollständig reflektiert. Daher können sie nicht absorbiert werden, und es kann keine Erwärmung stattfinden. Deswegen werden metallische Werkstoffe als Hohlleiter zur Führung von Mikrowellen und als Wandabschirmungen für UHF-Anlagen zur Begrenzung des Arbeitsraumes verwendet.
Transparenz	Andere Stoffe hingegen sind für Mikrowellen ähnlich transparent wie z. B. Glas für Licht, so dass die Mikrowellen weder reflektiert noch absorbiert werden. Eine Erwärmung solcher Stoffe im Mikrowellenfeld findet daher ebenfalls nicht statt. Entsprechend werden solche Stoffe in UHF-Anlagen dort eingesetzt, wo keine Absorption gewünscht wird z. B. für Transportbänder.
Absorption	Wiederum andere Stoffe besitzen die Eigenschaft, die Mikrowellen mehr oder weniger vollständig zu absorbieren. Dadurch wird die Strahlungsenergie vom Körper aufgenommen und in Wärme umgesetzt, so dass eine Erwärmung von innen heraus erfolgt. Die Aufheizdauer und die erreichbare Temperatur des zu erwärmenden Produktes ist hierbei abhängig von der Strahlungsintensität, dem Absorptionsvermögen des Materials, gekennzeichnet durch die dielektrische Konstante, und der Masse des zu erwärmenden Körpers.



Reflektion

Die UHF-Energie wird von Metalloberflächen reflektiert. Die Metalloberfläche wird nicht erwärmt.

Transmission (Durchdringung)

Viele Stoffe sind transparent für UHF-Wellen. Die Energie durchdringt diese Stoffe, ohne sie zu erwärmen.

Absorption

UHF-absorbierende Stoffe nehmen die UHF-Energie in unterschiedlicher Intensität auf und werden dadurch erwärmt. Polare Kautschuksorten und Ruß sind hochrangige UHF-absorbierende Stoffe.

Bild 4.5: Eigenschaften von Mikrowellen

Die hierfür erforderliche Schneckendrehzahl n [1/min] errechnet sich aus der spezifischen Ausstoßleistung G/n [(kg/h)/(1/min)] (siehe Kapitel 1 „Grundlagen der Kautschukextrusion“, Abschnitt 5.2.3) des Extruders zu

$$\begin{aligned} n \text{ [1/min]} &= G / (G/n) \\ &= 60 \text{ [min/h]} \times v_L \text{ [m/min]} \times g \text{ [kg/m]} / (G/n) \text{ [(kg/h)/(1/min)]} \quad (5.3) \end{aligned}$$

**Arbeits-
geschwindigkeiten**

Da alle Anlagenkomponenten hinsichtlich der Liniengeschwindigkeit aufeinander abgestimmt sein müssen, verfügen sie über eigene frequenzgeregelte Drehstromantriebe. Durchhangreglungen oder Tänzerrollen zwischen den einzelnen Komponenten stellen sicher, dass material- oder temperaturabhängige Änderungen wie z. B. durch Schrumpfen der Profile oder durch andere Einflüsse ausgeregelt werden. Übliche Arbeitsgeschwindigkeiten liegen im Bereich von $v_L = 10\text{--}30$ m/min.

5.2 Kühlstrecke zum Abkühlen von Gummiprofilen

Unmittelbar im Anschluss an die Vulkanisationsanlage werden die fertig vernetzten Profilstränge in einer Kaltwasserkühlstrecke abgekühlt, um eine Übervulkanisation mit negativen Auswirkungen auf die physikalischen Eigenschaften zu vermeiden.

**Verdampfungs-
energie**

Die Kühlstrecke kann ein einfaches wassergefülltes Tauchbecken sein. Üblicherweise werden jedoch Wassersprühkühlanlagen eingesetzt, bei denen die Profiloberfläche während des Durchlaufens mittels feinstrahliger Hohlkegel-Sprühdüsen über die gesamte Länge mit Kaltwasser benetzt wird. Dadurch wird die Verdampfungsenergie des Wassers zur Verbesserung des Wärmeübergangs und zur effektiven Kühlung genutzt. Beim Verlassen der Kühlstrecke passiert das Gummiprofil eine Trockendüse. Diese Düse ist austauschbar und umschließt das Gummiprofil recht eng. Zur einfachen Handhabung ist diese Trockendüse nach vorne offen. Ein Ringverdichter sorgt für eine ausreichende Luftströmungsgeschwindigkeit. Der Abzug erfolgt üblicherweise durch einen Raupenabzug.

