

Steigerung der Wasseraufnahmefähigkeit von Weizenmehl durch Attritionsbehandlung

J. Bode, Seevetal, O. Degant, Augsburg, und D. Schwechten, Konstanz

(Increase of water absorption of wheat flour by attrition treatment)

1. Einleitung

Eine hohe Wasseraufnahme (WA) bzw. Teigausbeute eines Mehls war für bäckeryieldige Anwendungen deshalb wichtig, weil sie bezogen auf das eingesetzte Mehl hohe Gebäckausbeuten erlaubt. Da Mehl in den letzten Jahren ein eher preiswerter Rohstoff geworden ist, haben jetzt aber andere Vorteile der erhöhten Wasseraufnahme deutlich an Bedeutung gewonnen. Vorteile für den Endverbraucher sind etwa ein deutlich besserer Geschmack der Gebäcke, eine bessere Lockerung, verbunden mit einem größeren Volumen, eine verlängerte Frischhaltung und eine Verzögerung des Altbackenwerdens, damit längere Haltbarkeit bzw. Verzehrbarkeit. Auch pasteurisiertes Schnittbrot, das durch den Pasteurisationsvorgang Krumenfeuchtigkeit und damit Geschmacksqualität verliert, profitiert von einer möglichst hohen Feuchtigkeit in der Krume, mit der der Feuchtigkeitsverlust vorkompensiert wird.

Für die Verwender im Backgewerbe bringt die erhöhte Wasseraufnahmefähigkeit der Mehle, wenn die gleiche Teigausbeute wie bei einem anderen Mehl angewandt wird, trockenere, weniger klebende Teige. Bei Laugenbrezeln ist es z.B. wichtig, einen festen Teig zu verwenden, der beim Brezelschlingen und beim darauf folgenden Belaugen formstabil ist. Dies wird normalerweise durch eine geringere Wasserschüttung erreicht mit der Folge einer unbefriedigenden Frischhaltung der gebackenen Brezel. Eine erhöhte Wasseraufnahme des Mehls trägt beiden Notwendigkeiten (Teigfestigkeit und gute Frischhaltung des Gebäcks) Rechnung und macht einen Kompromiß überflüssig. Weiter können in die Teigrezeptur bestimmte Bestandteile (Schrote, Ölsamen, getrocknete Früchte u.ä.) eingebracht werden, ohne daß eine zu trockene Gebäckkrume resultiert. Diese Bestandteile müssen normalerweise erst mit Wasser vorquellen (in Form eines sog. Quell- oder Brühstücks), bevor sie dem Teig zugefügt werden können. Zahlreiche Backbetriebe, vor allem aber Fertigmehlhersteller, setzen verschiedene Quellstoffe ein, um zum o.a. Zweck eine Erhöhung der Wasseraufnahme über die durch den natürlichen Rohstoff Mehl bisher gegebenen Grenzen zu erreichen. Verwendet werden neben Quellmehlen aus unterschiedlichen Getreidearten Quellstärken und andere pflanzliche Hydrokolloide, wie etwa die Zusatzstoffe E 412 Guarkernmehl, E 411 Johannisbrotkernmehl, E 401 Natriumalginat. Mit dem Einsatz dieser Stoffe geht eine „Verdünnung“ des backwirksamen Getreideeiweißes (Kleber, Gluten) einher, die durch getrennten Zusatz von getrocknetem Vitalkleber ausgeglichen werden kann. Statt Vitalkleber können auch besonders proteinreiche Mehle in der Mischung verwendet werden. Diese Verfahrensweisen führen regelmäßig zu erhöhten Kosten, zu größerem logistischen Aufwand und zu einer verlängerten Zutatenliste, in der ggf. die verwendeten Zusatzstoffe für den Verbraucher kenntlich gemacht werden müssen.

Immer mehr neue Anwendungen erfordern eine möglichst hohe Wasseraufnahme der Teige. So gibt es inzwischen ein Verfahren zur Vakuumkühlung von vorgebackenem Brot (1), das diesem natürlich einen gewissen Wasseranteil entzieht und in der Konsequenz zu trocknerem Brot führt, wenn nicht auch hier der Wasserverlust vorkompensiert wurde. Für bestimmte Backwaren (Ciabatta u.ä.) ist eine sehr hohe Teigausbeute nötig, um sie in optimaler Qualität herzustellen. Die Aufarbeitung solcher Teige ist bisher nur von Hand möglich gewesen oder seit neuem mit gesondert zu beschaffenden Maschinen, deren teigberührende Flächen mit „Anti-Haft-Beschichtung“ versehen sind und deren Elemente zur Portionierung und Förderung des Teiges diesen mechanisch nur minimal beanspruchen (2). Bei Mehlen mit sehr hoher Wasseraufnahmefähigkeit sind auch Teige mit hoher Teigausbeute, also hohem Wassergehalt,

noch stabil und kleben nicht, so daß sie trotz des Einsatzes der üblichen Aufbereitungsanlagen zu einem optimalen Gebäck verarbeitet werden können.

2. Stand der Technik

In Anbetracht dieser Situation, die prinzipiell schon sehr lange besteht, wenn vielleicht auch nicht in der oben dargestellten Ausprägung der letzten 10 Jahre, ist oft und intensiv versucht worden, Mehle mit einer erhöhten Wasseraufnahme herzustellen. Die Wasseraufnahme eines Mehls wird wesentlich durch seine Inhaltsstoffe Protein, Pentosane und beschädigte Stärke bestimmt. Dabei soll ein Teil Protein zwei Teile Wasser, ein Teil beschädigte Stärke ebenfalls zwei Teile Wasser und ein Teil Pentosan 10 Teile Wasser binden (3). Es versteht sich, daß diese Angabe nur eine Faustregel sein kann, die je nach Weizensorte und analytischer Bestimmungsmethode ggf. einer deutlichen Korrektur zu unterwerfen ist. Gehalte an Weizenprotein und Weizenpentosan im Mehl sind wohl langfristig züchterisch zu beeinflussen, aber wenn das Getreide beim Müller zur Verarbeitung ansteht, kann nur über eine Steigerung des Anteils an beschädigter Stärke die Wasseraufnahme erhöht werden.

Sehr hohe Stärkebeschädigungen können auch zu negativen Effekten führen. Dies sind etwa nachlassende Teige, geringes Brotvolumen, grobe Porung. Derartige Effekte sind wohl aus verschiedenen Experimenten (4) bekannt; die praktische Müllerei kann Stärkebeschädigungen in der dafür notwendigen Größenordnung bisher jedoch nicht darstellen. Zu unterscheiden von der WA-Erhöhung durch Stärkebeschädigung ist die WA-Erhöhung infolge einer unerwünschten sehr feinen Vermahlung von Weizenmehlen aus weichen Weizen. Das schnell aufgenommene Wasser wird im Laufe der Teigknetung nicht gehalten, so daß sich Teige mit schlechtem Stand ergeben (5, 6).

Bei einigen wissenschaftlichen Untersuchungen zur Stärkebeschädigung mit negativen Auswirkungen auf Teig und Gebäck mag eine mit der entsprechenden Behandlung einhergehende Überoxidation oder Denaturierung des Weizenklebers eine Rolle gespielt haben. Dies ist jedoch nicht generell zu vermuten. Man kann annehmen, daß nur eine bestimmte Menge an Stärke in die Klebermatrix des Teiges eingelagert werden kann, wenn diese ihre Kontinuität behalten soll. Da die beschädigte Stärke im Teig durch Quellvorgänge ein höheres Volumen und eine höhere Oberfläche aufweist als unbeschädigte, muß der Kleberanteil ggf. höher sein. Solange der Kleberanteil ausreicht, die Gesamtstärke (unbeschädigte und beschädigte) zu bedecken bzw. zu integrieren, führt eine Erhöhung des Anteils an beschädigter Stärke zu besserer Backfähigkeit im o.a. Sinne (7, 8). Dieses Modell ist plausibel und wird durch andere Untersuchungen gestützt (9). Aus vorliegenden Untersuchungen wurde auch ein mathematisches Modell abgeleitet, das aussagt, wie hoch bei gegebenem Proteingehalt der Anteil an beschädigter Stärke für ein optimales Backergebnis sein dürfte. Da neben enzymatischen Einflüssen und der Art des Backverfahrens auch die Weizensorte (damit die Proteinqualität) und auch das Vermahlungsverfahren mit Korrekturfaktoren berücksichtigt werden müßten, ist das Modell wohl zu komplex geworden und wurde nicht mehr weiterentwickelt.

Viele ältere Angaben zur erreichten Stärkebeschädigung können wegen der etwas zweifelhaften Bestimmungsmethoden (soweit diese überhaupt angegeben oder beschrieben wurden) nicht im Vergleich zu neueren Angaben beurteilt werden. Inzwischen dienen etablierte Methoden zur Messung der Stärkebeschädigung. Diese Methoden wurden miteinander verglichen und aus Untersuchungen der letzten Jahre sind Korrelationen verfügbar, die es erlauben, die mit der einen Methode erhaltenen Werte einigermaßen verlässlich in Einheiten einer anderen Methode umzurechnen (10, 11).

Die Stärkebeschädigung korreliert mit der Wasseraufnahme. Es gibt jedoch Hinweise, daß bei der gleichen Methode je nach Mahlverfahren und Weizensorte die Korrelationen zu einer anderen Methode und damit auch zur Wasseraufnahme unterschiedlich sein können (10, 12, 13).

