

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 15409 N  
Bewilligungszeitraum: 01.11.2007 – 31.10.2009  
Forschungsthema: **Optimierung der Gattierung der Feinmahlkammer von Kugelmühlen zur Zementmahlung**

## 1 Einleitung

Der Elektroenergieaufwand für die Zementherstellung beträgt im Mittel  $100 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$ , wobei ca. 30 % für die Aufbereitung von Rohmaterialien (Brechen, Mahlen, Trocknen) und ca. 38 % für das Vermahlen von Klinker und Beimischungen zu Zement verwendet werden. Für die Zementmahlung wird mit durchschnittlich  $38 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$  mehr Elektroenergie verbraucht als für die Rohmehlmahlung (inkl. Trocknung) mit ca.  $24 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$ . Über die Hälfte der weltweit eingesetzten Mahlanlagen bestehen immer noch aus Kugelmühlen mit Wirkungsgraden deutlich unter 5 %. Betrachtet man den Einfluss der Kugelmühlen-typischen breiten Partikelgrößenverteilungen auf die Qualität der ermahlenden Zemente und ihre Bedeutung insbesondere in hochentwickelten Märkten, so ist auch langfristig nicht mit einer vollständigen Substitution der Kugelmühle zu rechnen. Daher ist festzuhalten, dass die Optimierung der Vielzahl von installierten Mühlen einen Ansatz zur nachhaltigen Senkung des Energiebedarfs und der daraus indirekt resultierenden  $\text{CO}_2$ -Emissionen darstellt. Die Auswertung einer großen Zahl von Mühlenaudits zeigt überdies, dass die eingesetzten Kugelmühlen ein hohes Optimierungspotential ausweisen insbesondere in Hinblick auf die Gattierung. Hier sind Einsparungen von 8 – 12 % zu erwarten. Die Senkung des Energiebedarfs bei der Feinmahlung insbesondere durch Optimierung der Mahlkörper-Gattierung stellt eine attraktive Möglichkeit zur Kosteneinsparung dar, da eine Energieeinsparung im Mahlprozess ohne zusätzliche Investitionskosten möglich ist. Auf Grund von Verschleiß ist ohnehin eine regelmäßige Neubeschaffung von Mahlkörpern notwendig. Von großer Bedeutung ist jedoch, dass neben Qualitätsanforderungen an die gemahlenden Zemente auch verfahrenstechnische Randbedingungen berücksichtigt werden, um die Betriebssicherheit der Mahlanlagen zu gewährleisten. An erster Stelle ist eine ausreichende Zerkleinerung sicherzustellen, um ein Überfüllen der Mühle zu vermeiden.

Der Innenraum einer Kugelmühle ist messtechnisch nur schwer und im Betrieb gar nicht zugänglich. Durch die Modellierung der Mahlkörperbewegung und des Zerkleinerungsablaufs innerhalb einer Mahlkammer mittels geeigneter Methoden wie der DEM besteht die Möglichkeit, ein verbessertes Verständnis für die in einer Kugelmühle ablaufenden Zerkleinerungsvorgänge und damit auch für den Einfluss der Gattierung zu erhalten. Durch zusätzliche Informationen lassen sich präzisere Aussagen über das Verhalten der Mühlenfüllung bei unterschiedlichen Betriebsparametern treffen. Zudem lassen sich in Hinblick auf die Betriebssicherheit von Mühlen gezielt kritische Szenarien abbilden, die experimentell nur mit erheblichem Aufwand untersucht werden könnten. Die Modellierung der Mahlkörperbewegung in Kugelmühlen wurde bereits mit unterschiedlichsten Zielsetzungen erfolgreich realisiert. Allerdings unterschieden sich die dabei gewählten Randbedingungen von denen in Zementmühlen vorliegenden Verhältnissen. Ebenfalls wurde bisher der Einfluss der Mahlkörpergröße auf die vorliegende Druckverteilung und Beanspruchungshäufigkeit nicht systematisch ausgewertet. Darüber hinaus resultieren aus der Simulation der Mahlkörperbewegung nur bedingt direkte Informationen über das Zerkleinerungsverhalten des Mahlguts innerhalb der Mahlkammer.