**Band-
geschwindigkeiten**

Der Transport der Profilstränge durch die Kühlstrecke erfolgt durch ein von einem frequenzgeregelten Drehstrommotor angetriebenes Förderband. Die baulich bedingten Bandgeschwindigkeiten betragen bis zu 40 m/min. Die Länge der Kühlstrecke richtet sich nach der Arbeitsgeschwindigkeit, der Kühlwassertemperatur und der vorgegebenen Endtemperatur für das Profil. Üblich sind Längen von 6–12 m. Der Wasserverbrauch liegt bei 0,5–2 l/min pro Düse.

Bild 5.1 zeigt den Aufbau und die Funktion einer typischen Kaltwassersprühkühlstrecke in Modulbauweise für ein- oder mehrsträngige Profile aus einer oder mehreren Kautschuksorten.

Die Bilder 5.2 und 5.3 zeigen die Gesamtansicht einer Kaltwassersprühkühlstrecke im geöffneten Zustand und die Trockenblasvorrichtung mit den Ringdüsen zum Abblasen des Wassers.

Die Abkühlwanne ist über die gesamte Länge geschlossen und vollständig gegen den Austritt von Kühlwasser abgedichtet. Die Hauben werden durch Pneumatikzylinder geöffnet bzw. geschlossen, wodurch eine gute Zugänglichkeit zum Innenraum und zu den Profilen gewährleistet ist. Die gesamte Anlage ist aus Edelstahl gefertigt.

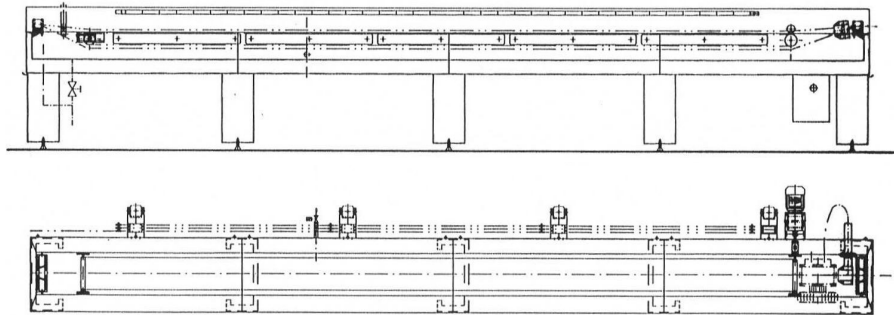


Bild 5.1: Kaltwassersprühkühlstrecke in Modulbauweise, Gesamtlänge 8–10 m
(Zeichnung: Fa. HSM GmbH)



Bild 5.2: Kaltwassersprühkühlstrecke (Foto: Fa. HSM GmbH)



Bild 5.3: Trockenblasvorrichtung (Foto: Fa. HSM GmbH)

5.3 Beflockungsanlagen

Veredelungs- einrichtungen

Die Beflockung ist eine vorzugsweise für Automobilprofile häufig angewendete Art der Veredelung. Die Sichtbereiche der Profile für Innenräume oder für Fensterführungen werden hierbei mit extrem kurzen und dünnen Kunststofffasern versehen. Dadurch entsteht eine optisch ansprechende, samtartige Oberfläche, die durch unterschiedlich eingefärbte Flockfasern der Fahrzeuginnenausstattung farblich angepasst werden kann. Außerdem können beflockte Profile kleinere Fremdkörper und Verunreinigungen wie Staub- und Sandkörper einbetten und so z. B. bei Führungen für bewegliche Seitenfenster ein Zerkratzen der Scheiben vermindern. Beflockungsanlagen sind daher wichtige Nachbehandlungs- bzw. Veredelungseinrichtungen in Extrusionslinien, die zur kontinuierlichen Herstellung von Gummiprofilen insbesondere für die Automobilindustrie dienen.

5.3.1 Fertigungsverfahren zur kontinuierlichen Beflockung

Die Beflockung kann nach zwei unterschiedlichen Fertigungsverfahren erfolgen. Bei der am häufigsten angewandten Methode erfolgt die Beflockung erst nach der Vulkanisation. Aufrauen, Kleberauftragung, Beflockung und Trocknung sind getrennte Arbeitsgänge. Alternativ finden bei der zweiten Methode die Vulkanisation und die Klebertrocknung in einem Arbeitsgang statt.

5.3.1.1 Beflockung nach der Vulkanisation

Haftverbesserung

Bei diesem Verfahren wird zur Vulkanisation eine Kombination aus UHF- und Heißluft- oder Salzbadvulkanisation eingesetzt. Bei der Heißluftvulkanisation wird ein Heißluftstrom mit sehr hoher Luftgeschwindigkeit durch den Vulkanisationskanal geleitet, um eine schnelle Vernetzung der Außenhaut zu erreichen. Nach dem Vulkanisationsvorgang und nach der Abkühlung und Trockenblasung der Profile muss die Oberfläche zur Haftverbesserung des nachfolgend aufgetragenen Klebmittels vorbehandelt werden. Im Folgenden sind die einzelnen Arbeitsschritte aufgeführt:

- Oberflächenvorbehandlung,
- Kleberauftrag,
- Flockaufbringung,
- Klebertrocknung,
- Abkühlung und Weiterverarbeitung (Aufwickeln, Schneiden o. a.).

