

Revolutionäre Messtechnik für Energie- und Ressourceneffizienz

Hochpräzise Radarsensoren und Radarmesssysteme für Warmbandwalzwerke

Die Ausstattung von Warmbandstraßen mit präzisen, genauen und robusten Messsystemen ist eine elementare Voraussetzung für die Verbesserung der Produktqualität und die Reduzierung des Energieverbrauchs, sowie der Erhöhung der Lebensdauer der Anlagen. Zu diesem Zweck arbeitet ein multidisziplinäres Konsortium an der Entwicklung von radargestützten Messsystemen für Warmbandwalzwerke. Diese Entwicklung erfolgt im Rahmen des geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojektes RAD-Energy für mehr Ressourcen- und Energieeffizienz

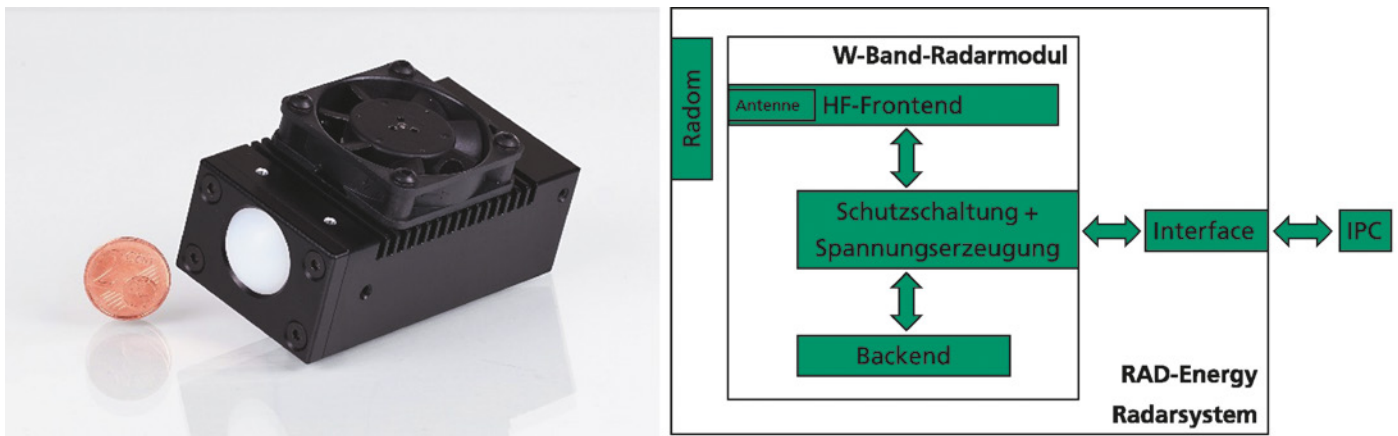


Bild 1. Im Rahmen des Projektes entwickelter Radarsensor (Bild: Asinco)

Derzeit entfallen zirka vierzig Prozent der industriell genutzten Energie auf Thermoprozessanlagen und Industrieöfen mit einem Kostenvolumen von 30 Milliarden €, so dass auch der langfristige „Lebenszyklusgedanke“ dieser Anlagen mit in die Überlegungen der Energieeffizienzsteigerung eingeht [1]. Ein großer Teil der Energieeinsparungen kann durch die Verringerung der Menge an rückgeführtem Material durch die Verbesserung der Prozesssteuerung und durch die gleichzeitige Erhöhung der Qualität der Endprodukte erzielt werden. Die Ausstattung von Anlagen mit präzisen, genauen und robusten Messsystemen ist eine elementare Voraussetzung für die Verbesserung der Produktqualität und die Reduzierung des Energieverbrauchs, sowie der Erhöhung der Lebensdauer der Anlagen. Zu

diesem Zweck arbeitet ein multidisziplinäres Konsortium an der Entwicklung von radargestützten Messsystemen für Warmbandwalzwerke. Diese Entwicklung erfolgt im Rahmen des geförderten Forschungs- und Entwicklungsprojektes RAD-Energy [2].

