

brennende Halden und Reduktionsschächte der Metallurgie sind nur einige Beispiele. Durch ungünstige Reaktionsführung kommt es häufig zur Emission von Schadstoffen, zu Wirkungsgradverlusten oder auch zu Betriebsstörungen.

Schon seit geraumer Zeit ist man bestrebt, die Vorgänge in einer von einem Gas durchströmten, reagierenden Feststoffschüttung zu modellieren. Bei den dabei entstandenen Berechnungsmodellen mußte jedoch aufgrund des damaligen Standes der Computertechnik eine Reihe von Vereinfachungen getroffen werden. Mit dem am Institut für Verfahrenstechnik der Technischen Universität Graz entwickelten Computerprogramm REBOS (Reacting bed of solid particles) wurde nun die Möglichkeit geschaffen, die zweidimensionalen Felder der Temperaturen beider Phasen, der Geschwindigkeit der Gasphase sowie der Konzentrationen der beteiligten Species für den instationären Anwendungsfall zu berechnen.

Die Basis des Modells ist die Lösung des Differentialgleichungssystems der Erhaltungssätze für Masse, Energie und Impuls. Wesentliche Bestandteile der Erhaltungssätze sind dabei jeweils die Quellterme, welche sich aufgrund der chemischen Reaktionen, aufgrund des Wärmeaustausches durch die Reaktorwand und aufgrund des Strömungswiderstandes durch die Schüttung ergeben. Die Berechnung dieser Quellterme ist einer der Schwerpunkte des Computerprogrammes REBOS.

Das Programm berücksichtigt neben der Trocknung vier heterogene und vier homogene Reaktionen und die für den Verlauf der Reaktionen wesentlichen Prozesse: 1) chemische Kinetik, 2) Kinetik der Porendiffusion und 3) Kinetik der Grenzfilmdiffusion. Außerdem werden die für die Berechnung erforderlichen Stoffgrößen temperatur- und konzentrationsabhängig berechnet.

Parameterstudien für den Fall der heterogenen Verbrennung von Kohlenstoff zeigten qualitativ eine gute Übereinstimmung mit Werten aus der Literatur. Die Berechnung der Selbstentzündung eines rauchgasdurchströmten Aktivkohlefilters und die Berechnung der Trocknung einer Brennstoffschüttung stimmten auch quantitativ sehr gut mit Meßwerten aus der Literatur überein. Für Aktivkohlefilter können die kritischen Betriebszustände berechnet werden. Weiterhin können mit Hilfe von REBOS auch Aussagen über erforderliche Kühlflächen zur Verhinderung der Selbstentzündung von Aktivkohlefiltern gemacht werden. Darüber hinaus kann auch das „Löschen“ des Brandes mit kalter Luft aufgezeigt werden.

Im Rahmen eines derzeit laufenden EG-Projektes werden parallel zur Weiterentwicklung des Computerprogrammes REBOS auch Messungen an großtechnischen Anlagen (Biomasse-Feuerungsanlagen, Reisschalenvergaser und einem Eisenerzreduktionsschacht) durchgeführt. Sinn dieser Messungen ist einerseits die Ermittlung der für die Berechnung benötigten Parameter bzw. auch deren Verifizierung, andererseits kann der Optimierungserfolg (z.B. Emissionsminderung) von Verfahrensführungs- oder Konstruktionsänderungen aufgrund der Computersimulation nachgeprüft werden.

Mit REBOS wurde ein effektives Werkzeug für die Optimierung sowohl der Konstruktion als auch der Betriebsweise von Verbrennungsanlagen geschaffen. Der Optimierungserfolg läßt sich an der Energieeinsparung und der reduzierten Schadstoffemission bewerten.

