

AiF-Forschungsvorhaben-Nr.: 16890 N
Bewilligungszeitraum: 01.01.2011 – 31.12.2012
Forschungsthema: **Anlagen- und produktspezifische Optimierung der Gattierung der Feinmahlkammer von Kugelmöhlen zur Zementmahlung**

1 Einleitung

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das durch die gemeinsame oder getrennte Vermahlung von Zementklinker und anderen Haupt- und Nebenbestandteilen hergestellt wird. Für die Zementmahlung werden heute noch überwiegend Kugelmöhlen, mit steigender Tendenz aber auch Vertikal-Wälzmöhlen und Gutbett-Walzenmöhlen eingesetzt.

Der Elektroenergieaufwand für die Zementherstellung beträgt im Mittel $110 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$, wobei auf die Zementmahlung mit etwa $50 \text{ kWh/t}_{\text{Zement}}$ der größte Anteil an Elektroenergie erforderlich ist (HOE-13). Über die Hälfte der weltweit eingesetzten Mahlanlagen bestehen immer noch aus Kugelmöhlen mit Wirkungsgraden deutlich unter 5 %. Da auch langfristig nicht mit einer vollständigen Substitution der Kugelmühle zu rechnen ist, stellt die Optimierung der Vielzahl von installierten Möhlen einen äußerst wichtigen Ansatz zur nachhaltigen Senkung des Energiebedarfs und der daraus indirekt resultierenden CO_2 -Emissionen darstellt. Die 2009 von McKinsey Deutschland veröffentlichte Studie „Wettbewerbsfaktor Energie“ zeigt die Bedeutung der Optimierung von Prozessen zur Steigerung der Energieeffizienz insbesondere für energieintensive Branchen wie die Zementindustrie (MCK-09).

Die Auswertung einer großen Zahl von Möhlensaudits, die das Forschungsinstitut der Zementindustrie in den letzten Jahren durchgeführt hat, zeigt, dass die eingesetzten Kugelmöhlen ein hohes Optimierungspotential insbesondere in Hinblick auf die Gattierung aufweisen. Durch Optimierung der Gattierung können fast ohne zusätzliche Investitionskosten Energieeinsparungen von 5 %, in Einzelfällen bis zu 12 % erzielt werden (HOF-09, MCI-80). In Folge von Verschleißerscheinungen müssen in regelmäßigen Abständen neue Mahlkörper beschafft und die Gattierung angepasst bzw. erneuert werden. Mögliche Optimierungsmaßnahmen können im Rahmen dieser Beschaffungen eingeplant und innerhalb der üblichen Stillstandsphasen umgesetzt werden.

Der Innenraum einer Kugelmühle ist messtechnisch nur schwer und im Betrieb gar nicht zugänglich. Daher wurde im Vorläuferprojekt ein molekulardynamisches Modell zur Beschreibung der Mahlkörper-Kinematik entwickelt. Durch die Kombination von numerischen und praktischen Experimenten an einer halbtechnischen Umlaufmahanlage konnten bereits grundlegende Erkenntnisse zum Einfluss der Mahlkörpergattierung hergeleitet werden, die ohne weitere Daten jedoch keine quantitative Auslegung ermöglichen.

Das wichtigste Kriterium für die industrielle Umsetzung stellt die Betriebssicherheit der Kugelmühle dar. Darunter versteht man die Gewährleistung der kontinuierlichen Zementproduktion in definierter Menge und Qualität, was unter anderem die vollständige Zerkleinerung aller Grobanteile beinhaltet. Produktionsausfall durch verminderte Mahlleistung infolge falscher Gattierung oder sogar Stillstandszeiten der Mühle können in der Regel nicht ausgeglichen werden. Bei der Optimierung der Mahlkörperzusammensetzung ist zu beachten, dass sich die Anforderungen an die Gattierung, die sich hinsichtlich Betriebssicherheit und Energieeffizienz ergeben, gegenläufig zueinander verhalten. Maßgeblich für die Betriebssicher-

heit ist die ausreichende Zerkleinerung von Überkorn aus der Grobmahlung. Werden diese groben Mahlgutpartikel nicht zerkleinert, so führt dies mit der Zeit zu einer Anreicherung dieser Fraktionen. Für diese Grobzerkleinerung werden große Mahlkugeln benötigt. Effiziente Feinmahlung wird hingegen durch den Einsatz kleiner Mahlkörper erreicht. Zudem bestehen Hinweise, dass die Größe der Mahlkörper das Fließverhalten des Mahlguts durch die Mühle und damit den Füllstand in der Mahlkammer beeinflussen kann. Auf der anderen Seite kann der Einsatz von sehr kleinen Kugelfractionen zu einer Übermahlung des Materials führen. Hierbei werden große Anteile an Feingut erzeugt und weiter beansprucht. Dies unterstützt die Agglomerationsneigung und kann in Verbindung mit hohen Temperaturen ein Verpelzen der Mahlkörper begünstigen. Ferner ist es bei Mahlanlagen im geschlossenen Kreislauf mit Siebenergie energetisch günstiger benötigte Feinanteile durch Abscheidung im Sieb und entsprechende Umlaufzahlen zu erzeugen.

Ein Großteil der erwarteten Optimierungspotentiale kann auf Basis von kinematischen Simulationsdaten nicht nutzbar gemacht werden, da der Einfluss des Mahlguts noch nicht in geeigneter Weise berücksichtigt werden konnte. Die durch Mahlung erzeugte Korngrößenverteilung ist aus produktionstechnischer Sicht jedoch von großer Bedeutung. Es fehlt somit eine entscheidende Bemessungsgröße für die Auslegung einer Gattierung. Durch Beschreibung der Zerkleinerung und damit einhergehend der Integration der Materialeigenschaften in das bestehende Modell wird eine vollständige Bewertung der Betriebssicherheit und darüber hinaus der Effizienz der gesamten Feinmahlung angestrebt. Zudem können Anlagenspezifische Details und die Zementsorten-abhängigen Unterschiede in den Materialeigenschaften ohne langwierige empirische Untersuchungen direkt in die Auslegung integriert werden.

Die Methoden der Simulationstechnik bieten hierzu vielversprechende Ansätze. Tuzcu (TUZ-10) beispielsweise stellt Ansätze zur Modellierung des Bruchverhaltens in Abhängigkeit von Energiecharakteristika aus DEM Simulationen in Verbindung mit Population Balance Ansätzen vor. Diese Methodik ist als sehr komplex zu bewerten und eher dem Feld der Grundlagenforschung zuzuordnen. Die in der betrieblichen Praxis verbreiteten Methoden zielen dagegen vornehmlich auf direkte Anwendbarkeit und einfache Strukturen ab. Um den Mehrwert von modelltechnisch ermittelten Ergebnissen nutzbar zu machen, ist es folglich erforderlich, eine einfache Kopplung zwischen der Mahlkörperbewegung und dem Mahlfortschritt unter Berücksichtigung der typischen Datenbasis eines Mühlenaudits zu realisieren. Ziel des Forschungsprojektes war somit die Identifikation geeigneter Kopplungsgrößen und die Entwicklung von Beschreibungsansätzen für das Zerkleinerungsverhalten in Abhängigkeit der Mahlkörpergattung. Dabei sollte ferner geprüft werden, in wie weit sich die komplexen Prozesse in Kugelmühlen effizient erfassen lassen und in wie weit teilweise empirische Ansätze als zielführender zu bewerten sind.

Das Projekt (AiF-Vorhaben-Nr.: 16890 N) wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e. V. (AiF) gefördert.

2 Beanspruchungssituation in der Feinmahlkammer

Für die Feinmahlkammer wird in der Regel die Kaskadenbewegung angestrebt, d.h. ein Abrollen der Mahlkörper aufeinander. Da die Drehzahl des Mühlenrohres über seine gesamte Länge konstant ist, werden verschiedene Bewegungszustände durch den Einsatz unterschiedlicher Panzerungsgeometrien erreicht. Die Kaskadenbewegung zeichnet sich durch ein verhältnismäßig geringes Anheben der Kugelschüttung in Drehrichtung aus. Kugeln werden an der Wand nach oben bewegt und rollen anschließend auf der darunterliegenden Schüttung ab. Dabei bewegen sich vornehmlich Wand-nahe Kugelschichten. Hin zum Zentrum der Schüttung nimmt die Bewegungsintensität der Kugeln stark ab. Die Kugeln werden hier leicht angehoben und gleiten danach jedoch relativ schnell wieder auf den anderen Kugeln nach unten hin. So entsteht eine konstante Relativbewegung zwischen den Mahlkörpern mit sehr geringer Geschwindigkeit. Die Kugeln befinden sich dabei überwiegend in vollständigen Kontakt mit ihren Nachbarn. Es liegt hier entsprechend eine sehr dichte und homogene Verteilung der Mahlkörper vor. Nach außen hin zur Kammerwand lockert sich diese Packung durch die höheren Geschwindigkeiten und die freieren Bewegungsmöglichkeiten etwas auf. **Bild 2–1** zeigt im Detail die Bewegungssituation der Mahlkörper während der Kaskadenbewegung.

