Dissertation

Klasen, T.

Essen, 2003

Auszüge aus:

Modell zur Abbildung der heterogenen Rostverbrennung: Erstellung, Validierung und Anwendung

InPro-Consult GmbH

SIPREU-TEC Innovative Prozessoptimierung AnSimO GmbH

Simulation und Optimierung von Rostfeuerungen

- Einsatz von Computational Fluid Dynamics (CFD) -

InPro-Consult GmbH

SIPREU-TEC Innovative Prozessoptimierung AnSimO GmbH

InPro-Consult GmbH

Gesellschaft zur innovativen Prozessoptimierung mbH

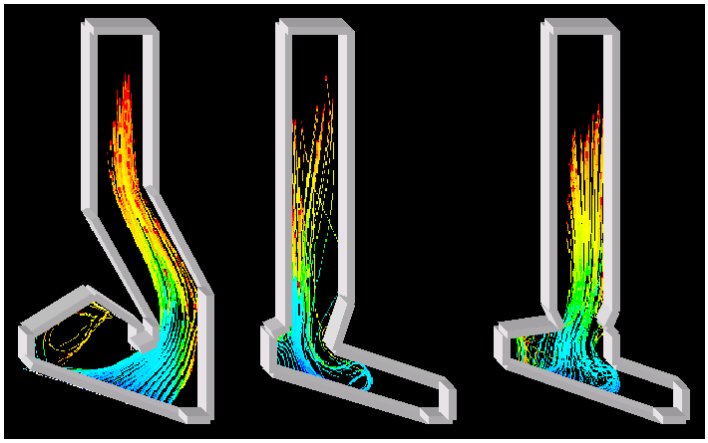
Anschrift: Kruppstr. 82, 45145 Essen

Internet: www.inpro-consult.de
E-Mail: kontakt@inpro-consult.de

Ansprechpartner:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Görner
(0201) 183 75 10
klaus.goerner@inpro-consult.de

Dr.-Ing. Thomas Klasen
(0201) 183 75 21
thomas.klasen@inpro-consult.de



Einleitung und Problemstellung:

Das größte Problem bei der Verbrennung von Abfällen und Ersatzbrennstoffen ist die zeitlich stark veränderliche Brennstoffzusammensetzung sowie die stark unterschiedlichen Abbrandcharakteristiken. In Zeitabständen von Minuten können sich die Brennstoffeigenschaften deutlich verändern, was eine Beeinflussung der Abbrenngeschwindigkeit und somit auch des lokalen Luftbedarfes auf dem Verbrennungsrost zur Folge hat. Bei einer Vielzahl von Anlagen offenbarten sich daher nach gewissen Reisezeiten die beiden folgenden Probleme:

- **Korrosionserscheinungen** (vor allem an den Wänden des Feuerraumes sowie der Nachbrennkammer und an den Überhitzerheizflächen) und
- **Verschlackungen und Verschmutzungen** (insb. der Kesselheizflächen).

Bild 1 zeigt für eine nicht-optimierte Anlage den verschlackten Schottenüberhitzer nach einer Reisezeit von 3000 Betriebsstunden.

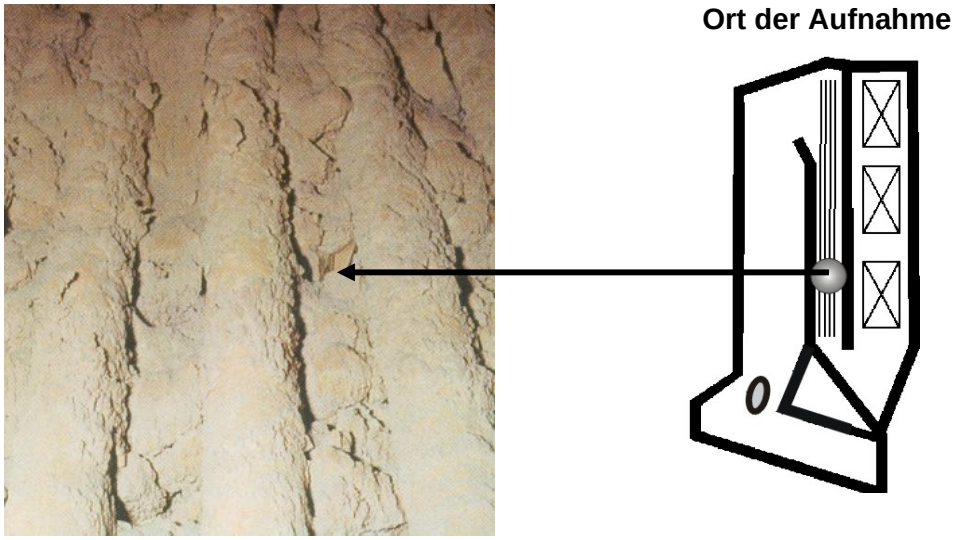


Bild 1: Vor einer Optimierung: Verschlackter Schottenüberhitzer

Ausfallzeiten, Reinigungs- und Reparaturkosten, die in erster Linie auf Grund von Verschmutzungen, Verschlackungen und Korrosionen entstehen, können schnell zu einem großen wirtschaftlichen Problem werden.

In der Regel liegen die Kosten für einen Kessel-Stillstand bei ca. 50.000 Euro / Tag.

Die Anlagenverfügbarkeit kann durch einen verbesserten Verbrennungsprozess deutlich erhöht werden. Die Simulation und Optimierung einer Anlage kann heutzutage mit dem Werkzeug "CFD" und einem für die heterogene Rostverbrennung notwendigem Zusatzmodell durchgeführt werden. Im Rahmen der wissenschaftlichen Tätigkeit am Essener Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik der Universität Duisburg-Essen wurde dieses spezielle Modell seit 1997 für Hausmüll entwickelt und mit großem Erfolg bei diversen Großanlagen angewendet. Konzentrations-, Temperatur- und Geschwindigkeitsverläufe können mit Hilfe von dreidimensionalen numerischen Strömungsberechnungen im Gegensatz zu beispielsweise relativ teueren und nicht sehr abbildungsgenauen Plexiglas-Modellen innerhalb kürzester Zeit für verschiedene Betriebsfälle untersucht und optimiert werden. Vor allem sind Unterwindverteilungen, Wärmeprofile auf der Rostbahn, Sekundärlufteindüsungen (Eindüsungsgeschwindigkeit, Geometrie, Anströmwinkel, Luftverteilung, ...), Feuerfestmaterialien und Lastpunkte beliebig variierbar. Reinigungs- und Reparaturkosten können somit erheblich gesenkt werden, sodass sich ein Umbau häufig schon nach kurzer Zeit amortisiert.