Die Einflüsse, die durch den Vermahlungsvorgang auf die im Farinographen gemessenen Parameter (Wasseraufnahme, Teigstabilität und Teigerweichung) eines Mehls ausgeübt werden, beschränken sich nicht auf die Stärkebeschädigung. Auch die Proteinkomponente kann verändert werden; hier ist etwa eine oxidative Kleberstärkung zu vermuten (14), aber auch eine Schädigung des Proteins durch Scher- und Temperatureffekte ist denkbar (4, 15, 16, 17). Ebenso spielt die Feinheit der erzeugten Mehlpartikel eine Rolle. Über den Aufschluß unlöslicher Pentosane durch bestimmte Mahlverfahren zu löslichen würde sich auch eine Erhöhung der Wasserbindung ergeben; dies ist, jedenfalls zur Zeit, Spekulation. Im Farinogramm lassen sich diese Einflüsse nicht getrennt erkennen. Es ist aber wahrscheinlich, daß unterschiedliche Vermahlungssysteme und/oder unterschiedliche Weizensorten die o.a. Parameter in unterschiedlicher Weise beeinflussen. In der Konsequenz kann das heißen, daß ein Vermahlungssystem „selektiv“ die Stärke beschädigt und zur gleichen oder sogar zu einer höheren Wasseraufnahme führt als ein anderes, bei dem schädigende Einflüsse auf andere Komponenten zu geringerer Teigstabilität und höherer Teigerweichung führen.

Prinzipiell eignen sich zur Beschädigung der Stärke die in einer modernen Mühle vorhandenen Walzenstühle. Bei der üblichen Herstellung von „hellem“ Mehl wird aber nicht eine Stärkebeschädigung, sondern die energetisch günstige und effektive Abtrennung der Schalenbestandteile angestrebt, mit dem Ziel, ein mineralstoffarmes Mehl mit möglichst hoher Ausbeute bei entsprechend geringem Anteil an möglichst mineralstoffreicher Kleie und Nachprodukten zu gewinnen. Zur Erhöhung der schon gegebenen Stärkebeschädigung kann der Mahlprozeß jedoch nur in gewissen Grenzen modifiziert werden. Es werden etwa die Walzengeschwindigkeit gesteigert; die Relativgeschwindigkeit der Walzen eines Walzenpaares zueinander (Voreilung) wird erhöht, der Walzenspalt wird verkleinert, der Anpreßdruck der Walzen wird erhöht. Weiter können statt Glattwalzen angeraute Walzen und Riffelwalzen verwendet werden, bei letzteren deren Riffelung und der Anstellwinkel der Riffeln modifiziert werden. Das britische Patent Nr. 1108 911 (18) beschreibt ein Verfahren als Gegenstand der Erfindung, bei dem sich Mehle mit hohem Anteil an beschädigter Stärke ergeben sollen. Es werden dabei teilweise extrem hohe Walzenrelativgeschwindigkeiten (Voreilung 1:8 bis 1:80) angegeben. Daneben soll der Riffelungskonstellation eine große Bedeutung zukommen. Die angeführten Ergebnisse lassen sich nicht beurteilen. Die Methode zur Bestimmung der Stärkebeschädigung wird nicht ausreichend beschrieben. Wasseraufnahmen der resultierenden Mehle werden nicht aufgeführt (bzw. wurden nicht bestimmt?). Die Realisierbarkeit des patentierten Verfahrens wird angezweifelt. Allenfalls Voreilungen von 1:6 werden für machbar gehalten. Außerdem ist mit erheblicher Flockenbildung und einer unakzeptablen Temperaturerhöhung zu rechnen (9, 19).

Die deutsche Auslegeschrift DE-AS 26 22 748 (20) betrifft ein Verfahren, mit dem sich durch eine Verdichtung (Kompaktierung) eines Roggenmehles mittels einer Presse um mindestens 10%, gefolgt von einer Zerkleinerung des verdichteten Gutes, eine Verbesserung der Backfähigkeit erreichen läßt. Danach wird die Wasseraufnahme eines Roggenmehls erheblich („30 % und mehr“) erhöht. Nach welcher Methode diese Erhöhung gemessen wurde, ist nicht beschrieben. Es ist anzunehmen, daß sich die Erhöhung auf die Wasseraufnahme vor der Behandlung bezieht und keine Angabe in Prozentpunkten im Sinne der Farinogramm-Wasseraufnahme darstellt. Die Anwendung des Verfahrens auf Weizenmehle wirkt sich laut Auslegeschrift in ähnlicher Weise aus. Angaben über die dabei erzielte Wirkung beschränken sich auf eine Erhöhung des Gebäckvolumens. Der Erfinder führt selbst aus, daß bei Weizenmehl eine weniger große Stärkebeschädigung als bei Roggenmehl auftritt und daß eine Veränderung des Eiweißes und die daraus resultierende Verbesserung der Klebereigenschaften Ursache für die Verbesserung ist. Angaben über die Wasseraufnahme von unbehandelten und behandelten Weizenmehlen finden sich nicht, auch Werte für die angenommene Stärkebeschädigung liegen weder für Weizen- noch für Roggenmehle vor. Als entscheidend für die Wirkung des erfundenen Verfahrens sieht der Erfinder neben der Druckerhöhung die gleichzeitige Temperaturerhöhung des Gutes im Prozeß an. Der Hinweis auf eine Keimreduzierung um mehr als zwei Zehnerpotenzen zeigt eine Temperatur an, die bereits zu Pasteurisationseffekten führt. Daraus erklärt sich eine thermische Enzymaktivierung und u.U. gleichzeitig eine beginnende Stärkeverkleisterung (bei Roggen), die

beide mindestens einen erheblichen Beitrag zu der beobachteten erhöhten Wasseraufnahme leisten.

Dagegen haben andere Autoren unter Bezug auf die o.a. Auslegungsschrift festgestellt, daß selbst durch erheblich größere Kompaktierungen keine wesentliche Veränderung der Eigenschaften der Stärkekörner erfolgt (21). Die Annahme der Stärkebeschädigung als Ursache für die beschriebenen Wirkungen ist deshalb unwahrscheinlich. Verschiedene Autoren berichten über Versuche, bei Mehl mittels Walzenverfahren eine Stärkebeschädigung zu erzielen. Die Methoden, mit denen die Stärkebeschädigung gemessen wurde, werden bei vielen Arbeiten nicht beschrieben (22). Korrelationen zu bewährten und/oder Standardmethoden sind nicht angegeben. Gelegentlich sind die Ergebnisse durch die Angaben der erzielten Wasseraufnahme, also des Primärziels, ergänzt und damit eigentlich zu Vergleichen geeignet. Leider werden auch zur Feststellung der Wasseraufnahme oft Methoden benutzt, die nicht der ICC-Standardmethode (33) entsprechen, so daß die Aussagen isoliert dastehen. Es gibt aber durchaus Ergebnisse, die bei praxisnahen Versuchsanordnungen die maximalen Möglichkeiten der Erhöhung der Wasseraufnahme von Mehlen durch die Walzenvermahlung darstellen (9). Danach liegt die erreichbare Erhöhung der Wasseraufnahme gegenüber einem Mehl vor der zusätzlichen Behandlung durchweg unter 10 Prozentpunkten.

Stiftmühlen und andere Prallmühlen sind sehr effektive Mühlen, die aber eher dazu geeignet sind, Mehlteilchen in Stärkekörnchen und Proteinkomponenten zu zerlegen als durch irreversible Verformung an Stärkekörnchen eine Beschädigung zu verursachen. Typenmehle aus der Prallvermahlung weisen eine niedrigere Stärkebeschädigung auf als die entsprechenden aus der Walzenvermahlung, obwohl sie feiner sind (23, 24). Mit entsprechendem Energieaufwand lässt sich mit diesen Mühlen eine nennenswerte Stärkebeschädigung erreichen. Allerdings wird auch hierbei die beim Walzenverfahren genannte Grenze von max. 10 Prozentpunkten Erhöhung der Wasseraufnahme nicht überschritten.

Daß Kugelmühlen bzw. Kugelschwingmühlen und Schwingmühlen geeignete Instrumente zur Erzeugung von beschädigter Stärke in Mehlen sein können, ist schon einige Zeit bekannt. Es ist gedanklich ohne weiteres nachzuvollziehen, daß das Quetschen eines Stärkekorns in einer Kugelmühle eher zu einer irreversiblen Zerstörung der Struktur eines Stärkekorns führt als ein deutlich kürzerer, meist elastischer Stoßvorgang von Partikeln in einer Prallmühle. Letzterer führt eher zu einem Bruch des Korns als zu einer mechanischen Verformung und Stärkebeschädigung im vorgenannten Sinne (4). Zwar findet auch bei einer Walzenmühle ein Quetschvorgang statt, höhere Stärkebeschädigungen erfordern jedoch neben hohen Anpreßdrücken offensichtlich auch Schereinflüsse, die durch eine Erhöhung der Relativgeschwindigkeit erreicht werden. Als Folge sind die bereits diskutierten Schädigungen nicht auszuschließen, die komplexe mechanisch/thermische Ursachen haben mögen.

