$$Fo = \frac{-\ln\left(\frac{\Theta \cdot (m + \sin(m) \cdot \cos(m))}{2 \cdot \sin(m)}\right)}{m^2} \qquad 13$$

Der Parameter m lässt sich iterativ mit Hilfe der Biot-Zahl Bi berechnen **(Gl. 14):**

$$m = \arctan\left(\frac{Bi}{m}\right) \qquad 14$$

Die Biot-Zahl ist das Verhältnis zwischen dem inneren Wärmeleitwiderstand des Kautschuks und dem äußeren Wärmeübergangswiderstand der umströmenden Luft und kann wie folgt berechnet werden **(Gl. 15):**

$$Bi = \frac{\alpha_{Luft} \cdot \frac{d_{Vulkanisat}}{2}}{\lambda_{Kautschuk}} \qquad 15$$

In der Biot-Zahl wird also der Wärmeübergangskoeffizient α der Heißluft berücksichtigt und fließt darüber in die Berechnung der Heizzeit mit ein.

Die für die Berechnung der Heiz- bzw. Vulkanisationszeit benötigten Stoffparameter in Abhängigkeit von der Temperatur sowie die Geometrie des Kanals sind in **Tabelle 1** aufgeführt.

Mit Hilfe der Fourier-Zahl und der Biot-Zahl kann nun die Heizzeit in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit für verschiedene Lufttemperaturen und Extrudatgrößen berechnet werden **(Abb. 3).** Hinsichtlich der Extrudatgeometrie wurde ein idealisierter Quader mit quadratischem Querschnitt gewählt.

Grundsätzlich zeigt sich, dass durch eine Verdopplung der Extrudat- bzw. Produktdicke die Heizzeit um einen Faktor von 2,5 gesteigert wird. Ferner hat auch die Lufttemperatur einen enormen Einfluss auf die Heizzeit. Obwohl der Wärmeübergangskoeffizient bei größerer Temperatur geringer ist, wirkt sich wie zu erwarten eine hohe Temperatur positiv auf die Heizzeit aus. Allerdings kann die Heizzeit nicht beliebig durch höhere Temperaturen gesenkt werden, da das Material sonst thermisch geschädigt wird. Den größten Effekt hat jedoch die Strömungsgeschwindigkeit der Luft. Insbesondere bei geringen Geschwindigkeiten wirkt sich eine Steigerung der Geschwindigkeit sehr deutlich aus. Ab Geschwindigkeiten von 80 bis 100 m/s wird dann ein nahezu konstanter Wert erreicht, ab dem eine weitere Steigerung der Luftgeschwindigkeit keinen Einfluss mehr hat. Hier wird der Prozess nicht mehr durch den Wärmeübergang zwischen Luft und Vulkanisat, sondern durch die Wärmeleitung innerhalb des Kautschuks dominiert. Da bei gängigen Heißluftvulkanisationsanlagen die Luftgeschwindigkeit 10 bis 15 m/s beträgt, liegt hier ein großes Potenzial zur Effizienzsteigerung von Heißluftvulkanisationsanlagen.

Durch eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit kann entweder die Heizzeit verringert, oder bei gleicher Heizzeit die benötigte Lufttemperatur reduziert werden. Neben einer Heizzeitverkürzung ist auch eine Verkürzung der Vernetzungsstrecke möglich. Dies ist insbesondere bei vernetzungskritischen Mischungen bei begrenzter Anlagenlänge relevant.