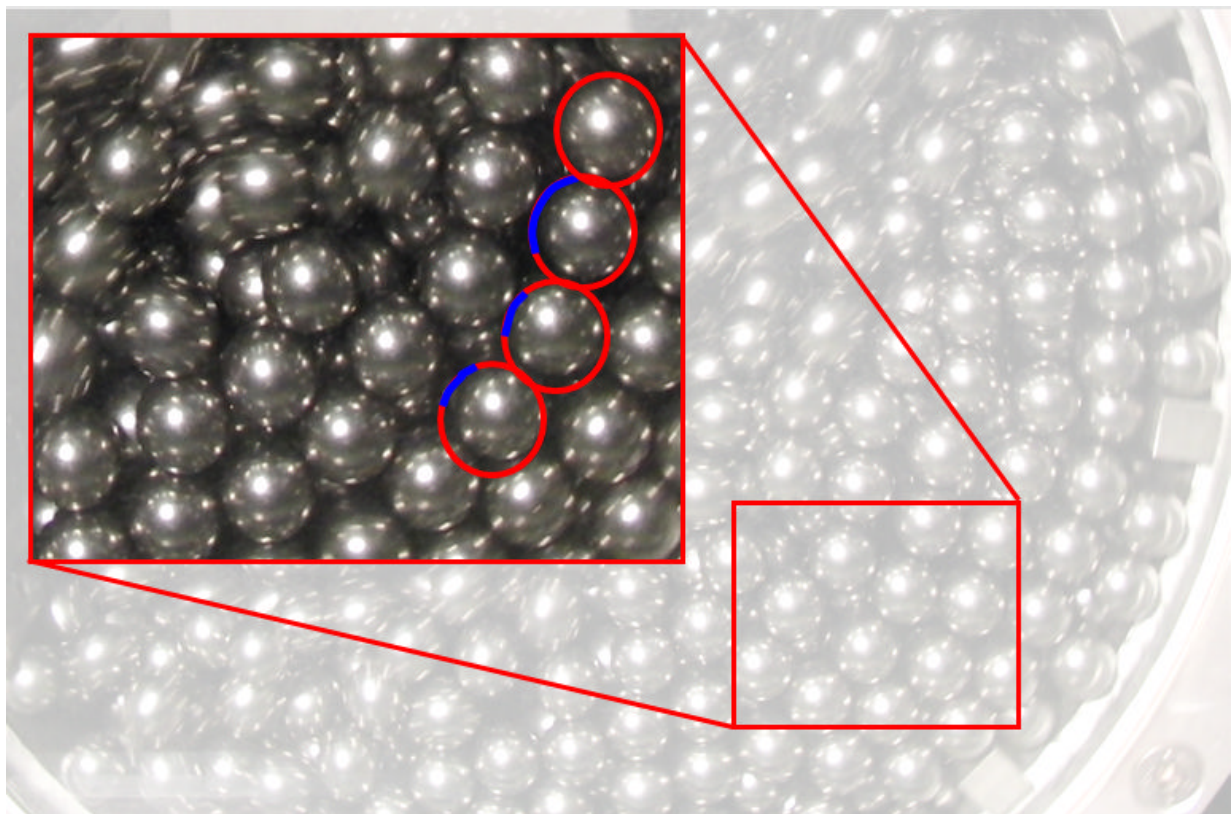


Bild 2–1 Bewegungsverhalten der Mahlkörper in der Feinmahlkammer. Farblich dargestellt sind die Kontaktbahnen der Mahlkörperoberflächen.

Typisch ist, dass die Mahlkugeln gegenseitig an ihren Oberflächen abrollen oder abgleiten. Dieser Effekt kann durch Auswertung einer Vielzahl von Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera bestätigt werden. Hierzu wurden auch Mahlkörper mit kleineren Durchmessern eingesetzt, die ein deutlich realistischeres Verhältnis von Mahlkörper- zu

Mühlendurchmesser aufweisen. Die hier graphischen ausgewiesenen Mahlkörper mit 20 mm Durchmesser stellen die Bedingungen in der Mühle optisch weit aus klarer dar.

Flankiert werden diese Erkenntnisse durch Auswertung von Simulationsdaten. Auch hier lässt sich der Bewegungsablauf anhand der simulationstechnisch ermittelten Partikeltrajektorien optisch nachvollziehen. Die vollständigen Messdaten bieten jedoch weitreichendere Auswertungsmöglichkeiten.

Die räumliche Verteilung der Mahlkörper wurde durch Triangulierung der Positionen in der betrachteten Fläche untersucht. Jeweils drei benachbarte Mahlkugeln bilden hierbei ein Dreieck. Durch Berechnung der durch die Dreiecke erzeugten Fläche abzüglich der Anteile der Kugeln, die innerhalb der Fläche liegen ergeben sich die Hohlräume der Kugelschüttung. Wertet man die Winkel, die sich zwischen den Verbindungslinien der einzelnen Punkte ergeben aus, so ergeben sich überwiegend Werte von $60^\circ \pm 0,1^\circ$. Dies weist auf gleichseitige Dreiecke hin, die wiederum ein Indiz für eine ideale Anordnung und vollständigen Kontakt aller Mahlkörper darstellten. Ferner ergibt sich für die Dreiecksflächen ein Mittelwert, der nur 2,1 % höher liegt, als die minimal mögliche Fläche zwischen den Kugeln. Dabei ist zu beachten, dass Kugeln an der Oberfläche teilweise größere Dreiecke aufspannen, die die Abweichung des Wertes erklären. Folglich kann angenommen werden, dass sich die Mahlkörper während der Kaskadenbewegung nahezu alle vollständig in Kontakt befinden.

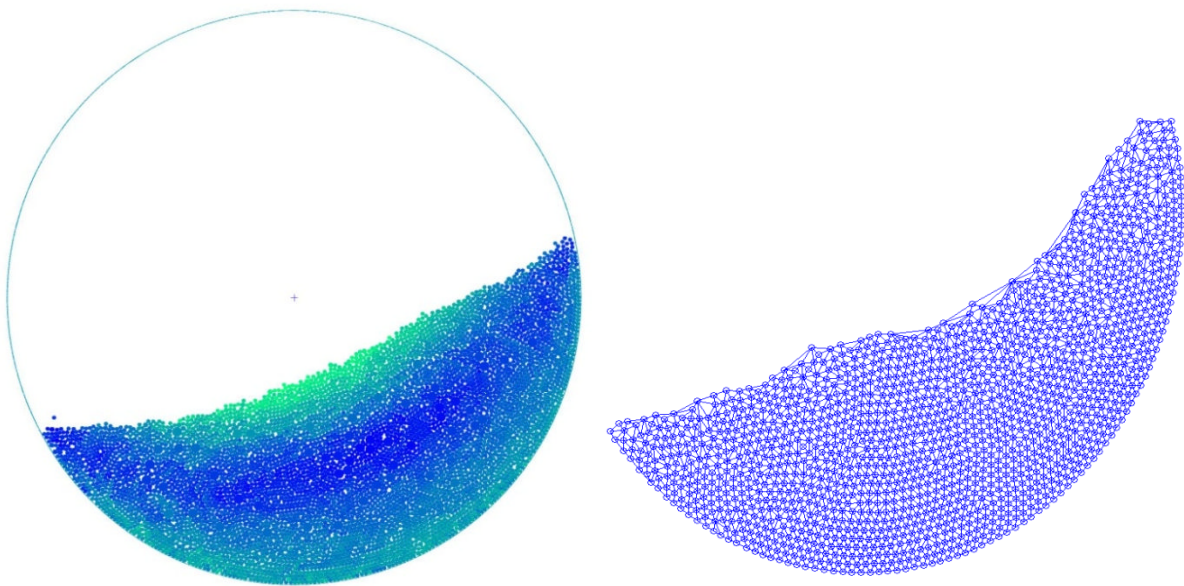


Bild 2-2 Visualisierung der Mahlkörperpositionen in einer 3 m-Mühle (links) und Triangulierung der Mahlkörperpositionen der Schüttung in einer 2 m-Mühle (rechts)

Die Untersuchung einer ruhenden Schüttung bestätigt dies. Hier können teilweise Abweichungen nach oben von bis zu 3,5 % festgestellt werden. **Bild 2-2** stellt rechts abschließend das Ergebnis einer Triangulierung der Kugelpositionen im Raum dar. Die derartig erhaltenen Ergebnisse können in weiteren Schritten genutzt werden. So können zum Beispiel reale Raumauffüllungen bei polydispersen Kugelmischungen besser bestimmt werden. Außerdem besteht die Möglichkeit einer räumlich-diskreten Beschreibung der Zerkleinerungsvorgänge.

Bild 2-2 zeigt im linken Teil zudem eine Visualisierung der Mahlkörperpositionen in einer 3 m-Mühle. Die Geschwindigkeiten sind dabei farbkodiert, so dass hohe Werte hell und geringe Werte entsprechend dunkler dargestellt sind. Man erkennt auch hier die geringen Ge-

schwindigkeiten der Kugeln in der Mitte der Schüttung. Dabei nimmt der Einfluss der Oberflächen auf die Schüttung mit steigendem Mühlendurchmesser deutlich ab. Während die Oberfläche sich proportional zum Radius vergrößert, nimmt die Fläche der Schüttung mit dem Radius zum Quadrat zu. Entsprechend nimmt der Einfluss der Randbereiche der Schüttung weiter ab, so dass die homogenen Verhältnisse in der Schüttung noch stärker überwiegen (FLE-13).

