

**Eine neue Methode zur kamerabasierten  
Analyse von Mehrstoffbrennern in  
industriellen Verbrennungsprozessen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines  
**Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)**

bei der KIT-Fakultät für Maschinenbau des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

DISSERTATION

von

**Dipl.-Ing. Markus Vogelbacher**  
geboren am 1. März 1986 in Baden-Baden

Tag der mündlichen Prüfung: 15.10.2018

Hauptreferent: PD Dr.-Ing. Jörg Matthes  
Korreferenten: Prof. Dr.-Ing. Veit Hagenmeyer  
Prof. Dr.-Ing. habil. Stefan Hinz



# Kurzfassung

In der energieintensiven Branche industrieller Verbrennungsprozesse stellt die Energiekostenminimierung und die Reduktion der Umweltbelastung eine große Herausforderung für Anlagenbetreiber dar. Ein wichtiger Schritt, um diese Herausforderungen zu meistern, ist die Substitution primärer, fossiler Brennstoffe, wie etwa Braunkohle, durch sogenannte alternative Brennstoffe, wie etwa aufbereitete Kunststoffabfälle oder Altreifen. Ermöglicht wird dies durch die Verwendung von Mehrstoffbrennern, die verschiedene Arten an alternativen Brennstoffen in vorgegebenen Anteilen zu fossilen Brennstoffen verbrennen können. Auf Grund der variierenden Brennstoffzusammensetzung und Qualität der alternativen Brennstoffe, kann eine optimale Verbrennung unter hohen Anteilen an alternativem Brennstoff nur durch eine geeignete Prozessführung, die eine permanente Anpassung der Brennerparameter durchführt, gewährleistet werden. Hierfür ist eine detaillierte Beurteilung des aktuellen Verbrennungszustandes notwendig, die mit den bestehenden Messsystemen nicht durchgeführt werden kann.

In der vorliegenden Arbeit wird ein kamerabasiertes Messsystem vorgestellt, das die Lücke bei der Überwachung des Verbrennungsprozesses schließt. Hierzu werden speziell Mehrstoffbrenner bei der Zementproduktion betrachtet, die eines der wichtigsten Einsatzgebiete darstellt.

Als Grundlage für das Messsystem dient eine Infrarotkamera mit speziellem Spektralfilter, die bei Betrachtung des Verbrennungsbereiches einen Blick durch die Verbrennungsgase und Umgebungseinflüsse hindurch auf den alternativen Brennstoff ermöglicht.

Mit Hilfe neu entwickelter Bildverarbeitungsalgorithmen können die Eigenschaften und damit das Verbrennungsverhalten des alternativen Brennstoffes online charakterisiert werden. Hierzu ist zunächst eine Bildvorverarbeitung notwendig, die gewährleistet, dass zum einen eine ausreichende Bildgüte und keine Änderung der Aufnahmekonstellation vorliegt und zum anderen Störungen wie Überdeckungen des Brennstoffes detektiert werden. Anschließend liefern Verfahren zur Detektion von Brennstoffpartikeln und dem gebündelten Brennstoffanteil Informationen über den Aufenthaltsort des alternativen Brennstoffes. Aus der über die Aufenthaltsorte berechneten Streichlinie des alternativen Brennstoffes können Kenngrößen abgeleitet werden, die das Flug- und Verbrennungsverhalten beschreiben. Die Bildverarbeitungsalgorithmen wurden basierend auf realen Prozess- und Simulationsdaten evaluiert.

Des Weiteren zeigen Langzeitversuche unter realen Prozessbedingungen, dass Zusammenhänge zwischen den kamerabasierten Kenngrößen und den Prozessdaten, wie etwa der Klinkerqualität bei der Zementproduktion, existieren. Das neu entwickelte Messsystem stellt damit aktuelle Informationen über den Verbrennungsprozess bereit, wodurch für konstante Verbrennungsbedingungen auch bei hohen Anteilen an alternativen Brennstoffen gesorgt werden kann. Die Ergebnisse der Arbeit wurden in einen industriellen Prototyp integriert, der sich aktuell im 24/7 Dauereinsatz unter realen Prozessbedingungen befindet.





# Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Automation und angewandte Informatik des Karlsruher Instituts für Technologie im Rahmen des KIC InnoEnergy Innovationsprojektes COMFEB. An dieser Stelle bedanke ich mich ganz herzlich bei allen, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Jörg Matthes für die Übernahme des Hauptreferats meiner Arbeit insbesondere aber auch für die hervorragende Betreuung, die vielen fachlichen Diskussionen, die wertvollen Ratschläge und die Unterstützung beim Verfassen der Arbeit. Herrn Professor Veit Hagenmeyer und Herrn Professor Stefan Hinz danke ich für die Übernahme der Korreferate meiner Arbeit.

Mein Dank gilt auch Herrn Dr. Hubert B. Keller, der mir als Leiter der Arbeitsgruppe Prozessoptimierung, intelligente Sensorsysteme und sichere Software die Durchführung der Arbeit ermöglichte und mich fachlich stets unterstützt hat. Ganz besonders möchte ich Herrn Dr. Patrick Waibel danken, der mir in unzähligen Gesprächen jederzeit mit Rat und Tat zur Seite stand, für die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit, für seine stete Hilfsbereitschaft, für die kritischen Anregungen und die zahlreichen Korrekturvorschläge beim Verfassen der Arbeit. Ebenfalls danke ich allen anderen Mitarbeitern der Arbeitsgruppe für viele fachliche Diskussionen und eine mehr als angenehme Arbeitsatmosphäre. Weiterhin danke ich allen Studierenden, die mich unterstützt haben.

Den Mitarbeitern der COMFEB Projektpartnern von ci-tec, Opterra Wössingen und Unitherm Cemcon danke ich für die wertvollen Anregungen und Diskussionen bei Projektbesprechungen und Messkampagnen. Besonders bedanken möchte ich mich für die gute und freundliche Zusammenarbeit bei Herrn Holger Schönecker, Herrn Dr. Roland Melerski, Herrn Konrad Döring und Herrn Markus Paur.

Zu guter Letzt möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner gesamten Familie bedanken für die liebevolle Unterstützung, den Glauben an mich und dafür, dass sie immer für mich da sind egal was das Leben gerade für mich bereit hält. Außerdem danke ich meiner Schwester Sabrina Vogelbacher für das fleißige Korrekturlesen. Der größte Dank gilt meiner Frau Natascha, die mich in allem unterstützt, mir den Rücken frei hält, hinter meinen Entscheidungen steht, mich auch in stressigen Phasen erträgt und einfach immer für mich da ist.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Einordnung der Arbeit . . . . .	1
1.2	Grundlagen und Entwicklungsstand . . . . .	3
1.2.1	Zementherstellungsprozess . . . . .	3
1.2.2	Mehrstoffbrenner - Verwendung alternativer Brennstoffe . . . . .	6
1.2.3	Bildakquise im Drehrohrofen . . . . .	8
1.2.4	Bildverarbeitung . . . . .	12
1.2.5	Existierende Verfahren im Bereich der industriellen Verbrennungsprozess- und Flammenüberwachung . . . . .	18
1.3	Offene Probleme . . . . .	23
1.4	Zielsetzung der Arbeit . . . . .	24
<b>2</b>	<b>Neues Konzept zur Überwachung von Mehrstoffbrennern</b>	<b>27</b>
2.1	Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern . . . . .	27
2.1.1	Allgemeine Erscheinungsformen . . . . .	28
2.1.2	Einfluss von Brenneinstellungen . . . . .	30
2.2	MIR-Kamerabildverarbeitung zur Überwachung von Mehrstoffbrennern . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Neue Bildverarbeitungsverfahren zur Analyse von Mehrstoffbrennern</b>	<b>35</b>
3.1	Spezifische Herausforderungen bei der Detektion von Brennstoffen in MIR- Bildern . . . . .	35
3.1.1	Änderung der Aufnahmekonstellation . . . . .	36
3.1.2	Verdeckungen des Brennstoffes . . . . .	36
3.2	Bildvorverarbeitung . . . . .	38
3.2.1	Bildgütebewertung . . . . .	39
3.2.2	Brennerdetektion . . . . .	40
3.2.3	Anbackungsdetektion . . . . .	41
3.3	Detektion des alternativen Brennstoffes . . . . .	42
3.3.1	Detektion des gebündelten alternativen Brennstoffanteiles (GAB) . . . . .	43
3.3.2	Brennstoffpartikeldetektion . . . . .	45
3.3.3	Zusammenführung GAB- und Partikeldetektion . . . . .	47
3.4	Bestimmung der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes . . . . .	48
3.5	Kenngrößenextraktion . . . . .	50
3.6	Weitere Verfahren der Mehrstoffbrennerüberwachung . . . . .	52
3.6.1	Austrittswinkel des Kohlebereiches . . . . .	52
3.6.2	Anwendung der neuen Verfahren bei anderer Bauform des Mehrstoff- brenners . . . . .	54

3.7	Zusammenfassung der Ergebnisse der neuen Bildverarbeitungsverfahren . . .	55
<b>4</b>	<b>Evaluation der neuen Bildverarbeitungsverfahren</b>	<b>57</b>
4.1	Erstellung eines Referenzdatensatzes mittels Referenzaufnahmen und Expertenwissen . . . . .	57
4.1.1	Analyse des Referenzdatensatzes . . . . .	60
4.1.2	Evaluation der Bildverarbeitungsverfahren mittels erstelltem Referenzdatensatz . . . . .	62
4.2	3D-Simulation des Mehrstoffbrenners und der Brennstoffflugbahnen . . . .	67
4.2.1	Simulationsmodell in Blender . . . . .	68
4.2.2	Evaluation der Bildverarbeitungsverfahren mittels Simulation . . . .	70
4.3	Fazit der Ergebnisse der Evaluation anhand der neuen Referenzdatensätze	73
4.4	Evaluation der weiteren Bildverarbeitungsverfahren . . . . .	74
4.4.1	Evaluation der Anbackungsdetektion . . . . .	74
4.4.2	Evaluation der Brennerdetektion . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Analyse der neuen bildbasierten Kenngrößen bei der Zementklinkerherstellung</b>	<b>79</b>
5.1	Vergleich von Kenngrößen und Prozessdaten . . . . .	79
5.1.1	Temperatur im Klinkerbett . . . . .	80
5.1.2	Wurfweite . . . . .	85
5.1.3	Streuung . . . . .	88
5.2	Diskussion der Ergebnisse . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>97</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>103</b>
A.1	Schiefer Wurf in Welt- und Bildkoordinaten . . . . .	103
A.2	Tool zur benutzerdefinierten Auswertung von Referenzaufnahmen . . . . .	107
A.3	3D-Simulationsmodell eines Mehrstoffbrenners in einer Drehrohrumgebung	110
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>117</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>123</b>
	<b>Liste eigener Veröffentlichungen</b>	<b>125</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>129</b>

# 1 Einleitung

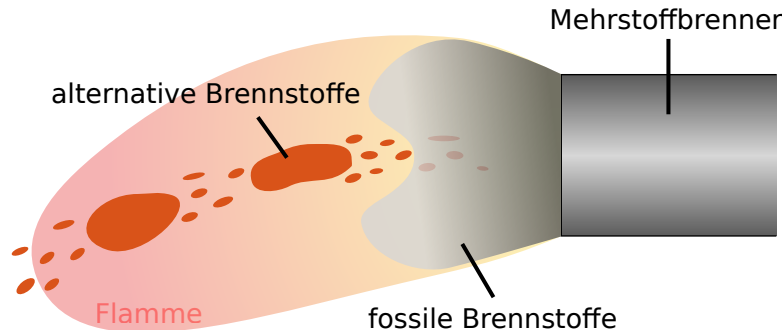
Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der kamerabasierten Überwachung von Mehrstoffbrennern bei thermischen Prozessen. Neben herkömmlichen Brennstoffen wie Kohle und Öl ermöglichen Mehrstoffbrenner das Verbrennen von alternativen Brennstoffen mit geringem Brennwert. Die Verwendung dieser Brennstoffe stellt eine kostensparende und CO<sub>2</sub>-reduzierte Energieerzeugung für verschiedene Anwendungen von der chemischen Industrie bis hin zu Kraftwerken bereit. Auf Grund der variierenden Brennstoffzusammensetzungen wird eine geeignete Prozesssteuerung erforderlich, die eine permanente Einstellung der Brennerparameter durchführt und damit eine optimale Verbrennung unterstützt. Eine solche Prozessführung erfordert eine detaillierte Kenntnis des aktuellen Prozesszustandes bzw. des Verbrennungsverhaltens, die mit bestehenden Messsystemen nicht adäquat erfasst werden können. In der vorliegenden Arbeit wurde ein neues kamerabasiertes Messsystem entwickelt, das aktuelle Informationen über den Prozesszustand liefert und dadurch eine Prozessführung ermöglicht. Im Rahmen des KIC INNOENERGY Innovationsprojektes COMFEB (*Camera-based Optimization of Multi-Fuel Burners*) wurden hierbei Mehrstoffbrenner im industriellen Umfeld der Zementproduktion, die eines der wichtigsten Einsatzgebiete von Mehrstoffbrennern darstellt, betrachtet.

## 1.1 Einordnung der Arbeit

Zement zählt als Bindemittel für Beton, Mörtel oder Estrich zu den meist verbauten Baustoffen überhaupt. Die Zementproduktion ist ein mehrstufiger Prozess, der gerade bei der Herstellung des Zementklinkers in Drehrohröfen eine enorme Menge an thermischer Energie von etwa 2900 kJ je Kilogramm Zement in Form von Brennstoffen benötigt [96]. Zum Erhalt natürlicher Ressourcen wurden in den letzten Jahren vermehrt fossile Brennstoffe, wie Braunkohle, durch alternative Brennstoffe, wie aufbereitete Kunststoffabfälle oder Altreifen, substituiert. Ermöglicht wurde dies durch die Entwicklung von Mehrstoffbrennern, die eine Verwendung von fossilen und alternativen Brennstoffen in einstellbaren Verhältnissen zulassen [93, 97].

Alternative Brennstoffe weisen dabei auf Grund ihrer partikelförmigen Beschaffenheit deutlich unterschiedliche Verbrennungseigenschaften als pulverförmige fossile Brennstoffe auf. Im Gegensatz zur Verbrennung der fossilen Brennstoffe nahe an der Brennerspitze, entsteht durch die alternativen Brennstoffpartikel eine Flugbahn innerhalb der Brennerflamme

auf der der Brennstoff je nach Partikelgröße und Feuchtigkeit zu unterschiedlichen Zeitpunkten zündet und nachfolgend verbrennt. Abbildung 1.1 veranschaulicht dies mit einer schematischen Zeichnung der Bestandteile einer Mehrstoffbrennerflamme.



**Abbildung 1.1:** Schematische Darstellung einer Mehrstoffbrennerflamme.

Der Verlauf der Brennstoffflugbahn spielt dabei eine entscheidende Rolle für die Umsetzung und das Ausbrandverhalten des alternativen Brennstoffes sowie auch für die Qualität des Klinkers. Unverbrannte Bestandteile des alternativen Brennstoffes, wie Chlor oder Phosphor, können bei zu hohen Konzentrationen im Klinkerbett etwa die Festigkeit des aus dem Klinker erzeugten Zements beeinflussen [11]. Die Schwankungen der Eigenschaften (z.B. Brennwert, Partikelgröße, Feuchtigkeit) des alternativen Brennstoffes, die je nach eingekaufter Qualität unterschiedlich stark ausfallen können, verhindern momentan eine vollständige Substitution fossiler durch alternative Brennstoffe.

Eine Online-Überwachung des alternativen Brennstoffes in der Brennerflamme kann in diesem Zusammenhang folgende Vorteile bieten:

- frühzeitige Detektion der Abweichung von der idealen Brennstoffflugbahn,
- frühzeitige Detektion von sich ändernden Brennstoffeigenschaften,
- Optimierung des Verbrennungsprozesses,
- Steigerung des alternativen Brennstoffanteiles sowie
- Gewährleistung einer konstanten Produktqualität.

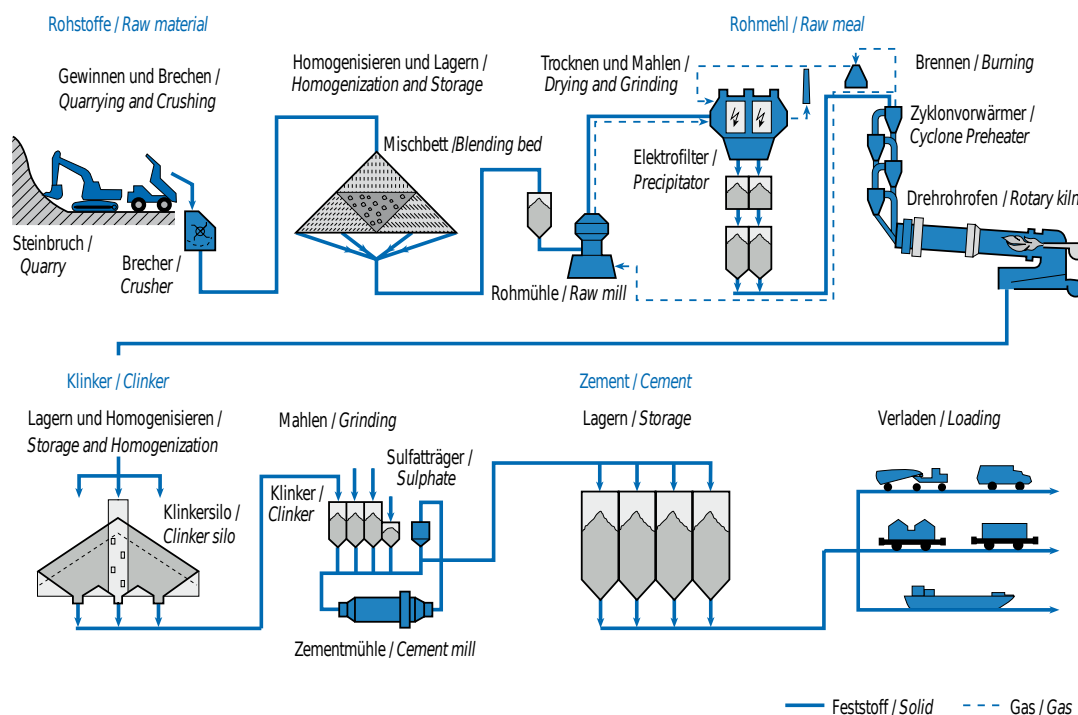
Voraussetzung für die Überwachung des Brennstoffes ist ein Messverfahren, das aktuelle Informationen über den Brennstoff oder die Verbrennung am Mehrstoffbrenner liefert. Die momentan an Anlagen verfügbaren Messsysteme, wie Kameras im visuellen Spektralbereich, erlauben die Beurteilung auf Grund der fehlenden Sichtbarkeit der Brennstoffe in der Brennerflamme nur eingeschränkt. Erst deutlich zeitversetzt können mittels Labormessungen von Klinkerproben erste Aussagen über den Verbrennungsprozess getätigt werden. Ein Kamerasystem im mittleren Infrarotbereich, das schon bei anderen industriellen Verbrennungsprozessen zum Einsatz kommt, erlaubt möglicherweise die Sicht auf den alternativen Brennstoff. Die neuen Möglichkeiten, die ein solches Kamerasystem zur Überwachung eines Mehrstoffbrenners bietet, werden in der vorliegenden Arbeit untersucht.

## 1.2 Grundlagen und Entwicklungsstand

Im Folgenden wird der Zementherstellungsprozess und die aktuelle Entwicklung in der Zementindustriebranche vorgestellt. Erläuterungen zum Aufbau und der Funktionsweise von Mehrstoffbrennern sowie die Rahmenbedingungen der Bildakquise bei Drehrohröfen dienen als Grundlage für die weiteren Untersuchungen. Des Weiteren wird ein Überblick über den Stand der Technik im Bereich kamerabasierter Überwachung industrieller Verbrennungsprozesse gegeben und dabei speziell auf den Bereich der Mehrstoffbrennerüberwachung bzw. auf Verfahren zur Flammenüberwachung eingegangen.

### 1.2.1 Zementherstellungsprozess

Die Zementindustrie ist eine der energieintensivsten Branchen im Bereich des verarbeitenden Gewerbes. Der Zementherstellungsprozess vom Steinbruch bis hin zum Ausliefern des Endproduktes ist in Abbildung 1.2 dargestellt.



**Abbildung 1.2:** Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses [95].

Die im Steinbruch gewonnenen Rohstoffe wie Kalkstein, Kreide oder Ton werden nach verschiedenen Vorverarbeitungsschritten als Rohstoffgemisch in einem Drehrohröfen [9] bei etwa 1450 °C zum Sintern erhitzt. Der dabei entstehende sogenannte Zementklinker wird anschließend unter Zugabe verschiedener Zusatzstoffe in Zementmühlen zum letztendlichen Zement gemahlen. Der bei der Produktion angestrebte Gehalt der verschiedenen Phasen des Zementklinkers ist in Abbildung 1.3 aufgelistet.

Klinkerphasen	chemische Formeln	Kurzbezeichnung	Gehalt in M.-%	
			H	M
Tricalcium-silicat (Alit)	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	H M N	80 63 45
Dicalcium-silicat (Belit)	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$	H M N	32 16 0
Calcium-aluminatferrit	$2 \text{ CaO} \cdot (\text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\text{C}_2(\text{A},\text{F})$	H M N	14 8 4
Tricalcium-aluminat	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	H M N	15 11 7
freies CaO	CaO		H M N	3 1 0,1
freies MgO (Periklas)	MgO		H M N	4,5 1,5 0,5

H: Hoher Gehalt, M: Mittlerer Gehalt, N: Niedriger Gehalt

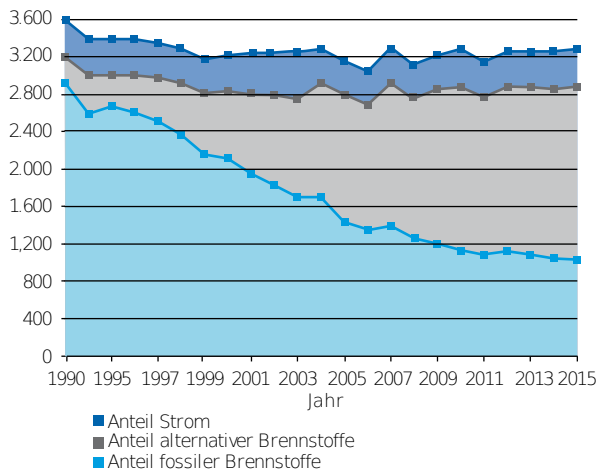
**Abbildung 1.3:** Phasenzusammensetzung des Zementklinkers [94].

Für den gesamten Herstellungsprozess beträgt der thermische und elektrische Energiebedarf eines Zementwerkes etwa 3200 kJ je Kilogramm Zement. Die elektrische Energie, die zur Rohstoffzerkleinerung und zur Zementmahlung benötigt wird, nimmt dabei neben der thermischen Energie von 2900 kJ je Kilogramm Zement nur einen kleinen Anteil am Energiebedarf ein [96]. Die thermische Energie, die unter einem hohen Brennstoffaufwand durch Brenner zur Verfügung gestellt wird, wird hauptsächlich zum Brennen des Klinkers im Drehrohfen benötigt. Zur Schonung natürlicher Ressourcen wurde in den letzten Jahren zunehmend eine Substitution fossiler Brennstoffe wie Braun- oder Steinkohle durch alternative Brennstoffe, die auch als Ersatzbrennstoffe bezeichnet werden, wie aufbereitete Kunststoffabfälle oder Altreifen angestrebt. Neben den organischen Anteilen des alternativen Brennstoffes, die den energetischen Beitrag fossiler Brennstoffe ersetzen, können darüber hinaus die anorganischen Anteile unmittelbar Teil des Produktes werden. In [4, 11, 74] werden die verschiedenen einsetzbaren alternativen Brennstoffe vorgestellt und ihr Einfluss auf die Anlagenleistung erläutert. Abbildung 1.4(a) zeigt die Entwicklung der eingesetzten Energieträger in den letzten knapp 25 Jahren.

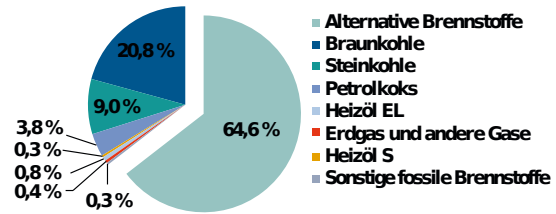
Eine klare Tendenz zur zunehmenden Verwendung alternativer Brennstoffe ist zu erkennen, so dass momentan etwa 65% der Brennstoffenergie durch alternative Brennstoffe bereitgestellt wird (Abbildung 1.4(b)). Um den letzten Schritt zu einer vollständigen Substitution fossiler Brennstoffe und damit einer kohlefreien Klinkerproduktion zu erreichen, müssen hohe Anforderungen an die Qualität des alternativen Brennstoffes gestellt werden. Eine hohe und konstante Qualität kann durch entsprechende Vorbehandlungsmaßnahmen erreicht werden wie etwa die Minderung der Feuchtigkeit zur Steigerung des Heizwertes oder die Verkleinerung der Korngröße für ein besseres Ausbrandverhalten des alternativen



Spezifischer Energieeinsatz in kJ /kg Zement



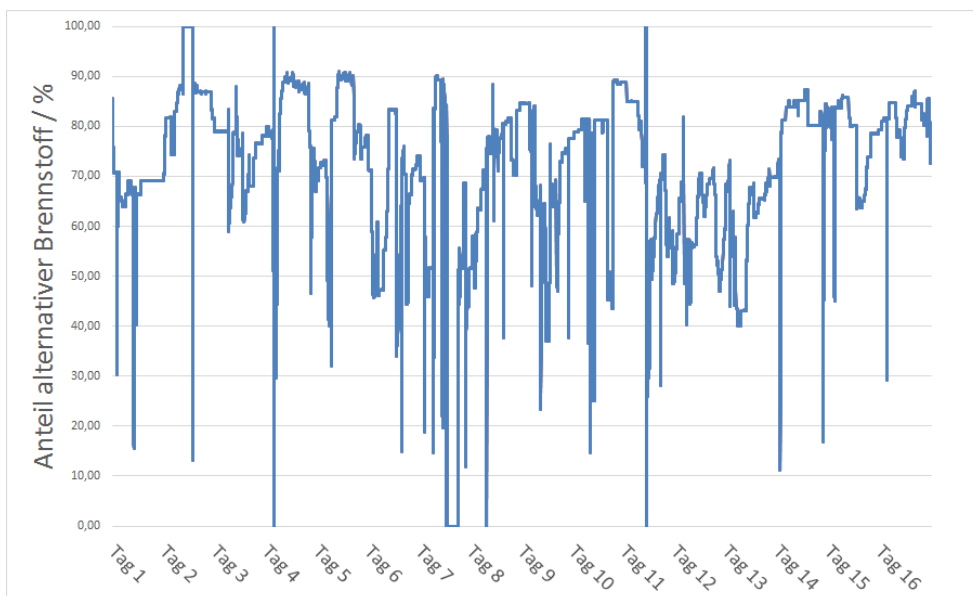
(a)



(b)

**Abbildung 1.4:** Energieeinsatz bei der Zementherstellung [96]. (a) Entwicklung der eingesetzten Energieträger. (b) Prozentuale Verteilung des Brennstoffeinsatzes.

Brennstoffes. Die Verfügbarkeit dieser qualitativ hochwertigen Brennstoffe ist momentan allerdings begrenzt und durch die Vorbehandlung auch mit wesentlich höheren Kosten verbunden [76]. Abbildung 1.5 zeigt den Verlauf des alternativen Brennstoffanteiles eines Mehrstoffbrenners einer Zementklinkeranlage über einen Zeitraum von 16 Tagen. Ein Betrieb mit konstantem Anteil an alternativem Brennstoff ist auf Grund der schwankenden Eigenschaften nicht möglich.



**Abbildung 1.5:** Verlauf des alternativen Brennstoffanteiles eines Mehrstoffbrenners bei der Zementherstellung.

## 1.2.2 Mehrstoffbrenner - Verwendung alternativer Brennstoffe

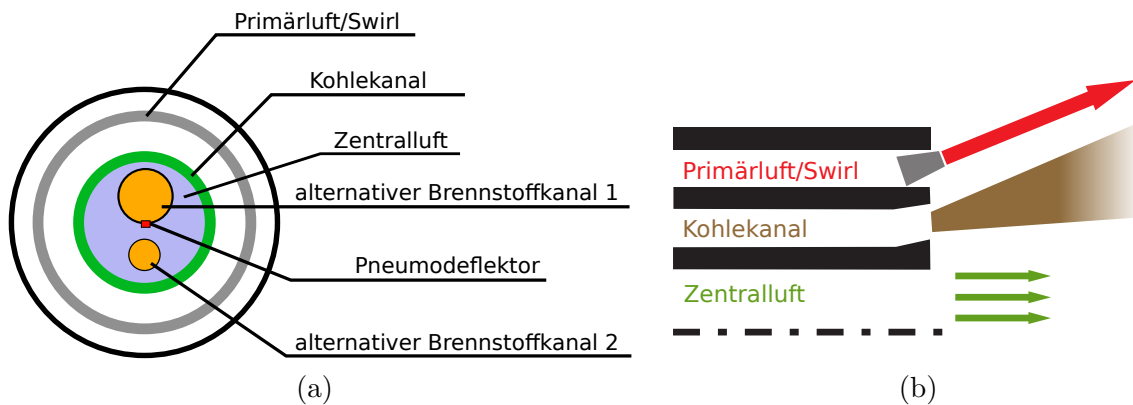
Mit der Entwicklung hin zur Verwendung fossiler und alternativer Brennstoffe in unterschiedlichen Verhältnissen entwickelte sich auch die Brennertechnologie weiter. Wurde zu Beginn noch das Brennstoffgemisch über einen einzelnen Brennstoffkanal zugeführt [68], wurden später separate Kanäle für fossilen und alternativen Brennstoff eingeführt. In frühen Ausführungen wurde der alternative Brennstoffkanal oberhalb eines existierenden Brenners angebracht. Bei den aktuellen sogenannten Mehrstoffbrennern befinden sich die Kanäle für gasförmigen, festen oder flüssigen alternativen Brennstoff im Zentrum des Brenners umgeben von einem ringförmigen fossilen Brennstoffkanal (Abbildung 1.6). Luftzuführungen ermöglichen bei dieser Bauform eine Beeinflussung der Flammenform und -länge. Eine Übersicht über die Entwicklung in der Brennertechnologie und der verfügbaren Mehrstoffbrennerbauarten liefern [25, 69].

Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise eines Mehrstoffbrenners soll anhand des MONO AIRDUCT SYSTEM (MAS) Drehrohrbrenners der Firma UNITHERM CEMCON (Abbildung 1.6), an dem Untersuchungen in dieser Arbeit hauptsächlich stattfanden, durchgeführt werden. Im Vergleich zu Abbildung 1.6 verfügt der nachfolgend betrachtete Mehrstoffbrenner über zwei Kanäle, über die fester alternativer Brennstoff zugeführt werden kann. In Abbildung 1.7(a) ist die Anordnung der alternativen Brennstoffkanäle und des Kohlekanals skizziert. Der alternative Brennstoffkanal 1 wird hierbei mit einem Gemisch aus Reifenflusen und aufbereiteten Kunststoffabfällen, dem sogenannten Fluff (flugfähige Fraktionen), und Brennstoffkanal 2 mit Tiermehl betrieben.



**Abbildung 1.6:** Mehrstoffbrenner der Firma UNITHERM CEMCON [92].

Die Form der Brennerflamme und das Flugverhalten der Brennstoffe lassen sich über den Druck der Luftzuführungen Drall- (Swirl) und Zentralluft beeinflussen. Der Drall einer Flamme beschreibt dabei deren Drehimpuls, d.h. wie stark die Flamme axial verwirbelt wird. Die Besonderheit des MAS Brenners ist hierbei ein einzelnes Gebläse zur Primärluftversorgung, wobei brennerintern in Drall-, Kühl- und Zentralluft aufgeteilt wird. Bei der Verwendung des Brenners und auch in dieser Arbeit wird die Bezeichnung Primärluft und Drallluft gleichgesetzt, da 80-90% der Primärluft für die Drallluft verwendet werden. Abbildung 1.7 zeigt die Anordnung der beiden Luftzuführungen Primär- und Zentralluft in Frontal- und Seitenansicht der Brennerspitze.

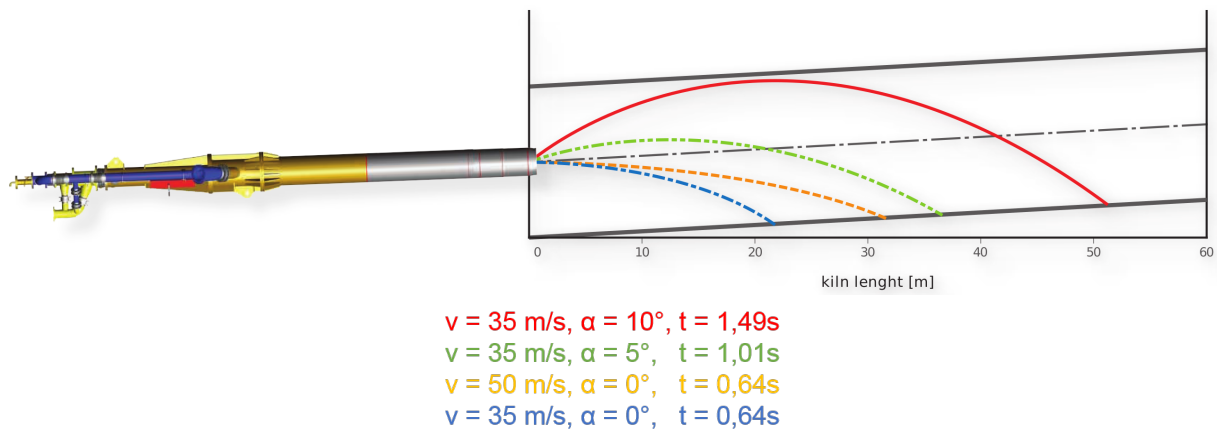


**Abbildung 1.7:** Schematische (a) Frontal- und (b) Seitenansicht [92] eines MAS Mehrstoffbrenners.

In Abbildung 1.6 rechts ist der MAS Brenner ohne äußeren Brennermantel zu sehen, wodurch die Düsenköpfe der Primärluft, d.h. der Dralleinstellung, sichtbar werden. Mit Hilfe der Dralleinstellvorrichtung können die Düsenköpfe stufenlos im Bereich von  $10^\circ$  (Ausströmung axial) bis  $40^\circ$  (Ausströmung radial) eingestellt werden. Anstelle des Winkels wird beim MAS Brenner der Einstellwert Swirl eingeführt, der sich aus der ersten Nachkommastelle des Tangens des Winkels ableiten lässt und damit einen Wertebereich von 1 ( $= 10 \tan(\sim 10^\circ)$ ) bis 9 ( $= 10 \tan(\sim 40^\circ)$ ) aufweist. Mit Hilfe des Druckes der Primärluft und der Swirl-Einstellung kann direkt die Flammenform beeinflusst werden. Ein hoher Druck und große Swirl-Werte führen zu einer kurzen scharfen Flamme. Ein niedriger Druck und kleine Swirl-Werte führen zu einer langen gleichmäßigen Flamme. Die Zentralluft, die im Zentrum des Brenners innerhalb des Kohleringes angeordnet ist (Abbildung 1.7), dient zur Stabilisierung der Flamme. Ein hoher Druck der Zentralluft führt zu einer scharfen und stabilen Brennerflamme nahe an der Brennerspitze.

Neben der Steuerung der Brennerflamme über die Drücke der Luftzuführungen ist auch eine direkte Beeinflussung des alternativen Brennstoffes möglich. Für den alternativen Brennstoffkanal 1 (Abbildung 1.7(a)) kann die Geschwindigkeit des Brennstoffes beim Austritt aus der Brennerspitze über die Drehzahl des Förderluftgebläses und der Winkel beim Austritt durch den Druck einer Düse am Ende des Brennstoffkanals, dem sogenannten Pneumodeflektor, gesteuert und dadurch die Flugkurve des alternativen Brennstoffes beeinflusst werden. Der auf Basis von theoretischen Simulationen ermittelte Einfluss von Geschwindigkeit und Austrittswinkel auf die Flugbahn des alternativen Brennstoffes ist in Abbildung 1.8 dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Verweildauer des Brennstoffes innerhalb der Brennerflamme nur durch eine Erhöhung des Austrittswinkels, nicht aber durch eine Erhöhung der Austrittsgeschwindigkeit, erreicht werden kann [92]. Die Verwendung des Pneumodeflektors bietet damit eine wichtige Einstellmöglichkeit zur Beeinflussung des Ausbrandverhaltens des alternativen Brennstoffes.



**Abbildung 1.8:** Abhängigkeit der Flugkurve und der Verweildauer innerhalb der Brennerflamme des alternativen Brennstoffes von Austrittsgeschwindigkeit und -winkel [92].

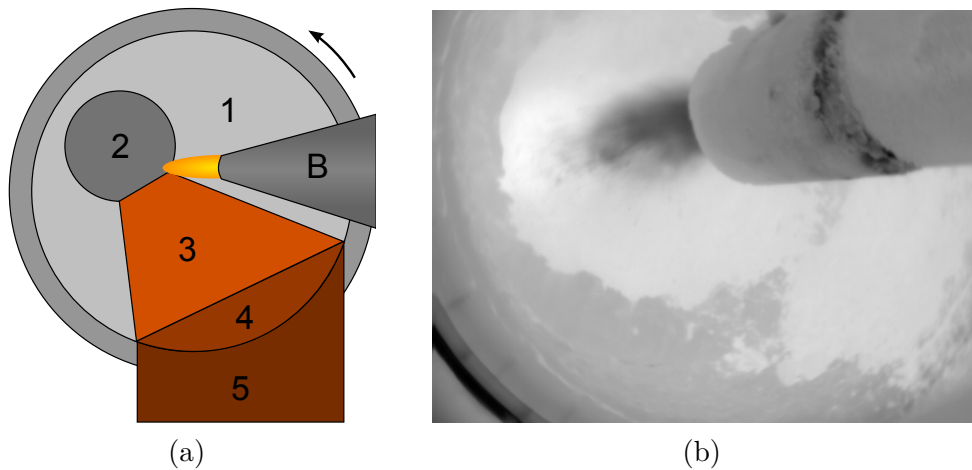
Zusammengefasst gibt es folgende Einstellmöglichkeiten an einem MAS Mehrstoffbrenner:

- Verhältnis Kohle zu alternativem Brennstoff,
- Massenströme Kohle und alternative Brennstoffe,
- Druck Primärluft,
- Swirl (Drallzahl),
- Druck Zentralluft,
- Drehzahl Förderluftgebläse alternativer Brennstoff sowie
- Druck Pneumodeflektor.

### 1.2.3 Bildakquise im Drehrohrofen

Für die kamerabasierte Analyse von Mehrstoffbrennern ist die Bildakquise im Bereich des Drehrohrofens ein wichtiger Bestandteil. In [108, 109] werden neue Konzepte zur Bildakquise bei Drehrohrofenprozessen vorgestellt. Demnach ist eine erfolgversprechende Bildakquise sowohl von der Wahl eines geeigneten Kameraeinbauortes als auch von der Wahl eines geeigneten Spektralbereiches der Kamera in Anbetracht der Ofenatmosphäre abhängig [30].

Speziell für die Überwachung des Mehrstoffbrenners ist eine schräge Einbauposition am geeignetsten (Abbildung 1.9). Dadurch wird bei guten Sichtbedingungen gewährleistet, dass der komplette Flammenkörper bis weit in das Drehrohr hinein sichtbar ist. Außerdem kann unverbrannter Brennstoff, der in das Brennbett fällt, detektiert werden. Weitere Auswertungen, die nicht den Mehrstoffbrenner betreffen, wie etwa die Überwachung der Klinkerbetttemperaturen oder des Klinkeraustrages, können aus dieser Kameraposition ebenfalls durchgeführt werden. Für eine umfangreiche Analyse des Zementherstellungsprozesses in Drehrohrofen wird deshalb die schräge Einbauposition ausgewählt.

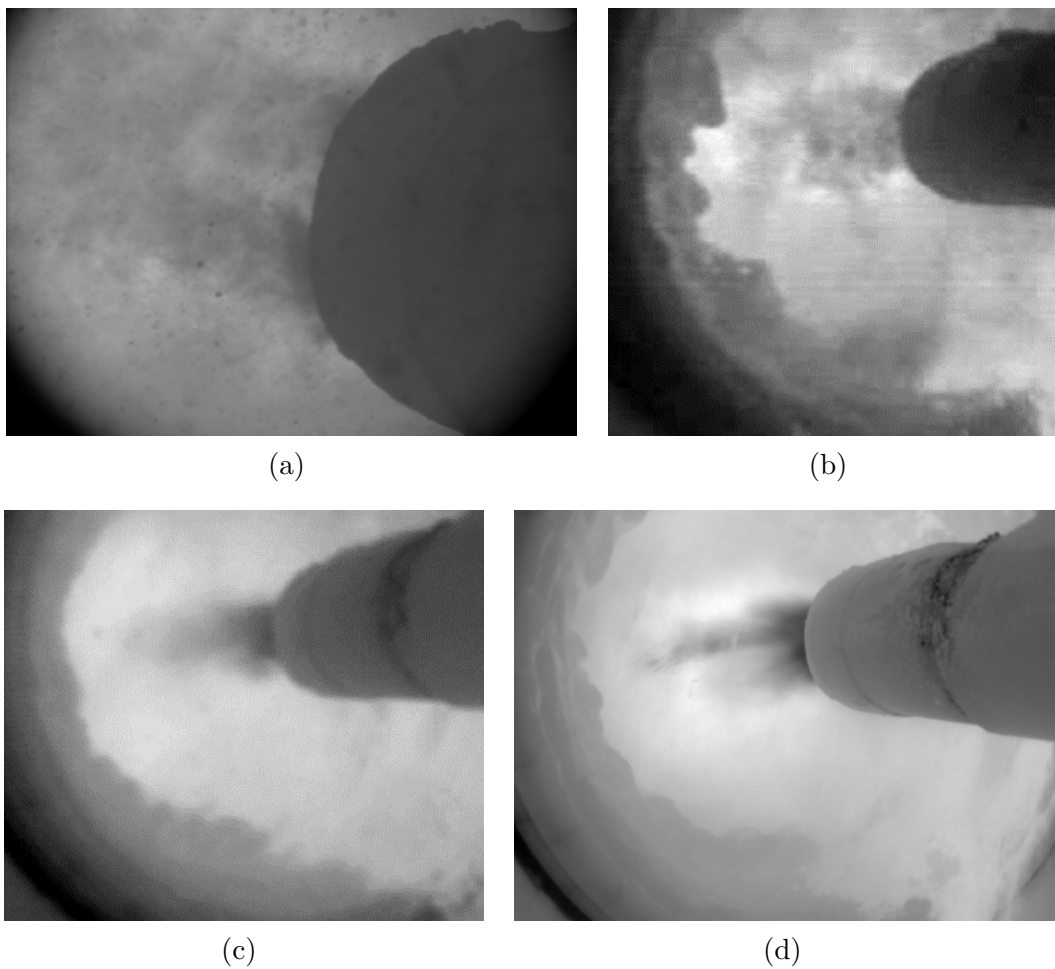


**Abbildung 1.9:** (a) Schematische Darstellung der Kamerasicht bei schräger Einbauposition (1: Drehrohrinnenwand, 2: Rückwand, 3: Feststoffbett, 4: Feststoffbett - Stirnseite, 5: Feststoffaustrag, B: Brenner) [109]. (b) Infrarotaufnahme eines Mehrstoffbrenners bei der Zementklinkerherstellung aus schräger Kameraposition.

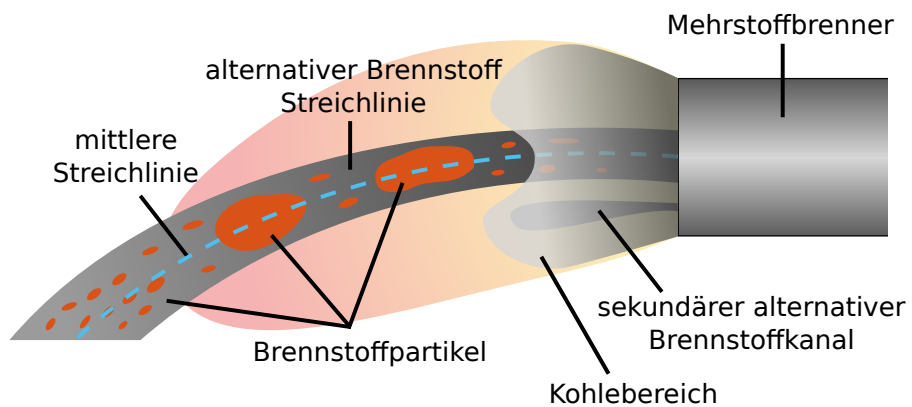
Bei der Wahl des geeigneten Spektralbereiches wird eine möglichst gute Durchsicht durch die Ofenatmosphäre angestrebt. Wellenlängenabhängige Extinktionen durch Verbrennungsgase wie Wasserdampf, Kohlenstoffdioxid oder Kohlenstoffmonoxid und Feststoffpartikel wie Ruß oder Asche werden bei der Wahl berücksichtigt. Nach [108] liegen geeignete Wellenlängenbereiche, in denen eine hohe Transmission der Ofenatmosphäre vorliegt, im mittleren Infrarotbereich (MIR) von  $3.6\text{-}4.0\ \mu\text{m}$  und  $9.0\text{-}12.0\ \mu\text{m}$ . Aufgrund der Transmission der Verbrennungsgase in diesen Spektralbereichen wird speziell in der Umgebung des Mehrstoffbrenners ein Blick durch die Flammen hindurch auf den noch unverbrannten Brennstoff ermöglicht. Ein Vergleich der Sicht auf einen Mehrstoffbrenner innerhalb eines Drehrohrofens mit verschiedenen, auf dem Markt erhältlichen Kameratechnologien, in unterschiedlichen Spektralbereichen, bestätigt diese Aussage (Abbildung 1.10).

Während im visuellen ( $0.4\text{-}0.7\ \mu\text{m}$ ) und nah-infraroten ( $0.8\text{-}1.1\ \mu\text{m}$ , NIR) Spektralbereich nur der Flammenkörper zu erahnen ist, wird mit der  $3.9\pm 0.1\ \mu\text{m}$  und  $10.6\pm 0.1\ \mu\text{m}$  MIR-Kamera der unverbrannte Brennstoff sichtbar. Bei diesen speziell für Drehrohröfen entwickelten Kameras zum Beispiel der Firma DIAS INFRARED SYSTEMS mit einer Auflösung von  $384\times 288$  Bildpunkten (PYROINC 380LF) werden die Temperaturen direkt mittels Mikrobolometerarrays in Grauwerte umgesetzt. Niedrige Grauwerte, d.h. dunkle Bildpunkte, entsprechen daher kalten Temperaturen, hohe Grauwerte, d.h. helle Bildpunkte, entsprechen hohen Temperaturen. Insgesamt wird ein Temperaturbereich von etwa  $800\ \text{°C}$  bis  $1600\ \text{°C}$  abgedeckt und dabei eine Messfrequenz von  $50\ \text{Hz}$  erreicht.

Eine schematische Erläuterung des Bildinhaltes einer MIR-Kamera für die Brennerumgebung wird in Abbildung 1.11 gegeben. Bei Anteilen an alternativen Brennstoffen unter  $100\%$  ist nahe der Brennerspitze der Kohlebereich zu erkennen. Da die Kohle in pulverförmigem Zustand vorliegt, ist eine vollständige Verbrennung nahe der Brennerspitze zu erwarten.



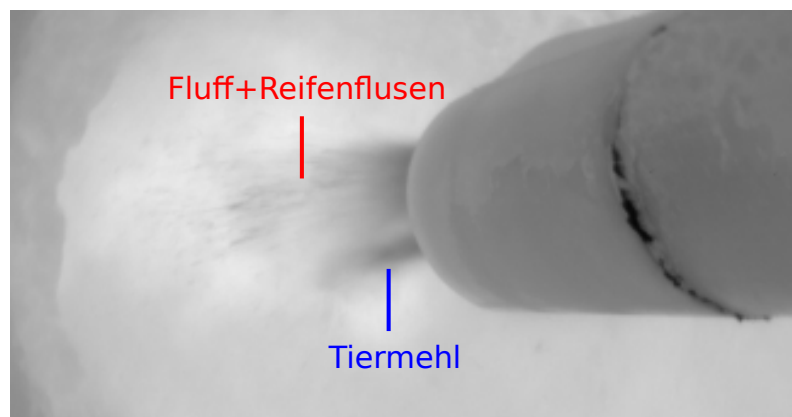
**Abbildung 1.10:** Vergleich für Kameras im (a) visuellen ( $0.4-0.7 \mu\text{m}$ ), (b) nah-infraroten ( $0.8-1.1 \mu\text{m}$ ) und mittleren-infraroten ((c)  $3.9 \mu\text{m}$  und (d)  $10.6 \mu\text{m}$ ) Spektralbereich.



**Abbildung 1.11:** Schematische Darstellung der Brennerumgebung bei Kameraaufnahmen im mittleren Spektralbereich ( $3.9 \mu\text{m}$  oder  $10.6 \mu\text{m}$ ).



Der viel grobkörnigere bzw. partikelartige alternative Brennstoff weist einen späteren Verbrennungszeitpunkt auf und tritt auf Grund der Anordnung der Brennstoffkanäle aus der Mitte des Kohlebereiches hervor. Je nach Abstand zur Brennerspitze lassen sich unterschiedliche Erscheinungsbilder des alternativen Brennstoffes erkennen. Kurz nach dem Austritt aus der Brennerspitze liegt der alternative Brennstoff noch sehr gebündelt vor, er erscheint als eine Art dunkler Schweif der aus der Brennerspitze tritt. Je weiter der Brennstoff sich von der Brennerspitze entfernt, desto mehr fächert sich dieser Brennstoffschweif auf und es werden einzelne Brennstoffagglomerationen und -partikel sichtbar. Wie lange welche Erscheinungsbilder zu sehen sind, ist sehr stark abhängig von den Brennereinstellungen. Bei großen Drücken des Pneumodeflektors zum Beispiel ist eine große Streuung des Brennstoffes schon nahe an der Brennerspitze zu erwarten und damit nur ein geringer Anteil gebündelter Brennstoff zu sehen. Tiermehl, das aus dem alternativen Brennstoffkanal 2 austritt (Abbildung 1.7(a)), wird in der schematischen Darstellung durch den Kohlebereich überdeckt. Wie Kohle, liegt das Tiermehl pulverförmig vor und weist eine kurze Verbrennungszeit auf. Daher ist es nur bei hohen Anteilen an alternativen Brennstoffen in den MIR-Bildern zu erkennen (Abbildung 1.12).



**Abbildung 1.12:** Unterscheidung der alternativen Brennstoffkanäle Fluff+Reifenflusen und Tiermehl in einer MIR-Kameraaufnahme eines Mehrstoffbrenners bei 100% alternativem Brennstoff.

Zur Beschreibung des Flugverhaltens des alternativen Brennstoffes wird im Folgenden die Streichlinie des alternativen Brennstoffes betrachtet. Die Streichlinie bezeichnet die Flugbahn mehrerer Brennstoffpartikel, die nacheinander von derselben Position losgelassen wurden. Im Falle des Mehrstoffbrenners wird die Öffnung des alternativen Brennstoffkanals 1 als Ausgangsposition betrachtet. Im Vergleich zur Bahnlinie oder Trajektorie wird dadurch nicht nur das Flugverhalten eines einzelnen Partikels, sondern des gesamten Partikelsystems analysiert. Außerdem lässt sich die Streichlinie theoretisch aus einem Einzelbild ermitteln. Wie in Abbildung 1.11 dargestellt, beschreibt die Streichlinie des alternativen Brennstoffes eines Mehrstoffbrenners einen aufgefächerten horizontalen bzw. schiefen Wurf. Durch Betrachtung der mittleren Flugkurve aller Partikel und damit der Reduktion der Streichlinie auf eine Hauptflugbahn, die im weiteren Verlauf als mittlere Streichlinie bezeichnet wird,

kann das Flugverhalten aller Brennstoffpartikel durch eine Kurve beschrieben werden (blaue Kurve, Abbildung 1.11).

Die in diesem Abschnitt aufgeführten Untersuchungen eines Kamerasystems im MIR-Spektralbereich zeigen, dass eine bildbasierte Analyse eines Mehrstoffbrenners innerhalb eines Drehrohrofens möglich ist. Die verfügbaren Kamerasysteme mit Spektralfiltern für  $3.9\ \mu\text{m}$  und  $10.6\ \mu\text{m}$  Wellenlängen machen den unverbrannten Brennstoff innerhalb der Flamme sichtbar und bieten damit eine gute Voraussetzung für eine Analyse des Flug- und Verbrennungsverhaltens der Brennstoffe.

## 1.2.4 Bildverarbeitung

Der vorherige Abschnitt zeigte, dass die Brennstoffe eines Mehrstoffbrenners im Verbrennungsprozess durch die Wahl eines geeigneten Kamerasystems sichtbar gemacht werden können. Um letztendlich eine quantitative Aussage über das Verbrennungsverhalten treffen zu können, ist es notwendig, physikalisch relevante Kenngrößen abzuleiten. Dafür wird die Bildverarbeitung als Bindeglied zwischen Bildakquise und Interpretation der Bilder herangezogen.

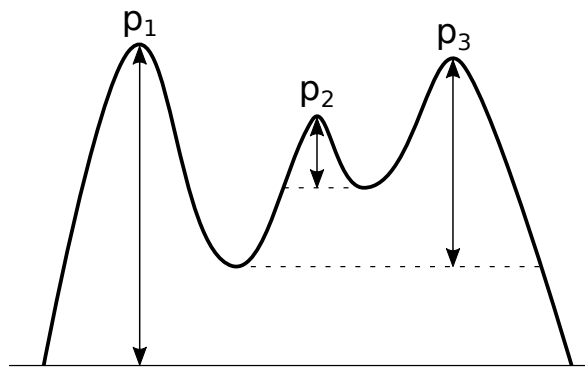
Der klassische Ablauf einer Bildverarbeitung startet mit der Bildakquise, bei der gewährleistet werden muss, dass relevante Bildinformationen zur Interpretation der Szene vorhanden und möglichst hervorgehoben sind. Die folgende Bildvorverarbeitung dient zunächst dazu, eine Vorauswahl geeigneter Bilder zu treffen. Unbrauchbare Bilder einer defekten Kamera oder stark verrauschte Bilder bieten keine Informationen und müssen erkannt und aussortiert werden. Außerdem können in einem weiteren Schritt Verfahren zur Bildverbesserung, zum Beispiel die Verstärkung von kontrastreichen Bildbereichen mit hohen Ortsfrequenzen, durchgeführt werden, um die nachfolgende Bildanalyse zu vereinfachen. Bei der Bildanalyse bzw. der Merkmalsextraktion werden mittels verschiedener Verfahren weitere Merkmale für einen Bildpunkt berechnet, wie etwa Kanten- oder Texturinformationen. Dadurch wird eine Zuordnung einzelner Bildpunkte auch zu komplexeren Objekten, die nicht allein durch die Grauwertinformation charakterisiert werden können, ermöglicht. Eigenschaften der detektierten Objekte, wie Geometrie oder mittlerer Grauwert, können zur Charakterisierung in Kenngrößen ausgegeben werden.

Für die Bildverarbeitung wird das erhaltene Kamerabild als eine zweidimensionale Matrix aus Intensitätswerten aufgefasst. Bei einkanaligen Bildern, wie sie etwa bei Infrarotaufnahmen auftreten, werden diese Intensitätswerte auch als Grauwerte bezeichnet. Der Grauwert  $g(x, y)$  beschreibt damit den Helligkeitswert am Bildpunkt  $(x, y)$  in diskreten Bildkoordinaten. Bei der Betrachtung von Bildserien wird außerdem mit  $g(x, y, n)$  das Bild (Frame) zum Zeitpunkt  $n$  bezeichnet. Durch Betrachtung einzelner Bildzeilen bzw. -spalten oder der gesamten Matrix können verschiedene Operatoren oder Filter auf das Bild angewandt und damit Informationen gewonnen werden. Einige dieser Verfahren, die für die vorliegende Arbeit von besonderer Relevanz sind, werden nachfolgend vorgestellt.



## Extremwerte im Grauwertverlauf

Die einfachste Auswertung eines Grauwertverlaufes entlang einer Geraden im Bild (z.B. Zeile oder Spalte) ist die Detektion lokaler Maxima bzw. Minima. Dazu wird die Umgebung eines Bildpunktes betrachtet. Liegen in ihr keine größeren bzw. kleineren Grauwerte als im Bildpunkt vor, wird der Punkt als lokales Maximum bzw. Minimum ausgegeben. Für eine erweiterte Beurteilung der Extremwerte können weiterführende Eigenschaften wie die Breite, die Höhe oder die Prominenz/Schartenhöhe angegeben werden. Die Prominenz/Schartenhöhe stammt aus der Geomorphologie und gibt an, in welchem Maß ein Maximum im Vergleich zu anderen Maxima heraussteicht [88]. Zur Bestimmung der Prominenz wird ausgehend von einem lokalen Maximum eine horizontale Linie nach links und rechts gezogen bis die Linie entweder den Grauwertverlauf auf Grund eines höher liegenden Maximums schneidet oder den Rand des untersuchten Grauwertverlaufes erreicht. In den beiden so erhaltenen Intervallen wird jeweils nach dem Minimum gesucht, das entweder ein Tal oder dem Endpunkt entspricht. Das höchste der beiden Minima der Intervalle wird ausgewählt und die Differenz zwischen dem Grauwert des ausgewählten Minimums und dem betrachteten Maximum wird als Prominenz des Maximums ausgegeben. Abbildung 1.13 zeigt ein einfaches Beispiel zur Prominenzbestimmung mit drei Maxima.



