

Laserbasierte Online-Messung des Korngrößenspektrums in Kohlenstaubleitungen

Max Starke, Michael Haug, Michael Schreiber, EUtech Scientific Engineering GmbH
Willy Derichs, RWE Power AG

1 Einleitung

Das Korngrößenspektrum, die Strömungsgeschwindigkeit und die Beladung der Kohlenstaubleitungen haben einen großen Einfluss auf den Verbrennungsvorgang in Kraftwerkskesseln. Insbesondere die Zündverzögerung, die Verbrennungseffizienz, der unverbrannte Kohlenstoffanteil, die Emissionshöhe sowie der Verschlackungs- und Verschmutzungsgrad werden davon beeinflusst.

Trotz der Bedeutung dieser Faktoren gibt es derzeit noch kein verlässliches Online-Messsystem zur direkten Messung des Größenspektrums von Kohlenstaubpartikeln innerhalb von Staubleitungen. Das derzeit übliche Verfahren besteht darin, Proben aus den Staubleitungen abzusaugen und die Korngrößenverteilung nachträglich durch Siebung im Labor zu bestimmen. Die Ergebnisse sind erst zeitverzögert verfügbar, wodurch direkte Rückschlüsse auf Einstellungen der Mühle erschwert werden. Da diese Messmethode mühsam und zeitaufwendig ist, werden Proben nur unregelmäßig entnommen. Darüber hinaus beeinflussen der Probennahmeprozess, Lagerung und Siebung das Ergebnis.

Zur Lösung dieses Problems hat EUtech Scientific Engineering in Zusammenarbeit mit der RWE Power AG (RWE) ein laserbasiertes System entwickelt und gebaut, das auf dem Raumfilterverfahren beruht.

Das System erlaubt neben der Echtzeit-Ermittlung der Korngrößenverteilung die zeitgleiche Erfassung der Partikelgeschwindigkeit. Eine orts aufgelöste Messung und damit die Ermittlung der Verteilung innerhalb einer Staubleitung ist möglich.

2 Systembeschreibung

2.1 Messbedingungen

Die Messbedingungen innerhalb einer Staubleitung sind durch hohe Umgebungstemperaturen (ca. 200°C) sowie sich kontinuierlich ändernde Randbedingungen (Kohlezusammensetzung, Beladungsdichte, Last, Verschleiß etc.) gekennzeichnet. Bei Braunkohlen erschweren zudem die hohe Feuchtigkeit und ein hoher Sandanteil, der eine stark abrasive Wirkung zeigt, den Einsatz eines Messsystems.

Die Staubkonzentration kann bis zu 1000 g/m³ betragen, ist nicht homogen verteilt und kann zeitlich fluktuieren. Daher kommt der Messung der Strömungsgeschwindigkeit über

die Partikelgeschwindigkeit sowie der Messung der Partikelbeladung eine hohe Bedeutung zu.

2.2 Messprinzip

Die Messsonde verfügt am äußeren Ende über eine Öffnung, dem Messvolumen, in dem die Partikel einer Strömung mit Laserstrahlen vertikal zur Flugrichtung abgetastet werden. Dazu befindet sich auf einer Seite des Messvolumens ein Laseremitter und auf der Gegenseite ein Detektor (g), bestehend aus einer speziellen Faseroptik. Die Anordnung der Lichtwellenleiter erfolgt in Form eines Gitters mit einem charakteristischen Abstand (f_0). Daraus lässt sich über die Projektion der Partikel auf das optische Gitter die Partikelgeschwindigkeit bestimmen. Hierbei kommen Verfahren der Frequenzanalyse zum Einsatz. Der Partikeldurchmesser (x_p) wird wiederum aus der Impulsbreite (t_p) und der aktuellen Partikelgeschwindigkeit (v_p) bestimmt, siehe Abbildung 1.

