

# Echtzeit-Monitoring und Optimierung der Sinterzone in Zementdrehrohröfen zur Stabilisierung der Klinkerqualität bei veränderlicher Zusammensetzung der Ersatzbrennstoffe

Mareike Hoyer, Roland Melerski, André Dittrich, Markus Vogelbacher, Patrick Waibel, Jörg Matthes und Hubert B. Keller

1.	Zuverlässige Echtzeit-Informationen aus dem Ofen: Infrarotkamerabasierte Bildverarbeitung als leistungsfähige und vielseitige Alternative zu konventioneller Sensorik .....	774
1.1.	Herausforderungen für konventionelle Messsysteme in Zementdrehrohröfen.....	775
1.2.	Prozessüberwachung und -regelung durch automatische Bildverarbeitung .....	776
2.	Extraktion von Prozessüberwachungsgrößen aus den Infrarot-Bilddaten durch innovative Bildverarbeitungsmethoden .....	777
2.1.	Vorverarbeitung der Bilddaten .....	778
2.2.	Zeitliche Filterung der Bilder .....	778
2.3.	Dynamische Anpassung der <i>region of interest</i> durch automatische Erkennung von Ansätzen, kalten Klumpen und der Brennerposition.....	778
3.	Optimierung der Prozessführung mit dem inspect pro control C-System .....	779
3.1.	Robuste Temperaturinformationen aus dem Inneren der Anlage .....	781
3.2.	Flugverhalten des Ersatzbrennstoffs.....	782
3.3.	Nutzung der berechneten Kenngrößen zur Prozessoptimierung in der Praxis.....	783
4.	Zusammenfassung .....	784
5.	Literatur.....	785

Eine hohe und gleichbleibende Zementklinkerqualität wird nur erreicht, wenn stabile Prozessbedingungen bei der Herstellung im Drehrohröfen vorliegen. Insbesondere die vorherrschenden Temperaturen in der Sinterzone stellen dabei wichtige Prozessgrößen dar. So beeinflussen z.B. das Temperaturprofil im Ofen sowie die Länge der Sinterzone direkt die Klinkerqualität. Die Temperaturverteilung wird dabei entscheidend durch die vorgenommenen Brenneinstellungen sowie die eingesetzten Brennstoffe bestimmt.

Um CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und Kosten zu senken, kommen in der Zementindustrie als Ersatz für fossile Energieträger zunehmend höhere Anteile von Ersatzbrennstoffen zum Einsatz. Diese Ersatzbrennstoffe stellen allerdings aufgrund ihrer schwankenden Eigenschaften wie Stückung, Heizwert und Zündfähigkeit eine besondere Herausforderung für den Einsatz im Sinterzonenbrenner dar. Sind die Brenneinstellungen nicht auf den aktuell eingesetzten Brennstoff und seine physikalisch-chemischen Eigenschaften abgestimmt, kann dies in einer unvollständigen Verbrennung in der Flamme – und damit ineffizientem Brennstoffeinsatz mit reduziertem Energieeintrag – resultieren. Zusätzlich ergibt sich daraus eine verminderte Klinkerqualität oder, bei großen Mengen an unverbranntem Ersatzbrennstoff im Klinkerbett, ein erhöhtes Potential für Beschädigungen der feuerfesten Ausmauerung.

Um gleichbleibende Prozessbedingungen auch bei hohen Ersatzbrennstoffraten zu ermöglichen, ist somit eine regelungstechnische Stabilisierung des Sinterungsprozesses erforderlich. Voraussetzung hierfür ist allerdings die detaillierte Kenntnis des aktuellen Prozesszustandes. Durch die Umgebungsbedingungen innerhalb der Industrieöfen sind direkte Messungen prozessrelevanter Kenngrößen in Echtzeit jedoch nur deutlich eingeschränkt möglich. Eine Möglichkeit zur Erfassung der relevanten Prozessgrößen – und somit passende Einstellungen des Brenners vorzunehmen beziehungsweise den Prozess erfolgreich zu regeln – ist die Verwendung bildgebender Verfahren mit anschließender Kenngrößenberechnung. Dies kann beispielsweise durch die Installation einer leistungsfähigen Infrarotkamera am Ofenauslauf und durch intelligente Verfahren der Bildauswertung erfolgen, die aus den Kamerabildern kontinuierlich prozessrelevante Kenngrößen zur Prozesscharakterisierung und -überwachung extrahieren. Ein Live-Bild bietet darüber hinaus einen visuellen Eindruck und ermöglicht somit eine schnelle Einschätzung des aktuellen Prozesszustands – besonders hinsichtlich außergewöhnlicher Ereignisse oder bei mehrdeutiger Datenlage. Erst mit diesen zusätzlichen Informationen aus dem Ofen lassen sich die Ersatzbrennstoffraten kontrolliert erhöhen und damit nachhaltig und langfristig bis hin zum möglichen Optimum steigern.

## 1. Zuverlässige Echtzeit-Informationen aus dem Ofen: Infrarotkamerabasierte Bildverarbeitung als leistungsfähige und vielseitige Alternative zu konventioneller Sensorik

Die aktuellen Prozessbedingungen innerhalb des Drehrohrofens, insbesondere innerhalb der Sinterzone und der anschließenden Vorkühlzone am Ofenauslauf, sind durch konventionelle Sensorik nur schwierig zu überwachen. Detaillierte Echtzeit-Informationen sind jedoch unbedingte Voraussetzung für eine erfolgreiche Regelung der Verbrennungsprozesse und damit für die stabile Prozessführung und letztendlich eine Klinkerqualität, die den Normansprüchen an das Endprodukt gerecht werden kann. Die Information über die aktuell produzierte Klinkerqualität steht allerdings erst nach Abschluss der Laboruntersuchung des fertig gebrannten Klinkers zur Verfügung und kann somit nur mit erheblicher Verzögerung in die Prozesskontrolle rückgekoppelt werden.