**Abbildung 1.13:** Beispiel zur Ableitung der Prominenz eines Maximums.

Das globale Maximum  $p_1$  weist die höchste Prominenz auf mit der Differenz des Maximums zu den Randpunkten. Das lokale Maximum  $p_2$  ist umgeben von den beiden höheren Maxima und weist damit die geringste Prominenz auf. Wird eine Subtraktion des Grauwertverlaufes vom maximalen Grauwert durchgeführt, kann das gleiche Prinzip auch für Minima angewandt werden.

## Gradient

Die Detektion von Kanten zwischen zwei Bildbereichen, die unterschiedliche aber homogene Grauwerte aufweisen, wird durch die Betrachtung des Gradientenverlaufes ermöglicht. Für die Berechnung des Gradienten  $\nabla g(x, y)$  werden die Ableitungen des Grauwertverlaufes in  $x$ - und  $y$ -Richtung betrachtet [8, 32, 41]:

$$\nabla g(x, y) = \left( \frac{\partial g}{\partial x}, \frac{\partial g}{\partial y} \right)^T. \quad (1.1)$$

Maxima im betragsmäßigen Verlauf des Gradienten werden als Kanten ausgegeben:

$$\|\nabla g(x, y)\|_2 = \sqrt{\left(\frac{\partial g}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial y}\right)^2}. \quad (1.2)$$

Zur Approximation der Ableitungen werden in der Bildverarbeitung Filtermasken verwendet wie etwa der *Sobel*-Operator [78]:

$$\frac{\partial g}{\partial x} = g_N(x, y) * \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 2 & 0 & -2 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad (1.3)$$

$$\frac{\partial g}{\partial y} = g_N(x, y) * \begin{pmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1.4)$$

\* bezeichnet hierbei den Faltungsoperator [87] und  $g_N(x, y)$  die Grauwerte der 3x3 Nachbarschaft an der Stelle  $(x, y)$ . Für den 3x3 *Sobel*-Operator  $f_{\text{Sobel}}$  berechnet sich die diskrete Faltung über

$$g_N(x, y) * f_{\text{Sobel}} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 g_N(x+i-2, y+j-2) \cdot f_{\text{Sobel}}(i, j). \quad (1.5)$$

## Korrelationsfilter - Template Matching

Häufig ist es die Aufgabe der Bildverarbeitung, ein Objekt gegebener Gestalt in einem Bild wiederzufinden. Dies wird als Template Matching bezeichnet und kann zum Beispiel mittels einer normierten Kreuzkorrelation, d.h. einem Grauwertvergleich, realisiert werden. In diskreter Schreibweise kann die normierte Kreuzkorrelation für ein Bild  $g(x, y)$  und einem zu detektierenden Objekt bzw. Template  $o(x, y)$  wie folgt beschrieben werden [12, 44]:

$$c(u, v) = \frac{\sum_{x,y} (g(x, y) - \bar{g}) \cdot (o(x-u, y-v) - \bar{o})}{\sqrt{\left(\sum_{x,y} (g(x, y) - \bar{g})^2\right) \cdot \left(\sum_{x,y} (o(x-u, y-v) - \bar{o})^2\right)}}. \quad (1.6)$$

Dabei ist  $(u, v)$  die Verschiebung des Templates über das Originalbild und  $\bar{g}$  bzw.  $\bar{o}$  der mittlere Grauwert im Bild bzw. Template.  $c(u, v)$  nimmt Werte im Bereich von -1 bis 1 an, wobei 0 keiner Korrelation, 1 einer hohen Korrelation mit dem Template und -1 einer hohen Korrelation mit dem inversen Template entspricht. Erreicht das Maximum von  $c(u, v)$  eine Mindestkorrelation, kann die Position des Maximums dementsprechend als Detektion ausgegeben werden.

## Segmentierung - Region Growing

Die Segmentierung beschreibt in der Bildverarbeitung Verfahren, die Regionen mit gleichen bzw. ähnlichen Eigenschaften, wie Grauwert oder Textur [99], zusammenfassen. Eine einfache Segmentierung ist zum Beispiel das Zusammenfassen von Bildpunkten, die alle einen

Grauwert größer als einen Schwellwert aufweisen, wobei dabei keinerlei Nachbarschaftsbeziehungen der Bildpunkte berücksichtigt werden. Ein aufwändigeres Verfahren stellt das Region Growing Verfahren dar [1]. Ausgehend von einem initialen Bildpunkt, dem sogenannten Saatpunkt, werden die Eigenschaften (Grauwert, Textur, usw.) der benachbarten Punkte betrachtet. Hat ein benachbarter Punkt ähnliche Eigenschaften, wird dieser Punkt in die segmentierte Region aufgenommen. Dieser Vorgang wird für die Region und die benachbarten Punkte so lange ausgeführt bis keine benachbarten Punkte mehr ähnliche Eigenschaften haben und damit nicht mehr in die Region aufgenommen werden können. Die zu vergleichende Eigenschaft kann dabei nur vom initialen Punkt betrachtet oder fortlaufend zum Beispiel bei Betrachtung des Grauwertes an den sich ändernden Mittelwert der Region angepasst werden. Neben diesen regionenorientierten Verfahren können auch kantenorientierte, texturbasierte oder auch modellbasierte Verfahren zur Segmentierung herangezogen werden [8, 41, 70].

### Morphologische Bildverarbeitung

Operatoren der morphologischen Bildverarbeitung für Binärbilder können verwendet werden, um die Gestalt von Regionen, die aus einer Segmentierung gewonnen wurden, zu verändern [36, 79].

Ausgangspunkt für die morphologische Bildverarbeitung ist dabei die Betrachtung der Pixel einer Bildmatrix, die ungleich Null sind, als Menge  $G$ . Bilder werden in diesem Bereich als Punktmenge betrachtet. In einem Binärbild ist die Menge  $G$  demzufolge definiert durch

$$G = \{(x, y) \mid g(x, y) = 1\}. \quad (1.7)$$

Außerdem wird ein strukturierendes Element (Maske) eingeführt, welches einer Punktmenge  $S$  entspricht mit der die Menge  $G$  manipuliert wird. Die um eine bestimmte Strecke  $w$  zum Bildpunkt verschobene Menge  $S$  wird mit  $(S)_w$  bezeichnet.

Mit diesen Definitionen können die beiden grundlegenden Operatoren der Morphologie aufgestellt werden [7, 41], nämlich die Erosion

$$G \ominus S = \{w \mid (S)_w \subseteq G\} \quad (1.8)$$

und die Dilatation

$$G \oplus S = \{w \mid (S)_w \cap G \neq \emptyset\}. \quad (1.9)$$

Für die Bearbeitung einer Objektform können diese elementaren Operatoren herangezogen werden, um neue Operatoren zu erzeugen.

Zur Entfernung kleiner, nicht zusammenhängender Regionen kann zum Beispiel eine Erosion auf die komplette Menge angewandt werden. Da eine Erosion unvermeidlich zu einer Reduktion der Größe aller Regionen führt, wird zum Ausgleich eine Dilatation durchgeführt. Diese Abfolge der elementaren Operatoren kann unter dem Begriff Öffnen zusammengefasst werden:

$$G \circ S = (G \ominus S) \oplus S. \quad (1.10)$$

Für den umgekehrten Fall, zum Beispiel das Schließen von Löchern in Regionen, wird zuerst eine Dilatation durchgeführt und anschließend die dadurch entstandene Größenänderung aller Regionen durch eine Erosion ausgeglichen. Diese Abfolge wird als Schließen bezeichnet:

$$G \bullet S = (G \oplus S) \ominus S. \quad (1.11)$$

### Zeitliche Bildfilterung

Werden mehrere Bilder mit einer vorgegebenen Abtastzeit  $T_A$  aufgenommen, wird von einer Bildsequenz gesprochen. Die Verwendung von Bildsequenzen ermöglicht es, auch dynamische Eigenschaften einer Szene, wie die Verfolgung von Objekten, auszuwerten und auch zeitliche Filterungen durchzuführen. Als zeitliche Filterung wird zum Beispiel die Verwendung des minimalen, mittleren oder maximalen Grauwertes für jeden Bildpunkt über eine Bildsequenz bezeichnet. Ebenfalls kann ein zeitlicher Tiefpassfilter erster Ordnung  $g_{\text{TP}}(x, y, t)$  bzw. IIR-Filter (*Infinite Impulse Response*) betrachtet werden, der über die Differentialgleichung

$$T \dot{g}_{\text{TP}}(x, y, t) + g_{\text{TP}}(x, y, t) = g(x, y, t) \quad (1.12)$$

mit der Zeitkonstanten  $T$  beschrieben wird [41]. Als Anfangswert wird sinnvollerweise

$$g_{\text{TP}}(x, y, 0) = g(x, y, 0) \quad (1.13)$$

gewählt.

In der zeitdiskreten Form (mit Halteglied 0. Ordnung) ergibt sich daraus für ein Bild zum Zeitpunkt  $n$ :

$$g_{\text{TP}}(x, y, n) = \kappa g_{\text{TP}}(x, y, n-1) + (1 - \kappa) g(x, y, n) \quad \text{für } 0 \leq \kappa \leq 1. \quad (1.14)$$

Mittels des Parameters  $\kappa$  kann der Einfluss des aktuellen Bildes gesteuert werden.  $\kappa$  steht in direktem Zusammenhang mit der Abtastzeit  $T_A$  und der Zeitkonstante  $T$  des Tiefpassfilters [14]:

$$\kappa = e^{-\frac{T_A}{T}}. \quad (1.15)$$

Der zeitliche Tiefpass erster Ordnung kann als Approximation der Berechnung des Mittelwertbildes einer Bildsequenz angesehen werden, wobei für die Berechnung des zeitlichen Tiefpasses eine Speicherung aller Bilder einer Bildsequenz entfällt.

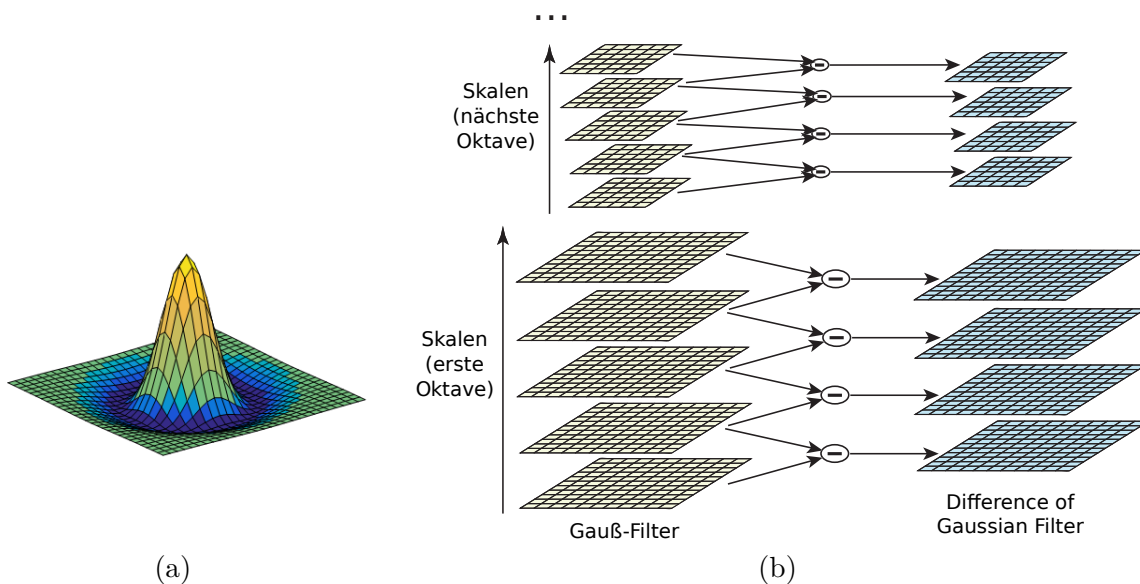
Die zeitliche Filterung einer Bildsequenz ermöglicht es, Störungen im Bild zu beseitigen oder stationäre Bildinhalte zu analysieren.

### Bildpyramiden, SIFT-Merkmalsextraktion

Strukturen in Bildern können unterschiedliche Ausdehnungen haben. Zur Detektion großer Strukturen wären damit auch große Operatoren und Filter notwendig. Dies würde einen erheblich erhöhten Rechenaufwand bedeuten. Um den Anstieg an Rechenaufwand zu verhindern, wurden sogenannte Bildpyramiden eingeführt [8, 13]. Dazu wird iterativ eine

Glättung und Unterabtastung durchgeführt, wodurch eine Pyramide von Bildern entsteht, die verschiedene Skalen repräsentiert. Operatoren und Filter können damit in kleinen Dimensionen auf entsprechend verkleinerte Bilder mit geringem Rechenaufwand angewandt werden.

Dieses Prinzip wird zum Beispiel bei der Detektion lokaler Merkmale mittels des SIFT-Algorithmus (*Scale-Invariant Feature Transform*) verwendet [47]. Für die Berechnung der Merkmalsbilder ist eine Faltung mit einem *Difference of Gaussian* Filter (Abbildung 1.14(a)) notwendig. Dadurch werden verschiedene Frequenzbänder des Bildes betrachtet. Zur effektiven Berechnung werden zunächst mehrere *Gauß*-Filter mit unterschiedlich skalierten Varianz auf die Ebenen einer Bildpyramide angewandt, wodurch unterschiedliche Skalen (skalierte *Gauß*-Filter) und Oktaven (skalierte Bildgröße) in einer Merkmalspyramide entstehen (Abbildung 1.14(b)). Über alle Skalen und Oktaven wird anschließend eine Suche nach lokalen Maxima zur Objektdetektion durchgeführt.



**Abbildung 1.14:** Übersicht SIFT-Merkmalsextraktion: (a) Beispiel für einen 2D Difference of Gaussian Filter. (b) Ablauf des SIFT-Algorithmus zur Erstellung einer Merkmalspyramide nach [13].

## Modellschätzung

Eine häufige Aufgabenstellung in der Bildverarbeitung stellt das Schätzen einer Kurvengleichung auf Basis eines Modells und vorhandener Messpunkte dar. Über die Methode der kleinsten Fehlerquadrate bzw. Least Squares (LS) Verfahren [83] werden die quadratischen Abstände jedes einzelnen Messpunktes zum Modell betrachtet und deren Summe zum Schätzen der Modellparameter minimiert. Das LS-Verfahren behandelt dabei Ausreißer und gute Messpunkte gleich, wodurch die Qualität der Schätzung stark beeinflusst werden kann.

Stehen zu den einzelnen Messpunkten die Varianz bzw. Standardabweichung zur Verfügung, kann über das weiterentwickelte Weighted Least Squares (WLS) Verfahren eine Modellschätzung durchgeführt werden. Das WLS-Verfahren gewichtet dabei die Abweichungen einzelner Messpunkte mit dem Reziproken der Standardabweichung. Ausreißer nehmen damit weniger Einfluss auf die Modellschätzung als beim LS-Verfahren.

Das *Random Sample Consensus* (RANSAC) Verfahren [28] bietet die Möglichkeit, Ausreißer zu detektieren und für die Modellschätzung zu ignorieren. Das Verfahren wählt aus allen Messpunkten zufällig Stichproben aus und führt auf deren Basis eine Modellschätzung durch. Anschließend wird die Anzahl der Messpunkte bestimmt, die innerhalb eines Toleranzbereiches vom geschätzten Modell abgedeckt werden. Dieser Vorgang wird für mehrere Iterationen wiederholt und dasjenige Modell als bestes ausgegeben, das die größte Anzahl an Messpunkten beinhaltet. Anschließend kann für die Messpunkte des besten Modells wiederum eine LS- oder WLS-Modellschätzung durchgeführt werden. Die Wahl des Toleranzbereiches spielt dabei eine wichtige Rolle für den Einfluss von Ausreißern auf das Schätzergebnis.

### 1.2.5 Existierende Verfahren im Bereich der industriellen Verbrennungsprozess- und Flammenüberwachung

Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, welche Messsysteme bzw. Möglichkeiten zur Überwachung des Verbrennungsprozesses aktuell einem Anlagenführer einer Zementdrehrohranlage zur Verfügung stehen. Des Weiteren wird betrachtet, welche Verfahren in der Literatur im Bereich der kamerabasierten Verbrennungsprozess- und Flammenüberwachung existieren.

#### Verfügbare Messsysteme an Zementdrehrohranlagen

Zur Beurteilung des Verbrennungsprozesses wird der Anlagenführer einer Zementdrehrohranlage durch verschiedene Prozessparameter unterstützt, die über das Prozessleitsystem ausgegeben werden. Wichtige Prozessparameter stellen unter anderem die  $\text{NO}_x$ - oder CO-Werte am Ofeneinlauf dar, die Rückschlüsse auf die Ofentemperatur erlauben. Hohe  $\text{NO}_x$ -Werte deuten dabei auf hohe Temperaturen im Ofen hin. Des Weiteren kann auch der Stromverbrauch des Drehrohrantriebes als Prozessparameter herangezogen werden. Ergeben sich Änderungen im Prozess, zum Beispiel durch schwankende Temperaturen der Brennerflamme, ändert sich auch die Umsetzung im Brennbett und damit die Beschaffenheit des Endmaterials, dem Zementklinker. Direkt messbar ist dies unter anderem durch die Betrachtung des Schüttwinkels, wie es in [108] vorgestellt wird. Da mit Änderung der Beschaffenheit des Brennbettes auch die nötige Kraft für die Durchmischung, d.h. der Rotation des Drehrohres, zusammenhängt, ist dies auch direkt im Stromverbrauch messbar. Der Stromverbrauch gibt damit einen Anhaltspunkt auf die Qualität des Klinkers, wobei die Ursache für Änderungen in der Qualität, wie etwa Temperaturänderungen, schon deutlich früher auftreten. D.h. Anpassungen unter anderem der Brenneinstellungen als Reaktion auf Qualitätsänderungen können damit erst durchgeführt werden, wenn Material schlechterer Qualität erzeugt wird.

Die wichtigste Überwachungsmöglichkeit zur Qualitätssicherung und der Prozesskontrolle stellt die Labormessung von Zementklinkerproben dar [10]. Mindestens stündlich werden aus dem aktuellen Prozess Klinkerproben entnommen und die mineralogische Zusammensetzung mit Hilfe eines Röntgendiffraktometers bestimmt. Ein Beispiel der Firma PANALYTICAL für ein Röntgendiffraktometer ist in Abbildung 1.15 gegeben.



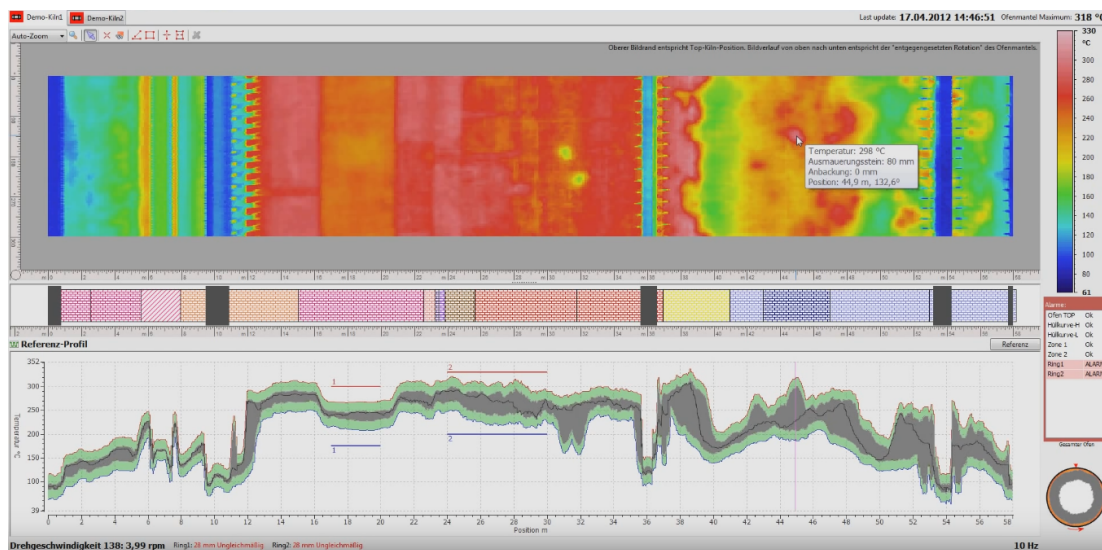
**Abbildung 1.15:** (a) Aufbereitete Probe für die Freikalkmessung und (b) Beispiel für ein Freikalkmessgerät CUBIX<sup>3</sup> der Firma PANALYTICAL [71].

Die Proben müssen für die Auswertung aufbereitet und in entsprechenden Behältnissen dem Messgerät zugeführt werden. Das Messergebnis liefert die unterschiedlichen Klinkerphasen wie Alit, Belit oder Freikalk, die auf die entsprechenden Grenzwerte, wie sie in Abbildung 1.3 dargestellt sind, überprüft werden müssen. Anhand dieser exakten Aussage über die Qualität kann eine zuverlässige Einschätzung des Sinterverhaltens getätigt werden. Diese Labormessungen werden allerdings nur jede Stunde bzw. höchstens jede halbe Stunde durchgeführt. Hinzu kommt, dass von Probenentnahme über Aufbereitung bis hin zur Auswertung der Probe und Ausgabe der Messergebnisse noch zwischen 30-60 Minuten eingerechnet werden müssen. Informationen über das aktuell im Drehrohr befindliche Material stehen dem Anlagenführer damit erst deutlich zeitversetzt und nur in großen zeitlichen Abständen zur Verfügung. Zusätzlich muss eine Unsicherheit von 0.1 bis 0.2 Prozentpunkten bei der Auswertung des Freikalkes einkalkuliert werden, da bei der Probeentnahme größere Klinkerbrocken nicht berücksichtigt werden und die Probeentnahme nur eine kleine Stichprobe des gesamten Klinkers darstellt.

### Kamerabasiertes Monitoring an Zementdrehrohranlagen

Neben den Prozessparametern und den Labormessungen stehen dem Anlagenführer noch verschiedene Kamerasysteme zur Verfügung, die zum Monitoring des Verbrennungsprozesses dienen. Eine Kamera im visuellen bzw. NIR Spektralbereich wird zur Überwachung der Brennerflamme eingesetzt. Die Bildhelligkeit lässt dabei grobe Rückschlüsse auf die Temperaturentwicklung im Drehrohr zu. Nähere Informationen über die Flamme oder den Brennstoff können allerdings nicht gewonnen werden. Außerdem sind durchaus Erfahrungen des Anlagenführers notwendig, um aus den Bildern die richtigen Rückschlüsse über den aktuellen Prozesszustand zu ziehen.

Auch Infrarotkamarasysteme werden aktuell eingesetzt, allerdings zur Überwachung der Temperatur des Drehrohrofenaußenmantels. Abbildung 1.16 zeigt die Visualisierung eines solchen Systems der Firma CMV-SYSTEMS. Dadurch können Hot-Spots, Anbackungsringe und auch Niedertemperaturzonen in der Sinterzone erkannt werden. Die Außenmanteltemperatur wird stark durch unbekannte Anbackungen an der Drehrohrinnenwand geprägt. Rückschlüsse auf die Verteilung der Innentemperatur im Drehrohr sind daher schwierig. Außerdem können Temperaturänderungen im Drehrohr nur deutlich zeitversetzt bemerkt werden, da eine Aufheizung oder Abkühlung des Drehrohraußenmantels längere Zeit in Anspruch nimmt. Kurzzeitige Schwankungen haben keinen Effekt auf die Außenmanteltemperatur.



**Abbildung 1.16:** Beispiel für die Messung der Temperatur des Drehrohrofenaußenmantels der Firma CMV-SYSTEMS. Visualisierung der Temperaturfelder auf dem abgewickelten Drehrohr und des Temperaturverlaufes entlang des Drehrohres [20].

### Automatisierte kamerabasierte Verbrennungsprozess- und Flammenüberwachung

Die automatisierte kamerabasierte Analyse von Flammen ist in der Forschung und Entwicklung, nicht nur in industriellen Umgebungsbedingungen, Bestandteil verschiedener Arbeiten. Nachfolgend wird ein Überblick über die Literatur in diesem Bereich gegeben.

Außerhalb industrieller Umgebungsbedingungen spielt die Überwachung von Flammen gerade im Bereich der Detektion von Feuer zum Beispiel auf öffentlichen Plätzen oder bei Waldbränden eine wichtige Rolle. Bilder aus der Videoüberwachung werden genutzt, um Flammen automatisiert zu detektieren und damit entstehendes Feuer frühzeitig zu erkennen. Die Detektion des Flammenbereiches erfolgt hierbei unter anderem auf Grundlage der Detektion bewegter Regionen, der Farbe oder einer Wavelet-Analyse [15, 17, 18, 35, 37, 54, 89, 90, 91].

Sowohl bei industriellen Anwendungsgebieten als auch bei der Videoüberwachung ist die Extraktion des Flammenbereiches ein erster wichtiger Schritt der Bildverarbeitung. Kanten-



und Konturdetektionsverfahren werden hierbei häufig eingesetzt, um die Grenzen des Flammenkörpers zu bestimmen [27, 33, 73, 75, 117].

Werden Flammen in einer industriellen Umgebung betrachtet, kann durch Wahl einer geeigneten Sensorik die anschließende Bildauswertung erleichtert werden, wie in Abschnitt 1.2.3 gezeigt. Eine Übersicht über die verfügbare Sensorik für die Flammenüberwachung bei verschiedenen industriellen Verbrennungsprozessen liefert [6].

In [3] werden für die Bewertung der Flamme eines Kohlebrenners an einer Testanlage Kameras im visuellen Spektralbereich verwendet. Die Bewertung wird sowohl auf Grundlage der RGB- und Falschfarbenbilder durchgeführt, als auch anhand der Grauwerte der segmentierten Flamme.

Durch Anwendung von optischen Filtern werden Kamerabilder bei unterschiedlichen Wellenlängen von Kohle- bzw. Gasflammen an einer Testanlage [40] und der Flamme in einem Dieselizeylinder [21, 55, 122] gewonnen. Über die Zwei-Farben Methode nach [38] wird die Temperatur der Flammen bestimmt und dadurch ein Monitoring bzw. eine Bewertung der Flamme gewährleistet.

Die Optimierung der  $\text{NO}_x$ -Werte einer Kohleflamme in einem Kesselofen wird in [5] durchgeführt. Die Analyse des Verbrennungsprozesses wird durch die Transformation des Flammenbildes in den HSI-Farbraum erreicht. Die Beurteilung und der Vergleich mit Prozesskenngrößen erfolgt hierbei rein auf den HSI-Farbwerten.

Flammenbilder eines Brenners in einem Drehrohr- oder Kesselofen im visuellen Spektralbereich sind außerdem Ausgangspunkt für verschiedene weitere Verfahren. [23] liefert einen Überblick inwieweit Verfahren der multivariaten Bildanalyse [26, 31] für die Flammenüberwachung genutzt werden können. Flammeneigenschaften, die anhand der multivariaten Bildanalyse und Verfahren der Datenanalyse extrahiert wurden, werden in [86, 120] mit Prozesskenngrößen verglichen und für eine Bewertung des Verbrennungsprozesses herangezogen.

Die Bewertung der Brennerflamme bei Versuchen in einem Kesselofen verschiedener Testanlagen ist Bestandteil der Arbeiten in [39, 42, 48, 49, 50, 51, 52, 81, 84, 85, 119]. Eine Flammencharakterisierung wird auf Grundlage von Kameraaufnahmen im visuellen Spektralbereich und Daten von Fotodetektoren ermöglicht. Mit Hilfe von Bildverarbeitungs-, Frequenzanalyse- und Datenanalyseverfahren können geometrische Parameter, wie Flammengröße oder -form, Leuchtparameter, wie die Helligkeit, und thermodynamische Parameter, wie Flammenflackern und Temperatur, gewonnen werden. In [16] werden diese Untersuchungen an einem Drehrohrföfen unter industriellen Prozessbedingungen durchgeführt. Die beschriebenen Verfahren betrachten hierbei hauptsächlich den Flammenkörper und damit nicht direkt die einzelnen Brennstoffanteile.

Im visuellen Spektralbereich sind einzelne Brennstoffpartikel nur beim Entzünden und außerhalb des Flammenbereiches zu erkennen. In [80, 118, 121] werden unter Laborbedingungen die Flugbahnen einzelner entzündeter Brennstoffpartikel detektiert und der Einfluss von Verbrennungsluft auf das Flugverhalten der Partikel betrachtet. In [57] wird der Mehrstoffbrenner der Nachbrennkammer eines Drehrohres mittels Bildverarbeitung

untersucht. Neben der Analyse des Flammenkörpers werden einzelne Brennstoffpartikel getrackt und die daraus gewonnene Information zur Optimierung des Verbrennungsprozesses genutzt [77]. Verfahren zur Detektion der Streichlinie des Brennstoffes existieren im Bereich von Verbrennungsprozessen bisher nicht. Außerhalb des Bereiches wird zum Beispiel in [63] ein Verfahren zur Analyse der Bewegung einer Menschenmenge bzw. von Straßenverkehr mit Hilfe einer Streichlinie mit optischen Fluss Verfahren [29, 82] verglichen.

Zur Beschreibung des Flugverhaltens alternativer Brennstoffe wurden außerdem CFD Simulationen von [45, 46] durchgeführt. Das Simulationsmodell wurde anhand der Daten eines Testreaktors, in dem einzelne Brennstoffpartikel untersucht wurden, entwickelt. Anhand der Simulation kann das Verbrennungsverhalten des Brennstoffes für verschiedene Anlagen bestimmt werden.

Die Flammenüberwachung mit Hilfe eines Infrarotkamarasystems und anschließender Bildauswertung ist in der Literatur nur wenig zu finden.

Die Analyse der Flamme eines Mehrstoffbrenners in Drehrohröfen im infraroten Spektralbereich über Thermogramme wurde in [24, 116] angewandt. Dabei wird der Temperaturverlauf zur Einschätzung der Verbrennung betrachtet. Eine direkte Beobachtung des alternativen Brennstoffes ist über die Thermogramme nicht möglich.

Kameras im NIR- und MIR-Spektralbereich wurden verwendet, um Untersuchungen an einer Wasserstoffflamme [19] durchzuführen und im Automobilbereich bei der Überwachung des Verbrennungsprozesses im Motorzylinder [2, 53]. Die verwendete Bildverarbeitung beinhaltet unter anderem Verfahren zur direkten Auswertung der Grauwerte, Kantenextraktion und Untersuchungen im Frequenzbereich.

Erste Verfahren zur Auswertung des ungezündeten Brennstoffanteiles eines Mehrstoffbrenners in einem Drehrohröfen werden in [108] vorgestellt. Einen Überblick über die Verwendung von Kameras im visuellen und infraroten Spektralbereich zur Optimierung industrieller Hochtemperaturprozesse liefert [56].

Das Prinzip der Verwendung einer Infrarotkamera zur Überwachung industrieller Verbrennungsprozesse [123, 124] wird bereits für die Auswertung von Rostfeuerungs- [60, 62] und Drehrohröfenprozessen, wie etwa bei der Sonderabfallverbrennung oder dem Zinkrecycling [58, 59, 61, 98, 107, 110, 111, 112, 113, 114], eingesetzt. Hierbei können verschiedene Informationen, unter anderem aus dem segmentierten Feststoffbett, gewonnen werden [108].

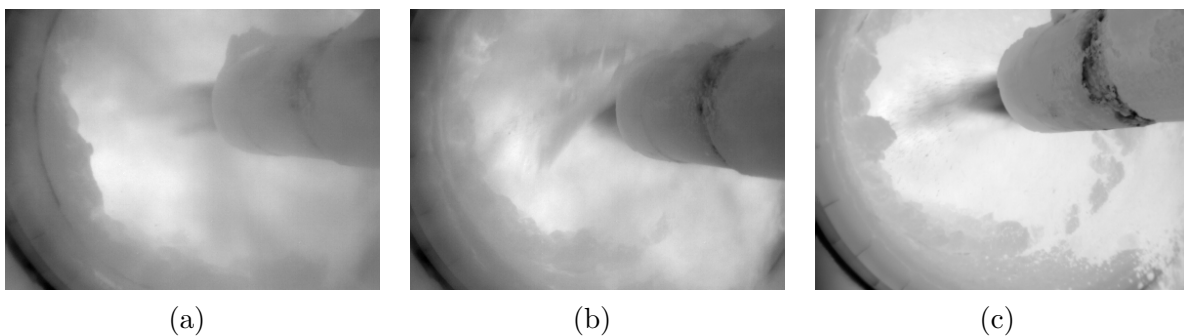
In [43, 64, 65, 66] wird mit Hilfe der Informationen einer Infrarotkamera durch neuronale Netze bzw. einer Fuzzy Regelung eine Überwachung und Regelung von industriellen Müllverbrennungsanlagen ermöglicht.

Der Überblick zeigt, dass ein Großteil der Verfahren im visuellen Spektralbereich meist nur an Testanlagen angewandt bzw. keine dauerhaften Untersuchungen unter industriellen Prozessbedingungen durchgeführt wurden. Der Einsatz von Infrarotkameras hat sich zur Überwachung verschiedener industrieller Verbrennungsprozesse bewährt. Allerdings ist die Verwendung von Infrarotkameras gerade im Bereich der Zementklinkerherstellung noch nicht weit verbreitet und wird bisher noch nicht zur Mehrstoffbrennerüberwachung eingesetzt.

## 1.3 Offene Probleme

Wie in den vorangegangenen Abschnitten erläutert, ist die Steigerung des alternativen Brennstoffanteiles beim Einsatz von Mehrstoffbrennern ein aktuelles Forschungsthema. Neben der kostenintensiven Aufbereitung der Brennstoffe bietet die permanente Überwachung und Regelung des Flug- und Verbrennungsverhaltens die Chance, diese Steigerung zu erreichen. Mit der momentan an Anlagen verfügbaren Sensorik ist diese Überwachung allerdings noch nicht möglich. Zum einen ist die Auswertung von Laborwerten sehr langsam und nur zeitversetzt möglich. Zum anderen sind die einzelnen Brennstoffbestandteile in den an Anlagen verwendeten Kameras im visuellen oder NIR-Wellenlängenbereich nicht identifizierbar, wie Abschnitt 1.2.3 zeigte.

Die Verwendung von Infrarotkameras für diese Überwachungsaufgabe macht unverbrannten Brennstoff innerhalb der Brennerflamme sichtbar, wodurch das Ausbrandverhalten beurteilt werden kann. Um die Überwachung automatisch durchführen zu können, ist eine Bildverarbeitung notwendig, die den Brennstoff detektiert, Informationen über das Flugverhalten etwa über die mittlere Streichlinie bereitstellt und daraus relevante Kenngrößen extrahiert. Die großen Herausforderungen stellen dabei die schwierigen Umgebungsbedingungen des Prozesses gerade im Zementbereich und die niedrige Auflösung der verfügbaren Infrarotkameras (z.B. PYROINC 380LF mit  $384 \times 288$  Pixeln) dar. Starke Staabeladungen oder Verdeckungen durch Anbackungen erschweren unter anderem eine robuste Detektion des Brennstoffes, die durch eine angepasste Aufnahmetechnik nicht verhindert werden können. Abbildung 1.17 zeigt einige Beispiele schwieriger Aufnahmebedingungen.



**Abbildung 1.17:** Beispiele für prozessbedingt schwierige Sichtbedingungen. (a) Überdeckung durch starke Staabeladung. (b) Überdeckung durch herabfallende Anbackungen. (c) Anbackungen, die den Brennstoffbereich durchlaufen.

Schwierige Bedingungen sind dabei recht häufig anzutreffen, weswegen von bisher entwickelten Verfahren, die bei guten Bedingungen getestet wurden, kein optimales Ergebnis zu erwarten ist. Bildverarbeitungsverfahren, die zuverlässige und robuste Ergebnisse unter realen Prozessbedingungen liefern und aus denen Kenngrößen abgeleitet werden können, die das Flug- und Verbrennungsverhalten beschreiben, müssen daher neu entwickelt werden. Auf Grundlage dieser Verfahren werden dann eine Online-Überwachung und in weiteren Schritten auch eine Regelung des Ausbrandverhaltens möglich.

Des Weiteren muss gezeigt werden, dass abgeleitete Kenngrößen sinnvoll mit physikalischen Werten des Prozesses korrelieren und damit auch mit Änderungen der Brenneinstellungen Einfluss auf den Prozess genommen werden kann. Bei der Entwicklung der neuen Verfahren und der letztendlichen Umsetzung in einer Prozessregelung gilt es, ein auch in der Praxis und an industriellen Anlagen umsetzbares Konzept zu erarbeiten, das von Anlagenführern akzeptiert wird [34, 72].

## 1.4 Zielsetzung der Arbeit

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich damit folgende Ziele:

1. Die Entwicklung von Verfahren zur Beurteilung der Aufnahmebedingungen bzw. der Aussagekraft des Bildinhaltes, um eine robuste Weiterverarbeitung in der Bildverarbeitung zu gewährleisten. Das umfasst die Einschätzung der Sichtbedingung, wie Staubbeladung und den Einfluss von Störungen, wie Überdeckungen durch Anbackungen.
2. Die Entwicklung von Verfahren zur Detektion des alternativen Brennstoffes.
3. Die Entwicklung von Verfahren zur Detektion von Brennstoffpartikeln, die aus dem gebündelten Brennstoffstrahl austreten und eventuell unverbrannt in das Brennbett eingebracht werden.
4. Die Entwicklung von Verfahren, die die verschiedenen Charakteristika des Flugverhaltens des Brennstoffes (konstanter Anteil, Partikel) berücksichtigen und daraus die Streichlinie des alternativen Brennstoffes ableiten.
5. Die Ableitung neuer physikalisch interpretierbaren Kenngrößen aus den Bilddaten, die das Flugverhalten des alternativen Brennstoffes beschreiben.
6. Die Erzeugung von Referenzdaten, die zur Validierung der neuen Verfahren herangezogen werden können. Das umfasst die Entwicklung eines Software-Tools zur Beurteilung von Bildsequenzen eines Mehrstoffbrenners durch einen menschlichen Betrachter.
7. Die Entwicklung eines 3D-Simulationsmodells des Mehrstoffbrenners zur Erzeugung neuartiger Referenzdaten zur Validierung.
8. Die Evaluation der neuen Verfahren für Bilddaten aus Drehrohrenprozessen.
9. Die Integration der neuen Verfahren in ein industriell einsetzbares Software-Tool für die Langzeiterprobung.
10. Der Vergleich bildbasierter Kenngrößen mit Prozessdaten.

---

In den folgenden Kapiteln wird die Umsetzung dieser Ziele beschrieben. In Kapitel 2 wird das neue Konzept zur Überwachung von Mehrstoffbrennern vorgestellt. Grundlage dafür bildet die Auswertung von MIR-Kamerabildern bei unterschiedlichem Flugverhalten des alternativen Brennstoffes. Kapitel 3 beschreibt die neuen Bildverarbeitungsverfahren zur Detektion der Streichlinie des alternativen Brennstoffes und die Ableitung von Kenngrößen. Die verschiedenen Ansätze zur Evaluation der neu entwickelten Verfahren durch Vergleich mit der menschlichen Einschätzung und der Simulation werden in Kapitel 4 gegeben. Kapitel 5 zeigt die Anwendbarkeit der bildbasierten Kenngrößen zur Optimierung industrieller Verbrennungsprozesse.



## **2 Neues Konzept zur Überwachung von Mehrstoffbrennern**

Kapitel 1 zeigte, dass die für eine Steigerung des alternativen Brennstoffanteiles notwendige dauerhafte Online-Überwachung des Brennstoffes mit den aktuell an Anlagen verfügbaren Messmethoden bisher nicht erfolgen kann. Die Verwendung von MIR-Kameras ermöglicht einen Blick durch die Verbrennungsgase hindurch direkt auf den unverbrannten Brennstoff und bietet damit eine gute Möglichkeit, neue Informationen über den Verbrennungszustand des alternativen Brennstoffes zu gewinnen.

Zur Beurteilung des Überwachungsverfahrens mit MIR-Kameras reicht allerdings die reine Sichtbarkeit des Brennstoffes in den Kamerabildern nicht aus. Es muss gewährleistet werden, dass Änderungen im Flugverhalten des alternativen Brennstoffes auch in den Kamerabildern zu erkennen sind. In Abschnitt 2.1 wird aus diesem Grund auf unterschiedliche Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern eingegangen. Zudem werden die Bilddaten für verschiedene Brennereinstellungen vorgestellt.

Auf Basis der neu gewonnenen Erkenntnisse aus den MIR-Kamerabildern, stellen die Detektion der mittleren Streichlinie und der Streuung des alternativen Brennstoffes zentrale Punkte bei der Bewertung des Verbrennungsprozesses dar. Beide Punkte beeinflussen im Wesentlichen die Aufenthaltsdauer des Brennstoffes innerhalb der Brennerflamme und damit sowohl die Chance auf eine komplette Brennstoffumsetzung als auch direkt die Temperatur der Flamme. In Abschnitt 2.2 wird ein neues Konzept zur Überwachung des alternativen Brennstoffes bei Mehrstoffbrennern auf Basis der MIR-Kamerabilder und anschließender neuer Bildverarbeitungsalgorithmen vorgestellt, das die Detektion der Streichlinie, die Streuung des Brennstoffes und davon abgeleitete Kenngrößen liefern kann. Es wird erläutert, welche Herausforderungen dabei angegangen werden müssen, welche Vorteile das neue Konzept bringt und wie es sich in die Prozessregelung integrieren lässt.

### **2.1 Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern**

Je nach Qualität des Brennstoffes oder nach Einstellungen des Brenners kann sich die Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern deutlich unterscheiden.

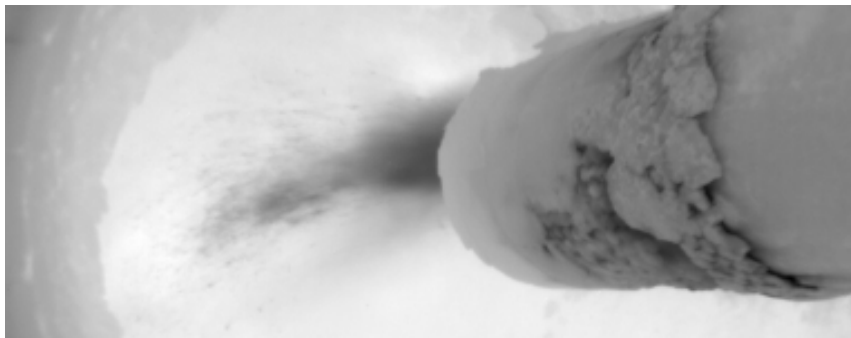
Um einen Überblick über die verschiedenen Erscheinungsformen und den Einfluss von Brenneinstellungen zu gewinnen, wurden in der vorliegenden Arbeit Bilddaten mehrwöchiger Messkampagnen ausgewertet und die wichtigsten Erscheinungsformen zusammengefasst.

### 2.1.1 Allgemeine Erscheinungsformen

Wie in Abschnitt 1.2.3 erläutert, lässt sich die Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes meist in Abhängigkeit des Abstandes zur Brennerspitze unterteilen. Abbildung 2.1 stellt ein Beispiel für die Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern dar. Nach Austritt aus der Brennerspitze liegt ein gebündelter Brennstoffstrahl vor, der sich bei weiterem Entfernen von der Brennerspitze immer weiter auffächert, bis nur noch Brennstoffpartikel zu erkennen sind. Damit wird der alternative Brennstoff durch die zwei zentralen Erscheinungsformen

- gebündelter alternativer Brennstoffstrahl und
- einzelne Brennstoffpartikel

repräsentiert.

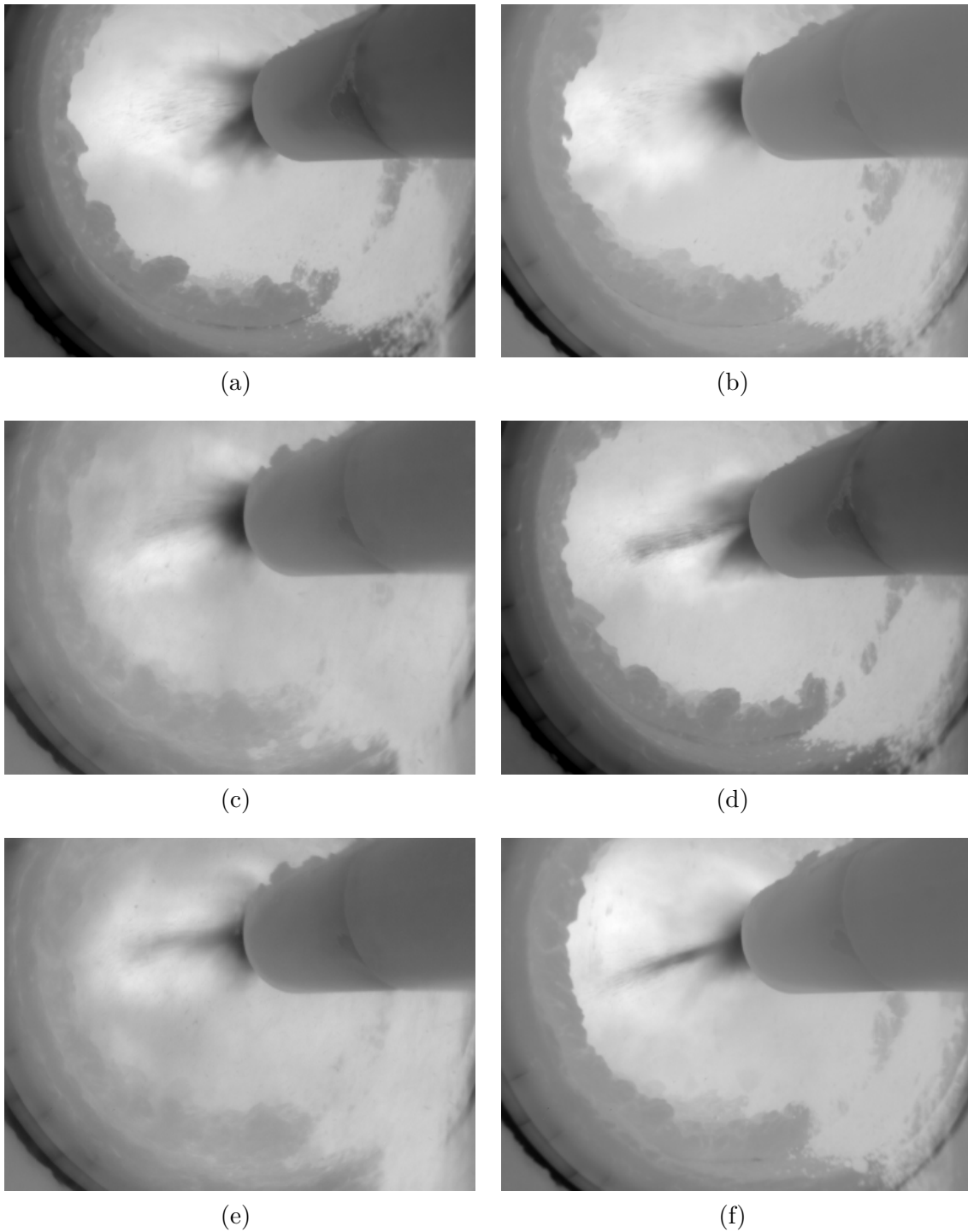


**Abbildung 2.1:** Standard Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern.

Bei der Betrachtung verschiedener Sequenzen fällt dabei auf, dass neben den verschiedenen Mischformen aus gebündeltem Strahl und einzelnen Partikeln auch Reinformen auftreten können. Abbildung 2.2 zeigt Beispiele für den fließenden Übergang zwischen der Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes rein als Brennstoffpartikel hin zu einem über nahezu die komplette Flugkurve gebündelten Brennstoffstrahl.

Um eine Detektion des alternativen Brennstoffes für alle Situationen über den kompletten sichtbaren Verlauf der Brennstoffflugbahn gewährleisten zu können, muss ein Bildverarbeitungsverfahren demzufolge beide Erscheinungsformen berücksichtigen.



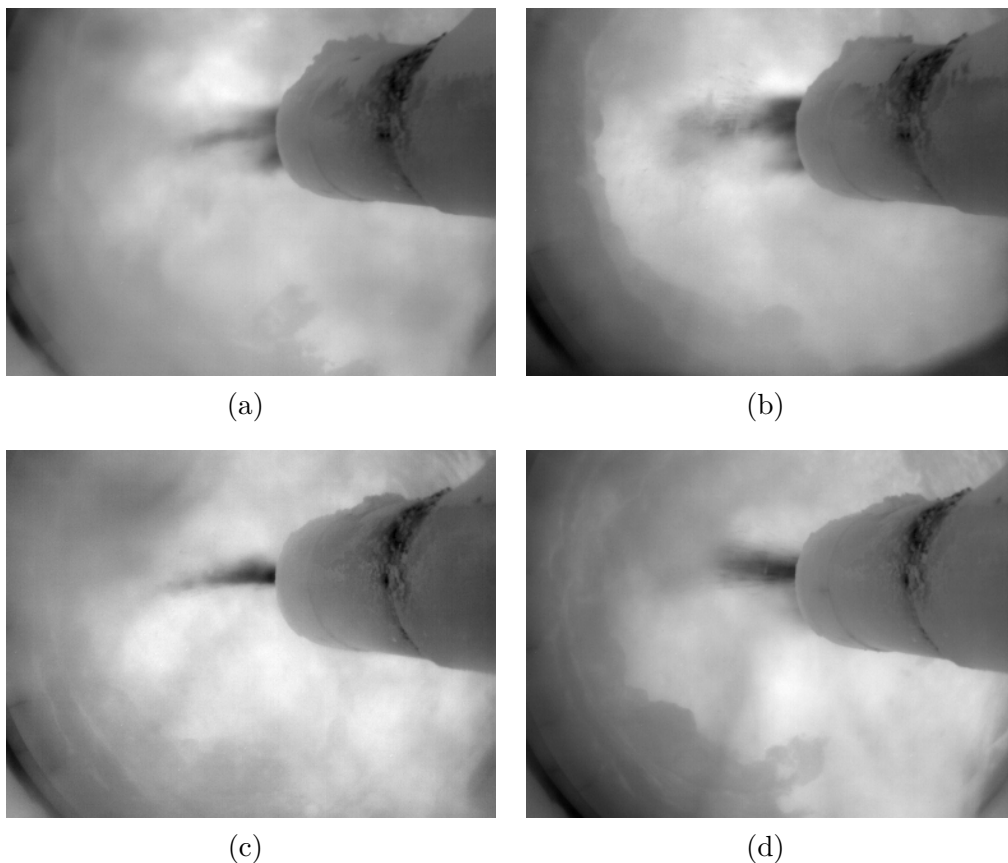


**Abbildung 2.2:** Beispiele für unterschiedliche Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes von (a) Einzelpartikeln bis hin zu einem (f) gebündelten Brennstoffstrahl. (b-e) zeigen den fließenden Übergang bzw. die Mischung von partikelförmigem und gebündeltem Brennstoffverhalten.

### 2.1.2 Einfluss von Brenneinstellungen

In einer zweitägigen Messkampagne wurde des Weiteren der Einfluss verschiedener Brenneinstellungen auf die Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes untersucht. Die für die Flugkurve des alternativen Brennstoffes ausschlaggebenden Brenneinstellungen stellen dabei der Pneumodeflektordruck, der den Austrittswinkel des Brennstoffes bestimmt, und die Drehzahl des Förderluftgebläses, die die Austrittsgeschwindigkeit des Brennstoffes bestimmt, dar.

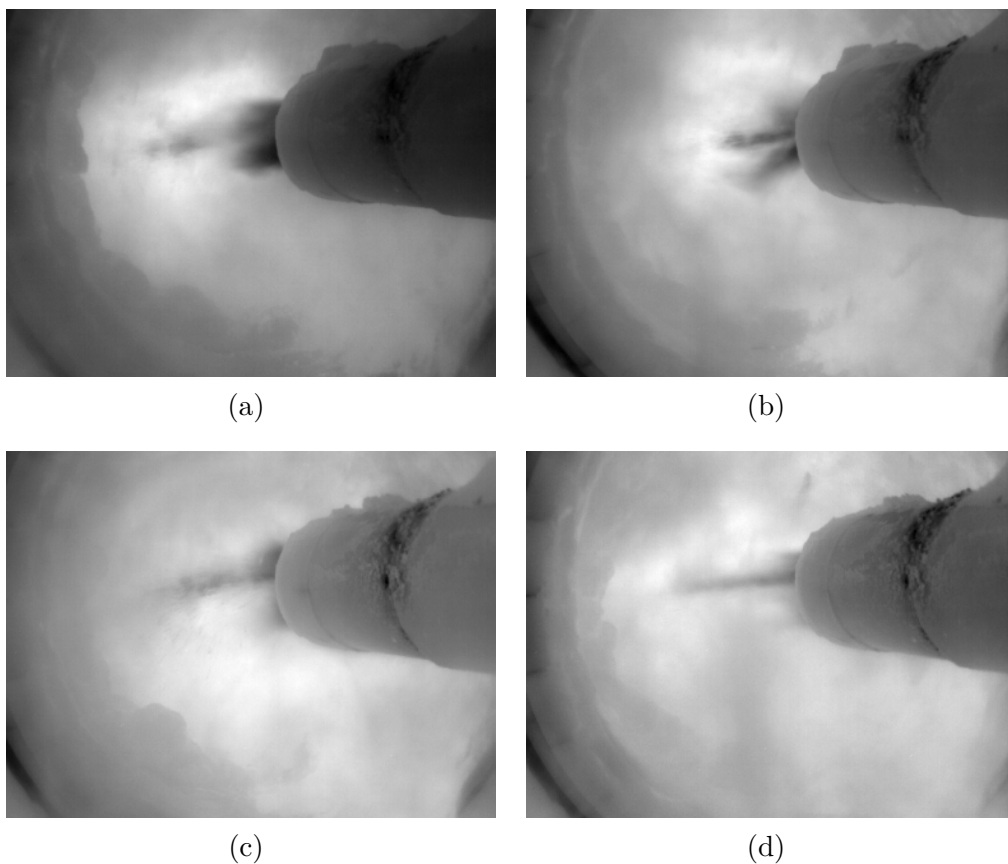
Abbildung 2.3 zeigt Beispiele für geringen (Abbildung 2.3(a)+2.3(c)) und hohen (Abbildung 2.3(b)+2.3(d)) Pneumodeflektordruck bei 70% (Abbildung 2.3(a)+2.3(b)) bzw. 100% (Abbildung 2.3(c)+2.3(d)) alternativem Brennstoffanteil. Ein hoher Pneumodeflektordruck führt dabei unabhängig vom alternativen Brennstoffanteil zu einer erhöhten Flugbahn und damit steileren mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes an der Brennerspitze. Gleichzeitig wird der Brennstoffstrahl stärker aufgefächert, wodurch einzelne Brennstoffpartikel schon nahe an der Brennerspitze sichtbar werden.



**Abbildung 2.3:** MIR-Kamerabilder für unterschiedliche Einstellungen eines Mehrstoffbrenners in einem Drehrohr zur Zementherstellung. Einstellungen des Pneumodeflektors bei 70% alternativem Brennstoff (a) 40 mbar, (b) 200 mbar und bei 100% alternativem Brennstoff (c) 40 mbar, (d) 200 mbar.

Die Änderung der Swirl-Einstellung von 2 auf 8 ist in Abbildung 2.4(a) und 2.4(b) gegeben und hat starken Einfluss auf den Kohlebereich allerdings keinen signifikanten Einfluss auf das Flugverhalten des alternativen Brennstoffes. Wie zu erwarten ist, führen kleine Swirlwerte zu einer axialen Ausströmung der Kohle und damit einem kompakten Kohlebereich (Abbildung 2.4(a)). Große Swirlwerte führen zu einer stärkeren radialen Ausströmung der Kohle und damit zu einer breiteren Auffächerung des Kohlebereiches (Abbildung 2.4(b)).

In Abbildung 2.4(c) und 2.4(d) sind die Auswirkungen von unterschiedlichen Drehzahlen des Förderluftgebläses und damit der Austrittsgeschwindigkeiten aus der Brennerspitze zu sehen. Hohe Drehzahlen und damit hohe Austrittsgeschwindigkeiten führen dabei zu einer flacheren, schmaleren und strafferen Streichlinie im Vergleich zu geringeren Drehzahlen.

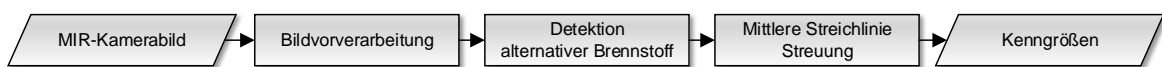


**Abbildung 2.4:** MIR-Kamerabilder für unterschiedliche Einstellungen eines Mehrstoffbrenners in einem Drehrohr zur Zementherstellung. Einstellung des Swirls auf (a) 2 und (b) 8. Einstellung der Drehzahl des Förderluftgebläses des alternativen Brennstoffes auf (c) 1900 Umdrehungen pro Minute und (d) 3000 Umdrehungen pro Minute.

Aus der Betrachtung verschiedener Sequenzen mit unterschiedlichen Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes können damit wichtige Informationen über den alternativen Brennstoff gewonnen werden, die im folgenden die Basis für die Entwicklung neuer Bildverarbeitungsalgorithmen darstellen.

## 2.2 MIR-Kamerabildverarbeitung zur Überwachung von Mehrstoffbrennern

Um die Informationen über das Flugverhalten des alternativen Brennstoffes aus den MIR-Kamerabildern zu extrahieren, werden neue Bildverarbeitungsalgorithmen benötigt. Das Ziel der Algorithmen stellt dabei zunächst die Detektion des alternativen Brennstoffes in seinen beiden Erscheinungsformen dar. Mit Hilfe der Lage des Brennstoffes kann sowohl die mittlere Streichlinie als auch die Streuung des alternativen Brennstoffes abgeleitet werden. Abbildung 2.5 zeigt das Ablaufdiagramm des neuen Bildverarbeitungs Konzeptes zur Überwachung von Mehrstoffbrennern.