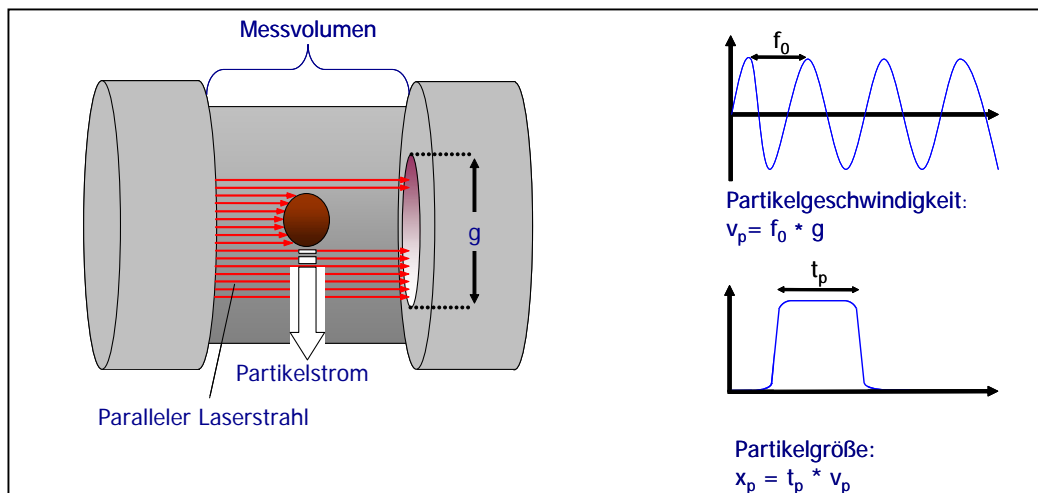


Abbildung 1: Messprinzip

Das Verfahren nutzt eine hohe Abfolge von Einzelpartikelmessungen, wobei die Länge der Partikel beim Durchtritt durch den Laserstrahl gemessen wird. Daraus lässt sich dann der Durchmesser und das Volumen der Partikel ermitteln. Das Verfahren zeichnet sich durch eine hohe Messrate und Reproduzierbarkeit der Messergebnisse aus. Im Gegensatz zu anderen Verfahren ist eine Kalibrierung vor Messbeginn nicht nötig und es lassen sich auch große Partikel bis ca. 5 Millimeter messen.

2.3 Systemaufbau

Das Messsystem besteht aus drei Baugruppen:

- der Messsonde, die zur Messung in den Staubkanal eingeführt wird,
- der Pneumatikeinheit, die die Zufuhr an Kühl- und Spülluft zur Messsonde regelt sowie
- dem Schaltschrank mit dem Bedien- und Auswertungsrechner, siehe Abbildung 2.

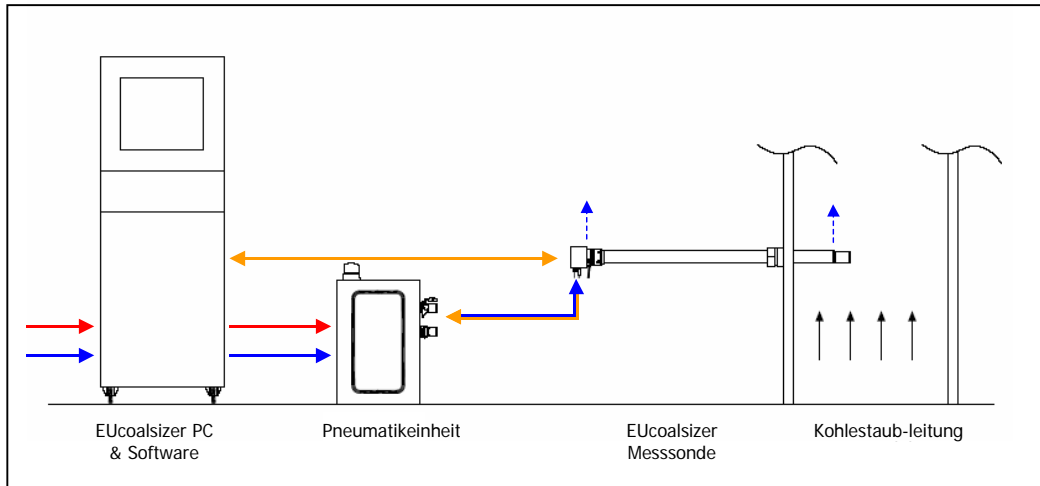


Abbildung 2: Systemaufbau

Die Messsonde wird mit der Pneumatikeinheit sowie der Versorgungs- und Bedienkonsole verbunden und kann dann unmittelbar für Messungen im Kohlestaubkanal genutzt werden. Der Systemaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Pfeile stellen die Versorgung mit Strom und Druckluft sowie den Signalfluss dar. Für Transportzwecke kann die Messsonde am Schaltschrank befestigt und die Pneumatikeinheit im Schaltschrank untergebracht werden.