## 1.1. Herausforderungen für konventionelle Messsysteme in Zementdrehrohröfen

Insbesondere Parameter wie die Form und Länge der Flamme, durch die sich der Verbrennungsprozess unmittelbar charakterisieren ließe, lassen sich aber nicht direkt bestimmen. Lediglich indirekte Rückschlüsse auf das Verbrennungsverhalten des aktuell eingesetzten Brennstoffs lassen sich aus Messungen beispielsweise der Gaszusammensetzung, der Sekundär- bzw. Tertiärlufttemperatur und der Ofenstromaufnahme ziehen. Dabei kann die konventionelle Sensorik allerdings kein vollständiges Bild der Prozesse innerhalb der Drehrohranlage liefern. Insbesondere lokale Schwankungen können zum Teil gar nicht erfasst oder Änderungen nicht unverzüglich wiederspiegelt werden. Auch das Temperaturprofil des Klinkerbetts am Ofenauslauf, das wertvolle Informationen über die Bedingungen in der Sinterzone sowie den Abkühlvorgang am Ofenauslauf enthält, ist durch konventionelle Sensorik nur unzureichend zugänglich: Thermoelemente spiegeln vielmehr gemittelte Gastemperaturen wider; Pyrometer-Messungen sind eher punktförmig und anfällig gegenüber fluktuierendem Staubaufkommen. Die kalibrierte Infrarotkamera hingegen liefert ein Array von Oberflächentemperaturpunkten, die durch geeignete Weiterverarbeitung und Bildauswertemethoden deutlich stabilere Temperaturinformationen aus dem Ofen liefern können.

Darüber hinaus erlaubt der visuelle Bildeindruck, den ein Kamerabild liefert, einen Überblick über den aktuellen Prozesszustand sowie bei einer entsprechend hohen Auflösung auch die Möglichkeit, durch automatische Bildauswertung relevante Prozessgrößen zu berechnen. Zwar kann schon die Installation einer normalen Kamera, die im visuellen Spektralbereich misst, oder die Beobachtung der Situation durch Sichtfenster im Ofenkopf die Prozessüberwachung unterstützen, indem sie einen visuellen Echtzeit-Eindruck der Flamme und der Viskosität des Materials am Ofenauslauf liefert. Dieser ist aber auf Grund des prozessbedingten – teils extremen – Staubaufkommens stark eingeschränkt. Der Einsatz von Infrarotkameras in speziell für die Anwendung angepassten Spektralbereichen im mittleren Infrarot (MIR) erlaubt hingegen die Durchsicht durch die Verbrennungsgase und Rußpartikel der Kohleflamme und

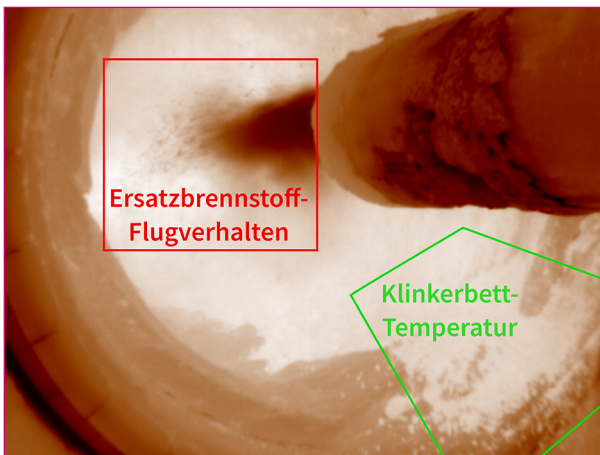


Bild 1:

Infrarot-Aufnahme des Ofenauslaufs eines Drehrohrfens zur Zementklinkerherstellung

damit eine ungestörte Sicht auf den Ersatzbrennstoff (Bild 1). So kann das Flug- und Verbrennungsverhalten der eingesetzten Ersatzbrennstoffe in Echtzeit beobachtet und durch geeignete Bildverarbeitungsalgorithmen auch automatisch bewertet und in die Prozesskontrolle rückgekoppelt werden.

## 1.2. Prozessüberwachung und -regelung durch automatische Bildverarbeitung

Ein weiterer entscheidender Vorteil beim Einsatz von infrarotkamerabasierten Messsystemen ist die Möglichkeit, durch innovative Methoden der Bildverarbeitung die in den Bilddaten enthaltenen Informationen automatisiert auszuwerten und Kenngrößen zu extrahieren. Mit der Bestimmung von prozessrelevanten Kenngrößen [2, 6] kann der Prozesszustand damit auch quantitativ erfasst werden. Erst durch die Bereitstellung dieser Informationen ist ein vergleichendes Langzeit-Monitoring und eine automatische Regelung des Prozesses möglich. Zur Überwachung des Ofenauslaufs bieten sich dafür insbesondere die Temperaturen im Klinkerbett sowie die Flugeigenschaften des Ersatzbrennstoffs an, auf die in den Abschnitten 3.1 und 3.2 im Detail eingegangen wird. Ein Beispiel für die Sicht in den Zementdrehrohrofen mit spezieller Infrarotkamera findet sich in Bild 1. Die für die Prozesskontrolle besonders interessanten Bereiche sind farbig hervorgehoben.