Tab 1: Parameter zur Berechnung der Heizzeit in Abhängigkeit von der Luftgeschwindigkeit

Temperaturen		Geometrie des Kanals	
Extrudattemperatur T_0	100 °C	Länge l	12 m
Solltemperatur T_{soll}	200 °C	Breite b	0,2 m
Θ für T_{Luft} = 250 °C	0,33	Höhe h	0,1 m
Θ für T_{Luft} = 400 °C	0,67	Hydraulischer Durchmesser d_h	0,13 m
Materialdaten der Luft für 250 °C		**Materialdaten der Luft für 400 °C**	
Wärmeleitfähigkeit λ	0,041382 W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit λ	0,05024 W/(m·K)
Kin. Viskosität ν	$4{,}203 \cdot 10^{-5}$ m²/s	Kin. Viskosität ν	$6{,}436 \cdot 10^{-5}$ m²/s
Prandtl-Zahl Pr	0,6993	Prandtl-Zahl Pr	0,7081
Materialdaten des Kautschuks			
Wärmeleitfähigkeit λ	0,2 W/(m·K)		
Dichte ρ	1 000 kg/m³		
Wärmekapazität c_p	2 000 J/(kg·K)		

4 Zusammenfassung

Die Energieeinbringung in das zu vulkanisierende Extrudat wird bei der Heißluftvulkanisation maßgeblich durch die konvektive Wärmeübertragung von Luft zum Kautschuk dominiert. Die thermodynamischen Zusammenhänge zeigen, dass der Wärmeübergangskoeffizient von der Lufttemperatur, dem hydraulischen Durchmesser und der Luftgeschwindigkeit abhängt. So kann durch eine Verringerung des Kanalquerschnitts der Wärmeübergangskoeffizient in doppelter Hinsicht erhöht und damit verbessert werden. Zum einen sinkt der hydraulische Durchmesser des Kanals und zum anderen wird bei konstantem Luftvolumenstrom die Luftgeschwindigkeit deutlich erhöht. Allerdings gibt es Grenzen, ab denen eine weitere Erhöhung des Wärmeübergangs ineffizient wird. Diese sind dann erreicht, wenn die Heizzeit nicht mehr durch den Wärmeübergang der Luft zum Vulkanisat, sondern durch die Wärmeleitung im Vulkanisat selbst dominiert wird.

5 Literatur

[1] F. Röthemeyer, F. Sommer, Kautschuktechnologie, Carl Hanser Verlag, München, 2006

[2] W. Hofmann, H. Gupta, Handbuch der Kautschuktechnologie, Dr. Gupta Verlag, Ratingen, 2001

[3] G. Abts, Einführung in die Kautschuktechnologie, Carl Hanser Verlag, München, 2007

[4] J. Gerlach, Hot air vulcanization of rubber profiles, Rubber World 212/4 (1995), 23

[5] A. Hill, Die kontinuierliche Vulkanisation von Elastomerdichtprofilen: Stand der Technik und Neuentwicklungen, Spritzgießen und Extrudieren von Elastomeren, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986

[6] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen, VDI-Wärmeatlas, Springer-Verlag, Berlin - Heidelberg, 2006

Impressum

Herausgeber
Dr. Heinz B. P. Gupta

Anschrift
Dr. Gupta Verlag
Am Stadion 3b,
40878 Ratingen
Ust. Nr. DE 157894980

Postanschrift
Postfach 10 13 30,
40833 Ratingen

Tel. +49 2102 9345-0
Fax +49 2102 9345-20

E-Mail info@gupta-verlag.de

Internet www.gak.de

Redaktion
Dr. Ernst Debie (Chefredakteur, v.i.S.d.P.)
Dr. Stephanie Waschbüsch
(Stellvertretende Chefredakteurin)
Dr. Heinz B. P. Gupta
Dr. Isabella Kappner
Dipl.-Biol. Markus Linden

in memoriam Dipl.-Chem. Frank A. Gupta †

Freie Mitarbeiter
Dr. Stefan Albus (ALS)
Jiri G. Drobny (JD)
Dr. Hermann Fries (HF)
Prof. Dr. Dr. Günter Grundke (GG)
Gert F. Hartmann (GFH)
Siegfried Heimlich (SH)
Dr. Franz Otto (FO)
David Shaw (DS)
Dr. Horst-E. Toussaint (HET)
David Vink (DV)

