

Aufarbeitung von Rückbrot unter umweltrelevanten und wirtschaftlichen Gesichtspunkten

Von der Fakultät III: Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
-Dr.-Ing.-
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Udo Martens
aus Varel

Promotionsausschuß:

Vorsitzender: Prof. Dr. Dietrich Knorr

1. Bericht: Prof. Dr. Jürgen-Michael Brümmer

2. Bericht: Prof. Dr. Dr. e.h. Friedrich Meuser

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 19.12.2001

Berlin 2001

D83

Ich erkläre an Eides Statt, daß die vorliegende Dissertation in allen Teilen von mir selbständig angefertigt wurde und die benutzten Hilfsmittel vollständig angegeben worden sind.

Vorveröffentlichungen von irgendwelchen Teilen der vorliegenden Dissertation sind von mir nicht vorgenommen worden.

Weiter erkläre ich, daß ich nicht schon anderweitig einmal die Promotionsabsicht angemeldet oder ein Promotionseröffnungsverfahren beantragt habe.

Berlin, 20.11.2001

Dipl.-Ing. Udo Martens

per aspera ad astra

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dr. e.h. Friedrich Meuser, der mir nicht nur das Thema dieser Arbeit gestellt hat, sondern mich auch in hervorragender Weise fachlich und menschlich betreut hat.

Der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, der Fa. Dietrich Reimelt KG und der Fa. Müller Brot GmbH & Co. KG danke ich für die Bereitstellung der finanziellen Mittel für die Durchführung dieser Arbeit. Insbesondere danke ich Herrn Dr. Stefan Reimelt, Herrn Dipl.-Kfm. Hans Müller jun. und Herrn Michael Nüßgen für die gewährte Unterstützung.

Für die Unterstützung bei der Durchführung der Versuche danke ich Frau Dr. Annelore Jähmig, Frau Dipl.-Ing. Elke Stötzer, Frau Dipl.-Ing. Melanie Braun, Herrn Dipl.-Ing. Dirk Imhof, Herrn Bäckermeister Gerhard Fischer, Herrn Mühlening, Heinrich Reimers und ganz besonders Herrn Chem.-techn. Assistent Andreas Lusch.

Schließlich danke ich den Mitarbeitern des Fachgebiets Getreidetechnologie der Technischen Universität Berlin für die herzliche und hilfsbereite Zusammenarbeit.

Inhaltsverzeichnis

	SEITE
1	Einleitung und Problemstellung
	1
1.1	Verwertung von Rest- und Rückbrot
	3
1.2	Aufgabenstellung für eine neuartige biotechnologische Aufarbeitung von Rückbrot
	5
2	Stand der Technik
	6
2.1	Verwertung von Brot in Teigen
	6
2.2	Aufarbeitung von Brot durch Kochextrusion
	6
2.3	Enzymatische Aufarbeitung von Brot
	7
2.4	Aufarbeitung von Brot zu Paniermehl
	7
2.5	Verwertung von Brot zur Hefeherstellung
	8
2.5.1	Exkurs: Technik der Backhefe- und Ethanolherstellung
	9
2.5.1.1	Nährsubstrat für die Backhefeherstellung
	9
2.5.1.2	Prozeßtechnik der Backhefeherstellung
	10
2.5.1.3	Nährsubstrat und Prozeßtechnik für die Ethanolherstellung
	11
2.5.2	Exkurs: Stickstoffquelle im Brot
	12
2.5.3	Exkurs: Herstellung eines Flüssigferments
	13
3	Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung
	15
3.1	Schritte zur Lösung der Aufgabenstellung
	17
4	Material und Methoden
	20
4.1	Aufbau und Betrieb der Laboranlage
	20
4.1.1	Sirupherstellung mit der Laboranlage
	21
4.1.2	Versäuerung des Brotsirups und Modellsubstrats
	22
4.1.3	Kontinuierliche aerobe und anaerobe Fermentation: Labor- fermenter
	23
4.2	Aufbau und Betrieb der Technikumsanlage
	24
4.2.1	Sirupherstellung und –versäuerung mit der Technikumsanlage
	26
4.2.2	Kontinuierliche aerobe und anaerobe Fermentation: Technikums- anlage
	27

	Seite	
4.2.2.1	Beschreibung der Fermentationsanlage	28
4.2.2.2	Beschreibung des kontinuierlichen Fermenters	28
4.2.2.3	Kontinuierlicher Betrieb des aeroben und anaeroben Fermenters	30
4.2.2.4	Optimierung des Betriebs des kontinuierlichen Fermenters	32
4.3	Aufbau und Betrieb der Pilotanlage	33
4.3.1	Beschreibung der Fermentationsanlage: Pilotanlage	34
4.3.2	Betrieb des Fermenters: Pilotanlage	34
4.4	Backversuche	35
4.4.1	Backversuche in der Institutsbäckerei	35
4.4.2	Backversuche in der Brotfabrik	36
4.5	Aufbereitung des Rohstoffs	37
4.6	Backhefen und Milchsäurebakterien	37
4.7	Analysenmethoden	38
4.7.1	Bestimmung der Zellzahl	38
4.7.2	Nachweis von Fremdhefen	38
4.7.3	Nachweis von Bakterien	39
4.7.4	Bestimmung des α -Amino-Stickstoffes	39
4.7.5	Bestimmung des Proteingehalts	39
4.7.6	Bestimmung des Stärke- und des Glucosegehalts	39
4.7.7	Bestimmung des Gehalts an unlöslichen und löslichen Ballaststoffen	39
4.7.8	Bestimmung des Mineralstoffgehalts	40
4.7.9	Bestimmung des Rohfettgehalts	40
4.7.10	Bestimmung des Wassergehalts	40
4.7.11	Bestimmung des Gehalts an Ethanol, Milchsäure sowie Saccharose	40
4.7.12	Bestimmung des Gehalts an Kochsalz	40
4.7.13	Bestimmung der Frischhaltung	40
4.7.14	Bestimmung der Triebkraft der Backhefe	41
4.7.15	Bestimmung der Gehalte Biotin, Pantothenensäure, Thiamin und m-Inosit	41

	SEITE
5	Ergebnisse und Diskussion 42
5.1	Herstellung des Fermentationssubstrats aus Rückbrot 42
5.1.1	Zusammensetzung des Rückbrots 44
5.1.2	Hygienischer Zustand des Brotpulvers 46
5.1.3	Amylolytischer Abbau, Versäuerung und Masseverteilung 47
5.1.3.1	Verflüssigung 48
5.1.3.2	Verzuckerung 50
5.1.3.3	Versäuerung 54
5.1.3.4	Aufarbeitung 56
5.1.4	Proteolyse 61
5.2	Aerobe und anaerobe Fermentation des Fermentationssubstrats und Verwendung der Produkte 63
5.2.1	Nährstoffversorgung bei den Fermentationen 67
5.2.2	Mikronährstoffversorgung für die aerobe Hefevermehrung 75
5.2.3	Verwendung der Flüssighefe, des Flüssigsauers und der Proteinfraction 76
5.3	Backhefeherstellung mit der Technikums- sowie der Pilotanlage und Verwendung der Backhefe 80
5.3.1	Optimierung der aeroben Fermentation mit der Technikumsanlage 82
5.3.2	Backhefevermehrung mit dem Technikumsfermenter 85
5.3.3	Backhefevermehrung mit der Pilotanlage und Verwendung der Backhefe 92
5.4	Masseanfall bei der Rückbrotverwertung 98
5.5	Täglicher Masseanfall und Verfahrensablauf bei der Rückbrotverwertung 103
5.6	Wirtschaftlichkeit des Verfahrens 105

6	Zusammenfassung	Seite 116
7	Literatur	119
8	Anhang	123
8.1	Funktionsbeschreibung der Anlage für die Flüssighefeherstellung	124
8.2	Zusammenstellung der Anlagenteile	127
8.3	Medienverbrauch und Leistungsangaben	128

Tabellen

Tabelle	Titel	Seite
1	Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Herstellung eines Futtermittels aus Rückbrot durch Trocknung	4
2	Reaktionsbedingungen für die Proteolyse von Brotsirup	22
3	Zusammensetzung des aus dem Rückbrot der Brotfabrik hergestellten Brotpulvers	45
4	Viskosität der Maische und des Brotsirups	49
5	Hydrolysegrad des Brotsirups in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen der enzymatischen Hydrolyse mit α -Amylase und Amyloglucosidase	52
6	Fermentation des Sirups mit <i>Lactobacillus delbrückii</i>	55
7	Einstellung des pH-Werts und Säuregrads des Flüssigsauers	56
8	Frischmasseanfall an Fraktionen bei der Aufarbeitung des Brotsirups und ihr Gehalt an Trockenmasse, Glucose und Protein	59
9	Prozentuale Verteilung der Trockensubstanz, der Glucose und des Proteins auf die bei der Aufarbeitung des Brotsirups angefallenen Fraktionen	59
10	Proteolytischer Abbau von Brotsirup	61
11	Zusammensetzung des Flüssigferments	64
12	Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung mit dem Modellsubstrat unter anaeroben Bedingungen: Laboranlage	68
13	Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung mit dem Modellsubstrat unter aeroben und anaeroben Bedingungen: Laboranlage	70
14	Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung unter aeroben und anaeroben Bedingungen mit Brotsirup: Laboranlage	71
15	Ergebnis der kontinuierlichen Hefevermehrung mit Brotsirup unter sterilen Bedingungen bei einer anfänglichen Hefekonzentration von 150g/L: Laboranlage	72
16	Konzentration an Backhefe und Fremdorganismen sowie Triebkraft der Backhefe bei der kontinuierlichen Fermentation über einen Zeitraum von 5 Tagen: Laboranlage	73
17	Weizenbackversuche mit Flüssighefe und Flüssigsauer: Laboranlage	78
18	Roggenbackversuche mit Proteinfraction und Flüssigsauer: Laboranlage	79

Tabelle	Titel	Seite
19	Kontinuierliche Backhefeproduktion unter unsterilen Bedingungen auf dem Wege der aeroben Gärung	83
20	Backhefeproduktion unter den Bedingungen der kontinuierlichen aeroben Fermentationen	87
21	Mittlerer Massestrom: Technikumsanlage	90
22	Backhefeherstellung mit dem Pilotfermenter im Zulaufverfahren und Hefeverwertung	94
23	Grunddaten für die Massebilanzierung bei der Aufarbeitung eines Brotsirups aus Rückbrot	99
24	Täglich aus Rückbrot anfallende Produktmassen bei dessen Gesamt- und Teilverwertung	104
25	Thermischer Energiebedarf bei der Flüssighefeherstellung	107
26	Abwärmeströme aus Rauchgas und Schwadenabluft im Neufahrner Betrieb der Müller Brot AG	108
27	Wärmeverbraucher für eine mögliche sowie eine bereits verwirklichte Nutzung der Abwärmeströme	108
28	Gegenüberstellung des nutzbaren Energieinhalts aus den Brennern und des Wärmebedarfs bei der Brotsirupbereitung und -aufarbeitung	109
29	Betriebs- und Hilfsstoffbedarf für die Flüssighefe- und Ethanolherstellung	110
30	Preise für die Betriebs- und Hilfsstoffe	111
31	Rechnerischer Erlös für die erzeugten Produkte	121
32	Kostendeckungsrechnung für den Betrieb der Rückbrotanlage zur Gewinnung von 2.620t Backhefe/a (H27) als Flüssighefe (3.930t/a) aus 3.750t/a Rückbrot bei 312 Betriebstagen – Modell A	113
33	Kostendeckungsrechnung für den Betrieb der Rückbrotanlage zur Gewinnung von 1.560t Backhefe/a (H27) als Flüssighefe (2.340t/a) aus 9.360t/a Rückbrot bei 312 Betriebstagen – Modell B	114

Abbildungen

Abbildung	Titel	Seite
1	Vereinfachtes Fließschema der Technikumsanlage.	25
2	Temperaturverlauf bei der Bereitung des Sirups aus Rückbrot.	27
3	Verlauf des Hydrolysegrades in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen (Glucoamylasekonzentration a:0,44%, b:0,22%, c:0,11%).	53
4	Führung der Prozeßströme bei der Bereitung und Aufarbeitung von Brotsirup aus Rückbrot (Brotpulver)	57
5	Schematischer Aufbau der Laboranlage zur aerob-anaeroben Backhefeproduktion.	69
6	Verlauf der Konzentration der Backhefe und der wilden Hefen während der kontinuierlichen Backhefeproduktion unter unsterilen Bedingungen auf dem Weg der aeroben Gärung: Versuch Nr. 128.	84
7	Fließbild des Technikumsfermenters.	86
8	Verlauf der Zellzahl über die Zeit (Versuch Nr. 155, 157, 158, 159).	87
9	Verlauf des pH-Wertes, Ethanolgehalts, Füllstands, Sauerstoffgehalts und der Zellzahl über die Zeit (VP 163).	88
10	Erreichen des Gleichgewichtszustands der Konzentration an Chloridionen im Technikumsfermenter.	89
11	Darstellung der Temperatur, der Rührerdrehzahl, des Sauerstoffpartialdrucks, des Zulaufvolumenstroms und des Gesamtzulaufs über die Fermentationszeit (V205).	95
12	Massebilanz für die Rückbrotverwertung mit Backhefeherstellung nach dem kontinuierlichen Verfahren und dem Zulaufverfahren (gestrichelte Linie).	100
13	Massebilanz für die Rückbrotverwertung bei kontinuierlicher Backhefeherstellung.	102

1 Einleitung und Problemstellung

Die Ernährungsgewohnheiten zeichnen sich in Europa durch einen hohen Backwarenkonsum aus. Er ist in Deutschland mit einem Prokopfverbrauch von 80kg/a besonders hoch und wird nur noch vom polnischen übertroffen, der etwa 100 kg/a beträgt (1). Aus diesem hohen Konsum resultiert in Deutschland ein großer Backwarenmarkt, an dem handwerkliche Produzenten und Betriebe des sogenannten produzierenden Backgewerbes ohne die Dauerbackwarenindustrie etwa je zur Hälfte des Gesamtumsatzes beteiligt sind (2). Die Produktionsbetriebe stehen sowohl bezogen auf die vorgenannte Unterteilung in der Art der Betriebe als auch untereinander in einem scharfen Konkurrenzkampf. Dieser hat im vergangenen Jahrzehnt zu einer Restrukturierung des Backgewerbes geführt, die noch immer nicht abgeschlossen ist.

Die Restrukturierung wird durch die Einführung neuer Techniken sowohl auf der Seite der Produktion als auch der Seite der Distribution der Backwaren in Gang gehalten. Auf der Seite der Produktion sind dies insbesondere verschiedene Kühltechniken für Teige und vorgebackene Produkte sowie dazugehörige Backtechniken, die insbesondere die Filialisierung von Backbetrieben vorangetrieben hat. Das hat auch dazu geführt, daß die Konzentrierung der Produktion entweder auf Brot oder Kleinbackwaren oder Feine Backwaren zunehmend aufgelöst wird. Das bedeutet, daß es heute kleine und sehr große Backbetriebe gibt, die eine breite Produktpalette aus allen drei Produktkategorien produzieren. Darunter sind einige Großbetriebe, deren Produktpalette so breit ist, daß sie in der Branchensprache als „Vollsortimenter“ bezeichnet werden.