**Abbildung 2.5:** Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Überwachung von alternativen Brennstoffen eines Mehrstoffbrenners.

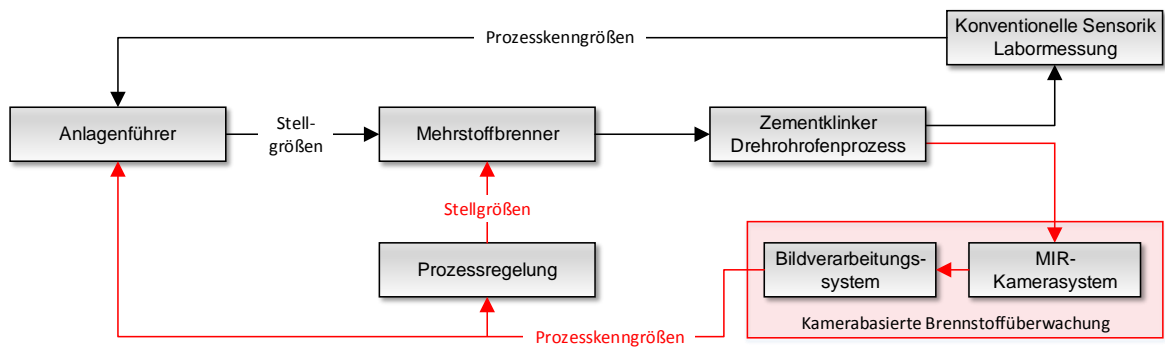
Vor der Detektion des alternativen Brennstoffes sind dabei zunächst Bildvorverarbeitungsschritte notwendig, um schlechte Sichtbedingungen oder ungewollte Verdeckungen des Brennstoffes zu erkennen und damit Fehldetektionen zu vermeiden. Aus der nachfolgend detektierten mittleren Streichlinie und Streuung des alternativen Brennstoffes können letztendlich Kenngrößen zur Beschreibung des Flug- bzw. Verbrennungsverhaltens des alternativen Brennstoffes abgeleitet werden. Die genauere Beschreibung der einzelnen Schritte erfolgt in Kapitel 3.

Die Überwachung von Mehrstoffbrennern durch das neu entwickelte Bildverarbeitungs-konzept bietet folgende Vorteile gegenüber bisherigen Überwachungsverfahren:

- Detektion des unverbrannten alternativen Brennstoffes,
- Bereitstellung von Kenngrößen zur Beschreibung des Flug- bzw. Verbrennungsverhaltens des alternativen Brennstoffes,
- frühzeitige Detektion von sich ändernden Brennstoffeigenschaften sowie
- Online-Überwachung des sich aktuell im Drehrohr befindenden alternativen Brennstoffes.

Des Weiteren kann die Integration des neuen Überwachungsverfahrens bei industriellen Verbrennungsprozessen eine automatisierte Mehrstoffbrennerregelung ermöglichen. Abbildung 2.6 zeigt ein neues Regelungskonzept mit kamerabasierter Brennstoffüberwachung.

Die bisherige Regelung des Mehrstoffbrenners erfolgt über manuelle Anpassung der Brenneinstellungen durch den Anlagenführer. Dem Anlagenführer stehen zur Optimierung des Verbrennungsprozesses die Prozesskenngrößen aus der konventionellen Sensorik, wie Prozessdaten oder Live-Kamerabild, und die zeitlich versetzten Labormessungen der Klinkerqualität



**Abbildung 2.6:** Neues Regelungskonzept eines Mehrstoffbrenners bei der Zementklinkerherstellung.

zur Verfügung. Die Informationen der konventionellen Prozesskenngrößen beschreiben allerdings nur die Folgen des sich ändernden Energieeintrages durch den Mehrstoffbrenner, unter anderem durch schwankende Eigenschaften der alternativen Brennstoffe.

Durch Integration der kamerabasierten Brennstoffüberwachung können im ersten Schritt dem Anlagenführer zusätzliche neue Prozesskenngrößen direkt über das aktuelle Flug- und Verbrennungsverhalten der Brennstoffe am Mehrstoffbrenner geliefert werden. Dadurch wird ein früheres Eingreifen in den Verbrennungsprozess gewährleistet und einer Produktion von schlechtem Endmaterial/Klinker frühzeitig entgegengewirkt. Im zweiten Schritt können die neu gewonnenen Prozesskenngrößen zukünftig auch direkt für eine automatische Regelung des Mehrstoffbrenners genutzt werden.

Das vorgestellte neue kamerabasierte Brennstoffüberwachungskonzept schließt damit die Lücke im Überwachungsprozess und sorgt für einen effizienteren Einsatz alternativer Brennstoffe. Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Bildverarbeitungsschritte des neuen Konzeptes im Detail beschrieben.



## **3 Neue Bildverarbeitungsverfahren zur Analyse von Mehrstoffbrennern**

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, welches Potential der Einsatz von MIR-Kameras zur Überwachung von Mehrstoffbrennern bietet. Die Gewährleistung der Sichtbarkeit des unverbrannten Brennstoffes in den Kamerabildern ist dabei aber nur der erste Schritt hin zu automatisch berechneten Kenngrößen, die im Prozessleitsystem angezeigt bzw. auch für eine Regelung des Mehrstoffbrenners genutzt werden können. Es werden Bildverarbeitungsverfahren benötigt, die aus den Bilddaten Informationen über den alternativen Brennstoff extrahieren und dabei auch unter schweren industriellen Umgebungsbedingungen robust Ergebnisse liefern. Eine solche Bildverarbeitungslösung stellt das neue Konzept aus Abschnitt 2.2 dar.

Nachfolgend werden die einzelnen Bildverarbeitungsschritte des neuen Überwachungskonzeptes für alternative Brennstoffe bei Mehrstoffbrennern (Abbildung 2.5) vorgestellt [106, 22, 100, 101, 102, 103, 105, 104]. Die spezifischen Herausforderungen, die sich durch die Umgebungsbedingungen des Verbrennungsprozesses ergeben, sind Bestandteil von Abschnitt 3.1. Die daraus folgenden notwendigen Verfahren der Bildvorverarbeitung (Abschnitt 3.2) bilden die Grundlage für die Detektion des alternativen Brennstoffes (Abschnitt 3.3) und die anschließende Ableitung der mittleren Streichlinie (Abschnitt 3.4). Die Ableitung von Kenngrößen wird in Abschnitt 3.5 durchgeführt. Abschnitt 3.6 beschreibt ein weiteres Verfahren zur Mehrstoffbrennerüberwachung und die Anwendbarkeit der neuen Verfahren auf andere Bauformen von Mehrstoffbrennern.

### **3.1 Spezifische Herausforderungen bei der Detektion von Brennstoffen in MIR-Kamerabildern**

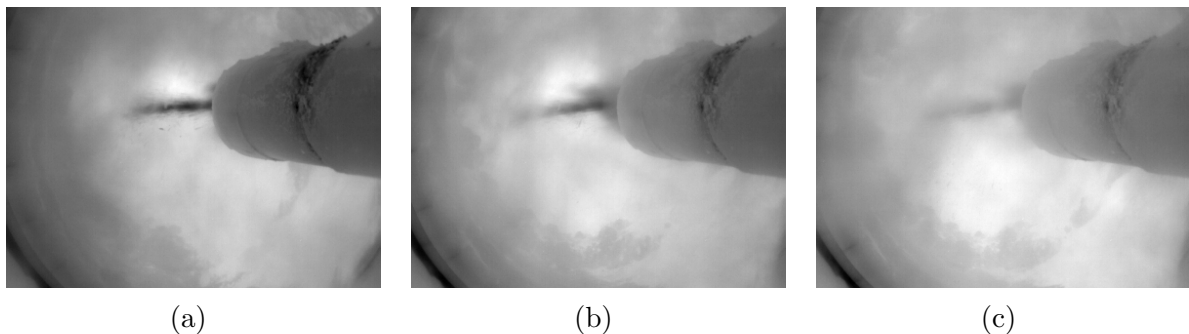
Gerade im rauen Umfeld industrieller Verbrennungsprozesse in Drehrohröfen sind eine starke Staubbeladung oder herabfallendes Material alltägliche Bedingungen und erschweren somit eine automatische Bildauswertung. Nachfolgend werden die einzelnen Problemstellungen, die eine robuste Auswertung der Bilder beeinträchtigen, vorgestellt.

### 3.1.1 Änderung der Aufnahmekonstellation

Für die automatische Auswertung der Kamerabilder können verschiedene geometrische Randbedingungen, wie etwa der Bereich in dem Brennstoff zu erwarten ist oder der Austritt des Brennstoffes aus der Brennerspitze, genutzt werden. Voraussetzung hierfür ist eine konstante Aufnahmekonstellation, die zum einen durch eine konstante Einbauposition der Kamera, aber auch durch eine konstante Position der Brennerspitze im Ofen erreicht wird. Gerade im industriellen Umfeld sind diese Bedingungen nicht immer einzuhalten. Die Einbauposition der Kamera kann sich, zum Beispiel bei der regelmäßig notwendigen Reinigung der Kameraöffnung oder auch beim betriebsbedingten Ein- und Ausfahren der Kamera, ändern. Außerdem kann das Ein- und Ausfahren des Brenners, zum Beispiel zur Wartung oder bei Ofenstillstand, zur Änderung der Brennerposition führen. Diese kleinen Änderungen können größere Auswirkungen auf den Sichtbereich der Kamera und damit auch auf vorher definierte Bildregionen haben. Aus diesem Grund ist es notwendig, die Aufnahmekonstellation vor der eigentlichen Bildauswertung regelmäßig automatisiert zu kontrollieren und gegebenenfalls über geeignete Verfahren eine Anpassung der Bereiche vorzunehmen (Abschnitt 3.2.2).

### 3.1.2 Verdeckungen des Brennstoffes

Trotz Auswahl einer geeigneten Aufnahmetechnik, werden unterschiedlich starke Staubbela-  
dungen bzw. den Brennstoff überdeckende Staubschwaden in nahezu jedem Bild auftreten. Daher ist eine Bewertung der aktuellen Sichtbedingungen erforderlich, über die auch der Zeitpunkt erkannt wird, ab dem Brennstoff nicht mehr zuverlässig zu erkennen ist. Änderungen in den Sichtbedingungen können innerhalb eines geringen Zeitraumes auftreten, wie in Abbildung 3.1 für einen Zeitraum von einer Sekunde dargestellt ist.



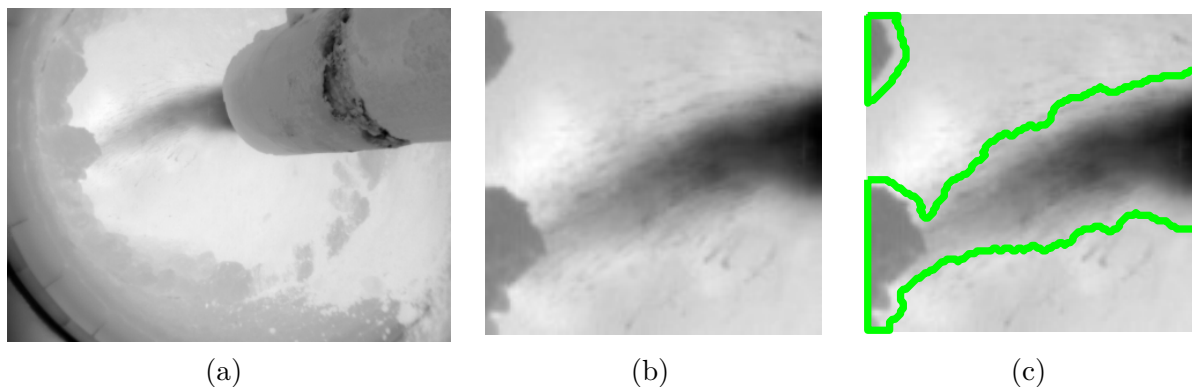
**Abbildung 3.1:** Beispiel für die Änderung der Sicht innerhalb einer Sekunde von (a) keine Verdeckung über (b) partielle Verdeckung bis hin zu (c) kompletter Verdeckung des alternativen Brennstoffes durch Staubschwaden.

Verfahren zur automatischen Bildauswertung müssen den Ausfall einzelner Bilder mit zu schlechter Sicht kompensieren können bzw. auch unter schlechteren Sichtbedingungen zuverlässige Ergebnisse liefern. Stehen über einen längeren Zeitraum keine gültigen Bilddaten



zur Verfügung, ist die Auswertung auszusetzen und eine entsprechende Warnmeldung auszugeben (Abschnitt 3.2.1).

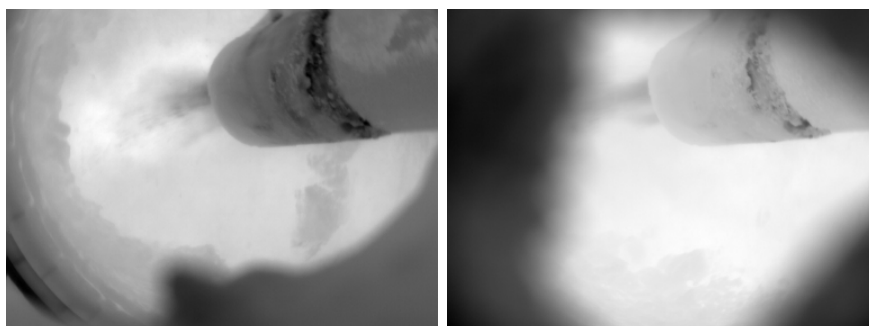
Neben Staub können aber auch Anbackungen eine Sicht auf den Brennstoff verhindern bzw. zu Fehldetektionen führen. Anbackungen bilden sich in einem Drehrohr durch anhaftendes Material des Brennbettes an der Drehrohrinnenwand (Abbildung 3.2(a)). Lang anwachsende Anbackungen können den Bereich, in dem alternativer Brennstoff zu erwarten ist, überdecken und damit die Auswertung beeinflussen. Wie in Abbildung 3.2(b) zu sehen, weisen Anbackungen einen ähnlichen Grauwert wie Brennstoff auf, wodurch grauwertbasierte Bildverarbeitungsverfahren fehlerhafte Ergebnisse liefern können (Abbildung 3.2(c)).



**Abbildung 3.2:** (a) Beispiel für Anbackungen, die den alternativen Brennstoffstrahl teilweise verdecken. (b) Beispielbild auf den Auswertebereich von Brennstoff zugeschnitten. (c) Ergebnis der Segmentierung durch ein Schwellwertverfahren. Anbackungen und Brennstoff werden gemeinsam detektiert.

Die Segmentierung der Anbackungen stellt damit einen wesentlichen Vorverarbeitungsschritt bei der automatischen Bildauswertung dar (Abschnitt 3.2.3).

Außerdem kann über die Segmentierung von Anbackungen ebenfalls durch Staub angesammeltes Material in der Kameraöffnung, das die Sicht in das Drehrohr blockiert (Abbildung 3.3), erkannt werden.



**Abbildung 3.3:** Beispiele von Anhäufungen von Material in der Kameraöffnung, die eine freie Sicht in das Drehrohr verhindern.

## 3.2 Bildvorverarbeitung

Die im vorangegangenen Abschnitt vorgestellten Herausforderungen gilt es durch geeignete Bildvorverarbeitungsverfahren für eine Weiterverarbeitung zu berücksichtigen, um durch entsprechende Maßnahmen eine zuverlässige Auswertung zu gewährleisten.

Wie in Abschnitt 1.2.3 erläutert, enthält das MIR-Kamerabild neben dem Mehrstoffbrenner und dem unverbrannten Brennstoff, auch noch große Bereiche des Drehrohres und des Klinkerbettes, die für die Auswertung des Brennstoffes nicht von Interesse sind. Aus diesem Grund kann der Bildausschnitt der eigentlichen Bildauswertung durch die Einbringung von Vorwissen auf interessierende Bildbereiche verkleinert werden. Die Bereiche orientieren sich dabei alle an der Position der Brennerspitze, die bei Neuinstallation des Systems manuell bestimmt wird und die unter anderem den Austrittspunkt  $(b_x, b_y)$  des alternativen Brennstoffes aus Brennstoffkanal 1 vorgibt.

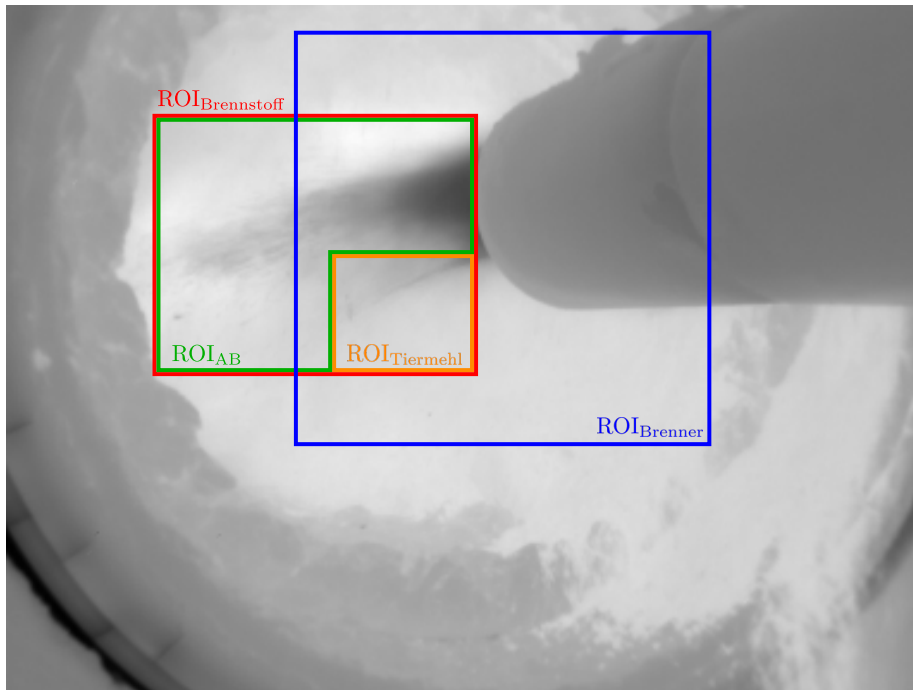
Der wichtigste Bereich stellt dabei der Bereich  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  (ROI = Region of Interest) vor der Brennerspitze dar, in dem unverbrannter Brennstoff zu erwarten ist.  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  wird auf der linken Seite auf Grund der Perspektive durch einen Anbackungsring bzw. das Drehrohrende, auf der rechten Seite durch die Brennerspitze und nach oben bzw. unten durch die Drehrohrinnenwand begrenzt. Bei hohen Anteilen alternativer Brennstoffe und damit einem verschwindenden Kohlebereich, kann bei guten Sichtbedingungen auch Brennstoff aus dem zweiten alternativen Brennstoffkanal (siehe Abbildung 1.8), der mit Tiermehl betrieben wird, sichtbar werden. Das Tiermehl kann als eigener Brennstoffstrahl betrachtet werden, soll aber nicht Bestandteil der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes aus Kanal 1 sein. Um entsprechende Fehldetektionen zu vermeiden wird der untere Bereich nahe an der Brennerspitze  $\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$ , in dem hauptsächlich Tiermehl auftreten kann, festgelegt und von der gesamten  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  abgezogen. Damit wird der Bereich zur Detektion von alternativen Brennstoffen

$$\begin{aligned} \text{ROI}_{\text{AB}} &= \text{ROI}_{\text{Brennstoff}} \setminus \text{ROI}_{\text{Tiermehl}} \\ &= \{(x, y) \mid ((x, y) \in \text{ROI}_{\text{Brennstoff}}) \wedge ((x, y) \notin \text{ROI}_{\text{Tiermehl}})\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

erhalten. Zur Überprüfung einer konstanten Aufnahmekonstellation wird die Lage der Brennerspitze im Bild detektiert. Auch dieser Bereich kann auf einen sinnvollen Suchbereich  $\text{ROI}_{\text{Brenner}}$  eingegrenzt werden. Wird die Brennerspitze in diesem Bereich nicht detektiert, kann zum einen die Kamera komplett verdeckt sein oder eine Fehlpositionierung der Kamera oder des Brenners vorliegen, worauf mit einer Warnmeldung hingewiesen werden muss.

Ein Beispiel für die Lage der verschiedenen interessierenden Bildbereiche ist in Abbildung 3.4 gegeben. Für die weitere Verarbeitung wird das Kamerabild  $g(x, y, n)$  zum Zeitpunkt  $n$  auf die Bildbereiche  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$ ,  $\text{ROI}_{\text{AB}}$ ,  $\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$  und  $\text{ROI}_{\text{Brenner}}$  zugeschnitten, wodurch die Bilder  $g_{\text{Brennstoff}}(x, y, n)$ ,  $g_{\text{AB}}(x, y, n)$ ,  $g_{\text{Tiermehl}}(x, y, n)$  und  $g_{\text{Brenner}}(x, y, n)$  entstehen.

Die festgelegten Bildbereiche stellen damit die Grundlage für die folgende Bildvorverarbeitung und -auswertung dar.



**Abbildung 3.4:** Festlegung von Bildbereichen für die weiteren Bildverarbeitungsschritte.  $ROI_{\text{Brennstoff}}$ : Bereich in dem Brennstoff auftritt.  $ROI_{\text{AB}}$  bzw.  $ROI_{\text{Tiermehl}}$ : Bereich in dem ausschließlich alternativer Brennstoff aus Brennstoffkanal 1 bzw. 2 (Tiermehl) zu erwarten ist.  $ROI_{\text{Brenner}}$ : Suchbereich für die Brennerspitze.

### 3.2.1 Bildgütebewertung

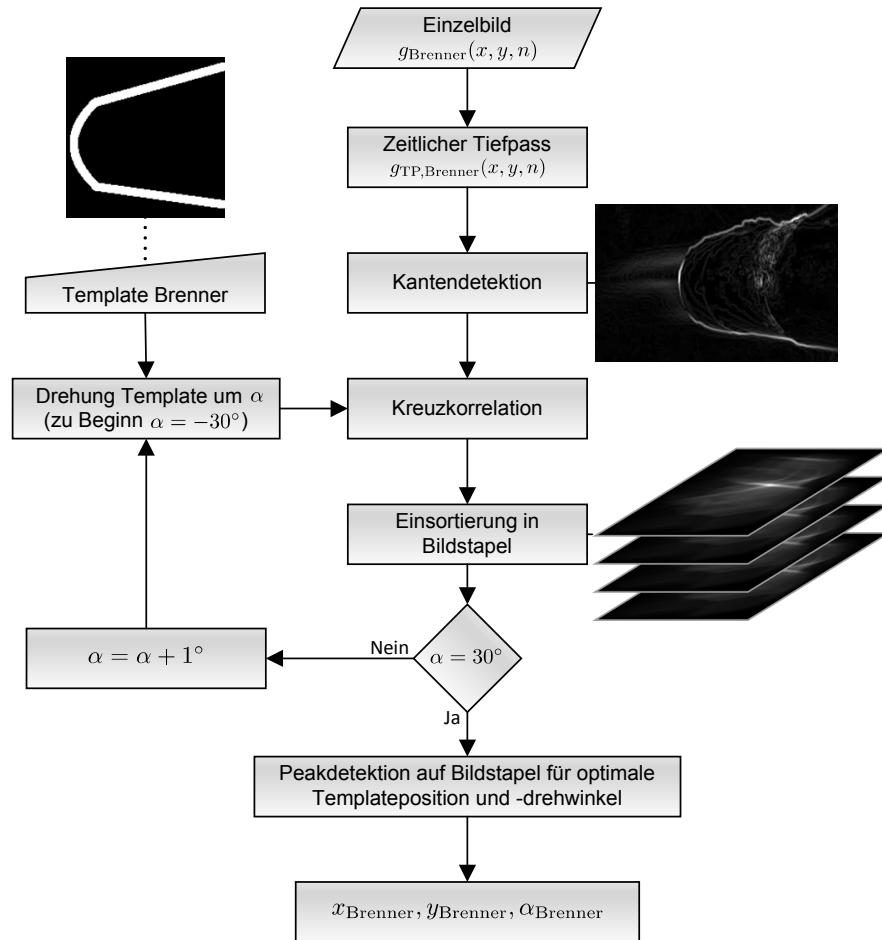
Der erste Schritt der Vorverarbeitung stellt die Bewertung der Bildgüte dar. Es muss gewährleistet werden, dass das aktuell betrachtete Bild auch genügend Informationen für die weitere Auswertung enthält. Wie in Abbildung 3.1 dargestellt, erschwert eine starke Staubbildung im Drehrohr eine Sicht auf den Brennstoff und kann diesen teilweise sogar komplett überdecken. Das Auftreten von Staub führt dabei zu einer Reduktion des Bildkontrastes. Kanteninformationen gehen dadurch komplett verloren und eine klare Abgrenzung zwischen Brennstoff und sonstigen Bildinhalten ist nicht mehr möglich. Als ein Maß zur Beschreibung des Informationsgehalts des Bildes  $g(x, y, n)$  zum Zeitpunkt  $n$  wird aus diesem Grund die Ausprägung der Kanten im festgelegten Bildbereich des Brennstoffes  $ROI_{\text{AB}}$  bestimmt. Die Bildgüte  $v(n)$  wird demnach berechnet über den mittleren Betrag des Gradienten über den betrachteten Bildbereich:

$$v(n) = \frac{\sum_{x,y} \|\nabla g_{\text{AB}}(x, y, n)\|_2}{M \cdot N - M_T \cdot N_T}, \quad (3.2)$$

mit  $M$ ,  $N$  und  $M_T$ ,  $N_T$  als Höhe bzw. Breite des ausgeschnittenen Bildbereiches  $ROI_{\text{Brennstoff}}$  und  $ROI_{\text{Tiermehl}}$ . Eine weitere Verarbeitung des aktuellen Bildes wird nur durchgeführt, wenn die berechnete Bildgüte  $v(n)$  einen vorgegebenen Schwellwert überschreitet.

### 3.2.2 Brennerdetektion

Ist über die Bildgütebewertung gewährleistet, dass im Bildbereich genügend Information für eine weitere Auswertung vorhanden ist, muss überprüft werden, ob zuvor manuell festgelegte Randbedingungen, wie die Position der Brennerspitze  $(b_x, b_y)$ , noch ihre Gültigkeit haben oder, ob es zu Änderungen in der Aufnahmekonstellation gekommen ist. Dazu wird die Position der Brennerspitze in den aktuellen Bilddaten detektiert und mit der Referenzposition abgeglichen. Der Ablauf der Brennerdetektion ist in Abbildung 3.5 gegeben.



**Abbildung 3.5:** Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Brennerdetektion.

Als Suchbereich wird der Bildausschnitt  $ROI_{\text{Brenner}}$  gewählt. Um lokale Störungen zu unterdrücken, wird zunächst der zeitliche Tiefpass  $g_{\text{TP,Brenner}}(x, y, n)$  mit vorangegangenen Bildern berechnet:

$$g_{\text{TP,Brenner}}(x, y, n) = \kappa \cdot g_{\text{TP,Brenner}}(x, y, n - 1) + (1 - \kappa) \cdot g_{\text{Brenner}}(x, y, n). \quad (3.3)$$

In der Praxis wurden bei 50 Bildern pro Sekunde mit  $\kappa = 0.95$  die besten Ergebnisse für die weitere Auswertung erzielt.

Bei der mittels *Sobel*-Operatoren approximierten Kantendetektion  $T_{\text{Brenner}}(x, y)$  des Tiefpass gefilterten Bildes tritt die Silhouette des Brenners als einer der wenigen stationären Bildinhalte sehr stark in den Vordergrund:

$$T_{\text{Brenner}}(x, y) = \|\nabla g_{\text{TP, Brenner}}(x, y)\|_2. \quad (3.4)$$

Die einfache Form der Brennersilhouette im Kantenbild kann als Template  $o(x, y)$  definiert und für die Suche der Brennerposition verwendet werden. Dazu wird die Kreuzkorrelation  $c(u, v)$  des Kantenbildes mit dem Template bestimmt:

$$c(u, v) = \frac{\sum_{x,y} (T_{\text{Brenner}}(x, y) - \bar{T}_{\text{Brenner}}) \cdot (o(x - u, y - v) - \bar{o})}{\sqrt{\left(\sum_{x,y} (T_{\text{Brenner}}(x, y) - \bar{T}_{\text{Brenner}})^2\right) \cdot \left(\sum_{x,y} (o(x - u, y - v) - \bar{o})^2\right)}}, \quad (3.5)$$

mit  $\bar{T}_{\text{Brenner}}$  und  $\bar{o}$  dem mittleren Grauwert der entsprechenden Bilder. Da sich neben der Position auch die Winkelausrichtung des Brenners ändern kann, wird die Korrelationsberechnung für verschiedene Drehwinkel des Templates durchgeführt und das Ergebnis in einen Bildstapel  $c(u, v, \alpha)$  eingetragen. Je nach verfügbarer Rechenzeit können mehr oder weniger Drehwinkel betrachtet werden. Als Beispiel wurde hier der Drehwinkel  $\alpha$  von  $-30^\circ$  auf  $30^\circ$  in  $1^\circ$  Schritten erhöht. Die Detektion des globalen Maximums des Bildstapels

$$(x_{\text{Brenner}}, y_{\text{Brenner}}, \alpha_{\text{Brenner}}) = \arg \max(c(u, v, \alpha)) \quad (3.6)$$

liefert nach Überprüfung, ob eine Mindestkorrelation erreicht wurde, die aktuelle Position und den Drehwinkel des Brenners.

Auf Grund des erhöhten Rechenaufwandes des Template Matchings wird die Abweichung der detektierten Brennerposition zur manuell angegebenen Referenzposition nicht permanent, sondern in regelmäßigen Abständen von beispielsweise fünf Minuten überprüft. Liegen kleine Abweichungen vor, werden die Werte aus dem Brennerdetektionsverfahren für die weitere Auswertung übernommen. Treten allerdings größere Abweichungen ( $> 10$  Pixel) auf bzw. wird kein Brenner detektiert, wird eine Aktualisierung der manuellen Referenzposition und der interessierenden Bildbereiche vorgeschlagen bzw. das Kamerabild muss auf eventuelle starke Verschmutzung oder falsche Einbauposition kontrolliert werden. Für den Zeitraum, in dem eine große Abweichung der Brennerposition vorliegt, wird mit der weiteren Auswertung ausgesetzt und auf eine Aktualisierung der Position gewartet.

### 3.2.3 Anbackungsdetektion

Als letzter Schritt der Bildvorverarbeitung gilt es zu überprüfen, ob im auszuwertenden Bildausschnitt  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  Brennstoff durch Anbackungen oder sich anhäufendes Material in der Kameraöffnung verdeckt wird (Abbildung 3.2 und 3.3). Beide Fälle führen zu kalten und damit dunklen homogenen Bildbereichen, die vom Bildrand in das Bild hineinragen. Um diese Bereiche segmentieren zu können, wird der Grauwertverlauf am Bildrand des ausgeschnittenen Bildes  $g_{\text{Brennstoff}}(x, y)$  betrachtet. Das Ablaufdiagramm zur Segmentierung von Anbackung ist in Abbildung 3.6 gegeben.



**Abbildung 3.6:** Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Segmentierung von Anbackungen.

Für den Bildausschnitt  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  sind die Grauwerte für den Bildrand von der rechten oberen Ecke über den oberen, linken und unteren Bildrand hin zur rechten unteren Ecke (Abbildung 3.7(a)) gegeben durch

$$g_{\text{Rand}}(l) = (g_{\text{Brennstoff}}(N, 1), \dots, g_{\text{Brennstoff}}(1, 1), \dots, g_{\text{Brennstoff}}(1, M), \dots, g_{\text{Brennstoff}}(N, M)), \quad (3.7)$$

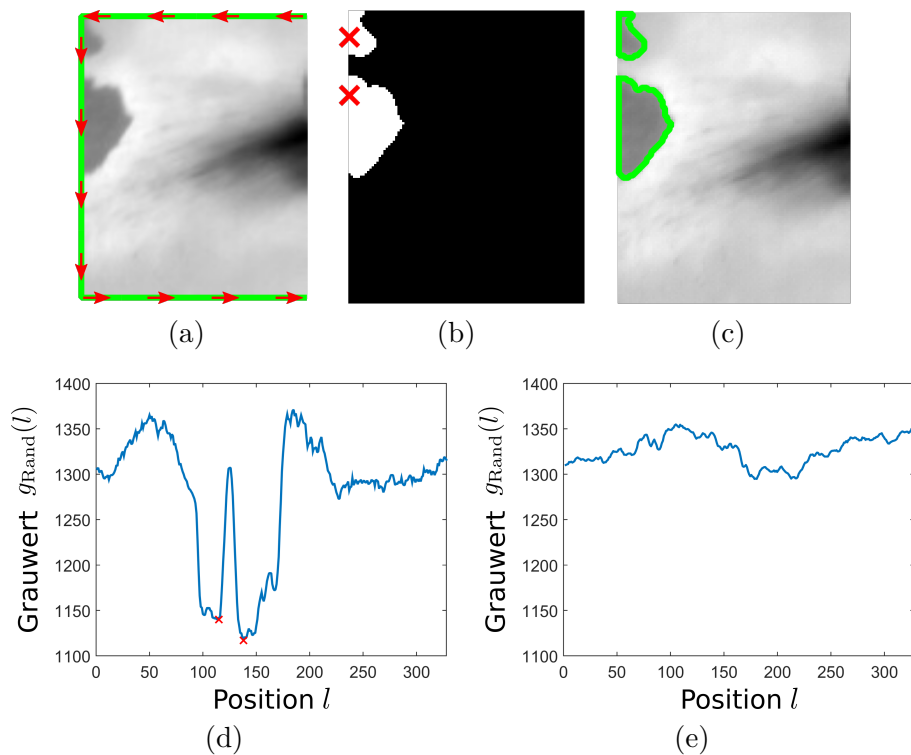
für  $l = 1 \dots (2 \cdot (N - 1) + M)$ . Wie zuvor stehen  $M$  und  $N$  für die Bildhöhe und -breite des ausgeschnittenen Bildbereiches. Der rechte Bildrand wird dabei nicht betrachtet, da dort aus anlagenspezifischen Gründen nur alternative Brennstoffe zu erwarten sind. Abbildung 3.7(d) zeigt ein Beispiel für die Extraktion des Grauwertverlaufes am Bildrand. Für Bildausschnitte ohne Überdeckungen ist am Rand die heiße Drehrohrumgebung zu erwarten und damit ein homogener Grauwertverlauf bei hohen Grauwerten (Abbildung 3.7(e)). Treten Anbackungen auf, können Grauwerteinbrüche durch eine lokale Minimasuche detektiert werden:

$$L = \arg \min(g_{\text{Rand}}(l)). \quad (3.8)$$

Zudem wird eine gewisse Mindestprominenz (Abschnitt 1.2.4) für ein Minimum vorausgesetzt, um möglichst nur starke Grauwerteinbrüche zu detektieren. Nachfolgend dienen die Lage und der Grauwert der Minima als Saatpunkte für ein Region Growing Verfahren (Abbildung 3.7(b)). Das daraus resultierende Segmentierungsergebnis wird anschließend mittels der morphologischen Operatoren Schließen, zum Füllen von Löchern und kleinen Spalten, und Dilatation, zum Ausschluss von Grenzbereichen durch Vergrößerung der Region, nachbearbeitet und als Anbackungsregionen ausgegeben (Abbildung 3.7(c)). Zum Schluss werden zusätzlich Randregionen, die Temperaturen kleiner als eine Mindesttemperatur enthalten, zu den Anbackungsregionen hinzugefügt und für die weitere Auswertung ausgeblendet.

### 3.3 Detektion des alternativen Brennstoffes

Nach Vorauswahl der Bilder und Festlegung der Anbackungsregionen, die für die weitere Auswertung nicht berücksichtigt werden, erfolgt die eigentliche Bildauswertung zur Überwachung des alternativen Brennstoffes. Ziel ist es, die mittlere Streichlinie des Brennstoffes zu bestimmen, da dadurch das Flugverhalten des Brennstoffes charakterisiert werden kann.



**Abbildung 3.7:** Beispiel für den Ablauf der Anbackungsdetektion: (a) Darstellung der Extraktion des Grauwertverlaufes entlang des Bildrandes. (b) Ergebnis der Segmentierung nach dem Region Growing Verfahren und einer morphologischen Nachbearbeitung (rote Kreuze = Saatpunkte des Region Growing Verfahrens aus der Minimadetektion). (c) Segmentierungsergebnis im Originalbild. (d) Grauwertverlauf entlang des Bildrandes für ein Bild mit Anbackungen und Detektion von Minima (rote Kreuze). (e) Grauwertverlauf entlang des Bildrandes für ein Bild ohne Anbackungen.

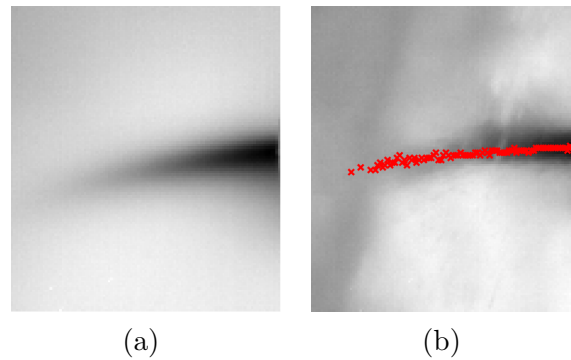
Wie in Abschnitt 2.1 erläutert, tritt der alternative Brennstoff in zwei Erscheinungsformen in MIR-Kamerabildern auf. Aus diesem Grund wird nachfolgend ein Detektionsverfahren für den gebündelten Brennstoffanteil (Abschnitt 3.3.1) und eine Brennstoffpartikeldetektion (Abschnitt 3.3.2) eingeführt, die die unterschiedlichen Charakteristiken des Brennstoffes berücksichtigen. Für die Detektion der mittleren Streichlinie wird im weiteren Verlauf nur noch Bildausschnitt  $\text{ROI}_{\text{AB}}$  betrachtet.

### 3.3.1 Detektion des gebündelten alternativen Brennstoffanteiles (GAB)

Nahe an der Brennerspitze ist der Brennstoff noch stark gebündelt und es bildet sich ein dunkler Brennstoffschweif aus. Durch zeitliche Tiefpassfilterung kann dieser gebündelte alternative Brennstoffanteil (GAB) noch weiter verstärkt werden (Abbildung 3.8(a)):

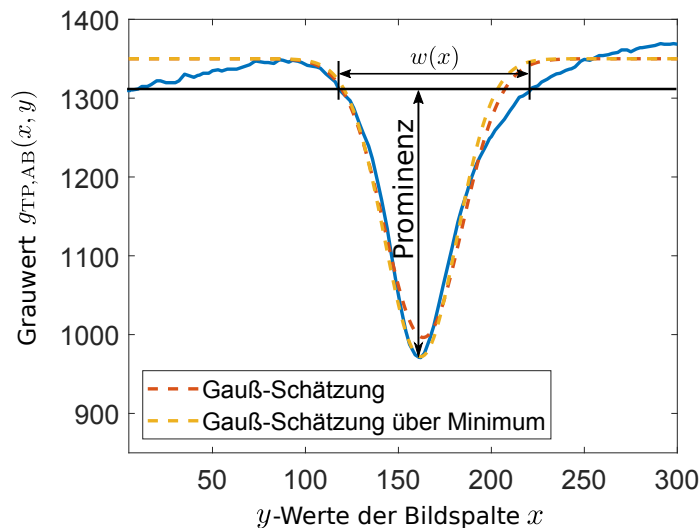
$$g_{\text{TP,AB}}(x, y, n) = \kappa \cdot g_{\text{TP,AB}}(x, y, n - 1) + (1 - \kappa) \cdot g_{\text{AB}}(x, y, n), \quad (3.9)$$

wobei wie zuvor  $\kappa = 0.95$  gewählt wird. Für die weitere Auswertung des Aufenthaltsortes wird jede Bildspalte  $x$  aus dem tiefpassgefilterten Bild  $g_{\text{TP,AB}}(x, y)$  einzeln betrachtet. Für jede Bildspalte  $x$  wird der Ort des Minimums  $\mu_{\text{GAB}}(x)$  mit der größten Prominenz bestimmt. Bildspalten mit Minima, die eine Prominenz kleiner als eine Mindestprominenz aufweisen, werden verworfen. Ein Beispiel für die spaltenweise Minimumdetektion ist in Abbildung 3.8(b) gegeben.



**Abbildung 3.8:** Beispiel für die Detektion des GAB. (a) Verstärkung des GAB durch zeitliche Tiefpassfilterung. (b) Ergebnis der spaltenweise Minimumsuche im Einzelbild eingezeichnet.

Neben der Position der Minima kann auch deren Breite geschätzt werden, indem die Nachbarschaft der Minima betrachtet wird. Abbildung 3.9 zeigt ein Beispiel für die Bestimmung der Minimumbreite für eine Bildspalte.



**Abbildung 3.9:** Beispiel für den Grauwertverlauf  $g_{\text{TP,AB}}(x, y)$  einer Bildspalte  $x$ , die angewandte Detektion der Minimumbreite über die Prominenz des Minimums und die geschätzte *Gauß*-Kurve für den Grauwertverlauf auf Basis der Grauwerte und der Minimumdetektion.



Der erste linke und rechte Nachbar mit einem Grauwert kleiner als der Grauwert des Minimums abzüglich der Prominenz wird bestimmt. Der Abstand der beiden Nachbarn kann als Breite  $w(x)$  des Minimums  $\mu_{\text{GAB}}(x)$  der Bildspalte  $x$  verwendet werden.

Wie in Abbildung 3.9 dargestellt, kann die Verteilung der Grauwerte des gebündelten alternativen Brennstoffanteiles in einer Bildspalte als *Gauß*-förmig um die Position des Minimums angenommen werden (Abbildung 3.9, rot). Da eine Schätzung der *Gauß*-Verteilung für jede Bildspalte zu rechenintensiv ist, wird eine Abschätzung der Verteilung durch die Position des Minimums und dessen Breite vorgenommen (Abbildung 3.9, gelb). Ein Großteil des GAB liegt innerhalb der Breite  $w(x)$  und kann demzufolge als  $6\sigma$ -Intervall angenommen werden. Dadurch kann die Standardabweichung in jeder Bildspalte geschätzt werden durch

$$\sigma_{\text{GAB}}(x) = \frac{w(x)}{6}. \quad (3.10)$$

Die damit erhaltene erste Einschätzung über den Aufenthaltsort des alternativen Brennstoffes mit  $\mu_{\text{GAB}}(x)$  und  $\sigma_{\text{GAB}}(x)$  dient als Grundlage für die Schätzung der mittleren Streichlinie.

Des Weiteren kann das GAB-Verfahren auch direkt zur Detektion des Tiermehlstrahles aus Brennstoffkanal 2 verwendet werden. Auf Grund der pulverförmigen Beschaffenheit tritt das Tiermehl im unverbrannten Zustand nur als gebündelter Strahl in Erscheinung. Damit liefert das Ergebnis des GAB-Verfahrens auf den Bildausschnitt  $\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$  direkte Aussagen über die Flugkurve und den Verbrennungszeitpunkt des Tiermehles. Voraussetzung hierfür ist allerdings die Sichtbarkeit des Tiermehles in  $\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$ , die nur bei hohen Anteilen an alternativem Brennstoff gewährleistet ist. Da Tiermehl an Anlagen nur in geringen Mengen eingesetzt wird und damit nur in seltenen Fällen in den Kamerabildern zu sehen ist, wird die Detektion des Tiermehles im weiteren Verlauf nicht weiter betrachtet.

### 3.3.2 Brennstoffpartikeldetektion

Je weiter sich der Brennstoff von der Brennerspitze entfernt, desto stärker erfolgt eine Auffächerung des Brennstoffes und einzelne Brennstoffpartikel treten zum Vorschein. Nach Beurteilung des GAB ist aus diesem Grund für eine komplette Beurteilung des alternativen Brennstoffes auch die Detektion einzelner Brennstoffpartikel notwendig. Die Detektion der Partikel wird im zweiten Detektionsverfahren mit Hilfe des SIFT Algorithmus (Abschnitt 1.2.4) erreicht. Dabei wird ausgenutzt, dass der beim SIFT verwendete *Difference-of-Gaussian* Filter (Abbildung 1.14(a)) starke Ähnlichkeit zum Grauwertverlauf eines Partikels im MIR-Kamerabild aufweist. Der SIFT Algorithmus angewandt auf  $g_{\text{AB}}(x, y, n)$  liefert eine Trefferliste  $p(n)$ , die für das aktuelle Bild  $n$  die Bildkoordinaten aller detektierten Partikel enthält:

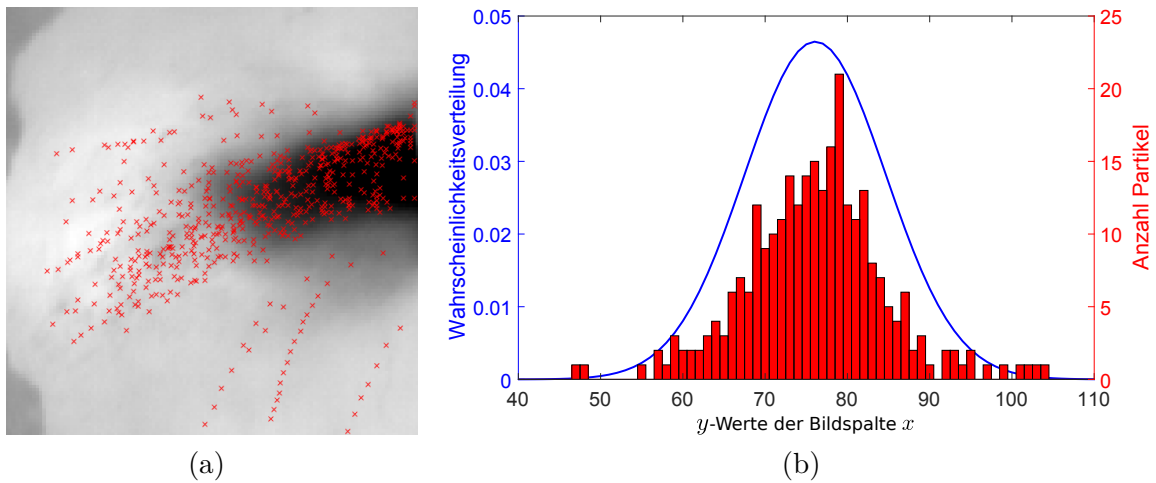
$$p(n) = \left( (x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_{K(n)}, y_{K(n)}) \right)^T, \quad (3.11)$$

mit  $K(n)$  der Anzahl der erkannten Partikel im aktuellen Bild  $n$ .

Diese Partikeldetektion wird über mehrere ( $J$ ) Bilder (z.B.  $J = 250$  Bilder  $\hat{=}$  5 Sekunden bei 50 Bildern pro Sekunde) durchgeführt und die Ergebnisse in den Partikelspeicher  $P(n)$  gespeichert:

$$P(n) = (p(n), p(n-1), \dots, p(n-J))^T. \quad (3.12)$$

Der Partikelspeicher  $P(n)$  stellt hierbei einen Ringpuffer dar, d.h. detektierte Partikel aus Bild  $n - J$  werden bei Eintreffen eines neuen Bildes durch die aktuellen Partikel ersetzt. Abbildung 3.10(a) zeigt ein Beispiel für die gesammelten Partikeldetektionen einer Bildsequenz, in der teilweise Flugkurven von Ausreißern nachvollzogen werden können.



**Abbildung 3.10:** (a) Gesammelte Partikeldetektionen einer Bildsequenz. (b) Beispiel für die Verteilung der Partikeldetektionen in einer Bildspalte  $x$  (rot) und Schätzung der zugehörigen *Gauß*-Verteilung (blau).

In  $P_{\text{sort}}(x, n)$  werden die Partikel aus dem Speicher  $P(n)$  anhand der  $x$ -Koordinaten nach der Bildspalte sortiert. Die Verteilung der  $y$ -Position der Partikel wird ebenfalls als *Gauß*-Verteilung angenommen (Abbildung 3.10(b)). Zur Information über die mittlere Streichlinie kann damit für den sortierten Partikelspeicher  $P_{\text{sort}}(x, n)$  für jede Bildspalte der Mittelwert  $\mu_{\text{Partikel}}(x)$  und die Standardabweichung  $\sigma_{\text{Partikel}}(x)$  der  $y$ -Positionen der Partikeldetektionen berechnet werden. Des Weiteren kann die Anzahl der detektierten Partikel  $k(x)$  spaltenweise ausgegeben werden. Für jede Bildspalte muss dabei eine vorgegebene Mindestanzahl an detektierten Partikeln vorhanden sein, um eine Schätzung der *Gauß*-Verteilung zu ermöglichen. Ansonsten wird für diese Bildspalte keine Detektion ausgegeben.

### 3.3.3 Zusammenführung GAB- und Partikeldetektion

Für die Schätzung der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes stehen damit für eine Bildspalte aus den beiden Detektionsverfahren folgende Informationen über den Aufenthaltsort des Brennstoffes zur Verfügung:

- GAB-Detektion:  $(\mu_{\text{GAB}}(x), \sigma_{\text{GAB}}(x))$
- Partikeldetektion:  $(\mu_{\text{Partikel}}(x), \sigma_{\text{Partikel}}(x))$

Für die Ableitung der mittleren Streichlinie müssen die Ergebnisse aus beiden Verfahren miteinander kombiniert werden, wobei je nach Erscheinungsform des Brennstoffes in den Bildern das entsprechende Verfahren stärker gewichtet werden soll. Eine Möglichkeit eine solche Gewichtung zu erreichen, bietet die Verwendung eines *Maximum a posteriori* (MAP) Ansatzes nach [67]. Als Prior-Verteilung wird in dem hier vorliegenden Fall das Ergebnis der GAB  $(\mu_{\text{GAB}}(x), \sigma_{\text{GAB}}(x))$  und als Beobachtungen zur Aktualisierung der Prior-Verteilung die Partikeldetektionen  $(\mu_{\text{Partikel}}(x), \sigma_{\text{Partikel}}(x))$  angenommen. Über die Anzahl der detektierten Partikel  $k(x)$  und einem Gewichtungsfaktor  $k_{\text{GAB}}$  wird bei der Schätzung des Mittelwertes  $\mu_{\text{MAP}}(x)$  die Gewichtung der beiden Verfahren beeinflusst. Mit diesen problemspezifischen Anpassungen folgt für die MAP-Schätzung der spaltenweisen Aufenthaltsorte des Brennstoffes

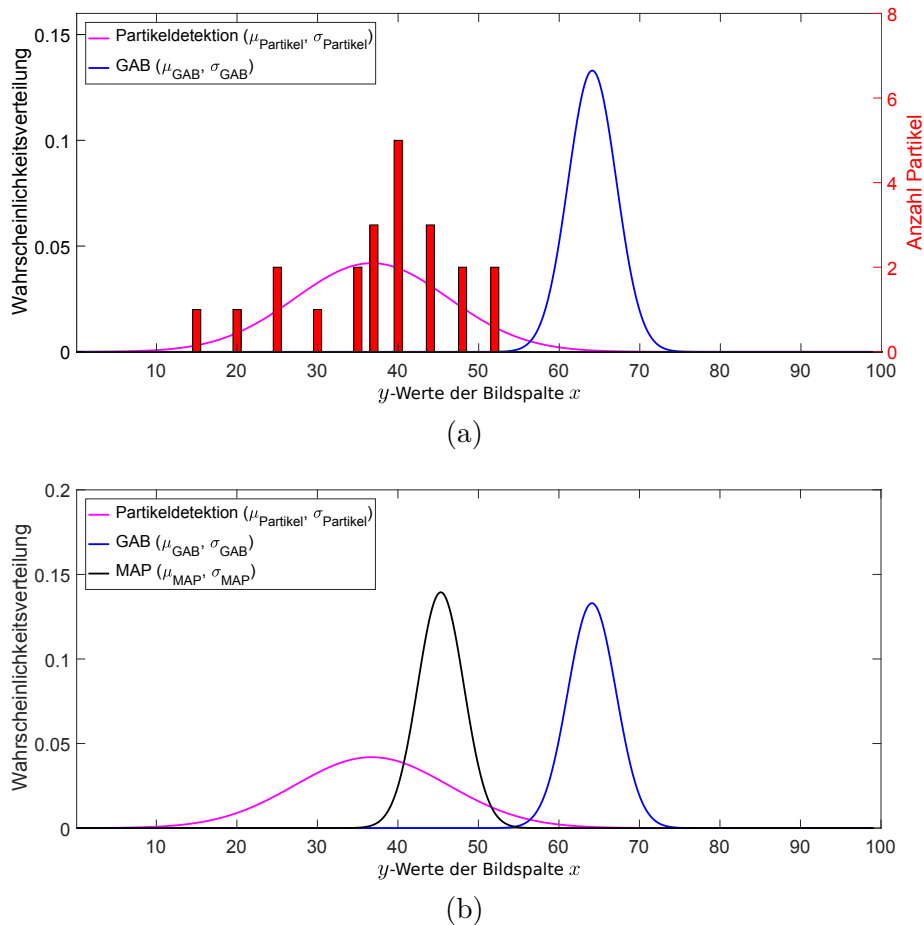
$$\sigma_{\text{MAP}}^2(x) = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_{\text{Partikel}}^2(x)} + \frac{1}{\sigma_{\text{GAB}}^2(x)}} \quad (3.13)$$

und

$$\mu_{\text{MAP}}(x) = \frac{1}{\frac{k_{\text{GAB}}}{\sigma_{\text{GAB}}^2(x)} + \frac{k(x)}{\sigma_{\text{Partikel}}^2(x)}} \left( \frac{k_{\text{GAB}}}{\sigma_{\text{GAB}}^2(x)} \mu_{\text{GAB}}(x) + \frac{k(x)}{\sigma_{\text{Partikel}}^2(x)} \mu_{\text{Partikel}}(x) \right). \quad (3.14)$$

Nach Erfahrungen aus der Anwendung der MAP-Schätzung bei der Nutzung von  $J = 250$  Bildern für den Partikelspeicher wird  $k_{\text{GAB}} = 1$  gewählt. Dadurch werden die Verfahren durch die Standardabweichung, d.h. der Sicherheit der Messung, und der Anzahl an detektierten Partikeln über die angepasste MAP-Schätzung zueinander gewichtet.  $k(x) > 1$  führt damit zu einer Verschiebung von  $\mu_{\text{MAP}}(x)$  hin zu  $\mu_{\text{Partikel}}(x)$ . Diese Verschiebung ist gerade in Bereichen, in denen vermehrt Brennstoffpartikel auftreten und ein GAB-Anteil nur geringfügig zu erwarten ist, gewünscht und wird somit durch die angepasste MAP-Schätzung automatisch erreicht.

In Abbildung 3.11 wird das Vorgehen bei der MAP-Schätzung schematisch für ein Beispiel durchgeführt. Die angenommene Verteilung der GAB-Detektion (blau) und die Verteilung, die sich aus den angenommenen Partikeldetektionen ergibt (rot), sind in Abbildung 3.11(a) zu sehen. Für eine übersichtlichere Darstellung des Ergebnisses der MAP-Schätzung wird im Vergleich zu einer realen Messung ein größerer Abstand zwischen beiden Verteilungen gewählt. Abbildung 3.11(b) zeigt das Ergebnis der nach Gleichung (3.13) und (3.14) bestimmten MAP-Schätzung (schwarz), die zwischen den beiden Ausgangsverteilungen liegt. Auf Grund der Kombination der beiden Verfahren und der damit zusätzlich genutzten Information verringert sich die Unsicherheit (Standardabweichung) der Schätzung.



**Abbildung 3.11:** Beispiel für die MAP-Schätzung. (a) Darstellung der Prior Verteilung aus dem GAB-Verfahren (blau) und der Verteilung aus der Partikeldetektion (magenta), die sich aus den gesammelten Partikeldetektionen (rot) ergibt. (b) Ergebnis der MAP-Schätzung (schwarz) aus Kombination von GAB-Verfahren und Partikeldetektion.

$(\mu_{\text{MAP}}(x), \sigma_{\text{MAP}}(x))$  stellt das kombinierte Ergebnis des Aufenthaltsortes des alternativen Brennstoffes für jede Bildspalte  $x$  dar, das nachfolgend zur Schätzung der mittleren Streichlinie weiterverwendet wird.

### 3.4 Bestimmung der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes

Die mittlere Streichlinie des alternativen Brennstoffes lässt sich als schiefer Wurf und damit als Polynom zweiten Grades in Weltkoordinaten beschreiben. Eine Transformation des schiefen Wurfs in Bildkoordinaten führt zu einer komplexen Beschreibung der Streichlinie in Abhängigkeit von extrinsischen und intrinsischen Kameraparametern (Anhang A.1). Zur Reduktion der Komplexität und um eine von Kameraparametern unabhängige Beurteilung zu erreichen, wird für den in den Kamerabildern sichtbaren Abschnitt der Streichlinie eine Approximation durch ein Polynom zweiten Grades durchgeführt. In Anhang A.1 wird gezeigt, dass die Abweichung durch diese Approximation vernachlässigbar ist.

