

Josef G. Knoll-Wissenschaftspreisträger 2004

Josef G. Knoll-Science Award Winner 2004

Steffen Ritterbusch „Modellierung und Simulation des Fermentationsverhaltens von indonesischem Kakao“, University of Hohenheim, 2002

Zusammenfassung

Indonesien ist mit einer jährlichen Erntemenge von 350.000 t und einem Weltmarktanteil von 11 % der drittgrößte Kakaoproduzent der Welt. Der in Indonesien überwiegend angebaute „Bulk Cocoa“ gilt jedoch wegen seines hohen Säuregehalts und des flachen Aromas auf dem Weltmarkt als minderwertig, weshalb er mit Preisabschlägen bis zu 20% gegenüber Standardqualitäten aus Westafrika gehandelt wird. Hierdurch gehen der indonesischen Volkswirtschaft jährlich etwa 60 - 80 Mio. US\$ verloren.

Die Qualitätsmängel werden überwiegend dem sortenbedingten hohen Pulpagehalt des indonesischen Kakaos zugeschrieben. Der hohe Pulpaanteil führt zu einer starken Säurebildung während der Fermentation, wodurch die zur Aromabildung nötigen spezifischen Reaktionen nicht optimal ablaufen können und sich am Fermentationsende ein hoher Säuregehalt in den Kakaosamen einstellt. Von den bisherigen Ansätzen zur Verbesserung des Fermentationsverlaufs konnte bezüglich der Kakaoqualität nur die mehrtägige Vorlagerung der geernteten Kakaofrüchte vor der Fermentation befriedigende Ergebnisse liefern. Dennoch konnte sich die Vorlagerung in der Praxis nicht durchsetzen, da bei diesem Verfahren hohe Verluste durch Verderbserscheinungen der Kakaosamen während der Lagerung auftraten.

Da die durch eine unvollständige Fermentation verursachten Aromadefizite in späteren Verarbeitungsschritten nicht mehr nachgeholt werden können, ist der Fermentationsverlauf für die spätere Aromabildung und damit für die Qualität des Kakaos von entscheidender Bedeutung. Der hohe experimentelle und analytische Aufwand sowie die eingeschränkten Versuchsmöglichkeiten vor Ort machten daher die Erstellung eines Prozessmodells erforderlich, um den Einfluß der Prozessparameter auf den Fermentationsverlauf eingehend zu untersuchen. Ein Modellansatz zur mathematischen Beschreibung der Vorgänge während der Kakaofermentation war bisher nicht verfügbar.

Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Erstellung eines mathematischen Modells zur Beschreibung des Fermentationsverlaufs. Das makroskopische Modell der Fermentationsmasse besteht aus drei Subsystemen, dem Gasraum der Schüttung, der Kakaopulpa und dem Kakaosamen. Trotz der schwierigen Meßbarkeit einiger Systemgrößen konnte ein Modellansatz entwickelt werden, der die experimentellen Ergebnisse mit ausreichender Genauigkeit wiedergibt. Besondere Schwierigkeiten nicht-isothermen Verlauf sowie der Überlagerung mehrerer Reaktionen, wodurch die Parameteridentifikation erst nach einer vorherigen abschnittsweise Sensitivitätsanalyse erfolgen konnte. Mit Hilfe des Modells konnten die Substratmenge und die Sauerstoffzufuhr in die Fermentationsschüttung als wichtigste limitierende Faktoren der Kakaofermentation identifiziert werden, während der Sauerstofftransport durch den Flüssigkeitsfilm der Mikroorganismen eine untergeordnete Rolle spielt. Die Abkühlung der Fermentationsmasse nach dem Erreichen von

Fermentationstemperaturen über 45°C wurde durch die teilweise Inaktivierung der Essigsäurebakterien und die damit verbundene verringerte Wärmeproduktion erklärt. Eine Schlüsselrolle bezüglich des für die Aromabildung entscheidenden pH-Wert-Verlaufs konnte der Milchsäurebildung zugeschrieben werden. Die deutliche Milchsäurebildung auch nach dem vollständigen Verbrauch der Glucose wurde auf die Aktivität heterofermentativer Milchsäurebakterien zurückgeführt, welche in der Lage sind, die in der Pulpa vorliegenden Pentosen abzubauen. Die bei hoher Sauerstoffzufuhr beobachtete reduzierte Milchsäurebildung wurde auf eine Hemmung durch das starke Wachstum der Hefen zurückgeführt.