Die Verbreitung der Produktpalette hat zusammen mit dem Einsatz der neuen Techniken zu einer bedeutenden Ausweitung des Wertschöpfungspotentials für die Backwarenproduktion geführt. Die Veränderungen der Backwarenmärkte sind zusätzlich im Zusammenhang mit einer fortschreitenden Veränderung der Verzehrsgewohnheiten zu sehen. Diese besteht in einer starken Zunahme des Außer-Haus-Verzehrs, für den Backwaren in Form von belegten Brötchen und ähnlichen Produkten eine wesentliche Voraussetzung darstellen. Dabei ist es

hinsichtlich eines jeglichen Verzehrs von Backwaren von ausschlaggebender Bedeutung, daß das Konsumentenverhalten durch extrem hohe Ansprüche an die Frische der Backwaren geprägt ist. Diesbezüglich ist es von besonderem Interesse darauf hinzuweisen, daß für Backwaren der Zeitraum, in dem sie frisch sind, deutlich kürzer ist als der ihrer Haltbarkeit. Ein großer Teil der Backwaren kann deshalb schon kurz nach der Auslieferung oder Auslage nicht mehr verkauft werden, obgleich die Haltbarkeitsgrenze noch lange nicht erreicht ist.

Daraus ergibt sich das Problem der Verwertung von Backwaren, die nicht mehr als ausreichend frisch empfunden werden, die aber noch zum Verzehr geeignet sind. Die Menge dieser Backwaren ist in Deutschland auf 8-10% der Produktionsmenge zu veranschlagen. Das sind nach einer groben Schätzung, die auf dem Mehleinsatz zur Backwarenherstellung in Deutschland beruht, ca. 600.000 t/a. Diese Menge kann aus Gründen der Art der Vermarktung von Backwaren sowohl in Bäckerläden als auch Filialen und Supermärkten nicht unterschritten werden, da eine gewisse Präsenz des Warensortiments bis zum Ende eines jeden Verkaufstages gewährleistet bleiben muß, weil sie für die Kaufentscheidung des Kunden maßgeblich ist.

Die in Deutschland nicht verkaufte Backwarenmenge besitzt bei Rohstoffkosten <300 Mio. DM einen Warenwert in der Größenordnung von 3 Mrd. DM. Dem Backgewerbe erwächst folglich aus dem Nichtverkauf eines Teils seiner Produkte ein milliardenschwerer Verlust, der letztendlich auch volkswirtschaftlich zu Buche schlägt. Darüber hinaus ergibt sich zusätzlich das Problem der Verwertung der nicht verkauften Backwaren. Die Lösung dieser Aufgabe ist in Abhängigkeit von der Art der Backbetriebe, ihrer Größe und ihrem Sortiment vielschichtig. Besonders problematisch stellt sie sich für Großbackbetriebe dar, die Supermärkte in Form eines Frischendienstes beliefern. Sie sind deshalb gezwungen, die Regale in den Supermärkten zu pflegen. Darunter ist zu verstehen, daß sie die Regale in dem für ihr Vertriebssystem optimalen Zyklus unter Berücksichtigung des Frischekriteriums befüllen und die unverkaufte Ware zurücknehmen. Dieses zurückgenommene Brot wird in der Fachsprache als Rückbrot bezeichnet. Es ist zu unterscheiden von dem innerhalb der Produktionsstätten beim Schneiden des Brotes anfallenden Resten, Fehlschnitten und Fehlchargen, die als Restbrot bezeichnet werden.

1.1 Verwertung von Rest- und Rückbrot

Hinsichtlich der Verwertung sowohl des Rest- als auch des Rückbrotes läßt es die Lebensmittelgesetzgebung zu, daß diese in gewissen Anteilen bei der Brotherstellung mitverwendet werden dürfen. Über die Zugabemengen sind Regeln erlassen, die sich auf die Rohstoffbasis beziehen, aus denen die Brote hergestellt werden. Für Brote, die überwiegend aus Weizenmählerzeugnissen hergestellt werden, darf die auf Frischbrot bezogene Zugabemenge an Restbrot 6% und für Brote, die überwiegend aus Roggenmählerzeugnissen hergestellt werden, darf sie bis zu 20% betragen (3). Für die Zugabe gilt es als entscheidendes Kriterium, daß das mitverwendete Brot im Enderzeugnis mit bloßem Auge nicht mehr zu erkennen sein darf.

Aus den vorgenannten Zahlenangaben für die Restbrotzugabe zur Backrezeptur neuer Brote geht im Zusammenhang mit der Vermahlung von Weizen und Roggen (ca. 5,4 Mio. t Weizen/a, ca. 1,1 Mio. t Roggen/a) (4) sowie der geschätzten Menge für unverkauftes Brot hervor, daß eine Mitverwendung des Rückbrotes allein über die Brotproduktion aus quantitativen Gründen nicht möglich ist. Deshalb werden unverkaufte, als Rückbrot anfallende Backwaren weit überwiegend als Futtermittel verwertet und nur Restbrot für die Herstellung von Backwaren eingesetzt.

Wirtschaftlich vorteilhaft für die Restbrotverwertung ist es, daß über die damit in die Rezeptur eingebrachte Masse wenigstens der anteilige Rohstoffeinstandspreis, weitestgehend der des Mehles, gewonnen wird. Bei der Verwertung des Rückbrots als Tierfutter richtet sich der damit von Backwarenproduzenten erzielbare wirtschaftliche Nutzen, der mit seiner Abgabe entweder zur direkten Verfütterung oder als Rohstoff für die Futtermittelherstellung verbunden ist, demgegenüber nach dem Preis für Futtergetreide, das einen zum Rückbrot vergleichbaren Nährwert hat. Nachteilig für diese Verwertungsform ist es folglich, daß der erzielbare Erlös damit deutlich unter dem für die vorgenannte Restbrotverwertung indirekt erzielbaren bleiben muß. Der mögliche Erlös wird zusätzlich dadurch gemindert, daß große Rückbrotmengen, wie sie bei einigen der Großbackbetriebe anfallen, aus logistischen Gründen nicht direkt verfüttert werden können, sondern zuvor erst noch zu einem Futtermittel aufgearbeitet werden müssen. Die Aufarbeitung erstreckt sich neben der Entpackung insbesondere auf eine Trocknung des Brotes, um es in eine

mikrobiologisch und hygienisch stabile Form zu überführen. Diese Aufarbeitung ist erforderlich, um die durch die Futtermittelverordnung gegebenen Anforderungen an gewisse Grenzwerte, wie etwa für die Aflatoxinkonzentration, erfüllen zu können (5).

Die wirtschaftliche Problematik der Rückbrotverwertung, die Grundlage für Überlegungen für eine neue Art der Verwertung von Rückbrot geworden ist, wird nachstehend an einer konkreten, aber aus Gründen der betrieblichen Geheimhaltung vereinfachten Beispielrechnung (Tab. 1) für die Aufarbeitung von Rückbrot zu einem Futtermittel unter Zugrundelegen des Preises für Futterweizen als Referenzpreis (6) dargestellt. Daraus geht hervor, daß Wirtschaftlichkeit in der Rückbrotaufarbeitung zu einem Futtermittel sowohl aus der Sicht eines abgebenden Großbackbetriebes als auch eines aufnehmenden Futtermittelwerkes nur in engen Grenzen, die z.T. im Investment in die Anlage und deren dauerhafter und kontinuierlicher Versorgung mit Rückbrot begründet liegen, erreicht werden kann. Nach der Rechnung bedeutet das, daß ein Backbetrieb aus der Abgabe von Rückbrot allenfalls noch einen kleinen Erlös erzielen kann. Dieser ist weit vom Mehleinstandspreis entfernt. Allerdings stellt der Rückbrotaufarbeitung zu einem Futtermittel wenigstens z.Z. noch eine kostenneutrale Verwertungsmöglichkeit dar. Außerdem bildet die Nutzung der Nahrungsenergie auf der Ebene des Tieres nach ihrer direkten Nutzung zur menschlichen Ernährung die nächsthöchste Verwertungsstufe.

Tabelle 1: Wirtschaftlichkeitsberechnung zur Herstellung eines Futtermittels aus Rückbrot durch Trocknung

Position	Betrag (DM/t Produkt)
Erlös*	+220
Variable Kosten (Trocknung, Anlagenbetrieb)	-80
Fixe Kosten (Personal, Reparaturen, Transport)	-40
AfA	-20
Ertrag	+80 (53**)

* Referenzpreis: Futterweizen (6)

** Ertrag bezogen auf ungetrocknetes Rückbrot.

Ertrag wird zwischen Brotfabrik und Futtermittelfabrik geteilt.

1.2 Aufgabenstellung für eine neuartige biotechnologische Aufarbeitung von Rückbrot

Aus dieser Situation wurde die wissenschaftliche Aufgabe zur Entwicklung eines neuen Wegs zur biotechnologischen Aufarbeitung von unverkauften Backwaren unter umweltrelevanten und wirtschaftlichen Gesichtspunkten hergeleitet. Besondere Zielsetzung war es dabei, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem eine vollständige Verwertung von Rückbrot und anderen, ihm gleichzustellenden Backwaren sowie auch in Produktionsbetrieben anfallenden nicht verbackenen Teigen und Restbrot im Sinne eines geschlossenen Stoffkreislaufes zu verwirklichen.

Hinsichtlich des Stoffkreislaufs und der Stoffnutzung ging es darum, beide auf einer möglichst hohen Verwertungsstufe für die Nutzung der menschlichen Nahrungsenergiezufuhr anzusiedeln. Außerdem war eine Verlängerung der Stoffnutzung in Betracht zu ziehen, um dadurch vorhandene, aber bisher nicht nutzbare Verwertungspotentiale zu erschließen. Davon betroffen sind in Brotfabriken die ganzjährig anfallenden hohen Abwärmemengen aus den Backöfen. Die Zielsetzung fügt sich folglich in die für eine nachhaltige industrielle Produktion gestellte Aufgabe der schonenden Nutzung der Ressourcen an Energie und Rohstoffen und dem davon abhängigen Umgang mit der Umwelt ein (7). Der Ansatz für die Lösung der Aufgabe lag in einer ganzheitlichen Betrachtung der Brotproduktion begründet, welche alle Stoffströme und teilweise die Herstellung von Rohstoffen einschließt.

Diesbezüglich waren auch die gesetzlich vorgegebenen Randbedingungen zu beachten, die in einem steten Fluß sind. Darauf sei hier deshalb hingewiesen, weil sie einen entscheidenden Einfluß auf mögliche alternative Verwertungsformen für Rückbrot ausüben. Beispielsweise können alternative Verwertungsformen entweder verboten sein, was für das direkte Verbrennen von Brot mit einem Heizwert von weniger als 11.000kJ/kg der Fall ist, oder gefördert werden, wie es zur Zeit für die Verstromung von Biogas aus organischen Resten zutrifft (8).

2 Stand der Technik

Da aus der Sicht gesetzlicher Regelungen Restbrot und Rückbrot unter den Begriff Brot fallen, sind sie gleich zu bewerten, so daß Rückbrot ebenso verwertet werden kann wie Restbrot (3). Für Restbrot gibt es vier Verwertungsmöglichkeiten, denen es gemeinsam ist, daß sie auf der höchsten Stufe der Nutzung der Nahrungsenergie stehen, weil sie direkt als Rezepturbestandteil bei der Brotherstellung verwendet werden. Sie unterscheiden sich aber im Aufwand für die Aufarbeitung des Restbrots zur Verwertung in der Backrezeptur. Vorteilhaft ist es für alle vier Verwertungsformen, daß das aufgearbeitete Restbrot in der Backrezeptur als Quellstoff zur Wasserbindung und als Geschmackstoffträger fungiert. Mit dem aufgearbeiteten Restbrot können deshalb die sensorischen Qualitätsmerkmale der Backwaren positiv beeinflußt werden. Darunter kann vor allem ihre Frischhaltung verlängert werden.

2.1 Verwertung von Brot in Teigen

Die einfachste Verwertungsform besteht darin, das Brot zu zerkleinern und einzuweichen, um es nach ausreichender Einwirkzeit zur Zerstörung der Krumen- und Krustenstruktur der Rezeptur für neue Backwaren in den eingangs zitierten Mengenbegrenzungen zusetzen zu können. Technisch etwas aufwendiger kann Restbrot über das als Isernhäger Brotsauerteigfermentation bekannt gewordene Verfahren verwertet werden(9). Mit diesem Verfahren werden Mehl, Wasser und Restbrot mit speziellen Säuerungskulturen zu einem Sauerteig sehr hohen Säuregrads fermentiert. Dafür wird ein Fermenter eingesetzt, in den Restbrot in Scheiben und ganzen Laiben eingebracht werden kann. Ein spezielles Schneidewerkzeug zerkleinert das Restbrot in dem Sauerteig so vollständig, daß es in diesem für das Auge nicht mehr sichtbar aufgelöst wird. Der fertige Sauerteig wird wie ein üblicher Sauerteig eingesetzt.

2.2 Aufarbeitung von Brot durch Kochextrusion

Eine technisch aufwendigere Aufarbeitung des Restbrotes besteht in seiner Trocknung und nachfolgenden Kochextrusion (10). Dadurch wird sein Stärkeanteil

vollständig verkleistert. Die Extrudate werden vermahlen und in Pulverform der Backrezeptur zugesetzt. Aufgrund der vollständigen Stärkeverkleisterung erfüllen die Pulver die Funktion eines Quellmehls .

2.3 Enzymatische Aufarbeitung von Brot

Eine zur Quellmehlherstellung vergleichbar aufwendige Aufarbeitung von Restbrot besteht in seiner enzymatischen Umwandlung in einen sogenannten Brotsirup (11, 12). Diese Aufarbeitung ist darauf gerichtet, die Stärke im Restbrot mit α -Amylase und Amyloglukosidase bis zur Glucose abzubauen. Es entsteht dadurch ein zähflüssiger, süß schmeckender Sirup, dem durch Druckkochung eine braune Farbe verliehen werden kann. Durch die Mitverwendung dieser Sirupe in der Brotrezeptur können den Broten besondere geschmackliche Eigenschaften verliehen werden. Außerdem kann die Brotkrume in ihrer Farbe nuanciert werden (13).

2.4 Aufarbeitung von Brot zu Paniermehl

Der Vollständigkeit halber sei erwähnt, daß aus Weizen hergestellte Backwaren , die als Restbrot anfallen, zu Paniermehl aufgearbeitet werden können (14). Dazu wird das Restbrot getrocknet und anschließend vermahlen. Aus dem Mahlgut wird Paniermehl abgesiebt. Die nahrungsenergetische Verwertung des Restbrots als Paniermehl erfolgt auf der gleichen Stufe wie die vorgenannten Formen, weil es selbst wieder direkt bei der Herstellung von Lebensmitteln verwendet wird.

Aus der Verwertung des Restbrots als Paniermehl geht im übrigen hervor, daß bereits mit den genannten Arten der Restbrotverwertung die technischen und gesetzlichen Verwertungsmöglichkeiten für seine Wiederverwertung bei der Brotherstellung ausgeschöpft sind. Folglich bleibt für die Verwertung des Rückbrots auf dem gleichen Wege kein quantitativ nennenswertes Potential übrig. Aus diesem Tatbestand ergab sich der Grund für die Suche nach neuen Wegen für die Verwertung von Rückbrot unter der vorgenannten Zielsetzung.

