

Kurzfassung der Dissertation

Hochpräzise FMCW-Radarsysteme zur korrelationsbasierten Geschwindigkeitsmessung von Fluidströmungen

Dipl.-Ing. Timo Jaeschke, Lehrstuhl für Integrierte Systeme, Ruhr-Universität Bochum

Aufgrund der immer weiter fortschreitenden Automatisierung von Industrieanlagen zur Realisierung von effizienten und gleichzeitig flexiblen Produktionsmöglichkeiten im Rahmen von Industrie 4.0 ist die kontinuierliche und präzise Überwachung von Prozessparametern unerlässlich.

Sensoren zur Bestimmung der Strömungsgeschwindigkeit von Fluiden stellen daher in der industriellen Messtechnik eine für viele Applikationen wichtige Schlüsseltechnologie dar. Einsatzgebiete sind zum Beispiel die Bestimmung der Flussgeschwindigkeit von Gasen, Flüssigkeiten, sowie von Mehrphasengemischen wie transportierten Stäuben oder zum Beispiel von Wasserdampf in Rohrsystemen. Es existieren zahlreiche Messverfahren die einen großen Teil der in den vielfältigen Anwendungen auftretenden Messaufgaben zufriedenstellend abdecken. Besonders bei der kontaktlosen Messung der Fließgeschwindigkeit turbulenter und aus abrasiven Materialien bestehenden Strömungen stoßen bisherige Messverfahren jedoch an ihre Grenzen.

Durch die hohen Strömungsgeschwindigkeiten sind invasive Sensoren, die ein Einbringen des Sensors in das Rohrsystem und Kontakt zum Medium verlangen, in vielen Anwendungen ungeeignet. Auch auf Ultraschall basierende Verfahren stoßen in diesen Applikationen an ihre Grenzen, weil die Schallwelle auf die hochturbulente Strömung als sehr inhomogenes Ausbreitungsmedium angewiesen ist. Zudem führen die hohen Strömungsgeschwindigkeiten zum sogenannten „Blowing-Away-Effekt“ durch den das Messsignal den Empfänger nicht mehr erreicht. Optische Sensoren weisen bei Strömungen aus abrasiven Fluiden schwerwiegende Unzulänglichkeiten auf, da die Transmittivität der optischen Fenster zur Einkopplung der Strahlengänge ins Medium nicht dauerhaft gewährleistet ist.

Als Ergänzung zum Portfolio der existierenden Verfahren wird in dieser Arbeit ein auf elektromagnetischen Wellen im Millimeterwellen-Frequenzbereich basierendes Sensorsystem für die berührungslose Bestimmung der Flussgeschwindigkeit turbulenter Strömungen vorgestellt.

Der Sensor besteht aus mehreren synchronisierten und in Strömungsrichtung hintereinander angeordneten Radarsensoren die durch die Strömung hindurch die Laufzeit der elektromagnetischen Welle zu einem ortsfesten Reflektor messen. Im Strömungsmedium vorliegende Permittivitätsfluktuationen bewegen sich nacheinander und zeitlich versetzt durch die jeweiligen Radarmessstrecken. Dadurch ändert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Welle und diese Änderungen resultieren in Schwankungen der gemessenen Laufzeit, bzw. der virtuell gemessenen Entfernungen. Durch Kreuzkorrelation der Messsignale von mindestens zwei Sensoren in bekanntem Abstand kann die Strömungsgeschwindigkeit des Mediums berechnet werden. Dieses indirekte Messprinzip stellt höchste Anforderungen an die Stabilität und Genauigkeit der eingesetzten Radarsysteme, bietet aber eine sinnvolle Ergänzung für durch bisherige Messtechnik nicht ausreichend abdeckbare Nischenapplikationen. Strömungen mit abrasiven Medien oder hohen Strömungsgeschwindigkeiten können mit elektromagnetischen Wellen aufgrund der längeren Wellenlänge als Licht bei zugleich höherer Ausbreitungsgeschwindigkeit als Schallwellen deutlich robuster gemessen werden.

Die Realisierung des Sensorsystems erfordert neben hochpräzisen Radarsensoren auch ein tiefgreifendes Verständnis der Vorgänge in der Strömung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird sowohl der Messsensor mit den zugrundeliegenden Verfahren für das Erreichen der in der Anwendung notwendigen Messgenauigkeit, als auch ein aus CFD- und 3D-EM-Simulation der Radarstrecke bestehender Multiphysik-Systemsimulator zur Nachbildung der Applikation und optimalen Auslegung des Sensors vorgestellt.

Die Basis des Sensors bilden drei synchron messende FMCW-Radarsysteme im Frequenzbereich um 80 GHz, welche dank der konsequent rauscharm und auf Messpräzision und Stabilität ausgelegten Hardware in Kombination mit einer optimierten Signalauswertung Rekordwerte in der Reproduzierbarkeit der Entfernungsmessung der Einzelsensoren mit einer Standardabweichung von 68.3 nm in ca. 0.5 m Entfernung bei gleichzeitig hoher Messgeschwindigkeit erreichen. Dies erlaubt die Detektion von sehr kleinen Permittivitätsfluktuationen, wie sie zum Beispiel durch Druckunterschiede, durch Materialinhomogenitäten bei Mehrphasenströmungen, oder Strömungen mit inhomogen gemischten Fluiden auftreten. Die Arbeit wird durch die Vorstellung von zahlreiche Messungen zur Charakterisierung des Systems abgerundet.