Die Vorteile des Verfahrens bestehen darin, dass die Vulkanisationszeiten vergleichsweise kurz sind und dass auch Moosgummiprofile problemlos beflockt werden können. Nachteilig ist hingegen, dass eine Vorbehandlung der Profiloberflächen erforderlich ist und dass ein gleichmäßiges Auftragen des Klebers vergleichsweise schwierig ist.

5.3.1.2 Beflockung vor der Endvulkanisation

Bei diesem Verfahren wird ausschließlich mit Heißluft vulkanisiert. Um zu vermeiden, dass der Flock verbrennt, kann nur mit einer vergleichsweise niedrigen Temperatur vulkanisiert werden. Der Kleberauftrag erfolgt direkt am Extrusionswerkzeug durch ein vorgeschaltetes zweites Mundstück. Die Beflockung findet unmittelbar dahinter statt. Die einzelnen Arbeitsschritte sind wie folgt:

Kleberauftrag

- Extrusion,
- Kleberauftrag am Mundstück,
- Beflockung,
- Vulkanisation und Klebertrocknung,
- Abkühlung und Weiterverarbeitung (Aufwickeln, Schneiden o. a.).

Die Vorteile bestehen darin, dass keine Vorbehandlung der Profilloberfläche erforderlich ist und dass eine exakte Positionierung des Klebers mit sehr guter Oberflächenhaftung möglich ist. Nachteilig ist dagegen, dass die Vulkanisationstemperatur vergleichsweise niedrig ist, weswegen die Heißluftvulkanisationsanlage vergleichsweise lang bzw. die Liniengeschwindigkeit vergleichsweise gering sein muss.

5.3.2 Beflockungsvorgang

5.3.2.1 Vorbehandlung

Die heute überwiegend eingesetzten EPDM-Mischungen sind meist nicht besonders geeignet, den Kleber aufzunehmen. Eine Vorbehandlung der Profilloberflächen vor dem Kleberauftrag zur Verbesserung des Haftvermögens ist also zwingend erforderlich. Folgende Methoden zur Vorbehandlung sind üblich:

Vorbehandlung

- Mechanisches Aufrauverfahren,
- Corona-Verfahren,
- Fluorisierung der Oberfläche.

Mechanisches Aufrauverfahren

Beim mechanischen Aufrauverfahren wird die Oberfläche des zu beflockenden Bereichs mit Hilfe von Bürsten bearbeitet. Hierdurch wird die Vulkanisationshaut der Profilloberfläche mechanisch aufgerissen und die Fläche für die Verankerung des Klebers vergrößert. Das aufzurauende Profil muss dabei präzise geführt werden und die Bürsten müssen in allen Ebenen verstellbar sein, um alle zu beflockenden Bereiche des Profils bearbeiten zu können. Die Aufraubürsten bestehen üblicherweise aus Synthefasern mit eingebetteten Schleifpartikeln aus Korund, die zu Scheibenpaketen zusammengefasst werden. Im Anschluss an den Aufrauvorgang wird das Profil in einer Reinigungsstation durch weiche Bürsten vom Schleifstaub gesäubert. Die Bilder 5.4 und 5.5 zeigen eine komplette Aufraustation im geöffneten Zustand sowie die Anordnung der Bürsten.

Bürsten

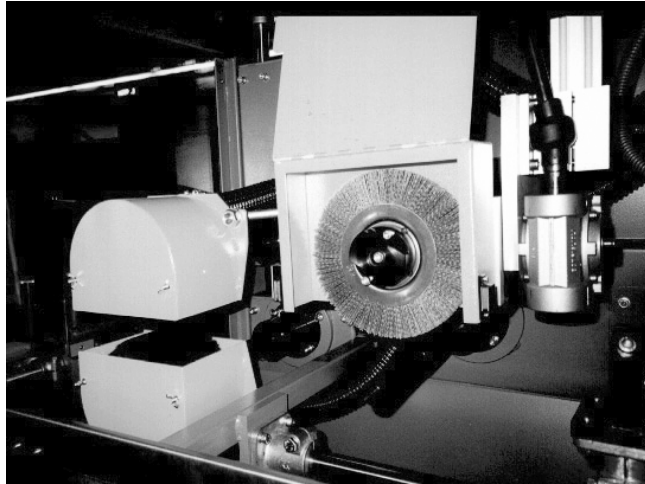


Bild 5.4: Bürstenanordnung (Foto: Fa. HSM GmbH)



Bild 5.5: Mechanische Aufraustation (Foto: Fa. HSM GmbH)

Raupenabzug

Um gute Aufrauergenergebnisse zu erzielen, muss das Profil unter Zug bearbeitet werden. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, vor und nach der Aufraustation einen Raupenabzug zu installieren, um das Profil im Bereich der Station unter konstanter Spannung zu halten, ohne dass sich diese Spannung bis zum Extrusionswerkzeug hin auswirken kann.