2.5 Verwertung von Brot zur Hefeherstellung

Ein Blick auf die Inhaltsstoffzusammensetzung des Rückbrots läßt nun erkennen, daß der Schlüssel für eine biotechnologische Aufarbeitung in seinem Stärkegehalt liegt, weil sie den größten Anteil an der Gesamtmasse ausmacht und weil sie einer Stoffumwandlung durch enzymatischen Abbau und nachfolgende Fermentation mit klassischen biotechnologischen Verfahren leicht zugänglich ist. Eine Möglichkeit dafür bietet die seit 200 Jahren bekannte Verhefung von stärkehaltigen Rohstoffen nach deren enzymatischer Hydrolyse zu vergärbaren Zuckern (15). Dieser Gedanke liegt deshalb nahe, weil zur Brotherstellung ohnehin Hefe benötigt wird und die Verwertung von Kohlenhydraten zur Hefeherstellung aus nahrungsenergetischer Sicht nur eine Stufe unter der Verwertung von Kohlenhydraten für die menschliche Ernährung erfolgt; sie liegt damit auf gleicher Höhe wie die für die Tierernährung gegebene.

Die Verwertung von Rückbrot als Substrat für die Backhefeherstellung ist deshalb bereits auch patentiert worden (12). Diese Verwertung des Rückbrots hat sich jedoch wirtschaftlich nicht verwirklichen lassen, weil sie gegenüber dem Einsatz von Melasse als Nährsubstrat wesentlich teurer ist. Außerdem ist die patentierte Verwertung des Rückbrots bisher noch nicht verfahrenstechnisch umgesetzt worden und die Verwertung der nicht fermentierbaren Stoffe aus dem Brot, die etwa 30% seiner Trockenmasse ausmachen, ist bisher ungelöst geblieben.

Im Zusammenhang mit den nicht verhefbaren Stoffen ist ein weiteres Patent zu zitieren, das zwar prinzipiell auf die Herstellung eines Brotsirups der bereits genannten Art gerichtet ist (11), in dem aber zusätzlich ein proteolytischer Abbau der Proteine der Brotkrume beschrieben ist (16). Daraus ergibt sich ein wesentlicher Ansatz für die Nutzung der von der Hefe nicht fermentierbaren Restmasse der Brotkrume. Er besteht darin, die Aminosäuren der Proteine für die Ernährung der Hefe verfügbar zu machen.

Dieser Ansatz führt zusammen mit dem Hinweis auf die Unwirtschaftlichkeit des Einsatzes von Rückbrot als Substrat für die Hefevermehrung zu der Überlegung, Wirtschaftlichkeit für ein Verfahren zur Hefevermehrung dadurch zu erreichen, daß die Wertschöpfung der Hefefabriken bei der Hefeherstellung aus Melasse in eine in

den Backprozeß integrierte Hefeherstellung aus verzuckertem Rückbrot zu verlagern. Damit würde die existierende Arbeitsteilung zwischen Hefefabriken und Brotfabriken im Teilbereich der Großbackbetriebe aufgelöst werden können.

2.5.1 Exkurs: Technik der Backhefe- und Ethanolherstellung

Die Technik der Backhefe- und Ethanolherstellung beruht auf der Fähigkeit der Hefe, unter Sauerstoffzusatz die assimilierbare Kohlenhydratquelle (C-Quelle) zu veratmen und sie unter Abwesenheit von Sauerstoff zu vergären. In beiden Fällen kommt es zu einer Vermehrung der Hefe, die beim Atmen 7,2 mal größer ist als beim Gären. Dieser Unterschied ergibt sich aus der Differenz im ATP-Gewinn der Hefezelle zwischen gären und atmen, der für die Zellsubstanzzunahme entscheidend ist. Aus der C-Quelle (Glucose) entstehen beim Veratmen 0,54 g und beim Vergären 0,075g Hefetrockenmasse (15). Die Bildung der Zellmasse und ihre Zusammensetzung wird durch die zur Verfügung stehende Quelle an resorbierbarem Stickstoff (N-Quelle) und von Wuchsstoffen (Vitamine, Mineralstoffe) limitiert (vergl. 2.5.2).

2.5.1.1 Nährsubstrat für die Backhefeherstellung

Nährsubstrat für die Backhefeherstellung ist heutzutage praktisch ausschließlich Melasse. Sie steht in großer Quantität sehr preiswert zur Verfügung. Vorteilhaft für ihren Einsatz gegenüber stärkehaltigen Rohstoffen ist es, daß der in ihr enthaltene Zucker von der Hefe direkt als C-Quelle verwertet werden kann, während stärkehaltige Rohstoffe, wie zum Beispiel Getreide oder Brot, erst durch enzymatische Hydrolyse zu einem assimilierbare Zucker enthaltenden Substrat aufgearbeitet werden müssen.

Die Backhefeherstellung erfolgt mit dem Ziel, die Zellmasseausbeute aus der C-Quelle durch Belüftung des Substrats in ein Maximum zu führen. Da bei aerober Vermehrung der Hefe mit Melasse als Substrat aus dieser weder nicht resorbierbare Stickstoffverbindungen noch Wuchsstoffe (Vitamine, Mineralstoffe) in ausreichender Menge zur Assimilation der C-Quelle zur Verfügung stehen, werden diese hinzugefügt. Als N-Quelle werden Ammoniumphosphat und –sulfat sowie Ammoniak

und Harnstoff eingesetzt. Ammoniumphosphat dient gleichzeitig auch als Phosphorquelle (P-Quelle). Zu ergänzende Wachstoffsstoffe sind Biotin, Panthothensäure, Inositol, Thiamin, Pyridoxin und Niacin. Mineralstoffe sind in Melasse weitgehend ausreichend vorhanden.

2.5.1.2 Prozeßtechnik der Backhefeherstellung

Die Backhefevermehrung erfolgt diskontinuierlich über mehrere Stufen im Zulaufverfahren (feed batch) in belüft- und sterilisierbaren unterschiedlich großen Fermentern. Die letzte Stufe der Vermehrung wird als Versandhefestufe bezeichnet und die vorausgehenden als Stellhefestufen. Prinzipiell ist es zwar auch möglich, Backhefe kontinuierlich zu vermehren (15), entsprechende Verfahren haben sich jedoch nicht durchsetzen können, weil das Risiko von Infektionen und der Veränderung der Qualitätsmerkmale der Hefe über die Zeit im Vergleich zum Zulaufverfahren größer ist.

Nach Abschluß der Fermentation in der Versandhefestufe wird die Backhefe durch Zentrifugalabscheidung vom fermentierten Substrat getrennt. Es entsteht dabei ein Konzentrat, das als Hefemilch bezeichnet wird. Diese Hefe wird durch mehrmaliges Verdünnen mit Wasser und anschließendes Konzentrieren gereinigt und von aus der Melasse stammenden Farbstoffen befreit. Die gereinigte Hefemilch wird durch Zentrifugalabscheidung entweder zu einer versandfertigen Flüssighefe konzentriert oder durch eine sich der zentrifugalen Aufkonzentrierung anschließenden Entwässerung mit einem Vakuumdrehfilter auf eine Trockenmasse von 27-30% eingestellt. Diese Hefe wird über Strangpressen zur Versandhefe ausgeformt. Sie wird aufgrund ihres Trockenmassegehalts als Backhefe H27 gekennzeichnet.

Die Flüssighefe und die Preßhefe werden nach ihrer Triebkraft und Triebhaltbarkeit charakterisiert. Beide Qualitätsmerkmale werden durch die Prozeßführung, insbesondere in der Versandhefestufe festgelegt. Diesbezüglich ist zu erwähnen, daß die Triebkraft negativ mit der Triebhaltbarkeit korreliert.

Das von der Hefe befreite fermentierte Substrat wird als Abwasser entsorgt. Die Entsorgung des Abwassers ist für die Hefefabriken wegen seiner starken Belastung mit organischen und anorganischen Stoffen sehr kostenintensiv und sie verursacht auch im Vergleich zur Entsorgung anderer Abwässer aus der Lebensmittelindustrie bezogen auf die für deren Produkte gegebene Wertschöpfung eine relativ hohe Umweltbelastung.

2.5.1.3 Nährsubstrat und Prozeßtechnik für die Ethanolherstellung

Die Ethanolherstellung und die Herstellung von Antiklopfmitteln daraus hat im Rahmen der Treibstoffgewinnung aus nachwachsenden Rohstoffen weltweit, darunter aber insbesondere in den USA, eine sehr große Bedeutung erlangt. Als Rohstoffe dienen zur Zeit insbesondere Mais und Zuckerrohr (17). In Europa zeichnet sich eine ähnliche Entwicklung ab, wobei für die bereits vorhandenen, bzw. in Bau befindlichen Fabriken Weizen oder Gerste als Rohstoff vorgesehen ist (18).

Die auf den stärkehaltigen Rohstoffen basierenden Prozesse sind aufgrund ihrer großen Bedeutung für die Umwelt sehr hoch entwickelt. Es gibt inzwischen vollständig kontinuierliche Prozesse, in denen Zellkonzentrationen von 15-45 g Hefetrockensubstanz (HTS) erreicht werden. Die Hefe wird zur Aufrechterhaltung der Geschwindigkeit der Fermentation bei hoher Zelldichte teilweise zurückgeführt. Dazu kann sie mit Säure gewaschen werden. Dieser Vorgang entspricht dem für die Backhefeherstellung beschriebenen.

Die Weiterentwicklung der Prozesse zur Ethanolherstellung ist vor allem der Senkung des energetischen Aufwands zugute gekommen. Praktisch der gesamte Energieaufwand ist für die Prozeßschritte des Aufschlusses des Rohstoffes (Stärke) und der Destillation des Ethanols erforderlich. Der energetische Gesamtaufwand beträgt bei der Anwendung konventioneller Verfahren 19MJ und bei modernen 8MJ pro Liter reinem Ethanol (15). Der energetische Aufwand konnte beim Aufschluß durch Einführung kontinuierlicher Verfahren und Anwendung thermostabiler α -Amylasen gegenüber diskontinuierlichen Verfahren mit klassischen α -Amylasen auf ein Viertel (2 MJ/Ethanol) gesenkt werden.

2.5.2 Exkurs: Stickstoffquelle im Brot

Zur Veranschaulichung der Bedeutung und Größe der Stickstoffquelle im Brot, die gegebenenfalls zur Resorption zur Verfügung gestellt werden kann, sei hier von Weizenmehl als Vergleichssubstanz ausgegangen. Besäße das Mehl bezogen auf seine Trockensubstanz einen Stärkegehalt von 78% und einen Proteingehalt von 14% (Nx5,7), so entstünden bei vollständiger enzymatischer Hydrolyse der Stärke zu Glucose aus 1.000 g der Trockensubstanz aus Mehl 867g Glucose, aus denen bei aerober Hefebildung 468g Hefetrockensubstanz würden. Das wäre aber deshalb nicht möglich, weil für die Trockensubstanz der Backhefe, die einen Proteingehalt von wenigstens 45% haben sollte, 211 g resorbierbare stickstoffhaltige Verbindungen (N-Verbindungen) notwendig wären. Da aber nur 140 g Protein vorhanden wären, könnten ohne Zugabe einer anderen N-Quelle in den Fermentationsansatz maximal nur 311 g Hefetrockensubstanz gebildet und entsprechend 576 g Glucose veratmet werden. Das setzte voraus, daß der N-Gehalt des Proteins vollständig zur Resorption zur Verfügung stünde. Es blieben demzufolge 291 g Glucose, die nicht veratmet werden könnten.

Da die Zellmassebildung bei der Vergärung von Glucose 7,2 mal kleiner als bei der Atmung ist, könnten aus den verbleibenden 291 g Glucose 22 g Hefetrockensubstanz entstehen, wenn dafür weitere 10 g resorbierbare N-Verbindungen zur Verfügung gestellt würden. Das könnte aber auch durch eine Begrenzung der aeroben Fermentation geschehen. Für diesen Fall wäre es möglich, eine aerobe mit einer anaeroben Fermentation von Glucose aus einem Mehlhydrolysat so zu kombinieren, daß sich ein optimales Verhältnis zwischen beiden Fermentationen ergäbe, bei dem eine maximale Resorption der N-Verbindungen und eine entsprechend maximale Zellmassebildung an Hefe erfolgte (19).

Diese theoretischen Überlegungen gelten in gleicher Weise für die Verwendung von Brot oder Produkten vergleichbarer Zusammensetzung für fermentierbare C- und N-Quellen. Praktisch erfährt die Umsetzung der Kohlenhydrate im Brot, hauptsächlich der Stärke, in von Hefe veratembare und vergärbare Kohlenhydrate sowie des Proteins in von ihr resorbierbare N-Verbindungen ihre Begrenzung durch die Art und

das Ausmaß der Hydrolysen, so daß davon auch die Zellmassebildung an Hefe beeinflußt wird. Da die kleinste Zellmassebildung bei rein anaerober Fermentation entsteht und sie zugleich mit der kleinsten Resorption an N-Verbindungen und der größten Bildung an Ethanol verbunden ist, kann demzufolge die Zellmassebildung unter Erhalt der vollständigen Umsetzung des Kohlenhydratanteils über die Wahl des Verhältnisses zwischen aerober und anaerober Fermentation gelenkt werden.

2.5.3 Exkurs: Herstellung eines Flüssigferments

Im Zusammenhang mit der Backhefeherstellung ist ein Blick auf die noch heute in russischen Brotfabriken geübte Praxis der Herstellung eines aus Backhefe und Milchsäure bestehenden Flüssigferments von großem Interesse. Das Flüssigferment besteht aus einer milchsauren Flüssigkeit, in der Milchsäurebakterien aktiv sind und in der auf anaerobem Wege Hefe vermehrt wurde. Das Flüssigferment wird in einem zweistufigen Fermentationssystem hergestellt, das vor mehr als 60 Jahren von Ostrovsky (20) entwickelt wurde.

Das System wird mit einer Maische aus Mehl betrieben, deren Stärkeanteil enzymatisch mit Malzmehl oder amylolytisch wirkenden Enzymen aus Mikroorganismen zu Maltose oder Glucose abgebaut wird. Die Maische wird in der ersten Fermentationsstufe unter selektiven Verfahrensbedingungen durch Milchsäurebildung mit Milchsäurebakterien (*Lactobacillus delbrueckii*) gesäuert. Damit wird über die dabei erfolgende Absenkung des pH die Voraussetzung dafür geschaffen, daß in der Maische neben den dominant vorkommenden Milchsäurebakterien keine anderen Bakterien wachsen können. Die saure Maische ist deshalb stabil, ohne daß ergänzende Maßnahmen für den Erhalt ihres mikrobiologischen Zustands ergriffen werden müssen. In ihr werden in der zweiten Fermentationsstufe auf anaerobem Weg Hefezellen vermehrt. Durch die Anreicherung des milchsauren Fermentationssubstrats mit Hefezellen entsteht das Flüssigferment, das direkt zur Teigherstellung verwendet wird.

Das Flüssigferment erfüllt aufgrund der in ihm enthaltenen aktiven Milchsäurebakterien und seines Milchsäuregehalts sowie der in ihm homogen verteilten Hefezellen zugleich die Funktion der Säuerung als auch des Triebes der Teige. Das

Flüssigferment wird unter den in Rußland üblichen Bedingungen der Teigführung mit großem Erfolg zur Fermentation von Brotteigen eingesetzt.