Zur Durchrührung der experimentellen Untersuchungen wurde zunächst ein kontinuierlich arbeitender Trommelentpulper zur partiellen Abtrennung der Pulpa von den Kakaosamen entwickelt. Bei einem Durchsatz von 2500 bis 7000 kg/h ergaben sich Entpulpungsgrade zwischen 15 und 28%. Der spezifische Energiebedarf der Entpulpung ist mit maximal 3 kJ/kg Kakao im Vergleich zu den anderen Verarbeitungsschritten wie der Trocknung vernachlässigbar.

Die Fermentationsuntersuchungen zeigten eine Beschleunigung des Temperaturanstiegs und des pH-Wert-Abfalls mit zunehmender Entpulpung, was auf die verbesserte Sauerstoffzufuhr zurückgeführt wurde. Der pH-Wert verlief jedoch noch immer deutlich zu tief, so dass die Qualität der fermentierten Kakaosamen durch die Entpulpung nicht signifikant verbessert werden konnte.

Auch durch eine Vorwärmung der partiell entpulpten Fermentationsmasse konnte die Kakaoqualität nicht verbessert werden. Zwar rührte die Vorwärmung von 40°C zu einer Reduktion der Essigsäure um 40 %, doch hatte der gleichzeitige Anstieg der unerwünschten Milchsäure um 25 % einen deutlich zu tiefen pH-Wert-Verlauf zur Folge. Auch der auf eine vollständigere Hydrolyse der Saccharose hindeutende höhere Gehalt an reduzierenden Zuckern konnte eine Verschlechterung des sensorischen Befundes gegenüber der unvorbehandelten Fermentation nicht ausgleichen.

Eine kontinuierliche Belüftung der Fermentationsmasse im Umluftbetrieb während der ersten beiden Fermentationstage führte zum gewünschten Verlauf. Nach einem schnellen Temperaturanstieg und pH-Wert-Abfall während der ersten beiden Fermentationstage erfolgte durch das in der zweiten Phase verringerte Sauerstoffangebot sowie durch die bei über 42°C verbleibende Temperatur ein verlangsamter Essigsäureabbau auf etwa 0,8g/100gTS nach 120 Stunden, was einer Reduktion von 50% gegenüber der Standardfermentation entspricht. Durch die auf das starke Hefewachstum zurückgeführte Verringerung der Milchsäurebildung um 60% verlief der pH-Wert nach dem zweiten Fermentationstag im gewünschten Bereich zwischen 5,0 und 5,4. Die analytischen Befunde wurden durch die sensorischen Untersuchungen qualitativ bestätigt. Von besonderer Wichtigkeit ist dabei die Tatsache, daß durch das modifizierte Fermentationsverfahren keine Fehlgerüche hervorgerufen wurden.

Die Validierung des Modells mit Hilfe der experimentellen Ergebnisse zeigte eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Fermentationsverläufen. Zur Überprüfung der Gültigkeit des mathematischen Modells für die gesamte Bandbreite der Versuche wurden neben der Standardfermentation je ein charakteristischer Versuch der Kistenfermentation mit vorheriger partieller Entpulpung, mit Entpulpung und Vorwärmung sowie der Fermentation mit Belüftung und vorheriger Entpulpung betrachtet. Der Vergleich der berechneten und gemessenen Verläufe von Temperatur, Sauerstoffsättigung, pH-Wert sowie Ethanol-, Essigsäure- und Milchsäuregehalt ergaben hierbei eine weitgehende

Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment. Der Einfluß von Entpulpung, Vorwärmung und Belüftung der Fermentationsmasse auf den Fermentationsverlauf konnte mit hinreichender Genauigkeit berechnet werden.

Durch die Analyse des Fermentationsprozesses mit Hilfe des mathematischen Modells konnten die Mechanismen des Sauerstofftransports sowie die limitierenden Einflußgrößen des Fermentationsverlaufs beschrieben werden. Als geschwindigkeitsbestimmende Faktoren wurden zu Beginn der Fermentation zunächst die Zellmasse, im weiteren Verlauf die Sauerstoffsättigung in der Gasphase, die wiederum durch die Sauerstoffzufuhr von außen bestimmt wird, identifiziert. Bei weiter fortschreitender Fermentation wirken entweder der Ethanolgehalt oder ein starker Temperaturanstieg auf über 45°C limitierend auf das Zellwachstum. Welche dieser Bedingungen zuerst eintritt, hängt vom jeweiligen Substratangebot und Wärmeaustausch ab. Nach dem vollständigen Verbrauch des Ethanols setzt der Essigsäureabbau durch überoxidierende Essigsäurebakterien ein. Bei hohen Reaktionsumsätzen infolge hoher Zellkonzentrationen wird auch dieser Vorgang temperaturbedingt limitiert.