Grundsätzlich wurden diverse anlagenspezifische Modifikationen durchgeführt, um den Verbrennungsprozess zu optimieren. Hierbei sind vor allem folgende Punkte zu nennen, die auch simulationstechnisch im Rahmen von Forschungsstudien näher untersucht worden sind:

- **Feuerraumgeometrie:**
  Konzipierung von Gleich-, Mittel- und Gegenstromfeuerungen (Bild 2)

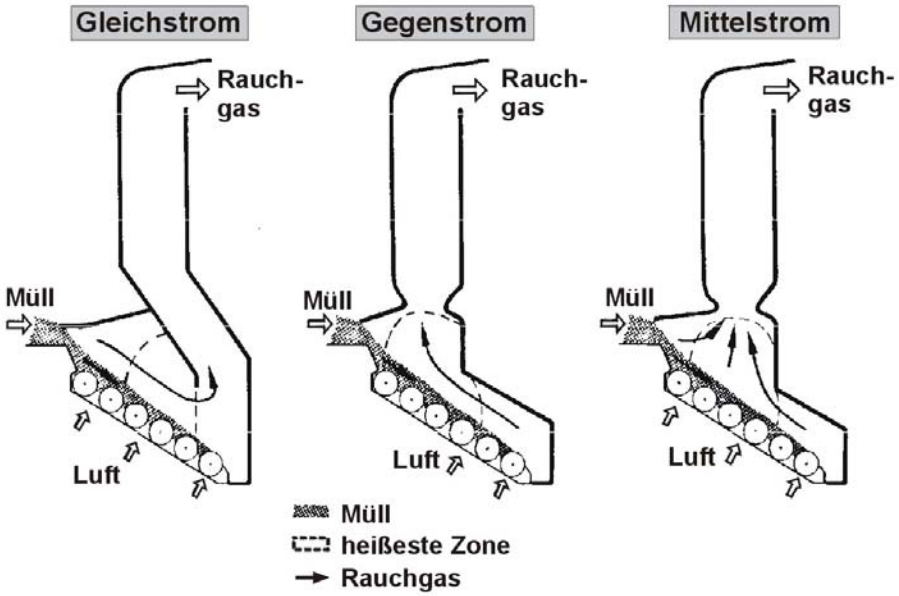


Bild 2: Schematisierte Darstellung von Rostfeuerungsanlagen

- **Feuerfestmaterial:**
  Mit neuen Produkten und Bindesystemen, verstärktem Einsatz von dichten vorgeformten Materialien und speziellen Haltesystemen haben die Hersteller von Feuerfestprodukten auf die höheren thermischen und komplexeren chemischen Betriebsbedingungen reagiert.

- **Sekundärluftzuführung:**
  Zum einen wurden die Winkelanstellungen der einzelnen Düsen variiert, um bestimmte Strömungseffekte zu induzieren, zum anderen kamen zusätzliche verfahrens- und anlagentechnische Varianten mit dem Ziel einer Strömungsvergleichmäßigung im Bereich des Übergangs vom Feuerraum in den 1. Zug zum Einsatz (engster Querschnitt), wie Bild 3 zeigt.

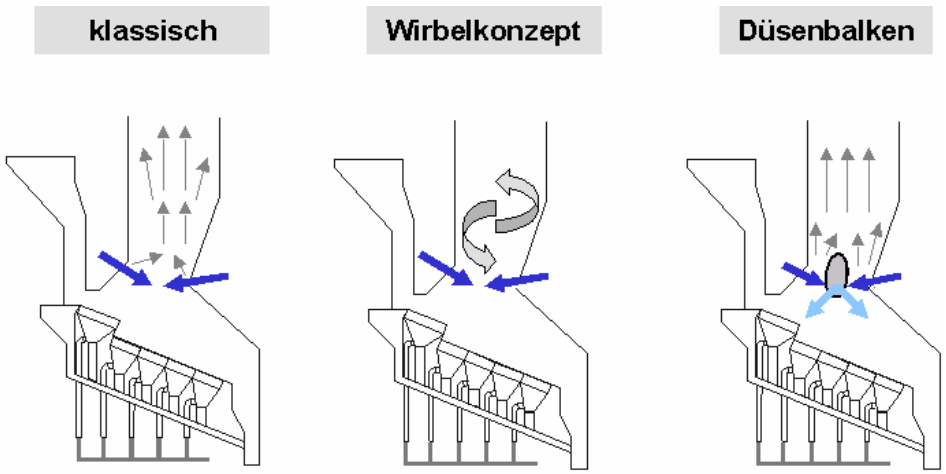


Bild 3: Sekundärluftzuführungskonzepte

Modellierung:

Gasphasenmodellierung

Das eingesetzte mathematische Modell basiert auf der Beschreibung der bei der Verbrennung relevanten Teilprozesse wie Strömung/Mischung, Reaktion und Energieaustausch (Strahlung, Konvektion und Leitung) innerhalb des betrachteten Raums und mit den Umfassungswänden (Feuerraum). Dabei werden diese Prozesse über ein System von partiellen Differentialgleichungen (Transportgleichungen) abgebildet und diese Gleichungen numerisch gelöst. Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist die 3-dimensionale Verteilung der Zustandsgrößen:

- Geschwindigkeit,
- Turbulenz (Mischung),
- Spezies (wie z.B. C_xH_y, CO, CO_2, H_2O, O_2, Partikel) und
- Temperaturen (Gasphase und Partikel).

Diese Vorgehensweise kann mit großem Erfolg auf die kontinuierliche Gasphase und auf eine stark verdünnte disperse Phase angewendet werden, also auf Feuerraum, Strahlraum, Leerzüge und mit Einschränkung auf konvektive Züge eines Dampferzeugers.