Vom Standpunkt einer wirtschaftlichen Herstellung von Backhefe aus betrachtet, muß die Flüssigfermentherstellung jedoch als völlig unwirtschaftlich angesehen werden, weil aus der über das Mehl oder ein vergleichbares anderes Fermentations-substrat, das beispielsweise auch Rückbrot sein könnte, zur Verfügung stehenden Maltose oder Glucose auf aerobem Weg 7,2 mal mehr Hefe als auf dem beschrittenen anaeroben gewonnen werden kann. Es kommt hinzu, daß die Fermentationsprodukte Ethanol und Kohlendioxid bei dem russischen Verfahren verloren gehen, weil sie beim Fermentieren und Backen an die Umwelt abgegeben werden. Weder das Ethanol noch das Kohlendioxid werden gewonnen, weil das sich wegen des dafür erforderlichen technischen Aufwands, der die Abtrennung der Hefe vor der Destillation des Ethanols erfordert, nicht lohnt. Außerdem besitzt das Fermentationssystem zwar eine hohe Anpassung an die kontinuierliche Produktion eines bestimmten in großer Quantität mit Sauerteig herzustellenden Brottyps, es kann aber nicht für die flexible Produktion eines breiten Brotsortiments, dessen einzelne Brotsorten mit Hefe und/oder mit Sauerteig hergestellt werden, eingesetzt werden.

Die Inflexibilität des Systems ergibt sich vor allem auch daraus, daß nicht auf spezielle Ansprüche bezüglich der Fermentationszeit unterschiedlicher Teige reagiert werden kann, weil die Hefekonzentration im Flüssigferment praktisch konstant ist. Es kommt hinzu, daß der nicht fermentierbare Feststoffgehalt des Substrats mit in die Rezeptur des Brots überführt werden muß. Darin liegt eine zusätzliche Begrenzung der Verwendung des Flüssigferments für ein breites Brotsortiment begründet. Schließlich ist darauf hinzuweisen, daß nur für die anaerobe Fermentation das für die Hefe verwertbare Stickstoffangebot aus dem Mehl ausreicht, um bei vollständiger Umsetzung des zu Zucker hydrolysierten Stärkeanteils in Ethanol und Kohlendioxid die unter anaerober Fermentation mögliche Hefemasse zu bilden.

Abgesehen davon, daß es sich bei der Hefe im Flüssigferment um eine spezielle der anaeroben Fermentation im sauren Milieu angepaßte Hefe handelt, die für das Brotbacken mit langen Gärzeiten geeignet ist, wird für die Einstellung einer ausreichenden Triebkraft während der anaeroben Fermentation des Substrats eine zusätzliche Stickstoffquelle zugeführt. Das ist deshalb erforderlich, weil die aus dem Mehl oder Malz stammenden, resorbierbaren Stickstoffverbindungen nicht ausreichen, um auf den für eine hohe Triebkraft erforderlichen Proteingehalt zu kommen. Der Proteingehalt von Backhefen mit hoher Triebkraft liegt im Bereich von 45-55% der Hefetrockenmasse.

Zur Erläuterung des Zusammenhangs zwischen Triebkraft und Gärzeit des Teigs zeigt eine Beispielrechnung für das Bierbrauen, daß aus dem Maltose- und Stickstoffangebot aus Malz aus 100g Maltose 7,5 g Hefetrockenmasse entstehen, die nur einen Proteingehalt von ca. 20-25% besitzen (21). Die Übertragung dieses Rechenbeispiels auf hydrolysiertes Brot als Fermentationssubstrat für eine anaerobe Backheferstellung würde unter der Annahme eines zum Malz vergleichbaren resorbierbaren Stickstoffangebots rechnerisch zwar zu einer Ausbeute an Backhefe führen, die der Ausbeute an Bierhefe beim Vergären der Würze entspräche, deren Triebkraft wäre jedoch wegen des niedrigen Proteingehalts viel zu klein.

3 Ansatz zur Lösung der Aufgabenstellung

Trotz all dieser Einschränkungen lieferte die Herstellung des Flüssigferments den grundsätzlichen gedanklichen Ansatz für die Lösung der Aufgabenstellung, weil sie die Möglichkeit eröffnet, zwei wesentliche Rohstoffe für die Backwarenproduktion, nämlich Backhefe und Flüssigsauer, produktionsintegriert aus Rückbrot herstellen zu können. Während nun die Herstellung des Flüssigferments in den russischen Fabriken auf einfache Weise auf die Produktionskapazität und Produktionsmenge an Backwaren abgestimmt werden kann, ergibt sich dieser Vorteil für den Einsatz eines vergleichbaren Verfahrens in deutschen Fabriken für die Verwertung der täglich insgesamt anfallenden Rückbrotmenge nicht, weil die daraus maximal herstellbare

Hefemenge viel größer ist als eine beliebige Brotfabrik an Hefe und/oder Sauerteig benötigt.

Für die als Beispiel für die Verfahrensentwicklung betrachtete Brotfabrik, die bei einer durchschnittlichen täglichen Produktion von 300t eine Rückbrotmenge von 30t zu verwerten hat, beträgt der Verbrauch an Backhefe (H27) nur etwa 5 t pro Tag und die auf den Säuregrad der Sauerteigbackwaren bezogene Säuremenge ist nur 100-150 kg groß. Die betrachtete Brotfabrik ist der in Neufahrn, Bayern, gelegene Betrieb der Müller-Brot AG.

Aus der Rückbrotmenge könnte nach Hydrolyse ihres Stärkegehalts zu Glucose bei aerober Fermentation viel mehr Hefe produziert werden als benötigt wird. Zur Erläuterung sei hier für den rechnerischen Idealfall angenommen, daß die Trockenmasse des Rückbrots einen Stärkegehalt von 65% besäße und der Trockenmassegehalt des Rückbrots 60% betrüge. Es entstünden dementsprechend bei einer vollständigen Hydrolyse der Stärke 13t Glucose und daraus bei der Hefevermehrung 7t Hefetrockenmasse, bzw. 26t Backhefe (H27).

Würde jedoch die Rückbrotmenge analog zum russischen Verfahren aerob fermentiert, so würden im rechnerischen Idealfall zwar aus 30t Rückbrot/d ca. 5,1t Ethanol/d und ca. 4,8 t Kohlendioxid/d neben ca. 3 t Hefe/d anfallen, diese Hefemasse wäre jedoch deutlich kleiner als es dem Bedarf der Fabrik entspricht. In dieser Betrachtung bleibt die Qualität der Hefe, die in ihrer Triebkraft zum Ausdruck kommt, zunächst unberücksichtigt.

Die Lösung der Aufgabenstellung wurde entsprechend dieser Überlegungen in der Kombination einer aeroben mit einer anaeroben Fermentation des aus Rückbrot herstellbaren Fermentationssubstrats und der produktionsintegrierten Gewinnung, Aufarbeitung und Verwertung der dabei anfallenden Nebenprodukte gesucht. Dafür zeichneten sich zwei Lösungswege ab. Der eine bestand in der Möglichkeit der Durchführung der sogenannten aeroben Gärung und der andere darin, das Substrat in zwei Teilströme aufzuteilen und den einen zur aeroben Hefevermehrung und den anderen zur Ethanol- und Kohlendioxidherstellung einzusetzen.

Für beide Lösungsansätze war aus den vorgenannten Überlegungen abzuleiten, daß für eine hohe Triebkraft der Backhefe das Angebot an resorbierbarem Stickstoff im

Substrat gegenüber dem aus dem Rückbrot vorhandenen erhöht werden muß. Dafür bietet es sich an, entweder eine resorbierbare N-Quelle zuzufügen oder die über den Proteingehalt des Brotes vorhandene N-Quelle resorbierbar zu machen. Für die benötigte Backhefemenge (H27) von 5 t/d, die einem Proteingehalt von 45-55% in der Trockenmasse aufweisen sollte, entspräche das einer Stickstoffmenge von 90-120 kg Stickstoff/d.

Hinsichtlich der Verwirklichung eines aus aerober und anaerober Fermentation kombinierten Verfahrens ist es zusätzlich notwendig, die Masseströme so zu lenken, daß die in der aeroben Stufe erforderliche hohe Verdünnung des Fermentationssubstrats zur Absenkung der Zuckerkonzentration auf die für die aerobe Fermentation zulässige Höhe möglich wird. Aus dieser Notwendigkeit ergibt es sich, daß ein beide Fermentationen umfassendes Konzept für die aufeinander abzustimmenden Masseströme erstellt werden muß. Dieses Konzept muß auf eine Minimierung des Prozeßwasservolumens und seiner Fracht gerichtet werden, damit im Verfahren kein Abwasser entsteht. Daraus ergaben sich zwei technische Fragestellungen. Die eine bezog sich auf die Auswahl der Prozeßtechnik der Hefevermehrung und die andere auf die produktionsintegrierte Verwertung des Prozeßwassers über den Gesamtverfahrensablauf der Brot- und Rückbrot-aufarbeitung.

3.1 Schritte zur Lösung der Aufgabenstellung

Die vorstehend skizzierte Lösung der Aufgabenstellung erfolgte schrittweise mit der Zielsetzung, eine möglichst einfache und sichere Prozeßtechnik für die in den Produktionsprozeß von Brotfabriken zu integrierende biotechnologische Aufarbeitung und Umsetzung des Rückbrots in für die Brotherstellung direkt und indirekt verwertbare Produkte zu entwickeln. Aus den zur Lösung der Aufgabenstellung vorgesehenen fermentativen Prozeßschritten, die sich aus der Aufgabe der vollständigen Verwertung des Rückbrots in einem Produktionsbetrieb ergeben, zeichnete sich ab, daß dies Backhefe, ein milchsaures Prozeßwasser (Flüssigsauer),

ein enzymatisch nicht verflüssigbarer Reststoff aus Proteinen und Ballaststoffen (Proteinfraktion), Ethanol und Kohlendioxid sein würden.

Für die beispielhaft untersuchte Fabrik sind unter „Rückbrot“ verpackte, geschnittene Brote (Schnittbrot) verschiedener Zusammensetzung, ganze unverpackte Brotlaibe, Kleingebäck (Brötchen, Brezeln, Plunderstücke) und Kuchen zu verstehen. Dieses Rückbrot fällt in unterschiedlichen Mengen an, so daß die aufzuarbeitende Masse eine gewisse Schwankungsbreite in der Inhaltsstoffzusammensetzung aufweist. Das verpackte Brot muß vor der Aufarbeitung entpackt werden, wofür ein Aufarbeitungsschritt erforderlich ist, der hier für die Entwicklung des Verfahrens nicht weiter untersucht wird, weil er zum Stand der Technik gehört. Er wird allerdings in die Wirtschaftlichkeitsberechnung für das gesamte Verfahren einbezogen.

Die für die Verwertung der aus dem Rückbrot herstellbaren Produkte entscheidenden Prozeßschritte beginnen erst nach dem Entpacken des Brots. Diese Prozeßschritte sollen hier einleitend grob gegliedert werden, um dann anhand dieser Gliederung die für die Entwicklung des Verfahrens erforderlichen Untersuchungen darzustellen. Die Prozeßschritte bestehen in der

- enzymatischen Aufarbeitung des Rückbrots zu einem Brotsirup,
- Versäuerung des Brotsirups mit Milchsäurebakterien,
- Aufarbeitung des versäuerten Brotsirups zum Fermentationssubstrat,
- Verwertung des Fermentationssubstrats zur Herstellung von Backhefe-, Ethanol-, Kohlendioxid und Flüssigsauer
- Verwertung der Backhefe als aus dem fermentierten Substrat gewonnenes Konzentrat (Flüssighefe) zum Brotbacken,
- Verwertung der Proteinfraktion zum Brotbacken,
- Destillation des anaerob fermentierten Substrats,
- Verwertung des vom Ethanol befreiten fermentierten Substrats als Flüssigsauer zum Brotbacken.

Der Prozeßschritt der Destillation des anaerob fermentierten Substrats ist nur in soweit durchgeführt worden, wie er für die Führung des Prozeßwasserstroms des Flüssigsauers und seiner Verwertung erforderlich war. Dazu wurde ein Aliquot des milchsauren Substrats anaerob fermentiert, aus ihm die Hefe zentrifugal abgeschieden und danach das Ethanol durch Erwärmen des Flüssigsauers ausgetrieben. Die Verfahrensschritte der Destillation des Ethanols und der Verflüssigung des Kohlendioxids wurden nicht durchgeführt, weil sie zum Stand der Technik gehören. Sie werden aber in der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf der Grundlage dafür bekannter Zahlen berücksichtigt.

4 Material und Methoden

Für die Durchführung der Entwicklung der Prozeßtechnik waren sowohl Versuche im Labor- als auch im Technikumsmaßstab erforderlich. Einige Versuche mußten zur Abschätzung einer Maßstabsvergrößerung auch im Pilotmaßstab durchgeführt werden. Die Versuchsanordnungen wurden in Abhängigkeit von den jeweils erzielten Erkenntnissen solange ergänzt und modifiziert, bis sich die Verfahrensschritte als technisch durchführbar erwiesen. Nachfolgend werden der Entwicklung des Verfahrens entsprechend zunächst der Aufbau und Betrieb der Anlagen zur Aufarbeitung des Rückbrots zu Brotsirup, zur Versäuerung des Sirups, zur Aufarbeitung des versäuerten Sirups zum Fermentationssubstrat und schließlich zur Verwertung des versäuerten Fermentationssubstrats zur Herstellung von Flüssighefe und Flüssigsauer beschrieben. Die Inoculi für alle nachfolgend beschriebenen Fermentationsanlagen wurden in üblicher Weise im mikrobiologischen Labor als Reinzucht herangeführt. Das galt sowohl für die Backhefen als auch die Sauerteigbakterien.

Es wurden sich in der Baugröße und im Betrieb unterscheidende Anlagen aufgebaut. Bezogen auf ihre Funktion werden diese Anlagen im folgenden als Labor-, Technikums- und Pilotanlage bezeichnet. Die Labor- und Technikumsanlage wurden sowohl in ihrem konstruktiven Aufbau als auch ihre Betriebsweise vielen Veränderungen unterworfen, die hier nicht alle geschildert werden können. Es werden deshalb nur die Bauformen beschrieben, mit denen die für die Auswahl der Verfahrensschritte und ihre Abstimmung aufeinander wichtigsten Ergebnisse erzielt worden sind.

4.1 Aufbau und Betrieb der Laboranlage

Die Laboranlage bestand aus einem Sirupkocher, einem Versäuerungsbehälter, zwei Hefefermentern und zwei Lagerbehältern. Die Bereitung des Brotsirups, seine Versäuerung und Aufarbeitung zum Fermentationssubstrat erfolgte diskontinuierlich.

Der Sirup wurde entweder aus getrocknetem und pulverisiertem Rückbrot (Brotpulver) oder aus Rückbrot, wie es von der beispielhaft untersuchten Fabrik aus dem Handel zurückgenommen wird, bereitet (vgl. 4.5). Das Brotpulver und das aus dem Handel stammende Rückbrot, das nachfolgend als Brot bezeichnet wird, entsprachen in ihrer Zusammensetzung über die Zeit der Durchführung der Versuche jeweils einer Durchschnittsmischung der zuvor genannten Produkte.

Das Fermentationssubstrat wurde kontinuierlich sowohl anaerob als auch aerob/anaerob und aerob fermentiert. In den Fermentern wurde außerdem ein Modellsubstrat aerob und anaerob/aerob fermentiert. Das Modellsubstrat wurde aus Glucose, Kleie und Wasser hergestellt. Es wurde nach der Versäuerung analog zum Fermentationssubstrat aufbereitet.

4.1.1 Sirupherstellung mit der Laboranlage

Als Sirupkocher wurde ein temperierbarer Doppelmantelbehälter mit Rührwerk eingesetzt, der ein Füllvolumen von 3,2 l besitzt. Der Sirupkocher wurde über ein Wasserbad temperiert.