- Die Messsonde besteht aus Edelstahl und enthält im vorderen Teil die Messoptik. Neben der Führung und dem mechanischen Schutz wird über die Messsonde die Kühlung der Elektronik sowie die Versorgung der Messoptik mit kleinen Spülluftmengen (ca. 5 l/min) sichergestellt. Die Kühlluftmenge wird in der Pneumatikeinheit entsprechend den Temperaturanforderungen der Elektronik geregelt. Anlagerungen auf der Sondenoberfläche werden durch die zusätzliche Regelung der Oberflächentemperatur vermieden.
- Die Pneumatikeinheit regelt die verschiedenen Luftströme, überwacht die Temperatur der Messsonde und überträgt Signale. Bei Überschreitung der Temperaturgrenzen in der Messsonde bzw. einem Ausfall der Druckluftversorgung wird der Bediener gewarnt.
- Der Auswertungsrechner befindet sich in der Versorgungs- und Bedienkonsole. Alle Messungen werden online über den Rechner bedient, visualisiert und archiviert. Zugleich stellt die Konsole die Hauptverteilung von Luft und Strom sicher.

3 Versuchsmessungen

Das Messsystem wurde seit Oktober 2005 verschiedenen Versuchs- und Vergleichsmessungen an einem 600 MW-Kessel des Kraftwerks Niederaußem unterzogen. Im April 2006 wurde das System für den regulären Messbetrieb abgenommen.

Für eine Messung werden die Messsonde und Pneumatikeinheit über Schnellkupplungen elektrisch und pneumatisch mit der Bedienkonsole verbunden und unmittelbar am Messort (oftmals einer Arbeitsbühne) aufgestellt, siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: Messaufbau im Kraftwerk

Die vorhandenen Messöffnungen in der Staubleitung konnten verwendet werden, wobei ein abdichtender Adapter zum Einsatz kam. Die Traversierung der Messsonde im Staubkanal erfolgte manuell. Beim Start einer Messung wird zunächst die Messöffnung und die Messtiefe vom Bedienrechner abgefragt, wodurch später eine automatische Zuordnung der Messergebnisse möglich wird.

Bei einer Messung wird entweder eine vordefinierte Anzahl von Partikeln erfasst oder kontinuierlich gemessen. Die Anzahl der Partikel kann frei gewählt werden und richtet sich nach der statistischen Reproduzierbarkeit und der Messdauer. Eine Punktmessung dauert typischerweise zwischen ein und drei Minuten. Bei der kontinuierlichen Messung wird eine definierte Partikelanzahl zwischengespeichert. Im Speicher werden dann kontinuierlich alte gegen aktuelle Messwerte ausgetauscht.

Die Auswertung der Messergebnisse erfolgt online und wird während der Messung von der Bediensoftware in verschiedenen Grafiken und Anzeigen visualisiert:

- Verteilungsdichte und Verteilungssumme in äquidistanten Größenklassen
- Verteilungsdichte einer frei wählbaren Siebklasseneinteilung
- Geschwindigkeitsverteilung
- Beladungsdichte und Systemparameter

Neben der Darstellung der aktuellen Verteilungskurven kann auch der zeitliche Verlauf charakteristischer Werte der jeweiligen Summenkurve dargestellt werden.

3.1 Vergleichsmessungen

Die Vergleichsmessungen erfolgten mit Hilfe der isokinetischen Probennahme mit nachfolgender Siebanalyse. Aufgrund des begrenzten Zugangs fanden die Messungen mit dem optischen System und die Probennahmen abwechselnd an derselben Messöffnung statt. Es wurden dafür mehrere Messungen sowohl in verschiedenen Positionen als auch bei unterschiedlichen Mühleneinstellungen durchgeführt. Die Randbedingungen wurden während einer Vergleichsmessung konstant gehalten.