Festbettmodellierung

Nicht direkt angewendet werden können diese Ansätze für die heterogene Phase, nämlich das Festbett (Müllbahn). Die wesentlichen Ursachen dafür liegen in der Konsistenz des Abfalls mit seinen zeitlich und räumlich stark schwankenden Eigenschaften. Am LUAT wurde für die Müllbahn ein vereinfachtes, eindimensionales Modell entwickelt, mit dem sich das Wärmefreisetzungsprofil und die Speziesverteilung über der Müllbahn näherungsweise angeben lassen. Bild 4 zeigt exemplarisch verschiedene Wärmefreisetzungsprofile, wie sie bei unterschiedlichen Feuerraumgeometrien und Müllparametern zu erwarten sind.

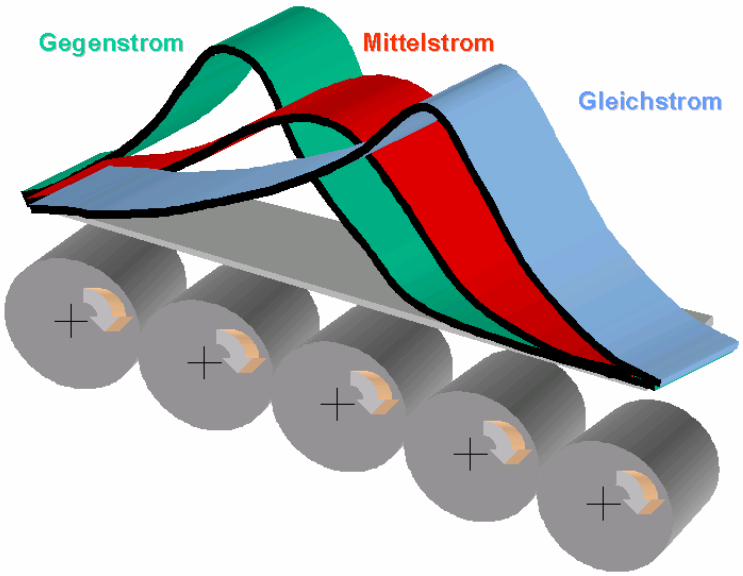


Bild 4: Wärmefreisetzung über der Müllbahn am Beispiel eines Walzenrostes

Aus einer Gesamt-Massen- und Energiebilanz werden die Konzentrationsprofile für CO, CO_2, O_2 und C_xH_y und die Temperatur der Gasphase über der Müllbahn als Randbedingung für die Gasphasenberechnung bestimmt.

Modellvalidierung:

Für einen Referenzfall konnten gemessene und numerisch berechnete Werte verglichen werden. Bei der Gegenüberstellung konnte festgestellt werden, dass sowohl die Niveaus der Mittelwerte in allen Messebenen (Bild 5) als auch die Einzelmesswerte je Ebene ausreichend genau abgebildet werden (Bild 6).

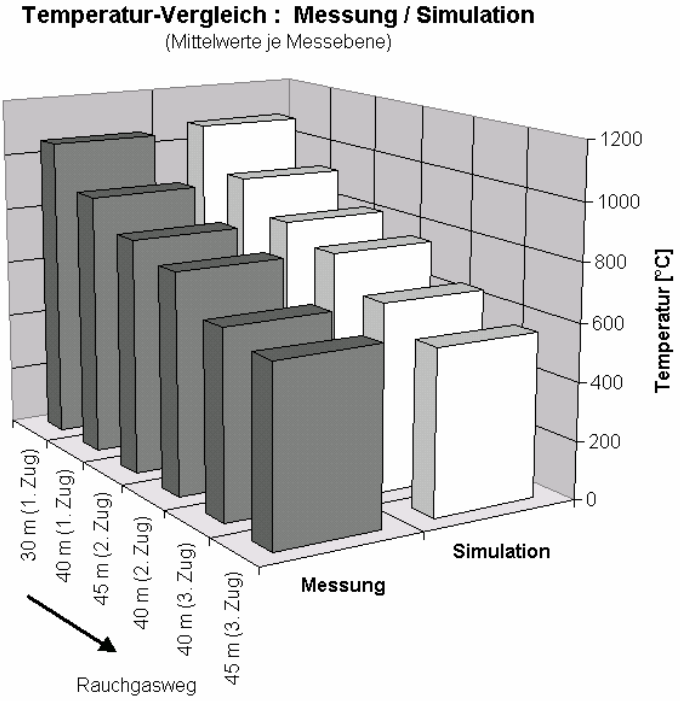


Bild 5: Gemessene und berechnete Temperatur-Mittelwerte

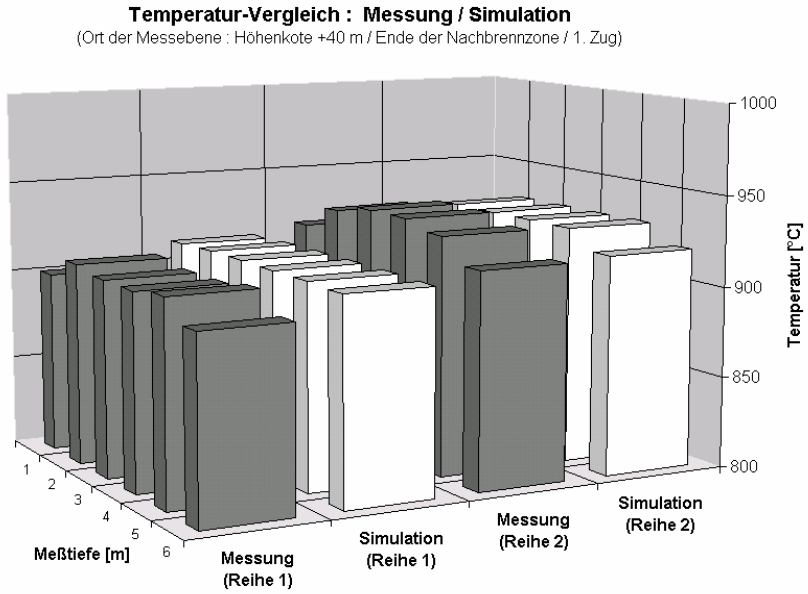


Bild 6: Gemessene und berechnete Temperatur-Einzelwerte

Modifizierung des Sub-Modells für den Brennstoff "Holz"

Biomasse (insbesondere Holz) besitzt eine gänzlich veränderte Abbrandcharakteristik. Zunächst wurden allerdings bei der Abbildung von Biomasseanlagen die "Müll-Profile" verwendet. Wie Bild 7 zeigt, lag die Differenz zwischen Mess- und Simulationswerten bei einer großen Laboranlage (MARS-Anlage am Essener Lehrstuhl für Umweltverfahrenstechnik und Anlagentechnik) an einigen Messstellen bei über 200 K.