Brotpulver wurde außerhalb des Reaktors mit α -Amylase (L-840, Genencor) zu einer Maische vermischt. Die Maische wurde in den Sirupkochbehälter gegeben. Der Sirupkochbehälter wurde für 2 h auf eine Temperatur von 70°C erwärmt, um die Stärke zu verflüssigen. Anschließend wurde der Sirupkochbehälter auf 60°C abgekühlt. Bei dieser Temperatur erfolgte die Zugabe von Glucoamylase (L-300, Genencor), um die verflüssigte Stärke zu Glucose abzubauen.

Nach einem Zeitraum von bis zu 15 h wurde die Temperatur des Brotsirups bei einigen Versuchen auf die Reaktionstemperatur von proteolytisch wirkenden Enzymen eingestellt. Die Reaktionszeit der verwendeten Proteasen (Corolase L10, PN-L, 7089, 7092 und PP, Röhm, Tab. 2) betrug jeweils 16 h. Die Maische wurde vor der Zugabe der Proteasen auf die vom Enzymhersteller angegebene Reaktionstemperatur und den angegebenen pH-Wert eingestellt.

Tabelle 2: Reaktionsbedingungen für die Proteolyse von Brotsirup

Enzym ¹⁾	Reaktionstemperatur (°C)	pH-Wert	Dosierung (g/kg Protein TS)
Corolase PP	50 (50-60) ²⁾	8,4 (8-9)	1,4 (0,1-5)
Corolase PN-L	48 (30-50)	5,0 (5-8)	2,8 (0,2-10)
Corolase 7089	50 (30-60)	7,1 (7)	1,4 (0,1-5)
Corolase L 10	55 (55-65)	6,1 (5-7)	1,4 (0,1-5)

1) Reaktionszeit betrug für alle Versuche 17 h

2) Werte in Klammern entsprechen Herstellerangaben

Nach Abschluß der enzymatischen Reaktionen wurde der Brotsirup auf 100°C aufgeheizt, um die Enzyme zu inaktivieren. Diese Temperatur reichte zur Inaktivierung aus, weil keine thermostabilen α -Amylasen eingesetzt wurden. Der Einsatz solcher Amylasen verbot sich, weil der Prozeßstrom des Flüssigsauers zum Brotbacken vorgesehen war. Eine thermostabile α -Amylase würde die Brotkrume zerstören. Anschließend wurde der Sirup auf die Versäuerungstemperatur von 50°C abgekühlt.

4.1.2 Versäuerung des Brotsirups und Modellsubstrats

Der Brotsirup wurde in einen verschließbaren Kunststoffbehälter gefüllt und mit einer vorher auf Brotsirup herangezogenen Kultur mit *Lactobacillus delbrueckii* (L. delbrueckii 0597, BFGKF in Detmold und Münster) beimpft. Diese als Anstellsauer bezeichnete Kultur wurde in einem Verhältnis von 1-2 Teilen Anstellsauer zu 8-9 Teilen Brotsirup zugegeben. Der beimpfte Brotsirup wurde anschließend bei 50 °C im Wärmeschrank für etwa 24 h inkubiert.

Das Modellsubstrat aus mühlenüblicher Weizenkleie, Glucose und Leitungswasser wurde entsprechend versäuert. Das Modellsubstrat diente gegenüber dem Brotsirup als idealisiertes Nährsubstrat. Es enthielt durch die Extraktion der Weizenkleie alle für die anaerobe Fermentation von Hefe erforderlichen Nähr- und Wachstoffsstoffe. Das Modellprozeßwasser wurde im Verhältnis 1:10:89 mit Glucose, Weizenkleie und

Leitungswasser angesetzt. Ein Aliquot des Ansatzes wurde mit *L. delbrueckii* versäuert. Dieser versäuerte Teil diente als Anstellsauer für die Versäuerung des Modellsubstrats.

Die im Brotsirup und Modellsubstrat enthaltenen groben Bestandteile wurden mit einem Sieb mit der Maschenweite 500µm abgetrennt. Die so vorbereiteten Fluide wurden anschließend in einer Becherzentrifuge (Varifuge3.2, Heraeus) bei 5000 UPM für 5 min zentrifugiert. Die Überstände dienten als Fermentationssubstrate und die Rückstände wurden verworfen.

Der Glucosegehalt der Überstände wurde je nach Versuchsanordnung entweder durch Glucosezugabe oder Verdünnung mit Leitungswasser oder Flüssigsauer für die Fermentationen eingesetzt.

Die Versäuerung des Brotsirups und des Modellsubstrats wurde generell durch Messung des pH-Wertes und titrimetrischer Bestimmung des Säuregrads bestimmt. Die Säuerung wurde in ausgewählten Substraten zusätzlich durch enzymatische Bestimmung des Milchsäuregehalts festgestellt.

4.1.3 Kontinuierliche aerobe und anaerobe Fermentation: Laborfermenter

Die Fermentationssubstrate wurden aerob in einem doppelwandigen Fermenter aus Glas, der ein Volumen von 1,5 L besaß, fermentiert. Der Fermenter wurde wahlweise steril und unsteril betrieben. Das Fermentationssubstrat und die Verdünnungsflüssigkeit wurden zur Verhinderung unerwünschten Mikroorganismenwachstums bei 50°C gelagert. Die Nährsubstrate wurden von dort über zwei Schlauchpumpen in den Fermenter zugeführt. Dem Fermentationssubstrat aus Brotsirup wurde für einige Versuche zusätzlich eine für das Hefewachstum erforderliche Nährlösung (N-Quelle, Vitamine, Mineralstoffe) zugesetzt. Die Nährlösung wurde mit dem Substrat vermischt zugegeben.

Der Fermenter wurde mittels eines Magnetrührers gerührt, die Belüftung erfolgte zur Feinverteilung der Luft über einen am Boden angebrachten Sinterstein. Der Fermenter wurde über ein Wasserbad auf 30°C temperiert. Der pH-Wert wurde mit

einer im Fermenter befindlichen Elektrode gemessen und mit einem Titrator (Titrino, Metrohm) durch Zugabe von Lauge (0,1 n NaOH) konstant gehalten. Der Ablauf aus dem Fermenter wurde mit einer Schlauchpumpe so geregelt, daß der Füllstand immer konstant blieb. Die Konzentration an Hefezellen im Fermenter wurde über die pro Zeiteinheit zugegebene Glucosemenge konstant gehalten. Der Ablauf wurde gesammelt und zur Abscheidung der Hefe mit einer Becherzentrifuge (Varifuge, Heraeus) zentrifugiert.

Die anaerobe Fermentation erfolgte kontinuierlich in einem mit einem Rührwerk ausgestatteten Fermenter, der mit einem Wasserbad auf 30°C temperiert wurde. Der Fermenter hatte ein Volumen von 5 L. Das Substrat wurde aus einem auf 50°C temperierten Zulaufbehälter mit einer Schlauchpumpe in den Fermenter gefördert. Das fermentierte Substrat wurde aus dem Fermenter mit einer weiteren Schlauchpumpe in einen Ablaufbehälter gefördert.

Da die Konzentration an Hefezellen in beiden Fermentern gleich groß sein sollte, die Umsatzrate unter aeroben Bedingungen aber sehr viel größer als unter anaeroben ist, wurden zwei Zulaufbehälter mit unterschiedlicher Glucosekonzentration verwendet, um die Hefekonzentration in beiden Fermentern gleich zu halten. Die Fermenter wurden kontinuierlich so betrieben, daß es während der Verweilzeit des Substrats zum vollständigen Abbau der Glucose kam. Der Ablauf des aeroben Fermenters wurde dann in den anaeroben Fermenter geleitet. Der Ablauf des anaeroben Fermenters wurde in den Ablaufbehälter geleitet und auf 8°C gekühlt. Zur Förderung der Volumenströme wurden Schlauchpumpen (Masterflex 1-100 und 6-600, Cole-Parmer) verwendet.

4.2 Aufbau und Betrieb der Technikumsanlage

Die Technikumsanlage bestand aus dem Anlagenteil zur Bereitung und Aufarbeitung von Brotsirup und zur Fermentation des aus dem Brotsirup gewonnenen Substrats (Abb. 1). Die Bereitung des Brotsirups, seine Versäuerung und Aufarbeitung zum Fermentationssubstrat erfolgte diskontinuierlich. Das Fermentationssubstrat wurde kontinuierlich sowohl aerob als auch anaerob fermentiert. Das Anlagenteil zur Sirupherstellung und Aufarbeitung besteht aus einem doppelwandigen Kochbehälter mit wandschabendem Rührwerk (Volumen: 300 L, 1), der mit Wärmeträgeröl aus

einer Wärmeübertragungsanlage temperiert (STO 1-18-42 D2, Single) wird, einem Fermenter mit wandschabendem Rührwerk zum Versäuern des Brotsirups (Volumen: 200 L, 2), einem Schwingsieb (600 LS 24S, Sweco, 3), einem Dekanter (CA 150, Westfalia Separator, 5), einem Tellerseparator (NA7, Westfalia Separator, 6) und einer Schneckenpresse (P-Spezial, Vetter, 4). Der Dekanter wurde auf der Seite des Klarlaufs mit einer Tauchscheibe ausgestattet. Diese Scheibe wies einen Durchmesser von 136 mm auf. Sie diente dazu, die auf der im Dekanter rotierenden Flüssigkeit aufschwimmende Fettschicht mit in das Sediment zu drücken. Diese Maßnahme war erforderlich, weil das Rückbrot einen relativ hohen Fettgehalt aufweist, der nicht mit in das Fermentationssubstrat gelangen sollte. Die einzelnen Elemente wurden mit Rohrleitungen über Pumpen verbunden. Im Bereich der Herstellung des Fermentationssubstrats wurden Exzentrerschneckenpumpen (2NE20, Netch) und im Bereich seiner Fermentation Schlauchpumpen (Masterflex, Cole-Parmer) eingesetzt.

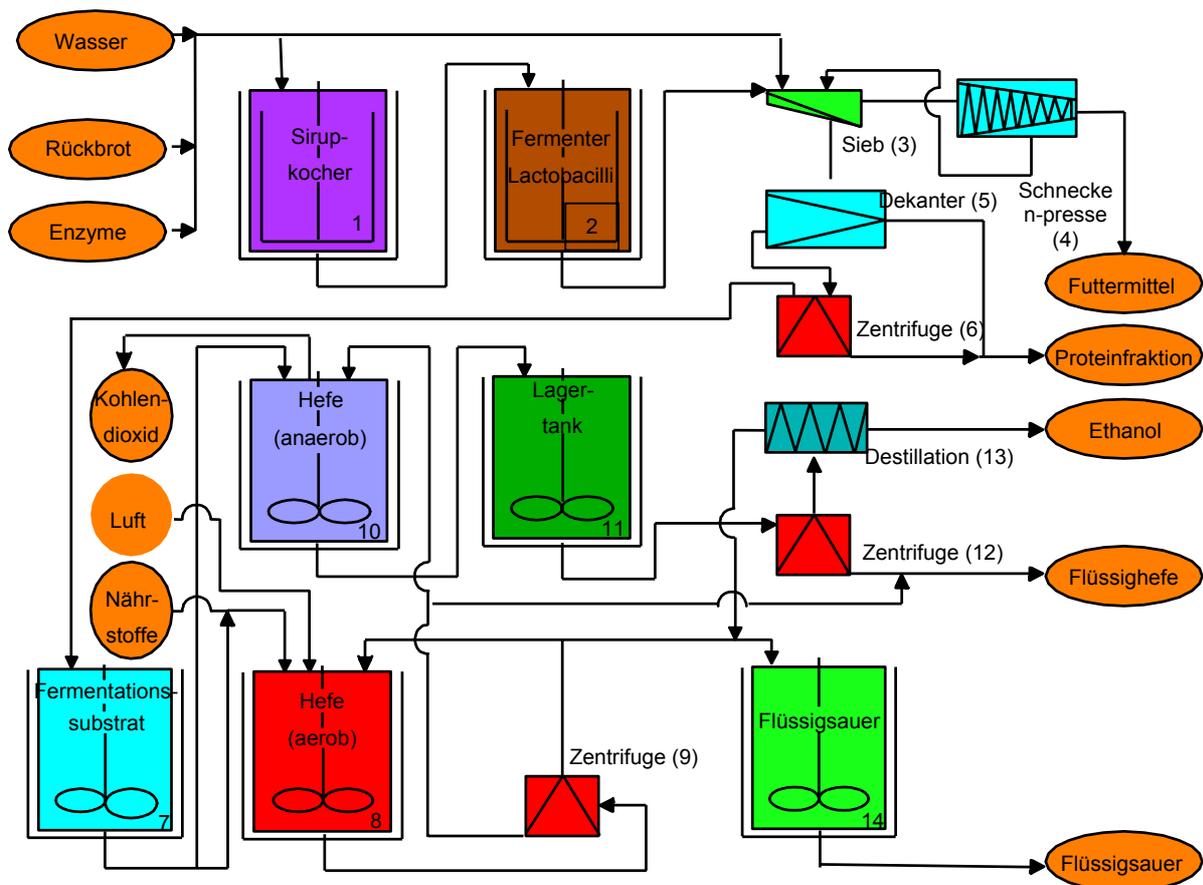


Abbildung 1: Vereinfachtes Fließschema der Technikumsanlage.

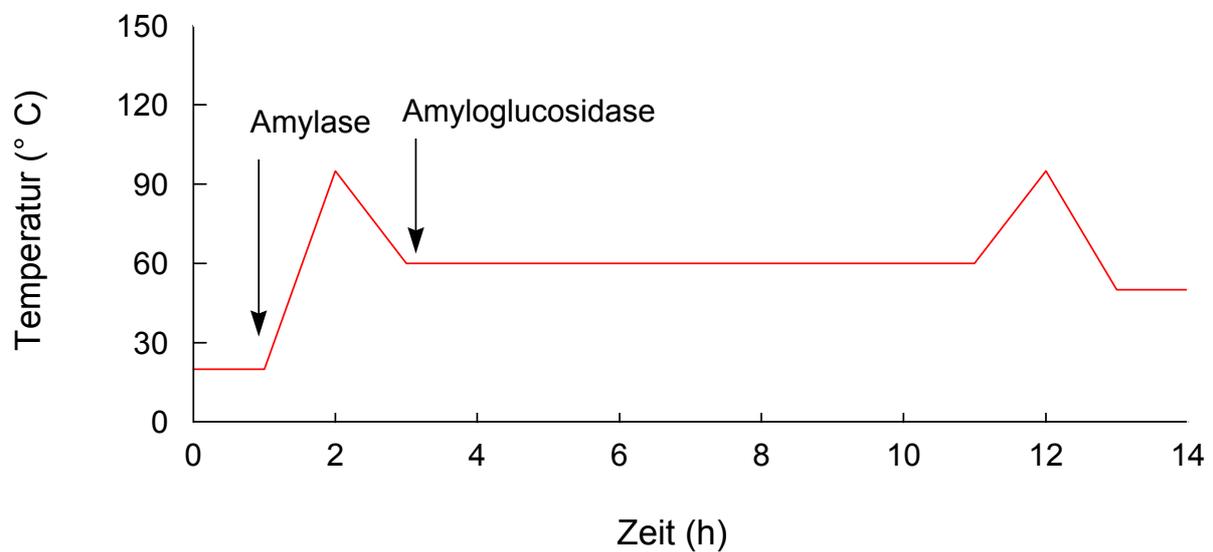
4.2.1 Sirupherstellung und -versäuerung mit der Technikumsanlage

80kg pulverisiertes Rückbrot wurde mit 100 L Leitungswasser im Sirupkocher zu einer Maische gemischt. Dem Leitungswasser wurde α -Amylase (Dexlo, Genencor) zugegeben. Der Mischvorgang dauerte 1 h (Abb. 2). Danach wurde die Maische in 2 h auf 95°C erwärmt. Der pH mußte nicht eingestellt werden, weil der pH der Maische aufgrund des Säuregehalts im Rückbrot im Wirkungsoptimum der Enzyme lag. Außerdem brauchten keine Ca-Ionen zur Aktivierung der α -Amylase zugesetzt werden, weil das Leitungswasser eine ausreichende Ca-Härte besaß. Nach Erreichen der Temperatur von 95°C wurde die verflüssigte Maische in 1 h auf 60°C gekühlt und dann mit Amyloglucosidase (Optidex L-300, Genencor) versetzt. Die Zugabemengen an den Enzymen betragen für die α -Amylase und für die Amyloglucosidase je 1 ml pro kg Stärke im Brot. Die spezielle Aktivität der Enzyme ergibt sich aus der vom Hersteller für die Produktkennzeichnung gegebenen Spezifikationen.

