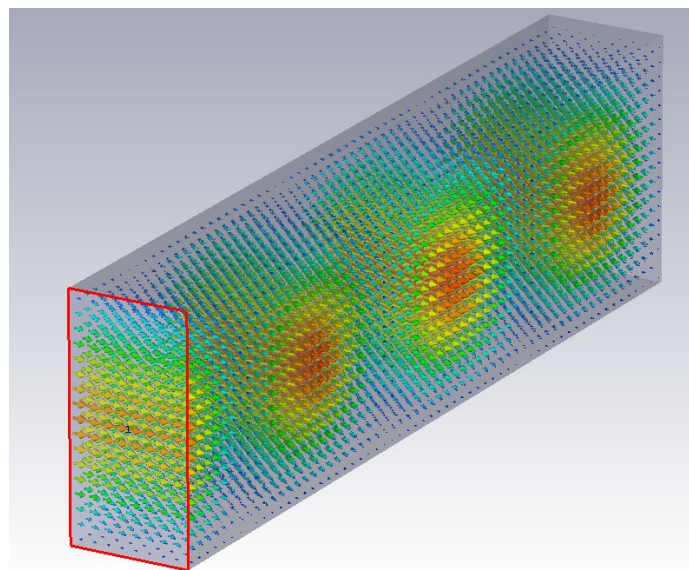




Jonas Petzke, M.Sc.

Halbleitergestützte Mikrowellenvernetzung von Kautschukextrudaten

Hochleistungskautschuke sind der Grundwerkstoff, aus dem diverse Gummiprodukte wie Reifen, Riemen oder Schläuche hergestellt werden. Ein Großteil wird in der Extrusion von Gummiprofilen verarbeitet, die in zahlreichen Branchen wie der Automobilindustrie, Medizin-, Elektrotechnik und im Maschinenbau eingesetzt werden. Diese Profile werden primär zum Abdichten von zwei oder mehr Komponenten (z. B. bei Türen, Deckeln) oder auch zum Trennen von Flüssigkeiten (z. B. Kühlmittel) genutzt. Die ständig wachsenden Werkstoffanforderungen und steigenden Komplexitäten sowie Entwicklungen von Werkstoffrezepturen erfordern Anpassungen in den Produktionsverfahren.



Simulativ ermitteltes E-Feld im Rechteckhohlleiter

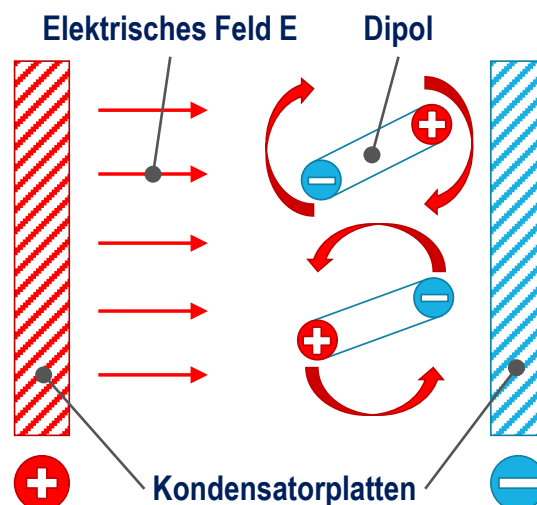
Die Grundprinzipien der Wärmeeinbringung können einerseits in die Wärmeübertragung, d. h. Wärmeleitung, Konvektion oder Strahlung und andererseits in Dissipation klassifiziert werden. Die Wärmeübertragungsverfahren unterscheiden sich zwar in der Art der Wärmequelle, allerdings nicht in der Art der Wärmeverteilung im Extrudat. Es erfolgt ein Wärmetransport durch Wärmeleitung von den äußeren Bereichen des Extrudats ins Innere. Dieses Erwärmungsprinzip wird technisch mittels Heißluft- oder Infrarotvulkanisation umgesetzt. Es ist ein bekanntes und erforschtes Verfahren und nimmt bisher den höchsten Stellenwert im Industriezweig der Vulkanisation ein. Jedoch steht der hohen Wirksamkeit ein erheblicher Energieverbrauch gegenüber, da ein Großteil der erzeugten Wärmeenergie aufgrund von Leckagen und den Öffnungen am Ein- und Auslauf der Anlage an die Umgebung abgegeben wird. Zusätzlich erschwert eine Wärmeübertragung per Wärmeleitung über die Außenflächen

eine homogene Erwärmung des Querschnitts. Somit wird die Temperaturverteilung und der Vernetzungsgrad zur Mitte des Extrudats inhomogen. Im ungünstigsten Fall entstehen lokale Hotspots, welche qualitätsmindernde Einflüsse auf das Endprodukt haben können.