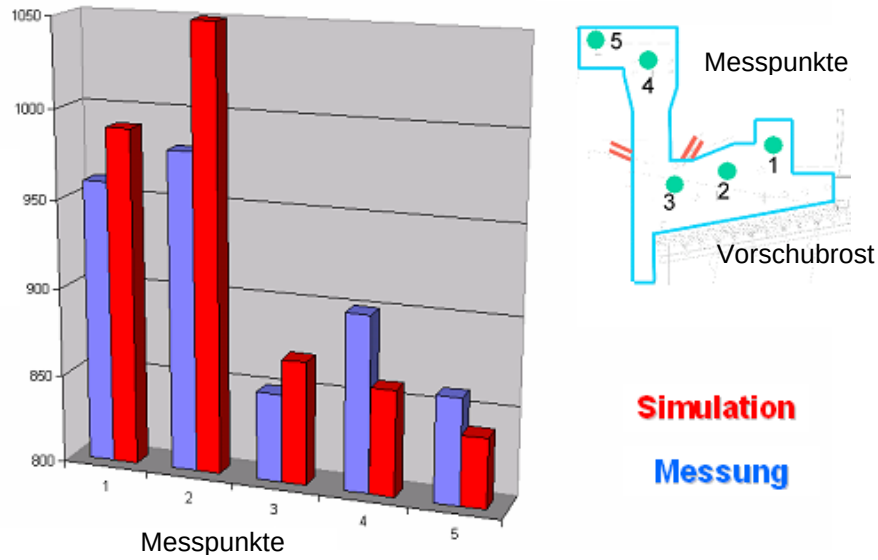


Bild 7: Temperaturen in °C (Brennstoff "Holz" mit Sub-Modell für Hausmüll)

Die Profile über dem Rost mussten auf Grund der veränderten Wärmefreisetzung also modifiziert werden. Bild 8 zeigt den Vergleich der Wärmefreisetzungsprofile von Hausmüll sowie Holz.

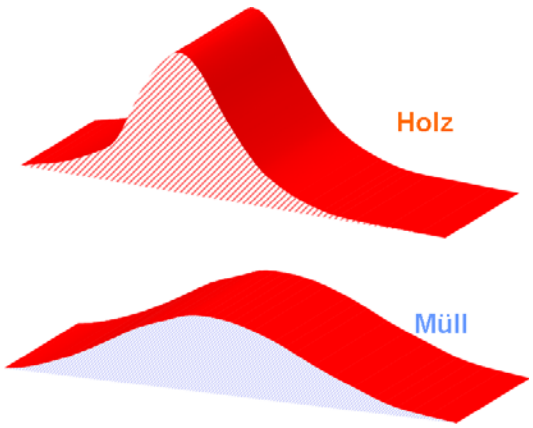


Bild 8: Wärmefreisetzung für die Brennstoffe "Holz" und "Hausmüll"

Mit den neu konzipierten Rost-Profilen für Holz wurde die Laboranlage erneut simulationstechnisch abgebildet. Dieses Mal wurden die Verhältnisse durch die Simulation ziemlich gut abgebildet, wie in Bild 9 verdeutlicht wird.

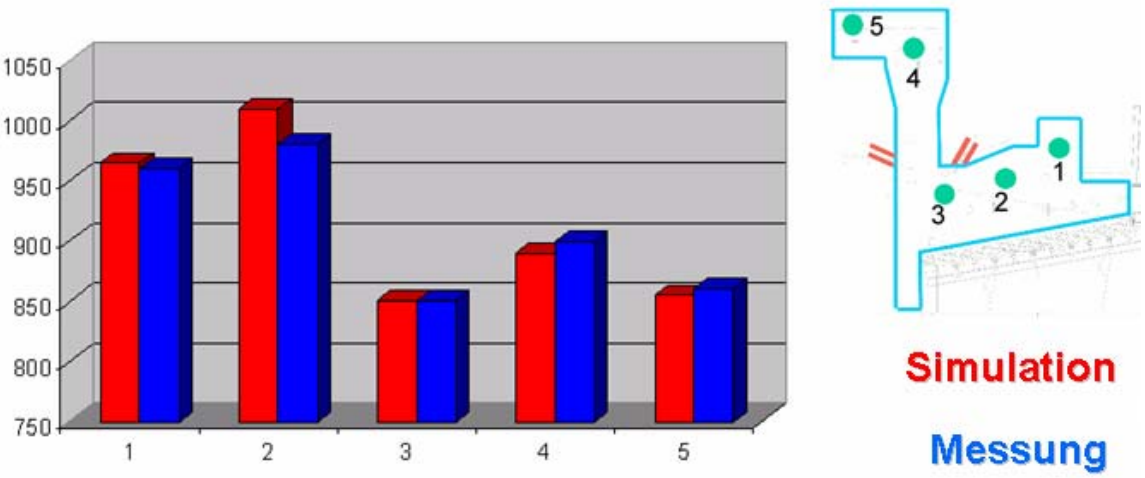


Bild 9: Temperaturen in °C (Brennstoff "Holz" mit Sub-Modell für Holz)

Die an der Laboranlage gefunden Beziehungen wurden anschließend auch an großen Realanlagen überprüft sowie ebenfalls bestätigt, sodass das "Werkzeug" CFD in Kombination mit dem modifizierten Sub-Modelll nun auch problemlos bei Biomasse-Anlagen eingesetzt werden kann.