Corona-Verfahren

Beim Corona-Verfahren wird die Profiloberfläche durch eine Hochspannungs-Funkenentladung behandelt. Hierbei wird die oberste Molekülschicht der Oberfläche durch Beschuss mit Elektronen und Ionen in ihrer Ladung verändert. Auf dem eigentlich nicht polaren EPDM-Material werden dadurch polare Gruppen erzeugt, die geeignet sind, feste Verbindungen zum Flockkleber einzugehen.

Hochspannungs-
Funknentladung

Corona-Anlagen arbeiten mit Hochfrequenz-Hochspannungen im Bereich 5–15 kV und bei Frequenzen zwischen 15 und 30 kHz.

Die Vorteile bestehen darin, dass ein zugfreier Profiltransport möglich ist. Nachteilig ist, dass sich beim Vorgang gesundheitsschädigendes Ozon bildet, das abgesaugt werden muss, sowie dass durch den Lichtbogen Brandgefahr besteht und dass der Elektrodenabstand auf die Profilgeometrie abgestimmt werden muss. Außerdem ist diese Art von Anlagen recht störanfällig.

Brandgefahr

Fluorisierung der Oberfläche

Bei der Fluorisierung wird die Oberfläche des Profils kurzzeitig einem Gemisch aus gasförmigem elementarem Fluor und einem reaktionsträgen Inertgas ausgesetzt. Dabei entsteht eine mikroskopisch feine Grübchenstruktur an der Profiloberfläche. Dieser, durch das extrem hohe Oxidationspotenzial von Fluor hervorgerufene Effekt, erzeugt eine ausgezeichnete Basis für die Haftung des Klebers. Für dieses Verfahren sind heute bereits Durchlaufanlagen, die in die Linie integriert werden können, erhältlich.

Grübchenstruktur

Die Vorteile bestehen darin, dass eine sehr gute Haftfähigkeit auch bei EPDM erreicht wird sowie dass die Profilgeometrie keinen Einfluss hat und dass ein spannungsfreier Transport der Profile erfolgen kann. Nachteilig ist, dass die Kosten für diese Art von Anlagen sehr hoch sind, dass hohe Sicherheitsauflagen zu erfüllen sind und dass die Anlagen einen hohen Wartungsaufwand benötigen.

hohe Sicherheits-
auflagen

5.3.2.2 Kleberauftrag

Das Auftragen des Klebers erfolgt üblicherweise nach einer von drei verschiedenen Arten (siehe Bild 5.6):

- Walzenauftrag,
- Aufspritzen,
- Pinselauftrag.

Selbstverständlich muss bei allen Auftragsarten die Kleberkabine explosionsgeschützt und mit einer wirksamen Absaugung versehen sein.

Walzenauftrag

Beim Walzenauftrag wird der Kleber mittels perforierter Walzen auf die Oberfläche des Profils aufgetragen. Die zu beflockenden Bereiche der Profile müssen hierzu entweder durch Verformung über den Walzendruck oder durch entsprechende Führungen möglichst parallel zu den Walzen ausgerichtet werden.

Walzendruck

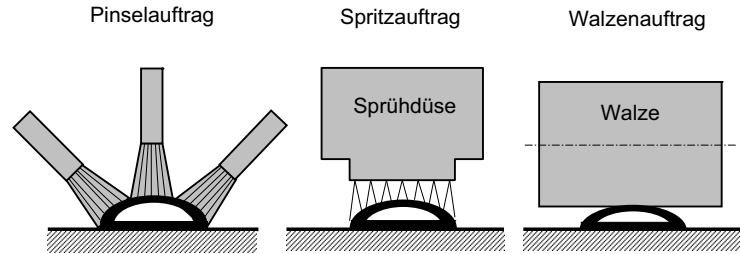


Bild 5.6: Verfahren zur Kleberaufbringung und Auswirkungen auf das Profil

Spritzauftrag

Kleberbegrenzung Beim Spritzauftrag wird der Kleber durch Mikrodüsen, die entsprechend der Profilgeometrie möglichst senkrecht zur Profilloberfläche angeordnet sind, aufgebracht. Dieses Verfahren kann vor allem dann angewendet werden, wenn keine exakte Kleberbegrenzung erforderlich ist.

