



Millimeter-wave Steelworks Radar

Axel Hülsmann – axel.huelsmann@iaf.fraunhofer.de

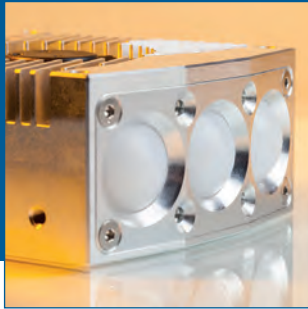
Due to the harsh environmental conditions at steelworks, sensors have to be extremely resistant to thermal radiation, lightning, dust, smoke, and steam. Optical, ultrasonic, or mechanical sensors fail or need extensive maintenance. Thanks to extensive research on high-frequency and mixed-signal devices, it is now possible to adopt cost-effective and highly accurate compact millimeter-wave (mmW) radar sensors in the steel industry. At a frequency of 100 GHz, millimeter waves behave quasi optically and components known from optics, such as waveguide fibers, flat and curved mirrors, and dielectric lenses, can be adopted for focused radar beam applications. The advantage of wavelengths more than 1000 times longer than light is their resistance to dust and aerosols.

- 1 *Harsh environmental conditions at steelworks.*
Raue Umgebungsbedingungen in Stahlwerken.

The European steel industry is under high economic pressure and has shrunk significantly over the past few decades. Emerging markets like China, India, or Brazil penetrate the international steel market with cheap steel products made possible by lower labor costs, careless environmental pollution, and national subsidies. Germany's automobile industry depends on a reliable steel product supply chain and production expertise. To stop steel production from declining further in Europe, innovations must be implemented now. Automatization and rationalization processes must be improved to reduce overall production costs and enhance the quality of steel products like slabs, panels, and plates.

The Situation in the Steel Industry

Fraunhofer IAF is collaborating with several companies from the steel sector to develop new sensors based on millimeter-wave radars that fulfill the steel industry's special requirements. These sensors must be able to operate remotely, enable better production control, and reduce waste. Germany produces roughly 40 million tons of steel a year. The price of crude steel in Europe is about 500 € per ton. Currently each ton of crude steel produces 1.4 tons of CO₂. For example, a decrease in the actual offcut of a steel slab from 5 cm to 2.5 cm would save 500 kilotons of steel, 250 million €, and 700 kilotons of CO₂.



- Millimeter-wave radar sensor
- Sensors for steelworks
- Harsh environmental sensors
- Distance and velocity measurements

Millimeterwellen-Radare für Stahlwerke

Aufgrund der rauen Bedingungen in Stahlwerken müssen Sensoren extrem unempfindlich gegenüber Hitze, Blitzlichtern, Staub, Rauch und Dampf sein. Optische, akustische und mechanische Sensoren sind ungeeignet oder brauchen erhebliche Wartung. Dank der Forschung an Hochfrequenz- und Mixed-Signal-Bauelementen ist der Einsatz von kosteneffizienten und hochgenauen, kompakten Millimeterwellen-Radar-Sensoren in der Stahlindustrie heute möglich. Bei Frequenzen um 100 GHz verhalten sich Millimeterwellen quasioptisch. Für fokussierte Radarstrahl-Anwendungen können daher Komponenten eingesetzt werden, die aus der Optik bekannt sind: Glasfasern, flache und gekrümmte Spiegel oder dielektrische Linsen. Der größte Vorteil einer Wellenlänge, die mehr als 1000 mal größer ist als die Lichtwellenlänge, ist die Unempfindlichkeit gegenüber Staub und Aerosolen.