Die hohen Geschwindigkeiten und das freiere Bewegungsverhalten der Mahlkörper an der Oberfläche der Schüttung führen zu partiellen Beanspruchungen durch Schlag. Diese sind aber in Häufigkeit und Intensität nur von untergeordneter Bedeutung. Daher wird diese Art der Beanspruchung zunächst nicht tiefergehend betrachtet.

Insbesondere im Hinblick auf die Bestimmung von Materialparametern spielt das Zerkleinerungsverhalten eine wesentliche Rolle. Dieses ergibt sich in der Regel direkt als Ergebnis der Beanspruchung. Hierbei ist aber immer die Anwendbarkeit in der Praxis als Randbedingung zu berücksichtigen.

3 Modellierung der Zerkleinerung

Zur Beschreibung der Zerkleinerung von Partikelsystemen, wie bei der Mahlung von Zement, existieren eine Reihe von Modellansätzen. Diese unterscheiden sich in vielen Gesichtspunkten. Hierzu zählen beispielsweise der Auflösungsgrad des betrachteten Systems, die Beschreibung von Bruchvorgängen hinsichtlich des Einflusses der applizierten Energie und hinsichtlich der Entstehung von Bruchstücken wie auch die Verwendung und Integration von Materialparametern. Die Wahl eines geeigneten Ansatzes ist im vorliegenden Fall durch die Datenbasis der DEM-Simulation, durch die Erkenntnisse aus der Bestimmung von Materialparametern und durch den industriellen Anwendungsrahmen bestimmt.

3.1 Zerkleinerungsmodelle

Eine direkte Beschreibung der Zerkleinerung in Abhängigkeit der Beanspruchungsspektren aus der DEM-Simulation durch Methoden wie beispielsweise „population balances“ ist als sehr komplex zu bewerten und daher unter Berücksichtigung des Anwendungsrahmens nicht als optimal einzustufen. Zu den einfacheren Ansätzen zählt neben dem sogenannte „Perfect Mixing Model“ (ARM-05) die Beschreibung durch die „Zerkleinerungsinvarianten“ nach Espig (ESP-84, ESP-96, ESP-02, ESP-13). bei dem auf der Basis eines gemessenen Referenzzustandes einer Mühle die Korngrößenverteilung des Mühlenaustragsgutes $R_A(x)$ unter Variation von Mühlenumsatz und Korngrößenverteilung des Mühlenaufgabegutes $R_F(x)$ berechnet werden können.

Grundlage des Zerkleinerungsmodells nach Espig ist die Erkenntnis, dass das Produkt aus Mühlenumsatz und der dazugehörigen Zerkleinerungsgeschwindigkeit (nach Espig (ESP-84) auch Auswahlfunktion) $S(x, z)$ innerhalb eines weiten Variationsbereichs für jede Kornklasse konstant ist. Ein geringer Mahlgutmassenstrom durch die Mühle führt danach zu einer hohen Zerkleinerungsgeschwindigkeit des Mahlgutes. Ein großer Mahlgutmassenstrom hat eine geringe Zerkleinerungsgeschwindigkeit zur Folge. Außerdem hat das Verweilzeitverhalten des Mahlgutes in der Mühle einen Einfluss auf das Zerkleinerungsergebnis.

Dieser Modellansatz wurde sowohl in der Praxis als auch in verschiedenen Forschungsprojekten auf die Mahlung in Kugelmühlen angewandt (VDZ-04). Dabei wurde der Mahlvorgang in der Mühle jedoch in der Regel nicht vollständig aufgelöst. Vielmehr wurden untersuchte Mühle durch das Aufgabegut und die ermahlene Korngrößenverteilung als gesamte Einheit beschrieben. Die Betrachtung des Einflusses der Gattierung auf das Produkt erfordert jedoch eine explizite Betrachtung des Ablaufes der Mahlung.

3.2 Kopplung der Modelle

Informationen über die Mahlkörperbewegung liegen in Form von Energie- und Bewegungsdaten aus der DEM-Simulation vor. Folglich muss eine Möglichkeit gefunden werden, die Zerkleinerungsreaktion eines bestimmten Materials in Abhängigkeit der eingetragenen Energie unter Berücksichtigung gleicher Beanspruchungsbedingungen zu beschreiben. Hierzu wurde eine Reihe von Erkenntnissen und Anforderungen zusammengetragen:

Die Zerkleinerung innerhalb der Feinmahlkammer ist im Wesentlichen geprägt durch eine Druck- bzw. Reib-Beanspruchung. Kugeln befinden sich überwiegend in direkten Kontakt mit ihren umgebenden Nachbarn und es findet eine kontinuierliche Umwälzung der Schüttung statt. Die Zerkleinerung ist daher nicht nur von den Energieeinträgen je Kugelstoß abhängig sondern vielmehr von der Kontaktdauer und der dabei wirkenden Kraft. Die Betrachtung von

einzelnen Stoßereignissen, die durch die Simulation bestimmt werden, ist damit nicht zwingend zielführend. Die DEM Simulation kann dauerhafte Kontakte zwischen Partikeln numerisch nicht klar erfassen. Selbst im statischen Gleichgewicht finden periodische Ablöse- und Kontaktvorgänge statt, die jeder für sich als eigenes Stoßereignis erfasst werden würde. Zudem sind Relativbewegungen von Kugeln in sehr geringen Abständen unter Umständen auch zerkleinerungsrelevant.

Unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Erkenntnisse wird die Übertragung unter Verwendung des Weges, den die Zerkleinerungswerkzeuge, in diesem Fall die Kugeln, an ihren Oberflächen zurücklegen, realisiert. Wie bereits erläutert wurde, besteht ein enger nahezu dauerhafter Kontakt zwischen den Mahlkörpern in der Schüttung. Diese Kontakte stellen insbesondere für große Mühlendurchmesser den Großteil der Interaktionen dar. Die Zerkleinerung findet folglich durch die Relativbewegung der Oberflächen zweier Kontaktpartner statt und ist bestimmt durch die Dauer respektive den zurückgelegten Weg, durch den herrschenden Druck und damit den Energieeintrag und durch das Einzugsverhalten in die Zerkleinerungszone.

Betrachtet man diesen Kontaktweg, so erhält man eine Möglichkeit, die Zerkleinerungswirkung in Hinblick auf die Unterschiede, die sich aus den verwendeten Gattierungen ergeben, zu betrachten. Große Mahlkörper können bedingt durch die geringere Anzahl an Auflagepunkten einen wesentlich höheren Druck je Beanspruchung aufbauen. Zudem verfügen Sie über höhere Einzelmassen, so dass je Kugel und Stoß höhere Energien übertragen werden könnten. Auf Grund der Bewegungseinschränkung in der Schüttung kommt dieser Effekt jedoch nur bedingt zum Tragen. Es ist zu vermuten, dass das Gewicht der gesamten Schüttung sowie die Zentrifugalkraftwirkung der Rotation den Druckverlauf im Mittel wesentlich bestimmen. Mit abnehmender Kugelgröße nehmen die Auflagepunkte und Mahlkörpermassen ab. Damit sinkt der Druck je Beanspruchung. Die Zahl der Kontakte steigt jedoch an, wobei der Durchmesser mit der dritten Potenz in die Anzahl eingeht. Damit erhöht sich auch der Weg deutlich, den die Kugeln zurücklegen. **Bild 3–1** visualisiert diesen Zusammenhang. Die Betrachtung des Kontaktweges und die entlang diesem wirkenden Drücke, erfasst damit den entscheidenden Einfluss der Gattierung wie er im Vorläuferprojekt hergeleitet wurde.

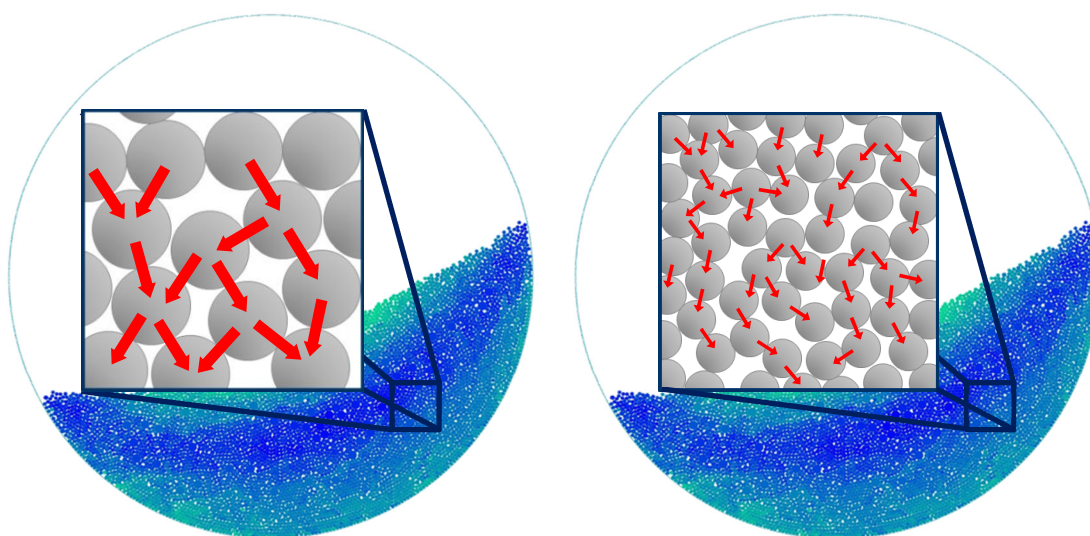


Bild 3–1 Anzahl an Kontakten und Interaktionskräfte für verschiedene Gattierungen

3.3 Bestimmung des Kontaktweges

Der Kontaktweg ergibt sich aus der Summe der Teilstrecken aller Einzelinteraktionen zwischen den Mahlkörpern. Diese Daten sind direkt nicht aus der Simulation abzuleiten und müssten explizit bestimmt werden. Daher wurde die Berechnungsstruktur für die Interaktionskräfte erweitert, um so die Oberflächenkontakte zu erfassen.