Gegenüberstellung der Verfahren

Gegenüberstellungskriterien	Solid State Mikrowelle (Neuentwicklung)	Magnetron Mikrowelle	Heißluftvulkanisation	Flüssigbadvulkanisation
Erwärmungsprinzip	Elektromagnetische Strahlung	Elektromagnetische Strahlung	Wärmeleitung	Wärmeleitung
Energieverbrauch in Prozent der tatsächlich notwendigen Energie	150%	500%	1000%	700%
Absorptionsrate der Mikrowelle in %	> 70%	20%	-	-
Homogenität der Erwärmung im Querschnitt (1 = gut; 6 = schlecht)	1-2	5	5-6	5-6
Nachteile	Hoher Preis	Schlechter Wirkungsgrad	Hoher Platz- und Energiebedarf	Kontamination mit Flüssigsalzen

Aufgrund der genannten Nachteile ist eine Verbesserung der Wärmeeinbringung ins Innere des Extrudats von der Industrie gefordert. Hierfür sind dissipative Effekte nutzbar. Die elektromagnetisch induzierte Welle, welche durch dipolare Inhaltsstoffe in einer Gummimischung absorbiert wird, ist sehr gut zur Vulkanisation geeignet. Die wechselnde Feldrichtung erzeugt eine innere Reibung der angeregten Bestandteile und somit eine dissipative Erwärmung.



Schematische Darstellung des Mikrowellenerwärmungsprozesses aufgrund von dipolaren Inhaltsstoffen

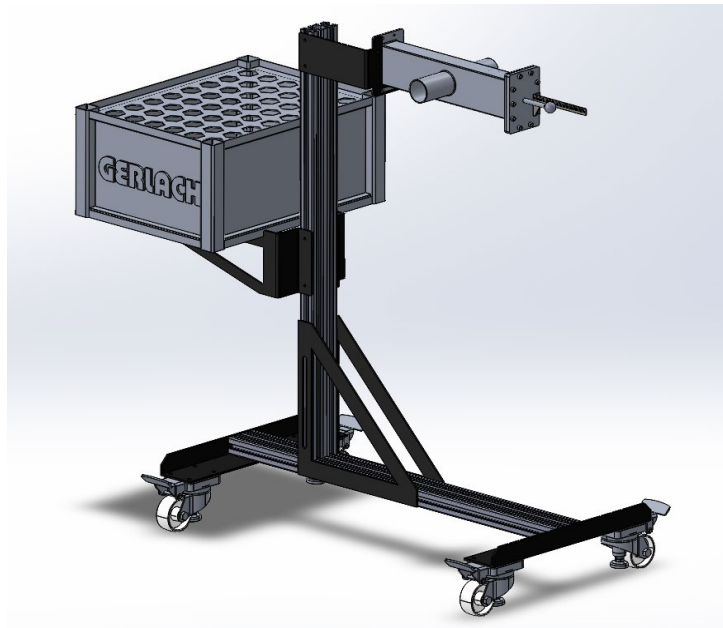
Für die industrielle Anwendung bedarf es einer Verbesserung der aktuellen Technologie zur Vernetzung von Kautschukextrudaten. Die Entwicklung eines Vulkanisationsofens, welcher nur so viel Energie in das Extrudat einbringt, wie technisch notwendig ist, ist das erstrebenswerte Ziel des Forschungsprojekts, um in Zeiten mit hohen Energiepreisen in industriell entwickelten Ländern wettbewerbsfähig zu sein. Die magnetronbasierte Mikrowellentechnologie zur Vernetzung von Kautschukprofilen wird bereits eingesetzt, allerdings ist die homogene Erwärmung des Extrudats die größte Herausforderung dieser Technologie. Die Gründe hierfür können unterschiedlich sein und sind nachfolgend aufgeführt.