Zur gezielten Entwicklung von Gattierungsregeln für Kugelmühlen zur Zementmahlung wurde daher ein Modell zur Beschreibung der Mahlkörper-Kinematik entwickelt, das an die Gegebenheit der Zementherstellung angepasst werden kann. Darauf aufbauend lassen sich durch die Kombination von numerischen und praktischen Experimenten Methoden zur Optimierung der Gattierung entwickeln. Hauptaugenmerk ist dabei auf die Randbedingungen wie Betriebssicherheit der Mühle und Produktqualität zu richten.

Das Forschungsvorhaben (AiF-Vorhaben-Nr.: 15409 N) der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.

## 2 Anforderungen an die Gattierung

Die Vermahlung von Zement erfolgt oftmals in Zweikammer-Mühlen, bestehend aus Grob- und Feinmahlkammer. Um die Vorzerkleinerung des Mahlguts in der Grobmahlkammer einer Kugelmühle zu gewährleisten, werden große Mahlkörper mit Durchmessern von 100 bis 50 mm eingesetzt. Diese besitzen auf Grund ihrer hohen Masse einen hohen Impuls. Um eine optimale Schlagwirkung der Mahlkörper zu erreichen, ist die Grobmahlkammer üblicherweise mit einer Hubpanzerung ausgestattet. Die Hubpanzerung gewährleistet, dass die Mahlkörper gemeinsam mit dem Mahlgut in der Mühle weit angehoben werden und aus möglichst großer Höhe auf das Mahlkugel/Mahlgut-Gemisch fallen.

Bei Eintritt in die Feinmahlkammer ist das Mahlgut schon so weit zerkleinert, dass kleinere Mahlkörper mit geringeren Einzelimpulsen eingesetzt werden können. Die Feinzerkleinerung erfolgt im Wesentlichen durch eine kombinierte Druck- und Scherbeanspruchung im Inneren der Schüttung. Daher ist die Effektivität der Zerkleinerung abhängig von der Beanspruchungsfläche und den Lückenvolumina. Dementsprechend werden die Feinmahlkammern von klassischen Zweikammer-Kugelmühlen mit Mahlkörper von 50 mm bis 17 mm befüllt. Da in der Feinmahlkammer keine so ausgeprägte Schlagwirkung erforderlich ist, werden glattere Panzerungsprofile eingesetzt. Durch die fortlaufende Größenreduktion des Mahlguts in axialer Richtung längs des Mahlwegs nimmt die erforderliche Kugelgröße ab. Um die Mahlkugelgröße an die jeweilige Mahlgutgröße anzupassen, werden Feinmahlkammern in der Regel mit sogenannten Klassierpanzerungen ausgestattet. Diese erzeugen in begrenztem Maße eine axiale Segregation und gewährleisten so, dass die Mahlkörpergröße entlang der Mahlbahn abnimmt, d.h. größere Mahlkugeln reichern sich im Bereich des Kammereinlaufs und kleinere Mahlkörper im Bereich der Austragswand an.



**Bild 2-1** Überfüllte Kugelmühle mit verstopfter Austragswand

Die Auslegung von Gattierungen wird überwiegend durch zwei konkurrierende Anforderungen bestimmt. Einerseits wird eine möglichst hohe Zerkleinerungsleistung angestrebt, andererseits besteht die Forderung nach Betriebssicherheit der Mühle. Grundsätzlich wird angenommen, dass kleine, an den Zerkleinerungsfortschritt des Mahlguts angepasste Kugeln eine höhere Mahlleistung erzielen als große Kugeln. Dies wurde im Rahmen des Vorläuferprojektes durch praktische und numerische Experimente bestätigt. Schüttungen aus kleineren Kugeln weisen eine höhere Anzahl an Kontakten, eine größere Kontaktfläche, homogenere Kräfteverteilungen und kleinere Einzellückenvolumina auf. Es wurde jedoch ebenfalls bestätigt, dass ein gewisser Anteil an ausreichend großen Kugeln zur Zerkleinerung von Überkorn, das in Folge unzureichender Zerkleinerung in der Grobmahlkammer in die Feinmahlkammer eintreten kann, benötigt wird. Fehlen diese Kugeln, reichern sich über die Zeit gröbere Partikel am Mühlenaustrag an und verstopfen die Austragswand (siehe **Bild 2-1**). In der Folge läuft die Mühle voll und der kontinuierliche Mahlbetrieb wird unterbrochen. Die starke Forderung nach Betriebssicherheit führt in der Praxis zu einer konservativen Gattierungsauslegung, d.h. zu einem hohen Anteil an großen Kugeln und damit zu einer verhältnismäßig schlechten Energieausnutzung.