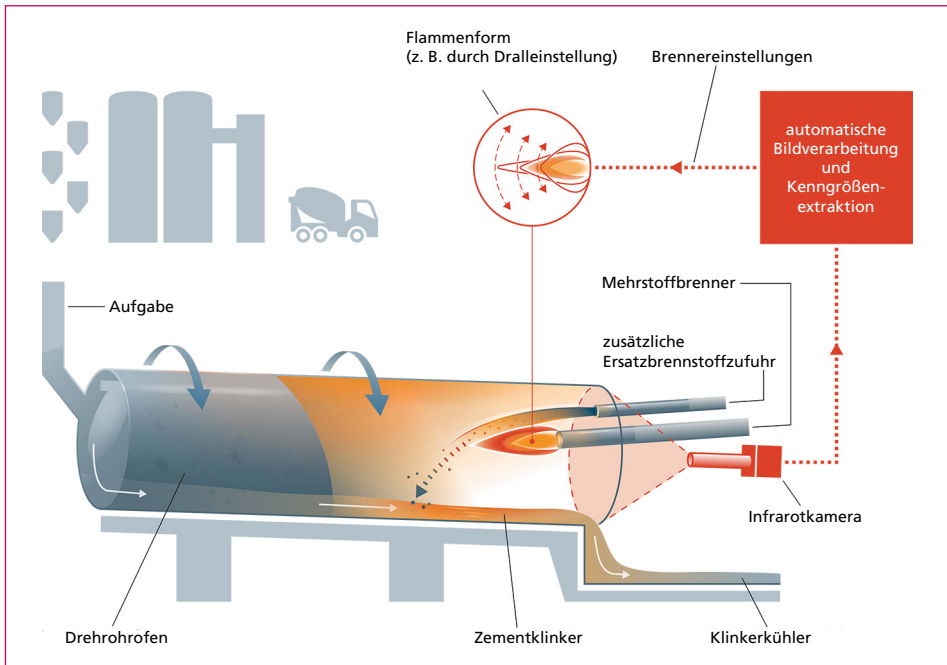


Bild 2: Schematische Darstellung des Infrarotkamera-Einsatzes zur Prozessregelung; die Kamera ist so positioniert, dass sie den Ofenauslauf samt Brenner bis hin zu Teilen der Sinterzone abbilden kann; Änderungen der Brennstoffqualität spiegeln sich in den Bilddaten wider und können so von spezialisierter Bildverarbeitungssoftware automatisch erkannt und für die Regelung genutzt werden

Der Ansatz der infrarotkamerabasierten Prozesskontrolle ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Er wurde in mehreren wissenschaftlichen Studien – unter anderem im Rahmen der Projekte COMFEB und OPTIMER – in verschiedenen Drehrohr-Anlagen (vor allem aus dem Bereich Zementherstellung [2, 3, 5, 6] und Zinkrecycling) evaluiert und verfeinert. Die Ergebnisse wurden von der ci-tec GmbH in die bestehende Softwarelösung zur Verarbeitung von Infrarot-Aufnahmen aus industriellen Verbrennungsprozessen integriert und stehen damit für die industrielle Anwendung zur Verfügung. Das System wird stetig erweitert – dabei fließen insbesondere neueste wissenschaftliche Erkenntnisse und die Erfahrungen der Praxisanwender in die Weiterentwicklung ein.

## 2. Extraktion von Prozessüberwachungsgrößen aus den Infrarot-Bilddaten durch innovative Bildverarbeitungsmethoden

Durch das infrarotkamerabasierte Messsystem werden umfangreiche Informationen in Echtzeit aufgenommen. Insbesondere ergeben sich aus den aufgenommenen Strahlungswerten direkt die Oberflächentemperaturen des jeweiligen Bereichs im Ofen. Damit lässt sich das System – ähnlich einem Pyrometer – auch zur Temperaturmessung einsetzen.

Dabei bietet die Infrarotkamera den Vorteil, dass über die Software flexibel konfigurierbar ist, welche Bereiche des Ofens (bzw. des Bildes) in die Temperaturmessung mit einfließen sollen. Zudem enthalten die Bilddaten weitere Informationen – wie zum Beispiel die aktuelle Staubbelastung – durch deren Berücksichtigung sich die Temperaturbestimmung vor allem in staubiger Atmosphäre wesentlich verbessern lässt und robuster gegenüber solchen Verfälschungsquellen ist. Darüber hinaus können aus den Bilddaten Temperaturprofile und weitere Kenngrößen extrahiert werden, mit denen der aktuelle Prozesszustand quantifiziert werden kann.

Der generelle Ablauf von der Bildaufnahme mit (Infrarot-)Kamera (wie in Abschnitt 1 beschrieben) über die Vorverarbeitung bis hin zur Extraktion von Kenngrößen, die zur Interpretation der Bildinhalte genutzt werden können, ist in Bild 3 schematisch dargestellt. Mittlerweile stehen einige Standardverfahren im Umfeld der industriellen Bildverarbeitung zur Verfügung, die in verschiedensten

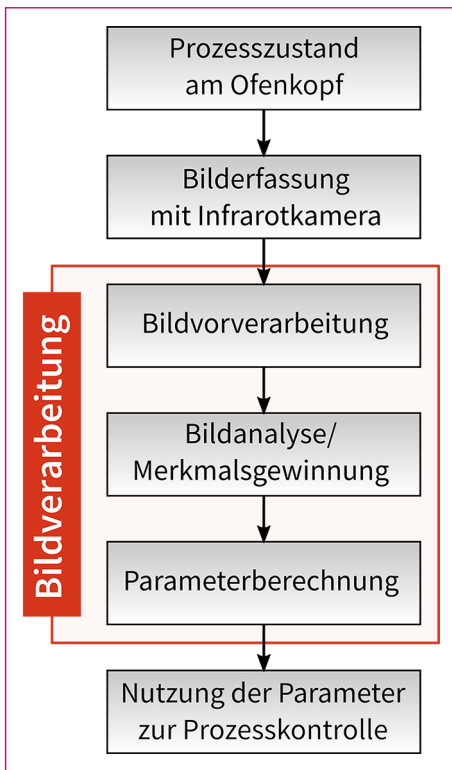


Bild 3: Ablauf der Bildverarbeitung zur Szenenanalyse für die Beurteilung und Kontrolle der Prozesssituation in einer Zementdrehrohranlage

Anwendungsfeldern erfolgreich eingesetzt werden. Die in diesem Artikel vorgestellten Verfahren gehen darüber hinaus, indem sie verschiedenen prozessspezifischen Herausforderungen aus der Zementherstellung im Drehrohren durch innovative und an die Anwendung angepasste Ansätze begegnen. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Verfahren beziehen sich hauptsächlich auf die Vorverarbeitung während Methoden der Bildanalyse und Parameterberechnung in Abschnitt 3 diskutiert werden.

## 2.1. Vorverarbeitung der Bilddaten

Um zu gewährleisten, dass nur Aufnahmen mit ausreichend guten Sichtverhältnissen in die Kenngrößenbestimmung einfließen, werden die kontinuierlich von der Kamera gelieferten Rohbilder unter anderem anhand der mittleren Temperatur und des Staubaufkommens evaluiert und gegebenenfalls von weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Darüber hinaus kommen Verfahren zum Einsatz, die beispielsweise bestimmte Effekte verstärken oder abschwächen. Ziel der Vorverarbeitung ist, die Bilder optimal für die weitergehende Analyse vorzubereiten und damit die erfolgreiche Extraktion von Kenngrößen zu unterstützen.