Um dem gemeinsamen Bewegungsverhalten zweier Kugeln zueinander insbesondere in Hinblick auf das Einzugsverhalten Rechnung zu tragen, werden zur Bestimmung des Kontaktweges verschiedene Fälle unterschieden. Hierbei werden zunächst die Drehrichtungen beider Kugeln untersucht. Für den Fall, dass beide Kugeln gegenläufig drehen, ergibt sich eine gleichförmige Bewegung der Oberflächen in der Kontaktzone. Diese Bewegung entspricht dem Abrollen der Oberfläche einer Kugel auf der jeweils anderen und ist beispielsweise bedingt mit dem Einzugsverhalten einer Rollenpresse vergleichbar. Drehen beide Kugeln gleichsinnig, so bewegen sich die Oberflächen der Kugel in der Kontaktzone gegeneinander. Hierbei wird Material teilweise in und teilweise wieder aus der Kontaktzone herausbefördert. Ein Einzugsverhalten ist somit nicht gegeben. Für diesen Fall wird daher angenommen, dass die Rotation der Kugeln nicht zerkleinerungsrelevant ist.

Je nach Verhältnis von Rotation zu Translation ergeben sich die folgenden Fälle:

A Abrollen der Kugeln an ihren Oberflächen:

- Ideales Abrollen
- Schlupf:
- Gleiten

B Drehung entgegen der Gleitrichtung

Rollt eine Kugel auf der anderen Kugel ab, so legt sie auf dieser Kugel einen Weg zurück. Die Richtung der Verschiebung des Kontaktpunktes, die hieraus resultiert, ist dabei der Rotation entgegen gerichtet. Die Vorzeichen der beiden Drehungen unterscheiden sich folglich. Ideales Abrollen stellt sich unter dieser Voraussetzung dann ein, wenn der Weg resultierend aus Translation und Rotation gleich sind. Dreht sich die Kugel gegenüber der Oberfläche stärker als sie sich fortbewegt, liegt Schlupf vor. Fällt die Drehung dagegen geringer aus, muss die Wegdifferenz von der Kugel durch Gleiten zurückgelegt werden. Stellt man sich vereinfacht einen Autoreifen auf einer Fahrbahn vor, so lassen sich die verschiedenen Arten der Abrollbewegung einfach nachvollziehen. Schlupf liegt bei durchdrehenden Reifen eines Anfahrvorgangs vor, während Gleiten bei einem blockierten Rad während des Abbremsens auftreten kann.

Für die letztendliche Betrachtung des Kontaktweges gelten die folgenden Annahmen.

- Eine translatorische Bewegung ist mit einer Positionsänderung verbunden und stellt somit eine Bewegung der Kugel im umgebenen Material dar. Hierdurch wird Material an verschiedenen Stellen beansprucht. Die sich ergebene Strecke an der Kugeloberfläche ist somit vollständig relevant für den Kontaktweg.
- Liegt ein Abrollvorgang vor, so wird diese Bewegung durch die Rotation begleitet. Durch die parallel zur Translation auftretende Rotation wird jedoch kein zusätzlicher Kontaktweg generiert.
- Tritt Gleiten oder Schlupf auf, so ist der dominierende Anteil für den Kontaktweg zu bestimmen. Im Falle des Gleitens ist dies der translatorische Anteil.

- Zur Betrachtung der überwiegenden Rotation ist zusätzlich das Einzugsverhalten zu bewerten. Sofern die Kugeln gegensinnig drehen liegt ein Einzug vor. In diesem Fall ergibt sich der Rotationsanteil aus dem Mittelwert der Drehwinkel beider Kugeln.
- Bei gleichsinniger Drehung liegt ein Materialeinzug vor. Entsprechend ist die Zerkleinerung vom translatorischen Anteil geprägt. Der Rotationsanteil wird in diesem Fall zu null gesetzt.
- Liegt eine translatorische Bewegung entgegen der Rotationsrichtung vor, so überlagern sich beide Anteile nicht mehr sondern kommen beide zum Tragen, sofern die Rotation beider Kugeln gegenläufig ist. In diesem Spezialfall wird die Summe beider Anteile berücksichtigt.

Diese Annahmen lassen sich mathematisch umsetzen und in die Strukturen des eingesetzten Modells übertragen. Durch die Aufsummierung sämtlicher Interaktionen über die Simulationszeit lässt sich der Kontaktweg bzw. auch die Kontaktgeschwindigkeit, d.h. der pro Zeiteinheit zurückgelegte Kontaktweg bestimmen.

Wie bereits erläutert, treten auch bei längeren Kontakten und sogar im Fall eines statischen Gleichgewichtes kurze Ablösevorgänge auf. Diese führen dazu, dass dauerhafter Kontakt teilweise nicht mehr erfasst werden kann. Längere Interaktionen werden nur zerlegt in Form von mehreren Einzelinteraktionen wahrgenommen. Eine nachträgliche Auswertung dieser ist schwer realisierbar.

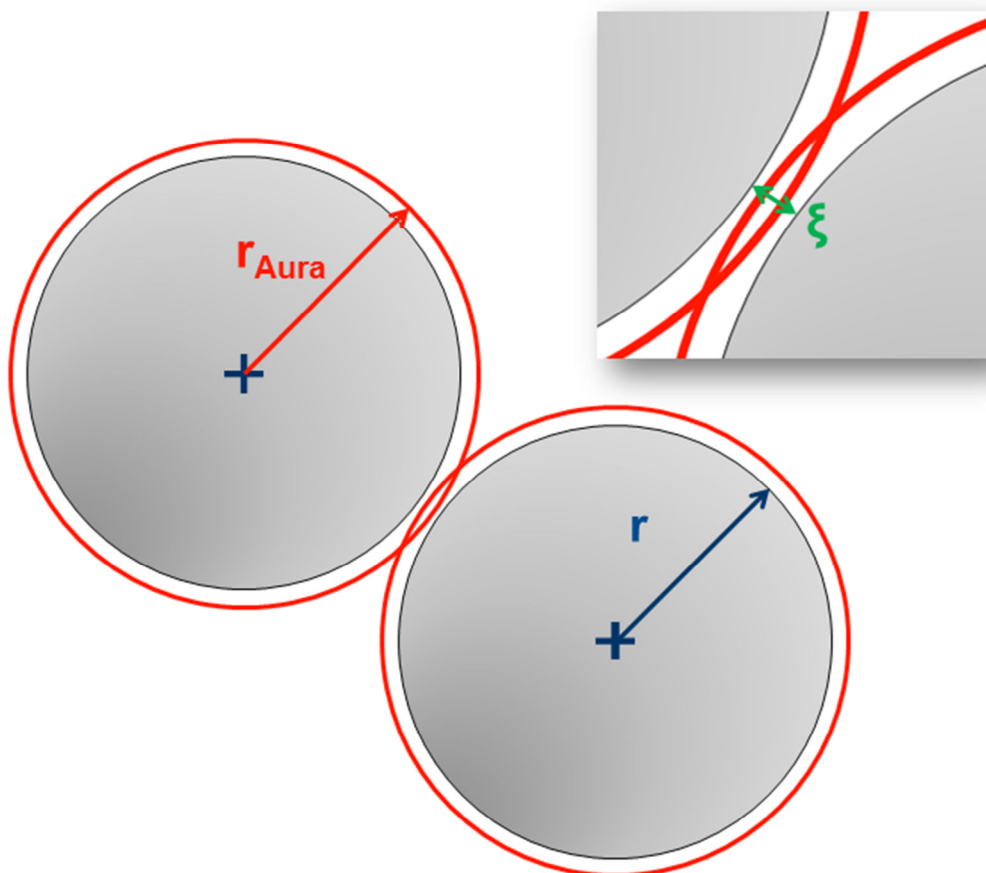


Bild 3–2 AURA-Konzept: Partikel erhalten einen erweiterten Radius zur Kontaktwegbestimmung

Ferner ist das Ziel der Untersuchung eine Beschreibung des Kontaktweges in Hinblick auf die Zerkleinerung von Material zwischen den Kugeln. Aus modell- und rechentechnischen Gründen erfolgt nur eine Simulation der Mahlkörper, das Mahlgut wird vernachlässigt. Beschrieben werden daher nur Kugel-Kugel-Kontakte. Eine Interaktion von Mahlgut mit den umgebenden Kugeln entsteht jedoch abhängig von der Korngröße bereits viel früher.