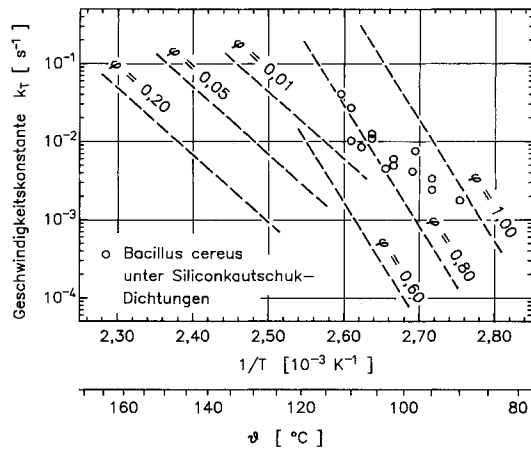


Abb. Vergleich des Einflusses von Siliconkautschuk-Dichtungen mit dem Einfluß der relativen Feuchte auf die Abtötungsgeschwindigkeit *Bacillus cereus*-Sporen.

gen und Dichtflächen befinden, eine erhöhte Hitzeresistenz aufweisen, so daß der Erfolg einer Hitzedesinfektion in Frage gestellt ist. Dabei wurde angenommen, daß durch das Anpressen der Dichtung zuvor anhaftende Flüssigkeit verdrängt wird und somit die Eigenschaften des Dichtungswerkstoffs milieubestimmend bezüglich der Abtötungskinetik werden.

## 1 Material und Methoden

Es wurde eine Apparatur konstruiert, die es erlaubt, auf einem Teststück die Abtötung von Keimen, die sich unter Dichtungen befinden, mit derjenigen von Keimen, die direkten Kontakt zum Erhitzungsmedium (heißes Wasser, Dampf) haben, zu vergleichen. Eine identische Wärmebelastung ist dadurch gewährleistet. Als Indikatororganismen wurden *Bacillus cereus*-Sporen ausgewählt. Zur Beurteilung der reaktionskinetischen Ergebnisse standen aus anderen Experimenten Daten zum Einfluß der relativen Luftfeuchte auf die Inaktivierungsgeschwindigkeit zur Verfügung. Zur Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften der Dichtungsmaterialien wurde in einer geschlossenen Meßkammer der Verlauf der Gleichgewichtsfeuchte bei Temperaturerhöhung gemessen.

## 2 Ergebnisse

Die Abtötung der Sporen unter Dichtungen kann unabhängig vom Werkstoff als Reaktion 1. Ordnung beschrieben werden. Einige Werkstoffe wie z.B. Naturkautschuk hatten keinerlei Einfluß auf die Resistenz. Dagegen konnten die Sporen unter anderen Dichtungsarten wie z.B. Siliconkautschuk wesentlich höhere Wärmebelastungen überstehen, als wenn sie direkten Kontakt zum Erhitzungsmedium hatten. Der Resistenzunterschied war um so größer, je höher die Temperatur war. Bei 112°C waren ca. 20mal längere Erhitzungszeiten erforderlich, um unter den Dichtungen dieselbe Keimreduktion zu erreichen.

Die genannten Werkstoffe unterscheiden sich in der Temperaturabhängigkeit der Sättigungsfeuchte. Siliconkautschuk kann bei höheren Temperaturen mehr Wasser aufnehmen. Ausgehend vom Sättigungszustand bei Raumtemperatur fällt die Wasseraktivität auf Werte um 60 % bei 95°C, wenn die Gutsfeuchte konstant bleibt. Bei Naturkautschuk tritt dagegen keine Senkung der Wasseraktivität auf, d.h. die Sättigungsfeuchte ist bei höheren Temperaturen kleiner oder unverändert.

Geht man davon aus, daß während der Erhitzungszeit der Feuchteausgleich zwischen Dichtung und Erhitzungsmedium nicht erreicht wird, so ist das Milieu unter Siliconkautschuk-Dichtungen durch eine reduzierte Wasseraktivität charakterisiert.