Es finden sich Hinweise, z.T. explizit, z.T. aus graphischen Darstellungen ableitbar, daß eine Behandlung in einer Kugelmühle die Stärkebeschädigung zu erhöhen vermag und die daraus resultierende erhöhte Wasseraufnahme überraschenderweise nicht mit den sonst bei anderen Verfahren beobachteten Nebeneffekten (Verringerung der Teigstabilität und Erhöhung der Teigerweichung) einhergehen muß (25, 26). Entsprechende Untersuchungen sind diesbezüglich nicht vertieft worden. Möglicherweise ergeben sich mit den bisher eingesetzten Mühlen dieser Art praktische Schwierigkeiten. So wird etwa empfohlen, die Effektivität dieser Mühle zur Bearbeitung von Stärke einzusetzen, die dann zur Erhöhung der Wasseraufnahme von Mehl diesem beigemischt werden soll (21). Auch durch die Behandlung mit Kugelmühlen war bislang keine größere Erhöhung der Wasseraufnahme bei Mehlen als 10 Prozentpunkte darstellbar.

Soweit eine größere Wasseraufnahmeerhöhung als die bei den vorangegangenen Ausführungen genannten 10 Prozentpunkte in einer Veröffentlichung aufscheint, ist von Grieß, nicht von Mehl ausgegangen worden (27, 12, 28) und/oder das erzeugte Mehl war mineralstoffreicher und damit pentosanreicher (29, 16) als das Vergleichsmehl, das über eine Walzenmühle erhalten worden war, und / oder es sind Vollkornmehle unterschiedlichen Ursprungs miteinander verglichen worden

(28) und / oder es sind andere Verfahren als ICC 115/1 zur Bestimmung der Wasseraufnahme angewandt worden (12, 30).

3. Rührwerkskugelmühle als Instrument zur gezielten Stärkebeschädigung

Die Rührwerkskugelmühle vom Typ ATR der Hosokawa Alpine AG, Augsburg ist eine kontinuierliche, trocken arbeitende Rührwerksmühle. Das vertikale Mahlgefäß wird von Mahlgut und Mahlperlen gleichmäßig durchströmt, wobei eine unter dem Mahlgefäß am Auslaß angeordnete horizontale Austragsschnecke für den kontrollierten Abzug von Gut und Mahlperlen sorgt. Damit ist also die Verweilzeit des Gutes in der Mühle bestimmt. Die Mahlperlen werden im Kreislauf geführt. Die Drehzahl der Schnecke ist variabel, so daß der Durchsatz in weiten Bereichen einstellbar ist. Gleichzeitig ist die Rührerdrehzahl regelbar. Diese ist der benötigten elektrischen Leistung regelmäßig proportional. Variation von Rührerdrehzahl und Durchsatz eröffnet also die Möglichkeit, einen weit gespreizten Bereich in das Mahlgut eingetragener spezifischer Energie (kWh/t) zu untersuchen und danach die erzielte Wirkung zu erfassen. Über die Mahltechnik ist bereits ausführlich berichtet worden (34). Sie soll deshalb nur kurz dargestellt werden.

Die Beanspruchung der Mahlgutpartikel in der Rührwerkskugelmühle erfolgt durch Druck, Schlag, Schub und Scherung zwischen den Mahlperlen. Diese haben eine Größe bis 7 mm, meist 1 bis 5 mm. Obwohl kleinere Mahlperlen aus verfahrenstechnischer Sicht vorteilhaft wären (höhere Zahl von Kontaktstellen), werden sie meist nicht verwendet, weil in einer nachfolgenden Trennstufe Mahlgut und Mahlperlen - meist mittels einer Siebmaschine - separiert werden müssen. Feinere Mahlperlen erfordern aber eine größere Siebfläche; somit stellt die Mahlperlengröße einen Kompromiß dar. Als Mahlperlenmaterial können keramische Werkstoffe (z.B. Al_2O_3), Stahl oder andere geeignete Materialien verwendet werden.

Die Verwendung einer derartigen Rührwerkskugelmühle erlaubte bei der gegebenen Aufgabenstellung, nämlich einer hohen Stärkebeschädigung mit der Folge einer möglichst hohen Wasseraufnahme, trotz z.T. hoher spezifischer Energieeinträge problemlos die Bearbeitung von Weizenmehlen, ohne daß die befürchteten praktischen Schwierigkeiten (s.o.) auftraten. Dabei konnten die Temperaturen des behandelten Mehls sicher unter 40°C gehalten werden, so daß thermische Schädigungen des Weizenproteins und ggf. anderer Inhaltsstoffe ausgeschlossen sind. Bei noch höherem Energieeintrag könnte eine Kühlung der separierten Mahlkörper notwendig werden, etwa mit Luft (direkt oder indirekt), flüssigem Stickstoff oder auch flüssigem oder festem Kohlendioxid (was aus wirtschaftlichen Gründen weniger realistisch erscheint) Tatsächlich ergab sich bei den meisten Betriebsbedingungen, daß eine Luftkühlung ausreicht, wobei ggf. die im Mahlkörperreservoir vorgehaltene Menge an Mahlperlen erhöht und damit eine Verlängerung ihrer Auskühlzeit erreicht wurde.

4. Versuchsbeschreibung

Die beschriebene Rührwerkskugelmühle (Abb. 1) wurde in zwei unterschiedlichen Versuchsanordnungen eingesetzt. Bei der ersten Versuchsanordnung (Abb. 2) wurde das bearbeitete Mehl im Kreislauf geführt, und die bei der Vermahlung angefallenen Feianteile wurden mittels eines Alpine Turboplex-Windsichters ATP/GS aus dem Kreislauf herausgenommen. Eine entsprechende Menge unbearbeiteten Mehls wurde zugeführt. Hierbei lag die Überlegung zu Grunde, daß vorzugsweise die entstandenen Feianteile beschädigte Stärke enthalten könnten, die noch im Kreislauf befindlichen Mehllanteile jedoch nicht oder nur in geringerem Maße.

Bei der zweiten Versuchsanordnung wurde das Mehl bei unterschiedlichen Bedingungen in einem Durchgang durch die Anlage geführt (Abb. 3). Dieses Verfahren würde ausreichen, wenn die Stärkebeschädigung nicht auf die Feianteile des bearbeiteten Mehls beschränkt wäre, sondern im gleichen Maße auch bei den gröberen Bestandteilen gegeben wäre. Natürlich ist eine Anlage mit

diesem Prozeßprinzip von der Investition und auch von den Energiekosten her deutlich kostengünstiger als die „Kreislaufvariante“.

5. Ergebnisse und Diskussion

Die Erhöhung der Wasseraufnahme bei den eingesetzten Mehlen war selbstverständlich das Ziel der beschriebenen Arbeiten. Konsequenterweise war dann auch die Messung der Farinogramm-Wasseraufnahme nach ICC 115/1 (33) der beste Gradmesser für die Erreichung dieses Ziels. Es besteht wohl kein Zweifel daran, daß eine Erhöhung der Wasseraufnahme durch die hier beschriebene Behandlung überwiegend durch eine entsprechende Beschädigung der Stärke im Mehl zu erklären ist. Allerdings gibt es eine gewisse Unsicherheit darüber, ob die gemessenen Werte der Stärkebeschädigung nach ICC 164 (31) stets unabhängig von anderen möglichen Einflußgrößen sind (10, 12, 13). Insofern wurde die gemessene Stärkebeschädigung nur bedingt als Maßstab für die Effektivität des Verfahrens angesehen.

5.1 Auswahl des Mahlverfahrens (Kreislauf/Durchlauf)

Es ist bekannt, daß bei Weizenmehlen der Feinanteil $\leq 15\mu$ grundsätzlich einen höheren Proteingehalt aufweist als die restlichen Anteile. Beim „Kreislaufverfahren“ (Abb. 2) ist deswegen zu erwarten, daß in der Anfangsphase des Versuchs über den Windsichter eine Feinfraktion abgetrennt wird, die einen gegenüber dem Ausgangsmehl erhöhten Proteingehalt aufweist. Proteinverarmung des Kreislaufmehls, Ausgleich des Massenverlusts durch Zugabe unbearbeiteten Mehls und Austrag der Feinfraktion sind erst dann in einem Gleichgewicht, wenn der Proteingehalt des ausgetragenen Feinmehls dem des Ausgangsmehls entspricht. Nur in dieser Phase lassen sich verlässlich die Veränderungen beurteilen, die bei kontinuierlicher Produktion zu erwarten sind. Die Einstellung des Gleichgewichts muß deshalb abgewartet werden. Tabelle 1 zeigt die Gleichgewichtswerte des Ausgangsmehls („Aufgabe“), des Kreislaufmehls („grob“) und des über den Windsichter ausgetragenen Feinmehls („fein“) im Vergleich.

Tabelle 1: Mehlparameter von Ausgangsmehl, Austragsmehl und Kreislaufmehl bei Gleichgewichtszustand der Mahlanlage

	Protein i.TS %	besch. Stärke i. TS %	Farinogramm-WA %
48421-Aufgabe	12,7	7,2	59,6
48421/9 180'-grob	9,4	8,8	78,0
48421/9 180'-fein	12,5	8,8	79,8

Der Gleichgewichtszustand, erreicht nach 180 Minuten, ist belegt durch die gleichen Proteingehalte von Ausgangsmehl und ausgetragenen Mehl. In diesem Arbeitszustand hat das Kreislaufmehl einen deutlich erniedrigten Proteingehalt. Interessanterweise weisen Kreislaufmehl und Austragsmehl einen identischen Gehalt an beschädigter Stärke und, wichtiger, eine fast gleiche Wasseraufnahme auf. Der kleine Unterschied läßt sich zwanglos durch den im Vergleich zum Kreislaufmehl höheren Proteingehalt des Austragsmehls erklären.