Der Vorteil besteht darin, dass der Kleber genau und gleichmäßig dosiert und verteilt werden kann. Nachteilig ist dagegen, dass das Verfahren nicht anwendbar ist, wenn eine exakte Kleberbegrenzung gefordert wird, sowie dass die Düsen häufig verstopfen und dass hohe Kosten wegen notwendiger Nassabscheider anfallen.

Pinselauftrag

Dosierung Beim Pinselauftrag werden ein oder mehrere kleine Pinsel so angeordnet, dass der Kleber gleichmäßig auf die zu beflockende Oberfläche des Profils aufgetragen wird. Hierbei ist zu beachten, dass der Auftrag im Überlappungsbereich der einzelnen Pinsel nicht zu dick wird. Die Dosierung des Klebers kann entweder durch Tropfenauftrag vor dem Pinsel oder durch den hohlgebohrten Pinselschaft erfolgen. Der Kleber wird – wie beim Spritzauftrag – aus einem Druckbehälter oder durch Schlauchpumpen zugeführt. Die Bilder 5.7 und 5.8 zeigen eine Gesamtansicht der Kleberauftragsstation mit Vorratsbehältern und die Anordnung der Pinsel mit Kleberzuführung.

genaue Kantenbegrenzung Die Vorteile bestehen darin, dass eine sehr genaue Kantenbegrenzung möglich ist, dass die Klebermenge sehr genau dosiert werden kann und dass eine Absaugung nur unmittelbar im Bereich der Kleberaufbringung erforderlich ist. Nachteilig ist wiederum, dass wegen der Gefahr der Pinselaustrocknung eine regelmäßige Überwachung stattfinden muss und dass die Pinsel bei Störungen, z. B. infolge von Fehlstellen im Profil, unter Umständen neu justiert werden müssen.

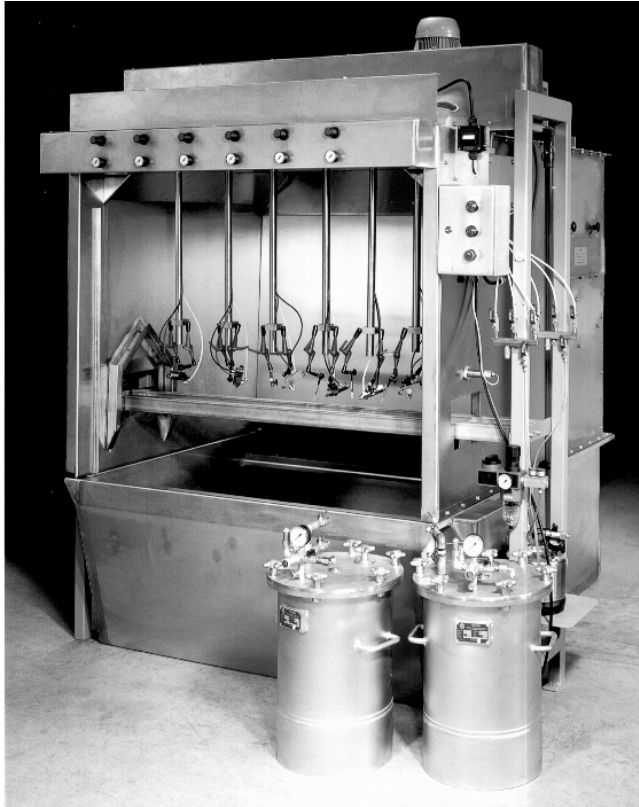


Bild 5.7: Kleberauftragsstation (Foto: Fa. HSM GmbH)



Bild 5.8: Pinselanordnung und Kleberzuführung (Foto: Fa. HSM GmbH)

5.3.2.3 Flockauftragung

Aufbau und Funktion von Beflockungsanlagen

Ausrichtung der Fasern Nachdem der Profilstrang vorbehandelt und mit Kleber versehen ist, erfolgt im nächsten Arbeitsschritt die eigentliche Beflockung. Die aus einem Kunststoffmaterial bestehenden Flockfasern werden aus einem Vorratsbehälter zugeführt und in der Beflockungskabine auf das durchlaufende Profil geblasen. Die Ausrichtung der Fasern erfolgt elektrostatisch mittels eines durch Elektroden erzeugten elektrischen Feldes. Hierbei ist zu beachten, dass eine gleichmäßig dichte und homogene Flockschiicht erreicht wird, bei der die einzelnen Flockfasern rechtwinklig zur Profilloberfläche ausgerichtet sind (Bild 5.9a). Nur dann ist in Verbindung mit der richtigen Vorbehandlung und dem richtigen Kleberauftrag die Gewähr für einen guten optischen Eindruck und ein gutes Abriebverhalten gegeben. Falls die einzelnen Flockfasern nicht senkrecht im Kleber verankert sind, sondern flachwinklig anliegen (so genanntes „Hundefell“), ist keine ausreichende Abriebbeständigkeit zu erwarten (Bild 5.9b).