## 2.2. Zeitliche Filterung der Bilder

Um den für den Prozess unerheblichen, kurzfristigen Schwankungen zu begegnen, hat sich die nichtlineare zeitliche Filterung des einlaufenden Rohbild-Datenstroms mittels Rangordnungsfilter bewährt. Je nach Filterungsverfahren können dadurch bestimmte Effekte in den Bildern verstärkt oder reduziert werden. Für die Anwendung in Zementdrehrohren von besonderem Interesse sind Verfahren, die mittels einer Maximum-Filterung kurzzeitig lokal erhöhtes Staubaufkommen herausfiltern, damit die gemessenen Temperaturen innerhalb der entsprechenden Bereiche nicht durch die kältere Staubwolke verfälscht werden. Dadurch und durch die Verwendung eines größeren Bereichs zur Temperaturbestimmung kann die Stabilität der Temperaturbestimmung im Vergleich zu Messungen durch Punkt-Pyrometer deutlich verbessert werden.

## 2.3. Dynamische Anpassung der *region of interest* durch automatische Erkennung von Ansätzen, kalten Klumpen und der Brennerposition

Die Bildbereiche, die im Live-Betrieb zur Kenngrößenermittlung genutzt werden sollen – die *regions of interest* – basieren auf (bereits vorhandenem) Prozesswissen auf Anwenderseite. Beispielsweise können mehrere Temperaturnauswertefelder so positioniert werden, dass die Temperaturen in verschiedenen Bereichen des Ofens überwacht werden können. Durch die Drehung des Ofens beziehungsweise die Bewegung des Materials im Ofen können dabei allerdings in einigen Bildbereichen temporär Objekte auftauchen, die eine zuverlässige Erkennung der relevanten Effekte stören würden.

Dazu gehören zum Beispiel kalte Ansatzbrocken im Klinkerbett oder kältere Drehrohr-Wandbereiche, die aufgrund der fluktuierenden Breite des Klinkerstroms am Ofenauslauf temporär sichtbar werden. Um die Klinkerbett-Temperatur trotzdem zuverlässig bestimmen zu können, kann die *region of interest* automatisch auf den sinnvollen Bereich beschränkt werden, wie in Bild 4.(a) exemplarisch dargestellt ist.

Auch durch Ansatzbildung könnte es zu Fehlerkennungen kommen, beispielsweise bei der automatischen Erkennung des (kalten) Ersatzbrennstoffs. Dies ist in Bild 4.(b) illustriert. Zur Eliminierung dieser Effekte wird vor der hier vorgestellten Flugbahnerkennung (Abschnitt 3.2) des Ersatzbrennstoffs eine Ansatz-Detektion [2, 3] durchgeführt, um diese Bereiche von der weiteren Bildverarbeitung auszuschließen.

Ein weiterer Aspekt, der für die robuste Brennstoff-Trajektorienerkennung berücksichtigt werden muss, sind kleine Veränderungen der Kamera-Einbauposition oder der Brennerposition relativ zum Ofen. Durch diese Veränderungen ändern sich die Startkoordinaten der Brennstoff-Trajektorie im Kamerabild. Abhilfe kann geschaffen werden, indem diese dynamisch angepasst werden. Dazu wird eine regelmäßige Brenner-Detektion [2, 3] mittels *template matching* durchgeführt und darüber die korrekte Austrittsposition des Brennstoffs aus dem Brenner im Bild ermittelt.

Die Verwendung solcher Methoden zur dynamischen Anpassung der Bereiche, die für die weitere Bildverarbeitung genutzt werden, erhöht die Robustheit der verwendeten Bilderkennungsalgorithmen weiter, um auch unter wechselnden Prozessbedingungen zuverlässige Ergebnisse zu erhalten.

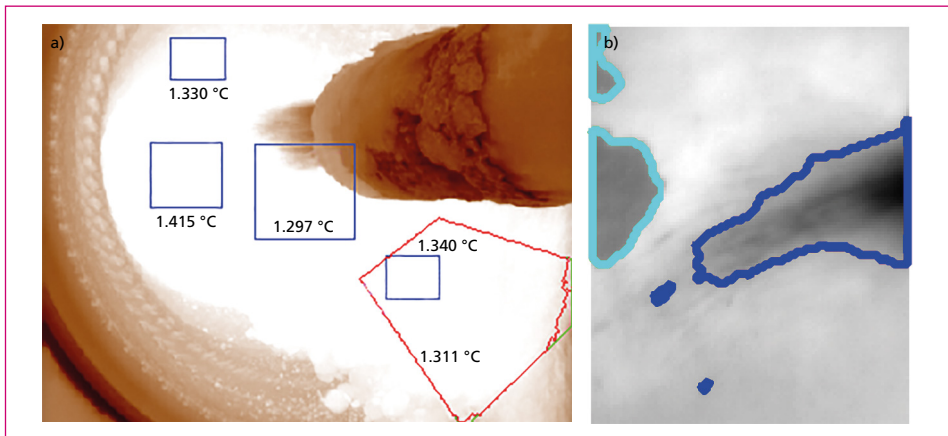


Bild 4: Beispiele für automatische Anpassung der region of interest (a) zur Bestimmung der Klinkerbett-Temperatur werden die kalten Bereiche der Drehrohrwand automatisch erkannt und für die weitere Berechnung ignoriert, der nach der dynamischen Anpassung tatsächlich zur Temperaturbestimmung verwendete Bildbereich ist hier rot umrandet; der Unterschied zur initial gewählten region of interest ist in grün markiert (b) die im regulären Betrieb entstehenden Ansätze (cyan) am Drehrohröfen könnten bei der Brennstoffdetektion (blau) zu Fehlerkennungen führen und werden daher ebenfalls automatisch erkannt und ausgeschlossen

### 3. Optimierung der Prozessführung mit dem inspect pro control C-System

Das in Abschnitt 1 vorgestellte Messsystem wird bereits erfolgreich industriell eingesetzt und kann auch für bestehende Anlagen nachgerüstet werden. Durch den modularen Aufbau der eingesetzten Bildverarbeitungssoftware sowie die Konfigurationsmöglichkeiten lässt sich das Messsystem an die spezifischen Gegebenheiten und Problemstellungen

der jeweiligen Produktionsanlage anpassen. In diesem Abschnitt werden verschiedene Methoden zur Merkmalsgewinnung und Parameterberechnung (Bild 3) vorgestellt und diskutiert, wie die Resultate zur Optimierung und Stabilisierung der Prozessführung in der Zementindustrie zum Einsatz kommen können.

