

Massendurchflussmessung von pneumatisch geförderten Feststoffen auf Basis von hochpräzisen FMCW-Radarsystemen

Die präzise messtechnische Erfassung von Durchflüssen spielt bei der Automatisierung und Regelung von komplexen Industrieanlagen eine wichtige Rolle, um Materialströme zu steuern und Prozesse zu optimieren. Während die Durchflussmessung von Flüssigkeiten seit Jahren erfolgreich durchgeführt wird, ist sie im Bereich von Schüttgütern weiterhin problematisch. Eines der weitverbreitetsten Transportverfahren für diese Schüttgüter ist die pneumatische Förderung, bei der das Schüttgut mit Hilfe von Gasströmungen fortbewegt wird. Die Erfassung des so erzeugten Massenstroms ist schwierig, da mehrere Messgrößen parallel berücksichtigt werden müssen und gleichzeitig aufgrund der abrasiven Eigenschaften des Partikelstroms, viele etablierte Durchflussmessverfahren nicht in Betracht kommen. Für die echtzeitfähige Massendurchflussbestimmung von pneumatisch geförderten Schüttgütern müssen zwei physikalische Parameter kontinuierlich, parallel und mit höchster Präzision aufgenommen werden, um einen verlässlichen Messwert zu erhalten. Die angesprochenen physikalischen Größen sind der Feststoffvolumenanteil des geförderten Schüttguts sowie dessen Transportgeschwindigkeit.

Im Rahmen der vorgelegten Arbeit wird ein auf Millimeterwellen beruhendes Radarverfahren entwickelt, welches diese anspruchsvolle messtechnische Aufgabe löst. Um eine vollständige Modellbildung des Messverfahrens zu ermöglichen, werden alle Einfluss nehmenden Parameter hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Ausbreitungseigenschaften elektromagnetischer Wellen untersucht. Es werden Mischungsformeln für dielektrische Mischmaterialien analysiert, welche eine effektive Mischpermittivität aus zwei Materialien in Abhängigkeit ihrer Volumenanteile berechnet. Um eine fehlerfreie Anwendung der Mischtheorie zu gewährleisten, werden viele beeinflussende Größen im Detail betrachtet, Fehlerabschätzungen vorgenommen und Kompensationsverfahren zur Fehlerminimierung erarbeitet. Um aus der Mischpermittivität des Förderstroms den Volumenanteil des Schüttguts zu bestimmen, wird ein Festziel-Radarverfahren entwickelt. Es wird gezeigt, dass die Veränderung des Feststoffvolumenanteils eine, mit Hilfe des Radarverfahrens mess- und auswertbare Verringerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der ausgesandten elektromagnetischen Wellen zur Folge hat. Um eine Volumenanteilsänderung des Förderguts von 0.1 % präzise zu bestimmen, muss das verwendete Radargerät eine Genauigkeit im Mikrometerbereich aufweisen. Dies wird unter anderem durch die Verringerung des Einflusses von Eingangsreflexionen auf die Radarmessung erreicht. Hierzu wird das herkömmliche kopolare Radarverfahren auf ein polarimetrisches Radarverfahren erweitert. Die positiven Effekte des entwickelten Pseudotransmissionsverfahrens werden hinsichtlich der verbesserten Signaldetektion sowie der erhöhten Messgenauigkeit sowohl in der Theorie als auch in 3D elektromagnetischen Simulationen und in Testmessungen bestätigt. Messungen an einer eigens entwickelten pneumatischen Kreisförderanlage verifizieren zudem die Anwendbarkeit und die erwartete Präzision des Pseudotransmissionsverfahrens zur Volumenanteilsbestimmung des geförderten Schüttguts.

Um eine radar-basierte Geschwindigkeitsmessung der Strömung vorzunehmen, werden zunächst die Eigenschaften der turbulenten Strömung analysiert. Unter Berücksichtigung der in der Theorie postulierten Prandtl'schen Mischungsweglänge sowie der Reynoldszerlegung, wird ein auf der Kreuzkorrelation zweier Pseudotransmissionsmessstellen beruhendes Messkonzept entworfen. Das entwickelte Verfahren wird sowohl in Strömungssimulationen als auch an der Versuchsanlage messtechnisch verifiziert. Aufgrund desselben, grundlegenden physikalischen Messeffektes der beiden entwickelten Messverfahren ist eine redundante Anordnung von modifizierten Radargeräten ausreichend, um eine präzise Erfassung des Massendurchflusses von pneumatisch geförderten Schüttgütern zu ermöglichen. Die entwickelten Verfahren zur Massendurchflussmessung sind den herkömmlichen Verfahren überlegen, insbesondere in der Genauigkeit sowie der technischen Einsetzbarkeit.