In der Abbildung wird daher der Einfluß von relativer Luftfeuchte und von Siliconkautschuk-Dichtungen auf die Abtötungskinetik in der Arrhenius-Darstellung verglichen. Die Verschiebung der Geschwindigkeitskonstanten für die Abtötung unter Dichtungen zu niedrigeren relativen Feuchten bei steigender Temperatur bestätigt, daß die kontinuierlich abnehmende Wasseraktivität für die hohe Resistenz der Sporen unter den Siliconkautschuk-Dichtungen verantwortlich ist.

## 3 Schlußfolgerungen

Wird eine Dichtung auf eine Dichtfläche gepreßt, so verdrängt sie das Wasser so weitgehend, daß die Abtötungsgeschwindigkeit durch Eigen-

## Hitzeresistenz von Keimen unter Dichtungen – Kontaminationsgefahr in Produktionsanlagen?

Dipl.-Ing. J. Pfeifer (Vortragender) und Prof. Dr.-Ing. H. G. Kessler, Lehrstuhl für Lebensmittelverfahrenstechnik und Molkereitechnologie, Technische Universität München, 8050 Freising-Weihenstephan.

Keimarme oder aseptische Technologien werden heute in der Lebensmittelproduktion, in der pharmazeutischen Industrie und bei vielen biotechnologischen Verfahren eingesetzt. Für rekontaminationsfreie Prozesse ist dabei die Reinigung und Desinfektion der oft komplexen Anlagen eine Voraussetzung, die jedoch nicht immer zufriedenstellend erfüllt werden kann. Dichtungen gelten allgemein als Schwachpunkte, wobei meist eine ungenügende Reinigung unterstellt wird. Ziel der vorgestellten Arbeit war dagegen zu untersuchen, ob Mikroorganismen, die sich zwischen Dichtun-

schaften der Dichtung bestimmt wird. Dabei kann es zu einer drastischen Erhöhung der Hitzeresistenz kommen. Bei der Werkstoffauswahl, der Konstruktion und bei der Auslegung der Anlagensterilisation sind diese Zusammenhänge zu berücksichtigen.

67

## Thermische Abtötung hitzeresistenter bakterieller Sporen mittels indirekter Erhitzungsmethoden

Dipl.-Ing. J. Haas (Vortragender) und Prof. Dr.-Ing. H. Schubert, Institut für Lebensmittelverfahrenstechnik, Universität Karlsruhe (TH), Kaiserstr. 12, 7500 Karlsruhe 1.

Viele Verfahren in der Lebensmitteltechnik dienen dem Zweck, Mikroorganismen und Enzyme zu inaktivieren und dadurch die Haltbarkeit von Lebensmitteln zu verlängern. Ein häufiges physikalisches Verfahren ist das Erhitzen, wobei ein möglichst hoher Anteil an lebensfähigen Formen von pathogenen, toxinbildenden und verderbniserregenden Mikroorganismen (z. B. Bakteriensporen) abgetötet, die sensorischen und ernährungsphysiologischen Eigenschaften des Lebensmittels jedoch so wenig wie möglich verschlechtert werden sollen. Aufgrund der unterschiedlichen Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten der Inaktivierung und der produktschädigenden chemischen Reaktionen ist es im obengenannten Sinn günstig, das Lebensmittel für kurze Zeit hohen Temperaturen auszusetzen. Temperatur/Zeit-Einwirkungen von 135 bis 155 °C für 2 bis 20 s sind als sog. Ultra-Hohe-Temperatur- (UHT-)Behandlung gebräuchlich.

Hinsichtlich einer verbesserten Qualität der Lebensmittel wäre eine kürzere Erhitzung bei noch höheren Temperaturen günstiger (Extrem-Hohe-Temperatur- (EHT-)Behandlung). Noch unbekannt ist jedoch, ob bei derart hohen Temperaturen die gleichen Gesetzmäßigkeiten der Sporeninaktivierung wie bei tieferen Temperaturen gelten, d. h. Sporen gemäß dem Inaktivierungs-Modell nach einer Reaktion 1. Ordnung abgetötet werden und sich die Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten mit dem bekannten Arrhenius-Ansatz beschreiben läßt.