250
nm/m

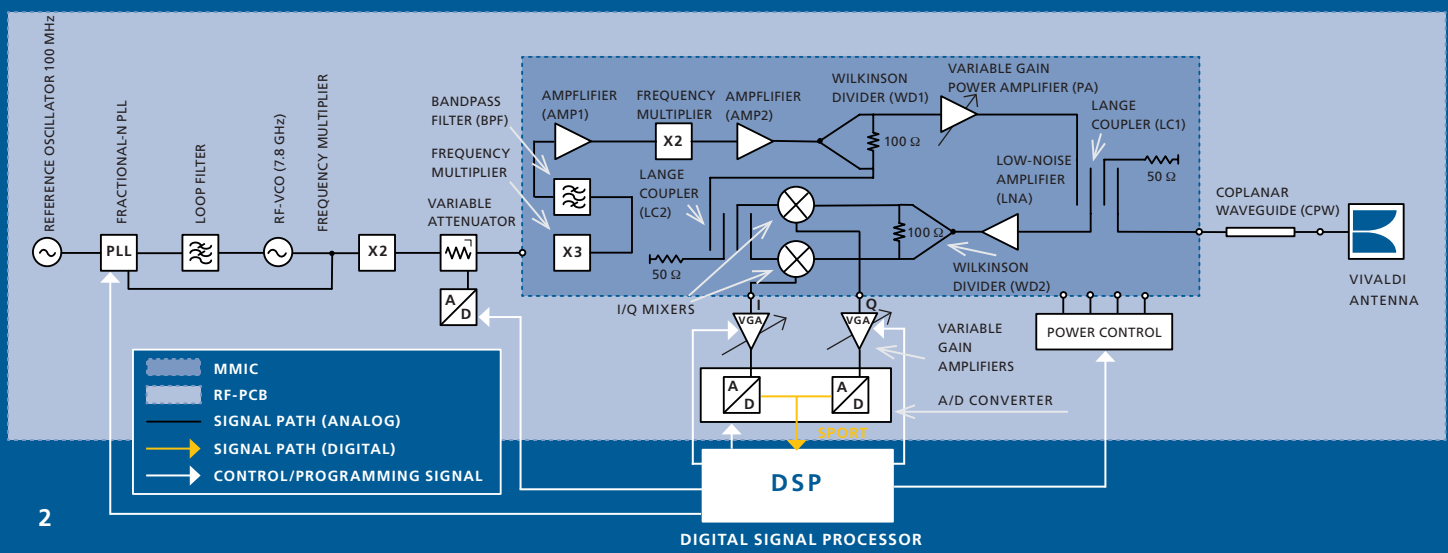
*Measurement accuracy.
Messgenauigkeit.*

Die Stahlindustrie in Europa ist unter hohem wirtschaftlichem Druck und über die letzten Jahrzehnte stark geschrumpft. Wegen geringer Lohnkosten, weniger strengen Umweltauflagen und nationalen Subventionen können Schwellenländer wie China, Indien oder Brasilien billige Stahlprodukte auf dem internationalen Markt anbieten. Insbesondere die deutsche Automobilindustrie ist jedoch auf eine hochwertige und zuverlässige Stahlversorgung und das Herstellungsfachwissen angewiesen. Um die Produktionskosten langfristig zu senken und die Qualität von Stahlprodukten, wie Brammen, Paneelen und Blech zu verbessern, müssen die

Automations- und Rationalisierungsprozesse schnellstmöglich verbessert werden.

Die Situation der Stahlindustrie

Das Fraunhofer IAF arbeitet mit mehreren Unternehmen des Stahlsektors zusammen, um neuartige Sensoren auf der Basis von Millimeterwellen-Radaren zu entwickeln, die die besonderen Anforderungen der Stahlindustrie erfüllen. Die Sensoren müssen berührungslos arbeiten, eine bessere Produktionskontrolle ermöglichen und den Ausschuss von Schrott verringern. Deutschlands jährliche Stahlproduktion liegt bei 40 Millionen Tonnen. Der Rohstahlpreis liegt bei 500 € pro Tonne.



2 Block diagram of a 100 GHz broadband radar sensor.

Blockschaltbild eines 100 GHz Breitband-Radar-Sensors.