Nach einer Verzuckerungszeit von 10 h wurde der Sirup zur Inaktivierung der Enzyme auf 95°C erwärmt. Anschließend wurde der Sirup auf die für seine Versäuerung mit *L. delbrückii* erforderliche Temperatur von 50°C abgekühlt. Die Versäuerung erfolgte in der Weise, daß der Sirup in den Versäuerungsbehälter gepumpt wurde, in dem sich noch 10% des vorangegangenen Ansatzes befanden. Die Versäuerung dauerte 20-24 h.

Der versäuerte Sirup wurde zur Trennung von groben Bestandteilen über das Schwingsieb (Maschenweite: 500 μ m) geleitet. Der Oberlauf wurde mit der Schneckenpresse entwässert. Das Preßwasser wurde als Prozeßwasser in den Prozeß zurückgeführt. Der Preßrückstand wurde nach Feststellung seiner Masse und Probenahme zur Bestimmung seiner Zusammensetzung verworfen. Der Unterlauf wurde zur Abtrennung der in ihm suspendierten Feststoffe in zwei Stufen zentrifugiert. Dazu wurde der Brotsirup zunächst durch den Dekanter und danach durch die Entschlammungszentrifuge gefördert. Dadurch entstand als Oberlauf ein teilgeklärtes Fermentationssubstrat, das in dem temperierbaren Lagerbehälter bei 50°C gelagert wurde.

Der Dekanter wurde bei einer Drehzahl von 6600 Upm, einer Differenzdrehzahl von 30 Upm und einem Zulauf von 300 l/h betrieben. Das Überlaufwehr wurde auf Stufe 14 eingestellt. Der Dekanter besaß eine Fettrückführscheibe im Bereich des Klarlaufaustrags. Der Tellerseparator wurde bei 8500Upm und einem Zulauf von 300 l/h als Entschlammer betrieben. Die Entschlammung erfolgte etwa alle 4 min für 3 s. Die anfallenden Sedimente wurden in einigen Versuchen mit Leitungswasser aufgeschlämmt und erneut zentrifugiert, um die in ihnen enthaltene Glucose zu extrahieren.



TUB - GV 1371/98

Abbildung 2: Temperaturverlauf bei der Bereitung des Sirups aus Rückbrot.

4.2.2 Kontinuierliche aerobe und anaerobe Fermentation: Technikumsanlage

Die aerobe und anaerobe Fermentation des Substrats bildeten die zentrale Aufgabe in der Entwicklung des Verfahrens. Da erstrebt wurde, diese bei ausreichender Betriebssicherheit möglichst einfach zu gestalten, erfolgte die Durchführung dieser Aufgabenstellung durch schrittweise Anpassung der Ausführung des aeroben Fermenters an die Mindestanforderungen für einen sicheren Betrieb. Diese Anforderungen wurden aus den in den Entwicklungsschritten erzielten Ergebnissen

abgeleitet. Nachfolgend wird die Fermentationsanlage, ausgehend von ihrer einfachsten Bauform, beschrieben.

4.2.2.1 Beschreibung der Fermentationsanlage

Die Fermentationsanlage bestand aus einem temperierbaren Vorratsbehälter für das Fermentationssubstrat (Volumen: 200 l, 7), einem aeroben Fermenter mit schnelllaufendem Rührwerk (Volumen 70 l, 8), der über eine Sinterplatte mit einem Kompressor (23 CM, Hydrovane Compressor) belüftet wurde, einem anaeroben temperierbaren Fermenter mit einem langsam laufendem Rührwerk (Volumen: 200 l, 10), einem temperierbaren Zwischenlagertank für das fermentierte Substrat (Volumen: 200 l, 11), den Fermentern zugeordnete Tellerseparatoren (NA7, Westfalia Separator, 9, 12), einer Abdampfanlage (Centri Therm CT 1 B, Alfa Laval, 13) sowie einem temperierbaren Lagertank für den Flüssigsauer (Volumen: 200 l, 14).

4.2.2.2 Beschreibung des kontinuierlichen Fermenters

Der kontinuierliche Fermenter und seine Steuerung wurden speziell für diesen Anwendungszweck ausgelegt und konstruiert. Der Fermenter bestand aus einem doppelwandigen Behälter aus Edelstahl mit einem Füllvolumen von 60l. Die Innenmaße des Rohrs betragen $D = 250 \text{ mm}$ und $H = 1250 \text{ mm}$. Der Fermenter wurde mit einem Rührwerk ausgestattet, welches drei Scheibenrührer mit einem Durchmesser von 100 mm aufwies. Die maximale Drehzahl des Rührers betrug 700 Upm. Am Rand der Innenwandungen wurden vier Strömungsbrecher angebracht. Zur Dosierung des Substrats, der Nährlösung und von Lauge wurden drei Anschlußstutzen in der Deckelplatte angebracht. Ein weiterer Stutzen wurde in die Deckelplatte eingebaut, um die Abluft über ein abschraubbares Abluffilter abführen zu können. Die Zuluft wurde mit einem Wälzkolbengebläse (RV 12H16G, Bauknecht) über einen Sterilluftfilter (360019P, Satorius) von unten über eine Edelstahl-Sinterplatte (Porengröße $30\mu\text{m}$) in den Fermenter geleitet.

Die in die Bodenplatte über einen Rohrstutzen eingebaute Sinterplatte war nach unten abgedichtet. Sie befand sich etwa 150mm über der Bodenplatte. Der Abstand wurde gewählt, damit die in der Bodenplatte befindlichen Meßsensoren,

insbesondere der Sensor für die Sauerstoffmessung, nicht durch den Kontakt mit den aufsteigenden Luftblasen in ihrer Funktion beeinträchtigt wurden. Der Ablauf des fermentierten Substrats erfolgte über einen Stutzen in der Bodenplatte.

Die ablaufende Flüssigkeit wurde mit einer frequenzgeregelten Membranpumpe (ML75, Jesco) in einen Labordekanter (MDZ 003, Lemitec) gefördert. In diesem wurde die Hefe von der Fermentationsbrühe abgetrennt und gelangte über den Auswurfschacht in ein Sammelgefäß. Der Klarlauf floß in ein Puffergefäß (Volumen 2 l) ab, von dem es entweder über eine für den Rücklauf vorgesehene Schlauchpumpe zurück in den Fermenter gefördert wurde oder über eine für den Klarlauf bestimmte Schlauchpumpe in ein Sammelgefäß gefördert wurde. Zwischen Ablaufstutzen und Membranpumpe befand sich in der Rohrleitung ein Sensor zur Trübungsmessung (CSB, Monitec) und ein pH-Sensor (pH 2100, Ingold).

In die Bodenplatte des Fermenters war ein Sensor zur Messung des gelösten Sauerstoffs (S 1131 Oxiform, Yokogawa) und ein Sensor zur Messung des Ethanol eingebaut. Beide Sensoren ragten in den Fermenter hinein. Der Fermenter war auf einer Grundplatte befestigt, unter der sich eine Wiegezeile (Dosimat E, Schenk) befand, die auf einem den Fermenter umschließenden Traggerüst lagerte. Im oberen Teil des Traggerüsts befanden sich Stützrollen aus Teflon, die den Fermenter in horizontaler Richtung führten und so die Funktion der Wiegezeile gewährleisteten. Der Fermenter wurde durch Umpumpen von Wasser aus einem Wasserbad durch den Doppelmantel temperiert.

Die den Meßsensoren jeweils zugehörigen Meßumwandler gaben ein Signal (4-20mA) an einen Modulträger (ME137, Meilhaus Electronic). Die auf den Modulträger eingesteckten Module dienten der galvanischen Entkopplung des Meßsignals. Die Module gaben ein Signal (0-5V) an eine Meßkarte (ME300, Meilhaus Electronic), welche die eingehenden analogen Signale in digitale umwandelte und an einen Prozeßrechner (Betriebssystem: Windows 95, Prozessor: Pentium 133 MHz, Teamhaus) weitergaben (Dateninput). Die Signale wurden mit einer speziellen Software (HP VEE x.0; Hewlett Packard) zur Regelung der Fermentation verwertet. Dabei erfolgte der Datenoutput entweder über den Modulträger oder eine optisch entkoppelte Relaiskarte (ME 131, Meilhaus Electronic).

Das Meßprinzip für die Messung des pH-Wertes des fermentierenden Substrats und die des Gewichts des befüllten Fermenters mit einer Wiegezeile erfolgte durch elektronische Meßwertaufnahme. Die Trübung des Substrats wurde über die Auslöschung des Lichts einer Glühlampe mit einer Photozelle bestimmt. Die Glühlampe und die Photozelle waren in zwei sich gegenüberliegenden Glaszylindern angeordnet. Der Spalt zwischen den Glaszylindern bildete den Meßweg, über den die optische Dichte des Substrats gemessen wurde.

Die Ethanolmessung erfolgte in einem sogenannten CH-Meßmodul. Das Meßmodul hat über eine semipermeable Sondenmembran Kontakt zum Substrat, das die flüchtige Kohlenwasserstoffverbindung (CH), in diesem Fall das Ethanol, enthält. Das Ethanol diffundiert aus dem Substrat über eine Membran in einen Luftstrom aus synthetischer Luft. Das Ethanol bewirkt an dem im Meßmodul enthaltenen Sensor eine zu seiner Konzentration (FMG Mini 3.06, Biotechnologie Kempe) proportionale Widerstandsänderung, die gemessen wird.

Die Sauerstoffmessung erfolgte mit einer Clark-Elektrode im Substrat (SM 31 Yokogawa).

4.2.2.3 Kontinuierlicher Betrieb des aeroben und anaeroben Fermenters

Die Einzelleistungen der Fermenter richteten sich nach den Teilungsverhältnissen zwischen aerober und anaerober Fermentation. Darüber wurde auch die Nährstoffversorgung bestimmt, hauptsächlich die mit resorbierbaren stickstoffhaltigen Substanzen. Daraus ergab sich die Ausbeute an Backhefe und Ethanol sowie das Volumen für den Flüssigsauer.

Die Abtrennung der Hefe erfolgte anfänglich mit dem im Fließbild eingezeichneten Tellerseparator. In späteren Versuchen wurde die Hefe mit Hilfe eines Labordekanter abgetrennt (vgl. 4.2.2.2). Der hefefreie Klarlauf des Separators wurde in die Abdampfanlage geleitet, um das Ethanol abzdampfen. Der beim Abdampfen als Sumpf anfallende milchsäurehaltige Flüssigsauer wurde zur

Verdünnung des Zulaufs des aeroben Fermenters verwendet. Außerdem wurde der Flüssigsauer als Schüttwasser eingesetzt.

Es wurde angestrebt, die Hefekonzentration im aeroben Fermenter konstant zu halten. Bezogen auf die Trockenmasse der Backhefe sollte die Hefekonzentration im Bereich von 15-25 g HTS/kg fermentierendes Substrat liegen. Der Volumenstrom für die Glucosezugabe wurde so eingestellt, daß die Glucosekonzentration in einem Bereich von 0,5-1,0 g Glucose/kg Substrat lag. Der pH-Wert wurde durch kontinuierliche Zugabe von Natronlauge aufrecht erhalten. Die dadurch eingebrachten Na-Ionen wurden durch die Verwendung von Ammoniumchlorid als Stickstoffquelle abgefangen. Das diente dazu, um im Flüssigsauer nur Natriumchlorid entstehen zu lassen, das bei der Teigherstellung wichtiger Rezepturbestandteil ist.

Die Verdünnung des Zulaufs des Fermenters erfolgte durch Rückführung des Klarlaufs aus der Abscheidung der Backhefe. Die Steuerung der Fermentation geschah durch manuelle Einstellung der Pumpleistung über die im Ablauf des Fermenters in regelmäßigen Abständen durch Auszählen bestimmte Konzentration an Hefezellen. Die Überwachung der Reinheit der Hefekultur erfolgte durch Probenahme aus dem Fermenter in regelmäßigen Abständen und Anzüchtung der Hefezellen auf speziellen Nährböden.

Die aus dem Ablauf des aeroben Fermenters über die Zentrifuge konzentrierte Hefe wurde hinsichtlich ihrer Triebkraft charakterisiert und für Backversuche sowie für die anaerobe Fermentation eingesetzt. Der für die anaerobe Fermentation vorgesehene Teilstrom des Fermentationssubstrats wurde in den anaeroben Fermenter gepumpt. Der Teilstrom bestand bei diesen Versuchen aus dem von der Proteinfraction befreiten verdünnten Brotsirup. Der Ablauf aus dem anaeroben Fermenter wurde in einen Vorratstank gefördert. Der Inhalt dieses Tanks wurde einmal täglich aufgearbeitet. Dazu wurde zunächst die Hefe abgeschieden und dann das Ethanol abgedampft. Der verbleibende Flüssigsauer wurde in einem weiteren Vorratstank bis zum Verbrauch gelagert. Die Hefe wurde für die anaerobe Fermentation weiterverwendet.

4.2.2.4 Optimierung des Betriebs des kontinuierlichen Fermenters

Für den Betrieb des kontinuierlichen Fermenters wurden drei Regelkreise zur Regelung des Prozesses eingerichtet. Einer diente der Regelung des pH-Wertes, ein zweiter der Regelung des Füllstands und ein dritter der Regelung der Hefekonzentration.

Die Regelung des pH-Werts wurde durch Zugabe von Lauge vorgenommen. Das geschah, wenn der Soll-pH-Wert, der auf 3,8 festgelegt war, unterschritten wurde solange, bis der obere Soll-pH-Wert von 4,2 überschritten wurde. Die Zugabe erfolgte über die Schaltung der die Lauge fördernden Schlauchpumpe.

Die Regelung des Füllstands erfolgte durch Zugabe von Klarlauf. Dieser wurde dem Puffergefäß entnommen, das dem Labordekanter nachgeschaltet war. Dazu wurde nach Unterschreiten des Sollgewichts des Fermenters aus dem Puffergefäß durch Zuschalten einer Schlauchpumpe solange Klarlauf gefördert, bis das Sollgewicht überschritten wurde.