Optimierungsbeispiele:

Beispiel 1: Sekundärluftverteilung

Ein wichtiger Einflussfaktor auf den Verbrennungsprozess stellt die Verteilung der Sekundärluft auf die einzelnen Düsenreihen dar. Für die Optimierung einer Gleichstromfeuerung wurden nach der Abbildung des Referenzfalles zwei weitere Betriebsfälle simuliert. Gegenüber dem Referenzfall lag der Unterschied vor allem in der Sekundärluftmenge der Düsenreihe 2, welche in der Mitte der Feuerraum-decke angeordnet war. Bei Betriebsfall A wurde die Düsenreihe 2 mit der doppelten Luftmenge beaufschlagt, bei Betriebsfall B war es die dreifache Menge. Die Bilder 10 - 12 sollen verdeutlichen, welches Optimierungspotential in einigen Anlagen noch vorhanden ist.

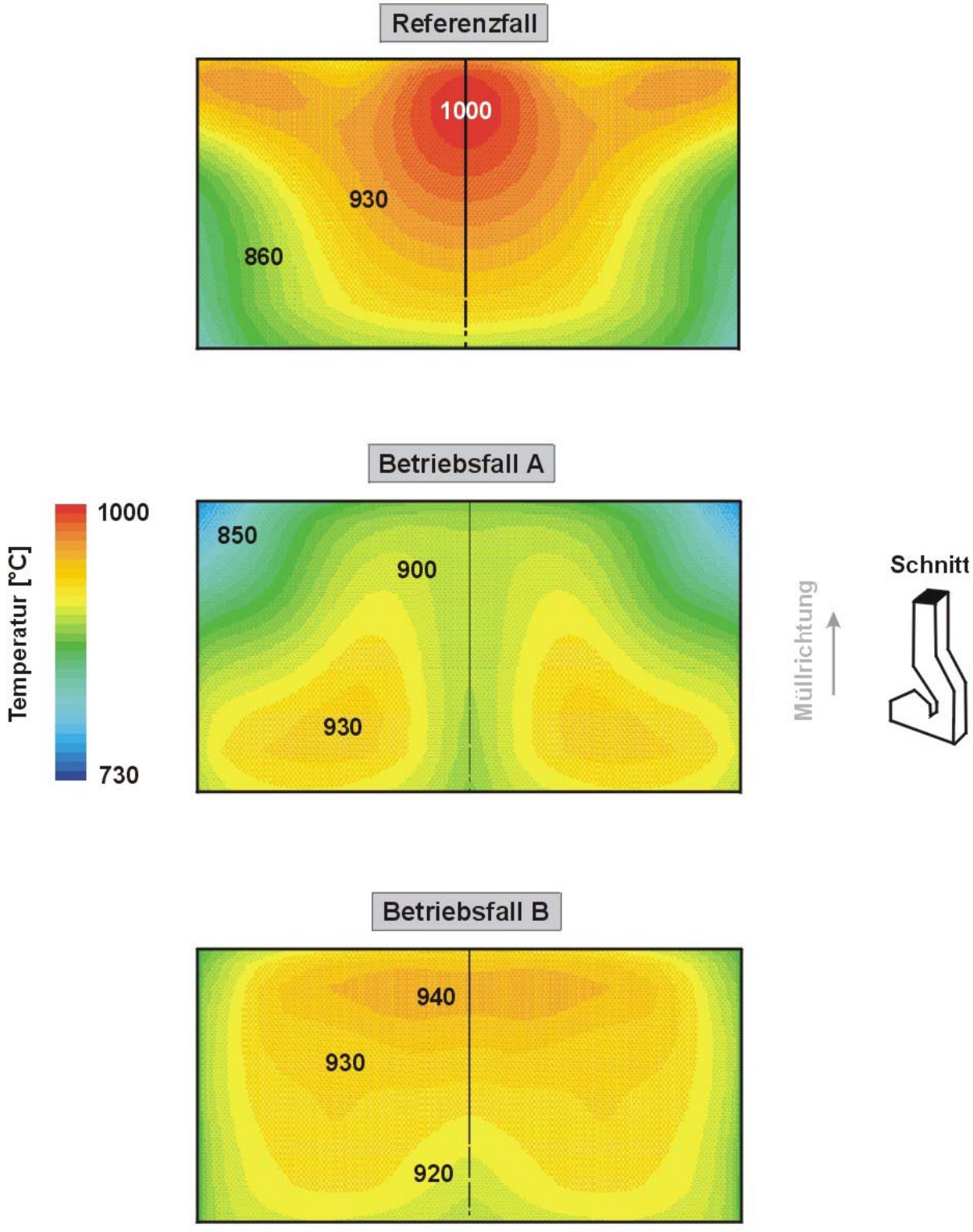


Bild 10: Vorhergesagte Temperaturen am Ende des 1. Zuges einer Hausmüllverbrennungsanlage