Radar Sensor Development

Fraunhofer IAF has developed a high-performance millimeter-wave radar system for harsh environments operating at W-band. This radar is based on a III/V-semiconductor front-end chip that includes a frequency multiplier,

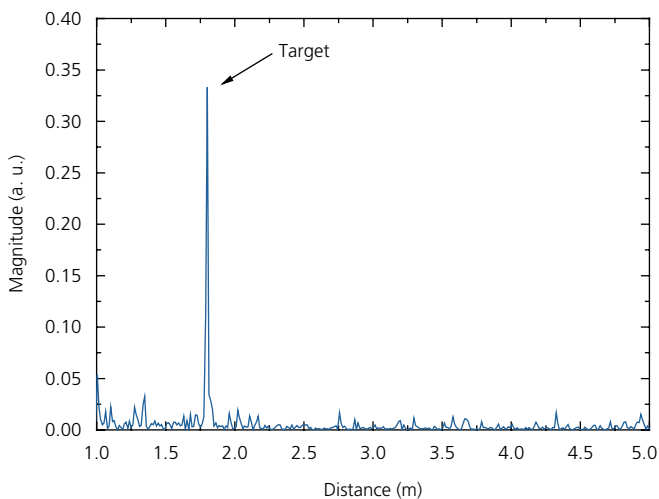
power amplifier, low noise amplifier, and I/Q mixer. Using IAF's qualified 100 nm mHEMT process, this chip has a -3 dB bandwidth of 15 GHz and a noise figure of 6 dB and operates on one transmit/receive antenna port. The radar module can therefore be programmed to operate in the frequency range

between 92 and 100 GHz by a test radio license. Resolution, sensitivity, and robustness are much better than in radar systems based on silicon, which is essential for use in steelworks. Chirp generation uses a TCXO-based fractional-N PLL, which results in an accuracy

of 250 nm/m under lab conditions. We developed a water-cooled housing and gas purge to fulfill the environmental requirements of heat radiation from liquid steel and to prevent dust particle accretion. The measurement spot size can be focused below 3 cm. The radar sensor includes a digital signal processor running a LINUX kernel. Robust signal processing algorithms have been developed to suppress clutter and noise, and to extract the distance-related information needed for precise process control. The radar system is ready for I4.0 applications, as the measurement data can be transferred via Ethernet.

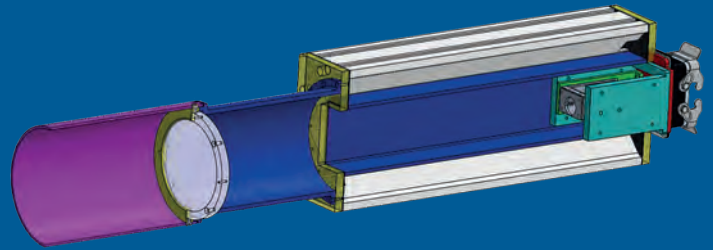
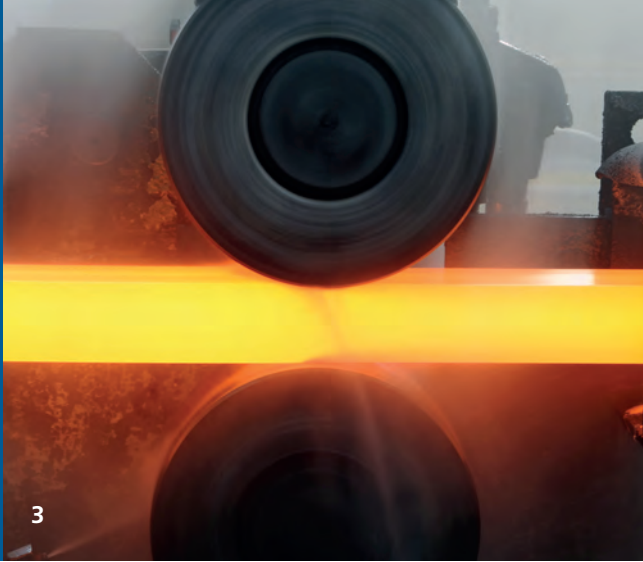
Summary

High-performance radars are needed for several areas of application at steelworks where other measurement techniques fail. The fluid level of molten steel can be measured with unbelievable accuracy. During steel slab production, radar border measurements can continuously monitor the casting process. Further applications during the panel sheet production process include the recording of red glowing plate thickness and positioning during the roller mill process.