Die Schlußfolgerung liegt auf der Hand: bei der gegebenen Anordnung erfahren das gröbere Kreislaufmehl und das feinere Austragsmehl die gleiche Stärkebeschädigung. Wenn die Bearbeitung nicht etwa auf Proteinverschiebung, sondern nur auf die höhere WA bzw. Stärkebeschädigung zielt, ist es nicht notwendig, das beschriebene Kreislaufverfahren anzuwenden. Die weiteren Versuche erfolgten deshalb im Durchlaufverfahren entsprechend Abb. 3. Das dabei verwendete Mehl ist durch die Werte in Tabelle 2 charakterisiert.

Durch unterschiedliche Einstellung der Drehzahl des Rührers und der Austragsschnecke (und damit des Materialdurchsatzes) wurde der spezifische Energieeintrag in das Mehl in weitem Rahmen variiert:

Rührerdrehzahl:	60-280 Upm
Drehzahl der Austragsschnecke:	3-7,3 Upm
Materialdurchsatz:	85,5-480 kg/h

Tabelle 2: Eigenschaften des Ausgangsmehls

Feuchte (%)	13,3
Mineralstoffe i. TS (%)	0,60
Protein i. TS (%)	12,1
Beschädigte Stärke nach ICC Nr. 164/TS(%)	6,1
Fallzahl	265
Farinogramm - Wasseraufnahme (%)	59,2
- Teigentwicklungszeit (Min.)	1,9
- Teigstabilität (Min.)	2,4
- Teigerweichung (FE)	86,0
Viskogramm (RVA-3D) Anfang Visk. (cp)	5,0
Max Visk. (cp)	549,0
Max Temp. (°C)	77,1
Max. Zeit (Min.)	31,5
Tiefster Punkt nach Verkl. (cp)	67,0
Diff. Visk.Max. zum tiefsten Punkt (cp)	482,0
Diff. End.Visk. zum tiefsten Punkt (cp)	750,0
Endvisk. (cp)	817,0

5.2 Farinogramm-Wasseraufnahme

Es ist plausibel, daß die Eigenschaftsänderungen des Mehles mit dem spezifischen Energieeintrag korrelieren. In Abbildung 4 wurde die erzielte Farinogramm-Wasseraufnahme gegen die eingetragene spezifische Energie aufgetragen. Dabei sind die Versuchswerte, die mit Al_2O_3 -Mahlperlen und die, die mit Stahlmahlperlen erhalten wurden, unterschiedlich kenntlich gemacht. Um einen Vergleich zur Wirkung einer Stiftmühle zu haben, sind weiter noch zwei solche Werte in die Darstellung aufgenommen worden, die bei der Behandlung des gleichen Mehls erhalten wurden.

Die „ Al_2O_3 “- und die „Stahl“-Werte liegen gut auf der Ausgleichsgeraden. Diese Mahlperlen haben also die gleiche Mahleffektivität. Die Werte der mit der Stiftmühle behandelten Mehle zeigen jedoch an, daß dieses Mahlsystem die eingebrachte Energie nicht annähernd in diesem Maße in eine Erhöhung der Wasseraufnahme umsetzt.

Bei der gegebenen Versuchsanlage war die Leistung des Antriebsmotors begrenzt. Dadurch konnten Versuche mit noch höheren spezifischen Energieeinträgen nicht realisiert werden. Bei den hohen spezifischen Energieeinträgen stieg die Temperatur des Mahlguts bis auf 40°C an. Bei noch höheren Temperaturen könnte u. U. eine unerwünschte Kleberschädigung eintreten. Die Installation eines stärkeren Motors und die Integration einer effektiveren Mahlperlenkühlung würde diese Einschränkungen aufheben, so daß vermutlich noch deutlich höhere Farinogramm-Wasseraufnahmen realisiert werden können. Dies deutet die Lage der Meßpunkte an; in ihrem oberen Bereich läßt die Ausgleichsgerade noch keinerlei Abflachungstendenz erkennen.

Die beiden mit dem Rasterelektronenmikroskop erhaltenen Aufnahmen erklären die Wirkung des Attritionsverfahrens. Bei der geringeren Vergrößerung fallen zunächst keine spektakulären Veränderungen der Stärkekörnchen im Weizenmehl auf. Allenfalls lassen sich Abflachungen erkennen, die mit einiger Phantasie als Veränderung hin zu einer polyedrischen Gestalt gedeutet werden können (Abb. 5).

Bei einer deutlich stärkeren Vergrößerung zeigen sich jedoch ganz deutlich durch den Mahldruck erzeugte Fissuren. In diese Risse kann ohne weiteres Teigwasser eindringen, sich an Stärke anlagern und zu einer Quellung und damit deutlichen Volumenvergrößerung des Stärkekorns führen. Mit dem Wasser können natürlich auch neben anderen darin gelösten Inhaltsstoffen amylytische Enzyme in das Stärkekorn eindringen und zu einem erheblich beschleunigten Stärkeabbau führen. Ohne daß der Enzymgehalt des Mehles erhöht wird, kommt es so im Teig und in der ersten Phase des Backvorganges zu einer verstärkten Dextrinierung mit deren Vorteilen (Geschmack, Frischhaltung, Bräunung) und ggf. auch deren Nachteilen (Abb. 6).

Mischt man das Ausgangsmehl mit einem behandelten Mehl ab, so weist das Mischmehl auch in der Praxis genau die Farinogramm-WA auf, die nach der proportional zur Zugabemenge sich ergebenden eingetragenen spezifischen Energie zu erwarten war. Dies ist insofern wichtig, als in der bäckerischen Anwendung nicht die hoch behandelten Mehle, sondern regelmäßig Abmischungen mit „normalen“ Mehlen eingesetzt werden dürften. Bei der weiteren Auswertung der Farinogramme zeigten die Teige der in der Rührwerkskugelmühle modifizierten Mehle mit dem deutlich veränderten Mehl/Wasser-Verhältnis (max. Differenz: 100:59 zu etwa 100:88) keine erheblichen Änderungen bei Teigstabilität und Teigerweichung gegenüber dem Teig aus dem Ausgangsmehl.

5.3 Stärkebeschädigung

Mit hoher Wahrscheinlichkeit ist die gefundene deutliche Erhöhung der Wasseraufnahme eines Mehls auf die mechanische Beschädigung der enthaltenen Stärke zurückzuführen. Die Meßwerte für deren Anteil sollten deshalb ähnlich wie die Farinogramm-WA mit der eingetragenen spezifischen Energie korrelieren. Abbildung 7 stellt den gefundenen Zusammenhang dar.

Gegenüber dem Ausgangswert zeigt sich bei allen Versuchsbedingungen eine Erhöhung des Gehalts an beschädigter Stärke. Betrachtet man die „Stiftmühlen“-Werte und die „Stahlmahlperlen“-Werte separat, so ergibt sich jeweils eine recht gute, aber deutlich voneinander abweichende Korrelation. Die „Al₂O₃-Mahlperlen“-Werte streuen jedoch stark, ohne daß aus der Überprüfung der Versuchsbedingungen irgendeine Ursache oder gar Gesetzmäßigkeit erkennbar wäre. Auch Unsicherheiten bei der Messung sind auszuschließen; alle Werte resultieren aus höchstens geringfügig voneinander abweichenden Mehrfachbestimmungen. Möglicherweise haben sich bei der Behandlung des Mehls Struktureffekte ergeben, die die Angreifbarkeit der beschädigten Stärke durch die bei der Methode ICC 164 (31) verwendeten Enzyme beeinflussen. Diese Interpretation ist natürlich unter großem Vorbehalt zu sehen.

5.4. RVA-Viskogramm

Die Messungen im RVA-3D wurden mit folgendem Temperatur/Zeit-Profil durchgeführt:

00:00:00 Temp. (°C) 30
 00:00:00 U/Min 960
 00:00:17 U/Min 160
 00:01:00 Temp. (°C) 30
 00:43:00 Temp. (°C) 95
 01:01:00 Temp. (°C) 95
 01:44:00 Temp. (°C) 30

Folgende Viskogramm-Parameter wurden festgehalten:

- Anfangsviskosität (cp)
- Maximale Viskosität (cp)
- Temperatur im Viskositätsmaximum (°C)
- Zeitablauf bis zum Viskositätsmaximum (Min.)
- Tiefster Punkt nach Verkleisterung (cp)

- Diff. Viskositätsmaximum zum tiefsten Punkt (cp)
- Diff. Endviskosität zum tiefsten Punkt (cp)
- Endviskosität (cp)

Damit sind ähnliche Aussagen möglich wie auf Grund eines Brabender-Amylogramms. Die erhaltenen Werte sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: RVA-3D-Werte von Mehlen aus „ATR“- und „Stift“-Vermahlung