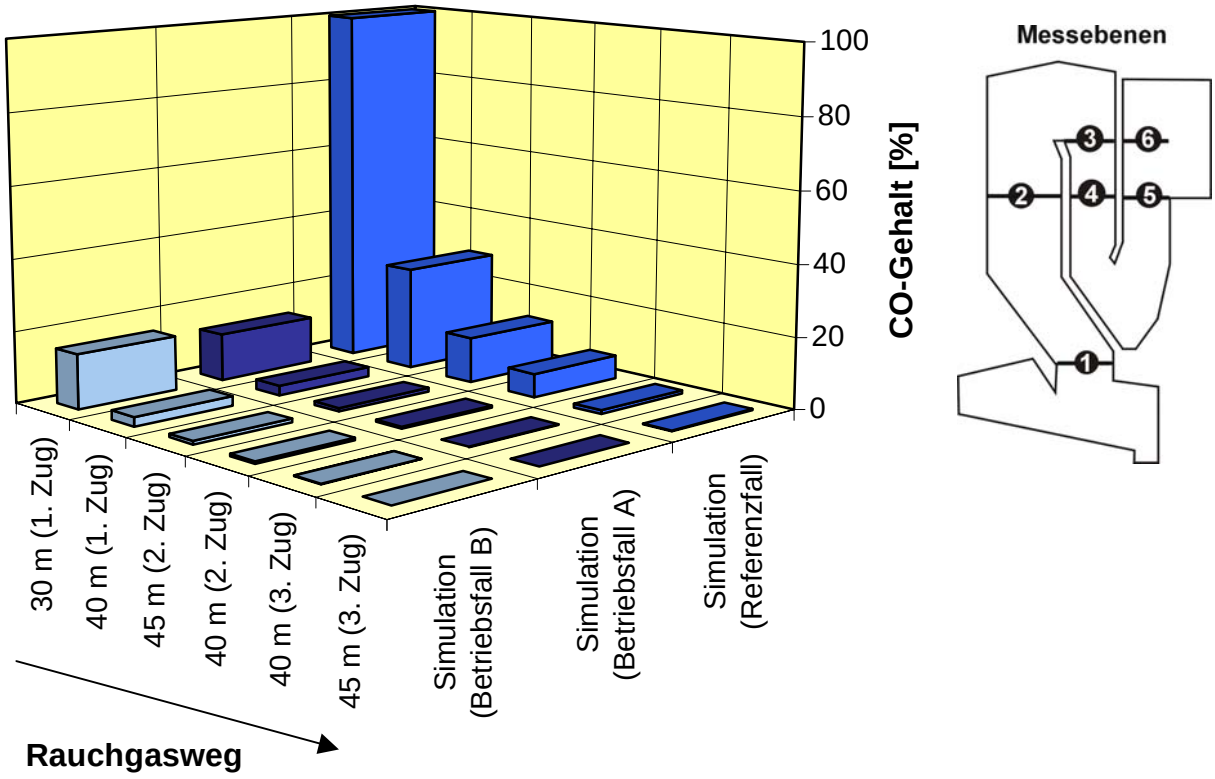


Bild 11: Numerisch berechnete CO-Mittelwerte (normiert) in allen Messebenen

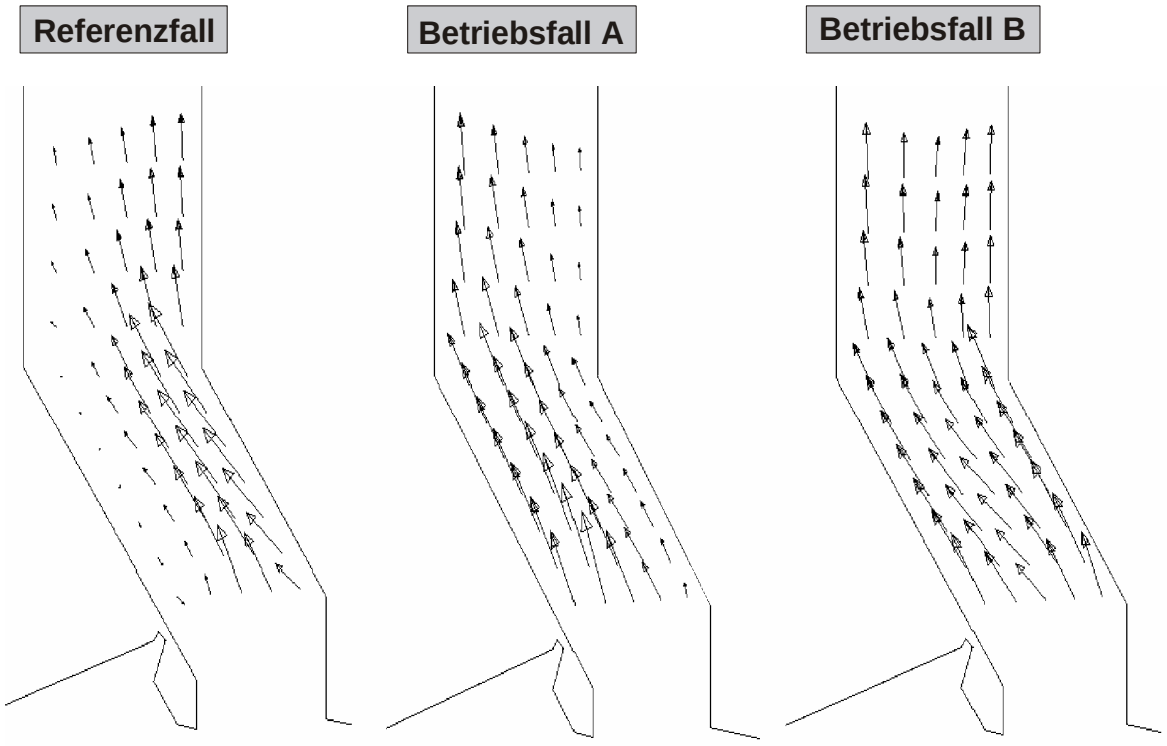


Bild 12: Vektordarstellung im Bereich des Schrägzuges für drei Betriebsfälle

Allen Ergebnissen ist zu entnehmen, dass der Referenzfall hinsichtlich der Verbrennungsbedingungen noch deutlich optimiert werden konnte. Um für alle sechs Messebenen die CO-Niveaus der drei Betriebsfälle in einem Diagramm erkenntlich machen zu können, wurden die CO-Mittelwerte normiert. Hiermit kann aus Bild 11 abgeleitet werden, dass die CO-Niveaus bei den Betriebsfällen A und B im Vergleich zum Referenzfall wesentlich niedriger sind. Vor allem im 1. Zug ist das gemittelte Niveau um etwa 90% kleiner. Das Geschwindigkeitsfeld ist beim Betriebsfall A gegenüber der Anfangsauslegung erheblich verbessert worden. Am gleichmäßigsten sieht aber das Strömungsfeld für Betriebsfall B aus. Bei der Vektordarstellung für den Referenzfall fällt die schon erwähnte Strömungsanlegung an der Feuerraumrückwand auf. Wird die in der Feuerraumdecke angeordnete Sekundärluftdüsenreihe 2 mit einer doppelten oder dreifachen Menge beaufschlagt, kann dieser Effekt unterbunden werden. Allerdings ist diese Änderung in sehr vielen Altanlagen nicht umsetzbar, da die Austrittsgeschwindigkeiten auf Grund von feststehenden Düsendurchmessern viel zu groß werden würden. Außerdem müssten gegebenenfalls die Sekundärluftgebläse ausgewechselt werden, was zu erheblichen Kosten führen würde.