Da die radarbasierte Messung unempfindlich gegenüber den rauen Bedingungen in Warmbandwalzwerken ist (z.B. hohe Temperatur, Staub, Feuchtigkeit und Nebel von Walzemulsion oder Öl) und durch die fortschrittlichen Signalverarbeitungsalgorithmen, die in diesem Projekt entwickelt wurden, kann die Messgenauigkeit der Qualitäts- und Prozessgrößen erfolgreich mit hoher Präzision erreicht werden. Dies bietet die Möglichkeit, alle Vorteile bestehender Messtechnologien ohne erkennbare Nachteile zu kombinieren.

Energieeinsparungspotentiale in Warmwalzwerke

Hochwertiger Flachstahl ist ein bedeutendes Wirtschaftsgut, das mit hoher heimischer Wertschöpfung verbunden ist. Der Einsatz robuster und präziser Messtechnik ermöglicht eine präzise Beherrschung der Band- und Prozessgrößen und damit Ressourceneffizienz und Energieeinsparungen durch Minimierung des Ausschusses und Steigerung des Ausbringens.

Die Produktion von Warmband erfolgt, ausgehend vom eingesetzten Vormaterial (Bramme), in mehreren Stufen, beginnend mit dem Wiedererwärmofen, gefolgt von einer Entzunderungsanlage, einem Vorbandgerüst, einer Schopfschere, einer Tandem-Fertigstraße, einer Kühlstrecke

Dr. Loui Al-Shrouf, Prof. Dr. Mohieddine Jelali, Joachim Denker, ASINCO GmbH, Duisburg; Benjamin Baumann, Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF, Freiburg; Kevin Wachsmann, thyssenkrupp steel Europe AG, Bochum – Kontakt: joachim.denker@asinco.de

und einer Haspelanlage. Die Ausstattung dieser Aggregate mit robusten und genauen Messsystemen kann zu erheblichen Qualitätsoptimierungen und Energieeinsparungen führen.

Präzise und robuste Positionierung der Brammen innerhalb der Wiedererwärmöfen. Dieser Prozess ist nicht vollständig automatisiert, da es keine Messsysteme gibt, die eine genaue Positionierung der Brammen innerhalb des Ofens gewährleisten, um sie sicher und logistisch zu erfassen. Der Einsatz von robusten Systemen wird die oben genannten Risiken minimieren, den Handhabungsprozess innerhalb des Ofens beschleunigen und Fehlstellungen der Brammen vorbeugen.

Brammenbreitenmessung vor und nach der Vorwalzstraße. Bei der Warmbanderzeugung sind unvermeidliche Breitenzuschläge notwendig, um die Kundenwünsche zu erfüllen, was den Verbrauch von Material, Rohstoffen und Energie erhöht. Optische Breitenmessgeräte, die eingesetzt werden, sind aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber der rauen Umgebungsbedingungen beim Stauchen und Walzen der Brammen im Vorbandgerüst oft nicht in der Lage, ein kontinuierliches und genaues Breitenmesssignal zu liefern. Nur mit einer präzisen und gegenüber der rauen Umgebung robusten Breitenmessung ist eine exakte Vorausberechnung bzw. Einstellung der Vorbandbreite möglich und damit eine deutliche Reduzierung des Energieverbrauchs realisierbar. Nach [3] kann eine signifikante Reduzierung der Breitenzuschläge und Bandsäbel zu einer geschätzten 0,1 % höheren Ausbeute führen, was Einsparungen zwischen 1.800 und 2.000 t pro Jahr bedeutet (Basis: Jahresproduktion von 1,8-2,0 Millionen t).

Präzise Brammen-/Banderkennung. Die Erkennung von Stückerfängen und -enden ist sowohl für die Materialverfolgung als auch für die Steuerung der verschiedenen Aggregate in Warmbandwalzwerken wichtig. Die Erkennungssignale dienen dazu, die Aggregate entweder zum Starten oder zum Stoppen der Verarbeitung von Brammen/Bändern zu veranlassen. Eine genaue Erkennung führt zu einer Verbesserung des Betriebes der verschiedenen Aggregate, zur Verbesserung der Produktqualität, zur Verringerung der Menge an rückgeführtem Material bzw. zur Steigerung