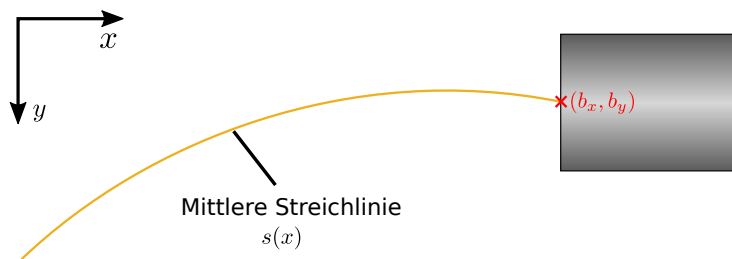
Dadurch wird in Bildkoordinaten die mittlere Streichlinie über

$$s(x) = \theta_2 x^2 + \theta_1 x + \theta_0 \quad (3.15)$$

mit den Parametern  $(\theta_0, \theta_1, \theta_2)$  der Kurve approximiert. Wie in Abschnitt 3.2 festgestellt, kann der Austritt des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze, bei konstanter Einbauposition der Kamera, als fest und gegeben vorausgesetzt und damit als physikalische Randbedingung für die Streichlinie verwendet werden. Dadurch ergibt sich ein fester Punkt  $(b_x, b_y)$  durch den die mittlere Streichlinie verlaufen muss (Abbildung 3.12), wodurch der Parameter  $\theta_0$  des Polynoms eliminiert werden kann. Die Funktion der mittleren Streichlinie vereinfacht sich zu

$$s(x) = b_y + \theta_2(x^2 - b_x^2) + \theta_1(x - b_x) \quad (3.16)$$

mit den zu bestimmenden Parametern  $(\theta_1, \theta_2)$ . Aus der Annahme eines schiefen Wurfes und der Beachtung der Achsenrichtungen im Bild ergibt sich außerdem, dass die mittlere Streichlinie links gekrümmt sein muss. Die zweite Ableitung der mittleren Streichlinie muss damit die Bedingung  $\frac{d^2s}{dx^2} > 0$  erfüllen, wodurch  $\theta_2 > 0$  gelten muss.

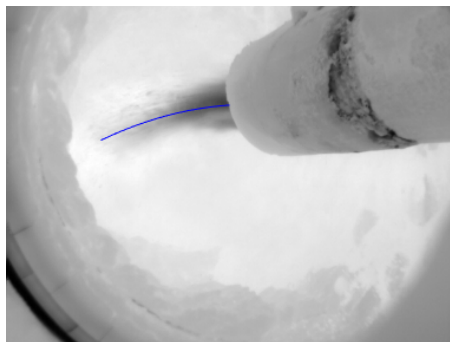


**Abbildung 3.12:** Schematische Darstellung der mittleren Streichlinie in der Brennerumgebung.

Auf Basis der Funktion  $s(x)$  der mittleren Streichlinie und des Ergebnisses der Brennstoffdetektion  $(\mu_{\text{MAP}}(x), \sigma_{\text{MAP}}(x))$  können die Parameter  $(\theta_1, \theta_2)$  geschätzt werden. Dabei werden zunächst Ausreißer durch ein RANSAC Verfahren (Abschnitt 1.2.4) eliminiert und anschließend die Parameter über einen WLS-Schätzer durch Minimierung des Gütekriteriums

$$\min_{\theta_1, \theta_2} \left( \sum_x \frac{(\mu_{\text{MAP}}(x) - s(x, \theta_1, \theta_2))^2}{\sigma_{\text{MAP}}^2(x)} \right) \quad (3.17)$$

bestimmt. Die über die neuen Verfahren detektierte Streichlinie kann damit in das aktuelle Kamerabild eingezeichnet werden (Abbildung 3.13).



**Abbildung 3.13:** Ausgabe der geschätzten mittleren Streichlinie (blau) in einer MIR-Kameraaufnahme.

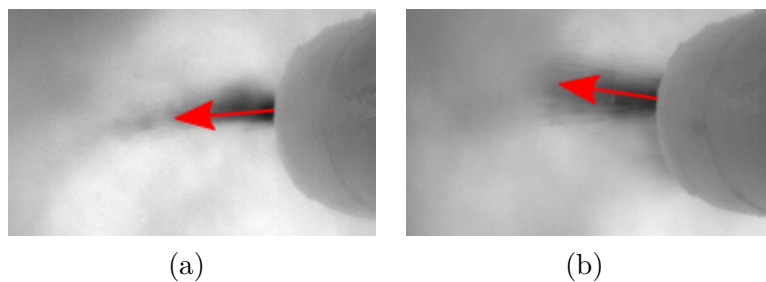
### 3.5 Kenngrößenextraktion

Die Darstellung der mittleren Streichlinie in den aktuellen Kamerabildern bietet dem Anlagenführer eine Unterstützung in der Beurteilung des Verbrennungsprozesses. Um die neu gewonnenen Informationen auch für eine zukünftige Regelung des Brenners nutzen zu können, ist es notwendig, aussagekräftige Kenngrößen automatisiert zu berechnen und auszugeben. Mit Hilfe der in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Verfahren lassen sich verschiedene Kenngrößen zur Beschreibung des Verbrennungsverhaltens des alternativen Brennstoffes ableiten:

- Die **Steigung der Streichlinie** nahe an der Brennerspitze

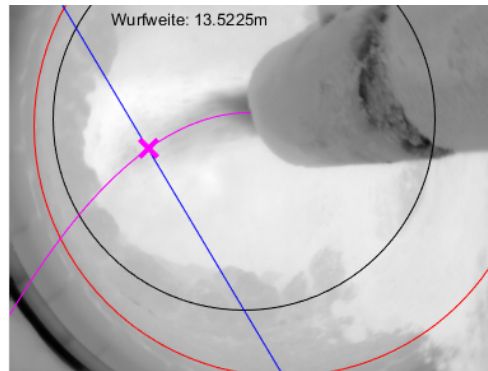
$$m_s = \left. \frac{ds(x)}{dx} \right|_{x=b_x} = 2b_x\theta_2 + \theta_1 \quad (3.18)$$

stellt eine wichtige Kenngröße dar, die den Austritt des Brennstoffes aus der Brennerspitze beschreibt. Der Austrittswinkel des Brennstoffes  $\alpha_{AB} = \tan^{-1}(m_s)$  und auch die Auswirkungen der Einstellungen des Pneumodeflektors auf die Flugbahn des Brennstoffes können damit direkt gemessen werden (Abbildung 3.14).



**Abbildung 3.14:** Darstellung der Steigung an der Brennerspitze bzw. des Austrittswinkels des Brennstoffes für einen Pneumodeflektordruck von (a) 40 mbar und (b) 200 mbar.

- Die **Wurfweite des alternativen Brennstoffes**, d.h. der Auftreffpunkt von unverbranntem Brennstoff auf dem Klinkerbett bzw. bei vollständigem Ausbrand der virtuelle Auftreffpunkt, kann mit Hilfe der mittleren Streichlinie berechnet werden. Abbildung 3.15 zeigt ein Beispiel für die Detektion derwurfweite. Die detektierte mittlere Streichlinie (magenta, Abbildung 3.15) wird mit einer Geraden entlang des unteren Drehrohrbodens (blau, Abbildung 3.15) geschnitten. Der Abstand in  $x$ -Richtung zwischen Brennerspitze und dem erhaltenen Schnittpunkt dient als Wurfweite in Bildkoordinaten. Ist das geometrische Modell des Drehrohres (schwarzer und roter Kreis, Abbildung 3.15) bekannt, kann der erhaltene Schnittpunkt auch in Weltkoordinaten umgerechnet und damit die Wurfweite zum Beispiel in Metern ausgegeben werden. Die Umrechnung von Bild- in Weltkoordinaten für den schrägen Blick in ein Drehrohr wird in [108] ausführlich erläutert. Da kleine Änderungen im geometrischen Modell allerdings starke Auswirkungen auf die Umrechnung haben können, wird aus Robustheitsgründen für die weitere Verarbeitung die Ausgabe in Bildkoordinaten bevorzugt. Die Regelung der Wurfweite stellt eine entscheidende



**Abbildung 3.15:** Berechnung der Wurfweite aus mittlerer Streichlinie und Gerade entlang Drehrohrboden.

Kenngröße für den Verbrennungsprozess dar. Zum Einen wird dadurch eine Einschätzung der Flugkurve des Brennstoffes ermöglicht und damit die Chance auf eine komplette Brennstoffumsetzung innerhalb der Brennerflamme beschrieben. Zum Anderen wird bei einer unvollständigen Verbrennung festgestellt, in welcher Zone des Umwandlungsprozesses im Klinkerbett unverbrannter Brennstoff eingebracht wird und damit zu ungewünschten Reaktionen führen kann.

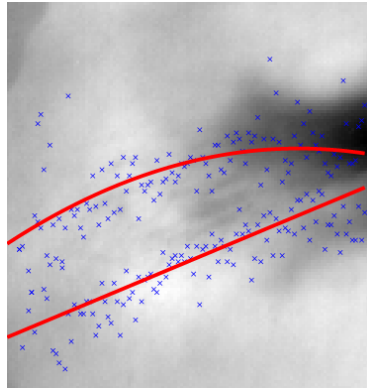
- Die **Streuung des alternativen Brennstoffes** wird allein durch Brennstoffpartikel beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Kenngröße nur aus der in Abschnitt 3.3.2 vorgestellten Partikeldetektion berechnet. Ein Maß für die Streuung bietet in diesem Zusammenhang die spaltenweise Standardabweichung  $\sigma_{\text{Partikel}}(x)$ . Über

$$\frac{\sum_x \sigma_{\text{Partikel}}(x)}{Q} \quad (3.19)$$

mit  $Q$  der Anzahl an Bildspalten, in der Partikel detektiert wurden, kann eine Kenngröße für die Streuung des alternativen Brennstoffes ausgegeben werden. Kleine Streuwerte deuten dabei auf einen stark gebündelten Brennstoffstrahl hin, dessen Verbrennung in der Brennerflamme nicht gewährleistet werden kann und damit unverbrannter Brennstoff aus der Flamme in das Klinkerbett fällt. Aber auch zu große Streuwerte sind nicht erstrebenswert, da vermehrt Brennstoffausreißer in das Klinkerbett fallen können.

Zusätzlich zur Ausgabe der Kenngröße der Streuung des alternativen Brennstoffes kann diese auch grafisch in den Bildern angezeigt werden. Grundlage dafür ist der sortierte Partikelspeicher  $P_{\text{sort}}(x, n)$  aus Abschnitt 3.3.2, der für jede Bildspalte die Verteilung der Partikel enthält. Durch spaltenweise Berechnung der Positionen der Partikel, die auf den Grenzen des 10% Quantils und 90% Quantils der Verteilung liegen, wird ein Schätzwert für die Grenzen der Streuung erhalten. Die Wahl des Prozentwertes des unteren und oberen Quantils bestimmt dabei den Einfluss von Ausreißern. Wird der Bereich zwischen dem unteren und oberen Quantil über alle Bildspalten aufsummiert, kann die erhaltene Summe ebenfalls als Maß für die Brennstoffstreuung dienen. Abbildung 3.16 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der Brennstoffstreuung. Blaue

Kreuze markieren dabei die spaltenweise Position des unteren und oberen Quantils auf deren Basis mittels eines Polynoms zweiten Grades und einem LS-Schätzers die untere und obere Grenzkurve (rot, Abbildung 3.16) ermittelt werden kann.



**Abbildung 3.16:** Darstellung der Grenzen der Brennstoffstreuung (rot) über die unteren und oberen Quantile der spaltenweise Partikelverteilung (blaue Kreuze).

Zusammenfassend kann mit Hilfe der vorgestellten Kenngrößen

- Steigung der Streichlinie an der Brennerspitze,
- Wurfweite des alternativen Brennstoffes und
- Streuung des alternativen Brennstoffes

das Verbrennungsverhalten des alternativen Brennstoffes beschrieben werden.

## 3.6 Weitere Verfahren der Mehrstoffbrennerüberwachung

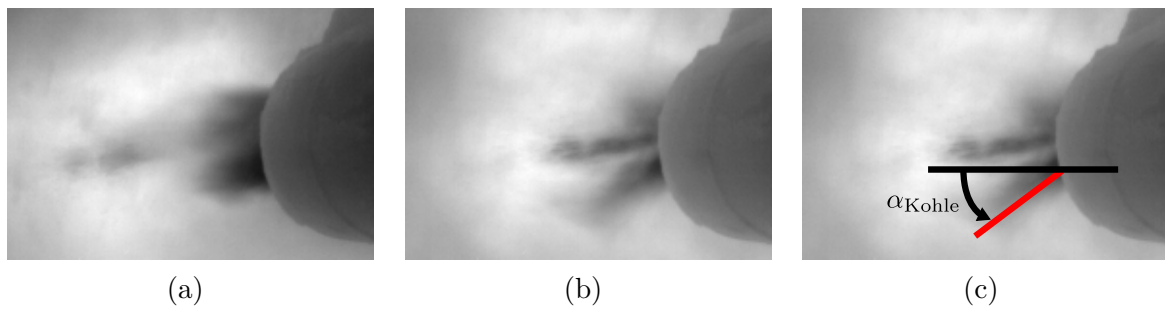
Neben dem Hauptziel der Detektion und der Ausgabe der mittleren Streichlinie kann auch eine Auswertung für den Kohlebereich des Mehrstoffbrenners mit Hilfe der MIR-Kamerabilder durchgeführt werden. Zusätzlich können die in Abschnitt 3.3 vorgestellten Verfahren auch auf andere Bauformen eines Mehrstoffbrenners angewandt werden.

### 3.6.1 Austrittswinkel des Kohlebereiches

Bei geringen und mittleren alternativen Brennstoffanteilen ist in der Nähe der Brennerspitze der Kohlebereich zu beobachten (Abbildung 1.11). Die Auffächerung des Kohlebereiches, d.h. der Winkel, unter dem die Kohle die Brennerspitze verlässt, kann im Wesentlichen durch die Brennereinstellung des Swirls beeinflusst werden. Beispiele für die Brennereinstellungen Swirl 2 und Swirl 8 sind in Abbildung 3.17 gegeben. Zur Überwachung des Kohlebereiches wird der Austrittswinkel  $\alpha_{\text{Kohle}}$  (Abbildung 3.17(c)) aus den MIR-Kamerabildern bestimmt.

Aus der Kameraperspektive sind wesentliche Änderungen in der Kohleaustrittsrichtung im Bereich unterhalb des alternativen Brennstoffstrahles zu erkennen. Da die Kohle zusätzlich





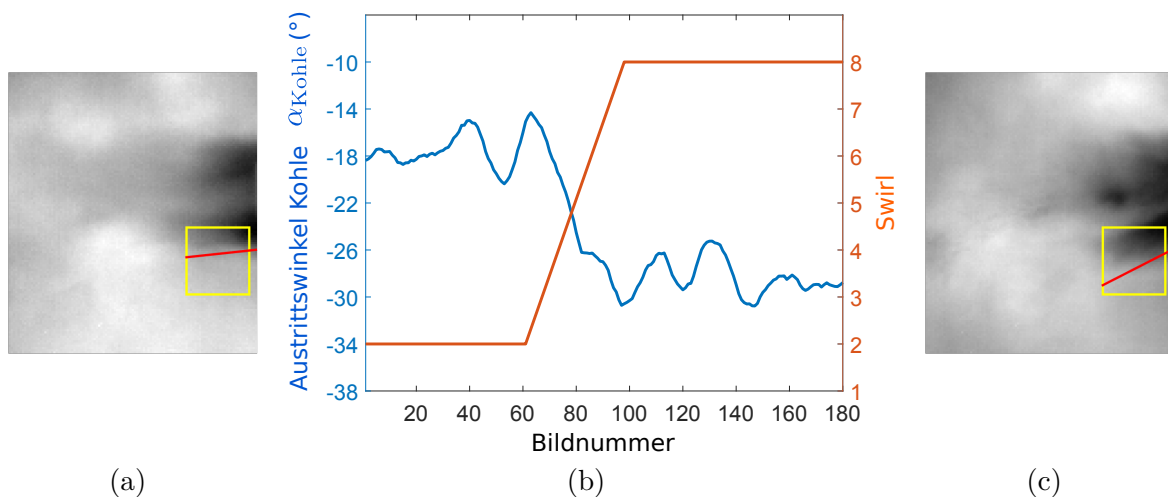
**Abbildung 3.17:** Beispiele für die Ausprägung des Kohlebereiches bei den Brennereinstellungen (a) Swirl 2 und (b) Swirl 8. (c) Definition des Austrittswinkels  $\alpha_{\text{Kohle}}$  des Kohlebereiches.

einen sehr kurzen Verbrennungszeitpunkt aufweist kann für die Bewertung eine kleine Region  $\text{ROI}_{\text{Kohle}}$  nahe dem unteren Bereich der Brennerspitze gewählt werden (gelbe Rechtecke, Abbildung 3.18). In der Region  $\text{ROI}_{\text{Kohle}}$  wird für jeden Bildpunkt die Gradientenrichtung bestimmt und anschließend die mittlere Gradientenrichtung im Bildausschnitt als Austrittswinkel  $\alpha_{\text{Kohle}}$  ausgegeben:

$$\alpha_{\text{Kohle}} = \frac{\sum_{x,y \in \text{ROI}_{\text{Kohle}}} \tan^{-1} \left( \frac{\left( \frac{\partial g}{\partial y} \right)}{\left( \frac{\partial g}{\partial x} \right)} \right)}{M_{\text{Kohle}} \cdot N_{\text{Kohle}}}, \quad (3.20)$$

mit  $M_{\text{Kohle}}$  und  $N_{\text{Kohle}}$  der Höhe und Breite der Region  $\text{ROI}_{\text{Kohle}}$ .

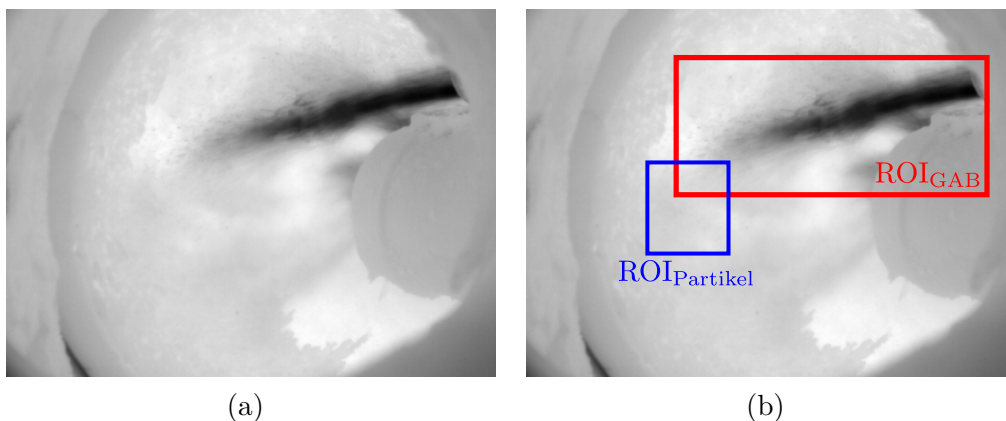
Abbildung 3.18 zeigt das Ergebnis der Detektion des Kohleaustrittswinkels  $\alpha_{\text{Kohle}}$  für eine Bildsequenz, in der der Swirl von 2 auf 8 erhöht wurde. Da die Einstellung des Swirls manuell durchgeführt wird, entsteht ein rampenförmiger Übergangsbereich. Die Erhöhung führt zu einer stärkeren Auslenkung des Kohlebereiches nach unten und deshalb zu einem betragsmäßig erhöhtem Austrittswinkel.



**Abbildung 3.18:** Einzelauswertung des Kohleaustrittswinkels  $\alpha_{\text{Kohle}}$  für Brennereinstellung (a) Swirl 2 und (c) Swirl 8. (b) Verlauf des Kohleaustrittswinkels  $\alpha_{\text{Kohle}}$  für eine Bildsequenz in der die Brennereinstellung Swirl von 2 auf 8 rampenförmig erhöht wurde.

### 3.6.2 Anwendung der neuen Verfahren bei anderer Bauform des Mehrstoffbrenners

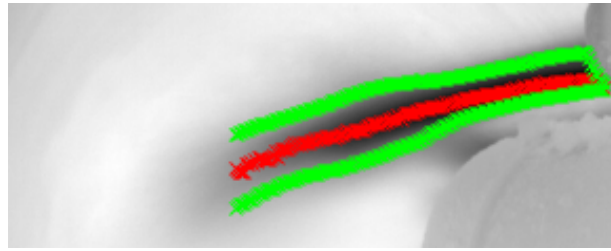
Anlagen, an denen der Umstieg auf Mehrstoffbrenner der neuen Bauform (Abschnitt 1.2.2) noch nicht durchgeführt wurde, bringen alternativen Brennstoff meist über einen separaten Brennstoffkanal ein, der oberhalb eines Kohlebrenners angebracht ist. Die Überwachung mittels einer MIR-Kamera kann auch für diese Bauform neue Informationen über den Verbrennungsprozess des alternativen Brennstoffes liefern. Abbildung 3.19(a) zeigt ein Beispiel für das in diesen Fällen auftretende MIR-Kamerabild.



**Abbildung 3.19:** (a) MIR-Kamerabild eines Mehrstoffbrenners mit separater Zuleitung für alternativen Brennstoff. (b) Auswahl interessanter Bildbereiche zur Auswertung des alternativen Brennstoffes.

Auf Grund der separaten Einbringung des alternativen Brennstoffes tritt dieser nahezu über die komplette Flugbahn als gebündelter Brennstoffstrahl in Erscheinung. Erst sehr weit im hinteren Bereich des Drehrohres fächert der Strahl auf und einzelne Brennstoffpartikel sind zu beobachten. Zur Auswertung des alternativen Brennstoffes für Brenner dieser Bauform werden die MIR-Kamerabilder deshalb in den Bereich  $ROI_{GAB}$  und  $ROI_{Partikel}$  aufgeteilt (Abbildung 3.19(b)). Zur Beurteilung der Flugbahn kann im Gegensatz zu den neueren Mehrstoffbrennerbauformen alleine das neue Verfahren zur Detektion des GAB (Abschnitt 3.3.1), angewandt auf den Bereich  $ROI_{GAB}$ , verwendet werden. Die Ausgabe der mittleren Streichlinie auf Basis des GAB-Verfahrens und die Fläche des alternativen Brennstoffes, die über die Summe der Breiten  $w(x)$  der spaltenweisen Minima aus der GAB gegeben ist, liefert wichtige Informationen über den Verbrennungsprozess. Ein Beispiel für die Bewertung des GAB für Mehrstoffbrenner mit einer separaten Zuleitung für alternativen Brennstoff ist in Abbildung 3.20 gegeben.

Für den Bereich  $ROI_{Partikel}$  können mit Hilfe des Partikeldetektionsverfahrens aus Abschnitt 3.3.2 die in das Klinkerbett herabfallenden unverbrannten Brennstoffpartikel gezählt



**Abbildung 3.20:** Bewertung des GAB für Mehrstoffbrenner mit einer separaten Zuleitung für alternativen Brennstoff. Detektierte spaltenweise Minima (rot) und deren Breite (grün) aus dem GAB-Verfahren.

werden. Dazu wird die Anzahl der Partikel  $K(n)$  aus der Trefferliste  $p(n)$  aus Gleichung (3.11) für die letzten  $n_0$  Bilder aufsummiert:

$$K_{\text{sum}}(n) = \sum_{i=n-n_0}^n K(i). \quad (3.21)$$

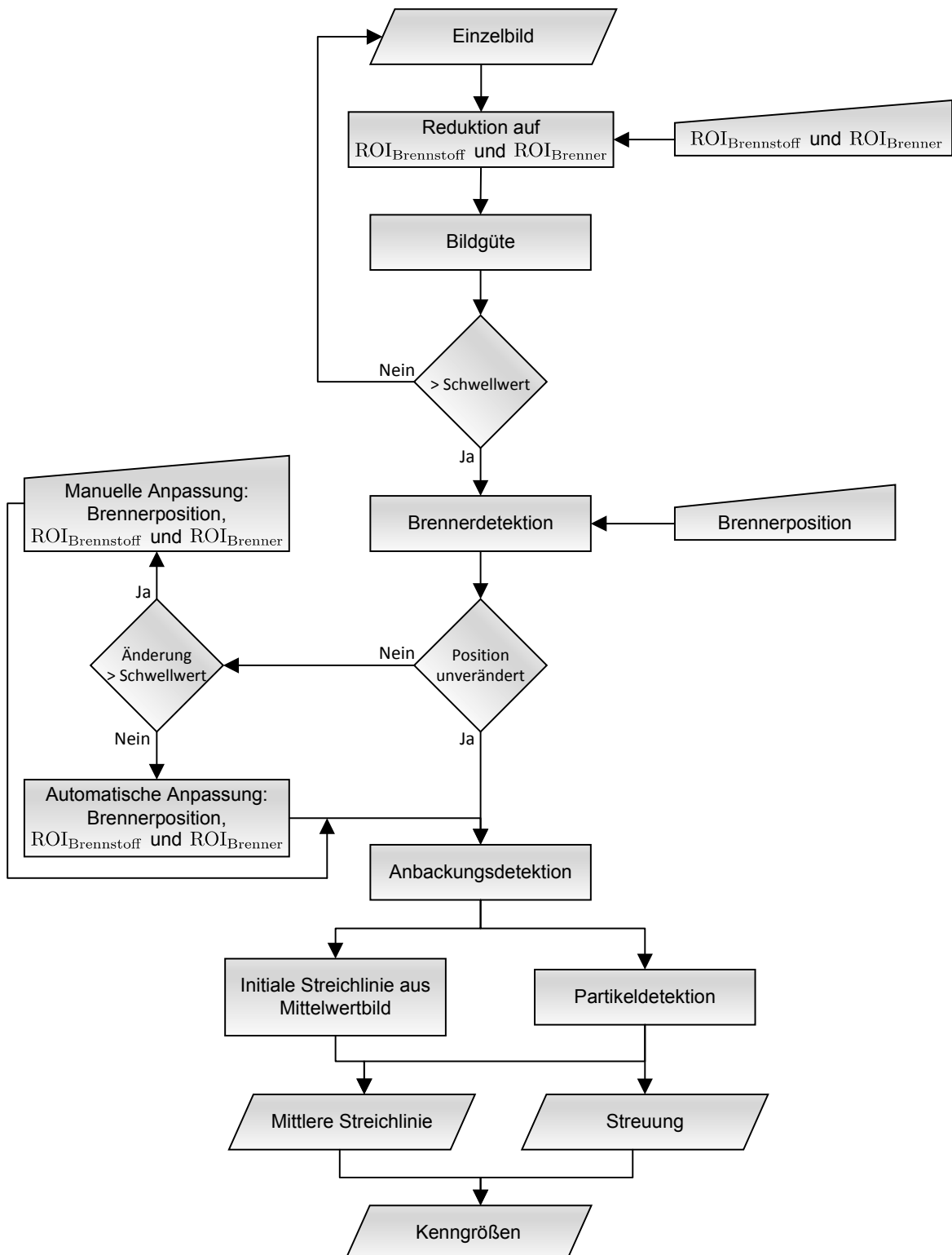
Die aus der mittleren Streichlinie gewonnenen Kenngrößen und die Anzahl herabfallender Partikel ermöglichen damit eine neuartige Bewertung der Verbrennung des alternativen Brennstoffes. Gerade das teilweise gewünschte Einbringen bestimmter Anteile an alternativen Brennstoffen in das Klinkerbett kann mit Hilfe des Auftreffpunktes von unverbranntem Brennstoff mit dem Klinkerbett und der Anzahl der Partikel sehr gut überwacht werden.

### 3.7 Zusammenfassung der Ergebnisse der neuen Bildverarbeitungsverfahren

Die in Kapitel 3 vorgestellten Verfahren ermöglichen es, die mittlere Streichlinie des alternativen Brennstoffes in Echtzeit zu ermitteln. Abgeleitete Kenngrößen, wie die Wurfweite oder die Streuung, erlauben es außerdem, quantitative Aussagen über den aktuellen Verbrennungszustand des alternativen Brennstoffes zu treffen. Durch Beachtung der verschiedenen Herausforderungen bei industriellen Prozessbedingungen ist die Auswertung robust auch unter schwankenden Prozess- und Sichtbedingungen möglich.

Abbildung 3.21 zeigt zusammenfassend das aus den vorgestellten neuen Verfahren resultierende Ablaufdiagramm zur Detektion der mittleren Streichlinie und den kamerabasierten Kenngrößen, das nachfolgend als Streichliniendetektion bezeichnet wird.

Im Folgenden wird die Anwendbarkeit der neuen Verfahren auf unterschiedliche Datensätze evaluiert. Außerdem wird gezeigt, welche Zusammenhänge zwischen den detektierten Kenngrößen und der Qualität des produzierten Zementklinkers bestehen.



**Abbildung 3.21:** Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Überwachung von alternativen Brennstoffen eines Mehrstoffbrenners.

## 4 Evaluation der neuen Bildverarbeitungsverfahren

In Kapitel 3 wurden die neuen Verfahren zur Streichliniendetektion und Kenngrößenextraktion vorgestellt. Nachfolgend gilt es, die Anwendbarkeit und Ergebnisse der neuen Verfahren zu bewerten. Ein wichtiges Bewertungskriterium stellt die Robustheit der Verfahren bei unterschiedlichen Prozessbedingungen dar. Es wird erwartet, dass die Streichliniendetektion trotz schwankender Sichtbedingungen oder unterschiedlicher Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes konstant zuverlässige Ergebnisse liefert. Um dies beurteilen zu können, werden Referenzdaten benötigt, die für verschiedene Prozessbedingungen die realen Streichlinien enthalten. Solche Referenzdaten existieren allerdings nicht, da durch die an Anlagen vorhandene Sensorik eine Detektion der Streichlinie nicht möglich ist. Für eine Bewertung der Verfahren muss daher zunächst ein Referenzdatensatz erzeugt werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden zwei neue Ansätze zur Referenzdatenerzeugung verfolgt. Ein Vergleich zur menschlichen Wahrnehmung wird ermöglicht, indem über ein neu entwickeltes Software-Tool Experten verschiedene MIR-Bildsequenzen eines Mehrstoffbrenners vorgeführt werden. Die Experten werten die Bildsequenzen manuell aus und bestimmen damit eine Streichlinie für jede Sequenz als Referenz. Durch das Heranziehen mehrerer Experten wird dadurch ein belastbarer neuer Referenzdatensatz für die Streichliniendetektion auf Basis der menschlichen Wahrnehmung erhalten. Die Vorstellung des Referenzdatensatzes und die Evaluation der Verfahren anhand des Datensatzes beinhaltet Abschnitt 4.1.

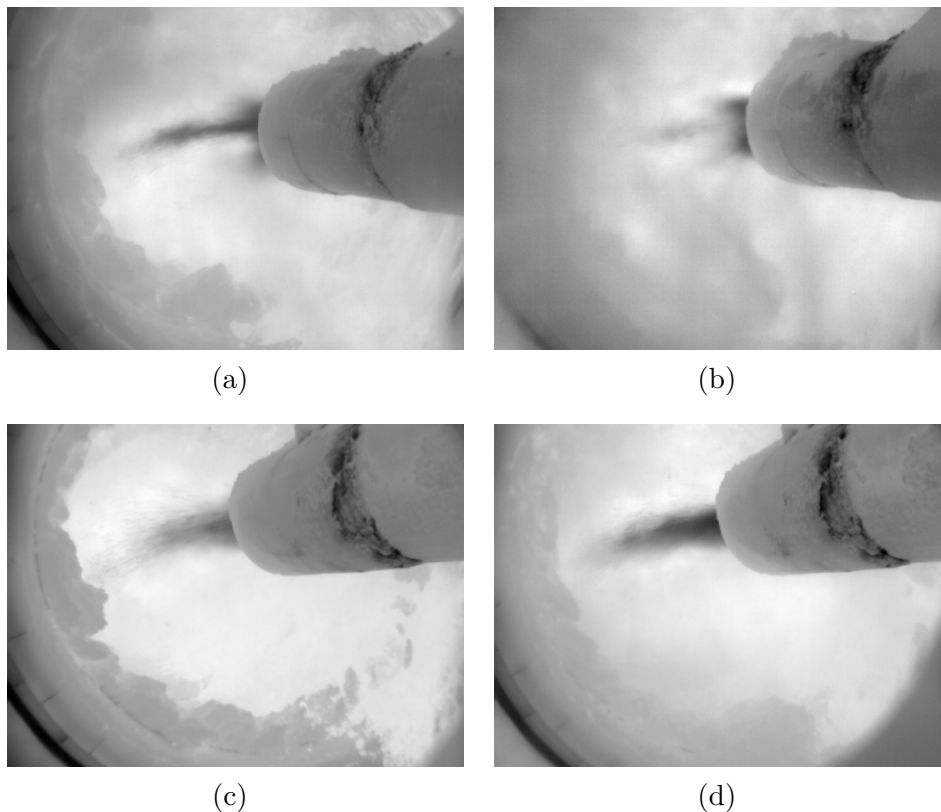
Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung eines Referenzdatensatzes bietet die Verwendung eines Simulationsmodells, das entsprechende Bilder eines Mehrstoffbrenners unter fest definierten und damit bekannten Randbedingungen liefert. Ein solches neu entwickeltes Simulationsmodell wird in Abschnitt 4.2 vorgestellt und die Evaluation der Bildverarbeitungsverfahren mittels der Simulationsdaten betrachtet. Abschnitt 4.3 fasst die Ergebnisse der Evaluation der Streichliniendetektion anhand der neu erstellten Referenzdatensätze zusammen. Abschließend ist die Bewertung der Vorverarbeitungsschritte der Anbackungs- und Brennerdetektion Bestandteil von Abschnitt 4.4.

### 4.1 Erstellung eines Referenzdatensatzes mittels Referenzaufnahmen und Expertenwissen

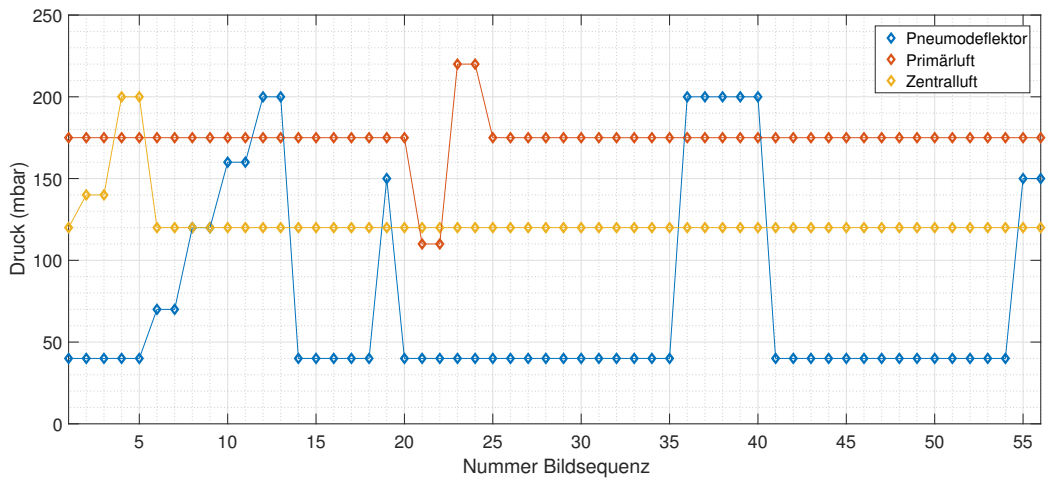
Um einen Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung und dadurch eine Bewertung der Robustheit der neuen Verfahren durchführen zu können, werden Sequenzen mit unter-

schiedlichen Brennereinstellungen und Sichtbedingungen durch Experten ausgewertet. Zur Evaluation der Streichliniendetektion wird die Abweichung der Streichlinie aus den neuen Verfahren zur Expertenauswertung bestimmt. Die Abweichung wird hierbei definiert als die Fläche zwischen beiden Kurven.

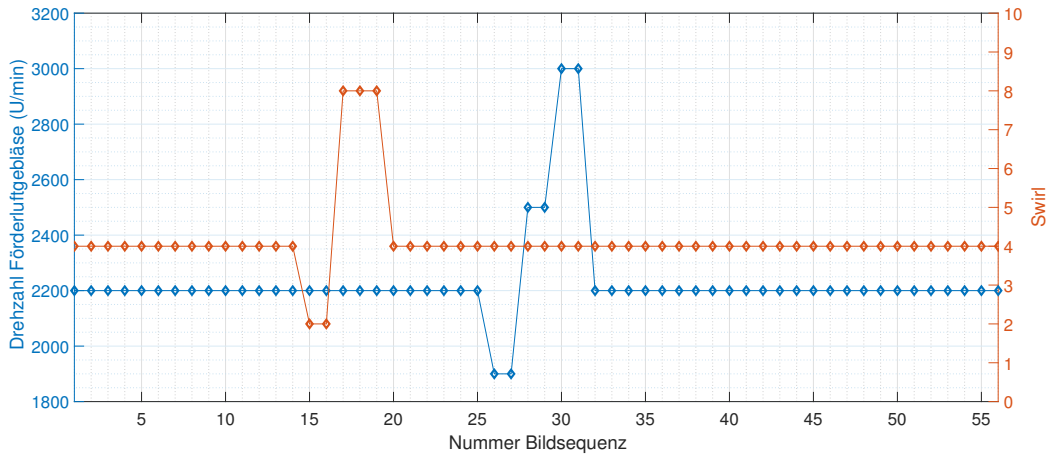
Grundlage für die Erzeugung eines belastbaren Referenzdatensatzes sind MIR-Kamera-sequenzen, die ein möglichst breites Spektrum an Brennereinstellungen und Sichtbedingungen enthalten. Um diese Anforderung zu erfüllen, konnten im Rahmen der vorliegenden Arbeit zwei Messkampagnen an einer Zementdrehrohranlage durchgeführt werden. In der ersten Messkampagne (MK1) wurden über zwei Tage in insgesamt 67 Sequenzen (510 000 Einzelbildern) alle verfügbaren Brennereinstellungen variiert. Da die Auswertung aller Sequenzen für einen Experten zu zeitaufwendig ist, wurden aus dem Datensatz 56 Sequenzen mit jeweils 100 Einzelbildern ausgewählt. In der zweiten Messkampagne (MK2) wurden in einem Langzeitversuch über zwölf Tage unter nahezu konstanten Brennereinstellungen 1727 Sequenzen mit jeweils 3000 Einzelbildern aufgenommen. Zur Reduktion der Datenmenge für den Experten wurden 20 Sequenzen mit jeweils 500 Einzelbildern mit verschiedene Erscheinungsformen des Brennstoffes zur Referenzdatenerzeugung ausgewählt. Beispielbilder und der Verlauf der Brennereinstellungen für beide Messkampagnen sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 gegeben.



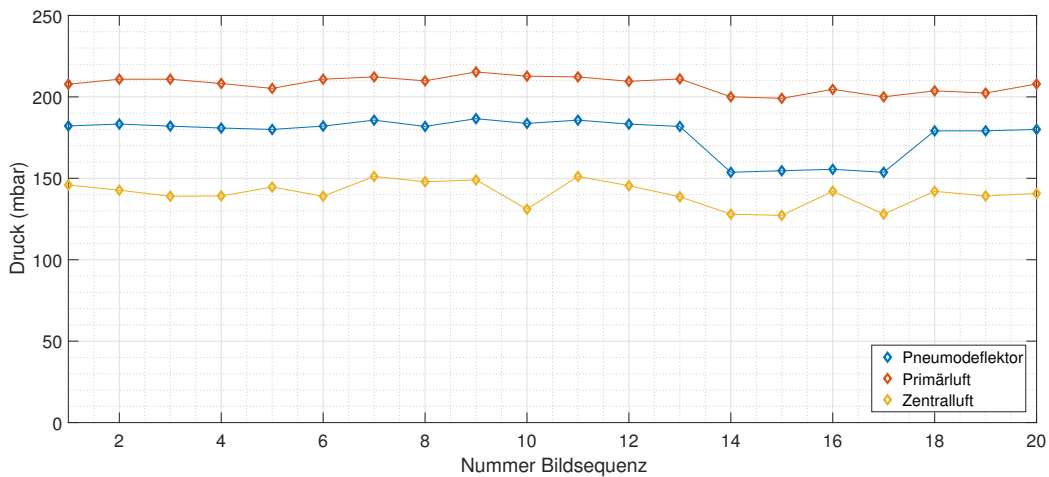
**Abbildung 4.1:** Beispielbilder aus MK1 und MK2 für die Referenzdatenerstellung. MK1 mit (a) guter und (b) schlechter Sicht. MK2 mit (c) streuendem und (d) gebündeltem Erscheinungsbild des alternativen Brennstoffes.



(a)



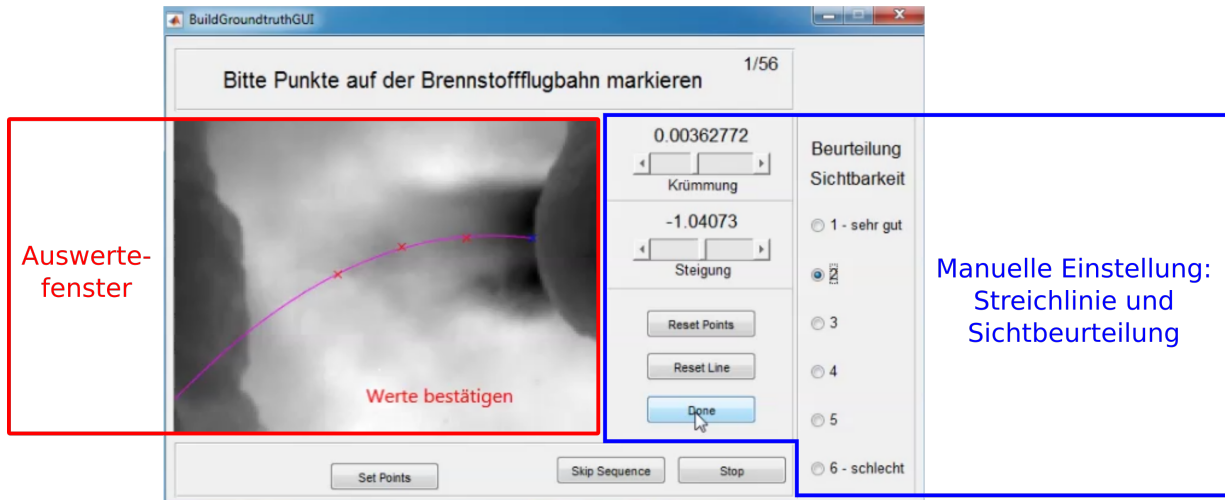
(b)



(c)

**Abbildung 4.2:** Brenneinstellungen für (a)+(b) MK1 und (c) MK2. In MK2 wurde sowohl die Drehzahl des Förderluftgebläses (2113 U/min), als auch die Swirl-Einstellung (2.5) für alle Sequenzen konstant gehalten.

Um die Auswertung der ausgewählten Bildsequenzen für den Experten möglichst komfortabel zu gestalten und gleiche Voraussetzungen für alle Experten zu gewährleisten, wurde ein neues Software-Tool entwickelt (Abbildung 4.3).



**Abbildung 4.3:** Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des Tools zur Referenzdatenerstellung.

Die Experten bestimmen hierbei per Mausclick verschiedene Punkte im Bild an denen sie alternativen Brennstoff erkennen. Nach Bestätigung der Punkte wird auf dieser Basis mittels LS-Verfahren automatisch eine mittlere Streichlinie  $s(x)$  mit den Parametern  $(\theta_1, \theta_2)$  analog zu Abschnitt 3.4 berechnet und angezeigt. Anschließend können Feinjustierungen an der Krümmung  $\theta_2$  und Steigung der Kurve  $\theta_1$  durchgeführt werden, bis das für den Experten optisch beste Ergebnis für die Sequenz erreicht ist. Neben der Streichlinie bewertet der Experte auch die Sichtbarkeit des alternativen Brennstoffes in den einzelnen Sequenzen anhand von Schulnoten von 1 (sehr gut) bis 6 (schlecht). Als Ergebnis der Auswertung werden letztendlich für jede Sequenz die Parameter der mittleren Streichlinie  $(\theta_1, \theta_2)$  und die Sichtbeurteilung als Referenzdaten abgespeichert. Eine genauere Beschreibung des Ablaufes der Expertenauswertung zur Referenzdatenbestimmung ist in Anhang A.2 gegeben.

Insgesamt wurde die Auswertung mittels des Software-Tools für MK1 von acht und für MK2 von vier verschiedenen Experten aus der Zementindustrie und der Bildverarbeitung von Hochtemperaturprozessen durchgeführt. Die daraus erhaltenen Streichlinien und Sichtbeurteilungen bilden den Referenzdatensatz zur Bewertung der Streichliniendetektion anhand der menschlichen Wahrnehmung.

#### 4.1.1 Analyse des Referenzdatensatzes

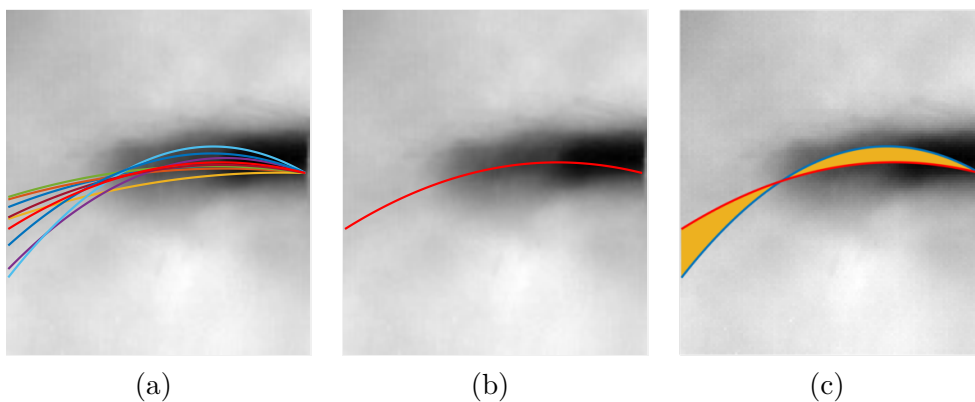
Zur Bestimmung der Abweichung zwischen Streichliniendetektion und Expertenauswertung werden die aus dem Software-Tool erhaltenen Referenzdaten weiter verarbeitet. Aus den für jede Sequenz aus MK1 acht und für MK2 vier erhaltenen Streichlinien wird jeweils



die mittlere Streichlinie  $s_{\text{all}}(x)$  als Referenz berechnet. Die Parameter  $(\theta_{1,\text{all}}, \theta_{2,\text{all}})$  von  $s_{\text{all}}(x)$  können auf Grund der Parameterlinearität von Polynomen durch den Mittelwert der Parameter der Streichlinien der Experten  $s_1(x), \dots, s_Z(x)$  bestimmt werden zu

$$\theta_{1,\text{all}} = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z \theta_{1,z}, \quad \theta_{2,\text{all}} = \frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z \theta_{2,z}, \quad (4.1)$$

wobei  $Z$  die Anzahl der Experten beinhaltet, die die betrachtete Einzelsequenz bewertet haben. In Abbildung 4.4 ist ein Beispiel für den Übergang von mehreren Expertendaten auf eine mittlere Streichlinie als Referenz für eine Sequenz dargestellt.



**Abbildung 4.4:** Erstellung von Referenzdaten anhand einer Beispielsequenz. (a) Einzelne Streichlinien der Experten ( $Z = 8$ ). (b) Berechnete mittlere Streichlinie/Referenz aus allen Expertendaten der Sequenz. (c) Berechnung der Abweichung eines Experten zur Referenz als Fläche zwischen beiden Kurven.

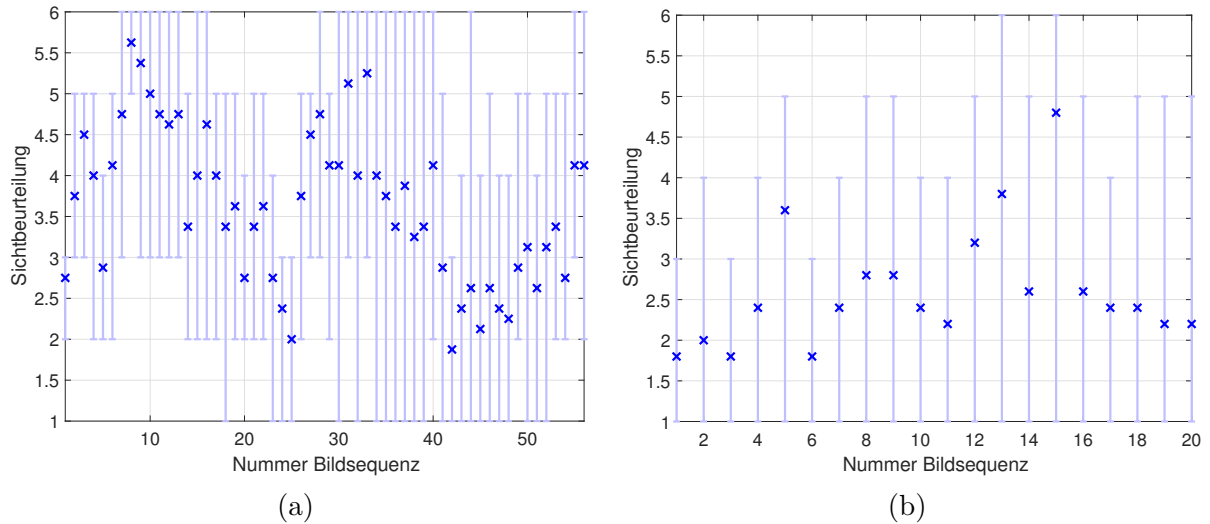
Zur Beurteilung, wie weit die Expertendaten für eine Sequenz auseinander liegen, wird zusätzlich die Abweichung der einzelnen Expertendaten  $s_1(x) \dots s_Z(x)$  zu der berechneten mittleren Streichlinie  $s_{\text{all}}(x)$  betrachtet. Die Abweichung  $dev(z)$  für den Experten  $z$  wird dabei durch die Fläche zwischen der vom Experten definierten Streichlinie  $s_z(x)$  und der mittleren Streichlinie aus allen Expertendaten  $s_{\text{all}}(x)$  bestimmt (Abbildung 4.4(c)):

$$dev(z) = \sum_{x=1}^{b_x} |s_{\text{all}}(x) - s_z(x)|. \quad (4.2)$$

Als Summationsgrenzen werden der linke Rand der  $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$  und der  $x$ -Wert der Brennerspitze  $b_x$  gewählt.

Für die Bewertung der Sichtbarkeit wird als Referenz der Mittelwert über alle Experten  $v_{\text{mean}}^{\text{Exp}}$  für eine Sequenz bestimmt. Abbildung 4.5 zeigt die Sichtbeurteilung für beide Messkampagnen. Insgesamt liegt die durchschnittliche Expertenbeurteilung der Sichtbedingungen von MK2 mit  $\varnothing 2.6$  deutlich besser als bei MK1 mit  $\varnothing 3.6$ . Des Weiteren sind in beiden Messkampagnen Sequenzen vorhanden, in denen die Beurteilung der Experten deutlich auseinander gehen. Sequenzen, wie etwa Sequenznummer 34 bis 39 aus MK1,

erhielten von einem Experten mit einer Bewertung von 1 sowohl die Beste als auch von einem anderen Experten mit 6 die schlechteste Note. Die beiden Experten bewerteten in MK1 die Sicht durchschnittlich mit  $\bar{\varnothing}$  2.3 und  $\bar{\varnothing}$  4.9. Eine direkte Begründung für diese starken Schwankungen kann nicht gegeben werden. Unterschiede können allerdings auf die unterschiedlichen Erfahrungen im Bereich industrieller Verbrennungsprozesse und speziell in der vorliegenden Aufgabenstellung innerhalb der Experten zurückgeführt werden.



**Abbildung 4.5:** Bewertung der Sichtbarkeit des alternativen Brennstoffes für (a) MK1 und (b) MK2 durch Experten. Kreuze entsprechen der durchschnittlichen Expertenbewertung. Vertikale Linien werden durch die beste und schlechteste Bewertung eines Experten für diese Sequenz begrenzt.

### 4.1.2 Evaluation der Bildverarbeitungsverfahren mittels erstelltem Referenzdatensatz

Nach Aufbereitung der Referenzdaten aus der Expertenauswertung können die neu entwickelten Verfahren aus Kapitel 3 evaluiert werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Bildgütebewertung und der Streichliniendetektion für die MIR-Kamerasequenzen der Referenzdaten mit der Expertenauswertung verglichen und bewertet.

#### Evaluation der Bildgütebewertung

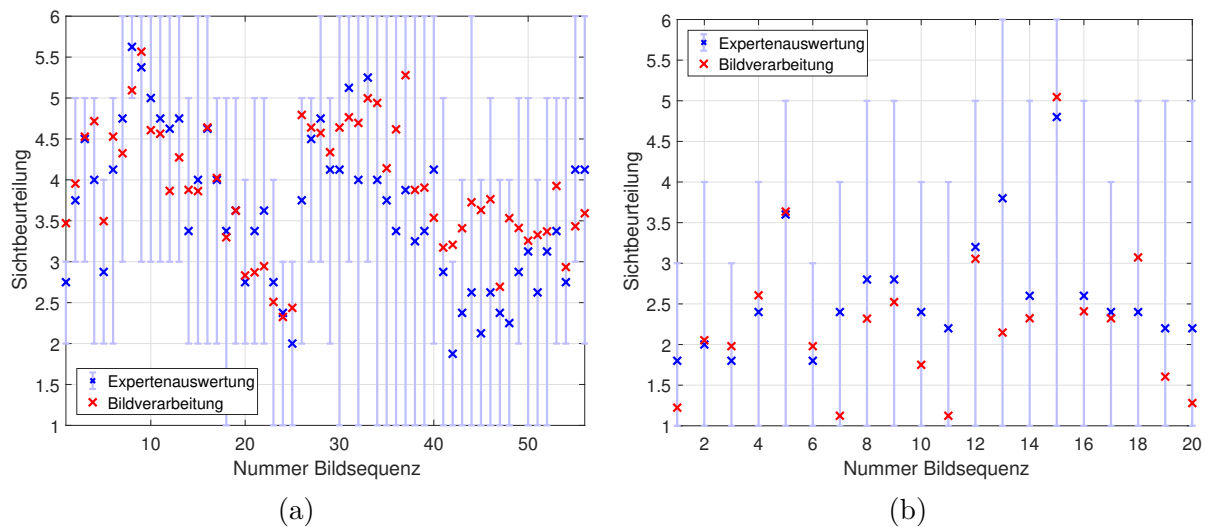
Nach Gleichung (3.2) wird die Bildgüte  $v^{\text{Image}}$  der Sequenzen bestimmt. Die Bildgütebewertung liefert große Werte für gute und kleine Werte für schlechte Sichtbedingungen. Um eine Vergleichbarkeit zur Sichtbeurteilung der Referenzdaten zu schaffen, wird der über die komplette Sequenz gemittelte Kehrwert der Bildgüte

$$v_{\text{mean}}^{\text{Image}} = \frac{1}{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I v^{\text{Image}}(i)} \quad (4.3)$$

betrachtet, mit  $I$  der Anzahl der Einzelbilder der Sequenz. Zusätzlich kann der Kehrwert für eine bessere Darstellung durch die Multiplikation mit einem für alle Sequenzen konstanten Faktor  $\gamma$  innerhalb des Wertebereiches von Schulnoten gelegt werden. Eine Skalierung von  $v_{\text{mean}}^{\text{Image}}$  auf den kompletten Bereich von 1 bis 6 ist nicht zielführend, da die unteren und oberen Grenzen von  $v_{\text{mean}}^{\text{Image}}$  nicht bekannt sind bzw. heuristisch bestimmt werden müssten. Damit ergibt sich für den Vergleichswert  $v_{\text{ev}}^{\text{Image}}$  der automatischen Bildgütebewertung für eine Sequenz:

$$v_{\text{ev}}^{\text{Image}} = \gamma \cdot v_{\text{mean}}^{\text{Image}}. \quad (4.4)$$

Abbildung 4.6 zeigt den Vergleich zu den Referenzdaten für beide Messkampagnen.

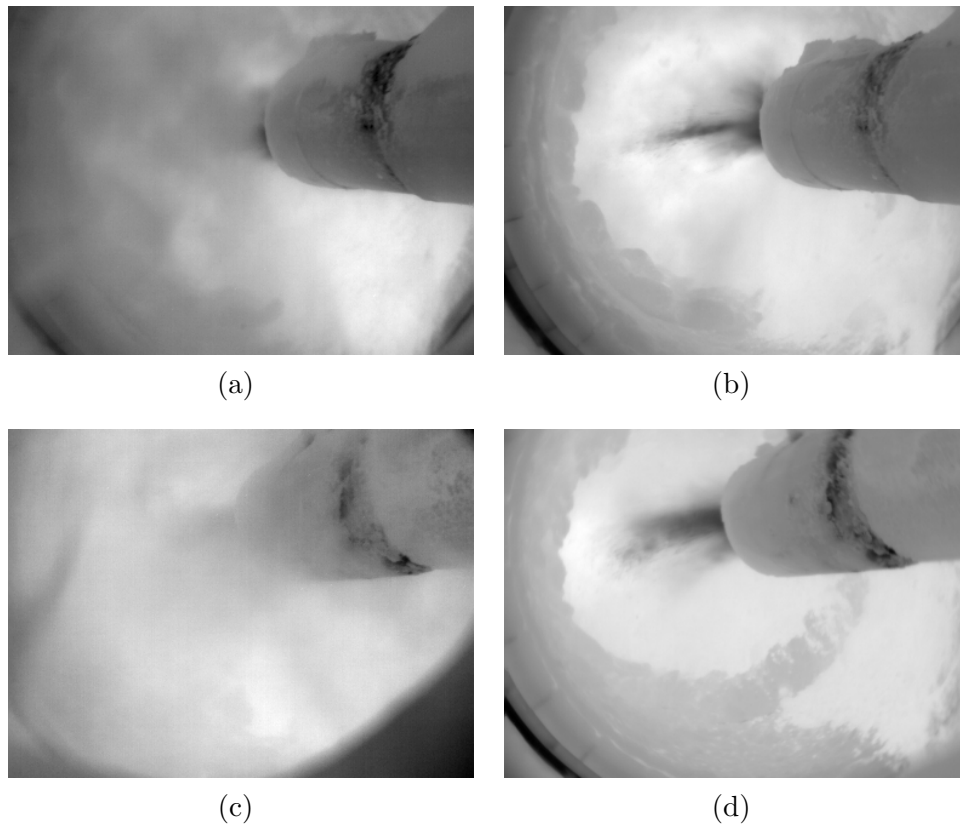


**Abbildung 4.6:** Vergleich der Sichtbeurteilung der Expertenauswertung (blau) und der automatischen Bildverarbeitung (rot) für (a) MK1 und (b) MK2.