Um dieser Einschränkung entgegenzuwirken, werden die simulierten Partikel durch eine AURA erweitert. AURA bezeichnet hierbei für den vorliegenden Fall der Kugeln einen **AU**s-gedehnten **RA**dus, der diese zusätzlich umgibt und Annäherungen registrieren kann. Zur Beschreibung dient hierfür die Kompression ξ , die als Maß für die Überschneidung von Partikeln den Abstand der Oberflächen beinhaltet (FLE-13). **Bild 3-2** stellt das AURA-Konzept grafisch dar. Durch den durch die Kompression bestimmten Radius besteht eine neue zusätzliche Stellgröße, die langfristig mit in die Betrachtung des Mahlverhaltens verschiedener Gattierungen einfließen kann.

Mittels der vorgestellten Methoden wurden verschiedene Gattierungen und verschiedene Baugrößen von Mühlen untersucht. Zudem wurde die Größe der AURA variiert. **Bild 3-3** stellt neben dem Kontaktweg die Abhängigkeit der mittleren Normalkraft vom Durchmesser der eingesetzten Kugeln dar. Für den Kontaktweg ergibt sich bei einem Bestimmtheitsmaß von größer 0,997 ein Exponent von -3,03, was den erwarteten kubischen Zusammenhang zwischen Kugelgröße, Kugelanzahl und damit dem Kontaktweg bestätigt. Die Normalkraft wird als Mittelwert über jeden Stoßvorgang erfasst. Aufgetragen sind jeweils die Mittelwerte über die gesamte Mühle über einen Zeitraum von 5 s. Die Erfassung erfolgt dabei im Rahmen der normalen Berechnung der Interaktionskräfte ohne Einfluss einer AURA. Die Normalkraft zeigt ein zum Verlauf des Kontaktweges reziprokes Verhalten. Eine Approximation ebenfalls mittels Potenzfunktion liefert einen Exponenten von 3,04 bei einem Bestimmtheitsmaß von größer 0,997. Damit bestätigt sich auch hier die angenommene kubische Abhängigkeit. Diese beruht zum einen auf der direkten Abhängigkeit der Anzahl an Auflagepunkten, die die Kräfte in der Schüttung aufnehmen, von der Anzahl an Kugeln. Zum anderen geht die Masse der Kugeln in die verfügbaren Stoßenergien ein, so dass auch hier eine kubische Abhängigkeit vorliegt.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Ergebnisse die erwarteten Abhängigkeiten bezüglich der Kugelanzahl aufweisen. Dies bestätigt die grundsätzliche Funktionalität der Bestimmung des Kontaktweges. Ferner zeigt sich, dass das Produkt aus Kontaktweg und mittlerer wirkender Normalkraft über den betrachteten Bereich an Kugelgrößen als konstant angenommen werden kann (FLE-13). Um im nächsten Schritt die Zerkleinerung beschreiben zu können, sind Informationen über die Abhängigkeit des Bruchverhaltens von den einwirkenden Kräften erforderlich. Ferner ist der Einfluss des Einzugsverhaltes für gröbere Partikel von Interesse. Hierzu ist die Implementierung eines Konzeptes erforderlich, das den Kontaktweg bei der Beschreibung der Zerkleinerung berücksichtigt.

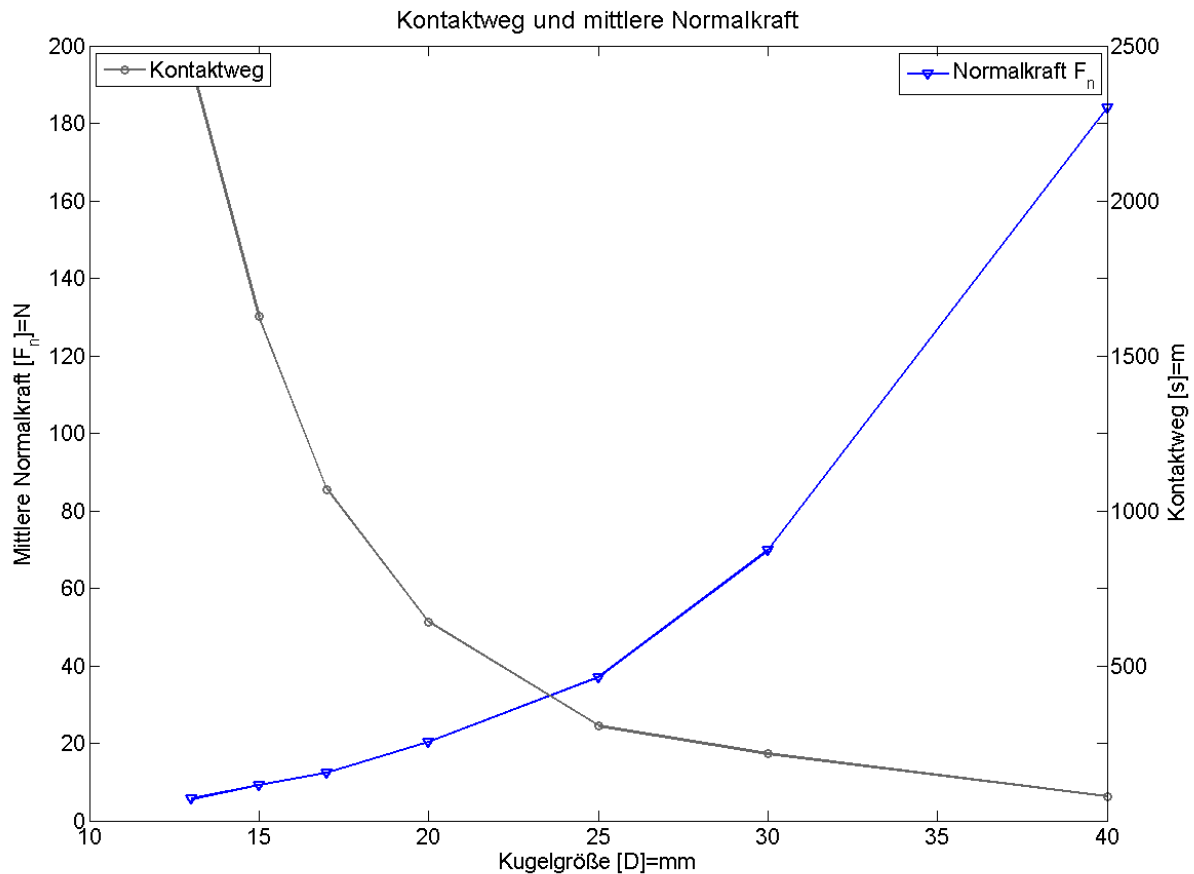


Bild 3–3 Kontaktweg und mittlere Normalkraft für verschiedene Gattierungen

3.4 Untersuchung der Zerkleinerung mittels der Zeiseltesters

Die Zerkleinerungswirkung durch Fallversuche, die überwiegend eingesetzt werden, unterscheidet sich klar von diesen Beanspruchungsbedingungen und ist eher geeignet für die Beschreibung der ersten Kammer. Im Rahmen des Projektes durchgeführte Versuche mit einer Fallapparatur bestätigen diese Annahmen. Zudem ist hier direkt keine Integrationsmöglichkeit hinsichtlich des Kontaktweges gegeben.

Eine definierte reibende Beanspruchung sowie ein direkt erfassbarer Kontaktweg sind jedoch im Mahlbarkeitstester nach Zeisel gegeben. Das System ist grundsätzlich bereits so komplex, dass sowohl Zerkleinerungs- als auch Mischungseffekte parallel auftreten. Ferner ist generell bekannt, dass die isolierte Bestimmung von Materialparametern für die Zerkleinerung nahezu unmöglich ist und daher genau genommen, auch bei den technischen Mahlbarkeiten nur Systemparameter ermittelt werden (UNL-10). Diese Erkenntnis führt jedoch zu einem neuen Ansatzpunkt. Sofern der Zerkleinerungsablauf im Zeiselgerät verfahrenstechnisch ausreichende Ähnlichkeit zur Zerkleinerung in der Kugelmühle ausweist, besteht die Möglichkeit beide Systeme mit einem geringeren Auflösungsgrad im Vergleich zu Ansätzen wie den population balances zu betrachten. Damit wäre auch die Nutzung der Zerkleinerungsinvarianten möglich.