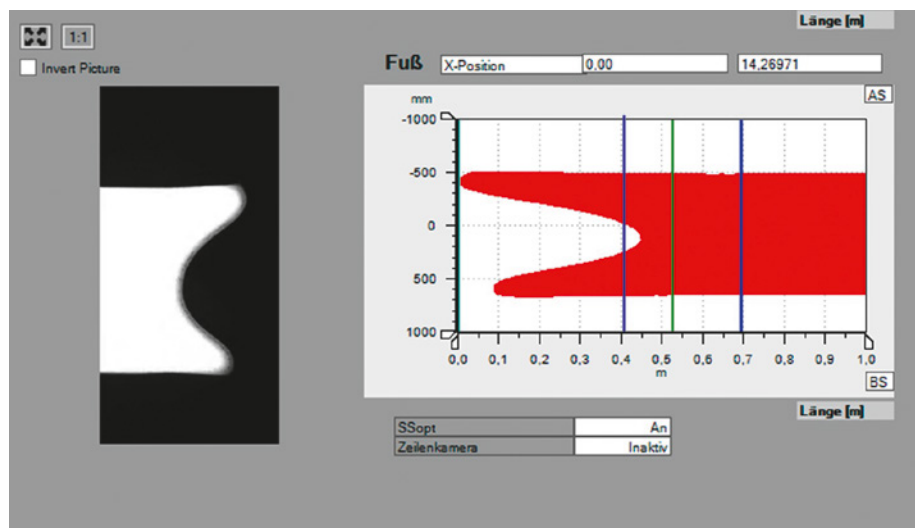


Bild 2. Schnittposition am Brammenkopf; blaue Linien: zu früh bzw. zu spät ausgelöst; grüne Linie: optimal geschnitten (Bild: Asinco)



Bild 3. Schopfschere im Werk Bochum von thyssenkrupp Steel Europe (Bild: Asinco)

der Produktivität und zur Verringerung der Energieverluste. Die Schopfschere ist ein ideales Beispiel für ein Aggregat, bei dem durch die Implementierung eines robusten und genauen Erkennungssystems ein hohes Potenzial für Energieeinsparungen, Qualitäts- und Produktivitätssteigerungen erreicht werden kann.

Hochpräzise Radarsensoren

Im Rahmen des Forschungsprojekts hat das Fraunhofer IAF ein leistungsfähiges Millimeterwellen-Radarsystem auf Basis

des FMCW-Funktionsprinzips (frequenzmodulierter Dauerstrichbetrieb) für raue Umgebungen entwickelt, das im W-Band (75 bis 110 GHz) arbeitet.

Der in **Bild 1** dargestellte Radarsensor basiert auf einer integrierten Millimeterwellenschaltung, die mittels der am Fraunhofer IAF etablierten Prozesstechnologie im dortigen Reinraum hergestellt wird. Er zeichnet sich durch eine hohe Frequenzgenauigkeit und Bandbreite von 15 GHz aus, die Entfernungsmessungen mit einer Genauigkeit im Bereich von wenigen 10 µm erlaubt. Aufbauend auf einer Spezi-