Elektroden Die Anordnung und Form der Elektroden richtet sich nach der Art der Beflockung. Unterschieden wird zwischen einer Normalbeflockung, die hauptsächlich für flächige und gerade Oberflächen eingesetzt wird, und einer Rundumbeflockung für gekrümmte Oberflächen. Als Weiterentwicklung der bisher üblichen fest in die Linie integrierten Beflockungsmaschinen mit einer großen Elektrode stehen heute auch bewegliche Anlagen kleinerer Bauart zur Verfügung. Diese können mittels Rollen in die Anlage ein- und ausgefahren werden, um bei farbiger Beflockung einen schnellen Farbwechsel durchführen zu können. Pro Einheit kann mit einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 6 m/min gerechnet werden. Durch Anordnung von z. B. drei Einheiten hintereinander kann die Produktionsgeschwindigkeit auf dann 18 m/min erhöht werden.

Als neueste Entwicklung sind Einzelgeräte mit schmalen, längs angeordneten Elektroden erhältlich. Mit diesen Geräten können die Fahrgeschwindigkeiten und die Qualität der Beflockung nochmals gesteigert werden. Pro Gerät sind damit selbst bei einer Rundumbeflockung noch Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 10 m/min erreichbar.

Die Bilder 5.10 und 5.11 zeigen den prinzipiellen Aufbau einer Beflockungsanlage und die Gesamtansicht.

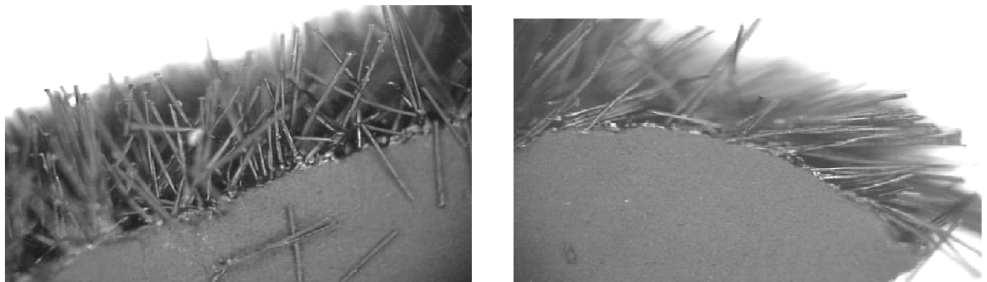


Bild 5.9: a) Korrekte Beflockung (links)
b) Ungleichmäßige Beflockung (rechts)
(Fotos: Fa. HSM GmbH)

8.3 Kurzzeichen ausgewählter Kautschuksorten und Elastomere

ABR	Acrylester-Butadien-Kautschuk
ACM	Acrylatkautschuk
ASR	Alkylensulfidkautschuk
AU	Urethankautschuk auf Polyesterbasis
BIIR	Brombutylkautschuk
BR	Butadienkautschuk
CFM	Fluorkautschuk auf Polytrifluoräthylenbasis
CIIR	Chlorbutylkautschuk
CR	Chloroprenkautschuk
EPDM	Äthylen-Propylen-Terpolymere
EPM	Äthylen-Propylen-Copolymere
EU	Urethankautschuk auf Polyätherbasis
FKM	Fluorkautschuk
FMQ	Fluorsiliconkautschuk
IIR	Butylkautschuk
IR	Isoprenkautschuk
MQ	Methylsiliconkautschuk
NBR	Nitrilkautschuk
NCR	Acrylnitril-Chloroprenkautschuk
NR	Naturkautschuk
PMQ	Siliconkautschuk mit Phenylgruppen
PUR	Polyurethan-Elastomere
Q	Siliconkautschuk
SBR	Styrol-Butadien-Kautschuk
SCR	Styrol-Chloroprenkautschuk
SIR	Styrol-Isoprenkautschuk
TPE	Thermoplastische Elastomere (Sammelbegriff)
TPE-A	Thermoplastische Copolyamide
TPE-E	Thermoplastische Copolyester
TPE-O	Thermoplastische Polyolefine
TPE-S	Thermoplastische Styrol-Blockcopolymere
TPE-U	Thermoplastische Polyurethane
TPE-V	Thermoplastische Elastomer-Blends
VMQ	Siliconkautschuk mit Vinylgruppen

9 Qualitätssicherung in der Proflextrusion

9.1 Grundsätze moderner Qualitätssicherung

Die Sicherung der Qualität nimmt, wie in fast allen Bereichen der industriellen Fertigung, inzwischen auch in der Kautschukverarbeitung einen zunehmenden Stellenwert ein. Dabei geht es in der modernen Qualitätssicherung nicht so sehr um Prüf- oder Kontrollmaßnahmen zur Feststellung von Fehlern oder um das Aussortieren von fehlerhaften Teilen. Schwerpunkte modernen Qualitätswesens sind vielmehr die Überwachung und Optimierung der Fertigungsprozesse zur Vermeidung von Fehlern und zur Verbesserung des allgemeinen Qualitätsniveaus, um so die Gesamtwirtschaftlichkeit der Produktionsprozesse zu verbessern.