Mahlkörperfüllungen von Kugelmühlen werden heute nach wie vor auf Basis empirischer Regeln festgelegt. In der Vergangenheit gab es zwar Ansätze, fundierte Gattierungsregeln zu formulieren. Diese waren aber ausschließlich empirischer Natur. Viele der Ansätze beruhen auf der theoretischen Bestimmung von maximal benötigten Kugeldurchmessern nach Bond und deren Weiterentwicklungen. Aufbauend auf der Arbeit von Bond wurde eine Vielzahl von weiterreichenden Verfahren für die Auslegung von Gattierungen entwickelt. Mittels der Formel nach Kassatkin besteht die Möglichkeit, einen theoretischen Minimal-Durchmesser zu bestimmen. Der Ansatz nach Papadakis hingegen beruht auf der direkten Hochrechnung von Durchmessern, die in einer Testmühle ermittelt wurden. Auf diese Weise können jedoch keine Aussagen über die gesamte Gattierung, sondern nur über die theoretischen Grenzgrößen getroffen werden. Überdies wurde der Einfluss der Gattierung auf die Leistungsaufnahme der Mühle grundsätzlich vernachlässigt. Die axiale Verteilung der eingesetzten Kugeln wurde von Schramm und Gaitsch untersucht. Dieser Ansatz beruht ebenfalls auf der Bestimmung von Größtkugeln nach Bond. Andere Gattierungsvorschläge basieren auf betriebstechnischen Untersuchungen oder Weiterentwicklungen der bekannten Ansätze.

Diese Vorgehensweisen haben sich jedoch in der Praxis nicht durchgesetzt. Ursache hierfür ist hauptsächlich, dass betriebstechnische Probleme (z.B. Materialtransport, Betriebssicherheit bei Überfüllung der Mühle) und anlagenspezifische Details (Panzerung, Übertragungswände) nicht ausreichend berücksichtigt werden konnten. Im Kern basieren alle Ansätze auf empirischen Zusammenhängen, die auf die messtechnische Unzugänglichkeit der Mühle im Betrieb zurückzuführen sind. In der Praxis werden Gattierungen bei Inbetriebnahme vom Anlagenlieferanten vorgegeben und vom Anlagenbetreiber durch Versuche („try and error“) im Laufe der Zeit „optimiert“. Bei den Optimierungsversuchen der Anlagenbetreiber werden jedoch in der Regel nur Änderungen in gewissen Grenzen vorgenommen, um die Betriebssicherheit der Mühlen nicht zu gefährden. Dabei ist festzustellen, dass Gattierungen in ersten Line nach Gesichtspunkten der Betriebssicherheit ausgelegt sind und sich daher auch nach längeren Betriebszeiten weit entfernt vom energetischen Optimum befinden können.