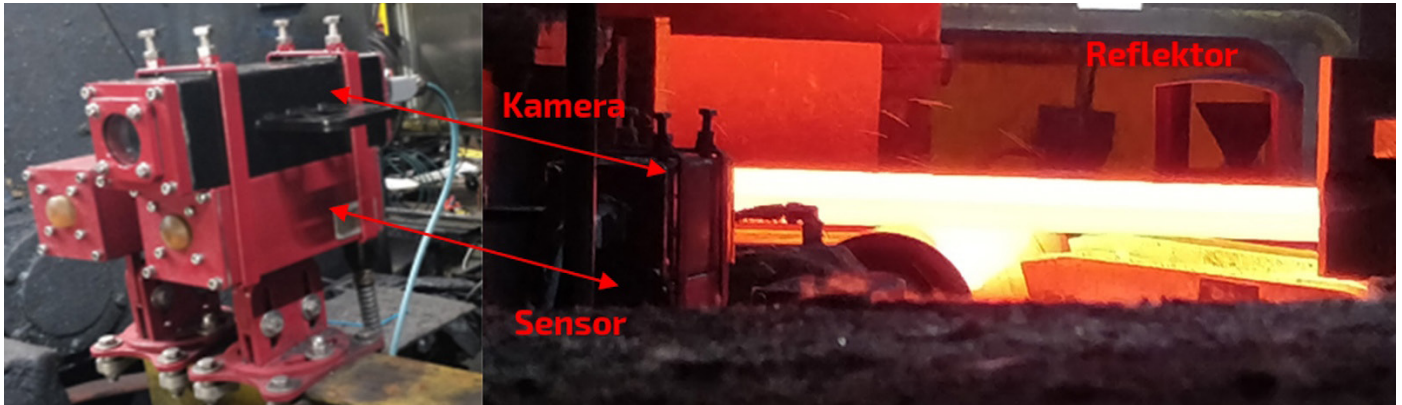


Bild 4. Installiertes radargestütztes Erkennungssystem (Bild: Asinco)

fiktions- und Konzeptionsphase wurde ein auf die Anforderungen im Walzwerk wassergekühlter und partikelsicherer Sensor entwickelt. Die Sensorentwicklung umfasste das Frontend- und Antennendesign sowie die Hard- und Software zur primären Signalverarbeitung. Der entwickelte Radarsensor wurde zunächst im Labor und im Anschluss daran unter realistischen Einsatzbedingungen im Walzwerk in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern getestet.

Der Frequenzbereich des W-Bandes eignet sich in hervorragender Weise für den Einsatz in Walzwerken, da die Radarsignale sowohl eine geringe atmosphärische Dämpfung erfahren und andererseits durch die besonderen Umgebungsbedingungen im Walzwerk (Dampf, Rauch,

Staub, Infrarotstrahlung) nahezu unbeeinflusst bleiben.

Der innere Teil des Systems besteht aus mehreren modular miteinander verbundenen, komplexen Multilageng-Platinen, während das Radar-Frontend einen integrierten III-V-Halbleiter-Millimeterwellenschaltkreis (MMIC) enthält, der aus einem Frequenzvervielfacher, einem Leistungsverstärker, einem rauscharmen Verstärker und einem I/Q-Mischer besteht. Die Frontend-Platine enthält auch eine Signalquelle, die auf einem phasenstabilen, spannungsgesteuerten Oszillator basiert, der hochlineare Frequenzrampen und Signale zur Synchronisierung des Datenerfassungsprozesses erzeugt. Eine robuste, breitbandige planare Antennenlösung wurde entwickelt und auf der

Frontend-Platine integriert, um die bereitgestellten 15 GHz Bandbreite des verwendeten MMIC auszunutzen und das Radarsignal mit einem Öffnungswinkel von 10° abzustrahlen. Dabei dichtet ein Radom-Fenster das Gehäuse ab. Ein digitales Backend mit einem Echtzeitbetriebssystem verarbeitet die erfassten Radardaten, berechnet die entsprechenden Entfernungsinformationen und kommuniziert über eine Ethernet-Schnittstelle mit einem Industrie-PC (IPC), der an die Steuerung der entsprechenden Messstelle angebunden ist.