Vermeidung
von Fehlern

Grundsatz modernen Qualitätsdenkens:

Fehlervermeidung statt Fehlererkennung

Die moderne Qualitätssicherung umfasst daher alle Bereiche der Fertigung vom Wareneingang der Rohstoffe, über die Materialaufbereitung, den Extrusionsprozess, die Nachbehandlung, die Produktprüfung bis zum Versand der Endprodukte.

Beim Extrusionsprozess selbst wird heutzutage die früher übliche statistische Prozessregelung (SPC) anhand von in regelmäßigen Zeitabständen entnommenen Stichproben überwiegend ersetzt durch eine kontinuierliche Prozessüberwachung mit statistischer Auswertung der die Qualität bestimmenden Verfahrensparameter unter Zuhilfenahme moderner rechnergestützter Überwachungseinrichtungen. Störgrößen, die zu Veränderungen innerhalb der Prozesse führen, können so rechtzeitig erkannt und bereits vor dem Auftreten von nicht spezifikationsgerechten Produkten korrigiert werden.

Störgrößen

9.2 Fehlerarten und Normalverteilung der Qualitätsmerkmale

Jeder Fertigungsprozess unterliegt zwei Arten von möglichen Fehlern:

- *Systematische Fehler*: Hierunter sind alle diejenigen Fehler zu verstehen, die eine Verschiebung der Qualitätslage (Mittelwert) zur Folge haben (z. B. fehlerhafte Einstellungen, Maschinendefekte, Materialänderungen usw.).
- *Zufällige Fehler*: Hierunter sind alle diejenigen Fehler zu verstehen, die bei gleich bleibender Qualitätslage (Mittelwert) eine Veränderung der Streubreite (Standardabweichung) zur Folge haben (z. B. Werkzeugverschleiß, Alterungsprozesse an den Maschineneinrichtungen, Schwankungen innerhalb der Materialeigenschaften und Einstellparameter, Umgebungseinflüsse usw.).

Verschiebung
der Qualitätslage

Veränderung
der Streubreite

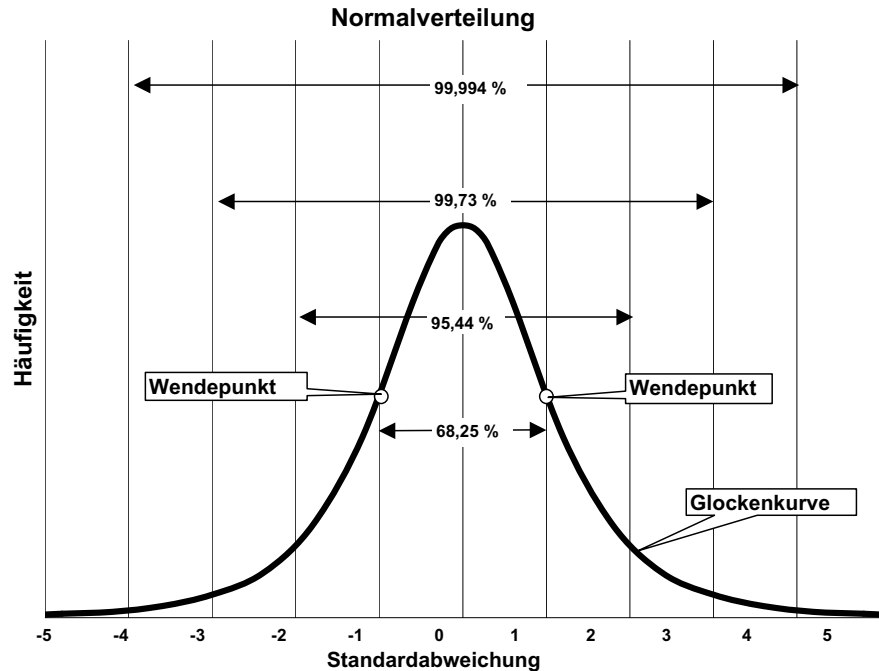


Bild 9.1: Normalverteilung der Häufigkeit von Qualitätsmerkmalen in Abhängigkeit von der Standardabweichung

- Normalverteilung** Die statistische Auswertung der überwachten Produkt- oder Prozessmerkmale (z. B. Abmessungen, Meter- oder Stückgewicht usw.) weist für eine Vielzahl von qualitätsbestimmenden Merkmalen eines Extrusionsprozesses eine so genannte Normalverteilung auf, bei der die Gesamtheit der Messwerte gleichmäßig um einen festen *Mittelwert* x_m streuen.
- Glockenkurve** Bild 9.1 zeigt die Häufigkeit der Messwerte einer Normalverteilung über die Standardabweichung. Diese weist eine glockenartige Form auf und wird daher gelegentlich auch als Glockenkurve oder nach ihrem Entdecker auch als *Gauß-Verteilung* bezeichnet.
- Basisbreite** Die Besonderheit einer jeden Normalverteilung besteht in der festen Zuordnung der Häufigkeit der Messwerte zur durch die Standardabweichung gekennzeichneten Basisbreite.