Versuchsnr.	48572/B	48572/B4	48572/B6	48572/C2	48572/B2	48572/B5	48572/D2	48572/D1
Mahlsystem	- (Aufgabe)	ATR/ Al ₂ O ₃	ATR/ Al ₂ O ₃	ATR/ Stahl	ATR/ Al ₂ O ₃	ATR/ Al ₂ O ₃	Stiftmühle CW	Stiftmühle CW
Spez. Energie kWh/t		31,2	66,3	67,9	86,3	132,2	82,3	183,5
Anfangsviskosität (cp)	5,0	13,0	14,0	15,0	28,0	20,0	-9,0	-16,0
maximale Viskosität (cp)	549,0	505,0	497,0	499,0	435,0	358,0	575,0	566,0
Temp. i. Visk. Max. (°C)	77,1	77,9	76,8	77,5	76,1	75,4	78,8	78,5
Zeit bis Visk. Max. (Min.)	31,5	32,0	31,3	31,7	30,7	30,3	32,5	32,4
Tiefster Punkt nach Verkl. (cp)	67,0	42,0	45,0	51,0	62,0	29,0	42,0	33,0
Diff. Visk.Max. zum tiefsten Punkt (cp)	482,0	463,0	452,0	448,0	373,0	329,0	533,0	533,0
Diff. End.Visk. zum tiefsten Punkt (cp)	750,0	601,0	559,0	527,0	363,0	296,0	762,0	833,0
Endviskosität (cp)	817,0	643,0	604,0	578,0	425,0	325,0	804,0	866,0

Die mit der Stiftmühle vermahlene Mehle zeigen bei den meisten Parametern eine leichte Erhöhung der Werte. Dies ist vermutlich auf den verbesserten Wasserzugang zu allen Inhaltsstoffen des Mehles und deren dadurch erreichte vollständige Hydratisierung zurückzuführen. Dieser Effekt könnte die erwartete Viskositätserniedrigung auf Grund des enzymatischen Abbaus der beschädigten Stärke überkompensieren. Eine Enzymaktivierung bei den im Prozeß allenfalls geringfügig erhöhten Temperaturen ist jedenfalls nicht anzunehmen. Bei den in der Rührwerkskugelmühle gemahlene Mehlen zeigt sich bei den meisten Parametern (Ausnahme: Temperatur im Viskositätsmaximum und, logischerweise, Zeitablauf bis zum Viskositätsmaximum) eine klare, mehr oder weniger starke negative Korrelation zur eingetragenen spezifischen Energie.

Abbildung 8 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der maximalen Viskosität von der eingetragenen spezifischen Energie. Alle weiteren Diagramme (Ausnahme: s.o.), würden die Abhängigkeit der aufgenommenen Werte von der eingetragenen spezifischen Energie mit einem sehr ähnlichen Verlauf darstellen.

5.5 Fallzahl

Die Fallzahl (32) ist ein Maß für die Enzymaktivität eines Mehls. Diese äußert sich indirekt in der Viskosität einer durch sehr schnellen Temperaturanstieg verkleisterten Stärkesuspension. Eine hohe Viskosität und damit hohe Fallzahlen zeigen niedrige Enzymaktivität an, niedrige Viskosität und niedrige Fallzahlen eine hohe Enzymaktivität. Da sich durch die Beschädigung der Stärke auch deren Angreifbarkeit durch Enzyme erhöht, könnten die behandelten Mehle u. U. eine niedrigere Fallzahl als das Ausgangsmehl aufweisen.

Abbildung 9 zeigt ganz klar, daß die Fallzahl nicht durch die Behandlung mit der Mahlperlenmühle oder der Stiftmühle beeinträchtigt wurde. Anders als beim Viskographen ist der kritische Temperaturbereich, in dem die beschädigte Stärke offen für den Enzymangriff war, so schnell durchschritten worden, daß kein nennenswerter Stärkeabbau stattfinden konnte.

6. Zusammenfassung

Durch Behandlung von Weizenmehl mit einer Rührwerkskugelmühle ATR wurde bei Weizenmehlen eine Erhöhung der Farinogramm-Wasseraufnahme um bis zu 29 Prozentpunkte erreicht. Diese korreliert sehr gut positiv mit der über Mahlperlen eingetragenen spezifischen Energie (kWh/t). Eine deutliche negative Korrelation besteht zwischen der Höhe des Viskositätsmaximums aus einem RVA-3D-Viskogramm und der spezifischen Energie. Auch die Stärkebeschädigung stieg grundsätzlich mit der eingetragenen spezifischen Energie an, wenngleich die erwartete klare Korrelation nicht gefunden wurde. Eine schlüssige Interpretation dafür konnte nicht gegeben werden.

Mehle aus Vergleichsmahlungen mit einer Stiftmühle zeigten erwartungsgemäß bei gleicher oder sogar deutlich höherer eingetragener spezifischer Energie nicht annähernd die Erhöhungen der Farinogramm-Wasseraufnahme, die mit der Rührwerkskugelmühle zu erreichen waren. Durch Verstärkung des Rührwerksantriebs werden in der Praxis noch deutlich höhere Wasseraufnahmen realisiert werden können. Entsprechende Anlagen, ausgelegt auf unterschiedliche Durchsätze, werden zur Zeit bei der Hosokawa Alpine AG & Co. OHG konzipiert.

Literatur

1. Wagner, R.: Vakuum-Unterbruchbackmethode. - Bericht über die Tagung für Bäckerei-Technologie 51. und Tagung für Konditorei-Technologie 6. 2000 (2001)
2. Spamer, H.: Herstellung von rustikalen Brötchen aus sehr wasserhaltigen Teigen Bericht über die Tagung für Bäckerei-Technologie 51. und Tagung für Konditorei-Technologie 6. 2000 (2001)
3. Kosmina, Natalie P.: Die Stärke bei der Teig- und Brotherstellung. In: Ulmann, M. (Hrsg.): Handbuch der Stärke in Einzeldarstellungen.- Berlin und Hamburg: Paul Parey (1974) 93 S.
4. Meuser, F., R.W. Klingler und J.A. Niediek: Veränderung der Mehlpartikelstruktur durch Schwingmahlung zur Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen.-, Deutsche Müller-Zeitung 77 (1979) 23, S. 399-402
5. Meuser, F. und R.W. Klingler: Einfluß physikalischer Struktureigenschaften auf die Teigbildung.- Getreide Mehl und Brot 33 (1979) 3, S. 57-62
6. Meuser, F., H. Reimer und G. Fischer: Physikalische und chemische Untersuchungen an Mehlen aus unterschiedlich vermahlenden Weizen im Hinblick auf deren Backqualität.- Deutsche Müller-Zeitung 75 (1977) 8, S. 145-154
7. Farrand, E.A.: Starch damage and α -amylase as basis for mathematical models relating to flour water-absorption.- Cereal Chemistry 46 (1969) S. 103-116
8. Farrand, E.A.: The influence of particle size and starch damage on the characteristics of bread flours.- Bakers Digest 46 (1972) 1, S. 22-26
9. Vorwerck, K.: Mechanisch beschädigte Stärke in Weizenmehlen – Beziehungen zu Analytik und Verarbeitungseigenschaften.- Getreide Mehl und Brot 31 (1977) 9, S. 234-239
10. Morgan, J.E., und P.C. Williams: Starch damage in wheat flours: A comparison of enzymatic, iodometric and near infrared techniques.- Cereal Chemistry 72 (1995) 2, S. 209-212
11. Rabe, E., und D. Meyer: Methoden zur Bestimmung der mechanischen Stärkebeschädigung in Weizenmehlen.- Getreide Mehl und Brot 51(1997) 4, S. 195-200
12. Stevens, J., und A.D. Evers: Der Mechanismus der Stärkebeschädigung.- Getreide Mehl und Brot, 37 (1983). 4, S. 101- 106
13. Rogers, D.E., J.A. Gelroth, J.M. Langemeier und G.S. Ranhotra: Evaluation of starch damage values determined enzymatically or amperometrically.- Cereal Chemistry 71 (1994) 6, S. 578-581