Ein wichtiges Ziel für Anlagenbetreiber ist die Erhöhung des Ersatzbrennstoffeinsatzes über den Hauptbrenner, ohne dass sich die veränderte Brennstoffzusammensetzung negativ auf die Prozessbedingungen auswirkt. In der Praxis stellen sich dadurch allerdings verschiedenste Herausforderungen. Die durch das System aus fest installierter Infrarotkamera und intelligenter Bildauswertesoftware bestimmten Prozessüberwachungsgrößen können dazu genutzt werden, den Herausforderungen zu begegnen und die Prozessführung zu verbessern. Insbesondere kann der Prozesszustand durch die berechneten Kenngrößen besser quantitativ erfasst werden, wodurch gezielte Eingriffe durch den Anlagenfahrer oder eine automatische Regelung ermöglicht werden [4].

Zwei am Ofenauslauf beobachtbare Aspekte, die zur Beurteilung des Prozesszustands hinsichtlich der produzierten Klinkerqualität besonders interessant sind, sind detaillierte Informationen über die Temperatur(-verläufe) in der Sinter- und Vorkühlzone sowie das Flug- und Verbrennungsverhalten des Brennstoffs. Der zeitliche Verlauf der Kenngrößen sowie die Visualisierung des Prozesszustands durch Live-Video und gefilterte Bilder können für die Darstellung im Leitstand individuell zusammengestellt werden (Bild 5), um das Personal in der stabilen Prozessführung zu unterstützen. Zusätzlich können die berechneten Prozessüberwachungsgrößen ins Prozessleitsystem der Anlage integriert werden, um sie mit anderen Messgrößen zusammenzuführen und für die Steuerung der Anlage zu verwenden.

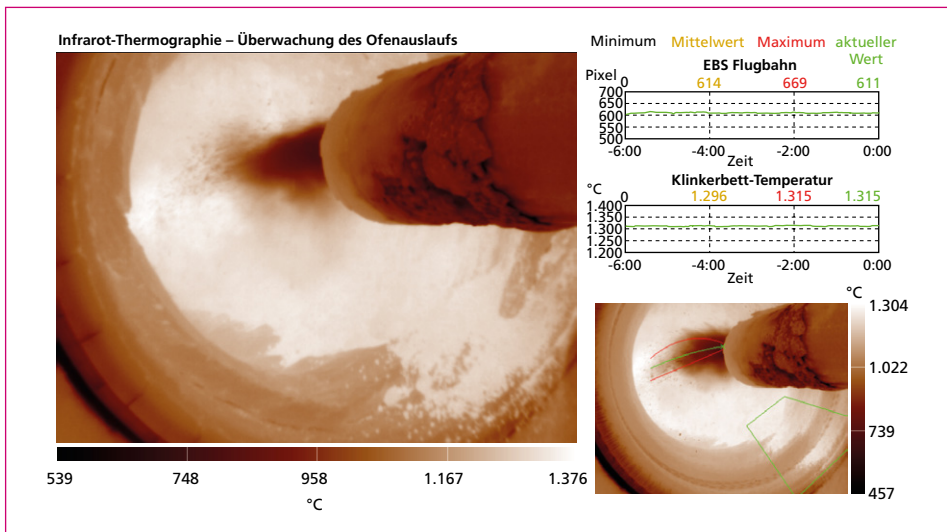


Bild 5: Beispiel einer Wartenanzeige für das Monitoring des Ofenauslaufs; neben dem Live-Bild (links) stehen dem Anlagenfahrer ein gefiltertes Bild samt Visualisierung der berechneten Ersatzbrennstoff-Flugbahn (rechts unten) sowie Trenddarstellung der wichtigsten Kenngrößen (rechts oben) zur Verfügung



### 3.1. Robuste Temperaturinformationen aus dem Inneren der Anlage

Zur Beurteilung der Temperaturverteilung im Ofen, die sich als Resultat der Brennstoffzusammensetzung und Brennereinstellungen ergibt, sind die aus den gefilterten Bildern ermittelten Temperaturen (Abschnitt 2.2) besonders aussagekräftig. Dabei ist die Flamme selbst für die eingesetzte Infrarotkamera bis auf Ruß- und Brennstoffpartikel weitestgehend durchsichtig (Bild 1); es werden vielmehr Oberflächentemperaturen gemessen. Die Prozesskontrolle kann sich damit direkt auf die Klinkerbett-Temperaturen stützen, statt aus der Flammentemperatur indirekt auf den erwarteten Wärmeübertrag ins Klinkerbett zu schließen.

Aus den Kamerabildern können dabei in Echtzeit sowohl die Temperaturinformationen selbst, als auch die Lage und Größe unterschiedlicher Temperaturzonen extrahiert werden. So entsteht ein umfassendes Bild der Temperatureinflüsse auf den Zementklinker zwischen Sinterung und Abwurf in den Klinkerkühler. Ziel ist eine möglichst stabile Temperaturverteilung – sowohl hinsichtlich der erreichten Temperaturen als auch hinsichtlich der Länge der Vorkühl- und Sinterzone. Bei der Beurteilung und Überwachung können Temperaturprofile (Bild 6) entlang des Ofens unterstützen. Durch die Überwachung der Temperaturen können die Folgen schwankender Ersatzbrennstoffqualität oder von Brennstoffumstellungen – zum Beispiel Änderungen des Energieeintrags und der Flammenlänge – frühzeitig erkannt und in Folge angepasst werden. Eine noch frühzeitigere Reaktion wird durch die ergänzende Überwachung des Brennstoff-Flugverhaltens ermöglicht, die in Abschnitt 3.2 vorgestellt wird.