Die Regelung der Hefezellkonzentration wurde über die Variation des Ablaufvolumenstroms vorgenommen. Bezogen auf die Trockenmasse der Backhefe sollte die Hefekonzentration im Bereich von 15-25 g HTS/kg fermentiertes Substrat liegen. Dieser Konzentrationsbereich wurde als Vorgabe für die zur technischen Umsetzung des Verfahrens zu treffenden Überlegungen im Hinblick auf die erforderlich stabile und sichere Betriebsweise des Fermenters und den Volumen-anfall des Flüssigsauers gewählt. Dazu wurde proportional zur Trübung des Substrats der Ablaufvolumenstrom über die frequenzgeregelter Membranpumpe verändert.

Die Konzentration an Sauerstoff und Ethanol wurden zwar kontinuierlich gemessen, die Meßwerte wurden aber nicht in einen elektronisch gestützten Regelungsprozeß eingefügt. Sie dienten lediglich der Überwachung der Fermentation.

4.3 Aufbau und Betrieb der Pilotanlage

Die mit der Technikumsanlage erzielten Ergebnisse mußten zur Schaffung der Möglichkeit einer Umsetzung der Erkenntnisse auf den betrieblichen Maßstab der beispielhaft untersuchten Fabrik zunächst auf einen Pilotmaßstab übertragen werden. Diesbezüglich bildete vor allem die für die backtechnischen Versuche erforderliche Hefemenge einheitlicher Qualität eine unabdingbare Voraussetzung. Diesbezüglich war es unerheblich, ob Backhefe aus dem Brotsirup kontinuierlich oder diskontinuierlich hergestellt wurde. Die Maßstabsvergrößerung des Fermenters gegenüber dem Fermenter der Technikumsanlage mußte im Bereich eines Faktors von 10-100 erfolgen.

Da sich im Verlauf der Durchführung der Untersuchungen herausstellte, daß der Schritt zur Maßstabsvergrößerung, der den Bau und die Inbetriebnahme des Fermenters in der Brotfabrik vorsah, für den erstrebten Erkenntnisgewinn zu kostspielig sein würde, wurde entschieden, die Piloteinrichtungen einer Hefefabrik für die Pilotversuche zu nutzen. Diesbezüglich war die Fa. Agrano, Riegel, bereit, ihre Piloteinrichtungen zur Verfügung zu stellen. Die Fa. Agrano stellt sogenannte biologische Backhefe aus Weizenmehl her, das aus biologischem Anbau stammt. Das Weizenmehl ist zwar wie das Rückbrot ein stärkehaltiger Rohstoff, seine Aufarbeitung erfolgt bei der Fa. Agrano jedoch in einem für die Rückbrotaufarbeitung nicht geeigneten System.

Es erwies sich hinsichtlich der Rückbrotaufarbeitung als vorteilhaft, daß die Sirupherstellung mit der beschriebenen Technikumsanlage so groß dimensioniert war, daß mit ihr Fermentationssubstrat im für die Maßstabsvergrößerung erforderlichen Umfang bereit gestellt werden konnte. Dazu wurde dieser Teil der Technikumsanlage vom Technikum des Instituts in die Hefefabrik der Fa. Agrano verlagert. Die Brotsirupherstellung wurde gemäß der Beschreibung nach 4.1.1 bzw. 4.2.1 sowohl mit Brot als auch mit Brotpulver und Teigen aus der Brotfabrik vorgenommen.

Da die Pilotversuche bei der Fa. Agrano nur im Zulaufverfahren betrieben werden konnten, war es nicht möglich, Backhefe kontinuierlich herzustellen. Diese Einschränkung in der Versuchsdurchführung konnte toleriert werden, weil es lediglich

darum ging, Hefe einheitlicher Qualitätsmerkmale für die industriellen Backversuche zur Verfügung zu stellen. Die Fragestellung bezüglich der Verwendung der anderen Produkte (Proteinfraktion, Flüssigsauer) aus der Rückbrotverwertung konnten mit der Technikumsanlage beantwortet werden.

4.3.1 Beschreibung der Fermentationsanlage: Pilotanlage

Die Versuchsanlage der Fa. Agrano besteht aus zwei Fermentern R1 (50l) und R2 (3000l) und einem Vorlagebehälter V2 (800l), der im unteren Teil einen Propellerrührer aufweist. Beide Fermenter sind mit Scheibenrührern ausgestattet und werden mit einem mit Bohrungen versehenen Ring belüftet. Im unteren Teil der Fermenter befinden sich jeweils vier Anschlüsse, an denen sich jeweils ein Probenahmehahn, ein Temperaturfühler sowie eine pH Elektrode befinden. Am R2 wurde zusätzlich eine Ethanolmeßsonde und eine Sauerstoffmeßsonde eingebaut. Es handelte sich dabei um die im kontinuierlichen Fermenter der Technikumsanlage verwendeten Meßeinrichtungen.

Die Fermenter werden über eine Steuereinheit bedient. Die Regelung des pH-Werts erfolgt mittels eines PC mit eingebauten Meßkarten. Der Substratzulauf für den R1 wurde anhand eines errechneten Zulaufschemas mit einer Schlauchpumpe durchgeführt. Der Substratzulauf für den R2 erfolgte in der mehrstündigen Startphase mit einer Schlauchpumpe aus einem auf einer Waage stehenden Vorlagegefäß. Nach der Startphase wurde der Zulauf gemäß einer im Steuerungs-PC vorgegebenen Zulaufkurve über den Volumenstrom eines in der Transferleitung zwischen V2 und R2 eingebauten Durchflußmesser automatisch eingestellt. Die Substratüberführung durch die Transferleitung erfolgte durch Erzeugung von Überdruck im V2 über ein steuerbares Absperrventil.

4.3.2 Betrieb des Fermenters: Pilotanlage

Der Fermenter R2 wurde im Zulaufverfahren steril betrieben. Vor Beginn der Fermentation wurde eine gewisse Menge Wasser (700-1000l) vorgelegt. Das Zulaufschema wurde zunächst rechnerisch aus der Menge an Inokulum, der Glucosekonzentration des Substrats, der bekannten stündlichen Zuwachsrate an Backhefe, der maximalen Fermenterfüllung und der Fermentationszeit ermittelt. Das

rechnerische Zulaufschema wurde anhand der aktuellen Prozeßmeßwerte angepasst. Die aus den Technikumsversuchen bekannten Zugabemengen an Nährsalzen wurden entsprechend der zu erwartenden Backhefemenge berechnet. Die Zugabemengen wurden gemäß den Versuchsergebnissen optimiert. Die Nährsalze wurden in Wasser aufgelöst und im Fermenter und im Substratlagertank vorgelegt.

Die Fermentationen erfolgten bei 30°C, einem pH-Wert von 5-6 und einer Rührerdrehzahl von etwa 100-250. Die Sauerstoffsättigung wurde durch die Luftzufuhr und Rührerdrehzahl auf mindestens 25% eingestellt. Der Ethanolgehalt des fermentierenden Substrats wurde durch Anpassung des Zulaufs des Fermentationssubstrats auf maximal 0,5Vol% eingestellt.

Nach Abschluß der Fermentation wurde der Fermenterinhalt auf etwa 12°C gekühlt und zentrifugiert (vgl. 4.2.1). Der Zulaufvolumenstrom zur Zentrifuge betrug 900l/h. Der dabei anfallende Hefeschlamm bildete die Flüssighefe. Sie wurde nicht weiter aufgereinigt, wie das bei der Herstellung handelsüblicher Backhefe der Fall ist.

4.4 Backversuche

Mit den bei der Rückbrotaufarbeitung anfallenden Produkten Flüssigbackhefe sowie der daraus hergestellten Resthefe, dem Flüssigsauer und der Proteinfraction wurden Backversuche sowohl in der Institutsbäckerei als auch der Brotfabrik durchgeführt. Die Flüssigbackhefe, der Flüssigsauer und die Proteinfraction für die Backversuche in der Institutsbäckerei und der Brotfabrik stammten sowohl aus der Technikumsanlage als auch der Pilotanlage. Die Backversuche wurden bezüglich der zu vergleichenden Kriterien in Anlehnung an das DLG-Prüfschema (22) ausgewertet. Außerdem wurde für einzelne Versuche die Frischhaltung mit einem Penetrometer und einem Konsistometer nach standardisierten Methoden bestimmt (vgl.4.5).

4.4.1 Backversuche in der Institutsbäckerei

In der Institutsbäckerei wurden Standard-Kastenbackversuche (23) mit Flüssigbackhefe von der Technikums- und der Pilotanlage in einem Etagenbackofen (Infra, Wachtel) durchgeführt. Dazu wurde Weizenmehl (Type 550) verwendet. In der

Institutsbäckerei wurden außerdem Standardbackversuche für freigeschobene Roggenmischbrote (60% Roggenmehl der Type 1150 und 40% Weizenmehl der Type 550) mit dem Flüssigsauer und/oder der Proteinfraction aus der Technikumsanlage durchgeführt. Abweichend von den Standardbackversuchen wurde für die Teigherstellung ein Spiralknetzer (SP40D, Diosna) verwendet. Die Versuchsteige hatten deshalb eine Größe zwischen 10-15 kg. Die Größe der Teige wurde gewählt, um die Auswertung der Ergebnisse im Vergleich zu den Industriebackversuchen auf eine sichere Grundlage zu stellen.

4.4.2 Backversuche in der Brotfabrik

In der Brotfabrik wurden mit der Rezeptur für das quantitativ wichtigste Brot freigeschobenes Weizenmischbrot (70% Weizenmehl der Type 550, 30% Roggenmehl der Type 997) unter Zugabe von Flüssigbackhefe, Flüssigsauer und Proteinprodukt Backversuche im Vergleich zur Produktionsrezeptur für dieses Produkt gemacht. Die Flüssigbackhefe und die Proteinprodukte stammten sowohl aus den Versuchen mit der Technikums- als auch der Pilotanlage. Der Flüssigsauer für diese Backversuche wurde nur mit der Technikumsanlage hergestellt.

Die Chargengröße der Teige betrug 240 kg. Die Zugabe der Flüssighefe, des Flüssigsauers und der Proteinfraction wurde von Hand vorgenommen. Die Zugabe von Flüssighefe und des Flüssigsauers geschah im Austausch zur üblicherweise verwendeten Backhefe bzw. des Teigsäuerungsmittels. Dazu erfolgte eine auf die Triebkraft der Flüssigbackhefe, bzw. den Säuregrad des Teigsäuerungsmittels bezogene Umstellung der Rezeptur, von der insbesondere die Schüttwassermenge betroffen war. Gleiches galt für die Verwendung der Proteinfraction.

Die Backversuche wurden auf den Produktionsanlagen der Brotfabrik durchgeführt, die Leistungen von 1.500-2.500 Brotlaiben/h von 1 kg Gewicht haben. Die Auswertung der Backversuche wurde nach betriebsüblichen Kriterien und in entsprechender Weise vorgenommen. Die Beurteilung schloß neben der Bestimmung der Volumenausbeute eine sensorische Bewertung der Brote ein.

4.5 Aufbereitung des Rohstoffs

Als Rohstoff für die Brotsirupbereitung dienten Brotpulver bzw. Rückbrot (vgl. 4.1.) und Teige. Das Brotpulver stammte aus einer Futtermittelfabrik, welche das Rückbrot der Brotfabrik zu einem Futtermittel verarbeitet. Dazu wird das aus dem Handel zurückkommende Brot in seiner jeweiligen Verpackung grob vorzerkleinert. Dadurch kann das Verpackungsmaterial anschließend durch Absaugen weitestgehend vollständig vom Brot getrennt werden. Das abgetrennte Brot wird in einem Trommeltrockner auf einen Restwassergehalt von <10% getrocknet. Die getrockneten Partikel werden anschließend durch Prallzerkleinerung zu einem Pulver mit einer Partikelgrößenverteilung von 100-1.000 µm zerkleinert.

Rückbrot und Teige wurden zur Aufbereitung von der Brotfabrik sowohl zum Institut als auch zur Fa. Agrano geliefert. Dort wurde das Rückbrot, soweit erforderlich, zunächst von Hand entpackt. Danach wurde das Brot entweder mit einem Kutter (Krämer & Gräbe) oder mit einem Schneidewerkzeug (Comitrol 1700, Urschel) unter Zugabe von Wasser zu einer Maische aufgearbeitet. Bei Verwendung des Schneidewerkzeugs zur Herstellung der Maische wurde das Brot zuvor mit einem Brotschredder (Rotomat 1000, Hommel) vorzerkleinert. Die Teige wurden direkt eingemaischt.

4.6. Backhefen und Milchsäurebakterien

Die Versäuerung des Brotsirups wurde mit *Lactobacillus delbrueckii* vorgenommen. Dazu wurde eine Reinkultur aus der Sammlung der BFGKF in Detmold und Münster mit Kennzeichnung 0597 eingesetzt. Diese Reinkultur wurde für die jeweiligen Versuche in der Laborreinzucht des Instituts herangezogen.

Für einige Fermentationsversuche in der Pilotanlage wurde eine hier nicht weiter zu spezifizierende Mischkultur verwendet, die aus einer Backhefe und Milchsäurebakterien bestand. Diese Mischkultur wird üblicherweise von der Fa. Agrano für ihre Backhefeherstellung eingesetzt.

Es wurden drei verschiedene Stämme *Saccharomyces cerevisiae* aus der institutseigenen Stammsammlung für die Fermentationsversuche in den drei Anlagen

verwendet. Die Hefestämme tragen die Bezeichnungen H24, H201 und H202. Sie zeichnen sich durch eine hohe Triebkraft und Vermehrungsfähigkeit aus. Einige Fermentationsversuche wurden mit handelsüblicher Preßhefe (Lesaffre) durchgeführt, die sich ebenfalls durch eine hohe Triebkraft und Vermehrungsfähigkeit auszeichnet. Die Hefestämme H24, H201 und H202 wurden für die Fermentationsversuche in den Anlagen über die Laborreinzuchten des Instituts und der Fa. Agrano herangezogen.

4.7 Analysenmethoden

Der Rohstoff wurde mit bekannten standardisierten Methoden analytisch charakterisiert. Die Auswertung der mit den Anlagen durchgeführten Versuche erforderte z.T. den Einsatz analytischer Methoden, die überwiegend auf die Charakterisierung der hergestellten Stoffströme und Produkte gerichtet war.

4.7.1 Bestimmung der Zellzahl

Die Zellzahl wurde durch Zählen der Hefezellen in einer Thomakammer mit einer Tiefe von 0,1 mm bestimmt. Die Zählung wurde mindestens einmal mit einer neu gefüllten Kammer wiederholt (24). Aus der Zellzahl wurde die Konzentration der Hefe in g Hefe/l Flüssigkeit (Fermentationssubstrat, Ablaufvolumenströme, Flüssighefe) nach Bronn (25) berechnet. Diese Vorgehensweise zur Bestimmung der Hefekonzentration war erforderlich, weil das Fermentationssubstrat aus Brotsirup anders als bei der Herstellung von Backhefe mit Melasse nur teilgeklärt wurde. Deshalb konnte die Trockenmasse (HTS) der Hefe nicht direkt bestimmt werden.

4.7.2 Nachweis von Fremdhefen

Der Nachweis von Fremdhefen erfolgte durch gleichzeitiges Ausstreichen verschiedener Verdünnungsstufen der Probe auf Lysin-Agar- und Pantothenat-Agar-Platten. Saccharomyces-Fremdhefen wachsen nur auf Pantothenat-Agar, während Nicht-Saccharomyces-Fremdhefen sowohl auf Pantothenat-Agar als auch auf Lysin-Agar wachsen. Die Ansätze wurden 2-4 Tage bei 28°C bebrütet (26).