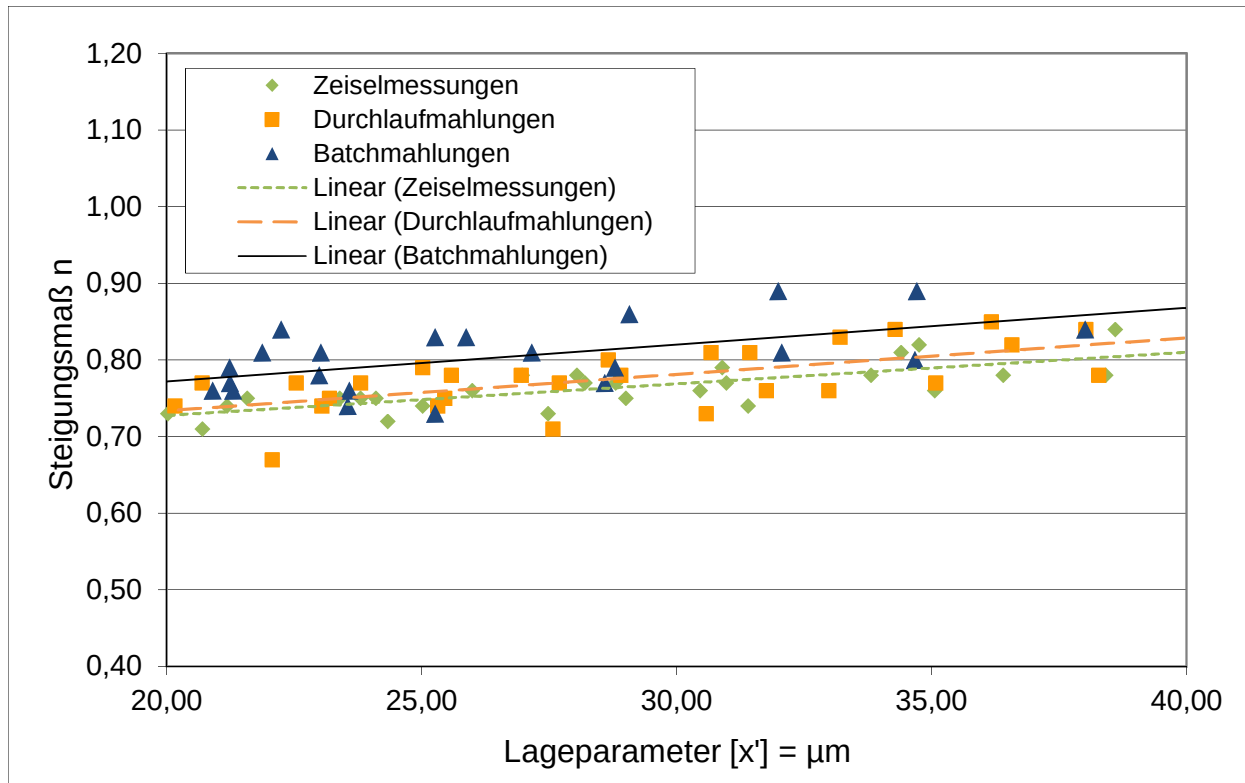


Bild 3-4 Vergleich von Korngrößenverteilungen aus Zeiselmessungen, Durchlauf- und Batchmahlungen anhand der Parameter der RRSB-Verteilung

Bild 3-4 zeigt die Zerkleinerungsergebnisse einer Vielzahl von Zeiselmessungen, Batch- und Durchlaufmahlungen. Verglichen wurde der Bereich des Lageparameters der RRSB-Verteilung zwischen 20 μm und 40 μm durch Auftragung des Steigungsmaßes n gegen den Lageparameter x' . Wie in **Bild 3-4** zu erkennen, stellt sich im betrachteten Bereich eine systematische Abnahme des Steigungsmaßes hin zu höheren Feinheiten ein. Dieser Effekt ist bei allen Verfahren zu beobachten. Im Mittel ergeben sich Ausgleichsgeraden, die eine sehr gute qualitative Übereinstimmung zeigen. Die maximale Abweichung besteht zwischen den Geraden aus Zeiselgerät und der Batchmahlung, ist aber mit Werten von ca. 0,04 eher gering. Die Streuung der Ergebnisse aus den Mahlanlagen liegt zudem deutlich höher als die der Proben aus dem Zeiselgerät.

Es ist zu beachten, dass für diese Abschätzung eine große Anzahl verschiedener Ergebnisse verwandt wurde, die unter Variation von Betriebsparametern erzeugt wurden. So wurden in den Mühlen unterschiedliche Gattierungen verwandt und am Zeiselgerät die Last verändert. Ferner wurden die Probenmassen bzw. Massenströme variiert. Dass sich diese Änderungen insgesamt in ähnlicher Weise ausgleichen, ist in Hinblick auf die angestrebten Ergebnisse als positiv zu bewerten. Systematische Unterschiede bestehen jedoch in den eingesetzten Ausgangsmaterialien. Während für Zeiselmessungen zunächst die übliche Körnung von 0,8 bis 1 mm eingesetzt wurde, basieren der überwiegende Teil der Batchmahlungen auf einer Körnung von 1 bis 4 mm und ein Teil der Durchlaufmahlungen auf vorgebrochenem Material kleiner 4 mm. Zudem liegt bei den Batchmahlungen je nach Gattierung ein Anteil an unzerkleinerten Partikeln zwischen 2 mm und 4 mm vor, der nicht mit in diese Betrachtungen eingeht. Es wird hier insbesondere eine Anreicherung schwer mahlbarer Bestandteile vermutet, die sich der nachfolgenden Feinzerkleinerung, die hier wesentlich be-

trachtet wird, entziehen. Dies kann grundsätzlich die leicht breitere Ausprägung der Streuung erklären. Weiterhin wurde nicht explizit die Eignung der RRSB-Verteilung für die Beschreibung der Korngrößenverteilungen überprüft.

Eine vollständige Bewertung des Verfahrens ist damit auf dieser Datengrundlage nicht möglich und erfordert tiefergehende Untersuchungen. Diese wurden mit einem nach Fleiger und Treiber (FLE-12) modifizierten Mahlbarkeitstester nach Zeisel durchgeführt. Es wurden zunächst Versuchsreihen unter Variation der Parameter Stempellast und Probenmasse gemäß **Tabelle 3–1** durchgeführt. Die Ergebnisse wurden mittels der Zerkleinerungsinvarianten bzw. der Energiecharakteristik ausgewertet. Hierzu wurden eine verschiedene Mahlschritte untersucht, um auch den zeitlichen Verlauf der Zerkleinerung erfassen zu können. Insgesamt zeigen die Ergebnisse ein Verhalten, das auf eine Invarianz zwischen der Probenmasse und der Zerkleinerungsgeschwindigkeit schließen lässt.

Tabelle 3–1 Versuchsreihe mit Standardstempel unter Variation von Last und Probenmasse

Stempellast	10	14	20	25
Probenmasse	$\Delta t_{\max} = 20 \text{ min}$			
20		x	x	x
25			x	
30	x	x	x	x
35			x	
40			x	x

Bild 3–5 zeigt vier Kurven aufgenommen mit unterschiedlichen Probemengen zwischen 20 g und 40 g. Erkennbar ist überwiegend eine sehr gute Übereinstimmung der Verläufe. Einzig die Kurve bei 40 g liegt im Feinbereich geringfügig unter der der anderen Kugeln. Bei hohen Füllgraden liegen die Kugeln vollständig im Material, so dass es zu einem Einzug von Material zwischen dem oberen Teil der Kugeln und dem Stempel kommen kann. In diesem Fall wird zusätzliche Zerkleinerungsarbeit an diesen Kontaktstellen geleistet. Der Effekt nimmt durch die Ausdehnung des Materials hin zu höheren Feinheiten zu.

Die Unstetigkeiten und die damit verbundenen leichten Abweichungen im Grobbereich sind durch den Verlauf der Rückstandswerte der Grobanteile erklärbar. Da bei größerer Probenmasse eine langsamere Zerkleinerung zu erwarten ist, verschiebt sich hier entsprechend das beobachtete Abknicken der Kurve.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass es sich bei den dargestellten Kurven um die Energiecharakteristiken handelt. Folglich ist der Einfluss des anliegenden Momentes bereits mit erfasst. Ein etwaiger Einfluss auf den Energieverbrauch durch erhöhte Reibung zwischen Material, Kugeln und Mahlschüssel ist somit berücksichtigt.

Da die geringen Abweichungen vollständig erklärbar sind, kann abschließend angenommen werden, dass für die Zerkleinerung im Zeiseltester ähnlich invariante Zusammenhänge zwischen Probenmenge und Zerkleinerungsgeschwindigkeit bestehen, wie in Kugelmöhlen. Damit ist neben dem Zerkleinerungsergebnis ein weiteres wichtiges Kriterium für die Übertragbarkeit der Ergebnisse erfüllt.