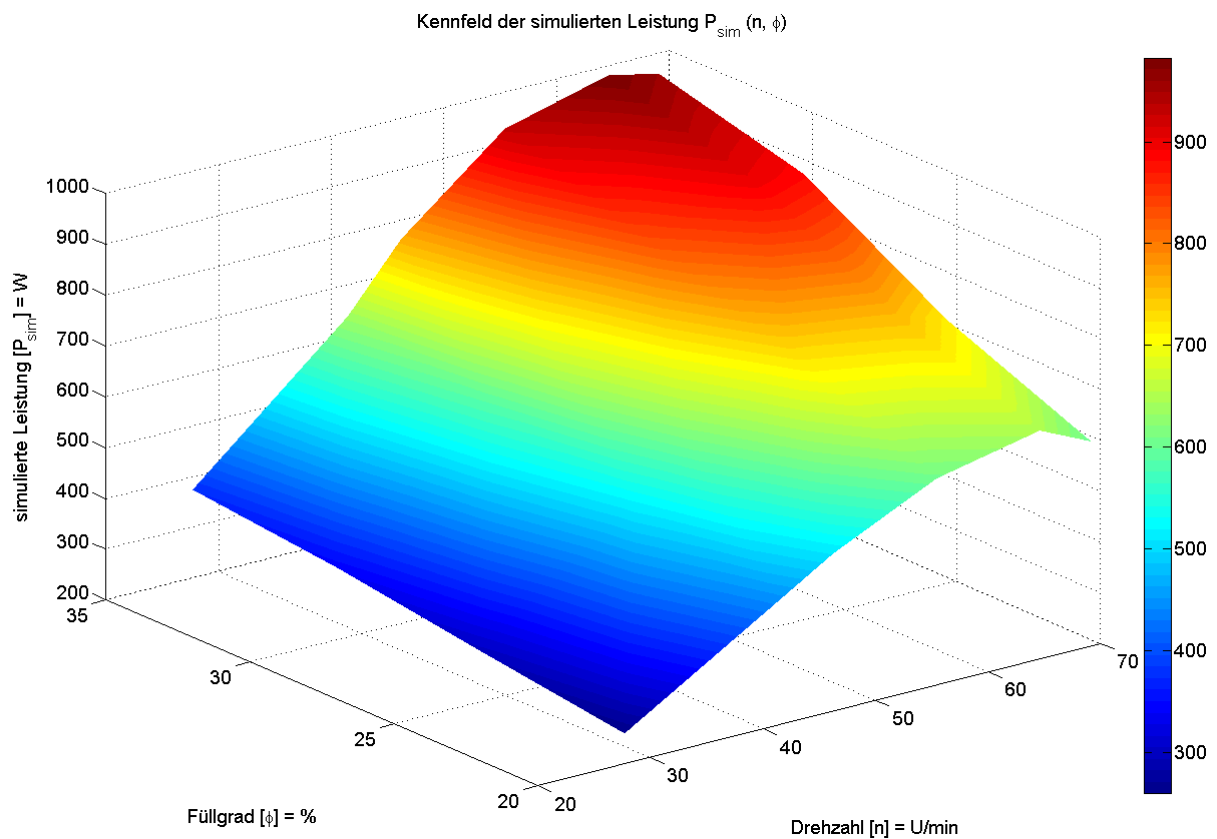
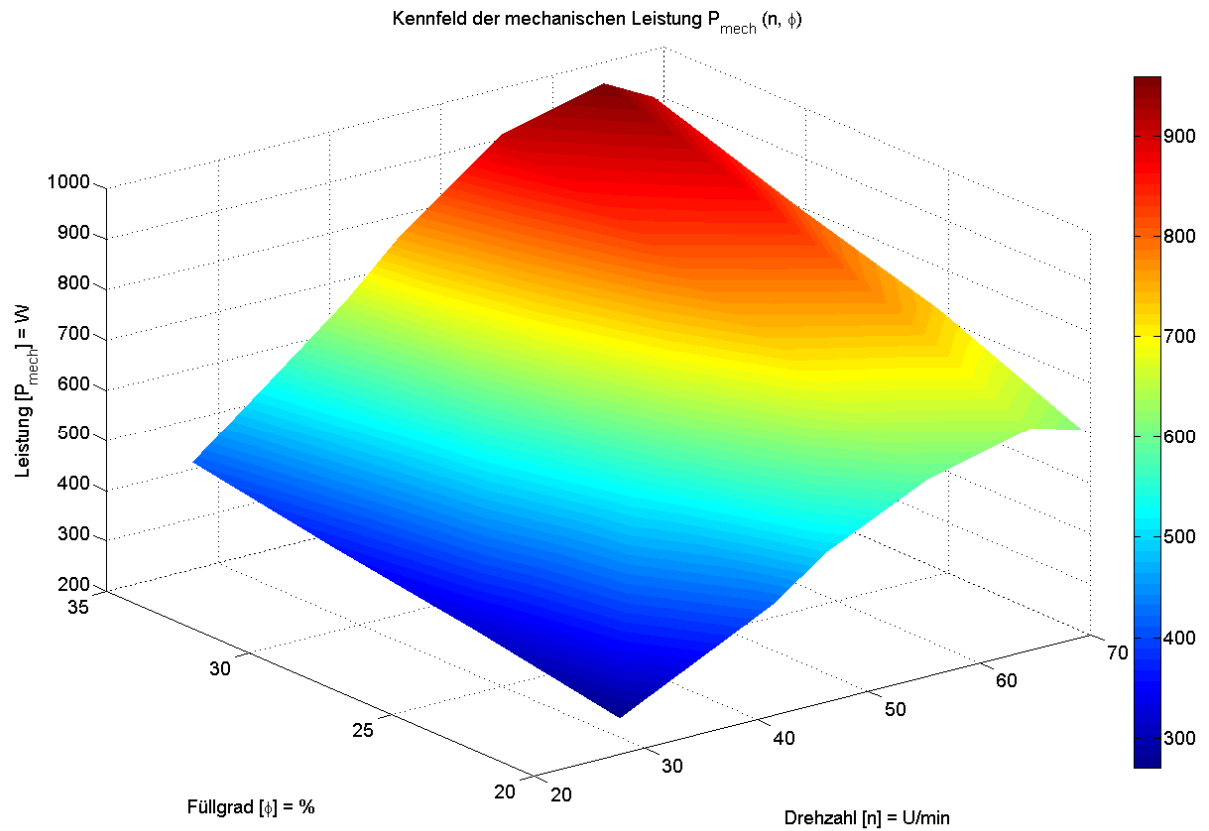
### 3 Untersuchung der Mahlkörperkinetik