Redaktionsassistenz
Patrizia Schmidt
Tel. +49 2102 9345-12

Abonnements
Noemi Jäger
Tel. +49 2102 9345-18

Anzeigen
Indira Gupta, Julian Bäumer
Tel. +49 2102 9345-15

Layout
Ulrich Gewehr, Max Godenrath
Tel. +49 2102 9345-18

Erscheinungsweise:
12 Ausgaben 2016
Postvertriebsnummer 4637
ISSN 0176-1625

Bankverbindungen
Deutsche Postbank AG
IBAN DE95 3004 0000 0858 7982 00
BIC COBADEFFXXX

Commerzbank Düsseldorf
IBAN DE43 3007 0024 0470 7170 00
BIC DEUTDEDBDUE

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen. Oft handelt es sich um gesetzlich geschützte eingetragene Warenzeichen, auch wenn sie nicht ausdrücklich als solche gekennzeichnet sind.

Abonnement-, Bezugs- und Lieferbedingungen:
Jahresabonnementpreis 280,- EUR (zzgl. Versandkosten). Einzelheft 25,- EUR (Inlandspreise verstehen sich inkl. der jeweils gültigen Mehrwertsteuer). Bestellungen nehmen der Verlag und alle Buchhandlungen im In- und Ausland entgegen. Eine neue Abonnementbestellung gilt zunächst nur für das laufende Kalenderjahr. Das Abonnement verlängert sich automatisch, wenn nicht sechs Wochen vor Ablauf des Kalenderjahres schriftlich gekündigt wird. Die Abonnementgelder werden jährlich im Voraus in Rechnung gestellt und bei Teilnahme am Lastschriftverfahren automatisch abgebucht. Sollte die Fachzeitschrift aus Gründen, die nicht vom Verlag zu vertreten sind, nicht geliefert werden können, besteht kein Anspruch auf Nachlieferung oder Erstattung vorausbezahlter Bezugsgelder. Gerichtsstand für Vollkaufleute ist Ratingen, für alle Übrigen gilt dieser Gerichtsstand, sofern Ansprüche im Wege des Mahnverfahrens geltend gemacht werden.

Urheber- und Verlagsrecht:
Mit Namen oder Signum des Verfassers gekennzeichnete Artikel sind nicht unbedingt die Meinung der Redaktion. Unverlangte Manuskripte werden nur zurückgesandt, wenn Rückporto beigefügt ist. Der Verlag setzt voraus, dass der Autor Inhaber der Urheber- und Verwertungsrechte hinsichtlich sämtlicher Bestandteile der Einsendung ist, also auch bezüglich miteingesandter Abbildungen, Tabellen usw. Mit Annahme des Manuskripts gehen das Recht der Veröffentlichung sowie die Rechte zur Übersetzung, zur Vergabe von Nachdruckrechten, zur elektronischen Speicherung in Datenbanken, zur Herstellung von Sonderdrucken, Fotokopien und Mikrokopien an den Verlag über. Die Zeitschrift und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der durch das Urheberrechtsgesetz festgelegten Grenzen ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig.

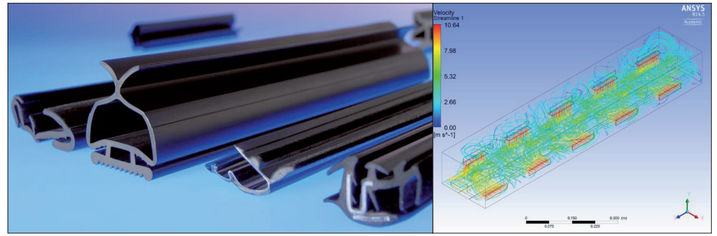
GAK Gummi Fasern Kunststoffe

Fachmagazin für die Polymerindustrie

Sonderdruck

Auswirkungen von Betriebsparametern in der Heißluftvulkanisation

Ganzheitliches Energiekonzept für die Heißluft-Vulkanisation mittels innovativer Luftführung und Wärmeübertragung