Radarbasierte Messsysteme

Im Rahmen der Projektarbeit und durch die Zusammenarbeit der Projektpartner

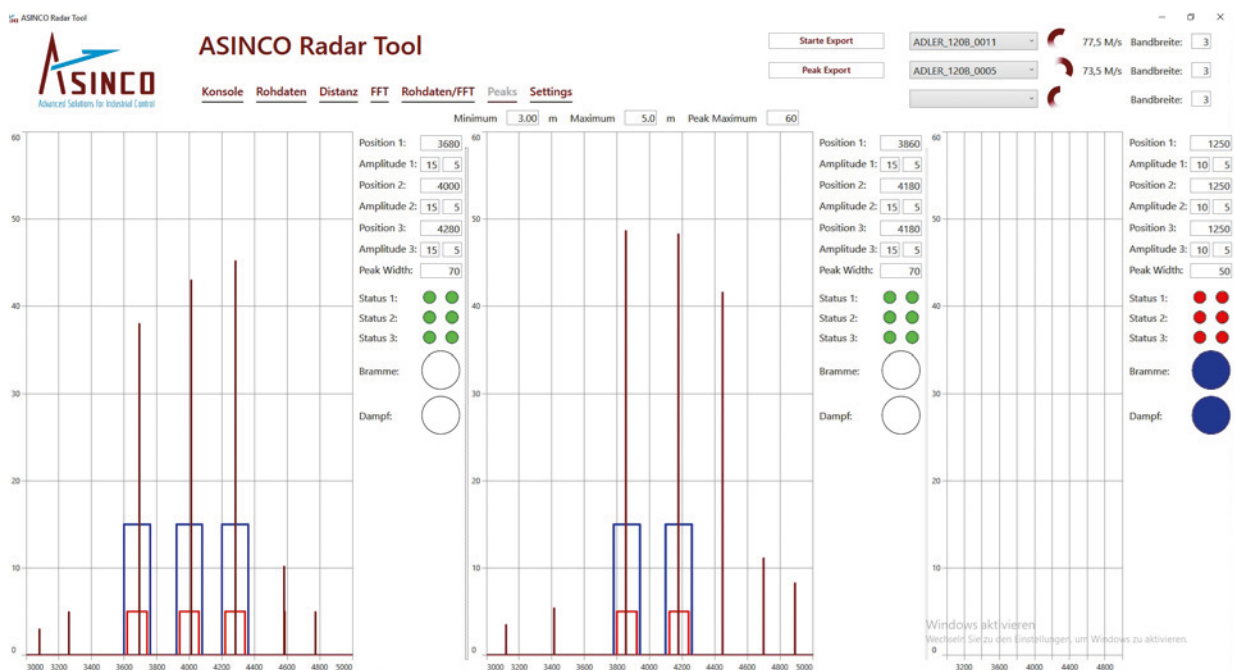


Bild 5. ASINCO Radartool für Einstellung, Kalibrierung und Wartung der Radar-Reflexschranke (Bild: Asinco)

wurden zwei radarbasierte Systeme entwickelt. Das Potential zur Energieeinsparung und die Komplexität der Messaufgabe wurden von Experten der Anlagenbetreiber und Radarexperten eingehend analysiert. Es wurden zwei Zielsysteme festgelegt, an denen gearbeitet und deren Spezifikationen definiert wurden. Diese beiden Systeme werden im Folgenden vorgestellt.

Radarbasierte Reflexschranke vor der Schopfschere.

Wie im vorangegangenen Abschnitt dargestellt, birgt die genaue Ansteuerung der Schopfschere ein hohes Potential zur Energieeinsparung und Produktivitätssteigerung. Dies kann erreicht werden, indem ein robustes und genaues Erkennungssystem implementiert wird, um sie zum richtigen Zeitpunkt auszulösen, um Kopf und Fuß des Vorbandes zu schneiden. Eine zu frühe Auslösung für den Vorbandkopf und eine zu späte Auslösung für den Vorbandfuß führt zum Problem, dass der Anfang und das Ende des Vorbandes nicht rechtwinklig abgeschnitten werden. Nicht rechtwinklige Formen des Vorbandanfangs und -endes führen häufig zu Problemen bei der Bandführung und zu Hochgehern, was mit Produktionsverlusten und hohen Energieverlusten verbunden ist [4]. Andererseits erhöht eine zu späte Auslösung für den Vorbandkopf sowie eine frühe Auslösung für das Vorbandende, um einen rechtwinkligen Schnitt der beiden Enden zu gewährleisten, die Materialverluste, verringert die Produktivität und erhöht den Energieverbrauch für das Wiedererwärmen des rückgeführten Materials (**Bild 2**).

Schopfscheren werden bisher entweder mit optischen Systemen wie Kameras und Fotozellen oder mit radiometrischen Messsystemen gesteuert. Radiometrische Systeme sind sehr genau, führen allerdings eine punktuelle Messung von Kopf und Ende der Brammen durch. Die