Das Forschungsvorhaben befasste sich schwerpunktmäßig mit der Betrachtung der Mahlkörperbewegung innerhalb der Feinmahlkammer. Diese wird durch ein zweidimensionales molekulardynamisches Modell beschrieben. Die Molekular-Dynamik unterscheidet sich in ihrem grundlegenden Aufbau nicht von klassischen DEM-Programmen. Neben der Applikation des Modells wurden umfangreiche Algorithmen zur Initialisierung, Leistungsmessung und Datenauswertung, darunter vor allem die Visualisierung des Bewegungsablaufs der Mahlkörperfüllung, realisiert. Die Modellierung von unterschiedlichen Mahlkammer-Geometrien kann mittels einer graphischen Oberfläche sowie quelltextbasiert durch geringfügige Änderungen der bestehenden Implementierung geschehen.

Der Vergleich der Simulationsdaten mit Messungen an einer Labormühle zeigt, dass die von der Mahlkammer aufgenommene mechanische Leistung für die reine Kugelfüllung sehr gut vorhergesagt werden kann. **Bild 3-1** zeigt die Kennfelder der gemessenen Leistungsaufnahme der Mahlkammer (oben) und der simulierten Leistung in Abhängigkeit der Parameter Drehzahl und Füllgrad (unten). Die mittlere Abweichung beträgt etwas 2,5 %. Versuche an einer Demonstrationsmühle mit gläsernen Stirnwänden zeigten überdies, dass das simulierte Bewegungsverhalten sehr gut mit der Realität übereinstimmt. Dies stellt einen ersten Ausgangspunkt zur Durchführung von Parameterstudien mit verschiedenen Mahlkörper-Gattierungen dar. Untersucht wurde die Leistungsaufnahme verschiedener Gattierungen während der Mahlung. Wie zu erwarten war, führt der Einfluss der Mahlguts zu einer erhöhten Abweichung. Diese liegt im Mittel bei etwa 13 %, führt aber zu keiner erkennbaren qualitativen Veränderung und kann somit vorerst abgeschätzt werden. Im Verlauf des Projektes wurde weiterhin festgestellt, dass die Leistungsaufnahme im Vergleich zur Zerkleinerung eine eher untergeordnete Rolle spielt und erst bei fortgeschrittener Optimierung stärker berücksichtigt werden muss.

Trotz der hohen Vorhersagequalität im betrachteten Rahmen ist jedoch zu beachten, dass durch die zweidimensionale Darstellung wichtige Prozesse, wie beispielsweise die Interaktion in axialer Richtung, vernachlässigt werden. Dies kann, wie oben gezeigt, durch eine geschickte Parameterwahl in gewissen Grenzen ausgeglichen werden. Die verwendeten Ansätze zur Berechnung der Interaktionskräfte zwischen den Partikeln sind vergleichsweise einfach aufgebaut, bieten jedoch mit richtiger Parametrisierung eine hohe Vorhersagequalität. Dies rechtfertigt den Aufwand der durchgeführten Anpassung. Es konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Wechselwirkungen durch das Modell im betrachteten Messbereich mit ausreichender Genauigkeit nachgebildet wird.