1. Inhomogene Vermischung der polaren Anteile im Extrudat
2. Multimodale Verteilung der Mikrowellenstrahlung im Kanal, welche mit magnetronbasierten Mikrowellen nicht homogen einstellbar ist
3. Veränderung der Absorptionsrate des Dielektrikums in einhergehender Probtiefe

Um diese Probleme zu beherrschen, soll ein Ofen entwickelt werden, der die halbleitergestützte Mikrowellentechnologie zur Erwärmung des Extrudats nutzt. Diese bietet eine sehr hohe Leistung bei geringen Verlusten. Im Bereich von 2,4 – 2,5 GHz ist eine Absorptionseffizienz von 75 % möglich. Die Vorteile sind im Vergleich zur magnetronbasierten Mikrowellenerzeugung wie folgt:

1. Geringe Leistungsaufnahme (250 W) bei gleicher Energieabsorption
2. Präzise und reproduzierbare Erzeugung der Mikrowelle (in 1 MHz Schritten einstellbar), wodurch ein pulsierender Betrieb im Frequenzbereich von 2400 bis 2500 MHz ermöglicht wird.
3. Kein Frequenzdrift bei Ein- und Ausschaltvorgängen (Pulsierender Betrieb)
4. Elektronische Auswertung der erzeugten und reflektierten Mikrowellenenergie
5. Auffinden von optimalen Betriebsparametern mit möglichst hoher Energieeinbringung in das Substrat ist möglich

Für die Anwendung in diesem Projekt soll ein Vulkanisationsofen einer Serienanlage gebaut werden, in der die gleichmäßige Vulkanisation von Kautschukextrudaten ermöglicht wird. Dieses Funktionsmuster soll neben der Erzeugung von Solid State Mikrowellen auch mit verschiedenen Sensoren ausgestattet werden. Das Hauptziel dieses Projektes ist einen Mikrowellenofen zu bauen, mit dem die deutlich höhere Absorptionsrate der mittels Halbleiter erzeugten Mikrowellenenergie in Kautschukprofilen nachzuweisen ist. Hierfür soll aufbauend auf Ergebnissen von Tests ein FEM Modell entwickelt werden, mit dem verschiedene Kautschuktypen und Profilgeometrien analysiert werden.



Mikrowellenversuchsstand

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Simulation soll sich die Steuerung der Mikrowelle so anpassen, dass ein über den Querschnitt homogenes Erwärmungsprofil erzeugt werden kann. Daraus entstehen verschiedene Vorteile, wie z. B. eine Verringerung der eingebrachten Primärenergie in das Extrudat. Idealerweise wird nicht wie aktuell das Fünf- bis Zehnfache (vgl. reine Heißluftvulkanisation) der notwendigen Erwärmungsenergie eingebracht, sondern nur so viel, wie rechnerisch notwendig ist. Des Weiteren soll die Vulkanisationsqualität durch eine möglichst homogene Erwärmung des gesamten Querschnitts gesteigert werden. Weiterhin ist die Nutzung nur von Mikrowellenerwärmung für die Vernetzung von möglichst vielen Kautschukprofilen und Werkstoffen zu bestätigen. Besonders zu beachten sind hier unpolare Kautschuktypen wie Silikone, welche auf die Beaufschlagung von 2450 MHz Mikrowellen nicht reagieren.

Das gebaute Funktionsmuster wird der Fa. Gerlach als Vorlage für ein Serienprodukt dienen, welches an Kunden vertrieben werden kann. Der Hauptabsatzmarkt sind Unternehmen, welche komplexe, geschäumte oder großvolumige Kautschukprofile herstellen und aufgrund von Form oder Material des Profils mittels der etablierten Technologie sowie der geringen Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes nicht effizient hergestellt werden können.

Danksagung

Wir danken dem „Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand“ (ZIM) für die finanzielle Förderung der Arbeiten, die aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erfolgt. Zudem bedanken wir uns bei unserem Kooperationspartner Gerlach Maschinenbau GmbH für die gute Zusammenarbeit.