Fachbeitrag von:
Sebastian Brockhaus, M.Sc., Kunststofftechnik Paderborn (KTP)
Prof. Dr. Volker Schöppner, Professor für Kunststoffverarbeitung
Christian Penner, Kunststofftechnik Paderborn (KTP), Universität Paderborn
Jens Möckel, Geschäftsführer der Gerlach Maschinebau GmbH, Nettetal

GERLACH MASCHINENBAU
Gerlach Maschinenbau GmbH
Berger Feld 3-5, 41334 Nettetal
Tel: +49 (0)2153-7372-60
info@gerlach-maschinen.de
www.gerlach-maschinen.de

UNIVERSITÄT PADERBORN
Die Universität der Informationsgesellschaft

Fakultät für Maschinenbau
Kunststofftechnik Paderborn
Verein zur Förderung der Kunststofftechnologie e.V.

GEFÖRDERT VOM
Bundesministerium für Bildung und Forschung

BETREUT VOM
PTKA
Projektträger Karlsruhe
Karlsruher Institut für Technologie

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in der Fördermaßnahme „KMU-innovativ: Ressourcen- und Energieeffizienz" (Förderkennzeichen 02PK2468) gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Dr. Gupta Verlag

69. Jahrgang, Juli 2016

07| 2016

Auswirkungen von Betriebsparametern in der Heißluftvulkanisation

V. Schöppner, S. Brockhaus, C. Penner, J. Möckel

Das Heißluftvulkanisieren gehört zur Klasse der drucklosen kontinuierlichen Vulkanisationsprozesse und zählt dabei zu den ältesten Verfahren. Die für die Vulkanisation notwendige Wärmeübertragung auf das Extrudat geschieht dabei durch Heißluft. Neben der Lufttemperatur hat auch die Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Turbulenz der Strömung signifikanten Einfluss auf den Temperaturverlauf innerhalb des Profils. Ein Indikator für die Effizienz der Energieeinbringung ist der Wärmeübergangskoeffizient der Luft in Abhängigkeit von der Strömungsform (laminar oder turbulent), der Strömungsgeschwindigkeit, der Temperatur sowie der durchströmten Kanalgeometrie. Es werden die Auswirkungen von Betriebsparametern auf den Wärmeübergangskoeffizienten in der Heißluftvulkanisation vorgestellt und diskutiert.

The hot air vulcanisation belongs to the class of pressureless continuous curing processes and counts among the oldest procedures as well. The heat transfer to the extrudate – necessary for the vulcanisation – is effected by hot air. In addition to the air temperature the flow velocity and the turbulence of the flow have significant influence on the temperature profile in the extrudate. An indication for the efficiency of the energy input is the heat transfer coefficient of the air depending on the flow behaviour (laminar or turbulent), the flow velocity, the temperature as well as the channel geometry being passed through. The effects of operating parameters on the heat transfer coefficient in the hot air vulcanisation will be presented and discussed.

1 Einleitung

Das Heißluftvulkanisieren gehört zur Klasse der drucklosen kontinuierlichen Vulkanisationsprozesse und zählt dabei zu den ältesten Verfahren [1 – 3]. Die für die Vulkanisation notwendige Wärmeübertragung auf das Extrudat geschieht dabei durch Heißluft, die je nach System an einem oder zwei Ende(n) in den Kanal mit einer gewissen Strömungsgeschwindigkeit eingebracht wird. Die Vermeidung von dort entstehenden Leckverlusten kann durch bestimmte Optimierungen nach [4] erreicht werden. Der kontinuierliche Transport des Extrudats durch die Anlage erfolgt über Gewebebänder oder Rollenbahnen, wobei die Extrudatgeschwindigkeit durch den vorgelagerten Extrusionsprozess bestimmt wird.