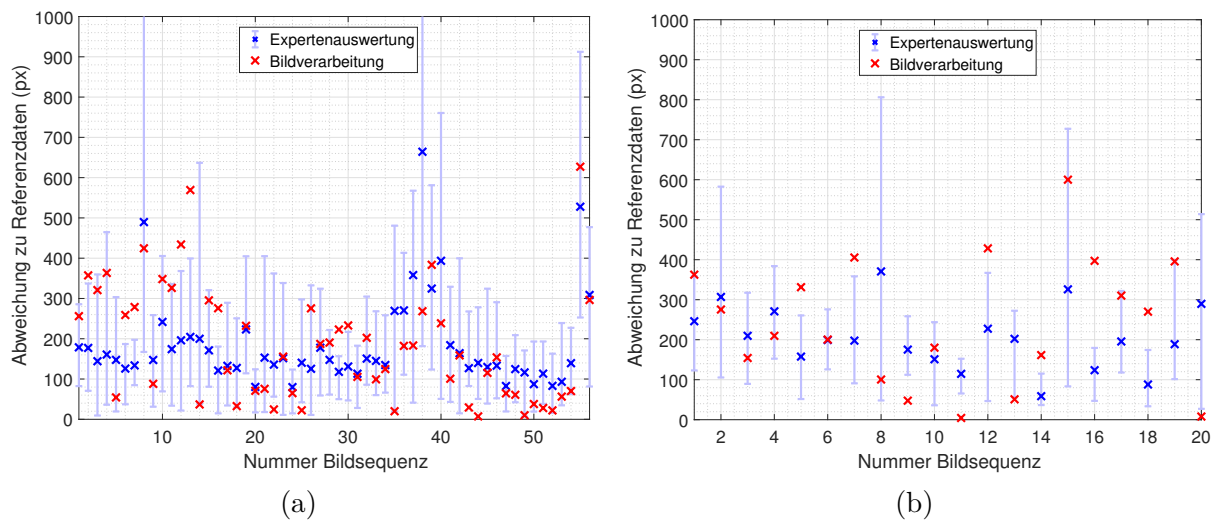
Über alle Sequenzen aus MK1 und MK2 liegt die maschinelle Bildgütebewertung innerhalb der Expertenauswertungen. Der Vergleich mit der durchschnittlichen Expertenauswertung  $v_{\text{mean}}^{\text{Exp}}$  zeigt außerdem eine hohe Korrelation (MK1: 0.77, MK2: 0.79) zwischen menschlicher Wahrnehmung der Bildsequenz und maschineller Beurteilung der Bildinformation über die Kantendichte im Bild. Die Bildgütebewertung über Gleichung (3.2) kann damit als entscheidender Parameter zur automatischen Vorauswahl der Kamerabilder verwendet werden. Ausgewählte Sequenzen mit schlechter und gut bewerteter Sicht aus beiden Messkampagnen sind in Abbildung 4.7 gegenübergestellt.

### Evaluation der Streichliniendetektion

Zur Bewertung der Streichliniendetektion wird gemäß Gleichung (4.2) die Fläche zwischen der mittleren Streichlinie aus allen Expertendaten  $s_{\text{all}}(x)$  und der automatisch detektierten Streichlinie  $s(x)$  berechnet. Abbildung 4.8 zeigt das Ergebnis der Evaluation für MK1 und MK2 mit Hilfe der erzeugten Referenzdaten.



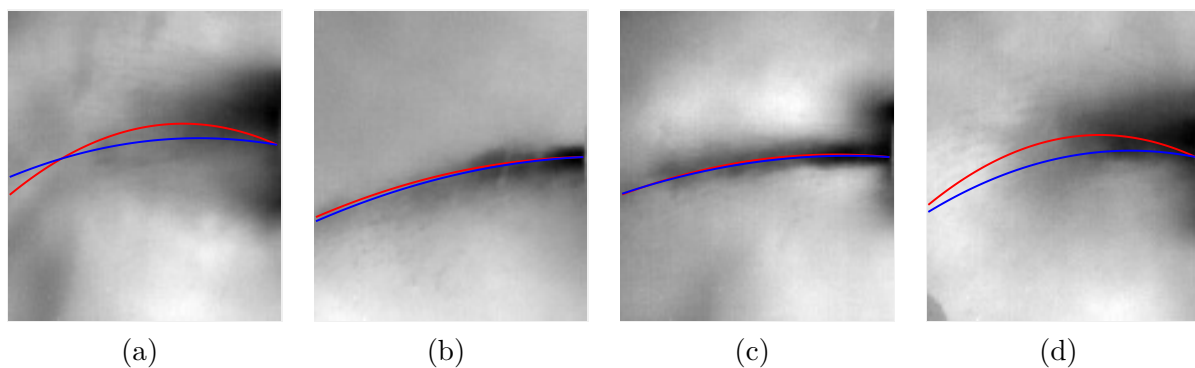
**Abbildung 4.7:** Beispielbilder für die Sichtbeurteilung. Aus MK1 (a) Bildsequenz Nummer 9 mit einer Note von  $\varnothing 5.4$  bzw.  $v_{ev}^{Image} = 5.6$  und (b) Bildsequenz Nummer 24 mit einer Note von  $\varnothing 2.4$  bzw.  $v_{ev}^{Image} = 2.4$ . Aus MK2 (c) Bildsequenz Nummer 15 mit einer Note von  $\varnothing 4.8$  bzw.  $v_{ev}^{Image} = 5$  und (d) Bildsequenz Nummer 1 mit einer Note von  $\varnothing 1.8$  bzw.  $v_{ev}^{Image} = 1.2$ .



**Abbildung 4.8:** Vergleich der Abweichung zu den Referenzdaten innerhalb der Expertenbewertung (blau) und der Streichliniendetektion (rot) für (a) MK1 und (b) MK2.

Als Vergleich dient für eine Sequenz die mittlere Abweichung über alle Experten  $\frac{1}{Z} \sum_{z=1}^Z dev(z)$  (blaue Kreuze, Abbildung 4.8) und ein Intervall (blau, Abbildung 4.8), das durch den Experten mit der größten Abweichung  $\max_z(dev(z))$  und dem Experten mit der geringsten Abweichung  $\min_z(dev(z))$  zu den Referenzdaten begrenzt wird. Die Abweichung der Streichliniendetektion zu  $s_{all}(x)$  ist in Abbildung 4.8 durch rote Kreuze markiert.

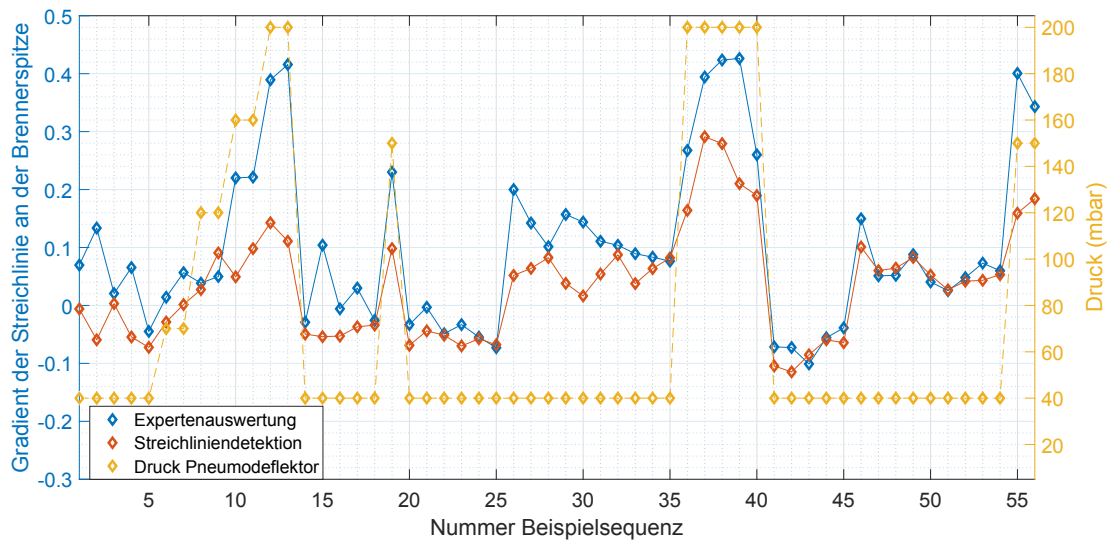
Für MK1 (Abbildung 4.8(a)) zeigt sich, dass für insgesamt 48 von 56 Sequenzen die Abweichung der Streichliniendetektion nicht größer ist als innerhalb der Expertenauswertung (rotes Kreuz liegt innerhalb bzw. unterhalb blauem Intervall). In einigen Fällen ist die Streichliniendetektion sogar besser als die beste Einzelexpertenauswertung. Es ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung bei der Streichliniendetektion für eine Sequenz von ca. 193 Pixeln. Bei einer Breite der  $ROI_{Brennstoff}$  von 110 Bildspalten entspricht dies einer durchschnittlichen Abweichung von 1.75 Pixel in einer Bildspalte. In Anbetracht der zuvor festgestellten schlechten Sicht- und Umgebungsbedingungen in MK1 wird damit mit dem neuen Verfahren der Streichliniendetektion eine hohe Genauigkeit im Vergleich zur menschlichen Wahrnehmung erreicht. Abbildung 4.9 zeigt einige Beispiele für einen visuellen Vergleich mit den Referenzdaten für MK1.



**Abbildung 4.9:** Beispiele für den Vergleich der Referenzdaten (blau) mit der Streichliniendetektion aus MK1 (rot).

Neben der absoluten Abweichung zwischen den Streichlinien, können auch die aus den Streichlinien gewonnenen Kenngrößen für einen Vergleich herangezogen werden. Dabei gilt es zu beachten, dass die Sequenzen aus MK1 zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit teilweise verschiedenen Aufnahmekonstellationen gewonnen wurden. Da bei der Wurfweite eine manuelle Anpassung an die Aufnahmekonstellation nötig wäre, nämlich die Anpassung der Geraden entlang des unteren Drehrohrbodens (Abschnitt 3.5), wird für den Vergleich die Steigung an der Brennerspitze herangezogen. Zur Bestimmung der Steigung wird lediglich der Austrittspunkt des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze angepasst, was automatisch mit Hilfe der Brennerdetektion (Abschnitt 3.2.2) erfolgt. Abbildung 4.10 zeigt den Verlauf der Kenngröße aus der Streichliniendetektion und den Referenzdaten im Vergleich zur BrennerEinstellung des Pneumodeflektors der jeweiligen Sequenz.

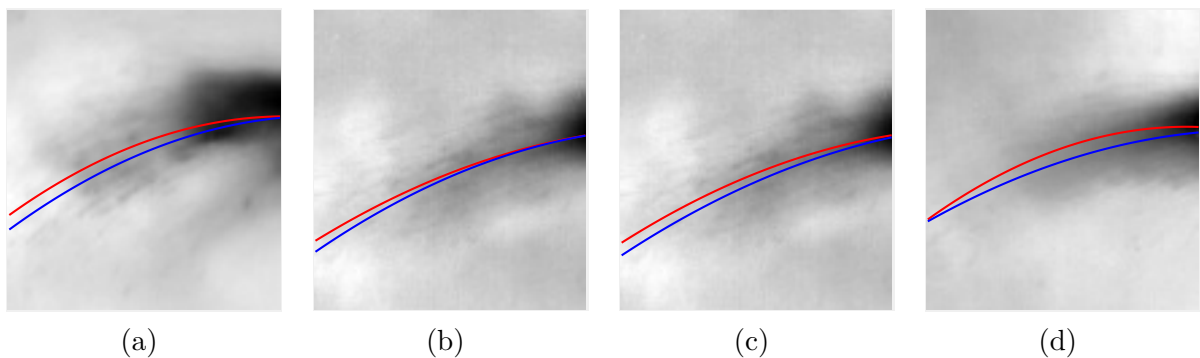
Daraus lassen sich zwei Ergebnisse folgern: Zum einen ist der Verlauf beider Kenngrößen sehr ähnlich und zum anderen entsprechen diese der Erwartung, dass eine Erhöhung des



**Abbildung 4.10:** Vergleich des Gradienten der Streichlinie an der Brennerspitze für Expertenauswertung (blau) und Streichliniendetektion (rot) mit der Brennereinstellung Druck Pneumodeflektor (gelb) für die Sequenzen aus MK1.

Pneumodeflektors einen steileren Abschluss des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze zur Folge hat. Sprünge im Verlauf, die nicht auf eine Änderung des Pneumodeflektors zurückzuführen sind, hängen mit anderen Brennereinstellungen (Abbildung 4.2) oder auch mit Änderungen in der Aufnahmekonstellation zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Streichlinie und die daraus abgeleiteten Kenngrößen wichtige Informationen über das Flug- und damit Verbrennungsverhalten des alternativen Brennstoffes liefern.

Diese Ergebnisse können durch die Auswertung von MK2 (Abbildung 4.8(b)) bestätigt werden. Die Abweichung der automatischen Bildauswertung ist insgesamt für 14 von 20 Sequenzen nicht größer als innerhalb der Expertenauswertung. Auch hier ist in einigen Sequenzen die Streichliniendetektion sogar besser als die beste Einzelexpertenauswertung. Die durchschnittliche Abweichung für eine Sequenz liegt bei ca. 245 Pixeln, das bei einer Breite der  $ROI_{\text{Brennstoff}}$  von 115 Bildspalten einer durchschnittlichen Abweichung von 2.13 Pixel in einer Bildspalte entspricht. Beispiele aus MK2 zum visuellen Vergleich sind in Abbildung 4.11 gegeben.



**Abbildung 4.11:** Beispiele für den Vergleich der Referenzdaten (blau) mit der Streichliniendetektion aus MK2 (rot).

Auf Grund der guten Sicht, der konstanten Brenneinstellungen und dem unterschiedlichen Erscheinungsbild des alternativen Brennstoffes (Partikel, gebündelt) in MK2, kann anhand dieser Daten auch eine Evaluation der einzelnen Verfahren (GAB, Partikeldetektion) im Vergleich zum einzig existierenden Referenzverfahren [108] und der Expertenauswertung durchgeführt werden. Das Referenzverfahren verwendet dabei eine spaltenweise Minimumsuche auf einem zeitlichen Minimumbild. Tabelle 4.1 beinhaltet die Gesamtabweichung der mittleren Streichlinie über alle Sequenzen aus MK2 basierend auf den einzelnen und kombinierten Brennstoffdetektionsverfahren aus Kapitel 3 und dem Referenzverfahren im Vergleich zur Expertenauswertung.

**Tabelle 4.1:** Vergleich der einzelnen Verfahren (GAB und Partikeldetektion) und die Kombination mittels MAP mit dem Referenzverfahren [108] und der Expertenauswertung über alle Sequenzen von MK2. Die Gesamtabweichung ist gegeben durch die Summe der Abweichungen zu den Referenzdaten über alle Einzelsequenzen.

Verfahren		Gesamtabweichung (px)
GAB		5488
Partikeldetektion		9932
MAP		4893
Referenzverfahren		8516
Expertenauswertung	Mittelwert	4100
	Maximum	7069

Es zeigt sich, dass das GAB-Verfahren alleine schon deutlich bessere Ergebnisse liefert als das Referenzverfahren. Eine mittlere Streichlinie, die rein auf der Partikeldetektion basiert, führt im Gegensatz dazu zu schlechteren Ergebnissen. Wird die Partikeldetektion allerdings über das MAP-Verfahren als Korrektur verwendet, lässt sich die Gesamtabweichung noch weiter reduzieren. Sie liegt nahe der mittleren Abweichung der Expertenauswertung und weit unterhalb der maximalen Abweichung.

Das in der vorliegenden Arbeit vorgestellte neue MAP-Verfahren, als Basis zur Bestimmung der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes, stellt damit das Verfahren mit der geringsten Abweichung zur menschlichen Wahrnehmung dar. Insgesamt zeigt die Evaluation der neuen Verfahren mit Hilfe des neu erstellten Referenzdatensatzes, dass die automatische Bildauswertung wichtige Informationen über den Verbrennungsprozess liefert, die durch die menschliche Wahrnehmung bestätigt werden können.

## 4.2 3D-Simulation des Mehrstoffbrenners und der Brennstoffflugbahnen

Bei der Erstellung von Referenzdaten aus bestehenden Bilddaten mittels Expertenauswertung sind die erhaltenen mittleren Streichlinien lediglich Schätzungen der realen Streichlinie.



Eine Möglichkeit Referenzdaten zu erhalten, bei denen die echte mittlere Streichlinie bekannt ist, ist die Entwicklung eines Simulationsmodells des Mehrstoffbrenners in einer Drehrohrumgebung. Solch ein neues Simulationsmodell, bei dem definierte Streichlinien des alternativen Brennstoffes eingestellt werden können, wird im folgenden Abschnitt vorgestellt und zur Evaluation der Streichliniendetektion verwendet.

### 4.2.1 Simulationsmodell in Blender

Zur Erstellung des Simulationsmodells wurde die Entwicklungsumgebung BLENDER [115] genutzt. BLENDER bietet als 3D-Animationsprogramm den Vorteil, dass realitätsnahe Bildsequenzen einer selbst erstellten und physikalisch korrekten Szene aufgenommen werden können. Integrierte Module erlauben das einfache Hinzufügen von für die vorliegenden Aufgabenstellung wichtigen Elementen wie Rauch oder Partikelsystemen zur Szene. Zusätzlich können neben der grafischen Bearbeitung in der Entwicklungsumgebung alle Programminhalte über ein PYTHON Skript erstellt und verwendet werden. Abbildung 4.12(a) und 4.12(b) zeigen zwei Beispielbilder der Simulation. Das Simulationsmodell enthält ein Drehrohr mit zufällig generierten Anbackungen an der Drehrohrinnenwand. Außerdem einen Mehrstoffbrenner mit einem Kohlering und einem alternativen Brennstoffkanal im Zentrum des Brenners. Der Ursprung der 3D Weltkoordinaten  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  des Modells liegt im Zentrum des Drehrohrendes. Die  $\hat{y}$ -Achse zeigt dabei in das Drehrohr hinein, die  $\hat{z}$ -Achse nach oben und die  $\hat{x}$ -Achse beschreibt dementsprechend die seitliche Abweichung.

Die Austrittsgeschwindigkeit  $v_0$  des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze kann beliebig eingestellt werden und bestimmt damit die mittlere Streichlinie  $\hat{z}_{\text{Sim}}(\hat{y})$  des Brennstoffes in Weltkoordinaten. Wie an realen Anlagen hat der Mehrstoffbrenner eine leichte Schrägstellung von  $2^\circ$ , wodurch sich an der Brennerspitze die Austrittsgeschwindigkeiten

$$v_{\hat{y}} = v_0 \cos(2^\circ), \quad v_{\hat{z}} = v_0 \sin(2^\circ) \quad (4.5)$$

und die mittlere Streichlinie anhand der Bahngleichung eines schiefen Wurfes

$$s_{\text{Sim}}(\hat{y}) = h_{\text{AB}} - \tan(2^\circ) \hat{y} - \frac{g}{2v_0 \cos^2(2^\circ)} \hat{y}^2 \quad (4.6)$$

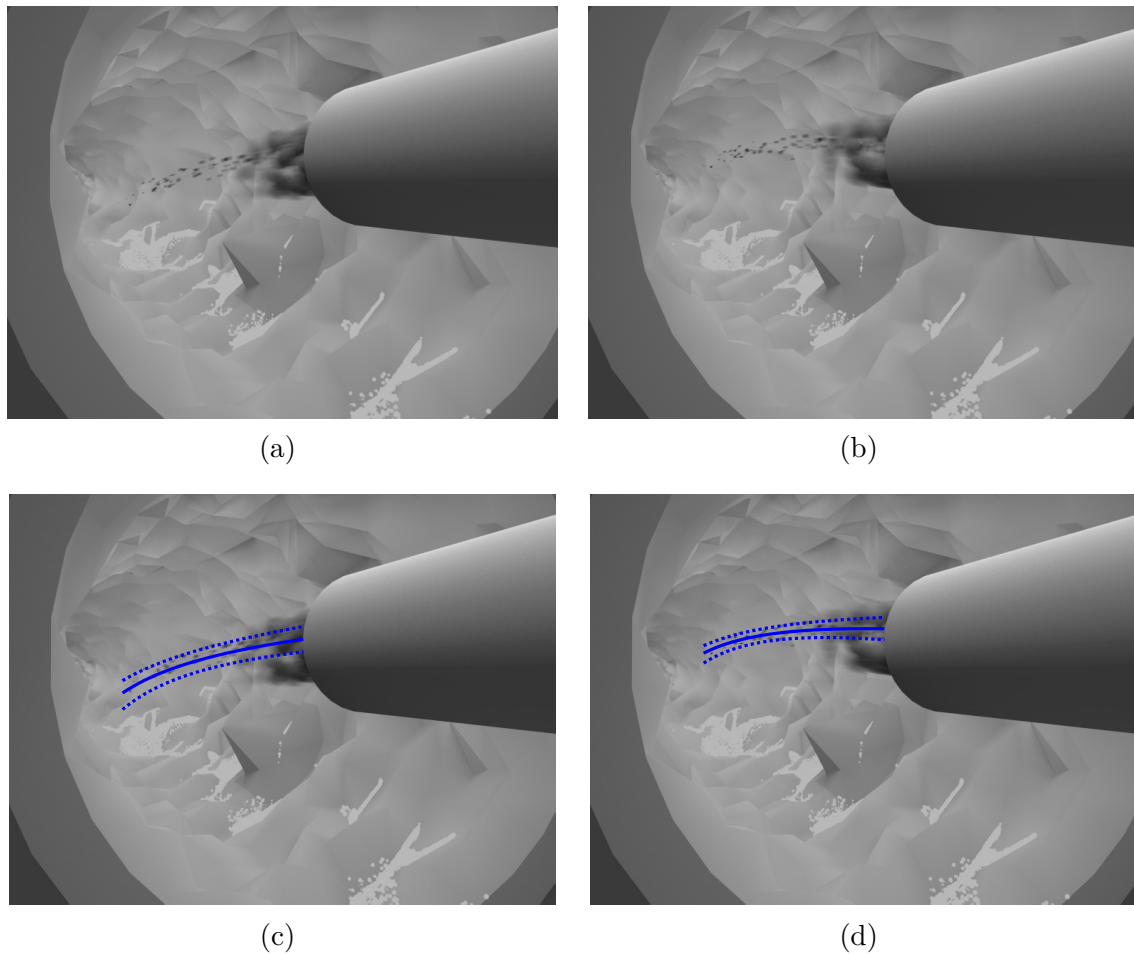
mit  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$  und  $h_{\text{AB}}$  der Höhe des Brennstoffaustrittes ergeben. Zur Simulation des Pneumodeflektors kann der vertikalen Geschwindigkeit eine zusätzliche Anfangsgeschwindigkeit  $v_{\text{Pneumo}}$  hinzugefügt werden:

$$v_{\hat{z}} = v_0 \sin(2^\circ) + v_{\text{Pneumo}}. \quad (4.7)$$

Auf Grund des Kreisquerschnittes mit dem Durchmesser  $d_{\text{AB}}$  des alternativen Brennstoffkanals befindet sich die Höhe des Austrittes des Brennstoffes im Bereich von  $h_{\text{AB}} - \frac{d_{\text{AB}}}{2}$  und  $h_{\text{AB}} + \frac{d_{\text{AB}}}{2}$  und es entsteht eine entsprechend breite Streichlinie (Abbildung 4.12(c) und 4.12(d)).

Zur Erstellung der Simulationsbilder wurde eine Austrittsgeschwindigkeit des alternativen Brennstoffes von  $v_0 = 25 \text{ m/s}$  und ein Durchmesser von  $d_{\text{AB}} = 16.25 \text{ cm}$  des Kreisquerschnittes entsprechend dem realen Brenner der Untersuchungen gewählt. Zusätzlich wurden,





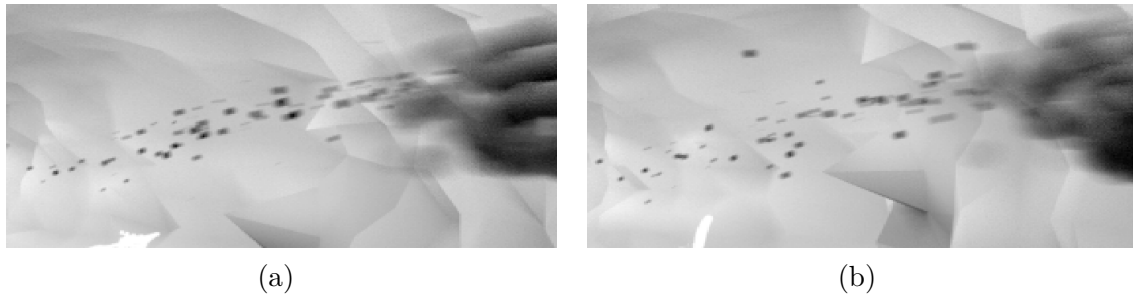
**Abbildung 4.12:** Beispiele für die Brennersimulation in BLENDER mit (a) niedriger und (b) hoher Flugbahn des alternativen Brennstoffes. (c) und (d) mit eingezeichneter mittleren Streichlinie (blau) und Grenzen der Flugbahn (blau gestrichelt) auf Basis der gewählten Brenneinstellungen.

zur Simulation von Partikelaustrifern, einzelnen Partikeln eine zufällige Ablenkung der Ausgangsgeschwindigkeit  $v_0$  zwischen  $-3.5 \text{ m/s}$  und  $3.5 \text{ m/s}$  aufaddiert (Abbildung 4.13). Durch die vertikalen Anfangsgeschwindigkeit  $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$ ,  $0.7 \text{ m/s}$ ,  $1.4 \text{ m/s}$  und  $2 \text{ m/s}$  konnten Sequenzen mit unterschiedlichen Pneumodeflektoreinstellungen erstellt werden.

Da aus der Simulation alle Abstände zwischen Welt- und Kamerakoordinatensystem und die Spezifikationen der Kamera bekannt sind, kann die mittlere Streichlinie in Bildkoordinaten  $(x, y)$  durch

$$\lambda \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{C} & 0 & \frac{c_x}{2} \\ 0 & \frac{f}{C} & \frac{c_y}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{\hat{x}} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{\hat{y}} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{\hat{z}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4.8)$$

berechnet werden.



**Abbildung 4.13:** Beispiele für die Brennersimulation in BLENDER mit  $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$  ausgeschnitten auf den Bereich der Brennerumgebung (a) ohne und (b) mit Partikel ausreißer des alternativen Brennstoffes.

Dabei ist  $\lambda$  ein Skalierungsfaktor,  $f$  die Brennweite,  $C$  die Pixelgröße in Metern und  $(c_x, c_y)$  die Auflösung in  $x$ - und  $y$ -Richtung der Kamera.  $r$  und  $(t_x, t_y, t_z)$  bezeichnen die Rotations- und Translationskomponenten der Kameraposition in Weltkoordinaten.

Eine detaillierte Beschreibung der Erstellung des Simulationsmodells in BLENDER wird in Anhang A.3 gegeben.

#### 4.2.2 Evaluation der Bildverarbeitungsverfahren mittels Simulation

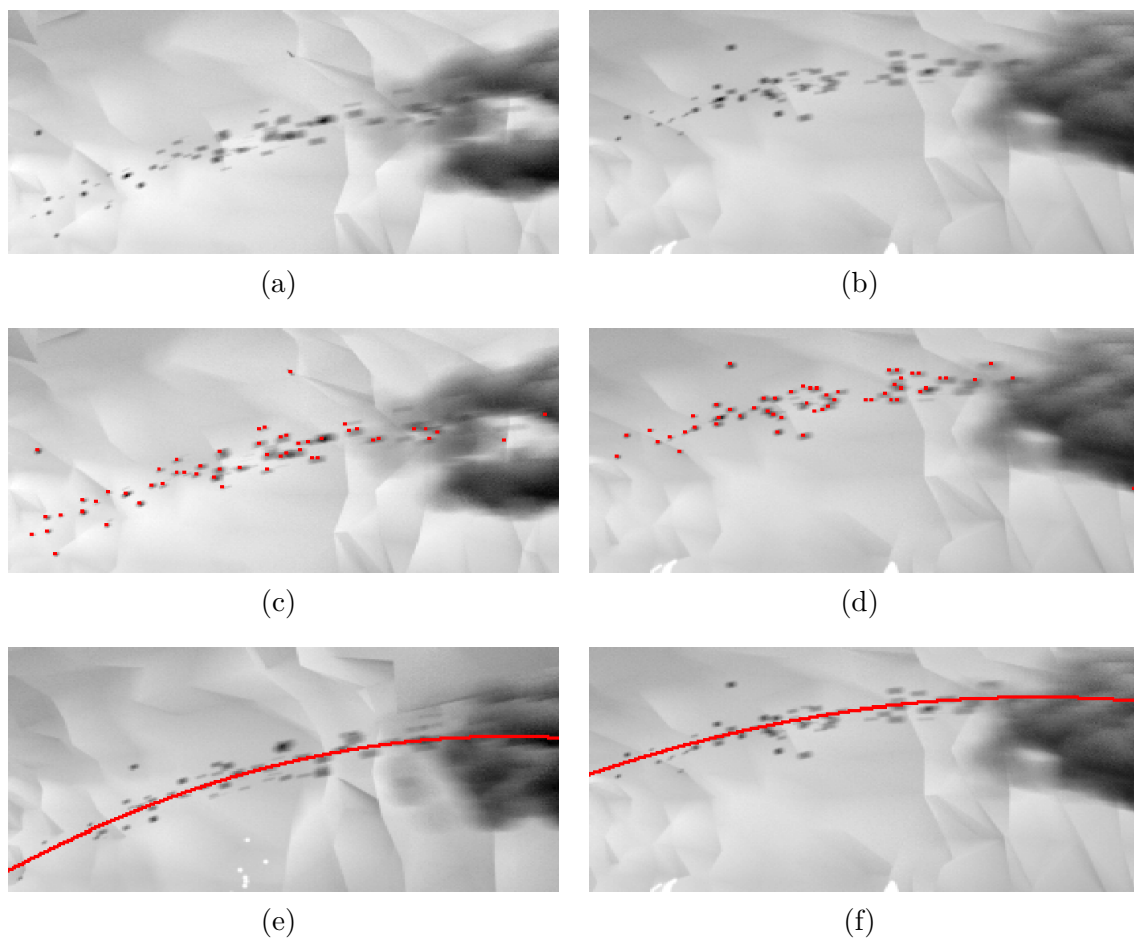
Anhand der störungsfreien Simulationsdaten können die neuen Bildverarbeitungsalgorithmen evaluiert werden. Abbildung 4.14 zeigt den Ablauf der Bildverarbeitung für die vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes von  $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$  (Abbildung 4.14, links) und  $v_{\text{Pneumo}} = 2 \text{ m/s}$  (Abbildung 4.14, rechts). Das Ergebnis der Partikeldetektion ist in Abbildung 4.14(c) und 4.14(d) zu sehen. Auf Grund der guten Sichtbarkeit kann nahezu jedes Brennstoffpartikel über das neue Verfahren detektiert werden. Das eingezeichnete Ergebnis der Streichliniendetektion in Abbildung 4.14(c) und 4.14(d), das auch den GAB-Anteil berücksichtigt, zeigt die erwartete Überlagerung mit der Flugbahn der Brennstoffpartikel.

Da bei den Referenzdaten aus der Simulation die Streichlinie des alternativen Brennstoffes über das Modell vorgegeben wird, kann zur Evaluation der Streichliniendetektion die Abweichung zur korrekten Streichlinie berechnet werden. Die mittlere spaltenweise Abweichung zwischen Streichliniendetektion und den Referenzdaten ist in Tabelle 4.2 gegeben.

**Tabelle 4.2:** Durchschnittliche Abweichung pro Bildspalte der Streichliniendetektion zu den Referenzdaten für unterschiedliche vertikale Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes.

vertikale Anfangsgeschwindigkeit	0 m/s	0.7 m/s	1.4 m/s	2 m/s
∅ Abweichung Streichlinie (px)	2.4	1.3	1.3	1.7

Auf Grund der Eigenschaften der eingebrachten Störungen ist eine exakte Detektion der idealen mittleren Streichlinie nicht zu erwarten. Zum einen kann die Verteilung der Störungen der Anfangsgeschwindigkeiten nicht als mittelwertfrei angenommen werden

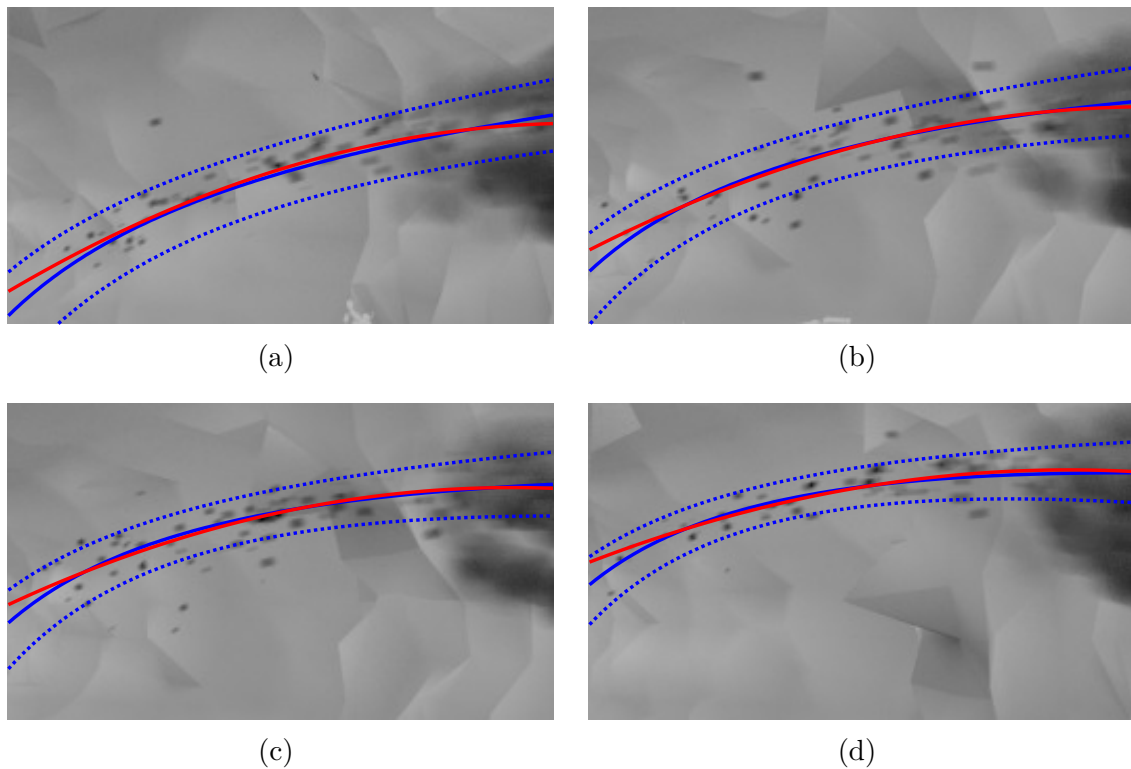


**Abbildung 4.14:** Bestimmung der mittleren Streichlinie für die Brennersimulationen in BLENDER mit Hilfe der neuen Bildverarbeitungsalgorithmen. Auf interessierenden Bereich zugeschnittenes Einzelbild für die vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes (a)  $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$  und (b)  $v_{\text{Pneumo}} = 2 \text{ m/s}$ . (c) und (d) zeigen das Ergebnis der Partikeldetektion (rote Punkte). (e) und (f) zeigen das Ergebnis der Streichliniendetektion.

und zum anderen haben diese Störungen einen nichtlinearen Einfluss auf die Streichlinie. Dadurch ergibt sich ein mittlerer Fehler innerhalb der Simulationsdaten ungleich Null, der selbst bei mittelwertfreien Störungen auftritt.

Mit einer durchschnittlichen Abweichung von etwa zwei Pixeln in jeder Bildspalte über alle Sequenzen, wird durch die automatische Detektion der mittleren Streichlinie eine hohe Genauigkeit erzielt. Dies kann auch durch den optischen Vergleich für alle vier vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten, der in Abbildung 4.15 dargestellt ist, nachvollzogen werden.

Die Kurven verlaufen stellenweise deckungsgleich. Nur in den Bereichen weiter von der Brennerspitze entfernt ist ein Unterschied zwischen Detektion und Referenz zu erkennen. Dieser Unterschied wird bei der Betrachtung der Kenngröße der Wurfweite in Tabelle 4.3 noch deutlicher.



**Abbildung 4.15:** Vergleich der Streichliniendetektion mit den Referenzdaten bei horizontaler Austrittsgeschwindigkeit von (a) 0 m/s, (b) 0.7 m/s, (c) 1.4 m/s und (d) 2 m/s.

Die Wurfweite wird dabei in Bildkoordinaten ausgegeben und beschreibt den horizontalen Abstand zwischen der Brennerspitze und dem Auftreffpunkt des alternativen Brennstoffes auf dem Brennbett in Pixeln. Wie in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, ergibt sich durch den Kreisquerschnitt des alternativen Brennstoffkanals eine aufgefächerte Flugbahn. Für die Wurfweite aus den Referenzdaten folgt damit eine mittlere Wurfweite aus der mittleren Streichlinie und eine minimale und maximale Wurfweite aus den Randflugbahnen des Brennstoffes.

**Tabelle 4.3:** Vergleich der Wurfweite der Streichliniendetektion mit den Referenzdaten für unterschiedliche vertikale Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes.

vertikale Anfangsgeschwindigkeit		0 m/s	0.7 m/s	1.4 m/s	2 m/s
Wurfweite (px)	Bildverarbeitung	210	241	276	298
	Referenzdaten				
	Minimum	173	208	238	259
	Mittelwert	207	235	260	277
	Maximum	233	257	277	292

Für geringe vertikale Anfangsgeschwindigkeiten ( $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$ ,  $v_{\text{Pneumo}} = 0.7 \text{ m/s}$ ) liegt die Wurfweite der Streichliniendetektion sehr nahe an der mittleren Wurfweite der Referenzdaten. Je größer die Anfangsgeschwindigkeit wird, desto weiter liegt die Wurfweite aus der Streichliniendetektion über der mittleren Wurfweite. Liegt für  $v_{\text{Pneumo}} = 1.4 \text{ m/s}$  die Wurfweite gerade noch innerhalb der maximalen Grenze, liegt sie für  $v_{\text{Pneumo}} = 2 \text{ m/s}$  leicht außerhalb des Bereiches der Referenzdaten.

## 4.3 Fazit der Ergebnisse der Evaluation anhand der neuen Referenzdatensätze

Da bisher keine Information über die Streichlinie des alternativen Brennstoffes eines Mehrstoffbrenners unter realen Prozessbedingungen vorhanden ist, stellt der Vergleich mit der Expertenauswertung von MIR-Kamerabildern einen wichtigen Schritt bei der Bewertung der neu entwickelten Verfahren dar. Bildauswertung und Experten haben hierbei die gleichen Ausgangsbedingungen, nämlich die ungefilterten MIR-Kamerabilder. Dadurch müssen sich die neuen Verfahren mit den kognitiven Fähigkeiten des Menschen, gerade im Bereich der Unterdrückung von Störungen und den Erfahrungen der Experten messen.

Abschnitt 4.1 zeigte, dass die Ergebnisse der Streichliniendetektion für unterschiedliche Prozessbedingungen mit der menschlichen Wahrnehmung übereinstimmen. Die Abweichung zur mittleren Expertenauswertung ist nur in wenigen Fällen höher als bei den Experten selbst und beträgt durchschnittlich pro Bildspalte nur etwa zwei Pixel. Größere Abweichungen zu den Experten können unter anderem durch eine konstante vertikale Verschiebung der Streichlinie bei einem breiten Brennstoffstrahl, wie zum Beispiel in Abbildung 4.11(a), entstehen. Aber auch die unterschiedliche Gewichtung der verschiedenen Brennstofferscheinungsformen durch den Experten kann zu Abweichungen führen. In der Regel wertet der Experte den konstanten alternativen Brennstoffanteil stärker als einzelne Brennstoffpartikel, die höhere Flugbahnen einnehmen können. In diesem Fall werden flachere Streichlinien aus der Expertenauswertung erhalten, wie zum Beispiel in Abbildung 4.11(a) zu sehen. Ein Vergleich der aus den Streichlinien erhaltenen Kenngrößen, wie etwa die Steigung an der Brennerspitze (Abbildung 4.10), zeigt außerdem, dass über die Streichliniendetektion die Flugbahn des alternativen Brennstoffes ähnlich gut wie durch die menschliche Einschätzung beschrieben werden kann. Mit dem neu erstellten Referenzdatensatz aus Abschnitt 4.1 konnte darüber hinaus festgestellt werden, dass das kombinierte Verfahren aus GAB- und Partikeldetektion das aktuell beste Verfahren zur Beschreibung der Streichlinie des alternativen Brennstoffes, im Vergleich zur menschlichen Wahrnehmung, darstellt. Informationen über den Verbrennungsprozess können damit automatisch aus den MIR-Kamerabildern erhalten werden und das in nahezu gleicher Qualität wie durch eine Gruppe menschlicher Betrachter.

Die hohe Genauigkeit der Streichliniendetektion kann durch das 3D-Simulationsmodell bestätigt werden. Für den neu erzeugten Referenzdatensatz wird ebenfalls eine durchschnittliche Abweichung pro Bildspalte von etwa zwei Pixel erreicht. Im Vergleich zu den Referenzdaten auf Basis der Expertenauswertung wird eine höhere Übereinstimmung durch eine große Abweichung zum Modell im hinteren Bereich des Drehrohres verhindert. Dieses Verhalten der Streichliniendetektion lässt sich mit Blick auf die Bilddaten der Simulation erklären. Wie beim realen Verbrennungsprozess sind nur wenige Brennstoffpartikel im hinteren Bereich des Drehrohres zu erkennen, die die stärkste Auslenkung nach unten erfahren. Das Fehlen dieser Information führt zu einer weniger gekrümmten Streichlinie aus der Streichliniendetektion und damit zu einer größeren Wurfweite im Vergleich zu den Referenzdaten (Tabelle 4.3). Dieses Verhalten ist bei den Referenzdaten aus der Expertenauswertung nicht zu beobachten, da die Brennstoffpartikel im hinteren Drehrohrbereich sowohl für die

Streichliniendetektion als auch für den Experten nicht zu sehen sind. Beide schätzen in diesem Fall die Streichlinie weniger gekrümmt ein als sie in der Realität vorliegt.

Trotz der beschriebenen Abweichung der Wurfweitenkenngröße bei den Simulationsdaten, kann sowohl für die Referenzdaten als auch für die Streichliniendetektion die zu erwartende Steigerung der Wurfweite bei Steigerung der vertikalen Anfangsgeschwindigkeit beobachtet werden.

Mit Hilfe der Referenzdaten aus der Expertenauswertung und Simulation konnte gezeigt werden, dass die Streichliniendetektion mittels der neuen Bildverarbeitungsalgorithmen im Bereich, in dem der Brennstoff zu sehen ist, eine hohe Genauigkeit erzielt. Des Weiteren geben abgeleitete Kenngrößen wie die Wurfweite korrekte Aussagen über das aktuelle Flugverhalten des alternativen Brennstoffes. Dabei ist eine wichtige Erkenntnis, dass auf Grund der fehlenden Sichtbarkeit des Brennstoffes im hinteren Bereich des Drehrohres, die Streichlinie aus der Streichliniendetektion tendenziell eine geringere Krümmung als die reale Streichlinie aufweist.

Neben der Genauigkeit der Streichliniendetektion stellt auch der benötigte Rechenaufwand der Bildverarbeitung ein wichtiges Bewertungskriterium dar. Die Verfahren sollen in das kommerziell verfügbare System zur Optimierung thermischer Prozesse INSPECT PRO CONTROL<sup>®</sup> der CI-TEC GMBH integriert werden. Das System liefert 20 MIR-Kamerabilder alle zwei Sekunden. Nach prototypischer Implementierung der neuen Verfahren in das System und dem Einsatz des Prototyps unter realen Prozessbedingungen, konnte nachgewiesen werden, dass der durch das System vorgegebene Rechenzeitraum für die Durchführung der neuen Bildverarbeitungsalgorithmen zur Streichliniendetektion auf einem Standard-Industrie-PC ausreichend ist und damit online ausgeführt werden kann.

## 4.4 Evaluation der weiteren Bildverarbeitungsverfahren

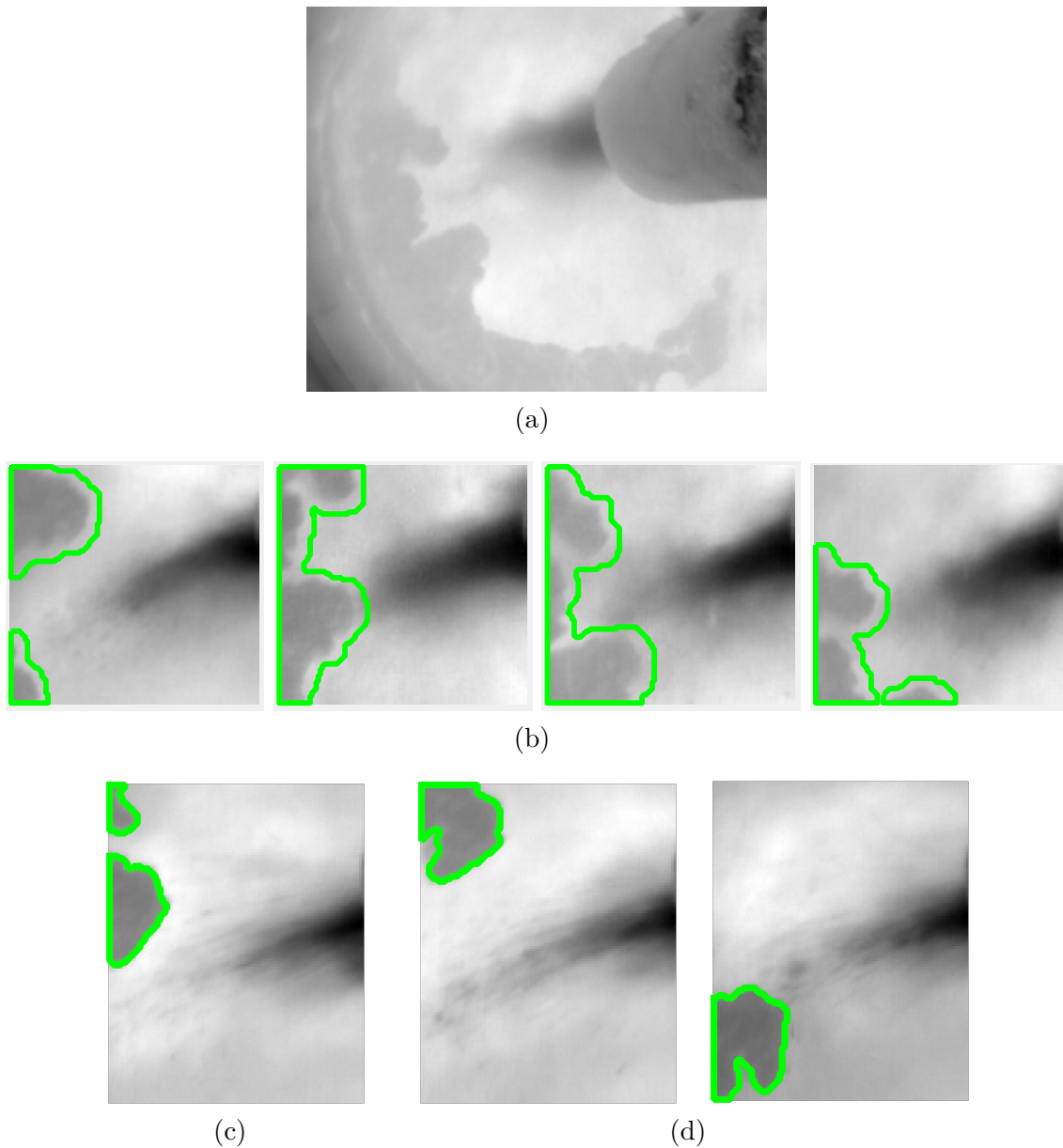
Wie bei der Streichliniendetektion existieren auf Grund der Neuheit der Aufgabenstellung keine Referenzdaten, um eine Evaluation der noch nicht betrachteten Bildverarbeitungsverfahren durchzuführen. Auf Basis ausgewählter Bilddaten der zwei durchgeführten Messkampagnen kann allerdings eine Bewertung der neu entwickelten Verfahren erreicht werden.

### 4.4.1 Evaluation der Anbackungsdetektion

Für die exakte Bewertung der Anbackungsdetektion aus Abschnitt 3.2.3 müsste ein Referenzdatensatz erzeugt werden, in dem jedes Pixel eines Einzelbildes einer Sequenz als Anbackung bzw. anbackungsfrei gelabelt wird. Das stellt allerdings einen nicht gerechtfertigten Aufwand dar. Sollen verschiedene Szenarien über diesen Ansatz betrachtet werden, würde dadurch zudem eine extrem große Datenmenge notwendig werden. Stattdessen werden in der vorliegenden Arbeit aus MK2 50 Sequenzen mit etwa 300 Einzelbildern, in

denen Anbackungen vorhanden sind, ausgewählt, für die das Segmentierungsergebnis der automatischen Anbackungsdetektion manuell verglichen wird.

Abbildung 4.16(a) und 4.16(b) zeigt das Segmentierungsergebnis der Anbackungsdetektion zu verschiedenen Zeitpunkten für eine der ausgewählten Sequenzen aus MK2. In Abbildung 4.16(c) und 4.16(d) sind weitere Beispiele aus zwei anderen Sequenzen zu sehen. Anbackungen werden hierbei auch im Überlappungsbereich mit alternativem Brennstoff hinreichend genau erkannt.



**Abbildung 4.16:** Beispiele zur Bewertung der automatischen Segmentierung von Anbackungen. (a) Einzelbild einer ausgewählten Beispielsequenz aus MK2. (b) Segmentierungsergebnis der Anbackungsdetektion zu verschiedenen Zeitpunkten für die Sequenz aus (a). (c) und (d) weitere Beispiele für die Segmentierung von Anbackungen.

Nach manueller Auswertung aller 50 Sequenzen, wie in Abbildung 4.16 dargestellt, wurden alle vorhandenen Anbackungen hinreichend gut segmentiert. Die neu entwickelte Anbackungsdetektion stellt damit ein zuverlässiger Vorverarbeitungsschritt zur Unterdrückung von Störungen und zur Vermeidung von Fehldetektionen dar.

#### 4.4.2 Evaluation der Brennerdetektion

Zur Bewertung der Brennerdetektion aus Abschnitt 3.2.2 können die gesamten Bilddaten aus MK1 und MK2 herangezogen werden. Durch Ein- und Ausbau der Kamera im Laufe der Messkampagnen entstehen unterschiedliche Aufnahmekonstellationen, die im Kamerabild zu verschiedenen Brennerpositionen und Rotationswinkeln führen. Nach Sichtung der gesamten Bilddaten konnten für beide Messkampagnen jeweils zwei unterschiedliche Positionen und Winkel des Brenners festgestellt werden. Für die Evaluation wurde die Position des Austrittes des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze ( $b_x, b_y$ ) und der Rotationswinkel des Brenners im Kamerabild für die vier beobachteten Konstellationen manuell markiert und als Referenz festgelegt.

Das Verfahren zur Brennerdetektion wurde auf jede Bildsequenz angewandt und mit der erstellten Referenz verglichen. Die durchschnittliche Abweichung der  $x$ - bzw.  $y$ -Position und des Brennerwinkels aus der Brennerdetektion zur Referenz ist in Tabelle 4.4 dargestellt.

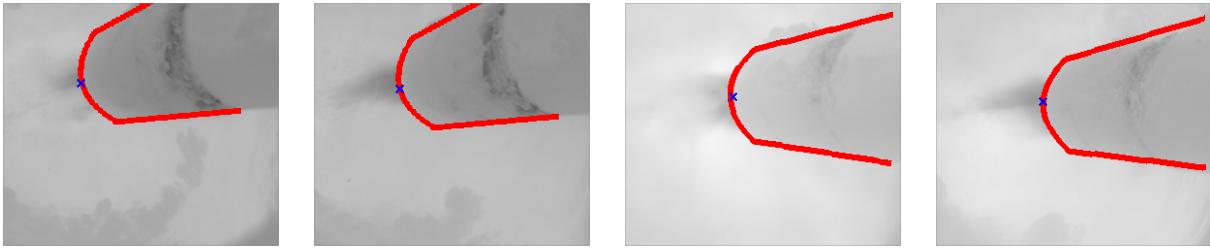
**Tabelle 4.4:** Evaluation des Verfahrens zur Brennerdetektion.

	Anzahl Sequenzen	Abweichung $b_x$ (px)	Abweichung $b_y$ (px)	Abweichung Rotationswinkel ( $^\circ$ )
Position 1	1135	0.67	1.19	1.12
Position 2	563	0.53	0.86	0.93
Position 3	31	0.52	1.65	1.33
Position 4	35	0.51	0.79	0.99

Mit einer mittleren Abweichung von etwa einem Pixel für die Position und  $1^\circ$  für den Winkel liefert die Brennerdetektion eine zuverlässige Schätzung für eine konstante Aufnahmekonstellation. Abbildung 4.17 zeigt Beispielbilder der vier betrachteten Brennerpositionen mit dem überlagerten Brenner-Template an der detektierten Position und unter dem detektierten Winkel der neu entwickelten Brennerdetektion.

Anhand der Brennerdetektion kann damit die Lage des Brenners im Kamerabild zuverlässig bestimmt und mit der bei der Inbetriebnahme festgelegten Soll-Position verglichen werden. Bei fester Installation des Systems ist eine Änderung der Position nur selten zu erwarten, eine regelmäßige Überprüfung, zum Beispiel alle fünf Minuten, ist daher im Anwendungsfall auch in Anbetracht des höheren Rechenaufwandes der Verfahren zur Brennerdetektion (Abschnitt 3.2.2) ausreichend.





**Abbildung 4.17:** Ergebnisse der Brennerdetektion für vier unterschiedliche Brennerpositionen und Rotationswinkel.

Treten Änderungen in der Aufnahmekonstellation auf, stellt gerade die Position des Austrittes des alternativen Brennstoffes aus der Brennerspitze ( $b_x, b_y$ ) für die weitere Bildauswertung der Streichliniendetektion ein zentrales Element dar (Abschnitt 3.4). Über das neue Verfahren kann die Lage des Brenners aktualisiert und damit für eine weitere erfolgreiche Auswertung gesorgt werden. Zur Steigerung der Robustheit wird eine Aktualisierung der Position allerdings nur durchgeführt, wenn eine Änderung der Brennerposition durch eine erneute Brennerpositionsschätzung anhand neuer Bilddaten bestätigt wird.

Werden größere Abweichungen (z.B.  $> 10$  Pixel) festgestellt, muss neben der Position auch die  $ROI_{\text{Brennstoff}}$  (Abschnitt 3.2) für die Bildauswertung angepasst werden, um den korrekten Bildinhalt zu gewährleisten. Die Anpassung der  $ROI_{\text{Brennstoff}}$  muss hierbei manuell im System durchgeführt werden, dadurch wird der aktuelle Bildinhalt und damit die Ursache für die große Abweichung (evtl. falsche Kameraposition oder starke Verschmutzung) überprüft. Wird über die Brennerdetektion kein Brenner erkannt, muss ebenfalls eine Überprüfung des Kamerabildes durchgeführt werden.

Die Brennerdetektion trägt damit zur Steigerung der Robustheit der weiteren Verfahren und vor allem zu einer korrekten Bildauswertung bei.



# 5 Analyse der neuen bildbasierten Kenngrößen bei der Zementklinkerherstellung

Durch den Vergleich mit der menschlichen Wahrnehmung und der Simulation in Kapitel 4 konnten die neu entwickelten Bildverarbeitungsverfahren und die daraus abgeleiteten Kenngrößen evaluiert werden. Um beurteilen zu können, welche Möglichkeiten die neuen Verfahren zur Optimierung des industriellen Verbrennungsprozesses bieten, muss auch gezeigt werden, inwiefern die neu gewonnenen Informationen Rückschlüsse auf, oder Vorteile gegenüber, anderen Prozesskenngrößen ermöglichen. Nachfolgend werden die neu gewonnenen Kenngrößen mit den Prozessdaten und den Labormessungen des Klinkers verglichen. Grundlage ist ein prototypisches Messsystem aus MIR-Kamera und Bildverarbeitungsmodul, das auf Basis des eingesetzten Systems in MK1 und MK2 entwickelt und über mehrere Monate an einer Zementdrehrohanlage installiert wurde. Die neu entwickelten Verfahren wurden dazu in ein bestehendes kommerziell verfügbares System zur Optimierung thermischer Prozesse INSPECT PRO CONTROL<sup>®</sup> der Firma CI-TEC GMBH integriert.

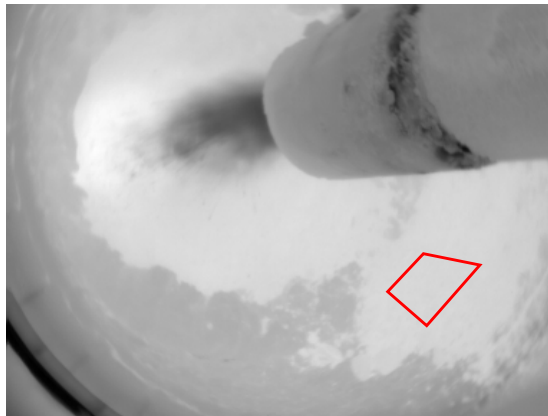
Abschnitt 5.1 beinhaltet den Vergleich zwischen den neuen Kenngrößen aus der Bildverarbeitung und den Prozessdaten bzw. den Labormessungen des Klinkers. Anschließend werden in Abschnitt 5.2 die Ergebnisse des Vergleiches und die Einsatzmöglichkeiten der neuen Kenngrößen diskutiert.