Zur Temperaturüberwachung können verschiedene Bereiche im Bild festgelegt werden, aus denen gefilterte oder auch ungefilterte Temperaturwerte ermittelt werden. Nützliche Temperaturen für das Monitoring sind beispielsweise:

- die Temperaturen des Klinkerbetts in verschiedenen Bereichen der Sinterzone um sicherzustellen, dass ein ausreichend hohes Temperaturniveau bzw. eine ausreichende Länge der Sinterzone erreicht werden, die für die Alitbildung und damit die Klinkerqualität eine entscheidende Rolle spielen,
- die Temperatur des Klinkerbetts am Ofenauslauf, um die Vorkühlung des Klinkers zu überwachen und den Zerfall von Alit zu Belit zu verhindern,
- die Temperatur des Hauptbrenners und gegebenenfalls eines Satellitenbrenners, um Schädigungen der Brenner durch Ausfall der Kühlung zu vermeiden,
- die mittlere Temperatur im Bereich der (Ersatz-)Brennstoff-Flugbahn bzw. des Flammenkerns, in der sich Brennstoffwechsel oder -schwankungen teils deutlich widerspiegeln,
- die Gesamttemperatur im Ofen,
- die Wandinnentemperaturen der Anlage.

Insbesondere für die Klinkerzone am Ofenauslauf kann – wie in Bild 4.(a) dargestellt – ein größerer Bereich gewählt werden, innerhalb dessen kalte Bereiche der Drehrohrwand sowie größere kältere Klumpen automatisch erkannt und von der weiteren

Temperaturbestimmung ausgeschlossen werden können (Abschnitt 2.3.). So kann die Klinkerbett-Temperatur am Ofenauslauf besonders zuverlässig bestimmt werden. Sie lässt Rückschlüsse darauf zu, wie schnell der Klinker in der Vorkühlzone bereits abkühlen konnte – ein wichtiger Aspekt für die Stabilisierung der bei der Sinterung entstandenen Klinkerphasen und damit die Qualität des Zementklinkers [2, 5].

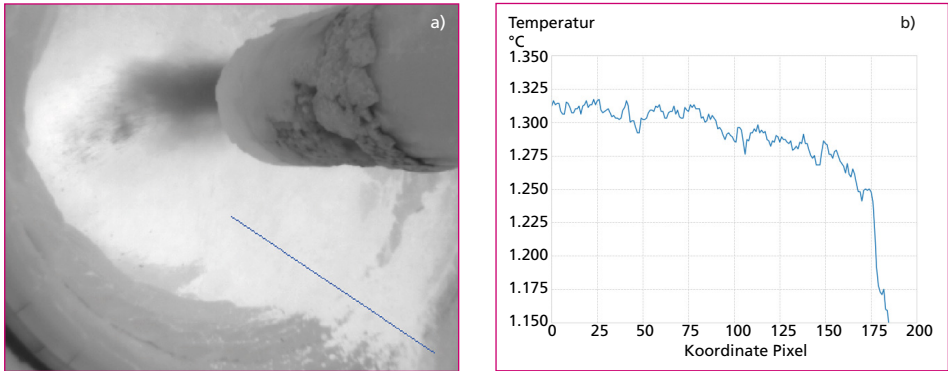


Bild 6: Aus den Infrarotaufnahmen (a) können Temperaturprofile (b) entlang beliebiger Linien erstellt werden; von besonderem Interesse sind Ofenlängsschnitte (im Beispiel blau dargestellt) oder Flammenquerschnitte

### 3.2. Flugverhalten des Ersatzbrennstoffs

Ein zweiter wichtiger Aspekt beim kontrollierten Einsatz von Ersatzbrennstoffen im Sinterzonenbrenner ist das Zünd- und Verbrennungsverhalten der eingebrachten Brennstoffe. Das Ziel hierbei ist es, den vollständigen Ausbrand und einen möglichst optimalen Energieeintrag bzw. ein möglichst definiertes und konstantes Temperaturprofil in der Vorkühl- und Sinterzone zu erreichen.

Durch die schwankenden Eigenschaften der Ersatzbrennstoffe ist eine initiale Anpassung des Mehrstoff- bzw. Satellitenbrenners, über den diese aufgegeben werden, an die Gegebenheiten in der jeweiligen Anlage dazu nicht ausreichend. Vielmehr muss im laufenden Betrieb das Verbrennungsverhalten kontinuierlich analysiert und beurteilt sowie bei Veränderungen entsprechend reagiert werden [1]. Je nach Brenner gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Einstellungen an den Brennstoff anzupassen, um beispielsweise ein Verschieben der Sinterzone durch Brennstoffwechsel zu vermeiden oder abzumildern. Zu den üblichen Einflussmöglichkeiten gehören die Drallluft am Hauptbrenner, die Geschwindigkeit der Förderluft, der Zentralluftdruck oder auch eine zusätzliche Luftlanze für den Ersatzbrennstoffkanal oder ein Kugelgelenk am Satellitenbrenner.

Neben der visuellen Begutachtung des Flugverhaltens können auch aus den Bildern extrahierte Kenngrößen zur Überwachung des Ersatzbrennstoffeinsatzes und zur Beurteilung von Veränderungen herangezogen werden. Besonders aussagekräftig ist die Flugbahn des Brennstoffs, die in Bild 7 farbig markiert ist. Bei der Bestimmung der Trajektorie [2, 3] wird berücksichtigt, dass der Brennstoff bei Austritt aus dem Brenner noch

weitestgehend gebündelt vorliegen kann, sich aber zunehmend auffächert und dann in Form einzelner Brennstoffpartikel sichtbar wird. Die Robustheit der Flugbahndetektion wird dabei durch die in Abschnitt 2.3 beschriebenen Verfahren zur Ansatz- und Brennerdetektion erhöht. Das Flugverhalten des Ersatzbrennstoffs lässt sich durch die Form der berechneten Flugkurve sowie durch die Streuung der Ersatzbrennstoffpartikel charakterisieren. Änderungen in der Ersatzbrennstoffqualität spiegeln sich unmittelbar in der Flugweite wider und ermöglichen damit eine schnelle Reaktion – entweder durch eine manuelle Optimierung oder bei geeigneten Regelungsmöglichkeiten durch automatische Prozesskontrolle. Somit lassen sich ein Verschieben der Sinterzone durch Brennstoffänderungen abfangen und der Sinterungsprozess stabilisieren.