punktuelle Messung erfolgt in der Mitte des Rollgangs. Das bedeutet, dass diese Systeme nicht die Spitze des Vorbandkopfes/-fußes erkennen können, wenn sich die Spitze auf der rechten oder linken Seite des Vorbandes befindet (**Bild 3**). Außerdem ist die Verwendung radiometrischer Messsysteme mit Gefahrenpotentialen verbunden und erfordert strenge Sicherheitsmaßnahmen. Kamerasysteme haben viele Probleme aufgrund der rauen Umgebungsbedingungen, die Stirnseiten der Vorbänder können bei starkem Dampf und Nebel, insbesondere im Winter, nicht erkannt werden. Außerdem müssen sie ständig gereinigt werden. Fotozellen werden in der Regel in der Mitte des Rollgangs installiert und können die Brammenspitze nur erkennen, wenn diese in der Mitte liegt. Ein weiterer Nachteil von Fotozellen ist, dass sie nicht in der Lage sind, Vorbandkopf/-fuß zu erkennen, wenn diese zu kalt sind und weniger Licht emittieren. Außerdem müssen Fotozellen dauerhaft unter Luftdruck stehen, um sauber gehalten zu werden, was die Gesamtbetriebskosten (TCO) erhöht.

Das entwickelte radargestützte System für die Erkennung von Vorbandköpfen und -enden vor Schopfscheren besteht aus zwei Radarsensoren, die auf der Antriebsseite installiert sind, und einem Dreifachreflektor auf der Bedienseite auf gleicher Höhe. Sowohl Sensor als auch Dreifachreflektor befinden sich außerhalb des Rollgangs (**Bild 4**).

Der Radarsensor sendet elektromagnetische Millimeterwellen mit geringer Intensität aus. Die Millimeterwellen werden von den Reflektoren zurückgeworfen und vom Sensor empfangen. Die Schwebefrequenzen (entsprechend dem Abstand zwischen dem Sensor und den drei Reflektoren) und ihre Amplitude (Spitze) werden durch eine geeignete Signalauswertung bestimmt. Bei Vorhandensein eines Vorbandabfangs werden die Wellen, die min-

destens einen der Reflektoren erreichen (abhängig von der Vorbandstärke und der Höhe des Brammenkopfes relativ zur Durchlasslinie), unterbrochen und die Reflektorspitze(n) fällt/fallen dann unter einen bestimmten Schwellenwert. Daraufhin wird ein Auslösesignal erzeugt. Das Triggersignal bleibt so lange hoch, bis das Vorbandende das Erfassungsfeld des Radarsensors verlässt. Das Umschalten des Triggersignals von hoch auf niedrig wird genutzt, um das Ende des Vorbandes zu erkennen. Die Triggersignale beider Radarsensoren werden miteinander fusioniert, um die Zuverlässigkeit der Erkennung zu erhöhen und eine Fehlererkennung zu vermeiden.

Durch den Einsatz des Dreifachreflektors wird das Erfassungsfeld in vertikaler Richtung über dem Rollgang vergrößert, da viele Vorbandanfänge und -enden entweder eine positive oder negative Skiform aufweisen. Mit dem Dreifachreflektor-Konzept wird daher der oberste Punkt des Kopfes und des Endes erfasst, was einen großen vertikalen Erfassungsbereich gewährleistet.

Das entwickelte radargestützte System zur Erkennung von Kopf und Ende der Vorbänder vor der Schopfschere hat die folgenden Merkmale, die die Probleme der bisherigen Systeme überwinden:

- berührungslose Erfassung außerhalb des Rollgangs (risikofrei für die Produkte und die Produktionslinie),
- präzise und robust gegenüber extremen/rauen Arbeitsbedingungen (Temperatur, Staub, Dampf, unterschiedlichen Lichtverhältnissen, etc.) im Gegensatz zu optischen/thermischen Reflexionsschranken,
- keine ständige und häufige Reinigung der Sensoren/Reflektoren erforderlich im Gegensatz zu Fotozellen und Kameras,
- Verwendung von ungefährlichen elektromagnetischen Millimeterwellen mit