Für experimentelle Untersuchungen ist es wegen der Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeitskonstanten der Sporeninaktivierung notwendig, die Sporensuspension möglichst schnell auf die Haltetemperatur aufzuheizen und abzukühlen, so daß die Inaktivierung beim Aufheizen und Abkühlen gegenüber der Inaktivierung beim Halten vernachlässigbar klein ist. Lassen sich derartige quasiisotherme Bedingungen im Experiment einstellen, sind aussagefähige Untersuchungen zur Inaktivierungskinetik und zur Hitzeresistenz der Sporen möglich. Auf dieser Grundlage wurden für Versuchszwecke zwei Erhitzungsanlagen derart entwickelt und aufgebaut, daß von Temperaturen unterhalb des UHT-Bereiches bis zu Temperaturen im EHT-Bereich quasiisotherme Inaktivierungsversuche durchführbar sind. Die Sporensuspension wird dabei in einem nicht durchströmten und einem durchströmten Kapillarrohr indirekt erhitzt, d. h. die Sporensuspension und das Heizmedium sind durch eine Wärmeaustauscherfläche voneinander getrennt. Mit der Methode des nicht durchströmten Kapillarrohres lassen sich quasiisotherme Bedingungen bis zu ca. 140 °C und mit der Methode des durchströmten Kapillarrohres bis zu ca. 170 °C realisieren. Experimente zur Hitzeresistenz von in physiologischer Kochsalzlösung suspendierten *Bacillus stearothermophilus*-Sporen liegen bis zu 155 °C vor. Danach werden Sporen bei sehr kurzen Behandlungszeiten zunächst nicht abgetötet, sondern aktiviert. Die Hitzeresistenz der Sporen wird demzufolge mit dem aus der Literatur bekannten Aktivierungs/Inaktivierungs-Modell beschrieben. Demgemäß werden Sporen in einem ersten Reaktionsschritt nach einer Reaktion 1. Ordnung aktiviert, bevor sie in einer Folgereaktion ebenfalls 1. Ordnung inaktiviert werden. Mit diesem Modell läßt sich im Gegensatz zum reinen Inaktivierungs-Modell die Sporeninaktivierung interpretieren. Die Versuchsergebnisse wurden nach beiden Modellen ausgewertet.

Hinsichtlich der UHT- und EHT-Hitzebehandlung von Lebensmitteln zeigt sich, daß für eine minimal geforderte Sporenabtötungsrate um den Faktor  $10^4$  nach dem Aktivierungs/Inaktivierungs-Modell ca. nur halb so lange Behandlungszeiten notwendig sind wie nach dem Inaktivierungs-Modell. Durch diese verkürzte Behandlungszeit werden wertgebende Inhaltsstoffe

im Lebensmittel weniger stark abgebaut. Von größerer Bedeutung ist jedoch, daß die Sporeninaktivierungsenergien nach beiden Modellen bis in den EHT-Bereich hinein ca. um den Faktor 3 kleiner sind als die Inaktivierungsenergien chemischer Abbaureaktionen. Aufgrund dieser beiden Tatsachen ist bei höheren Temperaturen und entsprechend kürzeren Zeiten im EHT-Bereich eine weitere Qualitätssteigerung hitzebehandelter Lebensmittel im Vergleich zur UHT-Behandlung zu erwarten.

68

## Technologische Aspekte der Mikrostruktur von Lebensmitteln

Dr.-Ing. F. Dannenberg (Vortragender) und Prof. Dr.-Ing. W. Bauer, Centre de Recherche Nestlé, Vers-chez-les-Blanc, CH-1000 Lausanne 26.