Auch schleichende Veränderungen können durch die objektive Quantifizierung des Flugverhaltens besser überwacht werden. Kommt es schließlich – zum Beispiel durch Veränderungen an der Anlage – zu dauerhaften Problemen beim Ersatzbrennstoffein-satz, können diese ebenfalls anhand der Infrarot-Aufnahmen analysiert und geeignete – gegebenenfalls bauliche – Maßnahmen ergriffen werden.

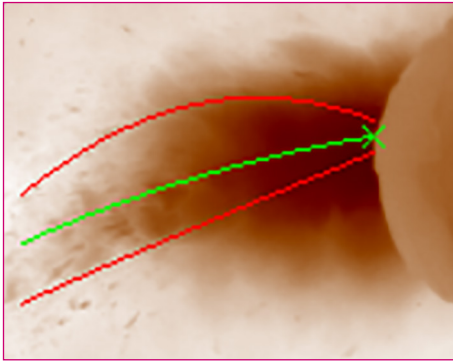


Bild 7: Bestimmung der Flugbahn des Ersatzbrennstoffs aus den Kame-rabildern; zur mittleren Flugbahn (grün) tragen sowohl die gebündelten Brennstoff-Anteile als auch einzelne Brennstoffpartikel bei; die Streuung (rot) wird durch Partikel dominiert

Ein weiterer Aspekt des Flugverhaltens sind unvollständig ausgebrannte Ersatzbrennstoff-Partikel, die ins Klinkerbett fallen. Diese können dort zu lokal reduzierenden Brennbedingungen führen, was sich negativ auf die Klinkerqualität auswirkt. Auch auf die Ansatzbildung können sich die unverbrannten Brennstoff-Bestandteile negativ auswirken, da der Ansatz poröser wird und damit die feuerfeste Ausmauerung nicht mehr so gut geschützt wird. Um Stillstandzeiten durch Reparaturarbeiten zu verringern, müssen Prozesssituationen mit hohen Anteilen an unverbranntem Ersatzbrennstoffeintrag ins Klinkerbett – vor allem nahe am Ofenauslauf – daher möglichst schnell erkannt und vermieden werden.

Durch entsprechende Filterung kann die Sichtbarkeit des Brennstoffs in den Infrarot-Aufnahmen erhöht werden, um den Anlagenfahrer in den Brennstoff- und Brennereinstellungen zu unterstützen. Darüber hinaus existieren erste Ansätze der automatischen Detektion unverbrannter Partikel, die eine weitere Möglichkeit bieten, das Flug- und Ausbrandverhalten zu quantifizieren.

### 3.3. Nutzung der berechneten Kenngrößen zur Prozessoptimierung in der Praxis

In Bild 8 sind die Ergebnisse aus einer mehrtägigen Messkampagne in einer Zement-drehrohranlage [2, 5] mit dem System aus Infrarotkamera und den hier vorgestellten Bildverarbeitungs-algorithmen dargestellt. Die ermittelten Flugbahnparameter haben

einen deutlichen Einfluss auf die Klinkerbett-Temperatur: Bei einer längeren Flugweite erhöht sich auch die Temperatur im Klinkerbett durch die bessere energetische Umsetzung des Brennstoffs aufgrund der längeren Aufenthaltsdauer in der Flamme. Dadurch wird wiederum die Klinkerqualität positiv beeinflusst. Somit geben die kamerabasiert bestimmten Kenngrößen schon vor Abschluss der Laboranalyse des hergestellten Zementklinkers aussagekräftige Hinweise auf den aktuellen Verbrennungsprozess und gegebenenfalls nötige Maßnahmen zur Prozessoptimierung. So kann den schwankenden Eigenschaften der eingesetzten Ersatzbrennstoffe beispielsweise durch die Anpassung der Brennereinstellungen unverzüglich entgegengewirkt werden. Durch eine solche regelungstechnische Stabilisierung kann auch eine Verschiebung der Sinterzone durch wechselnde Brennstoffqualität verhindert werden.

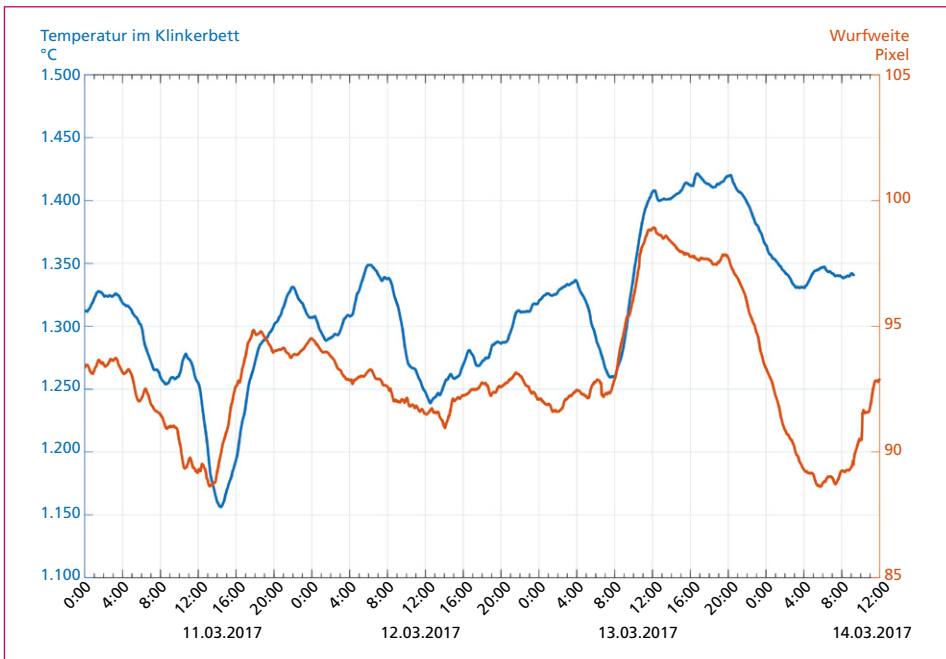


Bild 8: Vergleich der Klinkerbett-Temperatur und der Ersatzbrennstoff-Flugbahn (jeweils mit Mittelwertfilter 240 min) in einer Zementdrehrohranlage über mehrere Messtage