## 5.1 Vergleich von Kenngrößen und Prozessdaten

Ziel des Messsystems mit den neu entwickelten Bildverarbeitungsverfahren ist eine schnelle Optimierung von Prozessparametern im laufenden Betrieb, um eine gleichmäßig hohe Klinkerqualität zu erzielen. Wie in Abschnitt 1.2.5 beschrieben, stellt die Labormessung des Klinkers momentan die zuverlässigste Methode zur Beurteilung der Qualität dar. Dabei wird unter anderem der Anteil an verbliebenem Freikalk in den Klinkerphasen bestimmt und damit bewertet, ob eine vollständige Reaktion der einzelnen Komponenten in der Sinterzone erfolgt ist. Da diese Information allerdings durch die Dauer der Probenentnahme und -aufbereitung erst deutlich zeitversetzt zur Verfügung steht, wird im Folgenden überprüft, inwieweit die kamerabasierten Kenngrößen Rückschlüsse auf die Qualität des Klinkers zulassen. Anders als die Labormessung liefern die kamerabasierten Kenngrößen

Informationen über den Prozesszustand für den sich aktuell im Drehrohr befindenden Klinker und ermöglichen damit ein rechtzeitiges Eingreifen in den Prozess.

Der für die Qualität des Klinkers ausschlaggebende Reaktionsvorgang ist sehr stark abhängig von der Temperatur des Klinkerbettes in der Sinterzone und sollte dementsprechend im Drehrohr so eingestellt werden, dass sich ein für die Klinkerqualität akzeptabler Freikalkgehalt ergibt. Um diesen Zusammenhang zu überprüfen, wird aus den MIR-Kamerabildern des prototypischen Messsystems ebenfalls die Temperatur des Klinkerbettes in der Sinterzone bestimmt [108] und zur bildbasierten Analyse der Zementklinkerherstellung genutzt. Abbildung 5.1 zeigt das Messfeld in dem die mittlere Klinkertemperatur bestimmt wird.



**Abbildung 5.1:** Lage des Messfeldes zur Bestimmung der mittleren Temperatur im Klinkerbett.

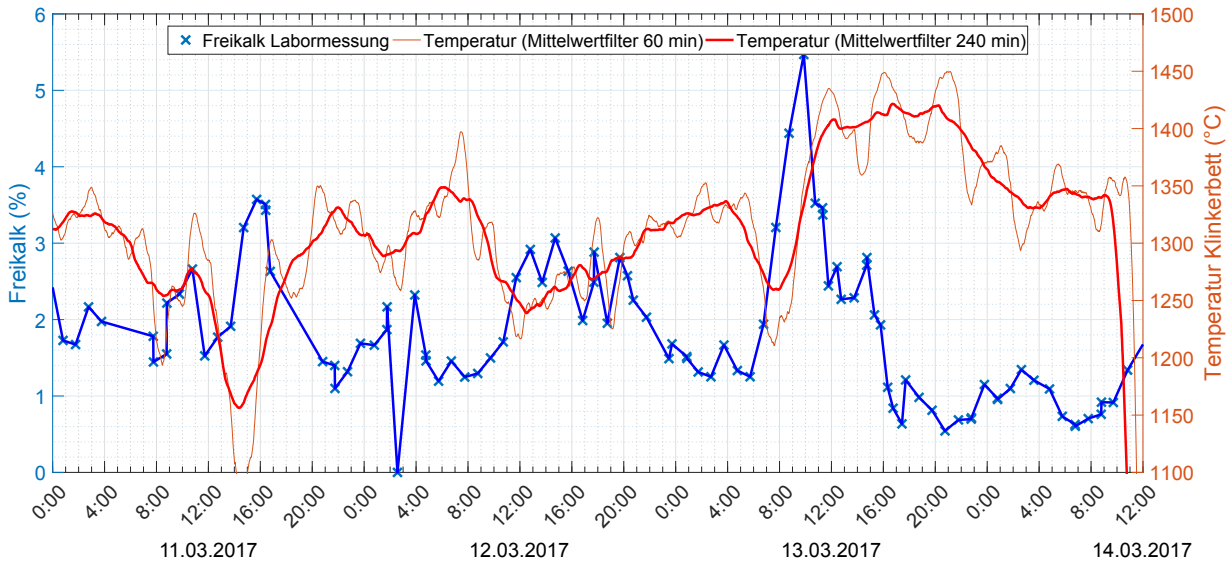
Nachfolgend wird zunächst der Einfluss der Temperatur im Klinkerbett auf den Freikalk als Ausgangspunkt zur Bewertung der Klinkerqualität untersucht.

Da die Temperatur im Drehrohr durch die Einstellung des Mehrstoffbrenners bzw. die Eigenschaften der verwendeten Brennstoffe beeinflusst wird, können anschließend die Zusammenhänge zwischen den neuen Kenngrößen und der Temperatur im Klinkerbett bzw. der Klinkerqualität betrachtet werden.

### 5.1.1 Temperatur im Klinkerbett

In Abbildungen 5.2 und 5.3 sind eine Auswahl an Temperaturverläufen dem Freikalk des Klinkers aus der Labormessung gegenübergestellt. Der Temperaturverlauf wurde zur Minderung von Störungen durch einen akausalen gleitenden Mittelwertfilter geglättet. Der Anteil an Freikalk wurde zum Zeitpunkt an dem die Messung vom Labor zur Verfügung gestellt wurde eingetragen (blaue Kreuze). Messwerte werden sehr unregelmäßig alle 30-60 Minuten geliefert. Zwischen zwei Messwerten stehen keine Informationen über den Freikalk zur Verfügung. Deswegen wird für die Darstellung in diesen Zeiträumen der Verlauf des Freikalkes linear interpoliert. Es muss beachtet werden, dass der Messwert des Freikalkes der aktuell vom Labor geliefert wird, nach Angaben von Anlagenbetreibern eine

Auswertedauer von 30-60 Minuten benötigt hat. D.h. der aktuelle Anteil an Freikalk gehört zu Klinkermaterial, das in den Kamerabildern 30-60 Minuten zuvor zu sehen war. Die exakte Auswertedauer steht für einzelne Messwerte des Freikalkes nicht zur Verfügung, weswegen auf eine konstante Verschiebung des Freikalkes in Abbildung 5.2 und 5.3 verzichtet und damit der Freikalk zum Zeitpunkt des Erhaltes des Messwertes aus dem Labor eingetragen wurde.



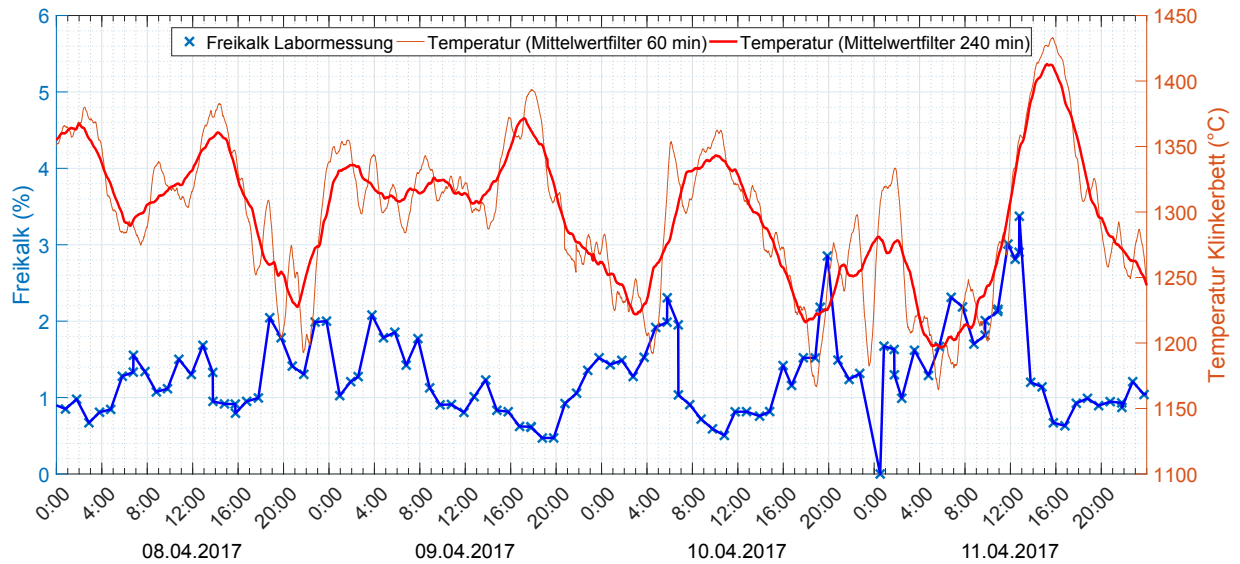
**Abbildung 5.2:** Vergleich der Temperatur im Klinkerbett (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im März.

Ein Vergleich der Verläufe von Temperatur im Klinkerbett und Freikalk zeigt einen gegenläufigen Verlauf der beiden Größen. Hohe Temperaturen führen zu einem besseren Sinterverhalten und korrelieren damit mit einem geringen Anteil an Freikalk. Neben dem visuellen Vergleich kann auch die Korrelation zwischen beiden Messgrößen betrachtet werden. Tabelle 5.1 zeigt die tageweisen Korrelationen zwischen Temperatur im Klinkerbett und den einzelnen verfügbaren Messwerten des Freikalkes für die in Abbildung 5.2 und 5.3 dargestellten Zeiträume.

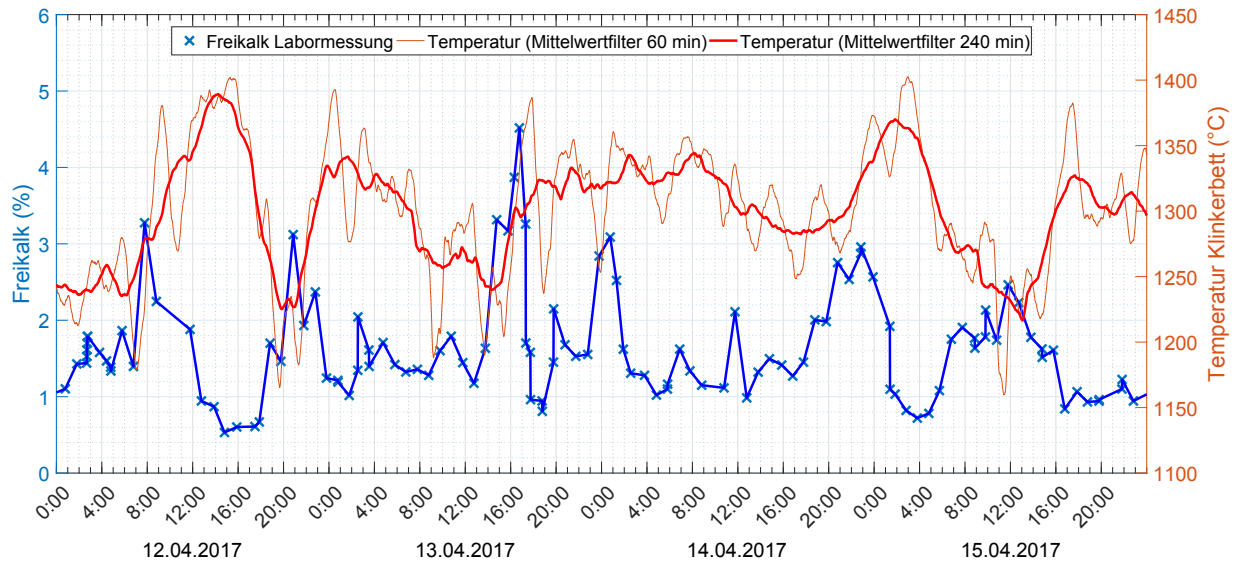
**Tabelle 5.1:** Tageweise Korrelationen zwischen Temperatur im Klinkerbett und zeitlich verschobenen Messwerten des Freikalkes.

Datum	11.03.	12.03.	13.03.	14.03.	08.04.	09.04.
Korrelation	-0.89	-0.78	-0.62	-0.43	-0.79	-0.63
Datum	10.04.	11.04.	12.04.	13.04.	14.04.	15.04.
Korrelation	-0.67	-0.45	-0.64	-0.56	-0.74	-0.84

Für die Bestimmung der Korrelation eines Tages wird das beste Korrelationsergebnis der Temperatur und den zwischen 30-60 Minuten zeitlich verschobenen Messwerten des



(a)

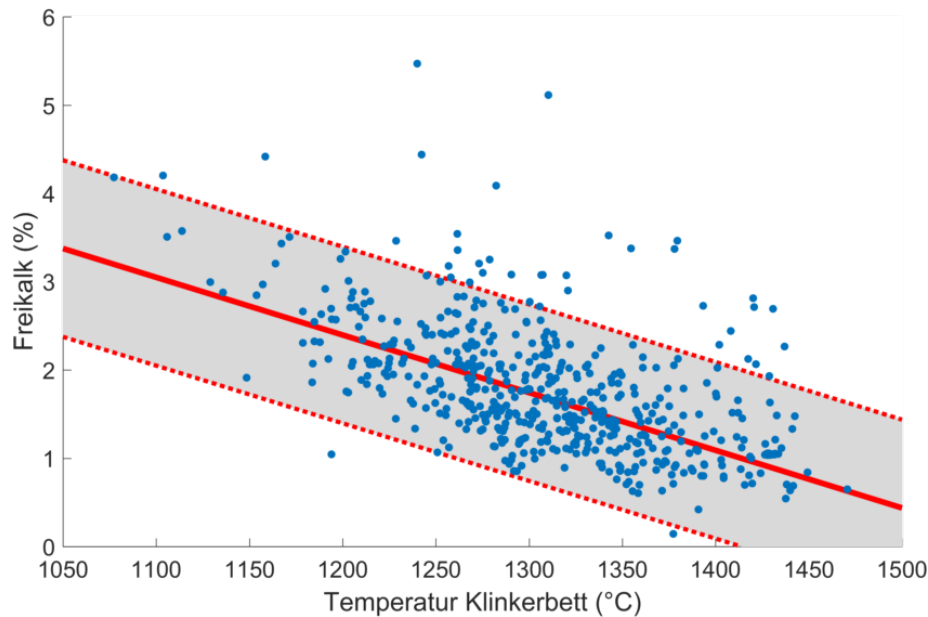


(b)

**Abbildung 5.3:** Vergleich der Temperatur im Klinkerbett (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im April.

Freikalkes verwendet. Dadurch wird der mittlere Zeitraum, der zur Probeentnahme und -aufbereitung für die Labormessung benötigt wird, abgeschätzt und für die Auswertung berücksichtigt.

Mit einer durchschnittlichen Korrelation von  $-0.67$  besteht, in Anbetracht des komplexen Prozesses, eine sehr gute gegenläufige Korrelation zwischen Temperatur im Klinkerbett und dem Anteil an Freikalk im Klinker. Der Zusammenhang beider Größen kann durch Betrachtung des Streudiagramms in Abbildung 5.4 noch weiter verdeutlicht werden.



**Abbildung 5.4:** Streudiagramm der Temperatur im Klinkerbett und den zeitversetzten Messwerten des Freikalkes im März (blau, 592 Messpunkte). Linearer Zusammenhang mittels RANSAC Geradenschätzung (rot) mit tolerierter Fehlerabweichung (grau).

Aus den Datenpunkten kann mittels RANSAC Geradenschätzung (Abschnitt 1.2.4) ein linearer Zusammenhang zwischen Temperatur und Freikalkwert abgeleitet und dadurch ein einfaches lineares Regressionsmodell zur Freikalkschätzung durch den aktuellen Temperaturwert bzw. mehrere vorangegangene Temperaturen beschrieben werden.

Da neben den Temperaturdaten auch zeitversetzt Laborwerte für den Freikalkwert vorliegen, kann das Modell um einen Korrekturterm erweitert werden. Dazu wird zum Zeitpunkt des Eintreffens einer neuen Labormessung die Abweichung des Modells für diesen Zeitpunkt bestimmt. Über einen linearen Tiefpass werden die Abweichungen als Korrekturterm mitgeführt und damit das Modell angepasst. Neben dem geschätzten Modell aus dem Streudiagramm können auch weitere Regressionsmodelle berücksichtigt werden, die zum einen reine Temperaturdaten oder Freikalkdaten, aber auch beide Daten gleichzeitig verwenden können.

Für eine erste Bewertung der Regressionsmodelle wurden verschiedene Modelle anhand von Daten aus der Langzeitmessung gelernt. Als Lerndaten wurden zehn Tage im März

ausgewählt, die restlichen Tage im März und der gesamte April wurden als Testdaten verwendet. Tabelle 5.2 zeigt den *Root Mean Square Error* (RMSE) der geschätzten Modelle für die Lern- und Testdaten aus der Langzeitmessung im März und April.

**Tabelle 5.2:** Abweichung der Freikalkschätzung für verschiedene Regressionsmodelle basierend auf zurückliegenden Labormessungen des Freikalkes, der aktuellen Temperatur im Klinkerbett und den Temperaturen zu den Zeitpunkten der letzten Freikalkmessungen (Temp = Temperatur).

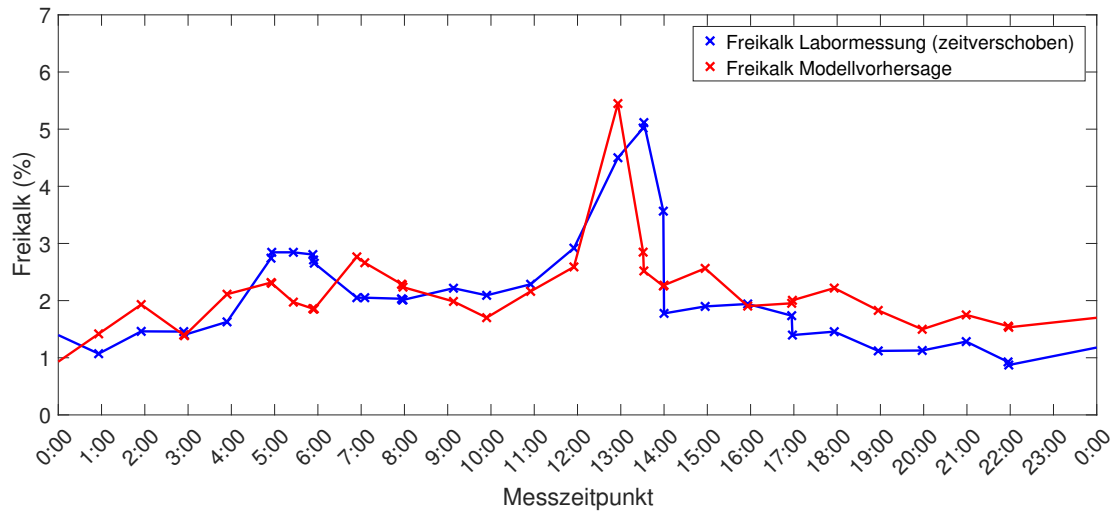
Modell	RMSE		
	Lerndaten	Testdaten März	Testdaten April
Freikalk	0.563	0.794	0.825
2×Freikalk	0.562	0.798	0.819
3×Freikalk	0.562	0.805	0.820
4×Freikalk	0.560	0.796	0.823
Temp	0.597	0.674	0.817
2×Temp	0.588	0.688	0.802
3×Temp	0.588	0.688	0.803
Temp + Freikalk	0.463	0.668	0.739
2×Temp + Freikalk	0.435	0.657	0.770
3×Temp + 2×Freikalk	0.426	0.668	0.747
4×Temp + 3×Freikalk	0.421	0.666	0.744
Temp + Korrektur	0.531	0.657	0.763

Auf den Lerndaten liefert das Regressionsmodell mit dem meisten Vorwissen, nämlich der aktuellen Temperatur, den letzten drei Freikalkmesswerten und den drei zugehörigen Temperaturen im Klinkerbett, das beste Schätzergebnis (RMSE = 0.421). Für die Testdaten ist zwischen den Temperatur-Freikalk Regressionsmodellen (RMSE = 0.657 bzw. 0.739) und dem einfachen linearen Modell, basierend auf der aktuellen Temperatur und einem Korrekturterm aus der letzten Freikalkmessung (RMSE = 0.657 bzw. 0.763), nahezu kein Unterschied zu erkennen. Eine Berücksichtigung von mehreren zurückliegenden Temperatur- und Freikalkwerten bringt keine wesentliche Verbesserung des Schätzergebnisses für die Testdaten. Die Regressionsmodelle, basierend rein auf vergangenen Freikalkmesswerten, liegen für alle Daten schlechter als die übrigen Modelle und werden deswegen nicht weiter berücksichtigt.

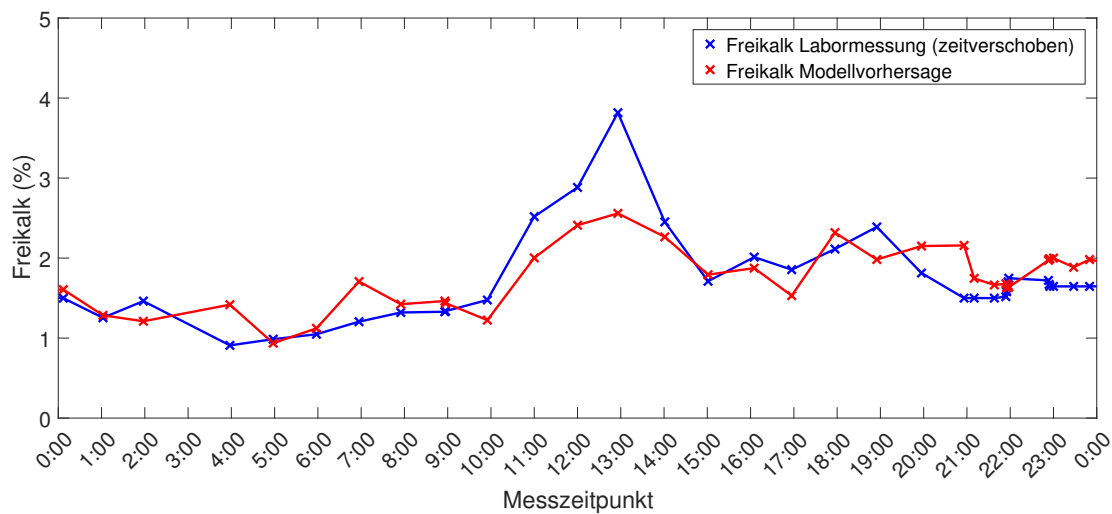
Auf Basis der ersten Untersuchungen ist ein Modell aus aktuellem Temperatur- und letzten Freikalklaborwert ausreichend zur Schätzung des aktuellen Freikalkwertes des in den Kamerabildern zu erkennenden Zementklinkers. Abbildung 5.5 zeigt ein Beispiel für den Vergleich von gemessenen Laborwerten des Freikalkes und nach dem linearen Modell mit Korrekturterm vorhergesagten Freikalkwerten. Der Zeitversatz der Labormesswerte wurde durch eine entsprechende zeitliche Verschiebung (50 Minuten) der Werte ausgeglichen. Der Vergleich zeigt, dass das Modell eine gute Vorhersage liefert, die gerade bei starken Ausreißern frühzeitig dem Anlagenführer Informationen über die aktuelle Klinkerqualität



bereitstellt. Dadurch können frühzeitig manuelle oder zukünftig auch automatisierte Gegenmaßnahmen, wie die Änderung der Brenneinstellungen, eingeleitet werden, die ohne kamerabasierte Überwachung erst bis zu einer Stunde später bei einer neuen Labormessung durchgeführt werden könnten.



(a)



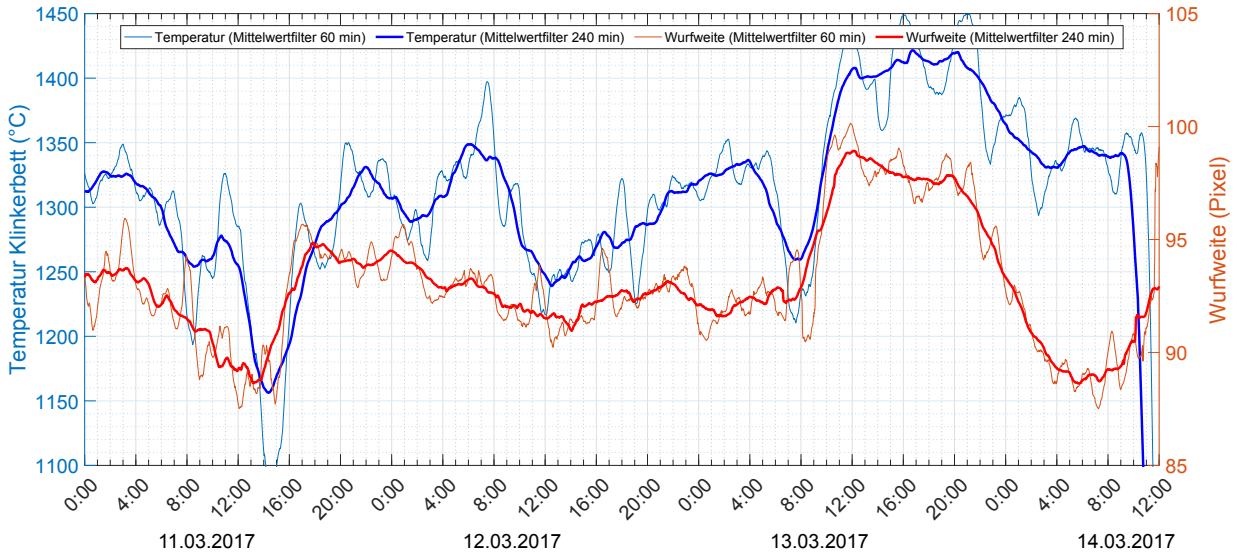
(b)

**Abbildung 5.5:** Vergleich gemessene Freikalkwerte (zeitverschoben um Auswertedauer, ca. 50 Minuten) und Modellvorhersage für (a) den 01.04. und (b) den 04.04.2017.

### 5.1.2 Wurfweite

Änderungen des Energieeintrages (Brennstoffmenge) durch den Brenner werden zeitlich versetzt zur Änderung der Temperatur im Klinkerbett führen. Die neu gewonnenen Kenngrößen zur Beurteilung des Verbrennungsprozesses bieten damit die Möglichkeit, noch früher Veränderungen der Prozessbedingungen zu erkennen.

Abbildungen 5.6 und 5.7 zeigen den Vergleich der Wurfweite und der Temperatur im Klinkerbett für verschiedene Zeiträume. Wie zuvor werden für die Darstellung beide Kenngrößen durch einen akausalen gleitenden Mittelwertfilter geglättet.



**Abbildung 5.6:** Vergleich der Wurfweite (rot) und der Temperatur im Klinkerbett (blau) für Messtage im März.

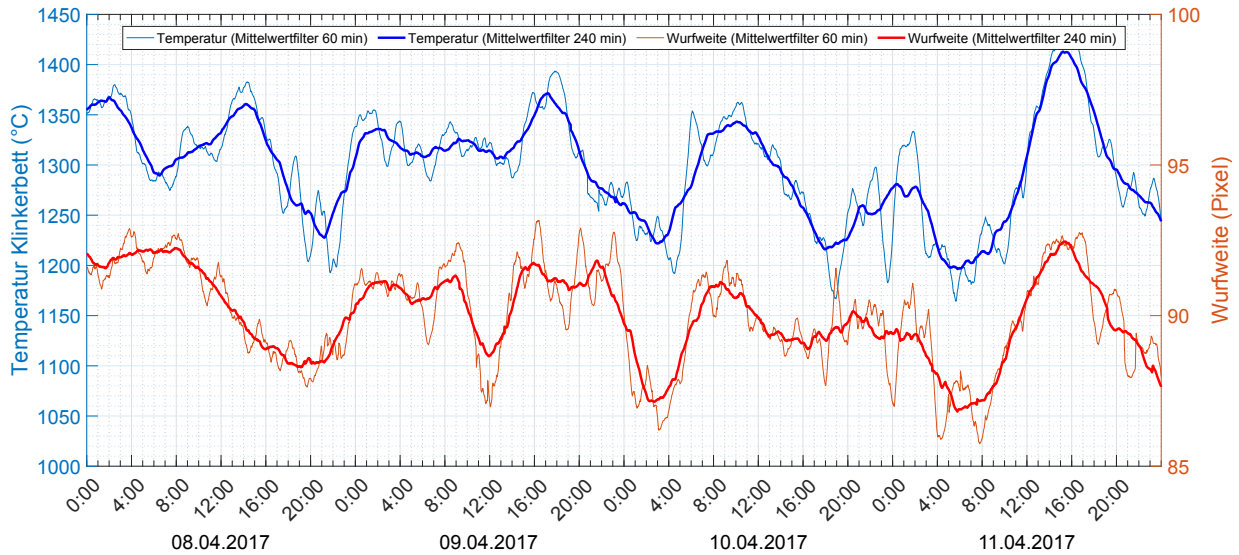
Ein Vergleich der Verläufe zeigt einen Anstieg der Temperatur bei Steigerung der Wurfweite. Eine Steigerung der Wurfweite resultiert aus einer Steigerung des Austrittswinkels des Brennstoffes aus der Brennerspitze. Die dadurch erhaltene höhere Streichlinie führt zu einer längeren Aufenthaltsdauer des Brennstoffes innerhalb der Brennerflamme, wodurch eine bessere Brennstoffumsetzung erreicht wird und damit die Erhöhung der Temperatur der Flamme erklärt werden kann.

Tabelle 5.3 beinhaltet die Korrelationen zwischen Temperatur und Wurfweite der ausgewählten Zeiträume.

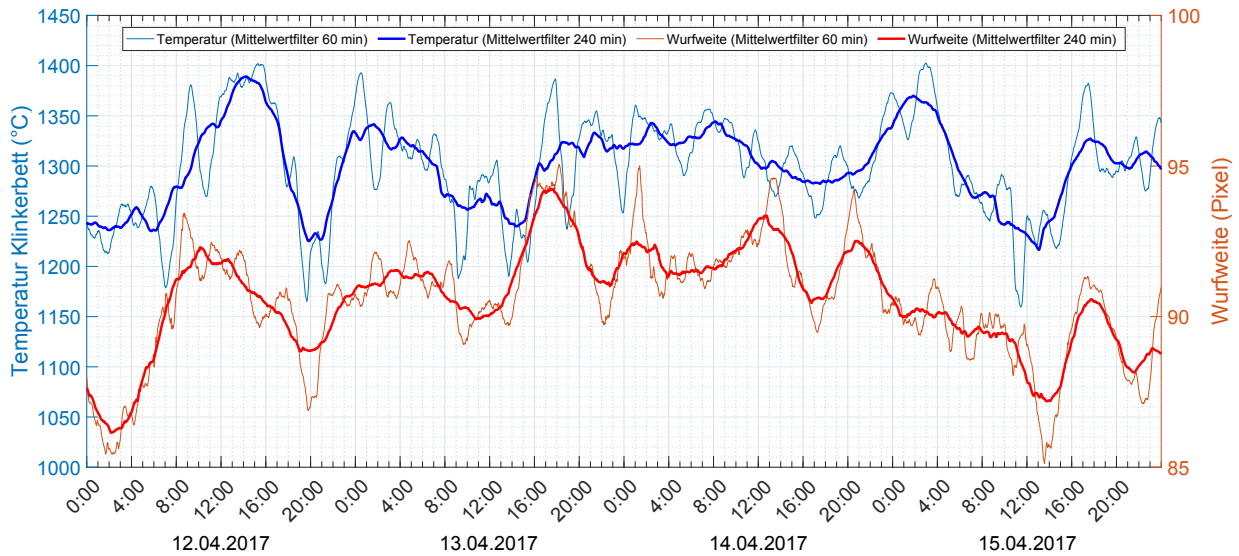
**Tabelle 5.3:** Tageweise Korrelationen zwischen Wurfweite und Temperatur im Klinkerbett.

Datum	11.03.	12.03.	13.03.	14.03.	08.04.	09.04.
Korrelation	0.65	0.55	0.83	0.66	0.53	0.24
Datum	10.04.	11.04.	12.04.	13.04.	14.04.	15.04.
Korrelation	0.69	0.98	0.73	0.31	0.03	0.72

Der zeitliche Versatz durch die verzögerte Reaktion der Temperatur im Klinkerbett auf sich ändernde Brennereinstellungen wird für die Korrelationsberechnung nicht beachtet, da die Reaktionszeit nicht bekannt ist und je nach Umgebungsbedingungen stark schwanken kann. Die bis auf wenige Ausnahmen hohen Korrelationen ohne Zeitversatz bestätigen den



(a)



(b)

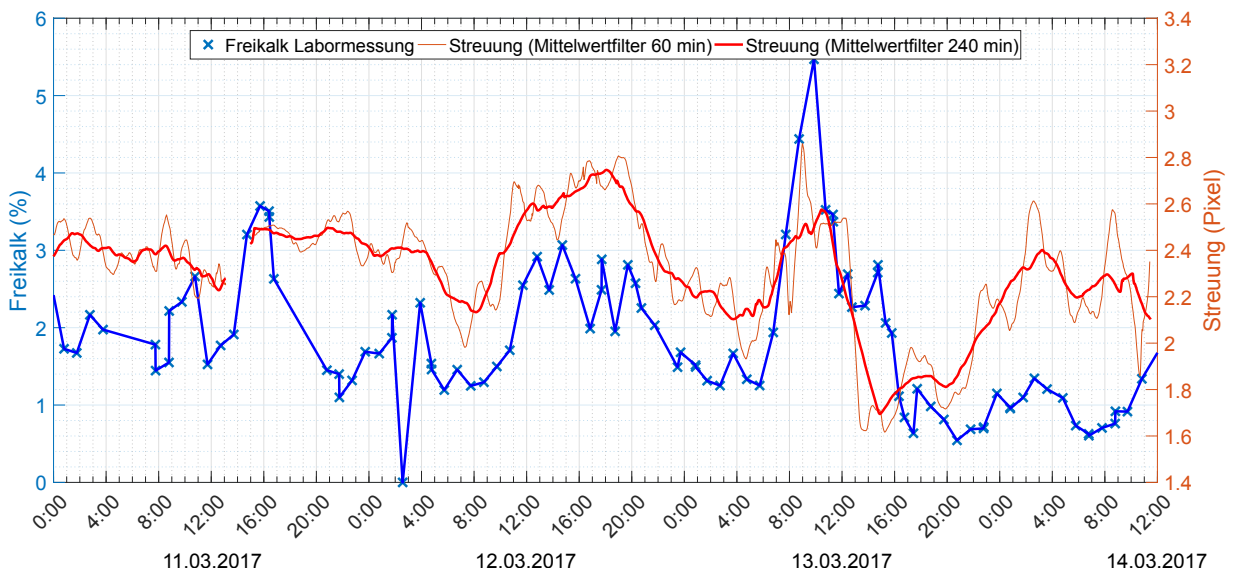
**Abbildung 5.7:** Vergleich der Wurfweite (rot) und der Temperatur im Klinkerbett (blau) für Messtage im April.

durch einen visuellen Vergleich der Verläufe gewonnenen direkten Zusammenhang zwischen Wurfweite und Temperatur im Klinkerbett. Geringe Korrelationen, wie etwa am 14.04. sind bei Betrachtung der Prozessdaten darauf zurückzuführen, dass in diesem Zeitraum der Energieeintrag (Brennstoffmenge) ebenfalls schwankt und damit zusätzlich auf die Temperatur im Klinkerbett Einfluss nimmt.

### 5.1.3 Streuung

Die Streuung des alternativen Brennstoffes kann ebenfalls für eine bessere Umsetzung des Brennstoffes in der Brennerflamme sorgen und damit zu höheren Temperaturen der Brennerflamme führen. Erhöhte Streuwerte können allerdings auch die Klinkerqualität durch in den Klinker fallenden unverbrannten Brennstoff negativ beeinflussen.

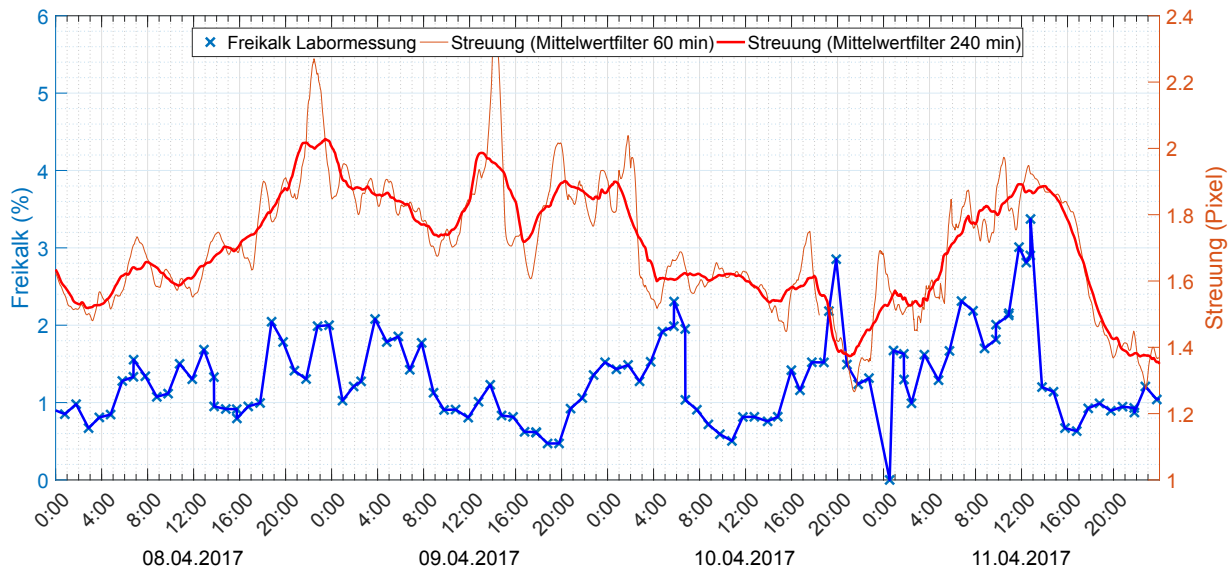
Abbildungen 5.8 und 5.9 zeigen den Vergleich der geglätteten Kenngröße Streuung und des Freikalkes für verschiedene Zeiträume. Wie zuvor erläutert, liegt der Freikalk nur in größeren Zeitabständen von bis zu einer Stunde vor. Durch die lineare Interpolation zwischen den Messwerten kann ein Zusammenhang zwischen erhöhter Streuung und erhöhtem Freikalk erkannt werden.



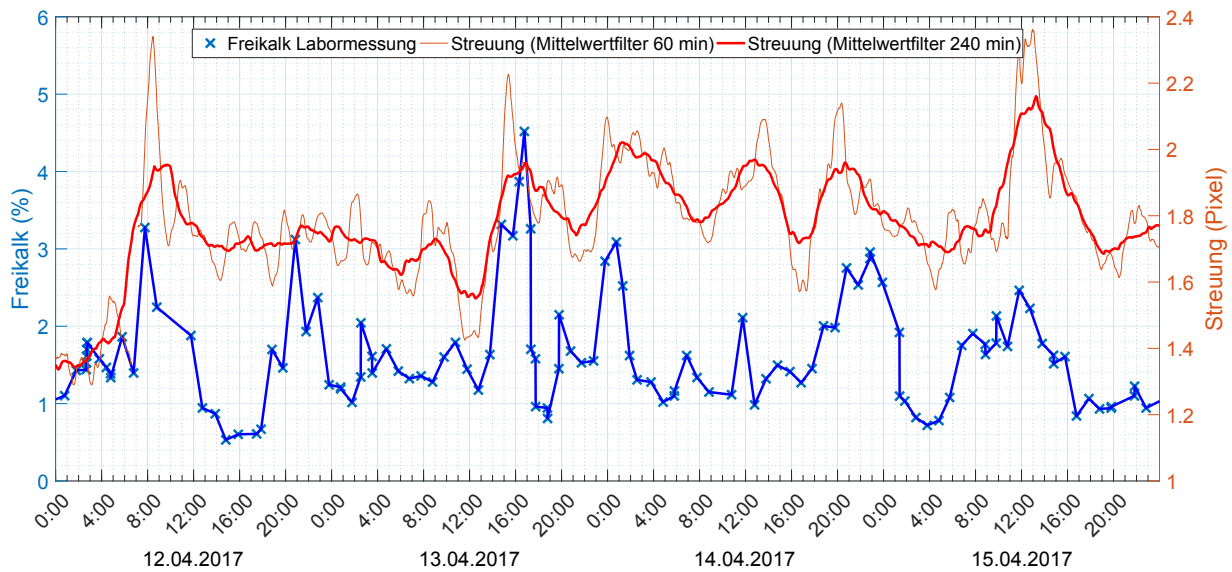
**Abbildung 5.8:** Vergleich der Streuung (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im März.

Eine Betrachtung der Korrelationen zwischen beiden Größen in Tabelle 5.4 verdeutlicht den Zusammenhang.

Für die Auswertung der Korrelation wurde der Zeitversatz zwischen Probeentnahme und Bereitstellung des Messwertes durch zeitliche Verschiebung der Freikalkmesswerte berücksichtigt. Dafür wurden die Freikalkmesswerte eines Tages zwischen 30 und 60 Minuten



(a)



(b)

**Abbildung 5.9:** Vergleich der Streuung (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im April.

**Tabelle 5.4:** Tageweise Korrelationen zwischen Streuung und zeitlich verschobenen Messwerten des Freikalkes.

Datum	11.03.	12.03.	13.03.	14.03.	08.04.	09.04.
Korrelation	0.25	0.73	0.56	0.48	0.68	0.37
Datum	10.04.	11.04.	12.04.	13.04.	14.04.	15.04.
Korrelation	0.18	0.55	0.25	0.51	0.31	0.40

zeitverschoben und für jede verschobene Minute die Korrelation bestimmt. Der größte Korrelationswert wurde in Tabelle 5.4 eingetragen.

Da der Freikalk hauptsächlich durch die Temperatur im Klinkerbett bestimmt wird, sind höhere Korrelationswerte zwischen Streuung und Freikalk nicht zu erwarten. Bis zu einem gewissen Maße führt eine hohe Streuung zu einer besseren Umsetzung des Brennstoffes, damit zu höheren Temperaturen der Brennerflamme und dadurch zu geringeren Freikalkwerten. Wird die Streuung zu groß, schwenkt das Verhalten um und der Freikalkanteil erhöht sich wieder. Das ambivalente Verhalten führt zu den Schwankungen der Korrelation zwischen Werten von 0.18 (kaum Korrelation) und 0.73 (hohe Korrelation).

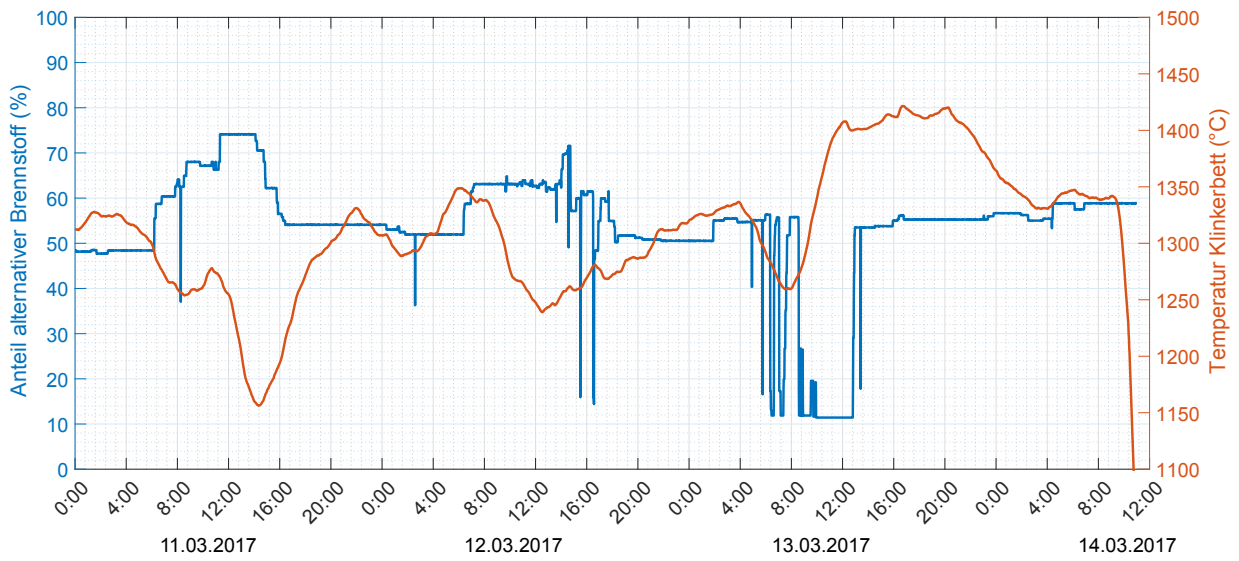
## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

Die vorangegangenen Abschnitte haben gezeigt, dass die Kenngrößen Wurfweite und Streuung des alternativen Brennstoffes und die Temperatur im Klinkerbett Informationen über die zu erwartende Qualität des Klinkers liefern. Die komplexen Zusammenhänge im Prozess führen dazu, dass die Betrachtung einer Kenngröße alleine für die Beurteilung der Qualität nicht ausreichend ist. Nachfolgend werden die Ergebnisse der zuvor verwendeten repräsentativen Zeiträume im März und April in Anbetracht aller Kenngrößen diskutiert.

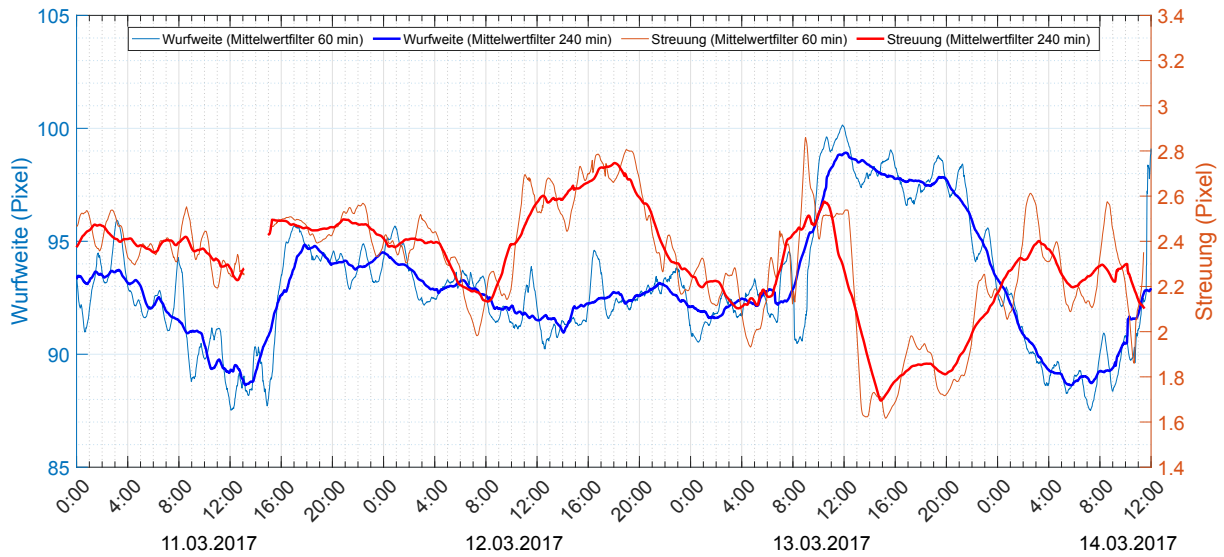
Zur Übersicht zeigt Abbildung 5.10 die Temperatur im Klinkerbett im Vergleich zum Anteil alternativer Brennstoffe am Mehrstoffbrenner, die Kenngrößen Wurfweite und Streuung des Mehrstoffbrenners und die Messwerte des Freikalkes für den Zeitraum im März. Die Brenneinstellungen sind für den kompletten Zeitraum konstant und in Tabelle 5.5 aufgeführt.

**Tabelle 5.5:** Brenneinstellungen bei Langzeitmessungen mit prototypischen Messsystem.

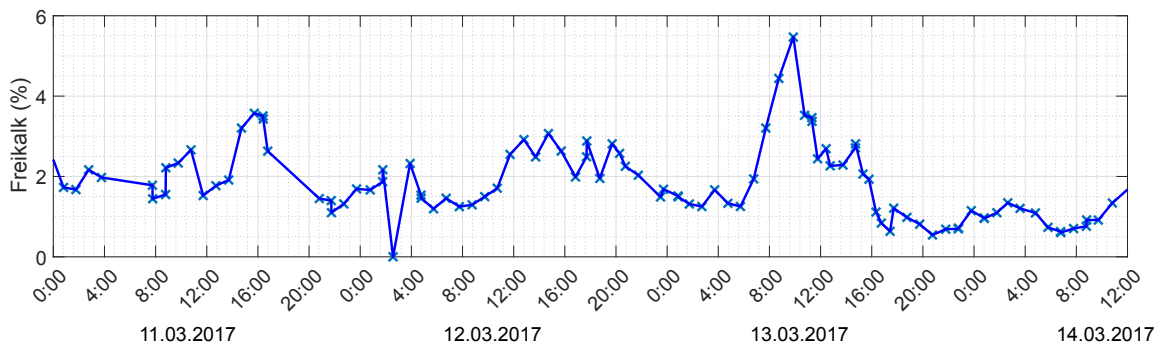
Pneumodeflektor (mbar)	Zentralluft (mbar)	Primärluft (mbar)	Drehzahl Förderluftgebläse (U/min)
180	100	230	2210



(a)



(b)

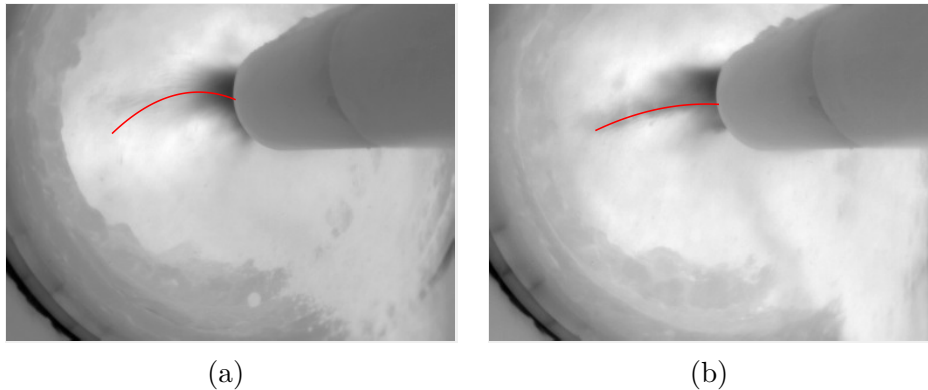


(c)

**Abbildung 5.10:** (a) Prozessdaten und (b) Kenngrößen des alternativen Brennstoffes im Vergleich zu den (c) Freikalkmesswerten für Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017.



Der erwartete Verlauf von sinkender Temperatur auf Grund sinkender Wurfweite und Streuung des alternativen Brennstoffes kann für den 11.03. von 0 bis 15 Uhr beobachtet werden. Die Änderungen am Brenner wurden dabei durch eine Erhöhung des alternativen Brennstoffanteiles ausgelöst. Die Wurfweite erreicht dabei zuerst das Minimum um etwa 14 Uhr, die Temperatur um etwa 15 Uhr. Das Maximum des Freikalkes wird dem Anlagenführer erst kurz vor 16 Uhr über die Labormessung mitgeteilt. Abbildung 5.11 zeigt ein Beispiel für den Wechsel auf die niedrige Flugkurve mit erhöhtem alternativem Brennstoffanteil.

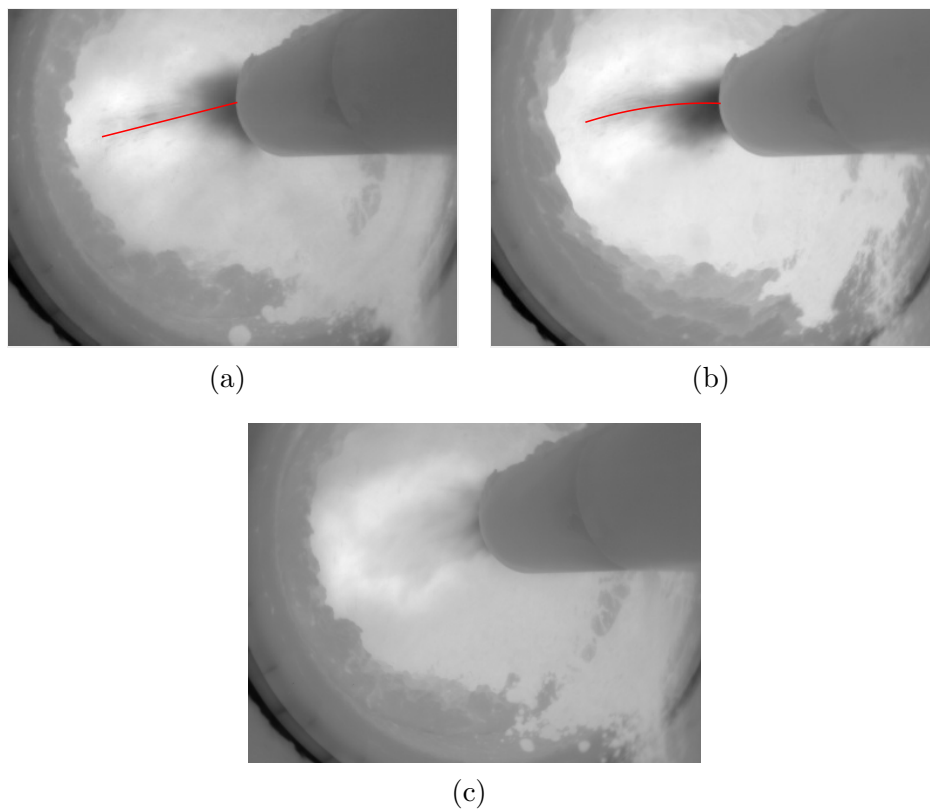


**Abbildung 5.11:** Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017. (a) 11.03. 4:00 Uhr. (b) 11.03. 14:00 Uhr.

Im weiteren Verlauf wird am 12.03. um 7 Uhr wiederum der alternative Brennstoffanteil erhöht, wodurch die Temperatur erneut kurzzeitig abfällt und dadurch der Freikalk steigt. Nach dem Temperaturabfall steigt die Streuung des Brennstoffes deutlich an, bei gleich bleibender Wurfweite. Die Temperatur steigt dadurch ebenfalls langsam wieder an und erreicht auch durch Verringerung des alternativen Brennstoffanteiles um etwa 22:00 Uhr wieder Werte wie vor dem Temperaturabfall. Bei Betrachtung des Freikalkes im Zeitraum von 16 bis 20 Uhr fällt auf, dass trotz steigender Temperaturen Schwankungen zu höheren Freikalkwerten zu erkennen sind. Dies ist auf die erhöhten Streuwerte des alternativen Brennstoffes in diesem Zeitraum zurückzuführen. Nachdem der Streuwert wieder gesunken ist, normalisiert sich der Freikalkverlauf wieder auf niedrige Werte.

Am 13.03. ab 4 Uhr treten Probleme mit der alternativen Brennstoffzufuhr auf. Die Temperatur im Klinkerbett fällt daraufhin bis 8 Uhr auf ein Minimum ab und hohe Freikalkwerte werden zeitlich versetzt bis zum Maximum bei etwa 10 Uhr gemessen. Ab 13 Uhr wird wieder ein konstanter Anteil an alternativen Brennstoffen mit großen Wurfweiten für den Brenner verwendet. Die Temperatur steigt dadurch deutlich an und der Freikalk nimmt konstant niedrige Werte an. Mit Absinken der Wurfweite um 0 Uhr am 14.03. sinkt die Temperatur wieder auf Werte, wie vor den Problemen mit der Brennstoffzufuhr. Abbildung 5.12 zeigt Beispiele für die niedrige Streichlinie vor den Problemen und die hohe Streichlinie nach Erhöhung des alternativen Brennstoffanteiles. Abbildung 5.12(c) zeigt außerdem die Abwesenheit von alternativem Brennstoff bei Problemen mit der Brennstoffzufuhr.





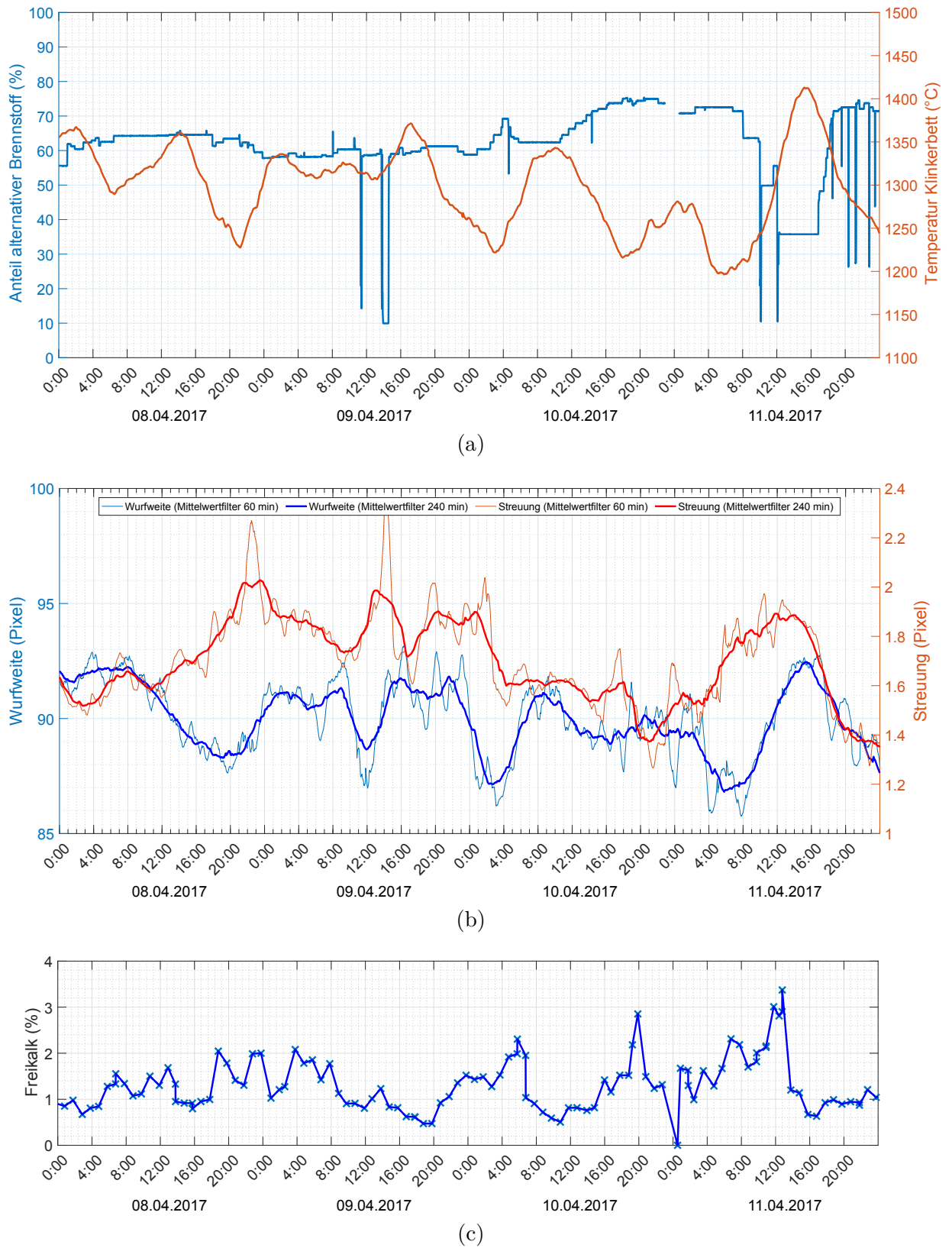
**Abbildung 5.12:** Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017. (a) 13.03. 8:00 Uhr. (b) 13.03. 20:00 Uhr. (c) 13.03. 8:00 Uhr, Ausfall alternativer Brennstoff.