Die Verbesserungen im Strömungsfeld machen sich auch direkt in den Temperaturverteilungen bemerkbar. Genau in den Rezirkulations- sowie Totzonen ergeben sich bei den beiden ersten Betriebsfällen deutlich abgesenkte Temperaturen. Da in diesen Regionen nur bedingt Verbrennungsreaktionen ablaufen, ist die Temperatur folglich auch viel geringer. Ein sehr homogenes Geschwindigkeitsfeld lässt auch sehr homogene Temperaturverteilungen resultieren, wie an dem Schnitt am Ende des 1. Zuges beim Betriebsfall B zu beobachten ist. Der Unterschied zwischen maximaler und minimaler Temperatur liegt in der gewählten Ebene bei ca. 30 K.

Beispiel 2: Sekundärlufteindüsung

Bei einer realen Müllverbrennungsanlage wurde ursprünglich das klassische Sekundärluftzuführungskonzept verwendet. Bereits nach kurzer Reisezeit wurde allerdings festgestellt, dass die Kesselheizflächen durch Aschepartikel belegt und Korrosionserscheinungen zu erkennen waren. Als Umbaumaßnahme sollte am Übergang vom Feuer- in den Nachbrennraum ein Verdrängungskörper (Düsenbalken bzw. Prisma) integriert werden.

Mit Hilfe von numerischen Berechnungen konnte insbesondere die Sekundärlufteindüsung vom Prisma optimiert werden. Die Verbesserungen gegenüber dem alten Zustand werden in den Bildern 13 - 15 deutlich.

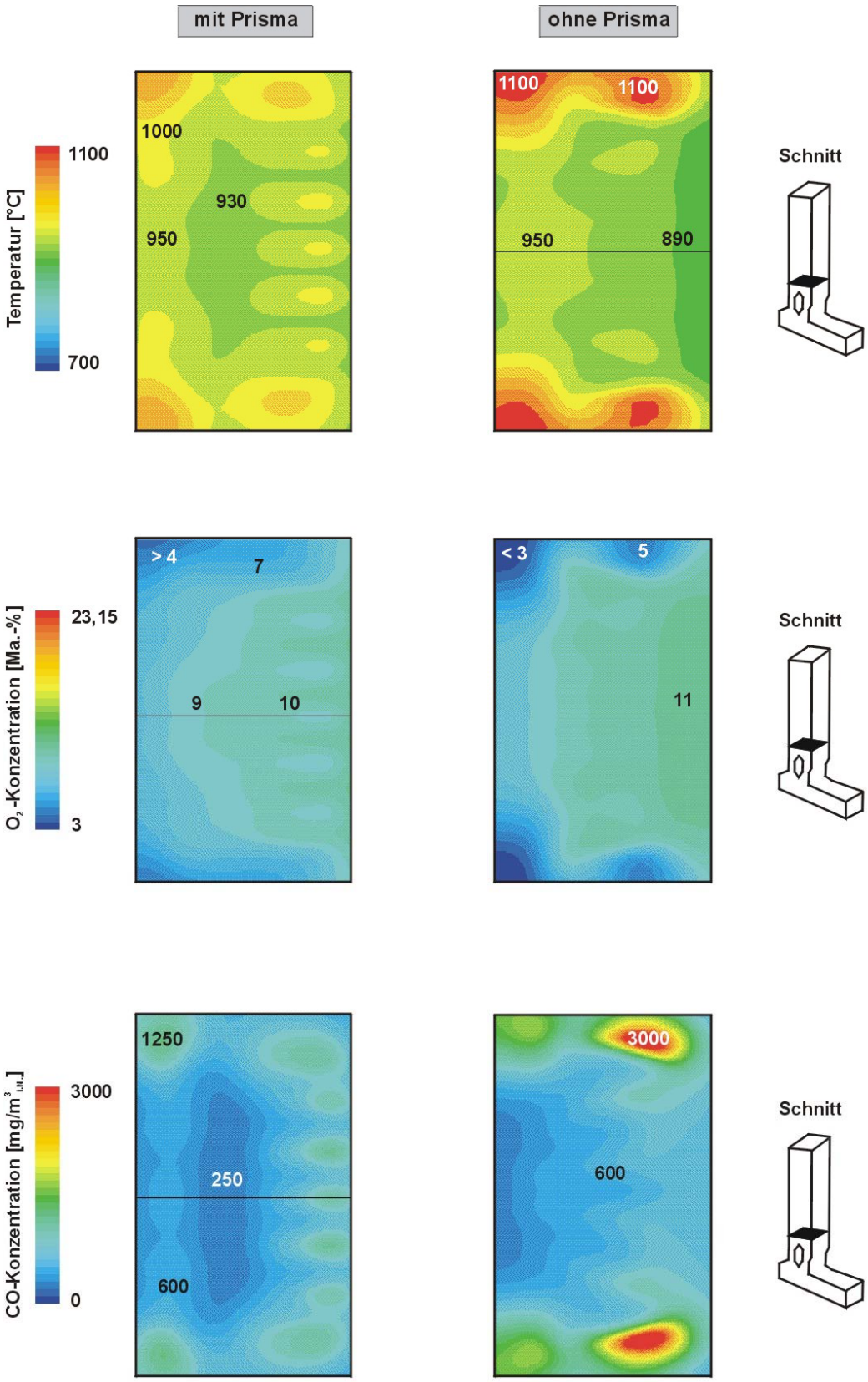


Bild 13: Einfluss eines Düsenbalkens auf Temperatur- und Speziesverteilungen

Am Geschwindigkeitsfeld kann erneut erkannt werden, dass eine homogene Strömung gleichmäßige Temperatur- und Speziesverteilungen zur Folge hat. In allen Darstellungen sind die verbesserten Bedingungen beim Einsatz des Prismas eindeutig feststellbar. Der Temperaturgradient sowie die maximale CO-Konzentration in der aufgeführten Schnittebene konnten jeweils mehr als halbiert werden.