Dabei hat neben der Lufttemperatur auch die Strömungsgeschwindigkeit bzw. die Turbulenz der Strömung signifikanten Einfluss auf den Temperaturverlauf innerhalb des Profils [1, 2, 5]. Ein Maß für die Effizienz der Energieeinbringung ist der Wärmeübergangskoeffizient α der Luft in Abhängigkeit von der Strömungsform (laminar oder turbulent), der Strömungsgeschwindigkeit, der Temperatur sowie der durchströmten Geometrie. Im Folgenden werden die Auswirkungen von Betriebsparametern auf den Wärmeübergangskoeffizienten in der Heißluftvulkanisation vorgestellt und diskutiert. Hier wird jedoch nicht auf die werkstoffliche Seite der Vulkanisation, sondern einzig auf verfahrenstechnische Einflussgrößen eingegangen.

Sebastian Brockhaus, M. Sc.
sebastian.brockhaus@ktp.upb.de
Prof. Dr. Volker Schöppner
Professor für Kunststoffverarbeitung
Christian Penner
Kunststofftechnik Paderborn (KTP),
Universität Paderborn, Paderborn

Jens Möckel
Geschäftsführer
Gerlach Maschinenbau GmbH, Nettetal

2 Grundlagen

2.1 Laminare und turbulente Strömung

Die in einem Heißluftvulkanisationskanal herrschenden Luftströmungen können grundsätzlich in laminar und turbulent **(Abb. 1)** klassifiziert werden. Eine laminare Strömung weist weder Verwirbelungen noch Querströmungen auf und wird auch als Schichtenströmung bezeichnet. Meistens sind die Strömungsgrößen über die Zeit konstant, sodass dann auch von einer stationären Strömung gesprochen werden kann. Bei einer turbulenten Strömung hingegen liegen deutliche Schwankungen der Strömungsgrößen vor, was zu einem Impuls quer zur Strömungsrichtung führt. Der Strömungszustand ist durch scheinbar regellose Verwirbelungen gekennzeichnet, wodurch ein zusätzlicher Energieaustausch stattfindet. Durch turbulente Strömung liegt also ein verbesserter Wärmetransport vor.

Ein Maß für die Strömungsform ist die sogenannte Reynolds-Zahl. Sie ist definiert als Quotient aus dem Produkt der Strömungsgeschwindigkeit und dem hydraulischen Durchmesser und aus der kinematischen Viskosität des Mediums **(Gl. 1):**

$$Re = \frac{v \cdot d_h}{\nu(T)} \qquad 1$$

Die kinematische Viskosität ν ist temperatur- und druckabhängig und ergibt sich aus der dichtebezogenen dynamischen Viskosität η. Der hydraulische Durchmesser d_h wird in Abhängigkeit von Fläche und Umfang eines beliebigen Querschnitts bestimmt und entspricht näherungsweise einem Kreisdurchmesser, bei welchem ähnliche Druckverluste bei gleicher Rohrlänge und Strömungsgeschwindigkeit herrschen **(Gl. 2):**

$$d_h = \frac{4 \cdot A}{U} \qquad 2$$

Den Übergang zwischen laminarer und turbulenter Strömung markiert dabei die kritische Reynolds-Zahl und es gilt [6]:

Laminare Strömung:	$Re < 2\,300$
Laminare/turbulente Strömung:	$2\,300 < Re < 10\,000$
Turbulente Strömung:	$Re > 10\,000$

Im laminaren Bereich wird die Strömung durch die viskosen Kräfte gedämpft. Nach einem Übergangsbereich wird die Strömung dann vollständig turbulent und durch die Trägheitskräfte dominiert.