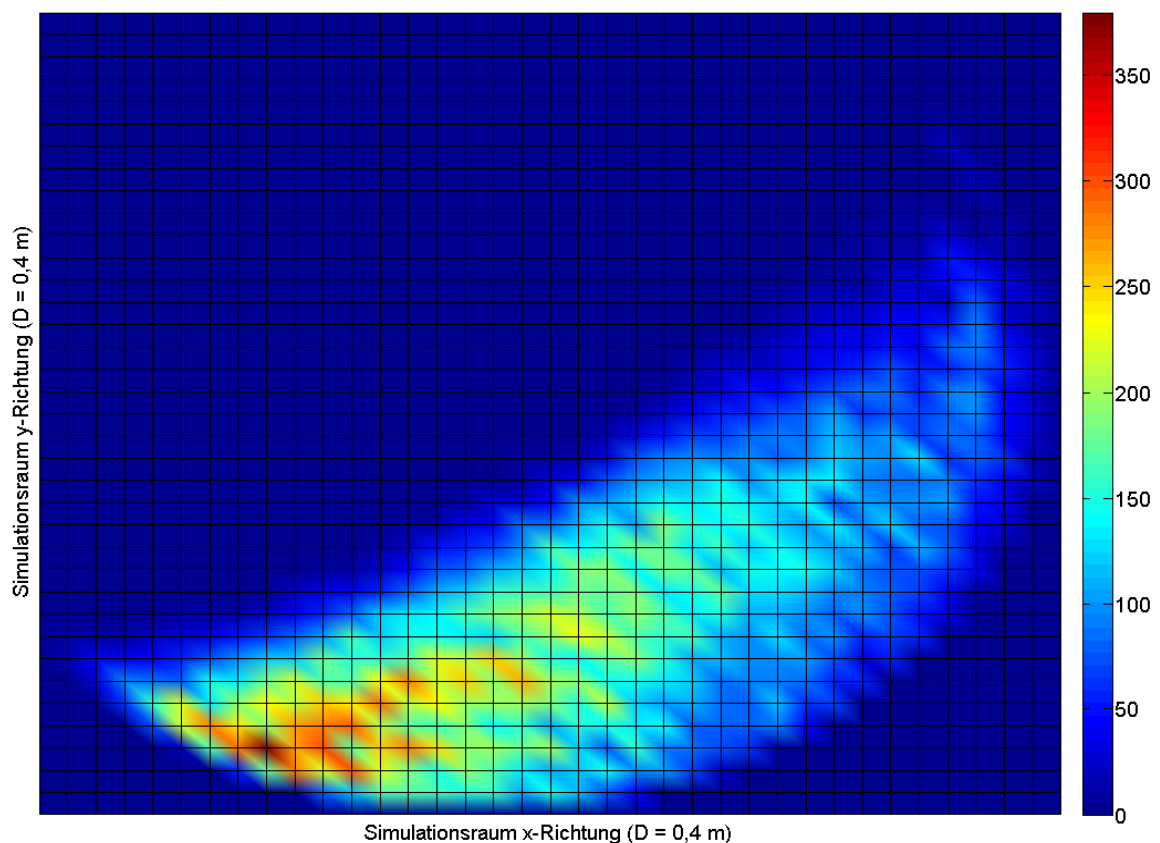
In verschiedenen Mahlversuchen wurden sowohl mono- wie auch polydisperse Gattierungen untersucht. Die Zerkleinerungsleistung wurde durch Messung der Leistungsaufnahme und Beprobung des Fertiggutes bestimmt. Dabei wurde die Annahme bestätigt, dass Gattierungen mit kleineren Kugeln eine bessere Zerkleinerungsleistung aufweisen. Es wurde jedoch festgestellt, dass diese Aussage nur in bestimmten Grenzen gilt. Unter Berücksichtigung der spezifischen Oberfläche nach Blaine erbrachte eine Gattierung aus 15mm-Kugeln deutlich bessere Ergebnisse als eine Kugelfüllung mit 13mm-Kugeln. Es konnte ebenfalls nachgewiesen werden, dass ein gewisser Anteil Großkugeln vorhanden sein muss, um die vollständige Zerkleinerung von groben Partikeln zu gewährleisten. Bei Berücksichtigung der Zerkleinerungsleistung und der Betriebssicherheit wurde mit einer Gattierung aus 70 % Kugeln mit Durchmesser 15 mm und 30 % mit Durchmesser 25 mm das beste Ergebnis erreicht.