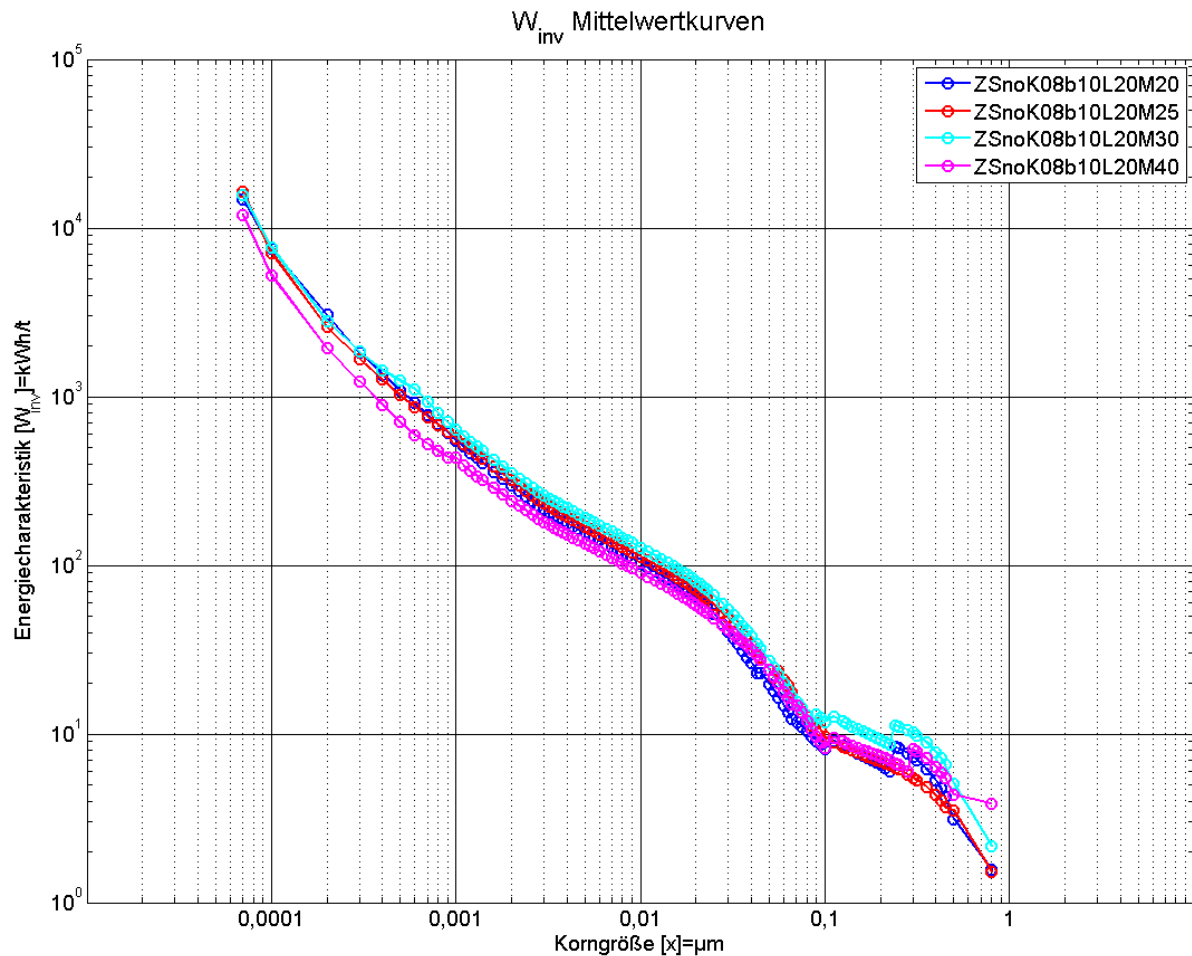


Bild 3-5 Mittelwertkurven der Energiecharakteristik bei Variation der Probemasse (Körnung 0,8 bis 1 mm, Last 20 kg)

3.5 Beschreibung unter Berücksichtigung des Kontaktweges

Mittels Simulation wurde gezeigt, dass eine Invarianz zwischen dem Kontaktweg und der je Kontakt eingebrachten Leistung besteht. Das gleiche Verhalten ist für die Zerkleinerungswirkung je Kontaktweg und bezogen auf die Beanspruchungsintensität nicht zu erwarten. Sofern dies der Fall wäre, würde bei ansteigendem Kontaktweg die Beanspruchungsintensität derart sinken, dass im gleichen Verhältnis zur Veränderung des Kontaktweges auch der Massenfluss bei gleichem Grad der Zerkleinerung sinkt. Daher wird zunächst die Kontaktintensität als neue Kenngröße eingeführt:

$$I_K := \frac{P_{eff}}{v_K} \quad (\text{Gl. 8.3})$$

mit

P_{eff} : Effektive Leistungsaufnahme

v_K : Kontaktgeschwindigkeit

Die Kontaktintensität beschreibt die pro Wegeinheit eingebrachte Energie und hat somit die Einheit J/m. Bezieht man diese Größe auf Durchsatzcharakteristik c_{inv} so erhält man nach folgender Formel die Intensitätscharakteristik:

$$I_{inv} := \frac{c_{inv}}{I_K} \quad (\text{Gl. 8.2})$$

mit

$$[I_{inv}] = \frac{\frac{kg}{J} \frac{s}{m}}{Js} = \frac{kg \cdot m}{Js}$$

Diese beschreibt den Massenfluss bei definiertem Grad der Zerkleinerung entlang eines Kontaktweges bezogen auf die dafür benötigte Energie. Geht man nun von einer Invarianz zwischen Beanspruchungsintensität und bereitgestellten Kontaktweg aus, so sinkt bei ansteigendem Kontaktweg der Massenfluss in gleichem Maße, so dass die Größe unverändert bleibt. Wird die Energieausnutzung schlechter in Folge zu hoher Beanspruchungsintensität, so sinken die Werte der Intensitätscharakteristik. Reicht auf der anderen Seite die Beanspruchungsintensität nicht aus, um Material zu zerkleinern, so führt dies ebenso zu einem Rückgang Werte. Damit erfüllt die Intensitätscharakteristik ein wesentliches Kriterium für die Herleitung einer Optimierungsstrategie.

Umfangreiche Versuche am Mahlbarkeitstester unter Variation der Last, der Kugelgröße und damit auch der Kontaktgeschwindigkeit konnten bereits andeutungsweise zeigen, dass mittels der Intensitätscharakteristik Erkenntnisse über die Effizienz der Zerkleinerung in verschiedenen Feinheitsbereichen erlangt werden können.

4 Übertragung der Ergebnisse auf Kugelmøhlen

Um die Überlagerung einer Vielzahl verschiedener Einflüsse wie der Verweilzeit in kontinuierlich betriebenen Møhlen zunächst zu eliminieren wurden umfangreiche Versuche in einer 40 kg-Batchmøhle durchgeführt. Hierbei wurden in verschiedenen, hin zu höheren Feinheiten länger werdenden Abständen Proben genommen und analysiert. Ergebnisse liegen folglich ähnlich wie beim Zeiseltest in Form von KorngröÙenverteilungen und dem Energiebedarf zu deren Erreichung vor. Die Auswertung erfolgt anhand der neu eingeföhrten Intensitätscharakteristik. Dabei wird der Kontaktweg durch Simulation bestimmt.

Bild 4–1 stellt die Intensitätscharakteristik für die verschiedenen Gattierungen dar. Das Maximum der verschiedenen Intensitätscharakteristik-Kurven verschiebt sich hin zu kleineren Durchmessern. Dabei zeigt sich, dass entgegen der ursprünglichen Erwartung die kleinsten Kugeln im Feinbereich nicht das Optimum darstellen. Dieses liegt für weite Teile für die 17 mm Gattung vor. Dabei ist jedoch zu beachten, dass bei diesen kumulierten Werten der Einfluss des hier vorliegenden Rückstands im Grobgut bis in den Feinbereich eine Rolle spielt. Ferner sind durch die sehr langen Mahldauern zusätzliche Effekte wie die Agglomeration von sehr feinem Gut zu erwarten. Weitergehende Untersuchungen von verschiedenen Zeit-Intervallen konnten bereits wertvolle Informationen für tiefergehende Betrachtungen liefern.