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen bei Mühlenbeladungen von 50, 55 und 60 Prozent sind für unterschiedliche Siebfraktionen in Abbildung 4 dargestellt:

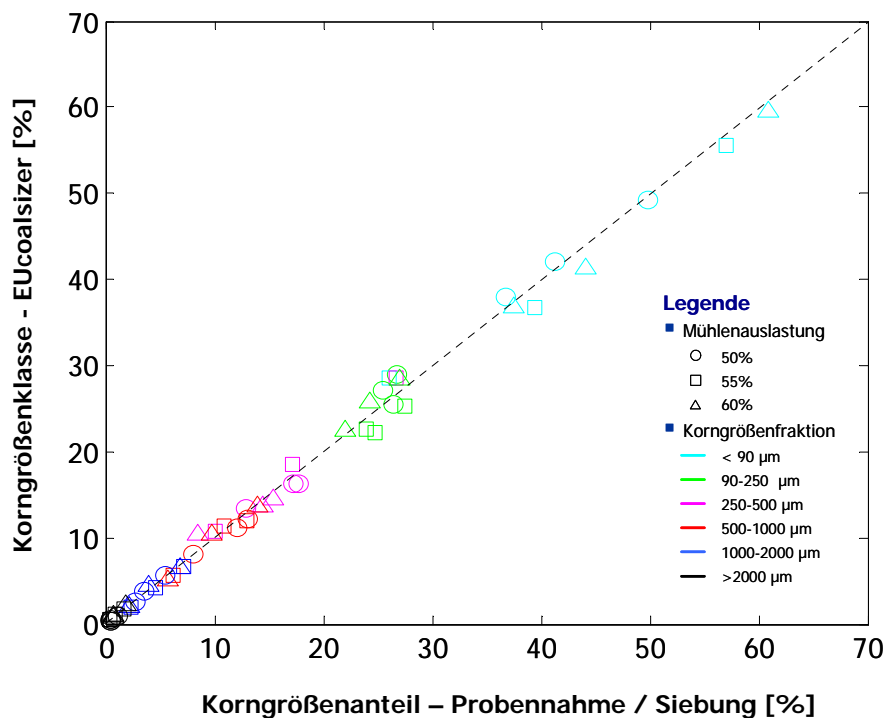


Abbildung 4: Vergleichsmessungen bei unterschiedlichen Mühlenbeladungen

Für unterschiedliche Betriebspunkte konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse der optischen Messsonde eine gute Übereinstimmung mit der Siebung zeigen. Die Abweichung der Messpunkte zur Diagonalen ist für die Siebfraktionen größer 500 µm größer als für die kleinen Siebfraktionen. Als Ursache wird die physikalische Begrenzung der Einzelkorn-erfassung auf Partikel größer 10 µm gesehen sowie Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung. Für die Bewertung des Mühlenverschleißes und die Optimierung der Betriebs-einstellungen werden jedoch auch die großen Siebfraktionen als wichtiger eingestuft.

Die weiteren Auswertungen beziehen sich ausschließlich auf Messungen, die mit Hilfe der Partikelmesssonde durchgeführt wurden.

3.2 Weitergehende Auswertungen – 2D-Visualisierung

Die Verwendung der Messsonde erlaubt es, mit geringem Aufwand eine Vielzahl von Punktmessungen in einer Ebene eines Staubkanals durchzuführen und auszuwerten. Bei konventionellen Messungen werden aufgrund der erforderlichen großen Probenmenge zumeist nur Probenmittelwerte einer Messachse untersucht. Abbildung 5 zeigt eine vom Auswertungssystem automatisch generierte zweidimensionale Darstellung der mittleren Partikelgröße und Partikelgeschwindigkeit in einer Kohlenstaubleitung. Diese Art der Darstellung lässt sich für die anderen Messgrößen automatisch generieren.