14. Okada, K., Y. Negishi und S. Nagao: Studies on heavily ground flour using roller mills. I alteration of flour characteristics through overgrinding.- *Cereal Chemistry* 63 (1986) 3, S. 187-193
15. Handreck, B., und L. Pötschke: Mahlergebnisse und Mehlqualität prallzerkleinerter Dunste aus unterschiedlichen Weizensorten.- *Mühle + Mischfuttertechnik* 133 (1996) 23, S. 365-370
16. Handreck, B., und L. Pötschke: Vermahlung von Weizengrieß der 1. Qualitätsstufe in Prallmühlen unterschiedlicher Wirkprinzipie.- *Mühle + Mischfuttertechnik* 132 (1995) 29, S. 479-483
17. Alsberg, C.L., und E. P. Griffing: Effect of fine grinding upon flour.- *Cereal Chemistry* 6 (1925) S. 325-344
18. Erfinder: G. J. Baker, E. N. Greer und die Müllerei- und Bäckereiforschungsvereinigung St. Albans, Brit. Pat. Nr. 1108 911
19. Belderok, B.: Wirkung der Stärkeschädigung im Weizenmehl auf die Teig- und Broteigenschaften.- *Getreide Mehl und Brot* 36 (1982) 7, S. 179-183
20. DE-AS 26 22 748.5-415, Anmelder: Mühle Rünigen AG, Braunschweig, Erfinder: P.-J. Weiland, Braunschweig
21. Meuser, F., R.W. Klingler und J.A. Niediek: Veränderung der Mehlpartikelstruktur durch Schwingmahlung zur Beeinflussung der Verarbeitungseigenschaften von Weizenmehlen.-, *Deutsche Müller-Zeitung* 77 (1979) 23, S. 388-392
22. Willm, C.: Stärkebeschädigung und Backfähigkeit.- *Getreide Mehl und Brot* 31 (1977) 2, S. 38-42
23. Zwingelberg, H.: Mahlverfahren für Mehle mit niedriger Stärkebeschädigung.- *Mühle + Mischfuttertechnik* 133 (1996) 5, S. 65-69
24. Zwingelberg, H.: Die Stiftmühle in der Weizenvermahlung.- *Mühle + Mischfuttertechnik* 131 (1994) 34, S. 443-445
25. Endo, S., S. Nagao und K. Tanaka: Interpretation of Do-Corder curves. Identification of flour components influencing curve characteristics.- *Cereal Chemistry* 58 (1981) 6, S. 358-542
26. Schlesinger, J.: Results of ball-milling Buhler experimentally hard winter wheat flour.- *Cereal Chemistry* 41 (1964) S. 465-474
27. Dexter, J.E., K.R. Preston, D.G. Martin und E.J. Gander: The effects of protein content and starch damage on the physical dough properties and bread-making quality of Canadian durum wheat.- *Journal of Cereal Science* 20 (1994) 2, S. 139-151
28. Sharma, H., und G. Bains: Effect of grinding on the quality of whole wheat meal.- *Journal of Food Science and Technology* 13 (1976) S. 92-93
29. Haridas Rao, P., K. Leelavati und S.R. Shurpalekar: Effect of damaged starch on the chapati making quality of whole wheat flour.- *Cereal Chemistry* 66 (1989) 4, S. 329-333
30. Evers, A.D., G.J. Baker und D.J. Stevens: Production and measurement of starch damage in flour. Part 2.: Damage produced by unconventional methods.- *Starch/Stärke* 36 (1984) 10, S. 350-355
31. Internationale Gesellschaft für Getreidewissenschaft und –Technologie/ICC (Hrsg.): ICC-Standard 164: Bestimmung des Gehalts an beschädigter Stärke mit Hilfe des Enzym-Kits der Firma Megazyme.- Detmold: Moritz Schäfer
32. Internationale Gesellschaft für Getreidewissenschaft und –Technologie/ICC (Hrsg.): ICC-Standard Nr.107/1: Untersuchungsmethode: Fallzahl.- Detmold: Moritz Schäfer
33. Internationale Gesellschaft für Getreidewissenschaft und –Technologie/ICC (Hrsg.): ICC-Standard Nr.115/1: Untersuchungsmethode: Brabender Farinograph.- Detmold: Moritz Schäfer
34. Schwechten, D., und O. Degant: Entwicklungsansätze zur Attritionsmahlung von Mehlen.- Bericht über die Tagung für Müllerei-Technologie 51. 2000 (2001)

Anschrift der Verfasser:

Dr. Jochen Bode
Ansgarstr. 2
D-21220 Sevetal und
Oskar Degant und Dr. Dieter Schwechten
Hosokawa Alpine AG
Postfach 101 109
D-86001 Augsburg