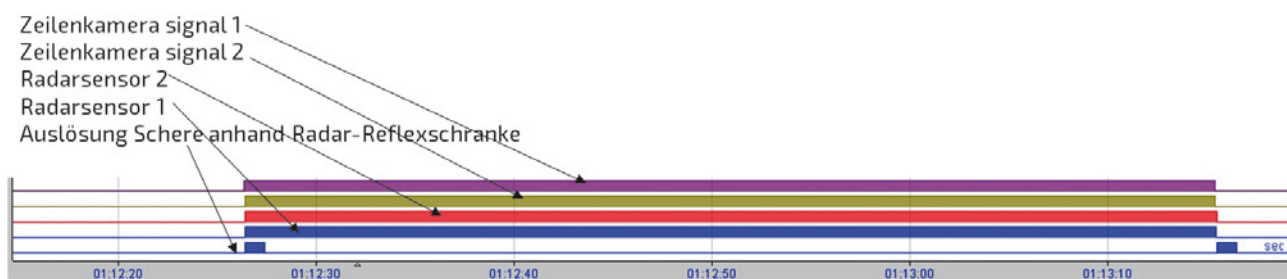


Bild 6. Erkennungssignale der radargestützten Reflexschranke und des optischen Referenzsystems (Bild: Asinco)

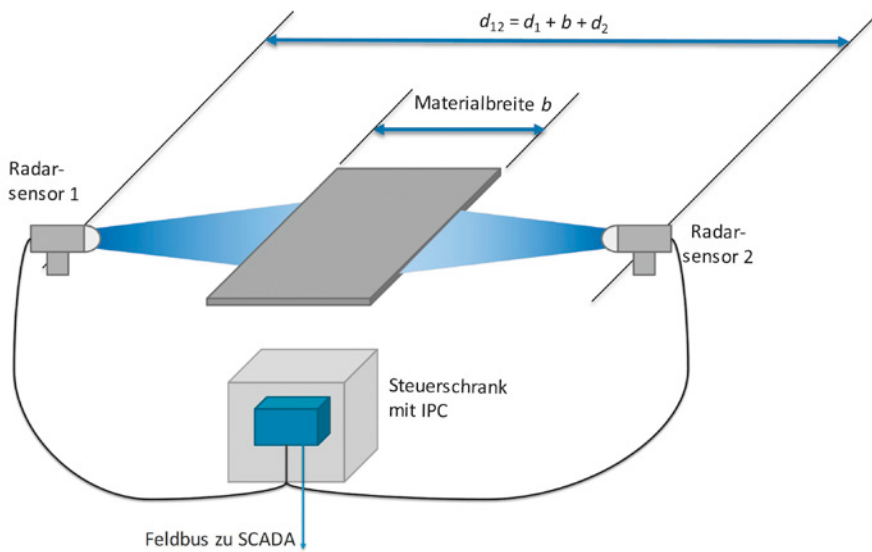


Bild 7. Schematische Darstellung des entwickelten Radar-Breitenmesssystems
(Bild: Asinco)

- geringer Leistung (vorteilhaft gegenüber radiometrischen Reflexschranken)
- lange Lebensdauer (im Gegensatz zu Wärmereflexionsschranken),
- sehr niedrige Betriebskosten (TCO) im Gegensatz zu Wärmereflexionsschranken, die 24/7 unter Luftdruck stehen müssen,
- schnelle Reaktion mit hoher Genauigkeit
- einfache Installation, Kalibrierung und Wartung mittels Radartool (**Bild 5**).

Nach der erfolgreichen Installation vor der Schopfschere im Warmbandwerk 3 (tkSE Bochum) wurden zahlreiche Offline-Tests durchgeführt, um die Performance des Systems zu verbessern (100%ige Erkennung, Null-Fehlauslösung, breites vertikales Erkennungsfeld, hohe Robustheit gegenüber rauen Betriebsbedingungen, hohe Erkennungsrate usw.). Das optische Erkennungssystem wurde als Referenzsystem

für die Performancebewertung betrachtet (**Bild 6**).

In einem der Offline-Tests wurden 4.270 Brammen im Performancetest berücksichtigt. Es wurden eine 99,94%ige Erkennungsrate für Vorbandkopf und -ende und eine Null-Fehlauslösungsrate erreicht. Entsprechende Änderungen zur weiteren Verbesserung der Erkennungsrate wurden durchgeführt und das System wird für die Kontrolle der Schopfschere im Warmbandwalzwerk eingesetzt.