## 4. Zusammenfassung

Eine am Ofenkopf einer Zementdrehrohranlage fest installierte Infrarotkamera im mittleren Infrarotbereich (MIR) bietet im Vergleich zu Kameras, die im sichtbaren (VIS) oder nahinfraroten (NIR) Bereich des Spektrums operieren, eine bessere Durchsicht durch Staub und Flammen. Damit lassen sich zuverlässig und flexibel Oberflächentemperaturen innerhalb des Ofens bestimmen. Zusätzlich bietet das Kamerabild einen visuellen Echtzeit-Eindruck des Prozesszustands im Ofen, der sowohl zur Überwachung im Leitstand als auch zur automatischen Extraktion von Prozessüberwachungsgrößen

durch die hier vorgestellten Bildverarbeitungsmethoden genutzt werden kann. Erst solche detaillierten Informationen aus dem Ofen sowie die quantitative Erfassung des Prozesszustands durch geeignete Kenngrößen ermöglichen ein adäquates und augenblickliches menschliches Eingreifen oder automatische Prozesskontrolle als Reaktion auf Veränderungen im Prozess. Der Nutzen der verschiedenen vorgestellten Ansätze wird durch Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Möglichkeiten der Optimierung durch infrarotkamerabasierte Prozesskontrolle

Einfluss auf	Auswirkung
Klinkerbett-Temperatur und Sinterzonenlänge	stabilere Erreichung des Optimums durch bessere Überwachung der Ersatzbrennstoff-Eigenschaften
unvollständig verbrannter Ersatzbrennstoff im Klinkerbett	weniger durch frühzeitige Detektion und sofort eingeleitete Gegenmaßnahmen
nötige Reparaturmaßnahmen und Stillstände	geringer und seltener durch optimierte Prozessführung und direkte Rückkopplung aus dem Inneren des Ofens
Ersatzbrennstoff-Rate	höher durch kontrollierte Steigerung und mehr verfügbare Informationen für die Feineinstellung
Wirtschaftlichkeit	besser, da stabilerer Gesamtbetrieb durch visuelle Informationen und prozessrelevante Kenngrößen und somit frühere Eingriffsmöglichkeit

Anhand der staubbereinigten Bilddaten aus dem Ofen kann beispielsweise online die Klinkertemperatur in verschiedenen Bereichen der Sinterzone und am Ofenauslauf bestimmt werden. Die so gemessenen Temperaturen erlauben Rückschlüsse auf die aktuellen Prozessbedingungen und sind damit wichtige Indikatoren für die Echtzeit-Qualitätsbeurteilung des hergestellten Klinkers. Als weitere Kenngröße kann das aus den Bilddaten extrahierte Flugverhalten des Ersatzbrennstoffs hinzugezogen werden, in dem sich Veränderungen in der Brennstoffqualität frühzeitig widerspiegeln. Die Kombination dieser Kenngrößen bietet das Potential für ein detailliertes und kontinuierliches Online-Monitoring des Prozesses im Bereich der Sinterzone und des Ofenauslaufs, da die kamerabasiert ermittelten Kenngrößen im Gegensatz zu den Ergebnissen der Laboruntersuchung der regelmäßig entnommenen Klinkerproben in Echtzeit zur Verfügung stehen. Somit lässt sich die Ersatzbrennstoffrate kontrolliert und damit nachhaltiger steigern und dabei eine gleichbleibend hohe Klinkerqualität erzielen.

## 5. Literatur

- [1] Dittrich, A., Keller, S., Vogelbacher, M., Matthes, J., Waibel, P., Keller, H. B.: Camera Based Optimization of Multi-Fuel Burners for the Use of Substitute Fuels in the Cement Industry. In: Thomé-Kozmiensky, K. J., Thiel, S., Thomé-Kozmiensky, E., Winter, F., Juchelková, D. (Hrsg.): Waste Management, Band 7. TK Verlag, 2017, S. 329-339.
- [2] Vogelbacher, M.: Eine neue Methode zur kamerabasierten Analyse von Mehrstoffbrennern in industriellen Verbrennungsprozessen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2018.
- [3] Vogelbacher, M., Waibel, P., Matthes, J., Keller, H. B.: Image-Based Characterization of Alternative Fuel Combustion With Multifuel Burners. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 14, no. 2, S. 588-597, Februar 2019.
- [4] Vogelbacher, M., Waibel, P., Matthes, J., Hoyer, M., Keller, H. B.: Bildbasierte Analyse von Mehrstoffbrennern bei industriellen Verbrennungsprozessen. In: Prozesswärme 02 2019. Vulkan Verlag, 2019, S. 81-87.

- [5] Vogelbacher, M., Matthes, J., Keller, H. B., Waibel, P.: Progression and Evaluation of a Camera-Based Measurement System for Multifuel Burners under Industrial Process Conditions. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics. Early access. 2019.
- [6] Waibel, P.: Konzeption von Verfahren zur kamerabasierten Analyse und Optimierung von Drehrohrenprozessen. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, 2014.

## Ansprechpartner



**Dr. Mareike Hoyer**  
ci-tec GmbH  
Projektleiterin  
Augartenstr. 1  
76137 Karlsruhe, Deutschland  
+49 721 62696869  
m.hoyer@ci-tec.de

## Weitere beteiligte Institutionen

OPTERRA Wössingen GmbH  
Karlsruher Institut für Technologie

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar

Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker, Alexander Gosten (Hrsg.):

**Energie aus Abfall, Band 17**

ISBN 978-3-944310-50-3 Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH

Copyright: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Dr.-Ing. Stephanie Thiel  
Alle Rechte vorbehalten

Verlag: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH • Neuruppin 2020

Redaktion und Lektorat: Dr.-Ing. Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc.

Erfassung und Layout: Elisabeth Thomé-Kozmiensky, M.Sc., Claudia Naumann-Deppe,  
Sarah Pietsch, Ginette Teske, Janin Burbott-Seidel, Roland Richter,  
Cordula Müller, Gabi Spiegel

Druck: Universal Medien GmbH, München

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funk-sendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien, z.B. DIN, VDI, VDE, VGB Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.