Abschließend werden noch Fotos vorgestellt, die zeigen sollen, wie gut die Betriebsergebnisse nach dem auf den Simulationsergebnissen basierenden Umbau, waren. Vor dem Umbau sind bereits nach ca. 3.000 Betriebsstunden Mängel an den Kesselheizflächen zu beobachten gewesen. Bild 1 zeigte bereits einen derartigen schlackenbelegten Schottenüberhitzer.

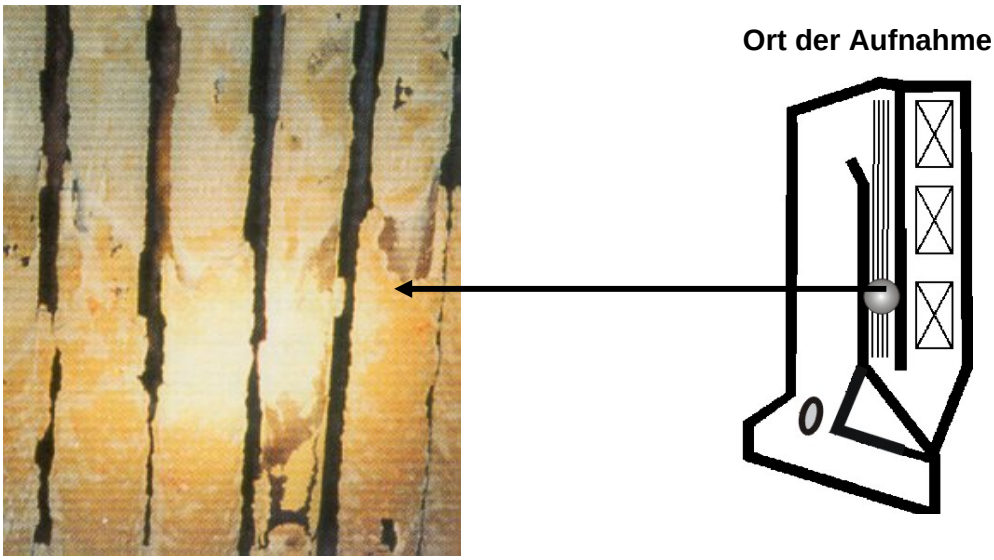


Bild 14: Nach Auslegungsempfehlung auf Basis von CFD: Schlackenfreier Überh.

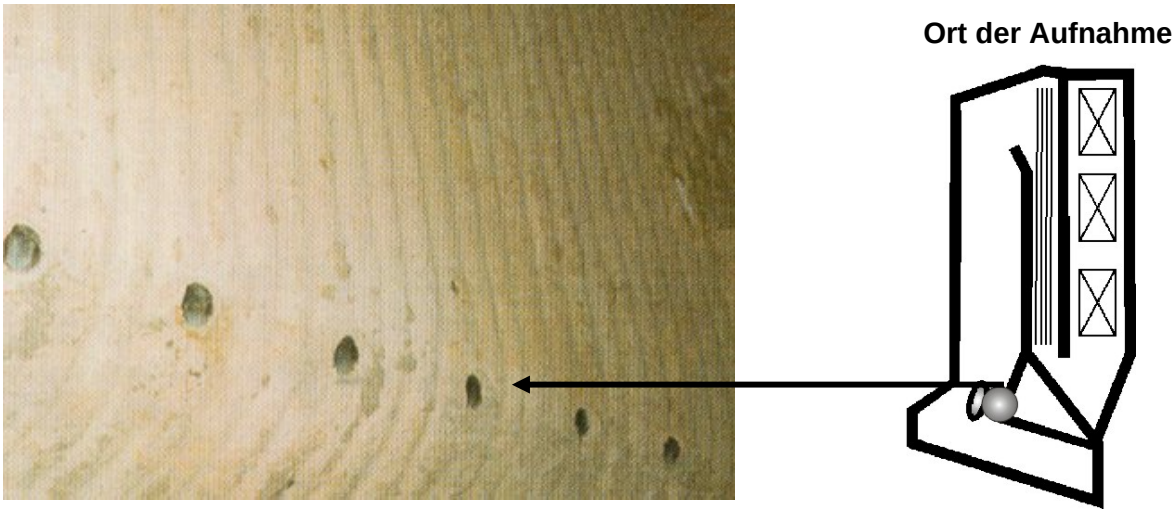


Bild 15: Nach Auslegungsempfehlung auf Basis von CFD: Freie SL-Düsen

Nach dem Umbau und einer Reisezeit von 9.000 Stunden konnte ein verschlackungsfreier Aschebelag beobachtet werden, wobei die Asche zudem problemlos abklopfbar war. Oft verschlacken in der Praxis auch die Sekundärluftdüsen. Bild 15 zeigt eine Prisma-Sekundärluftreihe, die das oben beschriebene Phänomen selbst nach einer Betriebsdauer von 9.000 Stunden nicht zeigt. Alle Düsen sind noch vollständig geöffnet und ansatzfrei.

Zusammenfassung:

Mittels numerischer Simulationen auf Basis von mathematischen Modellen können heutzutage Anlagen deutlich und vergleichsweise schnell optimiert werden. Das Werkzeug „CFD“ bietet für Rostverbrennungsanlagen in Kombination mit einem Sub-Modell hervorragende Möglichkeiten, um die Anlagenverfügbarkeit drastisch zu steigern.

Der Ist-Zustand von Altanlagen oder neu konzipierten Anlagen lässt sich auf dieser Weise problemlos abbilden, analysieren und später optimieren. Mit 3-dimensionalen Berechnungen kann in jedem Punkt des Berechnungsgebietes ein Temperatur-, Geschwindigkeits- oder Konzentrationswert visualisiert werden. Jeder beliebige Schnitt mit entsprechender Größenverteilung ist möglich. Gerade im Hinblick auf die gesetzlichen Rahmenbedingungen (Verweilzeit: 2s, T>850°C) kann eine Voraussage innerhalb einer horizontalen Ebene wichtige Informationen liefern.