Die Limitierung der Milchsäurebildung wird zum Fermentationsbeginn durch den niedrigen pH-Wert der Pulpa bestimmt. Der im weiteren Verlauf beobachtete hemmende Einfluß hoher Zellkonzentrationen auf die Milchsäurebildung wurde auf eine Substratlimitierung infolge einer Substratkonkurrenz oder sterischen Hemmung zurückgeführt.

Abschließend wurde mit Hilfe der Simulation von Prozessabläufen der Einfluß von Umgebungstemperatur, Wärmeverlusten, Oberflächen/Volumen-Verhältnis der Fermentationskiste, Anfangszellkonzentration und Sauerstoffzufuhr auf den Fermentationsverlauf beispielhaft untersucht. Im Hinblick auf die Praxis wurden Empfehlungen zur Verbesserung des Fermentationsregimes gegeben, um einen optimierten Fermentationsverlauf und somit eine höhere Produktqualität zu erzielen.

Für Plantagen oder Bauernkooperativen mit einer täglichen Erntemenge von mehreren Hundert Kilogramm wurde eine partielle Entpulpung der Kakaosamen auf ein Pulpa/Same-Verhältnis von 9 % gefolgt von einer Fermentation mit Belüftung empfohlen. Die Belüftung der Fermentationskiste sollte hierbei im Umluftbetrieb bei einer Sauerstoffzufuhr rate von 0,02 mol/kgTS h erfolgen. Nach Erreichen einer Fermentationstemperatur von 45°C nach etwa 2 Tagen ist die Sauerstoffzufuhr rate auf 0,003 mol/kgTS h zu reduzieren. Der Umluftbetrieb bei einer Luftgeschwindigkeit von etwa 0,01 m/s gewährleistet eine gleichmäßige Temperaturverteilung innerhalb der Fermentationsmasse bei homogener Produktqualität und niedrigem Energiebedarf. Durch entsprechende Auslegung der Wärmedämmung ist eine Anpassung des Verfahrens an die Chargengröße möglich.

Für die kleinbäuerliche Verarbeitung des Kakaos, bei der die beschriebene Entpulpung und Umluftfermentation aus Kostengründen nicht realisierbar ist, wird eine 2-stufige Fermentation in Säcken empfohlen. Zunächst ist eine 3-tägige Fermentation in luftdurchlässigen Säcken vorgesehen, wobei insbesondere bei Nacht auf eine gute Wärmedämmung geachtet werden sollte. Nach dem Erreichen einer Fermentationstemperatur von 40-45°C sollten die Kakaosamen weitere 2 Tage unter Luftabschluß und guter Wärmedämmung fermentiert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die entscheidenden Mechanismen zur Beeinflussung des Fermentationsverlaufs von Kakaosamen identifiziert. Erstmals konnte durch die Erstellung eines mathematischen Modells der „äußeren Fermentation“ der Einfluss

der Prozessparameter auf den Fermentationsverlauf quantifiziert werden. Durch die Identifikation der limitierenden Prozessparameter konnten Wege zur Prozessoptimierung im Hinblick auf eine Qualitätsverbesserung des Kakaos aufgezeigt werden. Das neuentwickelte Modell stellt einen ersten Ansatz dar, den Prozessverlauf der Kakaofermentation bei definierten Anfangs- und Randbedingungen unter Annahme einer in sich homogenen Fermentationsmasse zu berechnen und erlaubt so eine Optimierung des Prozesses bei stark reduziertem Versuchsaufwand.

Die bisher bei indonesischem Kakao auftretenden Qualitätsmängel konnten durch das neuentwickelte Verfahren weitgehend beseitigt werden. Durch einen flächendeckenden Einsatz des Verfahrens könnten die Absatzchancen auf dem Weltmarkt, wo indonesischer Kakao noch immer als minderwertige Qualität mit erheblichen Preisabschlägen gehandelt wird, deutlich verbessert werden.

Steffen Ritterbusch: Modellierung und Simulation des Fermentationsverhaltens von indonesischem Kakao, Stuttgart, 2002, ISBN: 3-18-310814-3