5 Measurement example of a 2 cm sphere at a distance of 1.8 m on a concrete floor.

Beispiel: Detektion einer 2 cm Kugel auf Betonboden im Abstand von 1,8 m.



3 *Roller mill environment.
Walzstraßenumgebung.*

4 *Cross section of a focusing
radar for harsh
environments.
Querschnitt eines fokus-
sierenden Radars für raue
Umgebungen.*

I 4.0

*Ready for I 4.0 thanks to
Ethernet data transfer.
Geeignet für Industrie 4.0
dank Ethernet-Datentransfer.*

Zurzeit erzeugt jede Tonne Rohstahl ca. 1,4 Tonnen CO₂. Allein die Reduzierung der Randtoleranz einer Bramme von zurzeit 5 cm auf 2,5 cm führt zu einer Ersparnis von 500 Kilotonnen Stahl, 250 Mio € und 700 Kilotonnen CO₂.

Radar-Sensor-Entwicklung

Das Fraunhofer IAF hat ein hoch performantes Millimeterwellen-Radarsystem für raue Umgebungen entwickelt, das im W-Band (75 – 110 GHz) arbeitet. Dieses Radar basiert auf einem III/V-Halbleiter-Frontend-Chip, der einen Frequenzvervielfacher, Leistungsverstärker, rauscharmen Eingangsverstärker und I/Q-Mischer integriert. Der Chip wurde mit dem IAF-eigenen 100 nm mHEMT-Prozess realisiert und hat eine -3 dB Bandbreite von 15 GHz, eine Rauschzahl von 6 dB und arbeitet mit nur einem Antennen-Port für Senden und Empfangen. Das Radar-Modul kann per Software so programmiert werden, dass es im legalen Frequenzbereich zwischen 92 GHz und 100 GHz unter Beantragung einer Versuchsfunklizenz betrieben werden kann. Auflösung, Empfindlichkeit und Robustheit sind deutlich besser als Radar-Systeme, die auf Siliziumschaltkreisen basieren, was entscheidend für Anwendungen in Stahlwerken ist. Die lineare Frequenzmodulation basiert auf einem temperaturkompensierten Quarzoszillator (TCXO), der die Referenz einer mehrfachfraktionellen Phasenregelschleife (PLL) ist und zu einer Genauigkeit von 250 nm/m unter

Laborbedingungen führt. Außerdem hat das Fraunhofer IAF ein wassergekühltes Gehäuse mit Gas-Spülung entwickelt, um den Umgebungsanforderungen im Stahlwerk und der Hitzeabstrahlung von flüssigem Stahl gerecht zu werden. Dadurch können Partikelanhaftungen verhindert werden. Der mmW-Messfleckdurchmesser kann auf unter 3 cm fokussiert werden. Der Radar-Sensor enthält einen digitalen Signalprozessor, auf dem ein LINUX-Kernel läuft. Zudem wurden robuste Signalverarbeitungsalgorithmen entwickelt, um Stördaten und Rauschen zu unterdrücken und die Entfernungsinformationen zu extrahieren, welche für eine präzise Prozesskontrolle benötigt werden. Das Radarsystem ist außerdem Industrie 4.0-kompatibel, da die Messdaten per Ethernet übertragen werden.

Resümee

Es gibt mehrere Anwendungen im Stahlwerk, bei denen hoch-performante Radare gebraucht werden, da andere Messtechniken hier an ihre Grenzen stoßen. So kann heute dank innovativer Radar-Technologie der Füllstand von flüssigem Stahl mit größter Präzision gemessen und bei der Brammen-Herstellung der Gießprozess überwacht werden. Im Walzwerk sind kontinuierliche Messungen der Dicke von rot glühendem Blech möglich. Auch eine Überwachung der Position des Blechs während des Walzprozesses ist realisierbar.