Der Vorteil einer turbulenten Strömung ist der erhöhte Impuls-, Wärme- und Stofftransport. Bei der Turbulenz entstehen Wirbel, welche dissipative Wärme erzeugen und den Transport in Scher- und in Hauptströmungsrichtung erhöhen. Ferner muss durch die turbulente Strömung nur eine dünne Randschicht durch Wärmeleitung überbrückt werden, wohingegen bei einer laminaren Strömung die Stromlinien parallel zueinander verlaufen und dann ausschließlich eine Erwärmung über Wärmeleitung stattfindet.

2.2 Möglichkeiten der Wärmeübertragung

Wärmeübertragung kann durch Wärmeleitung, durch erzwungene oder freie Konvektion sowie durch Strahlung erfolgen.

Wärmeleitung ist der Energietransport infolge atomarer und molekularer Wechselwirkungen auf Grund eines Temperaturgefälles und findet nur bei Festkörpern oder ruhenden Fluiden statt. Der Wärmestrom ist hierbei nur von dem Temperaturgradienten und dem Materialparameter λ (Wärmeleitfähigkeit) abhängig, welcher eine Funktion der Temperatur und des Drucks ist. Die Wärmeleitung wird durch das fouriersche Gesetz **(Gl. 3)** ausgedrückt [6]:

$$\dot{q} = -\lambda \cdot \nabla T \qquad 3$$

Der Wärmeübergang durch Konvektion ist eine Überlagerung von Wärmeleitung und Energietransport durch das strömende Fluid, wobei der Wärmeübergang durch die Strömung dominiert und durch die Wärmeleitung unterstützt wird. Entscheidend für den Wärmeübergang durch Konvektion ist der Wärmeübergangskoeffizient α, der bei einer erzwungenen Konvektion von der Wärmeleitfähigkeit, der Nusselt-Zahl und dem hydraulischen Durchmesser abhängig ist **(Gl. 4):**

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_h} \qquad 4$$

Die dimensionslose Kennzahl Nusselt (Nu) gibt das Verhältnis des Gesamtwärmestroms zu dem Wärmestrom durch Wärmeleitung an. Die Berechnung der Nusselt-Zahl ist abhängig von der Strömungsform und der Art der Konvektion, d. h. ob eine erzwungene oder eine freie Konvektion vorliegt. Für die erzwungene Konvektion, die bei der Heißluftvulkanisation grundsätzlich vorliegt, ist die Nusselt-Zahl von der Reynolds-Zahl und der Prandtl-Zahl abhängig.

Weiterhin wird bei der Strömungsform zwischen einer laminaren und turbulenten Strömung sowie einem thermischen Anlauf und einer voll ausgebildeten Strömung unterschieden. Mit Hilfe von experimentellen Untersuchungen in einem Heißluftvulkanisationskanal konnte durch Visualisierung der Strömungen gezeigt werden, dass im Kanal immer eine turbulente Strömung vorliegt.

Außerdem wird die Strömung stets als voll ausgebildet betrachtet, da es sich hier um einen kontinuierlichen, stationären Prozess handelt. Aufgrund dieser Überlegungen wird folgende Nusselt-Funktion verwendet **(Gl. 5)** [6]:

$$Nu = \frac{\left(\frac{\xi}{8}\right) \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12{,}7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left(Pr^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_h}{l}\right)^{\frac{2}{3}}\right] \qquad 5$$

mit

$$\xi = (1{,}8 \cdot \log_{10}(Re) - 1{,}5)^{-2} \qquad 6$$

Die Prandtl-Zahl Pr ist eine dimensionslose Kennzahl und gibt das Verhältnis von Impulstransport zu Energietransport an **(Gl. 7):**

$$Pr = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \qquad 7$$

Für die Beschreibung des lokalen Wärmestroms lautet dann das newtonsche Abkühlungsgesetz **(Gl. 8)** [6]:

$$\dot{q} = \alpha \cdot \Delta T \qquad 8$$

Eine weitere Möglichkeit der Wärmeübertragung ist die Wärmestrahlung – ein Energietransport durch elektromagnetische Strahlen, für die kein materieller Träger notwendig ist. Nachteil ist jedoch die Notwendigkeit hoher Temperaturen, was zu einer thermischen Schädigung des Vulkanisats führen kann. Die Wärmestrahlung wird in Abhängigkeit der Stefan-Boltzmann-Konstante σ_s wie folgt beschrieben **(Gl. 9)** [6]:

$$\dot{q}_s = E_s = \sigma_s \cdot \varepsilon \cdot T^4 \qquad 9$$

Allerdings ist bei der Heißluftvulkanisation vor allem die Wärmeübertragung durch Konvektion dominierend.

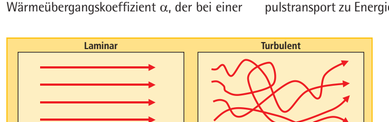


Abb. 1: Laminare und turbulente Strömung

3 Einfluss von Betriebsparametern

Anhand der theoretischen Vorüberlegungen sollen nun die Auswirkungen von Betriebsparametern bei der Heißluftvulkanisation aufgezeigt werden, um daraus Möglichkeiten zur Verbesserung abzuleiten. Bei der Heißluftvulkanisation wird die Energieeinbringung in das zu vulkanisierende Extrudat durch konvektive Wärmeübertragung von Luft zum Kautschuk dominiert. Daher ist es von enormer Wichtigkeit, einen hohen Wärmeübergangskoeffizienten zu erreichen, um eine effiziente und rasche Vernetzung des Kautschuks zu gewährleisten.

Der Wärmeübergangskoeffizient α hängt bei der Heißluftvulkanisation zum einen von den temperaturabhängigen Stoffwerten der Luft (Wärmeleitfähigkeit λ, dynamische Viskosität η, spezifische Wärmekapazität c_p und kinematische Viskosität ν) und zum anderen von der Kanalgeometrie (hydraulischer Durchmesser d_h) sowie der Strömungsgeschwindigkeit v der Luft ab. Die qualitativen Einflüsse auf den Wärmeübergangskoeffizienten sind in **Abbildung 2** dargestellt.

Aus **Gleichung 4** wird ersichtlich, dass mit einem kleiner werdenden Heißluftkanaldurchmesser der Wärmeübergangskoeffizient signifikant ansteigt. Dieser Einfluss ist nicht linear, da der hydraulische Durchmesser auch in die Reynolds-Zahl und damit auch in die Nusselt-Zahl eingeht (vgl. **Gl. 1** und **5**). Der hydraulische Durchmesser kann jedoch nicht ohne weiteres beliebig klein gewählt werden, da der von einem Heißluftventilator zu überwindende Druckverlust im Kanal dann immer weiter ansteigt. Daher wird der minimale Durchmesser durch die Leistung des Ventilators festgelegt.

Hinsichtlich des Wärmeübertragungskoeffizienten hat die Lufttemperatur einen negativen Einfluss. Je höher die Lufttemperatur ist, desto geringer ist der Wärmeübergangskoeffizient, wobei dieser Einfluss eher als gering einzustufen ist. Dennoch führt eine Erhöhung der Lufttemperatur zu einer deutlich schnelleren Vulkanisation, da neben dem Wärmeübergangskoeffizienten auch die Absoluttemperatur der Luft für die Temperaturentwicklung im Extrudat von entscheidender Bedeutung ist, was im Folgenden noch gezeigt wird.

Ferner steigt der Wärmeübergangskoeffizient mit steigender Luftgeschwindigkeit fast linear an. Allerdings gibt es auch Grenzen für die Wirksamkeit einer Erhöhung der Luftgeschwindigkeit, die im folgenden Abschnitt erläutert werden.