Die bei der Umwandlung von landwirtschaftlichen Rohstoffen in verzehrfertige Lebensmittel angewandten Verarbeitungsschritte wie Emulgieren, Erhitzen, Gefrieren, Trocknen und Extrahieren haben erhebliche Auswirkungen auf strukturelle und mechanische Eigenschaften und somit auf die sensorisch wahrnehmbaren Textureigenschaften des Endproduktes. Die native Grundstruktur eines Rohstoffes, gleichgültig ob tierischen oder pflanzlichen Ursprungs, ob fließfähig oder fest, wird durch überwiegend physikalische Wechselwirkungen von Proteinen, Polysacchariden und Lipiden bestimmt. Die lebensmitteltechnologische Bearbeitung, d. h. die kontrollierte Einbringung von weiteren Lebensmittelkomponenten und Energie, kann man als Restrukturierungsprozeß ansehen. Unabhängig davon, ob dieser Vorgang erwünscht ist oder nicht, resultiert eine „fabrizierte“ Struktur, welche im allgemeinen das Ergebnis von Veränderungen auf vier Strukturniveaus ist (Molekular-, Ultra-, Micro- und Makrostruktur). Der Strukturbegriff ist demnach sehr weit zu fassen. Er reicht von der schwammartigen Makrostruktur einer Brotkrume bis zur nur mittels Elektronenmikroskopie darstellbaren Kettenbildung der Caseinmizellen im Joghurtgel. Gemeinsam ist diesen sehr unterschiedlichen Strukturphänomenen, daß sie eine spezifische, instrumentell und sensorisch erfaßbare „Texturantwort“ zur Folge haben.

Häufig ist der alleinige oder überwiegende Zweck eines bestimmten Prozesses, eine neue Struktur zu erzeugen, u. U. unter Einschluß einer Phasenumwandlung, und damit dem Lebensmittel seine charakteristischen Eigenschaften zu geben. Als Beispiele seien hier die Kristallisation von Wasser im Freezer bei der Speiseeis-Herstellung, die Ausbildung einer komplexen dreidimensionalen Netzwerkstruktur bei der Joghurtfermentation, der Extrusion von Teigwaren oder der Kochwurstherstellung genannt. Wie diese Beispiele zeigen, haben wir es häufig mit kolloidalen Strukturen (Gele, Emulsionen, Schäume) zu tun.

Es beginnt sich die Erkenntnis durchzusetzen, daß eine bessere Kenntnis der Mikrostruktur traditioneller Lebensmittel und deren Komponenten sowie der Faktoren, die diese Struktur beeinflussen, die Voraussetzung ist für ein volles Verständnis der physikalischen und sensorisch wahrnehmbaren Eigenschaften (einschließlich so komplexer Phänomene wie der Aromafreisetzung beim Verzehr).

Konzeptionell stellt diese Betrachtungsweise das notwendige Gegengewicht zur Sicht des analytischen Chemikers dar, welcher Lebensmittel als eine Mischung aus organischen und anorganischen Komponenten sowie Wasser definiert.

Im Hinblick auf die zielgerichtete Entwicklung neuer Lebensmittelstrukturen gewinnt diese Betrachtungsweise sogar entscheidende Bedeutung. Fabrizierte, strukturierte, texturierte, rekonstituierte Lebensmittel sind Synonyme für maßgeschneiderte Produkte, die ganz bestimmte Anforderungen hinsichtlich Qualität, Ernährungswert und Preis erfüllen. Die größte Herausforderung für den Lebensmitteltechnologen besteht in der Erzielung organoleptisch einwandfreier Produkte. Beispiele sind rekombinierte Lebensmittelstrukturen aus tierischen Rohstoffen, auf pflanzlichen Rohstoffen basierende Imitate tierischer Produkte sowie die Vielzahl extrudierter Produkte, aber auch Neuentwicklungen im Bereich der Desserts und vor allem der Leicht-Produkte. Die Textureigenschaften sind häufig der begrenzende Faktor für die Akzeptanz durch den Konsumenten. Im Gegensatz zu Farbe und Aroma können Struktur und Textur nicht „zuggesetzt“ werden, sondern müssen durch in-situ-Reaktionen erzeugt und stabilisiert werden.