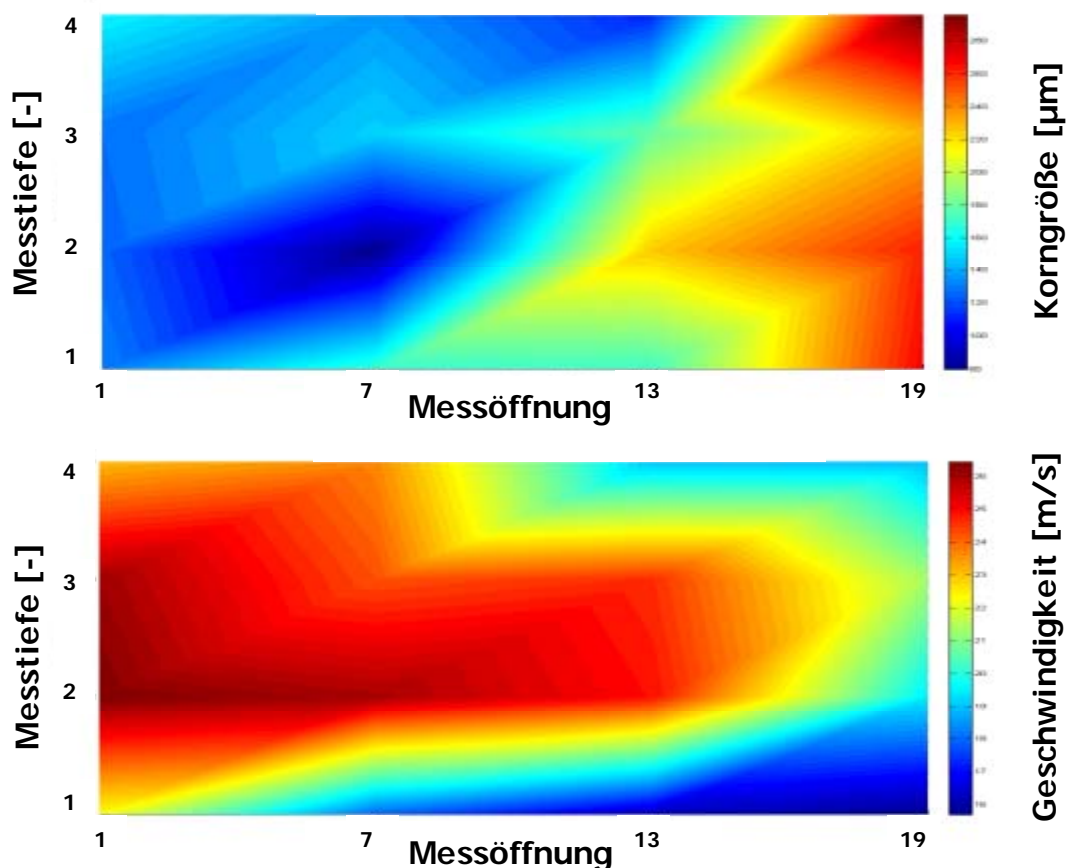


Abbildung 5: Mittlere Partikelgröße und -geschwindigkeit in einer Ebene der Kohlenstaubleitung

Die Darstellung der Korngrößen- und der Geschwindigkeitsverteilung in Abbildung 5 erlaubt Rückschlüsse auf die Qualität der Ausmahlung und der Vergleichmäßigung innerhalb der Staubleitungen. Diese Information ist notwendig, um optimale Einstellungen für die Mühlen zu finden bzw. durch Baumaßnahmen an der Staubleitung eine optimale Brennstoffverteilung auf alle Brenner zu erreichen. Im Bereich der Messöffnung 4 wurden im Mittel die größten Partikel und die geringsten Strömungsgeschwindigkeiten gemessen. Dies wird beim zugeordneten Brenner zu deutlich anderen Verbrennungsbedingungen führen als bei den restlichen Brennern. Wiederholungsmessungen hatten zudem gezeigt,

dass sich die Verteilungen innerhalb der Staubleitungen abhängig von den Randbedingungen (Mühlen-, Zuteilerdrehzahl sowie Primärluftmenge) ändern können.

3.3 Weitergehende Auswertungen – RRSB-Darstellung

Für die Charakterisierung feindisperser Schüttgüter hat in der Mineralstoffindustrie die RRSB-Verteilungsfunktion weite Verbreitung gefunden. Für die grafische Auswertung werden die kumulierten Siebergebnisse in einem doppeltlogarithmischen Netz aufgetragen [1]. Dieses erlaubt bei einer gewichteten linearen Regression der Messwerte eine reproduzierbare Charakterisierung der Verteilungskurve mittels des Steigungsmaßes n und des Lageparameters d' , siehe Abbildung 6.