Da der Wärmeübergangskoeffizient α keine Aussage darüber liefert, wie schnell das Bauteil erwärmt wird, müssen dafür die dimensionslosen Fourier- und Biot-Kennzahlen herangezogen werden. Mit diesen kann die Zeit berechnet werden, nach welcher eine vorgegebene Kerntemperatur eines zu vulkanisierenden Extrudats erreicht wird. Diese Zeit kann näherungsweise mit der Vulkanisationszeit gleichgesetzt werden und mit dieser ist es möglich, qualitative Aussagen über die Einflüsse auf die Vulkanisationszeit zu treffen.

Die oben genannten Kennzahlen enthalten einige Materialparameter des zu erwärmenden Stoffs. Die Fourier-Zahl ist dabei wie folgt definiert **(Gl. 10):**

$$Fo = \frac{a_{Kautschuk}}{\left(\frac{d_{Vulkanisat}}{2}\right)^2} \cdot t = \frac{\lambda_{Kautschuk}}{\rho_{Kautschuk} \cdot c_{p,Kautschuk} \left(\frac{d_{Vulkanisat}}{2}\right)^2} \cdot t \qquad 10$$

Darin sind t die Heizzeit (bzw. Vulkanisationszeit), λ die Wärmeleitfähigkeit, ρ die Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität und der idealisierten Dicke des Vulkanisats. Da die Stoffdaten in der Regel bekannt sind, muss zur Bestimmung der Heizzeit noch die Fourier-Zahl Fo berechnet werden. Diese ergibt sich aus dem Zusammenhang mit der dimensionslosen Temperatur Θ **(Gl. 11):**

$$\Theta = \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{2 \cdot \sin(m_i)}{m_i + \sin(m_i) \cdot \cos(m_i)} \cdot \cos\left(m_i \cdot \frac{x}{d_{Vulkanisat}}\right) \cdot e^{-m_i^2 \cdot Fo} \right) \qquad 11$$

Die dimensionslose Temperatur Θ wiederum berechnet sich aus der Solltemperatur in der Mitte des Vulkanisats sowie der Heißlufttemperatur und der Extrudattemperatur nach Austritt aus dem Extruder **(Gl. 12):**

$$\Theta = \frac{T_{mitte,soll} - T_{Luft}}{T_a - T_{Luft}} \qquad 12$$

Die Variable x in **Gleichung 11** ist eine Laufkoordinate, die es erlaubt, für verschiedene Stellen im Bauteil die dimensionslose Temperatur zu bestimmen. Da bei dieser Betrachtung das Koordinatensystem in der Mitte des Bauteils liegt, in der auch die Solltemperatur erreicht werden soll, wird diese Laufkoordinate zu null. Um die Gleichung weiter zu vereinfachen, reicht für eine hinreichend genaue Berechnung der Fourier-Zahl das erste Glied der Summation aus [6]. Somit kann die Fourier-Zahl wie folgt berechnet werden **(Gl. 13):**

Abb. 2: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von Lufttemperatur, hydraulischem Durchmesser und Strömungsgeschwindigkeit

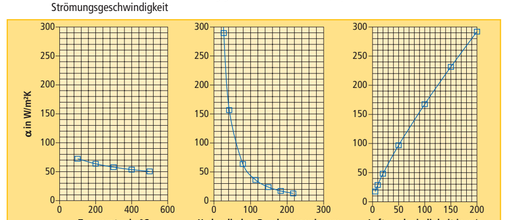
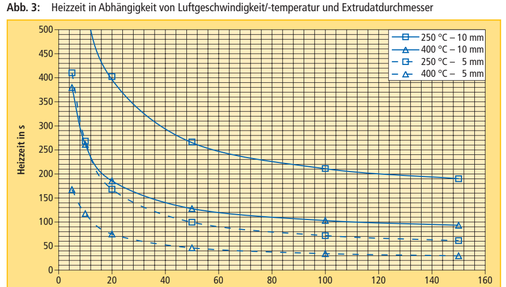



Abb. 3: Heizzeit in Abhängigkeit von Luftgeschwindigkeit/-temperatur und Extrudatdurchmesser