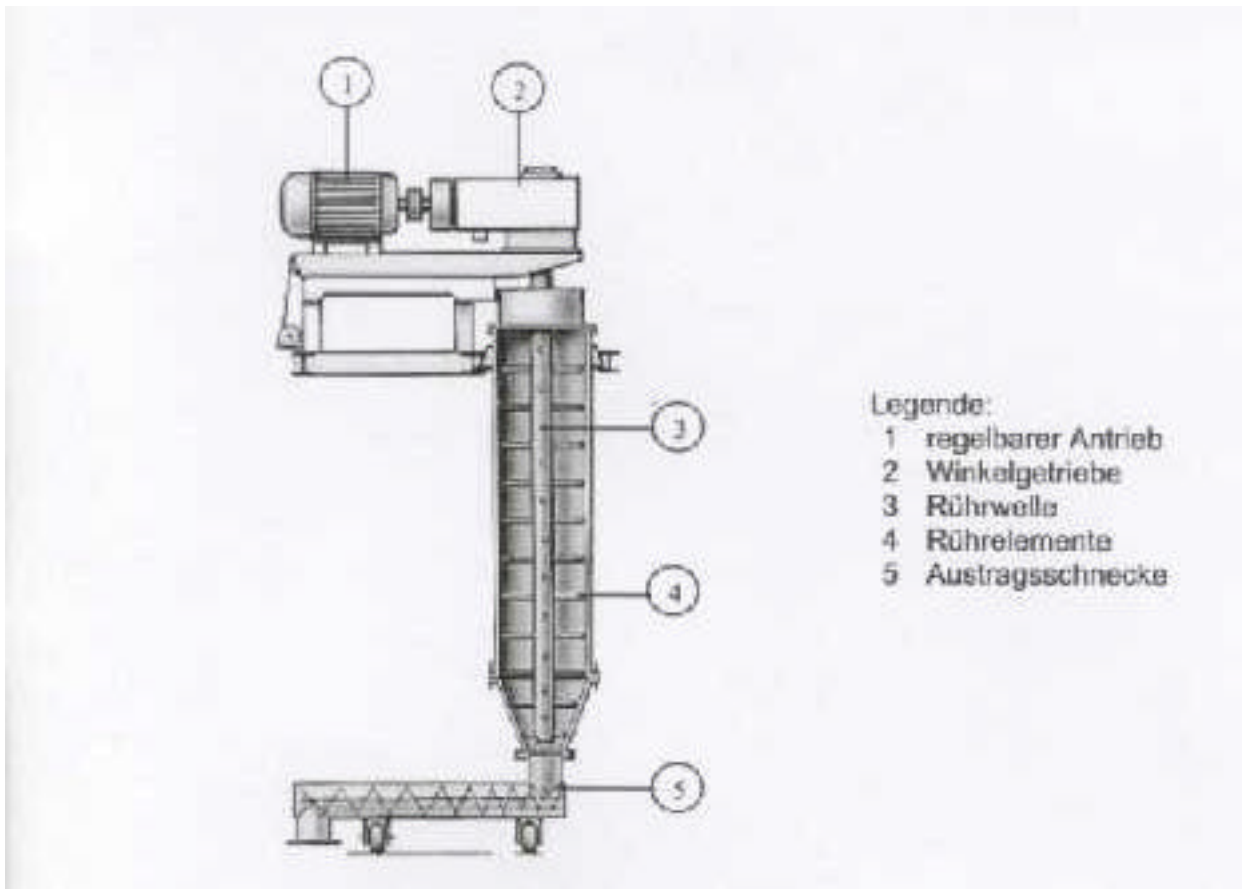


Abbildung 1: Rührwerkskugelmühle ATR

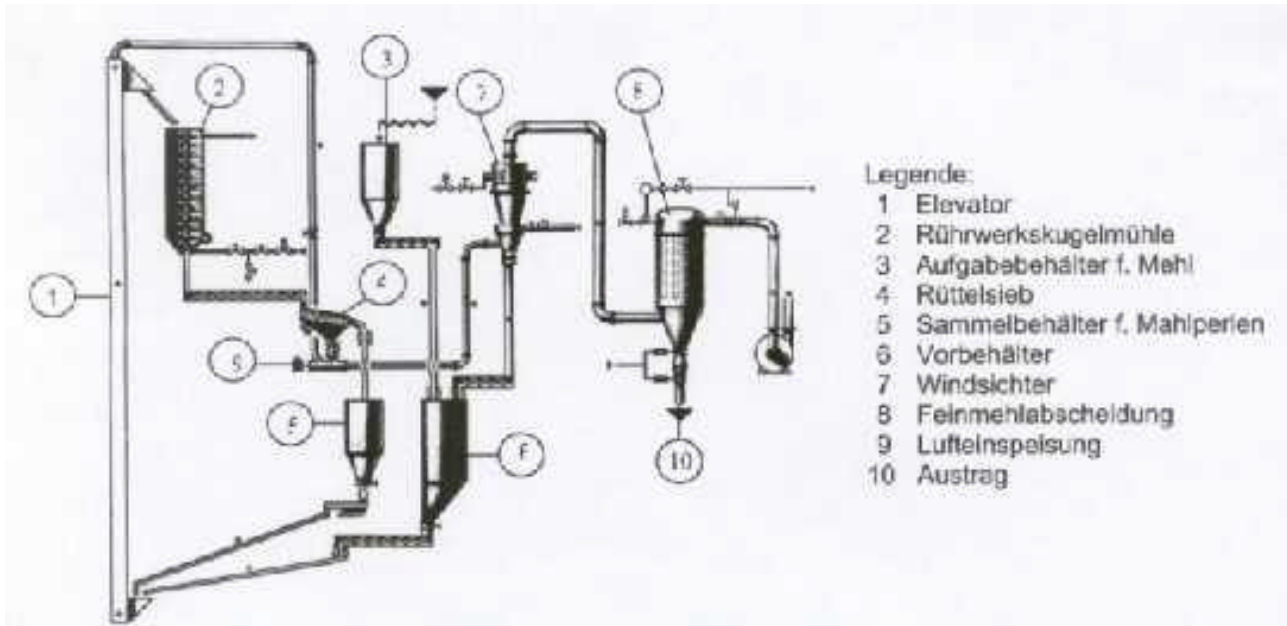


Abbildung 2: Mehlbehandlung in kontinuierlicher Kreislaufschtung

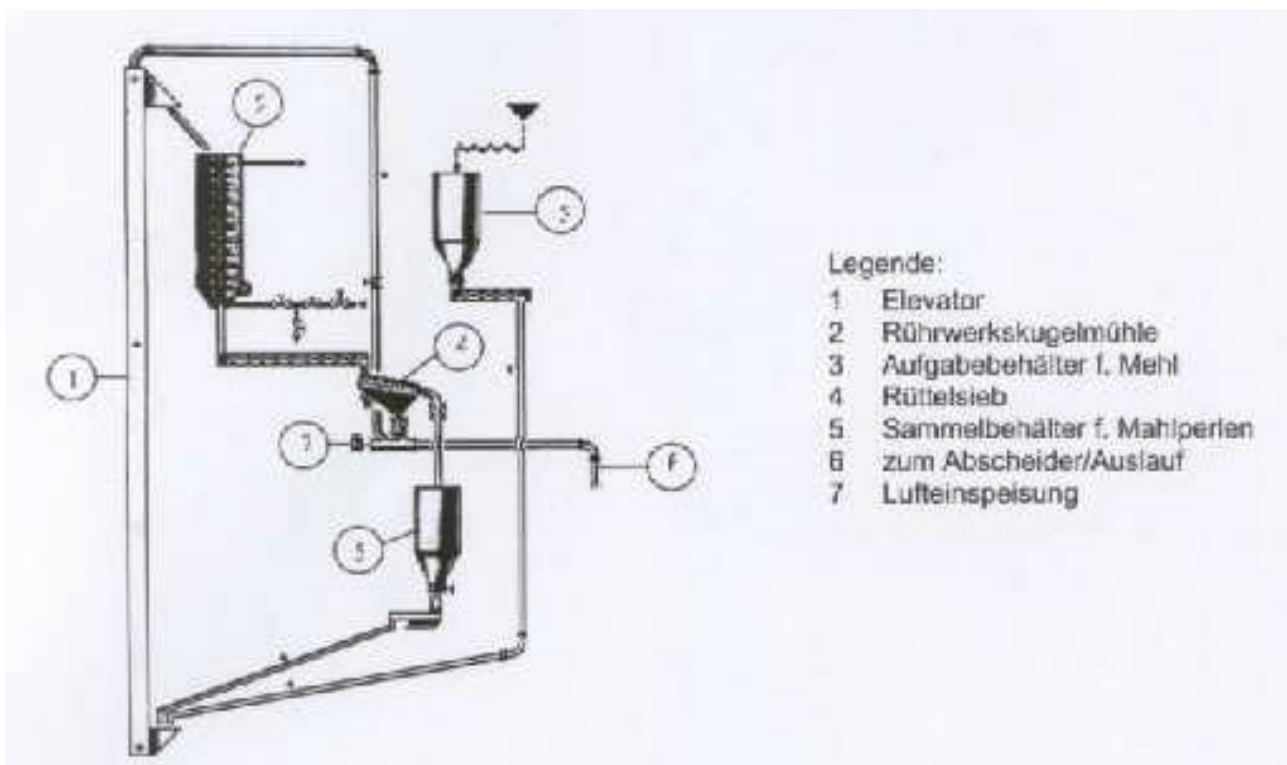


Abbildung 3: Mehlbehandlung in kontinuierlicher Durchlaufschtung

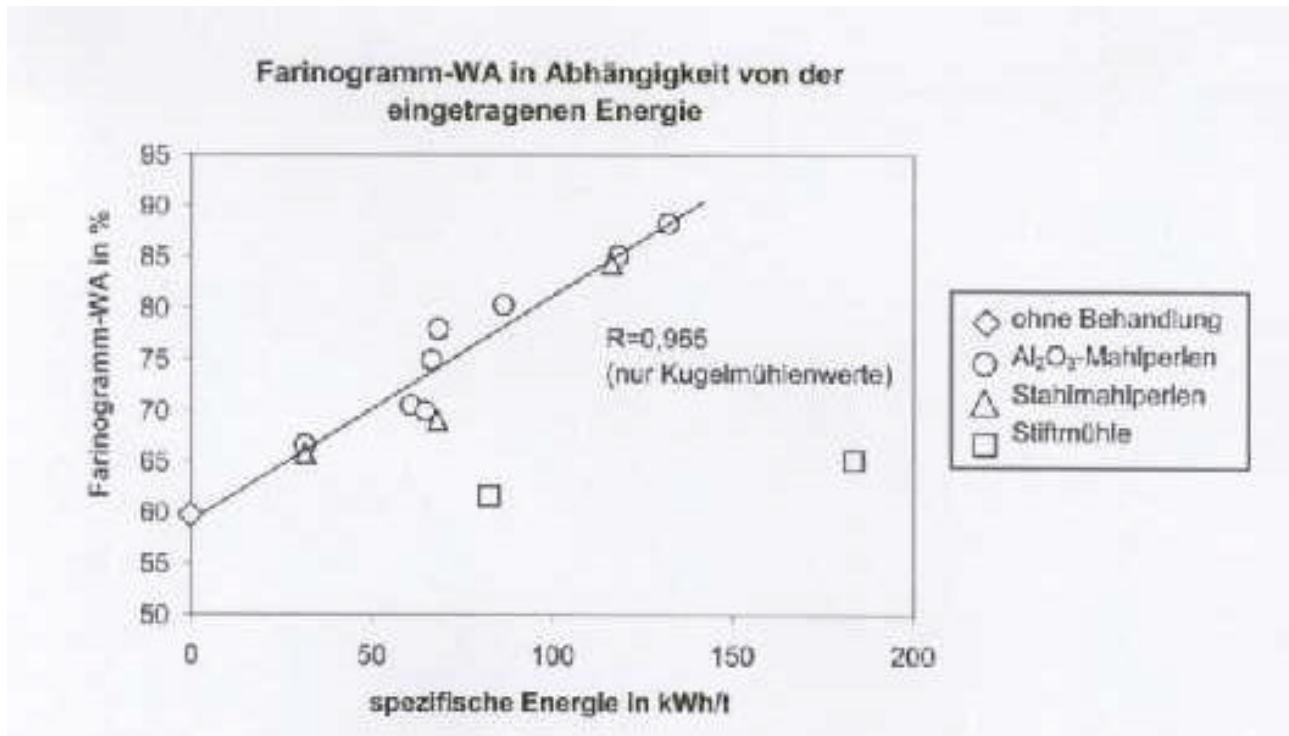


Abbildung 4: Farinogramm-WA in Abhängigkeit von der eingetragenen Energie

REM-Aufnahme von Weizenmehl nach der Attritionsbehandlung I

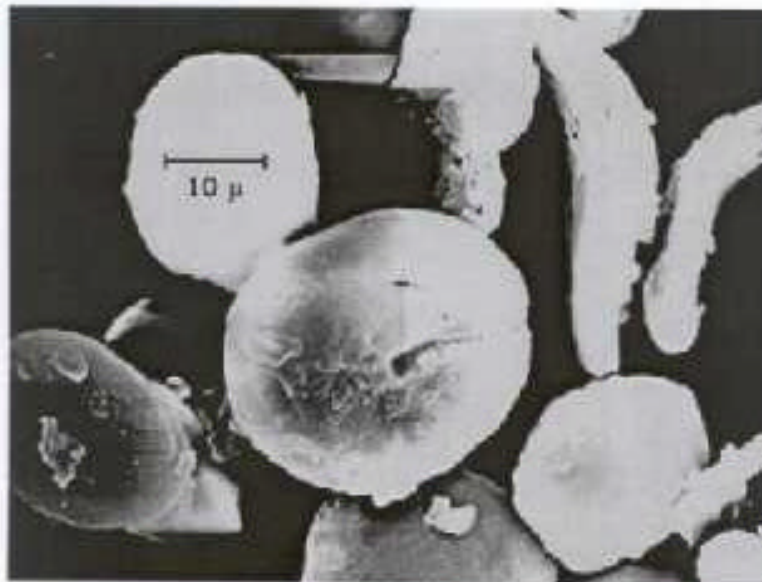