Für den Zeitraum im April, wird die Woche vom 08.04. bis 11.04. in Abbildung 5.13 genauer betrachtet. Trotz konstanter alternativer Brennstoffanteile schwankt in diesem Zeitraum der Freikalk. Die Brenneinstellungen sind bis auf eine höhere Drehzahl von 2300 bis 2400 Umdrehungen pro Minute, die zu geringeren Streuwerten führen, identisch mit dem zuvor betrachteten Zeitraum im März (Tabelle 5.5).

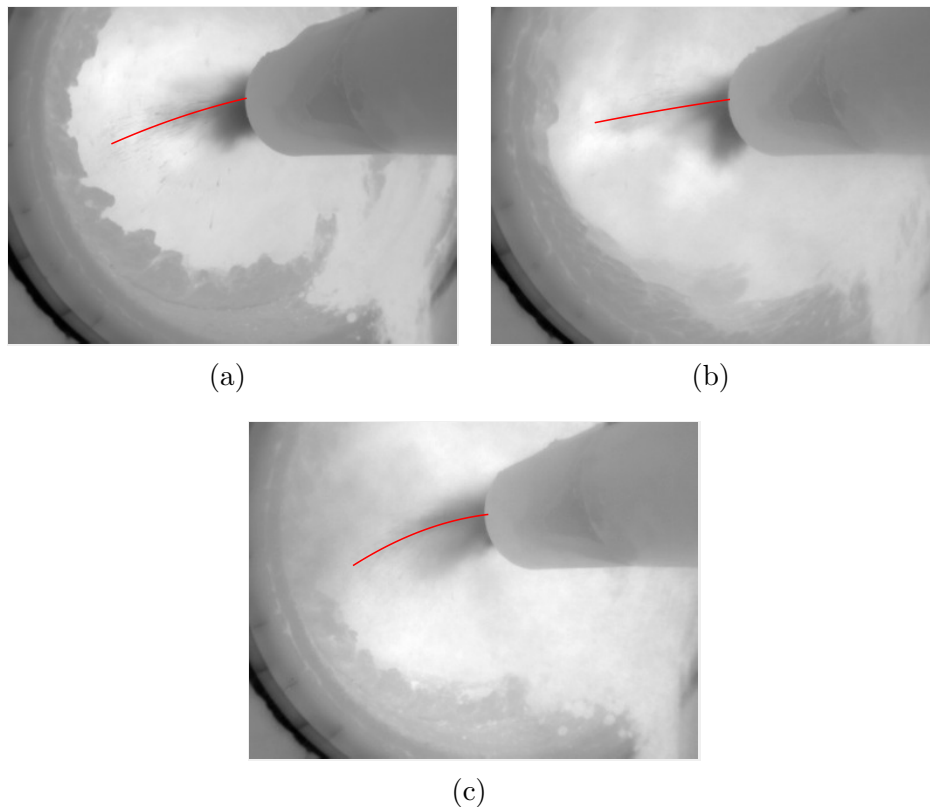
Ein Blick auf den Temperaturverlauf erklärt die Schwankungen im Verlauf des Freikalkes. Temperatureinbrüche am 08.04. um 21 Uhr, am 10.04. um 3 Uhr und am 11.04. um 6 Uhr können durch entsprechend vorheriges Absinken der Wurfweite erklärt werden und führen zu den Schwankungen.

Auffällig ist außerdem am 09.04. um 12 Uhr das Absinken der Wurfweite bei gleichzeitigem Anstieg der Streuung des Brennstoffes, wodurch die Temperatur in diesem Zeitraum konstant bleibt. Abbildung 5.14 zeigt ein Beispiel der stärkeren Streuung um 12 Uhr im Vergleich zur höheren Wurfweite und geringeren Streuung um 20 Uhr. Außerdem ist in Abbildung 5.14(c) ein Beispiel für die niedrige Streichlinie und damit geringe Wurfweite am 10.04. um 2 Uhr, die nachfolgend zu einem Temperatureinbruch führt, dargestellt.

Im weiteren Verlauf tritt am 11.04. um 12 Uhr eine Freikalkspitze auf, obwohl zu diesem Zeitpunkt hohe Temperaturen gemessen wurden. In diesem Fall kann die Erhöhung wiederum auf die erhöhte Streuung des alternativen Brennstoffes zurückgeführt werden. Eine hohe



**Abbildung 5.13:** (a) Prozessdaten und (b) Kenngrößen des alternativen Brennstoffes im Vergleich zu den (c) Freikalkmesswerten für Bilddaten vom 08.04.-11.04.2017.



**Abbildung 5.14:** Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 08.04.-11.04.2017. (a) 09.04. 12:00 Uhr. (b) 09.04. 20:00 Uhr. (c) 10.04. 4:00 Uhr.

Streuung bei geringer Wurfweite führt zu einer kurzen Flamme und dadurch einer höheren Temperatur im Messfeld am Drehrohrende. Allerdings wird die Temperatur weiter im Drehrohrinneren speziell in der Sinterzone bei einer kurzen Flamme geringer, wodurch das Brennen des Klinkers negativ beeinflusst wird und hohe Freikalkwerte erhalten werden.

Die nähere Betrachtung der Kenngrößenverläufe hat gezeigt, dass zur vollständigen Beschreibung des Verbrennungsprozesses und für eine Einschätzung der aktuellen Qualität, alle verfügbaren Kenngrößen herangezogen werden müssen. Die Kenngrößen des Mehrstoffbrenners liefern die ersten Informationen über die Verbrennung des alternativen Brennstoffes, die nachfolgend Änderungen der Temperatur im Klinkerbett bewirken. Erst deutlich zeitversetzt können aktuell die Auswirkungen der Änderungen durch die Labormessung des Freikalkes bestätigt werden. Weiterhin gilt es für den Vergleich mit den Freikalkmesswerten als Qualitätsparameter des Klinkers zu beachten, dass diese nur für wenige Messzeitpunkte vorliegen und zwischen den Messzeitpunkten keine Informationen vorliegen. Der Vorteil der Kenngrößen Temperatur im Klinkerbett und den neuen Mehrstoffbrennerkenngrößen Wurfweite und Streuung stellt damit eine durchgehende Online-Überwachung des Verbrennungs- und damit auch des Sinterprozesses dar.



## 6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand in der Entwicklung neuer Verfahren zur kamera-basierten Online-Überwachung alternativer Brennstoffe in Mehrstoffbrennerflammen, um die schwankenden Eigenschaften der Brennstoffe beurteilen und diesen frühzeitig entgegenwirken zu können. Hierzu wurden im Rahmen des KIC INNOENERGY Innovationsprojektes COMFEB industrielle Mehrstoffbrenner in Zementdrehrohröfen, einem der wichtigsten Einsatzgebiete von Mehrstoffbrennern, betrachtet.

Die Verwendung eines MIR-Kamerasystems in einem definierten Wellenlängenbereich bietet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit, durch die Verbrennungsgase und Ruß hindurch die unverbrannten alternativen Brennstoffanteile zu erkennen und zu beurteilen. In der vorliegenden Arbeit wurde das Potential der MIR-Kamerasysteme, im Vergleich mit anderen verfügbaren Kamerasystemen, vorgestellt und aufgezeigt, dass unterschiedliche Flugverhalten der Brennstoffe in den MIR-Bildern nachgewiesen werden können. Änderungen des Flugverhaltens entstehen durch die schwankenden Eigenschaften, wie Feuchtigkeit oder Partikelgröße, gerade alternativer Brennstoffe und beeinflussen damit auch den Verbrennungsprozess der Brennerflamme.

Der Einsatz der neu entwickelten Bildverarbeitungsverfahren auf MIR-Bildern der Brennerflamme ermöglicht eine Beurteilung des Flugverhaltens der alternativen Brennstoffe. Ein wichtiger Bestandteil stellt dabei die Streichlinie des alternativen Brennstoffes dar, die Aufschluss darüber gibt, wie lange sich der Brennstoff innerhalb der Brennerflamme aufhält und damit die Zeit zur vollständigen Verbrennung entlang der Flugbahn vorgibt. Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Detektion der mittleren Streichlinie und die daraus abgeleiteten neuen Prozesskenngrößen liefern demzufolge wichtige neue Informationen über das aktuelle Verbrennungsverhalten der Brennerflamme und den Einfluss der schwankenden Eigenschaften der alternativen Brennstoffe auf die Temperatur im Drehrohr. Mehrere Messkampagnen an einer industriellen Zementdrehrohranlage unter realen Prozessbedingungen haben gezeigt, dass die neuen Verfahren auch unter schwierigen und stark schwankenden Umgebungsbedingungen konstant zuverlässige Ergebnisse liefern. Im Vergleich zu den bisher an Anlagen verfügbaren Überwachungsmöglichkeiten des Verbrennungsprozesses, zum Beispiel der Qualitätsmessung im Labor, kann auf diese Weise aktuell und damit bis zu einer Stunde früher als bisher auf sich ändernde Verbrennungsbedingungen reagiert werden. Dadurch kann die Produktion von schlecht gebranntem Material auch beim Einsatz von hohen Anteilen an alternativen Brennstoffen reduziert bzw. komplett verhindert werden.

Die neuen Verfahren wurden in ein bestehendes System zur Optimierung thermischer Prozesse integriert und befinden sich als neues Überwachungssystem aktuell an Anlagen im Einsatz (Abbildung 6.1), wo sie Akzeptanz der Anlagenbetreiber erfahren. Die vorliegende



**Abbildung 6.1:** Integration des neuen Überwachungssystems in das Prozessleitsystem einer Zementanlage (unterer mittlerer Bildschirm).

Arbeit beschreibt damit, aufbauend auf dem in Kapitel 1 dargestellten Stand der Technik, die Entwicklung eines neuartigen Überwachungssystems für Mehrstoffbrenner von der Auswahl der Sensorik über die Bildverarbeitung bis hin zum Einbau des neu entwickelten Systems in einen industriellen Prototyp für den Dauereinsatz.

In Kapitel 2 wurde das neue Konzept für die Bildverarbeitung zur Detektion des alternativen Brennstoffes und allgemein zur Überwachung von Mehrstoffbrennern vorgestellt. Grundlage dafür sind die unterschiedlichen Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern je nach Qualität des Brennstoffes bzw. Einstellungen des Brenners.

Kapitel 3 beinhaltet die detaillierte Vorstellung der einzelnen Bildverarbeitungsverfahren, die zur Detektion des alternativen Brennstoffes notwendig sind und auf deren Basis die mittlere Streichlinie und Prozesskenngrößen abgeleitet werden können. Zunächst sorgen Bildvorverarbeitungsverfahren für den Ausgleich der spezifischen Herausforderungen der industriellen Umgebungsbedingung und damit für eine zuverlässige Durchführung der anschließenden Detektion des alternativen Brennstoffes. Über den Aufenthaltsort des Brennstoffes werden die mittlere Streichlinie unter den physikalischen Randbedingungen als schiefer Wurf geschätzt und Kenngrößen wie die Wurfweite berechnet.

Die Detektion der mittleren Streichlinie wurde in Kapitel 4 zum einen anhand einer Expertenauswertung und zum anderen mit Hilfe eines 3D-Simulationsmodells evaluiert. Da keine Referenzdaten für die Problemstellung existieren, wurde ein neues Tool entwickelt, mit dem eine Auswertung der MIR-Kamerabilder durch Experten durchgeführt und damit ein eigener Referenzdatensatz erzeugt werden kann. Ebenfalls neu entwickelt wurde ein 3D-Simulationsmodell bestehend aus Drehrohr und einstellbaren Mehrstoffbrennerparametern, wodurch die mittlere Streichlinie des alternativen Brennstoffes eindeutig vorgegeben werden kann.

Kapitel 5 analysiert die Relevanz der neu gewonnenen bildbasierten Kenngrößen im Vergleich zu den Prozessdaten bei der Zementklinkerherstellung. Zudem konnten Zusammenhänge

zwischen der Qualität des Klinkers, der Temperatur im Klinkerbett und den Kenngrößen hergestellt werden.

Zusammenfassend ergeben sich die wesentlichen Ergebnisse der Arbeit:

1. Analyse der Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes in MIR-Kamerabildern,
2. Entwicklung neuer Methoden zur Beurteilung der Bildgüte anhand der Sichtbedingungen und Überprüfung der Aufnahmekonstellation,
3. Entwicklung eines neuartigen Segmentierungsverfahrens zur Detektion von Überdeckungen durch Anbackungen an der Drehrohrinnenwand,
4. Entwicklung neuer Verfahren zur Detektion des alternativen Brennstoffes unterschiedlicher Erscheinungsform,
5. Ableitung der mittleren Streichlinie und darauf basierender Kenngrößen zur Beschreibung des Flug- und Verbrennungsverhaltens des alternativen Brennstoffes,
6. Entwicklung eines neuen Software-Tools zur Erzeugung von Referenzdaten basierend auf der menschlichen Wahrnehmung,
7. Entwicklung eines 3D-Simulationsmodells des Mehrstoffbrenners zur Erzeugung neuartiger Referenzdaten,
8. Evaluation der neu entwickelten Verfahren anhand der neu erzeugten Referenzdaten,
9. Ableitung von Aussagen über den Zusammenhang zwischen bildbasierten Kenngrößen und konventionellen Labormessungen der Klinkerqualität beim Zementherstellungsprozess und
10. Implementierung aller entwickelten Verfahren in das System INSPECT PRO CONTROL<sup>®</sup> zur Optimierung thermischer Prozesse und damit prototypische Verwendung der neuen Verfahren an verschiedenen industriellen Zementdrehrohranlagen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit stellen damit ein zuverlässiges Online-Überwachungssystem für Mehrstoffbrenner dar und ermöglichen es, auch bei hohen Anteilen alternativer Brennstoffe bzw. stark schwankender Qualität der Brennstoffe, für konstante Verbrennungsbedingungen zu sorgen. Die Verfahren und das Überwachungskonzept wurden durch ein Patent [106] geschützt.

Basierend auf den Ergebnissen ergeben sich zukünftig folgende weitere Schritte:

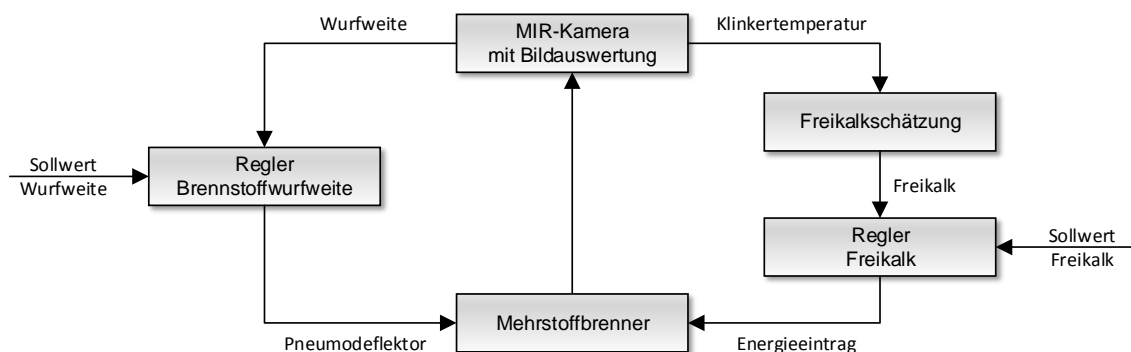
- Optimierung und Erweiterung der Bildverarbeitungsverfahren basierend auf Langzeitauswertungen und Erfahrungen der Anlagenbetreiber durch Verwendung des entwickelten Prototyps.
- Umsetzung eines Regelungskonzeptes des Mehrstoffbrenners und Einsatz der Regelung bei realen Prozessbedingungen.

Für ein zukünftiges Regelungskonzept kann hierbei aus den Ergebnissen des prototypischen Messsystems ein erster Vorschlag formuliert werden. Wurfweite und Streuung des alternativen Brennstoffes dienen dabei zur frühzeitigen Reaktion auf schwankende Eigenschaften des Brennstoffes, wie Partikelgröße und Feuchtigkeit, die das Flugverhalten und damit die Temperatur der Brennerflamme beeinflussen. Temperaturschwankungen, die durch das Flugverhalten des Brennstoffes nicht beschrieben werden können, wie etwa die Änderung des Heizwertes des Brennstoffes, können durch zusätzliche Betrachtung der Temperatur im Klinkerbett berücksichtigt werden. Wie in Abschnitt 5.1.1 gezeigt, kann auf Grund des näherungsweise linearen Zusammenhanges zwischen Klinkertemperatur und Freikalk (Klinkerqualität) die Klinkertemperatur für die Freikalkschätzung herangezogen werden. Die Stellgrößen Pneumodeflektor und Energieeintrag des Mehrstoffbrenners ermöglichen hierbei entsprechend die Beeinflussung von Wurfweite und Klinkertemperatur.

Bei dem erhaltenen Mehrgrößensystem gilt es zu beachten, dass Querkopplungen zwischen den verschiedenen Größen bestehen. Dabei hat der Pneumodeflektor zum einen direkten Einfluss auf die Wurfweite des Brennstoffes (kleine Zeitkonstante). Zum anderen wird eine anhaltende Änderung der Wurfweite auch die Klinkertemperatur beeinflussen, wobei auf Grund der Trägheit des Prozesses eine langsame Reaktion zu erwarten ist (große Zeitkonstante). Änderungen des Energieeintrages führen zu einer langsamen Veränderung der Klinkertemperatur (große Zeitkonstante), können sich aber in vernachlässigbarem Maße auch auf die Wurfweite auswirken.

Auf Grund dieser Erkenntnis kann ein erster Vorschlag für die Regelung eines Mehrstoffbrenners mit Hilfe einer MIR-Kamera und anschließender Bildauswertung formuliert werden. Die zuvor beschriebene Dynamik der Regelgrößen mit unterschiedlichen Zeitkonstanten führt hierbei, wie in Abbildung 6.2 dargestellt, durch Zeitskalentrennung (bzw. Singulärstörungsargumenten) zu zwei getrennten Regelkreisen:

1. Wurfweitenregelung durch Einstellung des Pneumodeflektors mit kleiner Zeitkonstante.
2. Freikalkregelung durch Einstellung des Energieeintrages (Brennstoffmenge) am Mehrstoffbrenner mit großer Zeitkonstante.



**Abbildung 6.2:** Schema zur Regelung eines Mehrstoffbrenners durch eine MIR-Kamera.



Die Umsetzung und Weiterentwicklung dieses ersten Vorschlages für eine Regelung von Mehrstoffbrennern gilt es in zukünftigen Arbeiten weiter zu verfolgen. Erste Untersuchungen zur virtuellen Identifikation der Dynamik des Mehrgrößensystems können z.B. anhand des neu erstellten Simulationsmodells in Blender durchgeführt werden.

Aktuell bietet das vorgestellte Überwachungssystem das Potential täglichen Ausfällen im Herstellungsprozess, d.h. die Herstellung von Klinker schlechter Qualität auf Grund nicht konstanter Verbrennungsbedingungen, entgegenzuwirken. Nach Angaben von Anlagenbetreibern kann durch eine konstante Online-Überwachung eine tägliche Produktion von etwa 80 t Klinker schlechter Qualität verhindert werden und damit täglich etwa 400 € eingespart werden.

Die Entwicklung in der energieintensiven Zementindustrie hin zur erhöhten Substitution von Kohlebrennstoffen durch alternative Brennstoffe kommt gerade in Zeiten, in denen international über den Kohleaustritt diskutiert und nach Alternativen zur Müllentsorgung gesucht wird, eine wichtige Rolle zu. Das vorgestellte neue Überwachungssystem unterstützt diese Entwicklung, indem aktuelle Informationen über den Verbrennungsprozess bereitgestellt werden und dadurch konstante Verbrennungsbedingungen und damit auch konstante Klinkerqualität bei hohen Anteilen an alternativen Brennstoffen gewährleistet werden. Durch die dauerhafte 24/7 Online-Überwachung kann darüber hinaus zukünftig der Anteil an alternativen Brennstoffen noch weiter gesteigert werden.



# A Anhang

## A.1 Schiefer Wurf in Welt- und Bildkoordinaten

Für eine Drehrohrverbrennungsanlage kann ein 3D Weltkoordinatensystem  $(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$  festgelegt werden. Hierbei zeigt die  $\hat{y}$ -Achse in das Drehrohr hinein, die  $\hat{z}$ -Achse nach oben und die  $\hat{x}$ -Achse beschreibt die seitliche Abweichung zur Drehrohrachse.

Der Verlauf der mittleren Streichlinie des alternativen Brennstoffes ist als schiefer Wurf und damit als Polynom zweiten Grades in Weltkoordinaten folgendermaßen gegeben:

$$\hat{z}(\hat{y}) = \hat{\theta}_2 \hat{y}^2 + \hat{\theta}_1 \hat{y} + \hat{\theta}_0. \quad (\text{A.1})$$

Nachfolgend wird diskutiert, ob die mittlere Streichlinie auch in den Bildkoordinaten  $(x, y)$  als Polynom zweiten Grades approximiert werden kann.

Allgemein kann die Transformation von Welt- in Bildkoordinaten über die Projektionsmatrix

$$\lambda \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{f}{C} & 0 & \frac{c_x}{2} \\ 0 & \frac{f}{C} & \frac{c_y}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_{\hat{x}} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_{\hat{y}} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_{\hat{z}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (\text{A.2})$$

durchgeführt werden. Dabei ist  $\lambda$  ein Skalierungsfaktor,  $f$  die Brennweite,  $C$  die Pixelgröße in Metern und  $(c_x, c_y)$  die Auflösung in  $x$ - und  $y$ -Richtung der Kamera.  $r$  und  $(t_{\hat{x}}, t_{\hat{y}}, t_{\hat{z}})$  bezeichnen die Rotations- und Translationskomponenten der Kameraposition in Weltkoordinaten.

Für den Anwendungsfall der Drehrohrverbrennungsanlage ergeben sich verschiedene Bedingungen für die Einbauposition und -ausrichtung der Kamera und damit für die Bildkoordinaten. Zum einen zeigt die  $y$ -Achse der Bildkoordinaten in negative Richtung der  $\hat{z}$ -Achse. Außerdem ist eine Rotation der Kamera in Richtung des Drehrohres notwendig, um aus der seitlichen Position neben dem Drehrohr einen Blick auf den Mehrstoffbrenner und den austretenden Brennstoff zu gewährleisten. Diese Bedingungen können durch Translationskomponenten für die seitliche Position und Rotationskomponenten für die Ausrichtung in Gleichung (A.2) berücksichtigt werden. Für die Ausrichtung der  $y$ -Achse der Bildkoordinaten in negative Richtung der  $\hat{z}$ -Achse ist eine Rotation der Weltkoordinaten um  $90^\circ$  um die  $\hat{x}$ -Achse notwendig. Hierfür lautet die Rotationsmatrix

$$R_{\hat{x}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(90^\circ) & -\sin(90^\circ) \\ 0 & \sin(90^\circ) & \cos(90^\circ) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.3})$$

Eine anschließende Rotation um  $\alpha_{\text{Rot}}$  um die  $\hat{y}$ -Achse ermöglicht den Blick auf Brenner und Brennstoff und wird durch die Rotationsmatrix

$$R_{\hat{y}} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{\text{Rot}}) & 0 & \sin(\alpha_{\text{Rot}}) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\alpha_{\text{Rot}}) & 0 & \cos(\alpha_{\text{Rot}}) \end{pmatrix} \quad (\text{A.4})$$

erhalten.

Die Gesamtroation  $R$  nach beiden Rotationen berechnet sich zu

$$R = R_{\hat{y}} \cdot R_{\hat{x}} = \begin{pmatrix} \cos(\alpha_{\text{Rot}}) & \sin(\alpha_{\text{Rot}}) & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -\sin(\alpha_{\text{Rot}}) & \cos(\alpha_{\text{Rot}}) & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ r_{31} & r_{32} & 0 \end{pmatrix}. \quad (\text{A.5})$$

Die an den Anwendungsfall angepasste Transformation von Welt- in Bildkoordinaten lautet damit

$$\begin{aligned} \lambda \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{f}{C} & 0 & \frac{c_x}{2} \\ 0 & \frac{f}{C} & \frac{c_y}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 & t_{\hat{x}} \\ 0 & 0 & -1 & t_{\hat{y}} \\ r_{31} & r_{32} & 0 & t_{\hat{z}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \\ \hat{z} \\ 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{f}{C} & 0 & \frac{c_x}{2} \\ 0 & \frac{f}{C} & \frac{c_y}{2} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11}\hat{x} + r_{12}\hat{y} + t_{\hat{x}} \\ -\hat{z} + t_{\hat{y}} \\ r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}} \end{pmatrix}. \end{aligned} \quad (\text{A.6})$$

Mit der Polynomgleichung (A.1) ergeben sich für die einzelnen Zeilen der Koordinatentransformation:

$$\lambda x = \frac{f}{C} (r_{11}\hat{x} + r_{12}\hat{y} + t_{\hat{x}}) + \frac{c_x}{2} (r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}), \quad (\text{A.7})$$

$$\lambda y = \frac{f}{C} \left( -(\hat{\theta}_2 \hat{y}^2 + \hat{\theta}_1 \hat{y} + \hat{\theta}_0) + t_{\hat{y}} \right) + \frac{c_y}{2} (r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}), \quad (\text{A.8})$$

$$\lambda = r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}. \quad (\text{A.9})$$

Gleichung (A.9) in (A.7) eingesetzt ergibt

$$(r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}) x = \frac{f}{C} (r_{11}\hat{x} + r_{12}\hat{y} + t_{\hat{x}}) + \frac{c_x}{2} (r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}) \quad (\text{A.10})$$

und damit

$$\hat{y} = \frac{-(r_{31}\hat{x} + t_{\hat{z}}) x + \frac{f}{C} (r_{11}\hat{x} + t_{\hat{x}}) + \frac{c_x}{2} (r_{31}\hat{x} + t_{\hat{z}})}{r_{32}x - \frac{f}{C} r_{12} - \frac{c_x}{2} r_{32}}. \quad (\text{A.11})$$

Mit Gleichung (A.9) wird für Gleichung (A.8)

$$y = \frac{\frac{f}{C} \left( -(\hat{\theta}_2 \hat{y}^2 + \hat{\theta}_1 \hat{y} + \hat{\theta}_0) + t_{\hat{y}} \right)}{r_{31}\hat{x} + r_{32}\hat{y} + t_{\hat{z}}} + \frac{c_y}{2} \quad (\text{A.12})$$

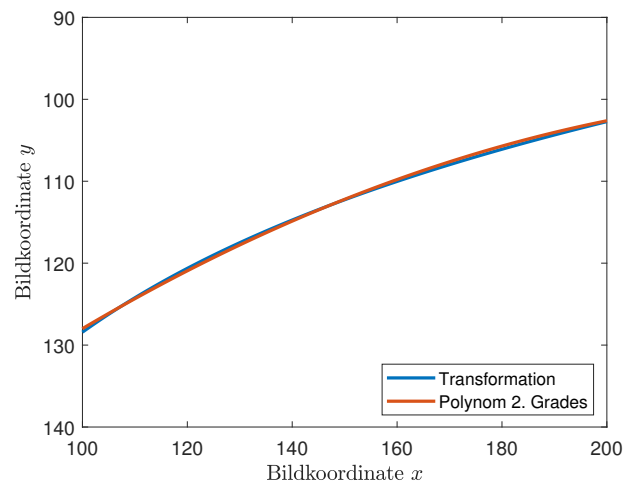
erhalten, wobei  $\hat{x}$  auf Grund der gleich bleibenden seitlichen Abweichung des Brennstoffes zur Drehrohrachse konstant ist. Nach Einsetzen von Gleichung (A.11) in (A.12) wird

die Flugkurve eines in Weltkoordinaten schiefen Wurfes in Bildkoordinaten durch eine gebrochen-rationale Funktion der Form

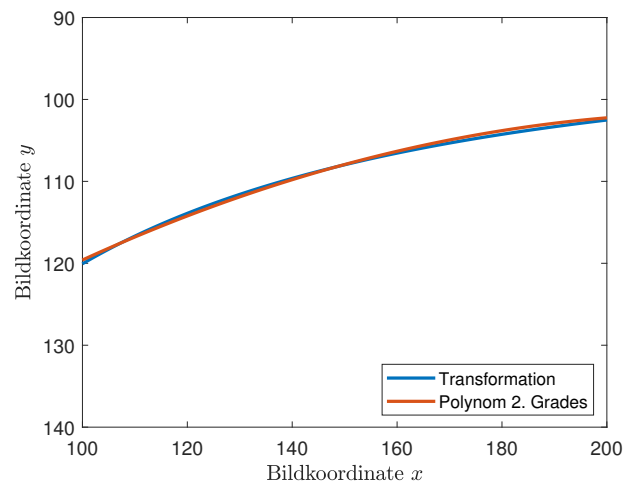
$$y = \frac{A_1x^2 + A_2x + A_3}{A_4x + A_5} \quad (\text{A.13})$$

beschrieben, mit den von den extrinsischen und intrinsischen Kameraparametern abhängigen Konstanten  $A_1, A_2, A_3, A_4$  und  $A_5$ .

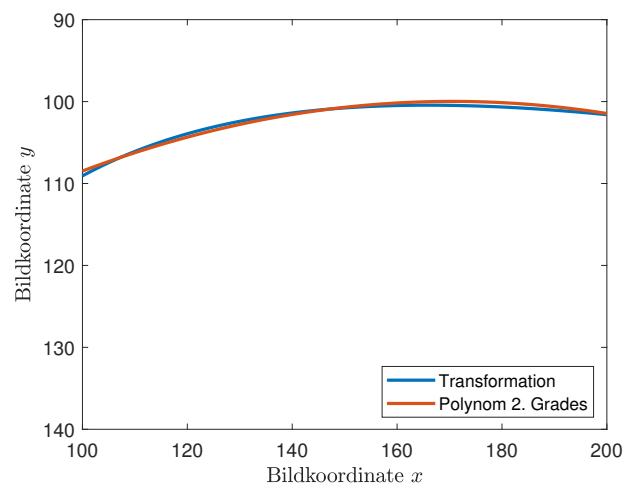
Dadurch liegt in Bildkoordinaten kein Polynom zweiten Grades vor, sondern ein komplexerer Zusammenhang. Für den in dieser Arbeit vorliegenden Anwendungsfall bei Verbrennungsprozessen im Drehrohr ist die komplette Flugkurve des Brennstoffes auf Grund von Überdeckungen und der Perspektive allerdings nicht sichtbar. Für den reduzierten, sichtbaren Abschnitt der Flugkurve wird zur Reduktion der Komplexität für den Anwendungsfall die Flugkurve auch in Bildkoordinaten durch ein Polynom zweiten Grades approximiert. Neben der Reduktion der Komplexität sind dadurch auch keine Informationen über die extrinsischen und intrinsischen Kameraparametern notwendig. Abbildung A.1 zeigt Beispiele für den Vergleich zwischen Transformation aus den Weltkoordinaten und vereinfachter Approximation der Flugkurve. Es wird deutlich, dass die Abweichung durch die Vereinfachung in Bildkoordinaten vernachlässigbar ist.



(a)



(b)

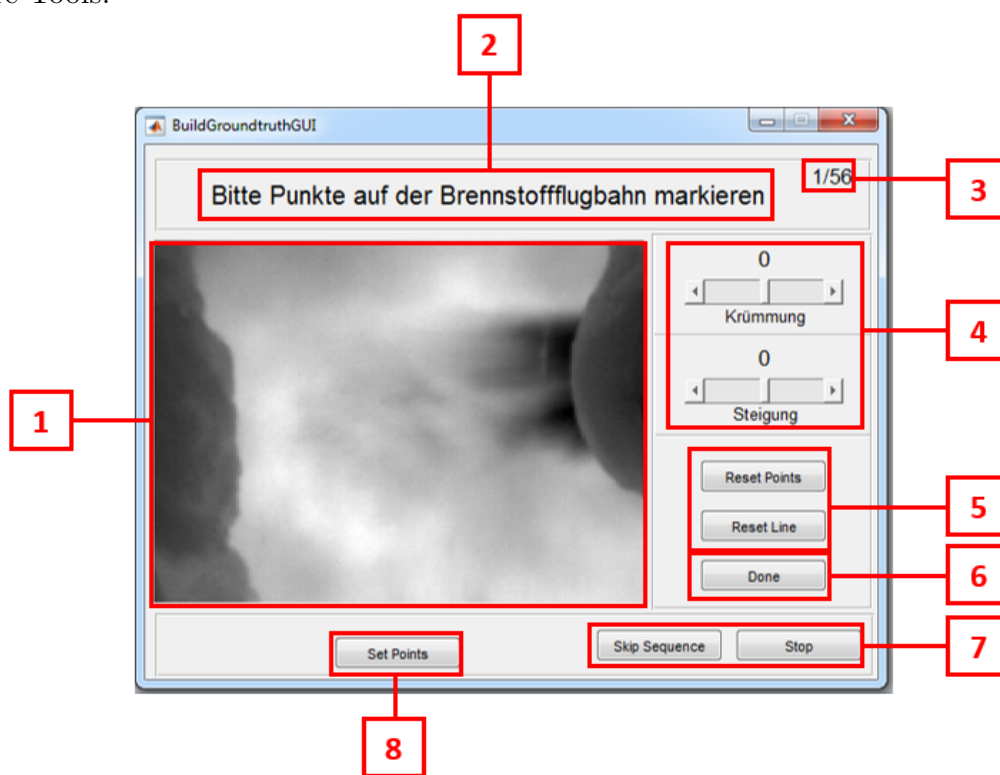


(c)

**Abbildung A.1:** Vergleich zwischen schiefem Wurf in Weltkoordinaten transformiert in Bildkoordinaten und der Approximation durch ein Polynom zweiten Grades für (a) keine, (b) mittlere und (c) hohe vertikale Ablenkungen der Flugkurve am Austrittspunkt des Brennstoffes.

## A.2 Tool zur benutzerdefinierten Auswertung von Referenzaufnahmen

Ein Referenzdatensatz wird für die Evaluation der neuen Verfahren zur Streichliniendetektion aus Kapitel 3 benötigt. Experten die MIR-Bildsequenzen eines Mehrstoffbrenners vorzuführen und die mittlere Streichlinie bewerten zu lassen, ist eine Möglichkeit solch einen Referenzdatensatz zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wurde ein neues Software-Tool entwickelt, das diese Expertenauswertung für den Experten möglichst komfortabel gestaltet und gleiche Voraussetzungen für alle Experten schafft. Das Software-Tool beinhaltet zum einen die Visualisierung der MIR-Bildsequenz und zum anderen die manuelle Detektion der mittleren Streichlinie durch den Experten. Abbildung A.2 zeigt die Benutzeroberfläche des Software-Tools.



**Abbildung A.2:** Bedienoberfläche des Software-Tools zur Referenzdatenerzeugung.

Die Benutzeroberfläche enthält folgende Bedienmöglichkeiten:

1. Hauptfenster mit Bildanzeige und Markierung der Bildpunkte.
2. Fenster mit Meldungen zum aktuellen Programmschritt.
3. Fortschritt/Anzahl Sequenzen.
4. Schieberegler zur Beeinflussung der geschätzten Flugkurve.
5. Buttons zum Zurücksetzen der markierten Punkte oder der Flugkurve.
6. Bestätigen der aktuellen Flugkurve, weiter mit nächster Sequenz.

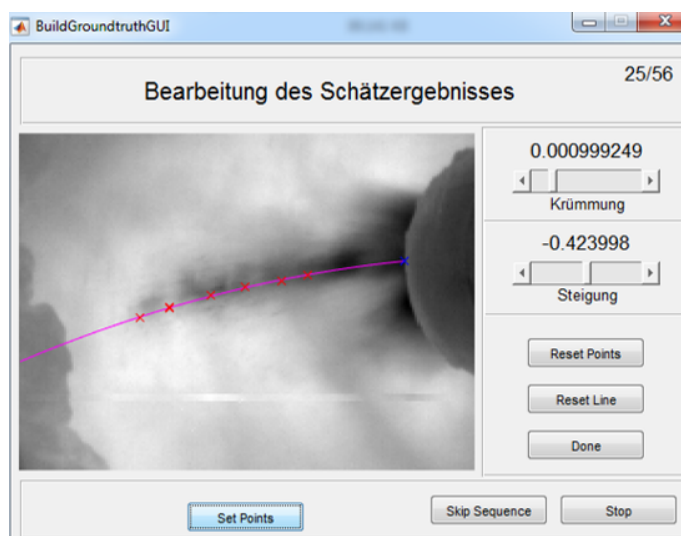
7. Möglichkeit zum Überspringen der aktuellen Sequenz (Skip Sequence) bzw. zum Programmabbruch (Stop).
8. Bestätigen der markierten Punkte, Start der Flugkurvenschätzung.

Der Benutzer markiert zunächst per Mausklick Punkte im Hauptfenster, an denen er in der Sequenz alternativen Brennstoff erkennt (Abbildung A.3).



**Abbildung A.3:** Software-Tool: Markierung von Punkten an denen alternativer Brennstoff erkannt wird.

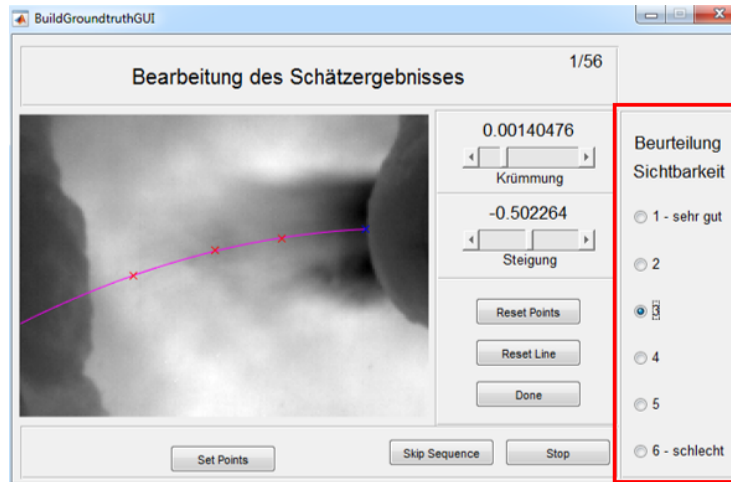
Hat der Benutzer den ersten Schritt beendet, bestätigt er die markierten Punkte, die nachfolgend die Basis zur Berechnung der mittleren Streichlinie mittels LS-Verfahren bilden. Wie in Abbildung A.4 dargestellt, wird die mittlere Streichlinie im Hauptfenster angezeigt und kann durch den Benutzer über Anpassung der Krümmung und Steigung nachbearbeitet werden. Punkte und Streichlinie können dabei jederzeit zurückgesetzt und für die entsprechende Sequenz neu bearbeitet werden.



**Abbildung A.4:** Software-Tool: Berechnung und Nachbearbeitung der mittleren Streichlinie auf Basis der zuvor markierten Punkte.



Bevor die Auswertung der betrachteten Sequenz beendet wird, gibt der Benutzer noch eine Beurteilung anhand von Schulnoten (1 - sehr gute Sicht, 6 - schlechte Sicht) über die Sichtbarkeit des Brennstoffes für die Sequenz ab (Abbildung A.5).

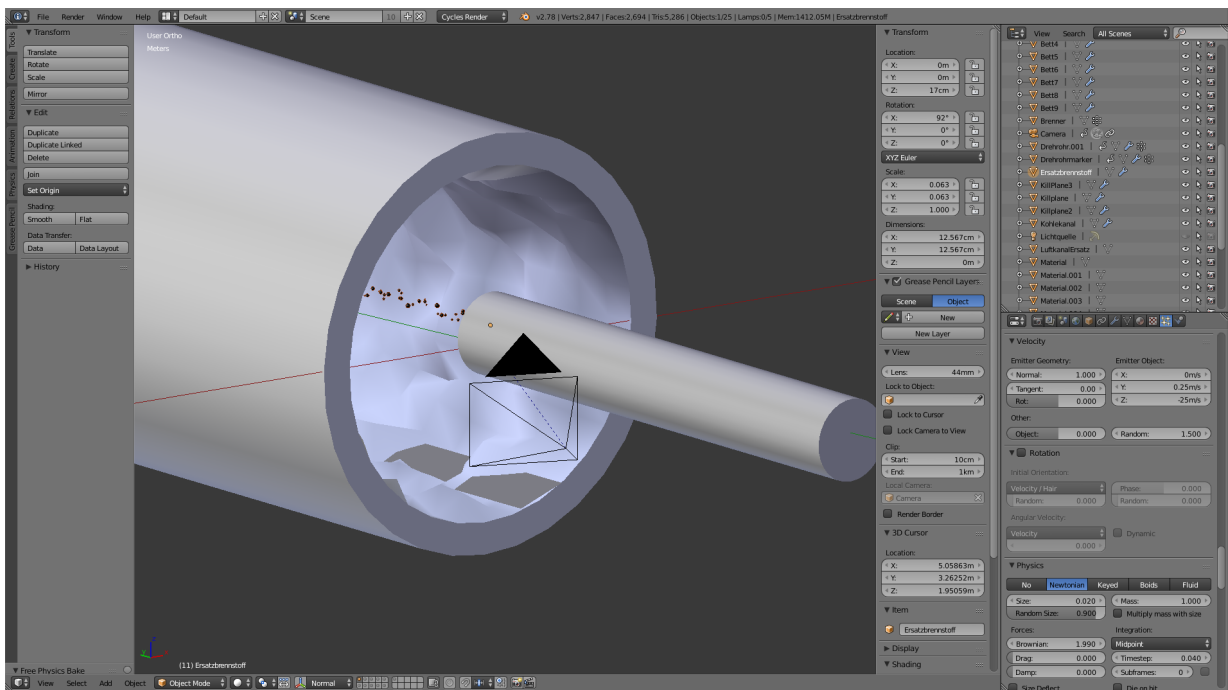


**Abbildung A.5:** Software-Tool: Beurteilung der Sichtbarkeit des Brennstoffes in der aktuell betrachteten Sequenz.

Als Ergebnis der Auswertung einer Sequenz werden die Parameter der mittleren Streichlinie und Sichtbeurteilung als Referenzdaten abgespeichert.

## A.3 3D-Simulationsmodell eines Mehrstoffbrenners in einer Drehrohrumgebung

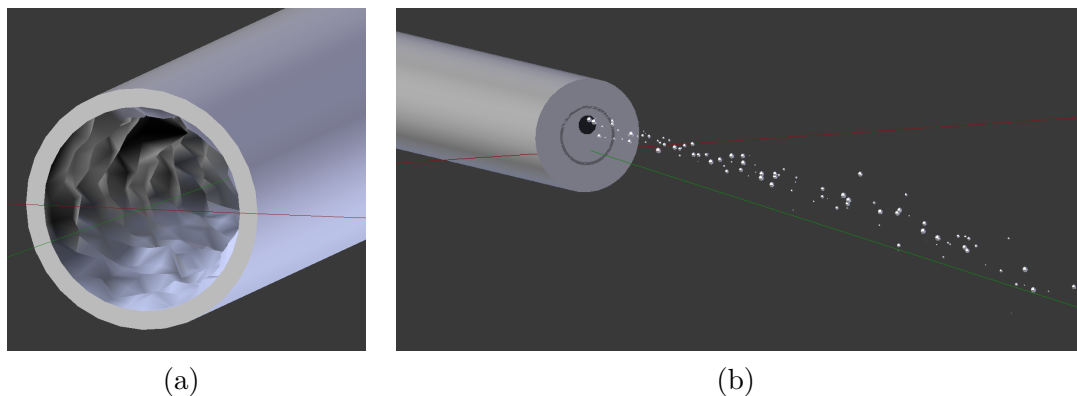
Ein Simulationsmodell aus Mehrstoffbrenner und Drehrohrfen bietet die Möglichkeit, die Streichlinien des alternativen Brennstoffes selbst vorzugeben und damit belastbare Referenzdaten für eine Evaluation zu erhalten. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Arbeit mit dem frei verfügbaren 3D-Animationsprogramm BLENDER [115] ein solches Modell entwickelt (Abbildung A.6).



**Abbildung A.6:** Simulationsmodell aus Mehrstoffbrenner und Drehrohrfen in der BLENDER Entwicklungsumgebung.

Die Länge, der Durchmesser, die Schrägstellung und die Drehgeschwindigkeit des Drehrohres können frei gewählt werden. Die Drehrohrinnenwand wird zur Simulation von Anbackungen mit einer zufällig generierten Hügellandschaft überdeckt (Abbildung A.7(a)). Das Brennbett wird durch ein Partikelsystem simuliert, das fortlaufend im hinteren Bereich des Drehrohres eingebracht und nachfolgend durch die Schrägstellung und Drehbewegung aus dem Drehrohr ausgetragen wird. Ebenfalls frei wählbar ist die Position und Auflösung der Kamera, die für den Renderprozess verwendet wird.

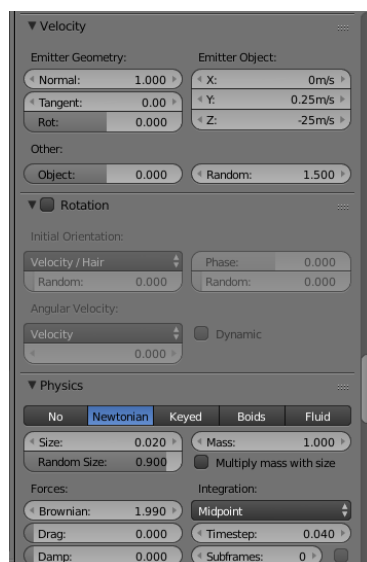
Bei dem Simulationsmodell des Mehrstoffbrenners wurde sich an dem in Abschnitt 1.2.2 vorgestellten MAS Brenner orientiert. Der im Modell als Zylinder dargestellte Mehrstoffbrenner enthält dementsprechend im Zentrum der Stirnseite einen alternativen Brennstoffkanal mit variablem Durchmesser  $d_{AB}$  aus dem Partikel in das Drehrohr hinein geschossen werden (Abbildung A.7(b)). Die am realen Brenner über die Drehzahl des Förderluftgebläses eingestellte Austrittsgeschwindigkeit des Brennstoffes wird im Modell durch die axiale



**Abbildung A.7:** Simulationsmodelle des (a) Drehrohres und (b) des Mehrstoffbrenners mit alternativem Brennstoff.

Anfangsgeschwindigkeit  $v_0$  der Partikel bestimmt. Eine zusätzliche Anfangsgeschwindigkeit  $v_{\text{pneumo}}$  der Partikel nach oben bildet den Einfluss des Pneumodeflektors nach. Außerdem kann die Größe und das Gewicht der Partikel verändert werden und damit verschiedene alternative Brennstoffe simuliert werden.

Der alternative Brennstoffkanal ist umgeben von einem Kohlering aus dem ebenfalls Partikel austreten, die allerdings eine geringe Lebenszeit und eine hohe Bewegungsunschärfe aufweisen. Dadurch wird der staubförmige Kohlebereich nahe der Brennerspitze simuliert. Einstellmöglichkeiten des Partikelsystems des alternativen Brennstoffes in BLENDER sind in Abbildung A.8 zu sehen. Unter dem Punkt *Velocity*  $\rightarrow$  *Emitter Object* können die Anfangsgeschwindigkeiten in axialer Richtung (Z) und nach oben (Y) und unter *Physics*  $\rightarrow$  *Size, Mass* die Partikelgröße und das Gewicht eingestellt werden.



**Abbildung A.8:** Blendereinstellungen des Partikelsystems zur Beschreibung des alternativen Brennstoffes.

Des Weiteren kann die Erstellung des Modells nicht nur in der BLENDER Entwicklungsumgebung, sondern auch in PYTHON Skripten durchgeführt werden. Dadurch wird eine Handhabung des Simulationsmodells und eine Einstellung der Brennerparameter ohne Kenntnis in der BLENDER Software möglich. Durch die vielfältigen Einstellmöglichkeiten können damit Simulationen für verschiedene Anlagen erstellt werden. Planungen für Neuinstallationen des Überwachungssystems werden dadurch erheblich erleichtert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden folgende PYTHON Skripte für das Simulationsmodell des Drehrohrenprozesses erstellt:

- **Drehrohr**, beinhaltet sowohl die Festlegung der Position, der geometrischen Größen und der Beleuchtung des Drehrohres als auch die Festlegung der Position und Ausrichtung der Kamera.
- **Brennbett**, beinhaltet die Einstellung des Partikelsystems (z.B. Position, Anzahl Partikel, ...) zur Brennbetterstellung.
- **Brenner**, beinhaltet die Festlegung der Position und der geometrischen Größen des Brenners und die Einstellungen der Partikelsysteme des Kohlekanals und des alternativen Brennstoffes.
- **Erstellung der Rendersequenz**, beinhaltet das Zusammenführen der einzelnen Skripte zum Gesamtmodell und Festlegung der Bildeinstellungen (z.B. Auflösung, Bildwiederholrate, ...).