**Bild 3-1** Kennfelder der gemessenen (oben) und simulierten Leistung (unten) der Versuchsmühle. Aufgetragen ist die mechanische Leistungsaufnahme in Abhängigkeit der Drehzahl und des Füllgrades. Erkennbar ist die gute qualitative Übereinstimmung beider Kennfelder.

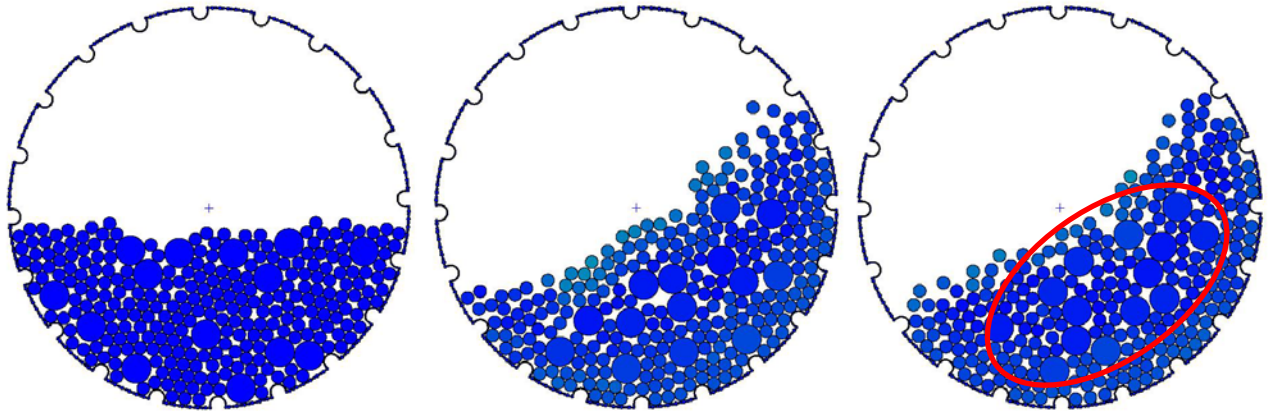
Durch Untersuchungen der räumlichen Verteilung der Stoßvorgänge, der Häufigkeiten und der Verteilung der Interaktionskräfte konnten die Einflussgrößen für die Performance einer Gattierung eingegrenzt und qualitative Zusammenhänge herausgearbeitet werden. **Bild 3–2** zeigt exemplarisch die Visualisierung der räumlichen Verteilung von Häufigkeiten einer Kräftefraktion. Die Bewertung einer Gattierung hinsichtlich Zerkleinerungsleistung und Betriebssicherheit kann durch Analyse der Häufigkeiten und Maximalwerte der Interaktionskräfte erfolgen. Eine Quantifizierung und gezielte Optimierung ist auf Grund der Informationsmenge und fehlender Bewertungskriterien nicht möglich. Dies kann nur auf Basis der materialabhängigen Beschreibung der Zerkleinerung geschehen.

Räumliche Verteilung der Anzahl von Kontakten mit  $50 \text{ N} < F_n < 200 \text{ N}$  für Gat. 4 (15 mm)



**Bild 3–2** Beispiel der Häufigkeitsverteilung der Kräftefraktion zwischen 50 und 200 N

Darüber hinaus wurden die implementierten Methoden zur umfangreichen Analyse des Mahlkörperverhaltens in Kugelmöhlen genutzt, um eine breite Informationsbasis für eine Optimierung zu schaffen. Über die rein numerischen Ergebnisse hinaus wurde auch eine Animation des simulierten Bewegungsablaufes realisiert, die eine weitergehende Analyse erlaubt. So konnten erstmals radiale Segregationseffekte untersucht werden. **Bild 3–3** zeigt drei Momentaufnahmen der simulierten Mühle. Es wird erkennbar, dass sich die kleine Fraktion an großen Kugeln in der Mitte anreichert und dort verbleibt. Auf Grund der geringen Relativgeschwindigkeiten im Zentrum der Schüttung verfügen die Kugeln trotz der großen Masse über geringe Impulse. Zudem entstehen große Einzellückenvolumina und der Krafffluss zwischen den Kugeln wird zunehmend inhomogen. Daher übt die Fraktion von großen Kugeln einen negativen Einfluss auf den Mahlprozess aus. Dieser ist bei der Kombination von Kugeldurchmessern und im Vorfeld einer Optimierung zu berücksichtigen.