Abbildung 5: REM-Aufnahme von Weizenmehl nach der Attritionsbehandlung I

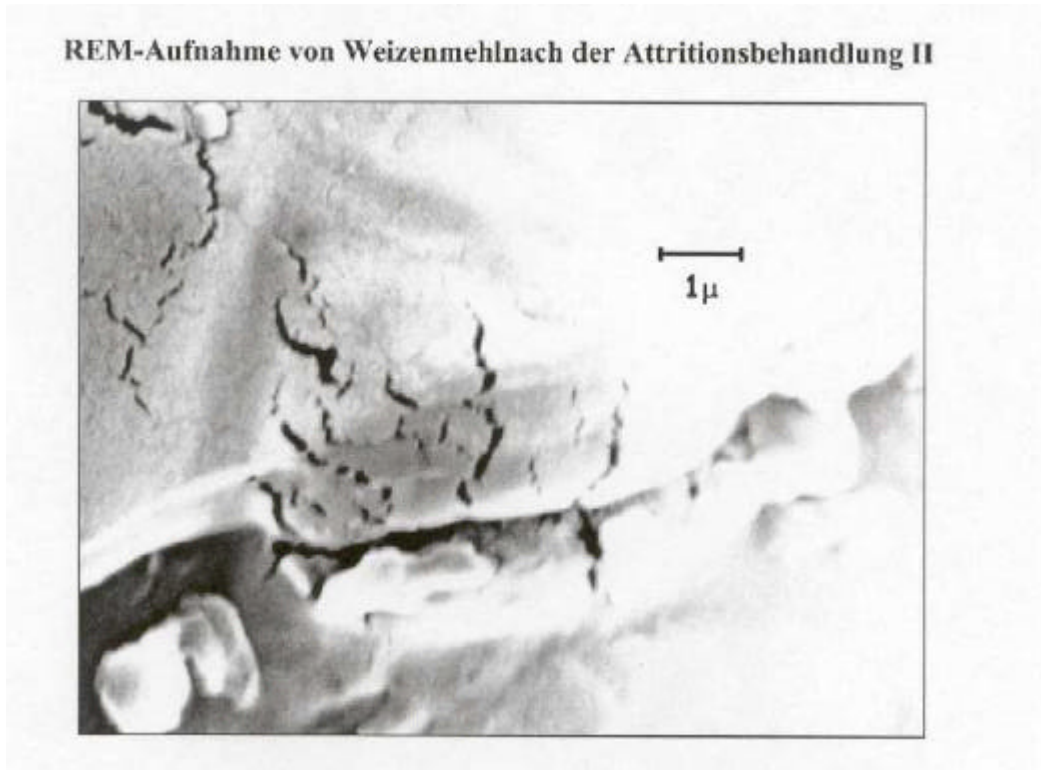


Abbildung 6: REM-Aufnahme von Weizenmehl nach der Attritionsbehandlung II

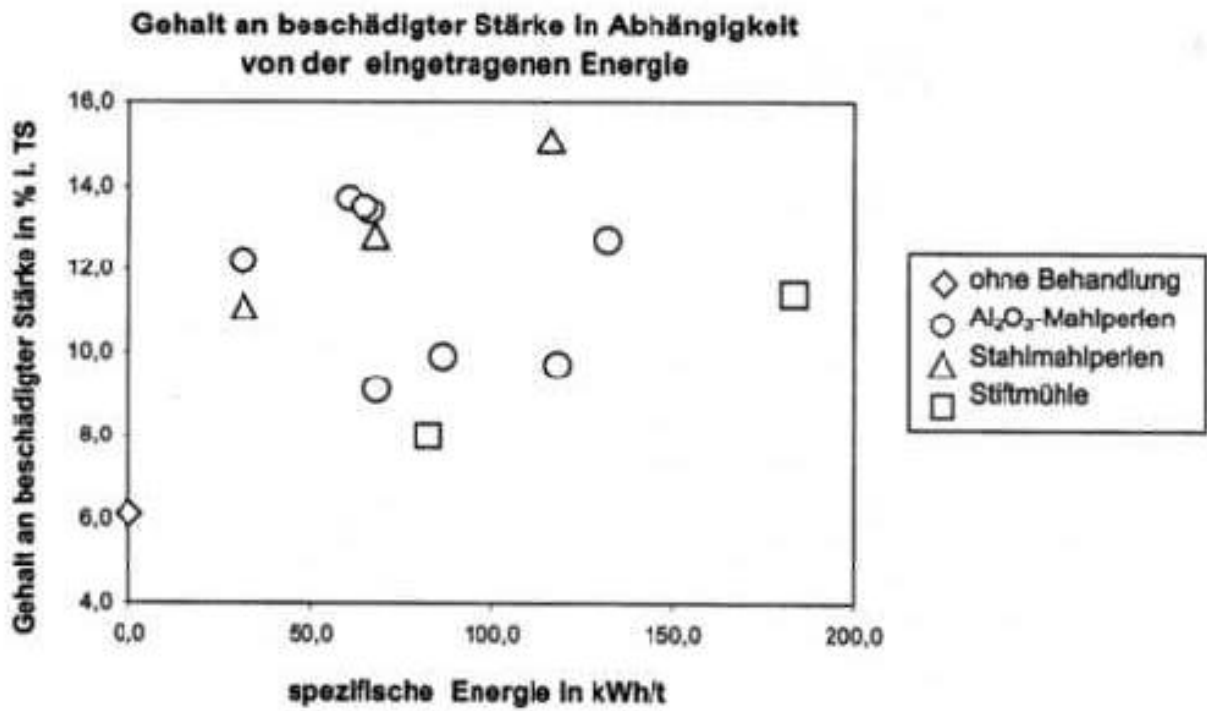


Abbildung 7: Gehalt an beschädigter Stärke in Abhängigkeit von der eingetragenen Energie

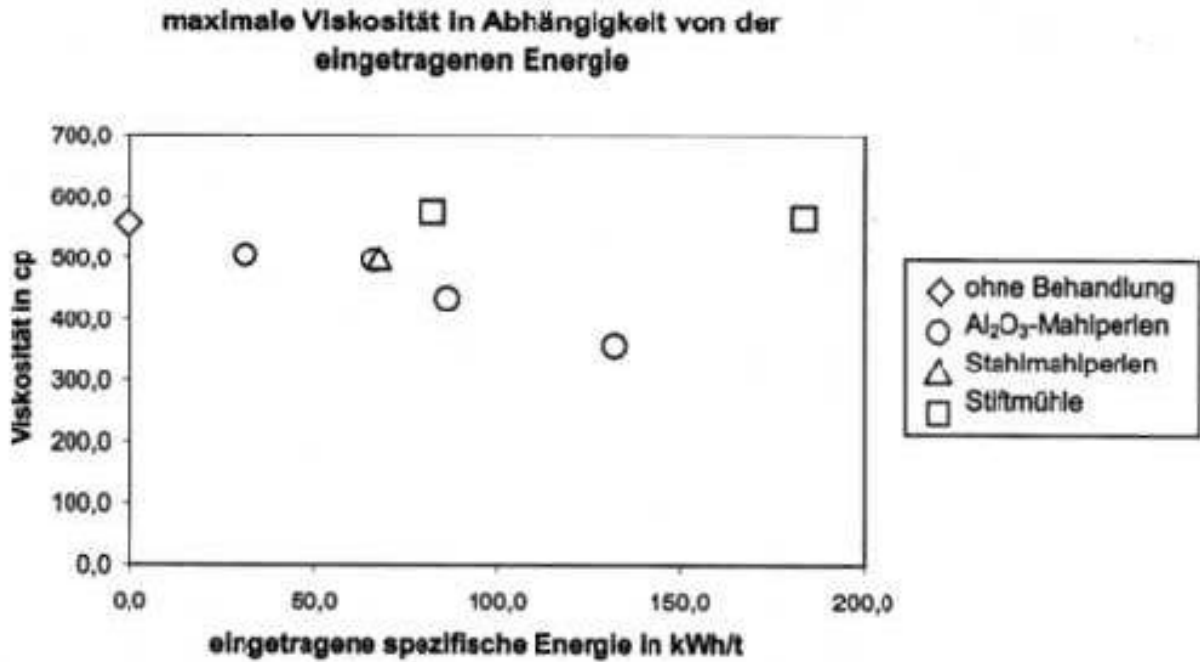


Abbildung 8: Maximale Viskosität in Abhängigkeit von der eingetragenen Energie

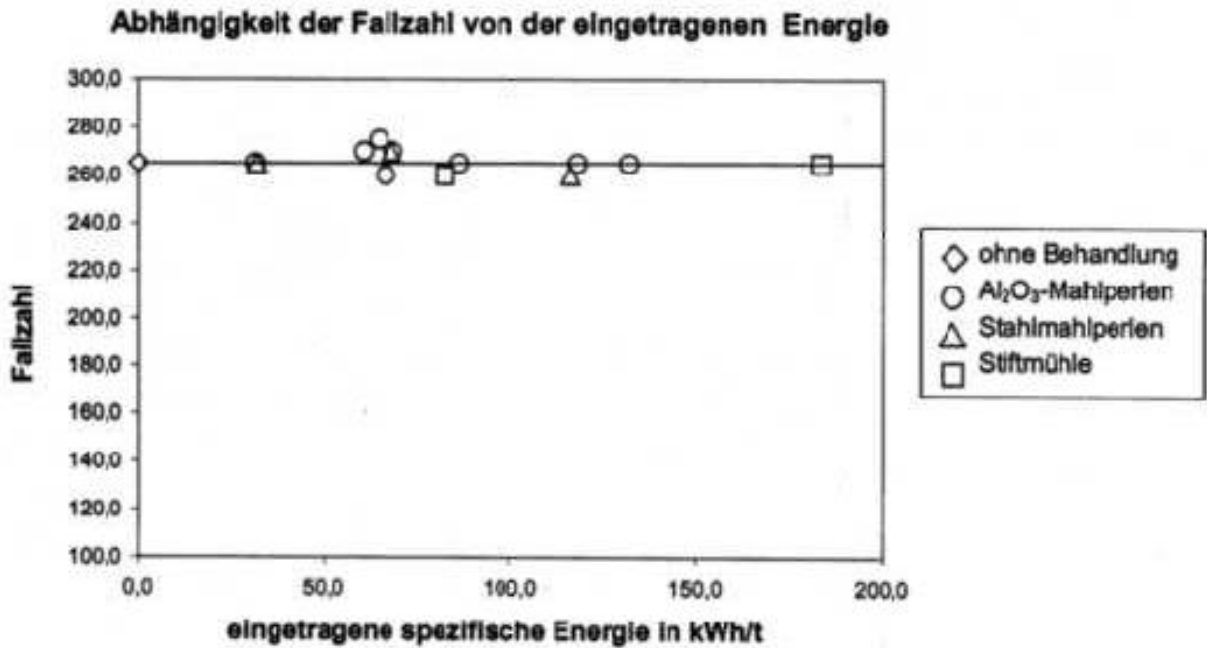


Abbildung 9: Abhängigkeit der Fallzahl von der eingetragenen Energie