## Abkürzungsverzeichnis

AB	Alternativer Brennstoff
CFD	Computational Fluid Dynamics
Fluff	Flugfähige Fraktionen
GAB	Gebündelter alternativer Brennstoffanteil
IIR	Infinite Impulse Response
LS	Least Square
MAP	Maximum a Posteriori
MAS	Mono Airduct System
MIR	Mittlerer Infrarotbereich
MK	Messkampagne
NIR	Nah-Infrarotbereich
RANSAC	Random Sample Consensus
RMSE	Root Mean Square Error
ROI	Region of Interest
SIFT	Scale-Invariant Feature Transform
WLS	Weighted Least Square

## Symbolverzeichnis

$\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)^T$	Partieller Ableitungsoperator
*	Faltungsoperator
$\ominus$	Erosion bei der morphologischen Bildverarbeitung
$\oplus$	Dilatation bei der morphologischen Bildverarbeitung
$\circ$	Öffnen bei der morphologischen Bildverarbeitung
$\bullet$	Schließen bei der morphologischen Bildverarbeitung
$\alpha$	Drehwinkel des Templates; in Abschnitt 1.2.2 Austrittswinkel des alternativen Brennstoffes
$\alpha_{\text{Kohle}}$	Austrittswinkel der Kohle
$\alpha_{\text{Brenner}}$	Drehwinkel des Brenners
$A$	Konstante zur Beschreibung eines schiefen Wurfes in Bildkoordinaten
$(b_x, b_y)$	Koordinaten der Brennerspitze
$C$	Pixelgröße

$c(u, v)$	Kreuzkorrelation für die Verschiebung $(u, v)$
$(c_x, c_y)$	Kameraauflösung
$dev(z)$	Abweichung zu Referenzdaten
$d_{AB}$	Durchmesser des alternativen Brennstoffkanals
$f$	Brennweite
$f_{Sobel}$	3x3 <i>Sobel</i> -Operator
$G$	Mengenbetrachtung eines Binärbildes
$g$	In Abschnitt 4.2.1 Erdbeschleunigung
$g(x, y)$	Grauwert eines Bildes an den Koordinaten $(x, y)$
$\bar{g}$	Mittlerer Grauwert des Bildes $g$
$g_{AB}$	Grauwerte in der Bildregion alternativer Brennstoff
$g_{Brennstoff}$	Grauwerte in der Bildregion Brennstoff
$g_{Brenner}$	Grauwerte in der Bildregion Brenner
$g_N$	Grauwerte einer 3x3 Nachbarschaft
$g_{Rand}$	Grauwerte entlang des Bildrandes
$g_{Tiermehl}$	Grauwerte in der Bildregion Tiermehl
$g_{TP}$	Ergebnisbild nach einer Tiefpassfilterung von $g$
$g_{TP,AB}$	Ergebnisbild nach einer Tiefpassfilterung von $g_{AB}$
$g_{TP,Brenner}$	Ergebnisbild nach einer Tiefpassfilterung von $g_{Brenner}$
$h_{AB}$	Höhe des Brennstoffaustrittes
$J$	Bilderanzahl
$K$	Anzahl erkannter Partikel in einem Bild
$K_{sum}$	Anzahl erkannter Partikel über mehrere Bilder
$k$	Anzahl erkannter Partikel in einer Bildspalte
$k_{GAB}$	Gewichtung des GAB-Verfahrens bei der MAP
$L$	Ergebnis einer Minimasuche
$l$	Laufindex des Bildrandes
$\lambda$	Parameter zur Umrechnung von Welt- in Kamera-koordinaten
$M$	Höhe des ausgeschnittenen Bildbereiches $ROI_{Brennstoff}$
$M_T$	Höhe des ausgeschnittenen Bildbereiches $ROI_{Tiermehl}$
$M_{Kohle}$	Höhe des ausgeschnittenen Bildbereiches $ROI_{Kohle}$
$m_s$	Steigung der Streichlinie
$(\mu_{GAB}, \sigma_{GAB})$	Ergebnis der Detektion des alternativen Brennstoffes aus dem GAB-Verfahren
$(\mu_{Partikel}, \sigma_{Partikel})$	Ergebnis der Partikeldetektion

$(\mu_{\text{MAP}}, \sigma_{\text{MAP}})$	Ergebnis des MAP-Verfahrens
$N$	Breite des ausgeschnittenen Bildbereiches $\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$
$N_{\text{T}}$	Breite des ausgeschnittenen Bildbereiches $\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$
$N_{\text{Kohle}}$	Breite des ausgeschnittenen Bildbereiches $\text{ROI}_{\text{Kohle}}$
$n$	Zeitpunkt der Bildaufnahme
$n_0$	Bildanzahl
$\kappa$	Gewichtungsfaktor zur Tiefpassfilterung
$o(x, y)$	Grauwert des Templates an den Koordinaten $(x, y)$
$\bar{o}$	Mittlerer Grauwert des Templates $o$
$P$	Partikelspeicher
$P_{\text{sort}}$	Sortierter Partikelspeicher
$p$	Trefferliste der Partikeldetektion; in Abschnitt 1.2.4 Maximum eines Grauwertverlaufes
$Q$	Anzahl Bildspalten mit Partikeln
$R$	Rotationsmatrix
$\text{ROI}_{\text{Brennstoff}}$	Bildregion Brennstoff
$\text{ROI}_{\text{AB}}$	Bildregion alternativer Brennstoff
$\text{ROI}_{\text{Tiermehl}}$	Bildregion Tiermehl
$\text{ROI}_{\text{Brenner}}$	Bildregion Brenner
$\text{ROI}_{\text{Kohle}}$	Bildregion Kohle
$r$	Rotationskomponente der Kameraposition in Weltkoordinaten
$S$	Strukturierendes Element
$s$	Streichlinie
$s_z$	Streichlinie des Experten $z$
$s_{\text{all}}$	Streichlinie aus der Expertenauswertung
$s_{\text{Sim}}$	Streichlinie der Simulation
$\theta$	Parameter der Streichlinie
$(\theta_{1,\text{all}}, \theta_{2,\text{all}})$	Parameter der Streichlinie aus der Expertenauswertung
$T_A$	Abtastzeit
$T$	Zeitkonstante eines Tiefpassfilters
$T_{\text{Brenner}}$	Ergebnisbild nach einer Kantendetektion von $t_{\text{Brenner}}$
$\bar{T}_{\text{Brenner}}$	Mittlerer Grauwert des Bildes $T_{\text{Brenner}}$
$(t_{\hat{x}}, t_{\hat{y}}, t_{\hat{z}})$	Translationskomponente der Kameraposition in Weltkoordinaten

$(u, v)$	Verschiebung eines Templates
$v$	Bildgüte
$v_{\text{mean}}^{\text{Exp}}$	Mittlere Sichtbeurteilung durch Experten
$v_{\text{mean}}^{\text{Image}}$	Mittlere Sichtbeurteilung durch Bildgütebewertung
$v^{\text{Image}}$	Sichtbeurteilung durch Bildgütebewertung
$v_{\text{ev}}^{\text{Image}}$	Angepasste mittlere Sichtbeurteilung durch Bildgütebewertung
$(v_{\hat{y}}, v_{\hat{z}})$	Anteile der Austrittsgeschwindigkeit des alternativen Brennstoffes in Weltkoordinaten
$v_0$	Austrittsgeschwindigkeit des alternativen Brennstoffes
$v_{\text{Pneumo}}$	Geschwindigkeit des Pneumodeflektors
$w$	Breite eines Minimums; in Abschnitt 1.2.4 Verschiebung bei der morphologischen Bildverarbeitung
$(x, y)$	Zweidimensionale, diskrete Bildkoordinaten
$(\hat{x}, \hat{y}, \hat{z})$	Dreidimensionale Weltkoordinaten
$(x_{\text{Brenner}}, y_{\text{Brenner}})$	Brennerposition aus Detektion
$Z$	Anzahl Experten
$z$	Auswahl eines Experten
$\hat{z}_{\text{Sim}}$	Mittlere Streichlinie in Weltkoordinaten



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Schematische Darstellung einer Mehrstoffbrennerflamme. . . . .	2
1.2	Schematische Darstellung des Zementherstellungsprozesses [95]. . . . .	3
1.3	Phasenzusammensetzung des Zementklinkers [94]. . . . .	4
1.4	Energieeinsatz bei der Zementherstellung [96]. (a) Entwicklung der eingesetzten Energieträger. (b) Prozentuale Verteilung des Brennstoffeinsatzes. . . . .	5
1.5	Verlauf des alternativen Brennstoffanteiles eines Mehrstoffbrenners bei der Zementherstellung. . . . .	5
1.6	Mehrstoffbrenner der Firma UNITHERM CEMCON [92]. . . . .	6
1.7	Schematische (a) Frontal- und (b) Seitenansicht [92] eines MAS Mehrstoffbrenners. . . . .	7
1.8	Abhängigkeit der Flugkurve und der Verweildauer innerhalb der Brennerflamme des alternativen Brennstoffes von Austrittsgeschwindigkeit und -winkel [92]. . . . .	8
1.9	(a) Schematische Darstellung der Kamerasicht bei schräger Einbauposition (1: Drehrohrinnenwand, 2: Rückwand, 3: Feststoffbett, 4: Feststoffbett - Stirnseite, 5: Feststoffaustrag, B: Brenner) [109]. (b) Infrarotaufnahme eines Mehrstoffbrenners bei der Zementklinkerherstellung aus schräger Kameraposition. . . . .	9
1.10	Vergleich für Kameras im (a) visuellen (0.4-0.7 $\mu\text{m}$ ), (b) nah-infraroten (0.8-1.1 $\mu\text{m}$ ) und mittleren-infraroten ((c) 3.9 $\mu\text{m}$ und (d) 10.6 $\mu\text{m}$ ) Spektralbereich. . . . .	10
1.11	Schematische Darstellung der Brennerumgebung bei Kameraaufnahmen im mittleren Spektralbereich (3.9 $\mu\text{m}$ oder 10.6 $\mu\text{m}$ ). . . . .	10
1.12	Unterscheidung der alternativen Brennstoffkanäle Fluff+Reifenflusen und Tiermehl in einer MIR-Kameraaufnahme eines Mehrstoffbrenners bei 100% alternativem Brennstoff. . . . .	11
1.13	Beispiel zur Ableitung der Prominenz eines Maximums. . . . .	13
1.14	Übersicht SIFT-Merkmalsextraktion: (a) Beispiel für einen 2D Difference of Gaussian Filter. (b) Ablauf des SIFT-Algorithmus zur Erstellung einer Merkmalspyramide nach [13]. . . . .	17
1.15	(a) Aufbereitete Probe für die Freikalkmessung und (b) Beispiel für ein Freikalkmessgerät CUBIX <sup>3</sup> der Firma PANALYTICAL [71]. . . . .	19
1.16	Beispiel für die Messung der Temperatur des Drehrohrofenaußenmantels der Firma CMV-SYSTEMS. Visualisierung der Temperaturfelder auf dem abgewickelten Drehrohr und des Temperaturverlaufes entlang des Drehrohres [20]. . . . .	20

1.17	Beispiele für prozessbedingt schwierige Sichtbedingungen. (a) Überdeckung durch starke Staubbeladung. (b) Überdeckung durch herabfallende Anbackungen. (c) Anbackungen, die den Brennstoffbereich durchlaufen. . . . .	23
2.1	Standard Erscheinungsform des alternativen Brennstoffes in MIR-Bildern. .	28
2.2	Beispiele für unterschiedliche Erscheinungsformen des alternativen Brennstoffes von (a) Einzelpartikeln bis hin zu einem (f) gebündelten Brennstoffstrahl. (b-e) zeigen den fließenden Übergang bzw. die Mischung von partikelförmigem und gebündeltem Brennstoffverhalten. . . . .	29
2.3	MIR-Kamerabilder für unterschiedliche Einstellungen eines Mehrstoffbrenners in einem Drehrohr zur Zementherstellung. Einstellungen des Pneumodeflektors bei 70% alternativem Brennstoff (a) 40 mbar, (b) 200 mbar und bei 100% alternativem Brennstoff (c) 40 mbar, (d) 200 mbar. . . . .	30
2.4	MIR-Kamerabilder für unterschiedliche Einstellungen eines Mehrstoffbrenners in einem Drehrohr zur Zementherstellung. Einstellung des Swirls auf (a) 2 und (b) 8. Einstellung der Drehzahl des Förderluftgebläses des alternativen Brennstoffes auf (c) 1900 Umdrehungen pro Minute und (d) 3000 Umdrehungen pro Minute. . . . .	31
2.5	Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Überwachung von alternativen Brennstoffen eines Mehrstoffbrenners. . . . .	32
2.6	Neues Regelungskonzept eines Mehrstoffbrenners bei der Zementklinkerherstellung. . . . .	33
3.1	Beispiel für die Änderung der Sicht innerhalb einer Sekunde von (a) keine Verdeckung über (b) partielle Verdeckung bis hin zu (c) kompletter Verdeckung des alternativen Brennstoffes durch Staubschwaden. . . . .	36
3.2	(a) Beispiel für Anbackungen, die den alternativen Brennstoffstrahl teilweise verdecken. (b) Beispielbild auf den Auswertebereich von Brennstoff zugeschnitten. (c) Ergebnis der Segmentierung durch ein Schwellwertverfahren. Anbackungen und Brennstoff werden gemeinsam detektiert. . . . .	37
3.3	Beispiele von Anhäufungen von Material in der Kameraöffnung, die eine freie Sicht in das Drehrohr verhindern. . . . .	37
3.4	Festlegung von Bildbereichen für die weiteren Bildverarbeitungsschritte. $ROI_{\text{Brennstoff}}$ : Bereich in dem Brennstoff auftritt. $ROI_{\text{AB}}$ bzw. $ROI_{\text{Tiermehl}}$ : Bereich in dem ausschließlich alternativer Brennstoff aus Brennstoffkanal 1 bzw. 2 (Tiermehl) zu erwarten ist. $ROI_{\text{Brenner}}$ : Suchbereich für die Brennerspitze. . . . .	39
3.5	Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Brennerdetektion. .	40
3.6	Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Segmentierung von Anbackungen. . . . .	42

3.7	Beispiel für den Ablauf der Anbackungsdetektion: (a) Darstellung der Extraktion des Grauwertverlaufes entlang des Bildrandes. (b) Ergebnis der Segmentierung nach dem Region Growing Verfahren und einer morphologischen Nachbearbeitung (rote Kreuze = Saatpunkte des Region Growing Verfahrens aus der Minimadetektion). (c) Segmentierungsergebnis im Originalbild. (d) Grauwertverlauf entlang des Bildrandes für ein Bild mit Anbackungen und Detektion von Minima (rote Kreuze). (e) Grauwertverlauf entlang des Bildrandes für ein Bild ohne Anbackungen. . . . .	43
3.8	Beispiel für die Detektion des GAB. (a) Verstärkung des GAB durch zeitliche Tiefpassfilterung. (b) Ergebnis der spaltenweise Minimumsuche im Einzelbild eingezeichnet. . . . .	44
3.9	Beispiel für den Grauwertverlauf $g_{TP,AB}(x, y)$ einer Bildspalte $x$ , die angewandte Detektion der Minimumbreite über die Prominenz des Minimums und die geschätzte <i>Gauß</i> -Kurve für den Grauwertverlauf auf Basis der Grauwerte und der Minimumdetektion. . . . .	44
3.10	(a) Gesammelte Partikeldetektionen einer Bildsequenz. (b) Beispiel für die Verteilung der Partikeldetektionen in einer Bildspalte $x$ (rot) und Schätzung der zugehörigen <i>Gauß</i> -Verteilung (blau). . . . .	46
3.11	Beispiel für die MAP-Schätzung. (a) Darstellung der Prior Verteilung aus dem GAB-Verfahren (blau) und der Verteilung aus der Partikeldetektion (magenta), die sich aus den gesammelten Partikeldetektionen (rot) ergibt. (b) Ergebnis der MAP-Schätzung (schwarz) aus Kombination von GAB-Verfahren und Partikeldetektion. . . . .	48
3.12	Schematische Darstellung der Streichlinie in der Brennerumgebung. . . . .	49
3.13	Ausgabe der geschätzten mittleren Streichlinie in einer MIR-Aufnahme. . . . .	49
3.14	Darstellung der Steigung an der Brennerspitze bzw. des Austrittswinkels des Brennstoffes für einen Pneumodeflektordruck von (a) 40 mbar und (b) 200 mbar. . . . .	50
3.15	Berechnung der Wurfweite aus mittlerer Streichlinie und Gerade entlang Drehrohrboden. . . . .	51
3.16	Darstellung der Grenzen der Brennstoffstreuung (rot) über die unteren und oberen Quantile der spaltenweise Partikelverteilung (blaue Kreuze). . . . .	52
3.17	Beispiele für die Ausprägung des Kohlebereiches bei den Brennereinstellungen (a) Swirl 2 und (b) Swirl 8. (c) Definition des Austrittswinkels $\alpha_{Kohle}$ des Kohlebereiches. . . . .	53
3.18	Einzelauswertung des Kohleaustrittswinkels $\alpha_{Kohle}$ für Brennereinstellung (a) Swirl 2 und (c) Swirl 8. (b) Verlauf des Kohleaustrittswinkels $\alpha_{Kohle}$ für eine Bildsequenz in der die Brennereinstellung Swirl von 2 auf 8 rampenförmig erhöht wurde. . . . .	53
3.19	(a) MIR-Kamerabild eines Mehrstoffbrenners mit separater Zuleitung für alternativen Brennstoff. (b) Auswahl interessanter Bildbereiche zur Auswertung des alternativen Brennstoffes. . . . .	54
3.20	Bewertung des GAB für Mehrstoffbrenner mit einer separaten Zuleitung für alternativen Brennstoff. Detektierte spaltenweise Minima (rot) und deren Breite (grün) aus dem GAB-Verfahren. . . . .	55

3.21	Ablaufdiagramm des Bildverarbeitungsalgorithmus zur Überwachung von alternativen Brennstoffen eines Mehrstoffbrenners. . . . .	56
4.1	Beispielbilder aus MK1 und MK2 für die Referenzdatenerstellung. MK1 mit (a) guter und (b) schlechter Sicht. MK2 mit (c) streuendem und (d) gebündeltem Erscheinungsbild des alternativen Brennstoffes. . . . .	58
4.2	Brennereinstellungen für (a)+(b) MK1 und (c) MK2. In MK2 wurde sowohl die Drehzahl des Förderluftgebläses (2113 U/min), als auch die Swirl-Einstellung (2.5) für alle Sequenzen konstant gehalten. . . . .	59
4.3	Screenshot der grafischen Benutzeroberfläche des Tools zur Referenzdatenerstellung. . . . .	60
4.4	Erstellung von Referenzdaten anhand einer Beispielsequenz. (a) Einzelne Streichlinien der Experten ( $Z = 8$ ). (b) Berechnete mittlere Streichlinie/Referenz aus allen Expertendaten der Sequenz. (c) Berechnung der Abweichung eines Experten zur Referenz als Fläche zwischen beiden Kurven.	61
4.5	Bewertung der Sichtbarkeit des alternativen Brennstoffes für (a) MK1 und (b) MK2 durch Experten. Kreuze entsprechen der durchschnittlichen Expertenbewertung. Vertikale Linien werden durch die beste und schlechteste Bewertung eines Experten für diese Sequenz begrenzt. . . . .	62
4.6	Vergleich der Sichtbeurteilung der Expertenauswertung (blau) und der automatischen Bildverarbeitung (rot) für (a) MK1 und (b) MK2. . . . .	63
4.7	Beispielbilder für die Sichtbeurteilung. Aus MK1 (a) Bildsequenz Nummer 9 mit einer Note von $\varnothing 5.4$ bzw. $v_{ev}^{Image} = 5.6$ und (b) Bildsequenz Nummer 24 mit einer Note von $\varnothing 2.4$ bzw. $v_{ev}^{Image} = 2.4$ . Aus MK2 (c) Bildsequenz Nummer 15 mit einer Note von $\varnothing 4.8$ bzw. $v_{ev}^{Image} = 5$ und (d) Bildsequenz Nummer 1 mit einer Note von $\varnothing 1.8$ bzw. $v_{ev}^{Image} = 1.2$ . . . . .	64
4.8	Vergleich der Abweichung zu den Referenzdaten innerhalb der Expertenauswertung (blau) und der Streichliniendetektion (rot) für (a) MK1 und (b) MK2. . . . .	64
4.9	Beispiele für den Vergleich der Referenzdaten (blau) mit der Streichliniendetektion aus MK1 (rot). . . . .	65
4.10	Vergleich des Gradienten der Streichlinie an der Brennerspitze für Expertenauswertung (blau) und Streichliniendetektion (rot) mit der Brenneinstellung Druck Pneumodeflektor (gelb) für die Sequenzen aus MK1. . . . .	66
4.11	Beispiele für den Vergleich der Referenzdaten (blau) mit der Streichliniendetektion aus MK2 (rot). . . . .	66
4.12	Beispiele für die Brennersimulation in BLENDER mit (a) niedriger und (b) hoher Flugbahn des alternativen Brennstoffes. (c) und (d) mit eingezeichneter mittleren Streichlinie (blau) und Grenzen der Flugbahn (blau gestrichelt) auf Basis der gewählten Brenneinstellungen. . . . .	69
4.13	Beispiele für die Brennersimulation in BLENDER mit $v_{Pneumo} = 0$ m/s geschnitten auf den Bereich der Brennerumgebung (a) ohne und (b) mit Partikelausträger des alternativen Brennstoffes. . . . .	70

4.14	Bestimmung der mittleren Streichlinie für die Brennersimulationen in BLENDER mit Hilfe der neuen Bildverarbeitungsalgorithmen. Auf interessierenden Bereich zugeschnittenes Einzelbild für die vertikalen Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes (a) $v_{\text{Pneumo}} = 0 \text{ m/s}$ und (b) $v_{\text{Pneumo}} = 2 \text{ m/s}$ . (c) und (d) zeigen das Ergebnis der Partikeldetektion (rote Punkte). (e) und (f) zeigen das Ergebnis der Streichliniendetektion. . . . .	71
4.15	Vergleich der Streichliniendetektion mit den Referenzdaten bei horizontaler Austrittsgeschwindigkeit von (a) $0 \text{ m/s}$ , (b) $0.7 \text{ m/s}$ , (c) $1.4 \text{ m/s}$ und (d) $2 \text{ m/s}$ .	72
4.16	Beispiele zur Bewertung der automatischen Segmentierung von Anbackungen. (a) Einzelbild einer ausgewählten Beispielsequenz aus MK2. (b) Segmentierungsergebnis der Anbackungsdetektion zu verschiedenen Zeitpunkten für die Sequenz aus (a). (c) und (d) weitere Beispiele für die Segmentierung von Anbackungen. . . . .	75
4.17	Ergebnisse der Brennerdetektion für vier unterschiedliche Brennerpositionen und Rotationswinkel. . . . .	77
5.1	Lage des Messfeldes zur Bestimmung der mittleren Temperatur im Klinkerbett.	80
5.2	Vergleich der Temperatur im Klinkerbett (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im März. . . . .	81
5.3	Vergleich der Temperatur im Klinkerbett (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im April. . . . .	82
5.4	Streudiagramm der Temperatur im Klinkerbett und den zeitversetzten Messwerten des Freikalkes im März (blau, 592 Messpunkte). Linearer Zusammenhang mittels RANSAC Geradenschätzung (rot) mit tolerierter Fehlerabweichung (grau). . . . .	83
5.5	Vergleich gemessene Freikalkwerte (zeitverschoben um Auswertedauer, ca. 50 Minuten) und Modellvorhersage für (a) den 01.04. und (b) den 04.04.2017.	85
5.6	Vergleich der Wurfweite (rot) und der Temperatur im Klinkerbett (blau) für Messtage im März. . . . .	86
5.7	Vergleich der Wurfweite (rot) und der Temperatur im Klinkerbett (blau) für Messtage im April. . . . .	87
5.8	Vergleich der Streuung (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im März. . . . .	88
5.9	Vergleich der Streuung (rot) und der Labormessung des Freikalkes (blau) für Messtage im April. . . . .	89
5.10	(a) Prozessdaten und (b) Kenngrößen des alternativen Brennstoffes im Vergleich zu den (c) Freikalkmesswerten für Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017.	91
5.11	Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017. (a) 11.03. 4:00 Uhr. (b) 11.03. 14:00 Uhr. . . . .	92
5.12	Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 11.03.-14.03.2017. (a) 13.03. 8:00 Uhr. (b) 13.03. 20:00 Uhr. (c) 13.03. 8:00 Uhr, Ausfall alternativer Brennstoff.	93
5.13	(a) Prozessdaten und (b) Kenngrößen des alternativen Brennstoffes im Vergleich zu den (c) Freikalkmesswerten für Bilddaten vom 08.04.-11.04.2017.	94
5.14	Ausgewählte Beispiele der Bilddaten vom 08.04.-11.04.2017. (a) 09.04. 12:00 Uhr. (b) 09.04. 20:00 Uhr. (c) 10.04. 4:00 Uhr. . . . .	95

---

6.1	Integration des neuen Überwachungssystems in das Prozessleitsystem einer Zementanlage (unterer mittlerer Bildschirm). . . . .	98
6.2	Schema zur Regelung eines Mehrstoffbrenners durch eine MIR-Kamera. . .	100
A.1	Vergleich zwischen schiefem Wurf in Weltkoordinaten transformiert in Bildkoordinaten und der Approximation durch ein Polynom zweiten Grades für (a) keine, (b) mittlere und (c) hohe vertikale Ablenkungen der Flugkurve am Austrittspunkt des Brennstoffes. . . . .	106
A.2	Bedienoberfläche des Software-Tools zur Referenzdatenerzeugung. . . . .	107
A.3	Software-Tool: Markierung von Punkten an denen alternativer Brennstoff erkannt wird. . . . .	108
A.4	Software-Tool: Berechnung und Nachbearbeitung der mittleren Streichlinie auf Basis der zuvor markierten Punkte. . . . .	108
A.5	Software-Tool: Beurteilung der Sichtbarkeit des Brennstoffes in der aktuell betrachteten Sequenz. . . . .	109
A.6	Simulationsmodell aus Mehrstoffbrenner und Drehrohrofen in der BLENDER Entwicklungsumgebung. . . . .	110
A.7	Simulationsmodelle des (a) Drehrohres und (b) des Mehrstoffbrenners mit alternativem Brennstoff. . . . .	111
A.8	Blendereinstellungen des Partikelsystems zur Beschreibung des alternativen Brennstoffes. . . . .	111

# Tabellenverzeichnis

4.1	Vergleich der einzelnen Verfahren (GAB und Partikeldetektion) und die Kombination mittels MAP mit dem Referenzverfahren [108] und der Expertenbewertung über alle Sequenzen von MK2. Die Gesamtabweichung ist gegeben durch die Summe der Abweichungen zu den Referenzdaten über alle Einzelsequenzen. . . . .	67
4.2	Durchschnittliche Abweichung pro Bildspalte der Streichliniendetektion zu den Referenzdaten für unterschiedliche vertikale Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes. . . . .	70
4.3	Vergleich der Wurfweite der Streichliniendetektion mit den Referenzdaten für unterschiedliche vertikale Anfangsgeschwindigkeiten des alternativen Brennstoffes. . . . .	72
4.4	Evaluation des Verfahrens zur Brennerdetektion. . . . .	76
5.1	Tageweise Korrelationen zwischen Temperatur im Klinkerbett und zeitlich verschobenen Messwerten des Freikalkes. . . . .	81
5.2	Abweichung der Freikalkschätzung für verschiedene Regressionsmodelle basierend auf zurückliegenden Labormessungen des Freikalkes, der aktuellen Temperatur im Klinkerbett und den Temperaturen zu den Zeitpunkten der letzten Freikalkmessungen (Temp = Temperatur). . . . .	84
5.3	Tageweise Korrelationen zwischen Wurfweite und Temperatur im Klinkerbett. . . . .	86
5.4	Tageweise Korrelationen zwischen Streuung und zeitlich verschobenen Messwerten des Freikalkes. . . . .	90
5.5	Brennereinstellungen bei Langzeitmessungen mit prototypischen Messsystem. . . . .	90





# Liste eigener Veröffentlichungen

## Industrielle Verbrennungsprozesse:

- Vogelbacher, M.: Ermittlung und Analyse neuer bildbasierter Prozesskenngrößen aus Infrarotaufnahmen für die thermische Sondermüllbehandlung in Drehrohröfen. Diplomarbeit, IAI, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.
- Waibel, P.; Vogelbacher, M.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Infrared camera-based detection and analysis of barrels in rotary kilns for waste incineration. In: 11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT), Neapel, Italien, 11.-14. Juni 2012.

*Zusammenfassende Veröffentlichung der Ergebnisse der eigenen Diplomarbeit.*

- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Bildbasierte Überwachung alternativer Brennstoffe eines Mehrstoffbrenners bei industriellen Verbrennungsprozessen. In: Forum Bildverarbeitung, Karlsruhe, 1.-2. Dezember 2016, S. 297–308, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern. In: 5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050, Karlsruhe, 15. Juni 2016.
- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern. In: VDI-Berichte 2280: Anlagenbezogenes Monitoring : neue Anforderungen - neue Konzepte, Würzburg, 25.-26. Oktober 2016, S. 201–212, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Scherrmann, A.; Gehrmann, H.-J.; Baumann, W.; Teuscher, N.; Hauser, M.; Seifert, H.; Stapf, D.; Paur, H.-R.; Matthes, J.; Waibel, P.; Vogelbacher, M.; Keller, H. B.: Mitverbrennung von Biomasse in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmasstab. In: Kraftwerkstechnik 2016: Strategien, Anlagentechnik und Betrieb (2016), S. 605–624.

*Betreuung von Messkampagnen an der Pilotanlage. Mitentwicklung der Bildverarbeitung zur Auswertung der Testdaten.*

- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Camera-based optimization of alternative fuel combustion with multi-fuel burners. In: 8th European Combustion Meeting (ECM), Dubrovnik, Kroatien, 18.-21. April 2017.

- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Image-based characterization of alternative fuel combustion with multi-fuel burners. In: IEEE Transactions on Industrial Informatics 14 (2017), August, Nr. 2, S. 588–597.
- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.: Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern durch bildbasierte Verfahren. In: VDI-Berichte 2302: 28. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerung, Darmstadt, 6.-7. September 2017, S. 757–763, VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Vogelbacher, M.; Waibel, P.; Matthes, J.; Keller, H. B.; Friedrich, H.-P.: DE 10 2016 000 290 A1: Auswerte- und Regelungsverfahren für Mehrstoffbrenner und Auswerte- und Regelungsanordnung dafür. Patent, Offenlegung, 2017.
- Dittrich, A.; Keller, S.; Vogelbacher, M.; Matthes, J.; Waibel, P.; Schönecker, H.; Keller, H. B.: Camera based optimization of multi-fuel burners for the use of substitute fuels in the cement industry. In: IRRC Waste to Energy, Waste Management Bd. 7. Wien, Österreich, 18.-19. September 2017, S. 329–339, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin.

*Vorstellung der Bildverarbeitung zur Extraktion von Kenngrößen zur Überwachung von Mehrstoffbrennern.*

- Matthes, J.; Waibel, P.; Vogelbacher, M.; Scherrmann, A.; Gehrman, H.-J.; Keller, H.B.: Camera-aided analysis and control of load flexible co-combustion of biomass in a pilot-scale power plant combustion system. In: 8th European Combustion Meeting (ECM), Dubrovnik, Kroatien, 18.-21. April 2017.

*Betreuung von Messkampagnen an der Pilotanlage. Mitentwicklung der Bildverarbeitung zur Auswertung der Testdaten.*

### **Weitere Veröffentlichungen:**

- Vogelbacher, M.: Review and outlook for texture analysis methods. Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory 13 (2012), S. 11–25.
- Vogelbacher, M.; Werling, S.; Ziebarth, M.: Beurteilung textiler Flächenhalbzeuge mittels variabler Beleuchtung. In: Forum Bildverarbeitung, Regensburg, 29.-30. November 2012, S. 193–204, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Vogelbacher, M.: Texture modulation model to describe structural-statistical textures. Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory 17 (2013), S. 139-154.
- Ziebarth, M.; Vogelbacher, M.; Olawsky, S.; Beyerer, J.: Obtaining 2d surface characteristics from specular surfaces. In: 36th German Conference on Pattern Recognition (GCPR), Münster, 2.-5. September 2014, S. 690-700, Springer, Heidelberg.

*Berechnung der Texturkenngrößen zur Beurteilung einer spiegelnden Oberfläche.*

- Vogelbacher, M.; Ziebarth, M.; Olawsky, S.; Beyerer, J.: Segmentierung unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten auf lackierten Oberflächen. In: Forum Bildverarbeitung, Regensburg, 27.-28. November 2014, S. 129-140, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe.
- Vogelbacher, M.; Ziebarth, M.; Olawsky, S.; Beyerer, J.: Segmentierung unterschiedlich stark ausgeprägter Welligkeiten auf lackierten Oberflächen. *tm - Technisches Messen* 81 (2014) 12, S. 644-651.
- Vogelbacher, M.; Schulte, H.; Heber, E.; Beyerer, J.: Specific inspection of the surface appearance of airbag fabrics for advanced quality control. In: 12th International Symposium on Sophisticated Car Occupant Safety Systems, Karlsruhe, 1.-3. Dezember 2014, S. 27.1-27.15, Fraunhofer ICT, Karlsruhe.
- Henkel, M.; Schmidberger, A.; Vogelbacher, M.; Kühnert, Ch.; Beuker, J.; Bernard, T.; Schwartz, T.; Syldatk, Ch.; Hausmann, R.: Kinetic modeling of rhamnolipid production by *Pseudomonas aeruginosa* PAO1 including cell density-dependent regulation. *Applied Microbiology and Biotechnology* 98 (2014) 16, S. 7013-7025.

*Umsetzung und Auswertung des biologischen Modells in MATLAB.*

- Vogelbacher, M.: Image warping and homogenization to analyse the frequency and amplitude modulation of structural-statistical textures. Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory 20 (2015), S. 115-122.



# Literaturverzeichnis

- [1] ADAMS, R. ; BISCHOF, L. : Seeded region growing. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16 (1994), Juni, Nr. 6, S. 641–647. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/34.295913>
- [2] ALLOUIS, C. ; MANCARUSO, E. ; SEQUINO, L. ; VAGLIECO, B. M.: IR analysis of diesel combustion in a transparent Euro5 diesel engine. In: *Process and Technologies for a Sustainable Energy (PTSE)*. Ischia, Italien, 27.-30. Juni 2010. DOI: <http://dx.doi.org/10.4405/ptse2010.P2.3>
- [3] AMIRUDDIN, A. K. ; SAPUAN, S. M.: Burner flame image analysis techniques. In: *National Conference on Software Engineering & Computer Systems (NACES)*. Pahang, Malaysia, 20.-21. August 2007, URL: [http://umpir.ump.edu.my/962/1/NaCSES-2007-003\\_BURNER\\_FLAME\\_IMAGE\\_ANALYSIS\\_TECHNIQUE.pdf](http://umpir.ump.edu.my/962/1/NaCSES-2007-003_BURNER_FLAME_IMAGE_ANALYSIS_TECHNIQUE.pdf)
- [4] ASAMANY, E. A.: *Waste-derived fuels for co-processing in rotary cement kilns*. Halifax, Kanada, Dalhousie University, Dissertation, 2016. URL: <http://hdl.handle.net/10222/72616>
- [5] BAEK, W. B. ; LEE, S. J. ; BAEG, S. Y. ; CHO, C. H.: Flame image processing and analysis for optimal coal firing of thermal power plant. In: *IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* Bd. 2. Pusan, Südkorea, 12.-16. Juni 2001, S. 928–931, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2001.931596>
- [6] BALLESTER, J. ; GARCIA-ARMINGOL, T. : Diagnostic techniques for the monitoring and control of practical flames. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 36 (2010), August, Nr. 4, S. 375–411. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.005>
- [7] BEYERER, J. : *Vorlesung am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, Karlsruher Institut für Technologie (KIT): Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung*. 2009
- [8] BEYERER, J. ; LEON, F. P. ; FRESE, C. : *Automatische Sichtprüfung - Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-23966-3>
- [9] BOATENG, A. A.: *Rotary Kilns: Transport Phenomena and Transport Processes*. Oxford, Großbritannien : Butterworth-Heinemann, 2008

- [10] BOOS, P. : Qualitätssicherung und Prozesskontrolle im modernen Zementwerk. In: *Heidelberg Cement: Newsletter Technik* 10 (2010), Oktober. URL: [https://www.normensand.de/fileadmin/gruppen/Normensand/Downloads/NL\\_Technik\\_No10\\_okt\\_2010.pdf](https://www.normensand.de/fileadmin/gruppen/Normensand/Downloads/NL_Technik_No10_okt_2010.pdf)
- [11] BRAUN, H. : Sekundärbrennstoffeinsatz in der Zementindustrie - vom Altreifen bis zum Tiermehl. In: *XVII. Gesteinshüttencolloquium*. Leoben, Österreich, 2001, URL: <http://institute.unileoben.ac.at/ghiwww/braun.pdf>
- [12] BRIECHLE, K. ; HANEBECK, U. D.: Template matching using fast normalized cross correlation. In: *SPIE Optical Pattern Recognition XII* Bd. 4387, International Society for Optics and Photonics, März 2001, S. 95–103. DOI: <http://dx.doi.org/10.1117/12.421129>
- [13] BURT, P. J. ; ADELSON, E. H.: The laplacian pyramid as a compact image code. In: *IEEE Transactions on Communication* 31 (1983), April, Nr. 4, S. 532–540. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TCOM.1983.1095851>
- [14] BÜTTNER, W. : *Digitale Regelungssysteme*. Braunschweig : Vieweg+Teubner Verlag, 1990. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-322-84129-2>
- [15] CELIK, T. ; DEMIREL, H. : Fire detection in video sequences using a generic color model. In: *Fire Safety Journal* 44 (2009), Februar, Nr. 2, S. 147–158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2008.05.005>
- [16] CHEN, H. ; ZHANG, X. ; HONG, P. ; HU, H. ; YIN, X. : Recognition of the temperature condition of a rotary kiln using dynamic features of a series of blurry flame images. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 12 (2016), November, Nr. 1, S. 148–157. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2015.2500891>
- [17] CHEN, T. H. ; KAO, C. L. ; CHANG, S. M.: An intelligent real-time fire-detection method based on video processing. In: *IEEE 37th Annual 2003 International Carnahan Conference on Security Technology*. Taipeh, Taiwan, 14.-16. Oktober 2003, S. 104–111, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CCST.2003.1297544>
- [18] CHEN, T. H. ; WU, P. H. ; CHIOU, Y. C.: An early fire-detection method based on image processing. In: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* Bd. 3. Singapur, 24.-27. Oktober 2004, S. 1707–1710, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIP.2004.1421401>
- [19] CHIMENTI, M. ; DI NATALI, C. ; MARIOTTI, G. ; PAGANINI, E. ; PIERI, G. ; SALVETTI, O. : An IR image processing approach for characterising combustion instability. In: *Infrared Physics & Technology* 46 (2004), Dezember, Nr. 1-2, S. 41–47. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2004.03.007>
- [20] CMV-SYSTEMS GMBH & CO.KG: 5. Juni 2018. URL: <http://www.cmv-systems.de/feuerraumtechnik/drehrohroefen/infrarot-ofenmantel-temperaturmessung/>

- [21] DIEZ, A. ; ZHAO, H. ; CARROZZO, T. ; CATANIA, A. E. ; SPESSA, E. : Development of a high-speed two-colour system and its application to in-cylinder diesel combustion temperature and soot measurements with split injections. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part D, Journal of Automobile Engineering* 226 (2011), Oktober, Nr. 5, S. 684–697. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954407011424547>
- [22] DITTRICH, A. ; KELLER, S. ; VOGELBACHER, M. ; MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; SCHÖNECKER, H. ; KELLER, H. B.: Camera based optimization of multi-fuel burners for the use of substitute fuels in the cement industry. In: *IRRC Waste to Energy, Waste Management Bd. 7*. Wien, Österreich, 18.-19. September 2017, S. 329–339, TK Verlag Karl Thomé–Kozmiensky, Neuruppin
- [23] DUCHESNE, C. ; LIU, J. J. ; MACGREGOR, J. F.: Multivariate image analysis in the process industries: A review. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 117 (2012), August, S. 116–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemolab.2012.04.003>
- [24] EMBERGER, B. ; HOENIG, V. : Optimierung der Drehofenfeuerung in Zementwerken bei Einsatz von Sekundärbrennstoffen. Flammenthermografie und der Brennstoffe auf Drehofenflammen. In: *VDI-Berichte 1988: 23. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerung*. Berlin, 12.-13. September 2007, S. 409–414, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [25] EMBERGER, B. ; HOENIG, V. : Rotary kiln burner technology for alternative fuel co-firing. In: *Cement International* 5 (2011), S. 48–60
- [26] ESBENSEN, K. ; GELADI, P. : Strategy of multivariate image analysis (MIA). In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 7 (1989), Dezember, Nr. 1-2, S. 67–86. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80112-1](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439(89)80112-1)
- [27] FAN, H. ; DONG, W. ; TANG, Y. : Flame front detection by line enhance active contour from OH-PLIF images. In: *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems (ICINIS)*. Shenyang, China, 1.-3. November 2010, S. 24–27, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICINIS.2010.11>
- [28] FISCHLER, M. A. ; BOLLES, R. C.: Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. In: *Communications of the ACM* 24 (1981), Juni, Nr. 6, S. 381–395. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/358669.358692>
- [29] FREY, D. ; ULRICH, M. ; HINZ, S. : Evaluierung effizienter Methoden zur Berechnung des optischen Flusses. In: *Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation 1* (2010), S. 5–18. DOI: <http://dx.doi.org/10.1127/1432-8364/2010/0036>
- [30] GADE, R. ; MOESLUND, T. B.: Thermal cameras and applications: a survey. In: *Machine Vision & Applications* 25 (2014), Januar, Nr. 1, S. 245–262. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00138-013-0570-5>

- [31] GELADI, P. ; ISAKSSON, H. ; LINDQVIST, L. ; WOLD, S. ; ESBENSEN, K. : Principal component analysis of multivariate images. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 5 (1989), März, Nr. 3, S. 209–220. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439\(89\)80049-8](http://dx.doi.org/10.1016/0169-7439(89)80049-8)
- [32] GONZALES, R. ; WOODS, R. : *Digital image processing*. New Jersey, USA : Prentice Hall, 2008
- [33] GUPTA, P. ; GAIDHANE, V. : A new approach for flame image edges detection. In: *International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. Jaipur, Indien, 9.-11. Mai 2014, S. 1–6, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICRAIE.2014.6909178>
- [34] HAGENMEYER, V. ; PIECHOTTKA, U. : Innovative Prozessführung: Erfahrungen und Perspektiven. In: *atp edition - Automatisierungstechnische Praxis* 51 (2009), Nr. 1-2, S. 48–64
- [35] HAN, D. ; LEE, B. : Development of early tunnel fire detection algorithm using the image processing. In: *International Symposium on Visual Computing (ISVC)* Bd. 4292. Lake Tahoe, USA, 6.-8. November 2006, S. 39–48, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/11919629\\_5](http://dx.doi.org/10.1007/11919629_5)
- [36] HARALICK, R. M. ; STERNBERG, S. R. ; ZHUANG, X. : Image analysis using mathematical morphology. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 9 (1987), Juli, Nr. 4, S. 532–550. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767941>
- [37] HORNG, W. B. ; PENG, J. W. ; CHEN, C. Y.: A new image-based real-time flame detection method using color analysis. In: *Networking, Sensing and Control*. Tucson, USA, 19.-22. März 2005, S. 100–105, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICNSC.2005.1461169>
- [38] HOTTEL, H. C. ; BROUGHTON, F. P.: Determination of True Temperature and Total Radiation from Luminous Gas Flames. In: *Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition* 4 (1932), April, Nr. 2, S. 166–175. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ac50078a004>
- [39] HUANG, Y. ; YAN, Y. ; LU, G. ; REED, A. : On-line flicker measurement of gaseous flames by image processing and spectral analysis. In: *Measurement Science and Technology* 10 (1999), Nr. 8, S. 726–733. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/10/8/307>
- [40] HUANG, Y. ; YAN, Y. ; RILEY, G. : Vision-based measurement of temperature distribution in a 500-kW model furnace using the two-colour method. In: *Measurement* 28 (2000), Oktober, Nr. 3, S. 175–183. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2241\(00\)00010-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-2241(00)00010-5)
- [41] JÄHNE, B. : *Digitale Bildverarbeitung*. Bd. 6. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2005



- [42] JIANG, Z. W. ; LUO, Z. X. ; ZHOU, H. C.: A simple measurement method of temperature and emissivity of coal-fired flames from visible radiation image and its application in a CFB boiler furnace. In: *Fuel* 88 (2009), Juni, Nr. 6, S. 980–987. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2008.12.014>
- [43] KELLER, H. B. ; KUGELE, E. ; OSTERHUES, B. ; WEINBERGER, T. : Einsatz neuronaler Netze im Umweltbereich am Beispiel der Müllverbrennung. In: *8. Symposium Informatik für den Umweltschutz*. Hamburg, 24.-26. August 1994, S. 405–414, Metropolis-Verlag, Marburg
- [44] LEWIS, J. P.: Fast template matching. In: *Vision Interface 95* (1995), Nr. 120123, 120-123. URL: [http://scribblethink.org/Work/nvisionInterface/vi95\\_lewis.pdf](http://scribblethink.org/Work/nvisionInterface/vi95_lewis.pdf)
- [45] LIEDMANN, B. ; ARNOLD, W. ; KRÜGER, B. ; BECKER, A. ; KRUSCH, S. ; WIRTZ, S. ; SCHERER, V. : An approach to model the thermal conversion and flight behaviour of refuse derived fuel. In: *Fuel* 200 (2017), Juli, S. 252–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2017.03.069>
- [46] LIEDMANN, B. ; WIRTZ, S. ; SCHERER, V. ; KRÜGER, B. : Numerical study on the influence of operational settings on refuse derived fuel co-firing in cement rotary kiln. In: *Energy Procedia* 120 (2017), August, S. 254–261. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.176>
- [47] LOWE, D. G.: Distinctive image features from scale-invariant keypoints. In: *International Journal of Computer Vision* 60 (2004), November, Nr. 2, S. 91–110. DOI: <http://dx.doi.org/10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94>
- [48] LU, G. ; GILABERT, G. ; YAN, Y. : Vision based monitoring and characterisation of combustion flames. In: *Journal of Physics: Conference Series, Sensors & their Applications XIII* 15 (2005), Nr. 1, S. 194–200. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/15/1/033>
- [49] LU, G. ; WAN, Y. ; WARD, D. : Advanced monitoring, characterisation and evaluation of gas-fired flames in a utility boiler. In: *Journal of the Institute of Energy* 73 (2000), Nr. 494, S. 43–49
- [50] LU, G. ; YAN, Y. ; COLECHIN, M. : A digital imaging based multifunctional flame monitoring system. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 53 (2004), Juli, Nr. 4, S. 1152–1158. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2004.830571>
- [51] LU, G. ; YAN, Y. ; COLECHIN, M. : Monitoring of oscillatory characteristics of pulverized coal flames through image processing and spectral analysis. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 55 (2006), Januar, Nr. 1, S. 226–231. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2005.861254>
- [52] LU, G. ; YAN, Y. ; CORNWELL, S. ; WHITEHOUSE, M. ; RILEY, G. : Impact of co-firing coal and biomass on flame characteristics and stability. In: *Fuel* 87 (2008), Juni, Nr. 7, S. 1133–1140. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.07.005>

- [53] MANCARUSO, E. ; SEQUINO, L. ; VAGLIECO, B. M.: IR digital imaging for analysing in-cylinder combustion process in transparent diesel engine. In: *Fotonica AEIT Italian Conference on Photonics Technologies*. Neapel, Italien, 12.-14. Mai 2014, S. 1–4, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/Fotonica.2014.6843916>
- [54] MARBACH, G. ; LÖPFE, M. ; BRUPBACHER, T. : An image processing technique for fire detection in video images. In: *Fire Safety Journal* 41 (2006), Juni, Nr. 4, S. 285–289. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.02.001>
- [55] MATSUI, Y. ; KAMIMOTO, T. ; MATSUOKA, S. : A study on the time and space resolved measurement of flame temperature and soot concentration in a DI diesel engine by the two-color method. In: *SAE Technical Paper* 790491 (1979), Februar. DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/790491>
- [56] MATTHES, J. : *Ganzheitliches Konzept zur kamerabasierten Optimierung industrieller Hochtemperaturprozesse*. Habilitationsschrift, Fakultät Maschinenbau, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017
- [57] MATTHES, J. ; HOCK, J. ; WAIBEL, P. ; SCHERRMANN, A. ; GEHRMANN, H.-J. ; KELLER, H. B.: A high-speed camera based approach for the on-line analysis of particles in multi-fuel burner flames. In: *Experimental Thermal and Fluid Science* 73 (2016), Mai, S. 10–17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2015.08.017>
- [58] MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; KELLER, H. B.: Infrared camera based optimization of the Waelz process for zinc recycling. In: *2nd International Symposium on the Processing of Zinc Ores and Concentrates*. Kapstadt, Südafrika, 13. November 2010, 19-32, Curran Associates, Inc., Red Hook (NY). URL: <http://toc.proceedings.com/11543webtoc.pdf>
- [59] MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; KELLER, H. B.: A new infrared camera-based technology for the optimization of the Waelz process for zinc recycling. In: *Minerals Engineering* 24 (2011), Juli, Nr. 8, S. 944–949. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2011.04.020>
- [60] MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; KELLER, H. B.: Detection of empty grate regions in firing processes using Infrared cameras. In: *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT)*. Neapel, Italien, 11.-14. Juni 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2012.210>
- [61] MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; KELLER, H. B. ; GRÖLL, L. : Camera based identification and control of the Waelz process. In: *13th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)* Bd. 1. Lissabon, Portugal, 29.-31. Juli 2016, S. 291–298, SciTePress, Setúbal. DOI: <http://dx.doi.org/10.5220/0005957402910298>
- [62] MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; KELLER, H. B. ; SCHÖNECKER, H. : Vermeidung von Leistungseinbrüchen durch Detektion der Rostbeladung und frühzeitige Signalisierung in der thermischen Abfallbehandlung. In: *9. Potsdamer Fachtagung: Optimierungen*

*in der thermischen Abfall- und Reststoffbehandlung, Perspektiven und Möglichkeiten.* Potsdam, 23.-24. Februar 2012

- [63] MEHRAN, R. ; MOORE, B. E. ; SHAH, M. : A streakline representation of flow in crowded scenes. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. Heraklion, Griechenland, 5.-11. September 2010, S. 439–452, Springer, Berlin, Heidelberg. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-15558-1\\_32](http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-15558-1_32)
- [64] MÜLLER, B. ; KELLER, H. B.: Neural networks for combustion process modelling. In: *Conference on Engineering Applications of Neural Networks (EANN)*. London, Großbritannien, 17.-19. Juni 1996, S. 87–90
- [65] MÜLLER, B. ; KELLER, H. B.: Neural networks for on line estimation of the heating value in thermal treatment of waste. In: *New frontiers in computational intelligence and its applications* (2000), Januar, S. 68–75
- [66] MÜLLER, B. ; KELLER, H. B. ; KUGELE, E. : Fuzzy control in thermal waste treatment. In: *6th European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing (EUFIT)* Bd. 3. Aachen, 7.-10. September 1998, S. 1497–1501, Mainz, Aachen
- [67] MURPHY, K. P.: Conjugate bayesian analysis of the gaussian distribution. In: *Technischer Bericht* (2007), 3. Oktober. URL: <https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Papers/bayesGauss.pdf>
- [68] NOBIS, R. H.: Latest rotary kiln burner technology possibilities and experiences. In: *IEEE Record of Conference Papers: Technical Conference on Cement Industry XXXII*. Tarpon Springs, USA, 22.-24. Mai 1990, S. 289–318, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CITCON.1990.111059>
- [69] NORSKOV, L. K.: *Combustion of solid alternative fuels in the cement kiln burner*, Technical University of Denmark, Dissertation, 2012
- [70] PAL, N. R. ; PAL, S. K.: A review on image segmentation techniques. In: *Pattern Recognition* 26 (1993), September, Nr. 9, S. 1277–1294. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90135-J](http://dx.doi.org/10.1016/0031-3203(93)90135-J)
- [71] PANALYTICAL: 5. Juni 2018. URL: <http://www.panalytical.de/en/CubiX3-Cement.htm>
- [72] PIECHOTTKA, U. ; HAGENMEYER, V. : A discussion of the actual status of process control in theory and practice: a personal view from German process industry. In: *at - Automatisierungstechnik* 62 (2014), Januar, Nr. 2, S. 67–77. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/auto-2014-1018>
- [73] QIU, T. ; YAN, Y. ; LU, G. : An autoadaptive edge-detection algorithm for flame and fire image processing. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 61 (2012), Mai, Nr. 5, S. 1486–1493. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TIM.2011.2175833>

- [74] RAHMAN, A. ; RASUL, M. G. ; KHAN, M. M. K. ; SHARMA, S. : Impact of alternative fuels on the cement manufacturing plant performance: an overview. In: *Procedia Engineering* 56 (2013), S. 393–400. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.138>
- [75] RAZMI, S. M. ; SAAD, N. ; ASIRVADAM, V. S.: Vision-based flame analysis using motion and edge detection. In: *IEEE International Conference on Intelligent and Advanced Systems (ICIAS)*. Kuala Lumpur, Malaysia, 15.-17. November 2010, S. 1–4, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICIAS.2010.5716222>
- [76] SARC, R. ; POMBERGER, R. ; LORBER, K. E.: Perspektiven der Verwertung von Ersatzbrennstoffen in Zementwerken. In: *Strategie Planung Umweltrecht* 7 (2013), S. 139–162
- [77] SCHERRMANN, A. ; GEHRMANN, H.-J. ; BAUMANN, W. ; TEUSCHER, N. ; HAUSER, M. ; SEIFERT, H. ; STAPF, D. ; PAUR, H.-R. ; MATTHES, J. ; WAIBEL, P. ; VOGELBACHER, M. ; KELLER, H. B.: Mitverbrennung von Biomasse in einer Kraftwerksstaubfeuerung im Pilotmassstab. In: *Kraftwerkstechnik 2016: Strategien, Anlagentechnik und Betrieb* (2016), S. 605–624
- [78] SENTHILKUMARAN, N. ; RAJESH, R. : Edge detection techniques for image segmentation - a survey of soft computing approaches. In: *International Journal of Recent Trends in Engineering* 1 (2009), November, Nr. 2, S. 250–254
- [79] SERRA, J. : *Image analysis and mathematical morphology*. Orlando, USA : Academic Press, 1983
- [80] SHADDIX, C. R. ; MOLINA, A. : Particle imaging of ignition and devolatilization of pulverized coal during oxy-fuel combustion. In: *Proceedings of the Combustion Institute* 32 (2009), Nr. 2, S. 2091–2098. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proci.2008.06.157>
- [81] SMART, J. ; LU, G. ; YAN, Y. ; RILEY, G. : Characterisation of an oxy-coal flame through digital imaging. In: *Combustion and Flame* 157 (2010), Juni, Nr. 6, S. 1132–1139. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.combustflame.2009.10.017>
- [82] STILLER, C. ; KONRAD, J. : Estimating motion in image sequences. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 16 (1999), Nr. 4, S. 70–91. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/79.774934>
- [83] STRUTZ, T. : *Data fitting and uncertainty: a practical introduction to weighted least squares and beyond*. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag, 2015
- [84] SUN, D. ; LU, G. ; ZHOU, H. ; YAN, Y. : Flame stability monitoring and characterization through digital imaging and spectral analysis. In: *Measurement Science and Technology* 22 (2011), Oktober, Nr. 11, S. 1–9. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/22/11/114007>

- [85] SUN, D. ; LU, G. ; ZHOU, H. ; YAN, Y. : Condition monitoring of combustion processes through flame imaging and kernel principal component analysis. In: *Combustion Science and Technology* 185 (2013), Dezember, Nr. 9, S. 1400–1413. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00102202.2013.798316>
- [86] SZATVANYI, G. ; DUCHESNE, C. ; BARTOLACCI, G. : Multivariate image analysis of flames for product quality and combustion control in rotary kilns. In: *Industrial & Engineering Chemistry Research* 45 (2006), Nr. 13, S. 4706–4715. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ie051336q>
- [87] SZELISKI, R. : *Computer vision - algorithm and applications*. London, Großbritannien : Springer-Verlag, 2011
- [88] THÖNI, C. : Von Schartenhöhe und Dominanz. In: *Die Alpen* (2003)
- [89] TÖREYIN, B. U. ; CENTIN, A. E.: Online detection of fire in video. In: *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. Minneapolis, USA, 17.22. Juni 2007, S. 1–5, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CVPR.2007.383442>
- [90] TÖREYIN, B. U. ; DEDEOGLU, Y. ; GÜDÜKBAY, U. ; CETIN, E. : Computer vision based method for real-time fire and flame detection. In: *Pattern Recognition Letters* 27 (2006), Januar, Nr. 1, S. 49–58. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.patrec.2005.06.015>
- [91] TRUONG, T. X. ; KIM, J. M.: Fire flame detection in video sequences using multi-stage pattern recognition techniques. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 25 (2012), Oktober, Nr. 7, S. 1365–1372. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engappai.2012.05.007>
- [92] UNITHERM CEMCON: *M.A.S. Kiln Burner - UNICAL Calciner Burner/M.A.S. GAS Burner*. Broschüre, 2015
- [93] VACCARO, M. : Burning alternative fuels in rotary cement kilns. In: *IEEE Cement Industry Technical Conference*. Phoenix, USA, 9.-14. April 2006, S. 127–136, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CITCON.2006.1635711>
- [94] VDZ - VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE: *Zement-Taschenbuch 2002*. Düsseldorf : Verlag Bau+Technik, 2002
- [95] VDZ - VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE: *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2014*. URL: <https://www.vdz-online.de/publikationen/umweltdaten/>. Version: 5. Juni 2018
- [96] VDZ - VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE: *Zementindustrie im Überblick 2016/2017*. URL: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick/>. Version: 5. Juni 2018
- [97] VDZ - VEREIN DEUTSCHER ZEMENTWERKE: *Zementindustrie im Überblick 2017/2018*. URL: <https://www.vdz-online.de/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick/>. Version: 5. Juni 2018

- [98] VOGELBACHER, M. : *Ermittlung und Analyse neuer bildbasierter Prozesskenngrößen aus Infrarotaufnahmen für die thermische Sondermüllbehandlung in Drehrohröfen*. Diplomarbeit, IAI, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011
- [99] VOGELBACHER, M. : Review and outlook for texture analysis methods. In: *Joint Workshop of Fraunhofer IOSB and Institute for Anthropomatics, Vision and Fusion Laboratory 13* (2012), S. 11–25
- [100] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Bildbasierte Überwachung alternativer Brennstoffe eines Mehrstoffbrenners bei industriellen Verbrennungsprozessen. In: *Forum Bildverarbeitung*. Karlsruhe, 1.-2. Dezember 2016, S. 297–308, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe. DOI: <http://dx.doi.org/10.5445/KSP/1000059899>
- [101] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern. In: *5. Jahrestagung des KIT-Zentrums Energie, Blick nach Vorne - Energiesystem 2050*. Karlsruhe, 15. Juni 2016
- [102] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Bildbasierte Überwachung und Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern. In: *VDI-Berichte 2280: Anlagenbezogenes Monitoring : neue Anforderungen - neue Konzepte*. Würzburg, 25.-26. Oktober 2016, S. 201–212, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [103] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Camera-based optimization of alternative fuel combustion with multi-fuel burners. In: *8th European Combustion Meeting (ECM)*. Dubrovnik, Kroatien, 18.-21. April 2017
- [104] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Image-based characterization of alternative fuel combustion with multi-fuel burners. In: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (2017), August, Nr. 2, S. 588–597. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TII.2017.2742533>
- [105] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Optimierung der Verbrennung von alternativen Brennstoffen bei Mehrstoffbrennern durch bildbasierte Verfahren. In: *VDI-Berichte 2302: 28. Deutscher Flammentag: Verbrennung und Feuerung*. Darmstadt, 6.-7. September 2017, S. 757–763, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [106] VOGELBACHER, M. ; WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B. ; FRIEDRICH, H.-P. : *DE 10 2016 000 290 A1: Auswerte- und Regelungsverfahren für Mehrstoffbrenner und Auswerte- und Regelungsanordnung dafür*. Patent, Offenlegung, 2017
- [107] WAIBEL, P. : *Ermittlung und Analyse neuer bildbasierter Prozesskenngrößen aus Infrarot-Aufnahmen für industrielle Anwendungen des Wälzrohrverfahrens*. Diplomarbeit, IAI, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2007
- [108] WAIBEL, P. : *Konzeption von Verfahren zur kamerabasierten Analyse und Optimierung von Drehrohrofenprozessen*, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Dissertation, 2014

- [109] WAIBEL, P. : Kamerabasierte Optimierung der Prozessführung von Drehrohröfen. In: *at - Automatisierungstechnik* 64 (2016), Nr. 12, S. 990–1002. DOI: <http://dx.doi.org/10.1515/auto-2016-0068>
- [110] WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Kamerabasierte Messverfahren zur Bestimmung neuartiger Prozesskenngrößen bei thermischen Prozessen. In: *VDI-Berichte 2056: 24. Deutscher Flammentag - Verbrennung und Feuerung*. Bochum, 16.-17. September 2009, S. 543–546, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [111] WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Segmentation of the solid bed in infrared image sequences of rotary kilns. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics (ICINCO)* Bd. 1. Funchal, Portugal, 15.-18. Juni 2010, S. 217–220, SciTePress, Setúbal. DOI: <http://dx.doi.org/10.5220/0002880402170220>
- [112] WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Camera-based analysis of rotary kilns. In: *International Computer Vision Summer School (ICVSS)*. Sizilien, Italien, 11.-16. Juli 2011
- [113] WAIBEL, P. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B. ; GEHRMANN, H.-J. ; KOLB, T. : Kamerabasierte Analyse von Mehrstoffbrennern. In: *VDI-Berichte 2119: 25. Deutscher Flammentag Verbrennung und Feuerung*. Karlsruhe, 14.-15. September 2011, S. 421–426, VDI-Verlag, Düsseldorf
- [114] WAIBEL, P. ; VOGELBACHER, M. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Infrared camera-based detection and analysis of barrels in rotary kilns for waste incineration. In: *11th International Conference on Quantitative Infrared Thermography (QIRT)*. Neapel, Italien, 11.-14. Juni 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.21611/qirt.2012.203>
- [115] WARTMANN, C. : *Das Blender-Buch: 3D-Grafik und Animation mit Blender*. Heidelberg : dpunkt.verlag, 2014
- [116] WIRTHWEIN, R. ; EMBERGER, B. : Burners for alternative fuels utilisation - optimisation of kiln firing systems for advanced alternative fuel co-firing. In: *Cement International* 4 (2010), S. 42–46
- [117] XINGXING, S. ; FUZHEN, H. : Flame edge detection based on C-V active contour model. In: *IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence (AICI)* Bd. 2. Shanghai, China, 7.-8. November 2009, S. 413–417, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/AICI.2009.321>
- [118] XUAN, Y. ; JIHONG, P. ; WANHAI, Y. : Firing particle flow detection and tracking in sequence images. In: *IEEE Proceedings of the 3d World Congress on Intelligent Control and Automation* Bd. 4. Hefei, China, 26. Juni - 2. Juli 2000, S. 2666–2670, IEEE, Piscataway (NJ). DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/WCICA.2000.862537>
- [119] YAN, Y. ; LU, G. ; COLECHIN, M. : Monitoring and characterisation of pulverised coal flames using digital imaging techniques. In: *Fuel* 81 (2002), März, Nr. 5, S. 647–656. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361\(01\)00161-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0016-2361(01)00161-2)

- [120] YU, H. ; MACGREGOR, J. F.: Monitoring flames in an industrial boiler using multivariate image analysis. In: *American Institute of Chemical Engineers* 50 (2004), Juni, Nr. 7, S. 1474–1483. DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/aic.10164>
- [121] ZHANG, L. ; BINNER, E. ; QIAO, Y. ; LI, C. Z.: High-speed camera observation of coal combustion in air and  $O_2 / CO_2$  mixtures and measurement of burning coal particle velocity. In: *Energy & Fuels* 24 (2010), September, Nr. 1, S. 29–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ef900463r>
- [122] ZHAO, H. ; LADOMMATOS, N. : Optical diagnostics for soot and temperature measurement in diesel engines. In: *Progress in Energy and Combustion Science* 24 (1998), Nr. 3, S. 221–255. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285\(97\)00033-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0360-1285(97)00033-6)
- [123] ZIPSER, S. ; GOMMLICH, A. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B. ; FOUDA, C. : On the optimization of industrial combustion processes using infrared thermography. In: *Proceedings of the 23rd International Conference on Modelling, Identification and Control (IASTED)*. Grindelwald, Schweiz, 23.-25. Februar 2004, S. 386–391, ACTA Press, Calgary
- [124] ZIPSER, S. ; MATTHES, J. ; KELLER, H. B.: Kamerabasierte Regelung von Feuerungsprozessen mit dem Software-Werkzeug INSPECT. In: *at - Automatisierungstechnik* 54 (2006), S. 574–581. DOI: <http://dx.doi.org/10.1524/auto.2006.54.11.574>