**Bild 3** Fehler! Formatvorlage nicht definiert.–3 Segregationseffekte in Kugelmühlen: Ausgangskonfiguration (links), Beispiel für erhöhtes Lückenvolumen (Mitte) und Beispiel der Anreicherung im Zentrum (rechts)



## 4 Zusammenfassung

Auf Basis der erzielten Ergebnisse konnten qualitative Gattierungsregeln formuliert werden. Die ermittelten Daten bestätigen die in der Praxis durch Erfahrungen im Anlagenbetrieb gewonnenen Erkenntnisse. Zusammenfassend ergeben sich die folgenden Regeln:

- Kleinere Kugeln erzielen durch die höhere Anzahl von Interaktionen und die größere Kontaktfläche eine bessere Mahlleistung als größere Kugeln.
- Die Interaktionskräfte zwischen größeren Kugeln sind jedoch auch bei gleichen äußeren Bedingungen für die Kugelbewegung höher als die zwischen kleineren Kugeln.
- Ein zu hoher Anteil an kleinen Kugeln führt zu einer unzureichenden Zerkleinerung von sehr groben Partikeln, die sich über die Zeit am Mühlenausstrag anreichern.
- Der Einsatz zu großer Kugeln führt zu einer allgemein schlechten Mahlleistung, da die Beanspruchungshäufigkeit auf Grund der geringen Kugelanzahl und des hohen Einzellückenvolumens sinkt.
- Polydisperse Gattierungen weisen auch ohne Klassierpanzerungen eine höhere Zerkleinerungsleistung auf als vergleichbare monodisperse Gattierungen.
- Ausreichende Grobzerkleinerung ist am effektivsten durch den Einsatz von geringen Mengen an deutlich größeren Kugeln zu erreichen. Derart bleibt immer noch eine große Anzahl an Interaktionen erhalten.
- Die Kombination deutlich unterschiedlicher Kugeldurchmesser kann in bestimmten Konfigurationen zu radialen Segregationseffekten und damit zu einer Abnahme der Mahlleistung führen.
- Durch die Wahl der Gattierung lassen sich zudem das Fließverhalten des Mahlgutes und der sich einstellende Mahlgutspiegel beeinflussen. Eine gleichmäßige Durchmesser-Verteilung führt zu einer hohen Raumausfüllung, einem geringen Einzellückenvolumen und damit zu einem hohen Mahlgutfüllstand.
- Der Einfluss der Gattierung auf die Leistungsaufnahme der Mühle ist verhältnismäßig gering. Dennoch kann man beobachten, dass die Leistungsaufnahme mit steigendem Kugeldurchmesser sinkt. Dieser Effekt kommt jedoch erst bei einer Feineinstellung der Gattierung zum Tragen, da der Einfluss der Zerkleinerungswirkung auf den spezifischen Energieverbrauch wesentlich größer ist.
- Die Simulationsdaten zeigen, dass ein rechnerisches Optimum existiert, mit dem die Betriebssicherheit einerseits und die maximale Zerkleinerungsleistung andererseits abgedeckt werden können. Dieses ist jedoch abhängig von der Mühlengeometrie und den Materialeigenschaften und kann nicht allgemeingültig ermittelt werden.

Vergleicht man die durch numerische und praktische Experimente hergeleiteten Regeln für die Gattierung mit den in der Praxis eingesetzten Optimierungsstrategien, so sind deutliche Parallelen zu erkennen. Mittels der vorliegenden Datenbasis können praktische Ansätze unterstützt und die Umsetzungsbereitschaft für Optimierungsvorschläge bestärkt werden.

**Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht**, da qualitative Gattierungsregeln abgeleitet werden konnten und eine Basis für eine weitergehende, mühlenspezifische Optimierung geschaffen wurden.