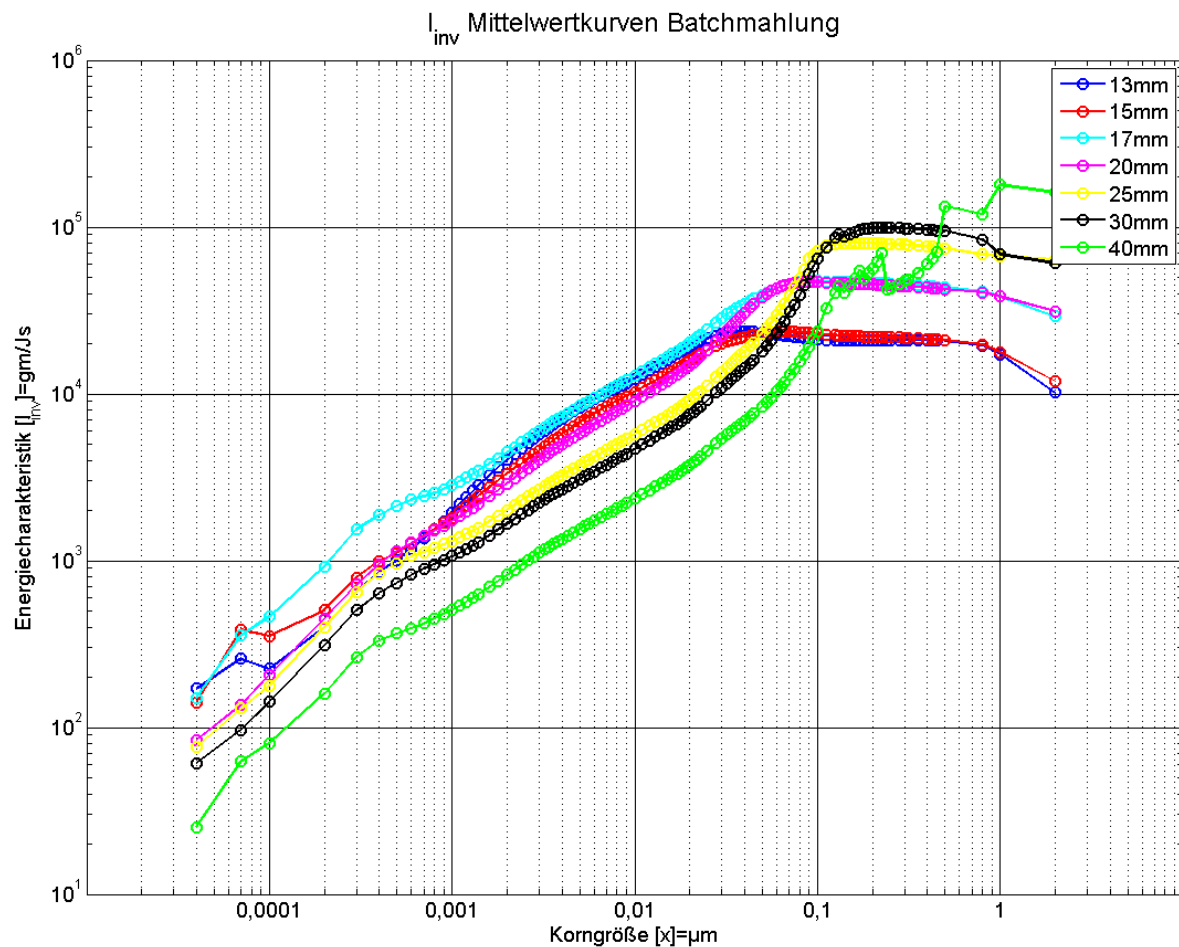


Bild 4–1 Mittelwertkurven der Intensitätscharakteristik für verschiedene Gattierungen über einen Mahlzeitraum von 0 bis 100 min

5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war die Untersuchung des Einflusses der Gattierung auf den Mahlprozess in Kugelmøhlen. Hierzu wurden neue Strukturen in Form der Intensitätscharakteristik geschaffen, die eine Betrachtung der Zerkleinerung unter Berücksichtigung der Mahlkörperbewegung erlauben. Grundlage dieses Ansatzes bildet die Annahme, dass die Zerkleinerung in der Feinmahlkammer wesentlich durch eine reibende Beanspruchung und Vollkontakt zwischen den Kugeln bestimmt ist. Darauf basieren wurde der Kontaktweg als Beschreibungsgröße vorgestellt. Die Bestimmung dieser Größe basiert auf dem ebenfalls neu eingeführten AURA-Konzept und berücksichtigt in vereinfachter Form bereits das Einzugsverhalten von Kugeln.

Die Verbindung der Größe Kontaktweg mit dem Zerkleinerungsergebnis wurde durch Versuche mittels eines modifizierten Mahlbarkeitstesters nach Zeisel realisiert. Dabei wurde die Zerkleinerung unter definiertem Druck bei bekannten Wegen analysiert. Ferner wurde grundsätzlich die verfahrenstechnische Vergleichbarkeit der Systeme Zeiseltester und Kugelmøhle aufgezeigt. Eingeschränkt ist diese nur bedingt durch die Linienkontakte in der Mahlschüssel im Vergleich zu Punktkontakten in der Kugelmøhle. Es wurden jedoch Vorschläge erarbeitet, um die Beanspruchungssituationen künftig besser angleichen zu können.

Die weitere Übertragung auf diskontinuierlich arbeitende Kugelmøhlen erfolgte durch Integration der simulierten Kontaktwege. Erkennbar ist, dass für verschiedene Kugeldurchmesser das Maximum der Intensitätscharakteristik in unterschiedlichen Korngrößenbereichen zu finden ist. Dies deutet darauf hin, dass für verschiedene Kornfraktionen jeweils eine optimale Kugelgröße existiert. Auf dieser Annahme aufbauend lassen sich nun Optimierungsstrategien ableiten, die beispielsweise anhand der vorherrschenden Korngröße und deren Abmahlverhalten die optimalen Kugelanteile auswählen. Folglich lässt sich die Auslegung auch unter Berücksichtigung von verfahrenstechnischen und produktspezifischen Randbedingungen vollständig algorithmieren. Hierzu ist jedoch eine Reihe von verbleibenden Fragestellungen zu klären. Dazu zählen unter anderem:

- Einfluss des Transportverhaltens in kontinuierlich arbeitenden Møhlen
- Agglomerationseffekte
- Verständnis des Einzugsverhaltens
- Energieaufnahme der Møhle in Abhängigkeit der Gattierung
- Skalierung der Energiedaten mittels der Simulation
- Validierung der Simulationsdaten an industriellen Anlagen
- Übertragung und Skalierung der Ergebnisse des Zeiseltests auf Kugelmøhlen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst die grundsätzliche Kopplung der DEM-Simulation mit einem einfachen Zerkleinerungsmodell in Hinblick auf die Zementmahlung in der Feinmahlkammer von Kugelmøhlen realisiert. Für die Anwendung auf Mahlanlagen wurden diverse Ansätze formuliert, die im Wesentlichen darauf abzielen, Fragestellungen durch Messungen an realen Anlagen zu beantworten. Derart kann der Grad der Komplexität weiterhin auf einem angemessenen Level gehalten werden. Verbesserungen der Vorhersagequalität können aber beispielsweise durch Erweiterung der Simulation auf eine 3D-Darstellung erzielt werden. Diese ist jedoch, wie ebenfalls im Rahmen des Projektes ermittelt wurde, mit sehr hohen Rechenzeiten verbunden.

Grundsätzlich aber stellt die DEM-Simulation ein sehr mächtiges Werkzeug dar. Um dieses jedoch in der Praxis effizient nutzen zu können, bedarf es wie hier gezeigt einer geeigneten Reduzierung der Komplexität. Entsprechend wurden zunächst einfache Konzepte geschaffen. Das volle Potential dieser Herangehensweise deutet sich in einer Reihe von Fragenstellungen jedoch bereits an. Langfristig kann angenommen werden, dass eine vollständige Berücksichtigung der Interaktionen aller Mahlrauminnenelemente möglich ist. Verbunden mit einer geeigneten Beschreibung der Zerkleinerung und der Sekundärprozesse wie der Klassierung kann damit eine vollständige Durchdringung der Mahlung in Kugelmøhlen erreicht werden. Es sind dazu neben simulationstechnischen Weiterentwicklungen aber auch intensive Messungen an realen Mahlanlagen erforderlich. Eine erfolgreiche praktische Anwendung kann nur durch eine praxisnahe Weiterentwicklung erfolgen. Dabei ist vornehmlich das Verständnis der Prozesse zu verbessern und nicht die Komplexität der Methoden zu erhöhen.

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

6 Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16890 N der Forschungsvereinigung VDZ gGmbH wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

7 Literatur

- ARM-05 ARMITSTEAD, T., (2004): *Modelling of comminution and separation in a closed circuit ball mill*, Undergraduate Thesis, University of Queensland
- ESP-84 ESPIG, D. (1984): *Berechnungsgleichungen und Gesetzmäßigkeiten für Mahlanlagen mit Trommelmühlen*, Dissertation, TH Leuna-Merseburg
- ESP-96 ESPIG, D., REINSCH, V.(1996): *Computer aided grinding circuit optimization utilising a new mill efficiency curve*, *International Journal of Mineral Processing*, 44-45, S. 249-259
- ESP-02 ESPIG, D., REINSCH, V. (2002): *Benefits from a new energy efficiency curve to the tumbling mill grinding practice*, 10th European Symposium on Comminution, Paper 89, Heidelberg
- ESP-13 ESPIG, D. (2013): *The energy efficiency curve to predict ball mill grinding behavior; part 1: methodical background*, *Cement International*, 1 (11), S. 46-53
- FLE-12 FLEIGER, P.M., REICHARDT, R., TREIBER, K. (2012): *High-precision power measurement for the grindability-test according to Zeisel*, *Chemical Engineering & Technology*, Vol. 35, No. 11, S. 1941-1948
- FLE-13 FLEIGER, P.M., (2013): *Titel noch ausstehend*, Dissertation in Vorbereitung
- HOE-13 HOENIG, V., KORING, K., FLEIGER, P., MÜLLER, C., PALM, S., (2013): *Energieeffizienz bei der Zementherstellung – Teil 1*, *Cement International*, Veröffentlichung geplant für 2013
- HOF-08 HOFER, C., (2008): *Best practice ball mill optimisation within CHR*, *Proceedings of the 6th International VDZ Congress*, S. 136-139
- MCI-80 MCIVOR, R. E., (1980): *The effect of media sizing on ball milling efficiency*, *Comminution Practices*, Society for Mining, Metallurgy & Exploration (Hrsg.), S. 279-292
- MCK-09 MCKINSEY & COMPANY, INC., (2009): *Wettbewerbsfaktor Energie – Neue Chance für die deutsche Wirtschaft*, Frankfurt
- TUZ-10 TUZCU, E.T., RAJAMANI, R.K., (2010): *Modeling Breakage rates in Mills with impact energy spectra and ultra-fast load cell data*, *Comminution '10*, Kapstadt
- UNL-10 UNLAND, G. (2001): *Beurteilung der Mahlbarkeit von Zementklinkern, Teil 1*, *ZKG International*, 2 / 54, s. 61-65
- VDZ-04 VDZ (2004): *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen; Untersuchungen zur Optimierung von Herstellung und Eigenschaften*, Schlussbericht für das AiF-Forschungsvorhaben 13198 N, Düsseldorf