$x_m \pm \sigma$ entspricht 68,26 % aller Messwerte

$x_m \pm 2 \sigma$ entspricht 95,44 % aller Messwerte

$x_m \pm 3 \sigma$ entspricht 99,73 % aller Messwerte

Eine Verschiebung der Qualitätslage, d. h. eine Verschiebung des *Mittelwertes*, ist dabei stets ein Anzeichen für das Vorhandensein eines oder mehrerer *systematischer Fehler*. Hier muss das Bedienungspersonal unmittelbar die Ursachen ermitteln und entsprechende Abhilfemaßnahmen einleiten – wie z. B. durch Korrektur der Einstellparameter an den einzelnen Maschinenkomponenten.

Die Standardabweichung σ bzw. die *Streuung* einer solchen Normalverteilung ist ein Maß für das vorhandene Qualitätsniveau und für die Gleichförmigkeit des Prozesses. Sie ergibt sich als Folge eventuell vorhandener *zufälliger Fehler* und kann in der Regel nicht unmittelbar durch das Bedienungspersonal verändert oder korrigiert werden. Hierzu sind aufwändigere Abhilfemaßnahmen, wie z. B. Wartung, Justierung, Reparatur oder gar Ersatz der maschinellen Einrichtungen, erforderlich. Eventuell muss auch über eine geeignete Umstellung der gesamten Fertigungskette nachgedacht werden mit dem Ziel, die Störanfälligkeit insgesamt zu verringern.

**Standard-
abweichung**

9.3 Fähigkeitskennwerte

Die so genannten Fähigkeitskennwerte dienen zur Aussage über die Qualitätslage eines Fertigungsprozesses bezogen auf die Toleranzgrenzen. Außerdem sind sie ein Indiz dafür, ob ein Fertigungsprozess beherrscht wird oder nicht:

Qualitätslage

c_p, c_{pk} für den Gesamtprozess (Prozessfähigkeitskennwert)
 c_m, c_{mk} für die einzelne Maschine (Maschinenfähigkeitskennwert)

Die Fähigkeitskennwerte geben an, wie groß der Abstand der normalverteilten Messwerte zu den Toleranzgrenzen ist bzw. wie sicher der Prozess gegen eventuell auftretende Störungen ist:

$$c_p, c_m = (OT - UT) / 6 \sigma \quad (9.1)$$

$$c_{pk}, c_{mk} = \text{Min} / 3 \sigma \quad (9.2)$$

OT = obere Toleranzgrenze

UT = untere Toleranzgrenze

Min = Mindestabstand zur nächstgelegenen Toleranzgrenze (unten oder oben)

Die Bilder 9.2a bis d zeigen grafisch die Zusammenhänge zwischen der Normalverteilung eines Fertigungsprozesses und den vorgegebenen Toleranzgrenzen OT (obere Toleranzgrenze) und UT (untere Toleranzgrenze) als Maß für die erzielten Fähigkeiten.

Bild 9.2a zeigt die Normalverteilung eines beherrschten Fertigungsprozesses, bei dem der $\pm 3 \sigma$ -Bereich der Glockenkurve hinreichend weit von den vorgegebenen Toleranzgrenzen entfernt ist. Die Fähigkeitskennwerte c_p bzw. c_m sind gemäß Gleichung 9.1 größer als 1.

Bild 9.2b zeigt eine Normalverteilung bei engeren Toleranzgrenzen. Nach wie vor ist der Fertigungsprozess wegen der konstanten Lage des Mittelwertes beherrscht. Allerdings ist mit einer gewissen Anzahl von nicht spezifikationsgerechten Produkten zu rechnen, da der $\pm 3 \sigma$ -Bereich die vorgegebenen Toleranzgrenzen überschreitet. Die Fähigkeitskennwerte c_p bzw. c_m sind gemäß Gleichung 9.1 kleiner als 1. Erforderlich ist somit eine Nachprüfung aller Produktteile, um die fehlerhaften Teile auszusortieren. Als Abhilfemaßnahme müsste die maschinen- oder materialbedingte Streuung verringert werden, damit der Fertigungsprozess wieder qualitätsgerecht werden kann.

Nachprüfung