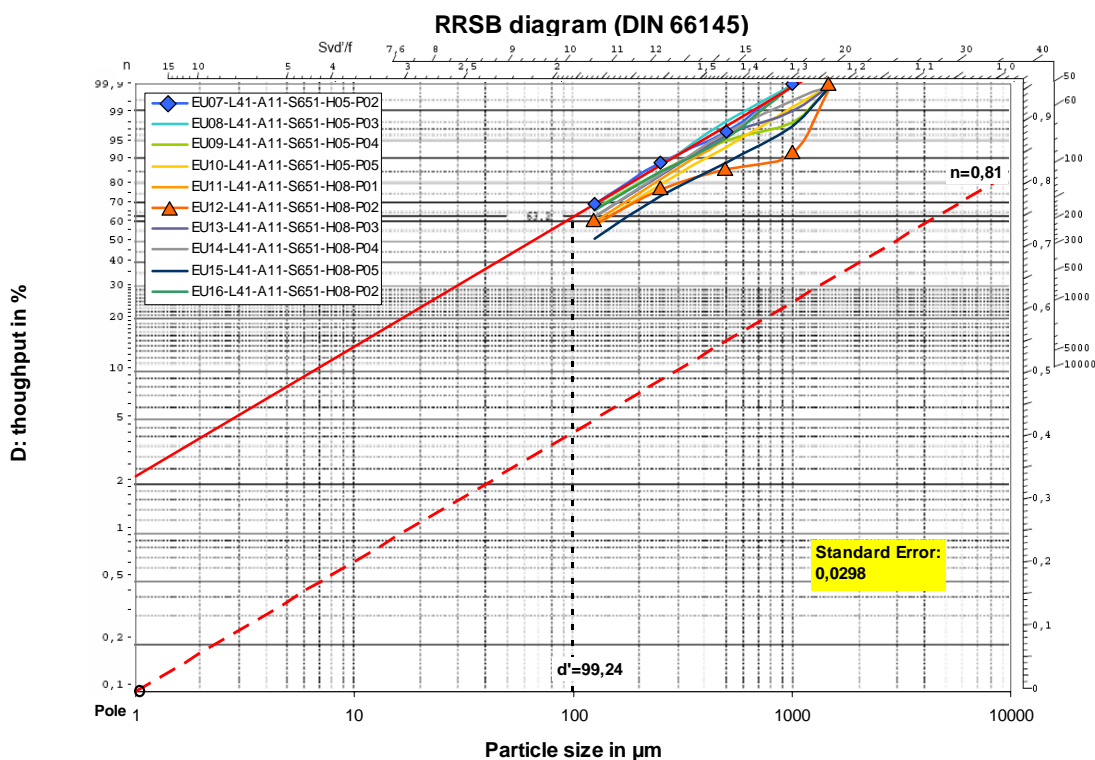


Abbildung 6: Vergleich von Messungen im RRSB-Diagramm

In Abbildung 6 ist die Korngrößenverteilung für zehn verschiedene Messpunkte einer Messkampagne im RRSB-Netz dargestellt. Für die erste Verteilungskurve (raute) sind der Lageparameter $d'=99$ und das Steigungsmaß $n=0,81$ dargestellt. Der Lageparameter (d') wird an der Schnittstelle der Approximationsgeraden (obere Gerade) mit der 63,2% Durchgangslinie abgelesen. Das Steigungsmaß wird nach der Parallelverschiebung der Approximationsgeraden in den Polpunkt (untere Gerade) an der zugehörigen Außenskalierung abgelesen. Die anderen Verteilungen, insbesondere die sechste, weisen zum Teil deutlich größere Abweichung zu der Idealgeraden auf. Für die Bewertung der Abweichung von der Idealgeraden kann aus verschiedenen Fehlermaßen, wie Standardabweichung, Korrelationskoeffizient und Bestimmtheitsmaß, ausgewählt werden [2]. So hat die erste Verteilungsfunktion ein Bestimmtheitsmaß von 0,99 und die sechste hingegen nur 0,87. Die De-

definition von Qualitätskriterien ist eine wichtige Voraussetzung für die Automatisierung von Messung und Auswertung und letztendlich für die Integration der Messergebnisse in die Anlagenregelung.