Energieeinsparung durch radarbasierte Schopfoptimierung. Um die tatsächliche Einsparung von Energie aus der Menge von gemessenem Ausschuss zurückzurechnen, wurden thermische Modelle entwickelt. Die Auswertung von 4.700 Bändern im Versuchsaufbau an der Reflexschrankenmessstelle vor der Schopfschere zeigte eine sehr geringe Streuung der Auslösezeiten von Schnitten der Schopfschere. Da eine große Menge thermische Energie im geschnittenen Kopf oder Ende des Bandes gespeichert ist, konnte, nach Berücksichtigung der manuellen Sicherheitsmarge der Schopfschnittoptimierung, im Durchschnitt eine maximale Energieeinsparung von 13 MJ pro Kopf oder Fuß erzielt werden.

Radarbasierte Breitenmessung. Es reicht nicht aus, dass Breitenmesssysteme unter idealen Bedingungen wie optische Systeme

Bild 8. Tool zur Radar-Breitenmessung (Bild: Asinco)

me eine hochgenaue Breitenmessung durchführen können, vielmehr sollten die Messsysteme in der Lage sein, die Messaufgabe auch unter den rauen Umgebungsbedingungen, die den Warmbandwalzprozess begleiten, zu erfüllen. Da optische Systeme an ihre Grenzen stoßen und keine zuverlässige Breitenmessung von Brammen liefern können, wäre die Entwicklung eines robusten radargestützten Breitenmesssystems, das diese komplexe Aufgabe zuverlässig erfüllen kann, ein enormer Erfolg in der Geschichte des Warmbandwalzens. Genau dieser Herausforderung stellte sich das Konsortium im RAD-Energy-Projekt unter der Koordination der ASINCO GmbH.

Das entwickelte Messsystem ermöglicht die berührungslose, radargestützte Messung der Breite von Stahlbrammen/-bändern in kontinuierlich laufenden Prozessen. Es besteht aus zwei Radarsensoren und der dazugehörigen Signalverarbeitungseinheit (**Bild 7**).

Die Signalverarbeitungseinheit besteht hauptsächlich aus einem Indus-

trie-PC, der über die entsprechenden physikalischen Schnittstellen verfügt, um sowohl mit den Sensoren als auch mit dem übergeordneten Automatisierungssystem der Produktionslinie zu kommunizieren. Mit Hilfe des entwickelten Radartools (**Bild 8**) können Sensoren einfach konfiguriert werden (Frequenzbereich, Sweep-Zeit, Abtastung, etc.) und die gesamte Installation, Konfiguration, Kalibrierung des Messsystems

kann mit Hilfe dieses Tools bedienerfreundlich durchgeführt werden.

Diese Arbeit ist im Projekt RAD-Energy [2] entstanden. RAD-Energy wurde unter dem Förderkennzeichen 03ET1510A-D im Förderprogramm „Anwenderorientierte nichtnukleare FuE im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung“ teilweise durch das BMWi gefördert.

Literatur

- [1] Beneke, F.; Schalm, S. (Hrsg.): Prozesswärme: Energieeffizienz in der industriellen Thermoprozesstechnik, Sonderpublikation der Zeitschriften gwi – Gaswärme international und ewi – elektrowärme international, Band II: 2011–2015, 2015.
- [2] RAD-Energy: Steigerung der Energieeffizienz im Warmwalzwerk durch revolutionäre Hochpräzisionsradar-Messtechnologie, BMWi-Projekt, Fördermaßnahme: Anwenderorientierte nichtnukleare FuE im 6. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Konsortium: ASINCO GmbH, Fraunhofer IAF, INDEV Gauging Systems Limited, thyssenkrupp Steel Europe AG, 01.10.2017–31.07.2021. <https://t1p.de/j8oy>; <https://t1p.de/3kxcv>
- [3] Lathe, R.; Molder, F.: Einsparung an Rohstoffen und Reduzierung der Umweltbelastung durch Verbesserung des Ausbringens bei der Erzeugung von Stahlbändern, Schlussbericht zum BMBF-Projekt 01 RW 0172 und 01 RW 0173, 01.09.2002–31.08.2006. <https://t1p.de/zqspr>
- [4] DELTA Sensor: Schopfscheren Bilderfassungssystem CropVision CV3000. <https://t1p.de/h8nkn>