3.4 Vergleich laserbasierte Online-Messung und manuelle Probennahme

Die Praxistests haben gezeigt, dass das System gut mit den Ergebnissen der manuellen Siebungsanalyse übereinstimmt. Auch Trendverläufe ließen sich damit zuverlässig wiedergeben.

In Sonderfällen führt die grundsätzliche Verschiedenheit der Messverfahren auch zu unterschiedlichen Ergebnissen:

- Holzartige Faserbestandteile beeinflussen aufgrund der geringen Dichte das Messergebnis der Laseranalyse stärker.
- Bei niedrigen Temperaturen (<110°C) können Partikel in der Staubleitung agglomerieren, was nur von der Lasermessung erfasst wird.
- Die Probenmenge für die Lasermessung ist signifikant geringer als bei der Probenahme. Dies verringert die Messdauer und kann zu statistischen Abweichungen führen.

Die laserbasierte Online-Messung bietet folgende Vorteile:

- Parallele Messung der Korngrößenverteilung, Geschwindigkeitsverteilung und Partikelbeladung
- Direkte Messung ohne mechanische Beeinflussung des Messguts
- Geringe erforderliche Probenmenge
- Möglichkeit der kontinuierlichen Messung und Überwachung
- Direkte Visualisierung erlaubt die Beobachtung kurzzeitiger Phänomene z.B. Pulsen
- Möglichkeit der statistischen Bewertung der Messergebnisse direkt am Messort, z. B. durch zweidimensionale Darstellungen und RRSB-Darstellungen
- Geringer Aufwand bei Messaufbau, Betrieb sowie der Ergebnisauswertung
- Kontinuierliche Ergebnisaufzeichnung erlaubt nachträgliche Auswertungen, z. B. Zeitreihenuntersuchungen und automatisches Berichtswesen
- Direkte Identifizierung von Fehlmessungen und Möglichkeit zur Wiederholungsmessung

4 Fazit und Ausblick

Bei den Tests konnte gezeigt werden, dass das von EUtech in Zusammenarbeit mit RWE entwickelte laserbasierte Online-Messsystem reproduzierbar die Korngrößen- und Geschwindigkeitsverteilung sowie Partikelbeladung ermitteln kann. Die Konstruktion dieses Systems erwies sich als geeignet für Dauerversuche im Kraftwerksbereich und die Betriebsergebnisse legen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der manuellen Probennahme und Siebung nahe. Die Onlineanalyse und Visualisierung der Messdaten

bietet die Möglichkeit, bereits beim Messbetrieb erste Untersuchungen anzustellen und weitgehend automatisiert Auswertungen durchzuführen. Das Ziel, zusätzliche Informationen für die Optimierung des Mühlenbetriebs und der Brenneinstellungen zu gewinnen, wurde damit erreicht.

In Zukunft ist geplant die Funktionalität wie folgt zu erweitern:

- Ausweitung der Messungen auf andere partikelbeladene Strömungen
- Erweiterung der Sensorik um Außentemperatur- und Druckmessung
- Weiterentwicklung der Auswertungssoftware

Bei der Integration und Adaption werden folgende Ziele verfolgt:

- Automatisierung routinemäßiger Messungen (automatische Verfahrenheit)
- Integration in Mühlen und Sichterregelung (Leittechnikanbindung)
- Anpassung der Sondenlänge an spezifische Anforderungen
- Entwicklung eines leichten, tragbaren Systems

5 Referenzen

- [1] DIN 66145: Darstellung von Korn-(Teilchen-)größenverteilungen; RRSB-Netz, Ausgabe: 1976-09
- [2] Bamberg G., Baur F.: Statistik, R. Oldenbourg Verlag, München, Wien, 6. Auflage 1989

Kontaktinformationen zu den Autoren:

Dr. Willy Derichs
RWE Power AG
Kraftwerk Niederaußem
Postfach 1461
50129 Bergheim
willy.derichs@rwe.com
<http://www.rwe.de>

Dr. Michael Haug, Dr. Michael Schreiber, Max Starke
EUTECH Scientific Engineering GmbH
Dennewartstraße 25-27
52068 Aachen
haug@eutech.de, schreiber@eutech.de, starke@eutech.de
<http://www.eutech-scientific.de>