4.7.3 Nachweis von Bakterien

Der Nachweis von Bakterien im fermentierenden, bzw. fermentierten Substrat erfolgte durch Ausstreichen und 48-stündige Bebrütung verschiedener Verdünnungsstufen auf MRS-Agar-Platten mit einem Zusatz von Actidion zur Unterdrückung des Hefewachstums.

4.7.4 Bestimmung des α -Amino-Stickstoffes

Für die Bestimmung des α -Amino-Stickstoffes wurde die Ninhydrinmethode verwendet (27). Ninhydrin ergibt mit dem Ammoniak aus desaminierten Aminosäuren eine blauviolette Färbung, die photometrisch bestimmt werden kann.

4.7.5 Bestimmung des Proteingehalts

Der Proteingehalt wurde nach der Kjeldahl-Methode gemäß AACC-Standard 46-13 bestimmt (28).

4.7.6 Bestimmung des Stärke- und des Glucosegehalts

Der Stärkegehalt wurde enzymatisch gemäß ICC Standard Nr. 128 bestimmt. Dabei wurde in Abwandlung der ICC-Standard-Methode die gebildete Glucose nicht mit der GOD-Methode, sondern mit Hexokinase und Glucose-6-Phosphat-Dehydrogenase über NADPH als Meßgröße bestimmt (29, 30). Der Glucosegehalt des Brotsirups wurde entsprechend bestimmt.

4.7.7 Bestimmung des Gehalts an unlöslichen und löslichen Ballaststoffen

Der Gehalt an unlöslichen und löslichen Ballaststoffen wurde nach der modifizierten AOAC-Methode enzymatisch-gravimetrisch bestimmt (31).

4.7.8 Bestimmung des Mineralstoffgehalts

Der Mineralstoffgehalt wurde gemäß dem ICC-Standard Nr. 104 (32) bestimmt. Dabei wird nach Veraschen des Probenmaterials bei 900°C im Muffelofen der Glührückstand gravimetrisch bestimmt und als Aschegehalt angegeben.

4.7.9 Bestimmung des Rohfettgehalts

Der Rohfettgehalt wurde nach Weibull-Stoldt (33) bestimmt. Nach dem Säureaufschluß der Proben wurde das mit Hexan extrahierbare Rohfett bei 105°C im Trockenschrank getrocknet und anschließend gravimetrisch bestimmt.

4.7.10 Bestimmung des Wassergehalts

Der Wassergehalt wurde für alle Glucose enthaltenden Proben mit der Karl-Fischer-Methode bestimmt. Dazu wurde die amperometrische Jodtitration auf einen methanolischen Extrakt des Probenmaterials angewendet (34). Der Wassergehalt aller anderen Proben wurde mit der Trockenschrankmethode (ICC-Standard Nr. 110/1) (35) bestimmt.

4.7.11 Bestimmung des Gehalts an Ethanol, Milchsäure sowie Saccharose

Die Gehalte an Ethanol, Milchsäure sowie Saccharose wurden enzymatisch über NADPH als Meßgröße erfaßt (36, 37, 38).

4.7.12 Bestimmung des Gehalts an Kochsalz

Der Gehalt an Kochsalz wurde mit der Methode nach Votocek und Mohr bestimmt (39). Dabei wurden die Chloridionen mit Silbernitratlösung unter Verwendung von Kaliumchromat als Indikator titriert.

4.7.13 Bestimmung der Frischhaltung

Die Messung der Frischhaltung erfolgte mit einem Penetrometer (Sommer & Runge; Belastung: 400 g, Einwirkzeit: 10 s, Meßkörper: Kalotte) (40). Die Messung der

Konsistenz erfolgte mit einem Konsistometer (Haake; Belastung: 6000 g, Meßpunkt: 8, Meßkörper: C, Meßstrecke: 20 mm, Kapillare: 5,0 mm) (41).

4.7.14 Bestimmung der Triebkraft der Backhefe

Die Triebkraft der Backhefe wurde mit einer eigens dafür entwickelten Methode bestimmt. Dazu wird in einer Kneteinrichtung (Farinograf, Brabender) ein Teig aus Weizenmehl, Wasser, Salz und Hefe bereitet. Ein gewogenes Aliquot dieses Teiges wird in eine Meßvorrichtung gegeben, die aus einem skalischen Meßbecher (Höhe x Durchmesser = 12cm x 5cm) besteht. Die durch die Gasbildungsgeschwindigkeit hervorgerufene Volumenausdehnung des Teiges in der Zeiteinheit ist das Maß für die Triebkraft.

Die Volumenausdehnung des Teiges wurde nach einer Zeit von 60 min an der Skala abgelesen. Der sich mit den Flüssigbackhefeproben ergebende Meßwert wurde in Relation zu dem Meßwert gesetzt, der sich unter den gleichen Versuchsbedingungen für einen mit einer kommerziellen Backhefe ergab. Versuchsbedingungen für diesen Vergleich war die Einstellung einer gleichen Hefezellzahl in den Teigen.

4.7.15 Bestimmung der Gehalte Biotin, Pantothersäure, Thiamin und m-Inosit

Die Bestimmung des Gehalts an Biotin, Pantothersäure, Thiamin und m-Inosit erfolgte nach mikrobiologischen Verfahren, die in der Veröffentlichung (42) beschrieben sind.

5. Ergebnisse und Diskussion

Nachfolgend werden die im Verlaufe der Durchführung des Vorhabens erzielten Ergebnisse im einzelnen dargestellt. Die Darstellung erfolgt jedoch nicht ausschließlich nach dem chronologischen Ablauf der Versuche, sondern nach den aufzuzeigenden verfahrenstechnischen Zusammenhängen, um Übersichtlichkeit in die Entwicklung der einzelnen Verfahrensschritte und die aus ihnen für das Gesamtverfahren gezogenen Schlußfolgerungen zu bringen. Außerdem werden im Interesse der Übersichtlichkeit der Darstellung des erreichten Entwicklungsstandes nur Ergebnisse präsentiert, aus denen diese Schlußfolgerungen gezogen werden konnten. Daraus resultiert hinsichtlich der Beschreibung der Teilschritte der Entwicklung eine Konzentrierung auf die Lösung des jeweiligen Aufgabenteils. Versuche, die zwar zur Erreichung der Teillösung auch durchgeführt werden mußten, deren Ergebnisse dafür aber nicht ausschlaggebend waren, werden nur insoweit erwähnt, wie das für die Vollständigkeit der Darstellung notwendig ist. Entsprechend dieser Vorgehensweise werden die Ergebnisse in vier Unterkapiteln abgehandelt und diskutiert. Diese Unterkapitel beziehen sich auf die

- Herstellung des Fermentationssubstrats aus Rückbrot,
- Verwendung des Fermentationssubstrats zur aeroben und anaeroben Fermentation,
- Verwendung der Produkte aus der Rückbrotaufarbeitung und
- Betrachtung zur Umsetzung und Wirtschaftlichkeit des Verfahrens.

5.1 Herstellung des Fermentationssubstrats aus Rückbrot

Da für die Herstellung des Fermentationssubstrats sowohl Brotpulver als auch Rückbrot eingesetzt wurde, bzw. auch für eine mögliche Umsetzung des Verfahrens in den technischen Maßstab in entsprechender Weise verwendet werden kann, war es zunächst erforderlich, die durchschnittliche Zusammensetzung und die enzymatische Abbaubarkeit beider Rohstoffe zu untersuchen.

Hinsichtlich der Verwendung des Brotpulvers als Rohstoff ist darauf zu verweisen, daß diese für die Entwicklung des Verfahrens deshalb erfolgte, weil es in einer für

den zeitlichen Ablauf der Versuche ausreichend großer Quantität in einheitlicher und durchschnittlicher Zusammensetzung aus dem zitierten Prozeß der Futtermittelherstellung (vgl. 1.1) zur Verfügung gestellt werden konnte. Dieser aus der Futtermittelfabrik stammende Rohstoff wurde im Gegensatz zu dem aus dem Handel genommenen Rückbrot aus hygienischen Gründen als kritisch angesehen. Das Brotpulver wurde deshalb zum Ausschluß hygienischer Bedenklichkeit einer mikrobiologischen Untersuchung unterzogen, weil mit der vorgesehenen Verwendung der bei der verfahrensgemäßen Verarbeitung des Rohstoffs anfallenden Produkte zu verkostende Brote gebacken wurden.

Bezüglich der Entwicklung des Verfahrens war außerdem zu prüfen, wie und in welcher Form der Rohstoff in den Verfahrensablauf eingeschleust werden sollte. Diesbezüglich ist es unabdingbar, daß er entpackt und zerkleinert wird, um ihn zum enzymatischen Abbau einmischen zu können. Hinsichtlich des enzymatischen Abbaus muß gewährleistet werden, daß die Enzyme das Substrat durchdringen können. Diesbezüglich ist eine Zerkleinerung des Rohstoffs zur Oberflächenvergrößerung vorteilhaft. Dafür eignet sich die Trocknung des Rückbrots besonders, weil das getrocknete, stückige Rückbrot durch Prallzerkleinerung in ein feines Pulver vermahlen werden kann. Ein entsprechendes Pulver bietet den weiteren Vorteil, längerfristig lagerfähig zu sein. Diesen Vorteil besitzt ungetrocknetes Rückbrot nicht. Es ist aufgrund seines Wassergehalts ($a_{\text{W}} > 80\%$) leicht verderblich, vornehmlich durch Schimmelpilzwachstum.

Die Lagerfähigkeit von Brotpulver eröffnet die Möglichkeit, die Leistung einer Rückbrotverarbeitungsanlage auf konstantem Niveau zu halten und Spitzen im Rückbrotanfall abzufangen. Die Trocknung ist deshalb im Zusammenhang mit den Investitionen für die Entpackungseinrichtungen und die gegebenenfalls erforderlichen Trockner sowie die Kosten für deren Betrieb unter Verwendung der Abwärme der Backöfen bei der Berechnung der Wirtschaftlichkeit des Verfahrens zu betrachten.

5.1.1 Zusammensetzung des Rückbrots

Da das Rückbrot der als Untersuchungsbeispiel herangezogenen Brotfabrik bislang von einer Futtermittelfabrik verwertet wird, die es zu Pulver nach dem beschriebenen Verfahren (vgl. 1.1) aufarbeitet, wurden über einen Zeitraum von sechs Monaten Proben gezogen, deren Inhaltsstoffzusammensetzung bestimmt wurde. Dadurch war es möglich, einen Überblick über die Schwankungsbreite der durchschnittlichen Zusammensetzung des Rückbrots zu erhalten. Diese Information ist für den täglichen Betrieb einer Rückbrotverarbeitungsanlage wichtig, weil von ihr abgeleitet werden kann, welcher Einfluß von der Zusammensetzung auf die Ausbeute an Produkten ausgeht. Zwar ist für die Auslegung einer solchen Anlage die mittlere Zusammensetzung des Rückbrots entscheidend, doch gibt diese weder einen ausreichenden Hinweis auf die Ausbeuterelationen noch den Betrieb einzelner Anlagenteile. Dafür muß die Schwankungsbreite der Inhaltsstoffzusammensetzung bekannt sein.

In der Tabelle 3 ist das Ergebnis der Untersuchung der innerhalb von sechs Monaten zu zufälligen Zeitpunkten gezogenen Proben aufgeführt. Da die Proben aus dem Volumenstrom des Brotpulvers gezogen wurden, handelt es sich bei dem angegebenen Mittelwert nicht um einen gewichteten Wert, der die Rückbrotmengen nach Tag, Produktcharge und relativen Anteil derselben am täglichen Gesamtanfall an Rückbrot berücksichtigte, sondern um den Mittelwert aus den gezogenen Proben.

Tabelle 3: Zusammensetzung des aus dem Rückbrot der Brotfabrik hergestellten Brotpulvers

Substanz	Anzahl der Proben	Meßwert (%TS)		Mittelwert* (%TS)
		Kleinster	Größter	
Glucose	9	0,8	1,4	1,0
Protein	10	12,8	15,5	13,4
Fett	9	4,4	6,1	5,4
Ballaststoffe**	3	5,5	14,1	10,5
Saccharose	9	1,1	6,5	1,5
Kochsalz	5	2,4	2,7	2,6
Stärke	11	61,8	71,1	63,7
<i>Summe</i>	-	-	-	98,0

nicht gewichteter Wert, **Gesamtballaststoffe (AOAC)

Der aus der Summe der Mittelwerte für die einzelnen Inhaltsstoffe gebildete Wert repräsentierte mit 97,5% praktisch die gesamte Trockenmasse des Brotpulvers. Sie wurde als Grundlage für alle Überlegungen zur Berechnung der Ausbeute an Produkten herangezogen, von der die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens abhängt. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens ist der Anteil der aus dem Rückbrot zur Fermentation bereitstellbaren Kohlenhydrate, hauptsächlich von Glucose aus dem enzymatischen Abbau der Stärke mit Amyloglucosidase.

Aus dem vollständigen Abbau der Stärke zu Glucose ergäbe sich, bezogen auf den Mittelwert des Stärkegehalts von 63,7%, ein Massegewinn von 7,1 Teilen, so daß 66,1% der aus dem Rückbrot entstandenen Trockenmasse fermentierbare Glucose wären. Dazu addierten sich unter Berücksichtigung des Massegewinns bei der Hydrolyse der Saccharose bei der Fermentation etwa 1,5% Glucose und Fructose, so daß von der eingesetzten Masse etwas mehr als zwei Drittel für die Fermentation zur Verfügung stünden. Die Ausnutzung dieses theoretischen Potentials wird jedoch durch die unter den Verfahrensbedingungen erzielbare Hydrolyse der Stärke zu fermentierbaren Kohlenhydraten begrenzt.

Der mit 5,4% gegenüber Broten üblicher Zusammensetzung relativ hohe Fettgehalt ergab sich aus dem Kuchenanteil im Rückbrot. Die gleiche Ursache hatte der entsprechend hohe Saccharosegehalt, der außerdem, bezogen auf seinen Masseanteil an der Gesamtmasse des Rückbrots, die größte Schwankungsbreite unter den Inhaltsstoffen aufwies.

Die Inhaltsstoffzusammensetzung läßt erkennen, daß bei rein amylolytischer Hydrolyse des Rückbrots knapp ein Drittel seiner Trockenmasse als nicht verflüssigbarer Feststoff anfallen muß. Die relative Zusammensetzung dieses Trockenmasseanteils an Protein, Fett und Ballaststoffen kann über die Verfahrensbedingungen der Abscheidung der Feststoffe in gewissen Grenzen beeinflußt werden.

5.1.2 Hygienischer Zustand des Brotpulvers

Zur Beurteilung des hygienischen Zustands des Brotpulvers wurde dessen Kontamination an anaeroben mesophilen Bakterien sowie Hefen und Schimmelpilzen festgestellt. Die durchschnittliche Koloniezahl an aeroben mesophilen Bakterien betrug auf Plate-Count-Agar $2,2 \times 10^5$ und auf Nähragar $2,9 \times 10^5$ koloniebildende Einheiten (KBE) pro Gramm Brotpulver. Die mikroskopische Untersuchung der Kolonien zeigte, daß es sich z.T. um bewegliche Stäbchenbakterien handelte. Es waren Sporenbilder. Das wurde durch Abtötung vegetativer Keime vor der Kultivierung der Bakterien auf Plate-Count-Agar festgestellt.

Der Nachweis von Hefen und Schimmelpilzen erfolgte auf Hefeextrakt-Glucose-Chloramphenicol-Agar und auf Sabouraud-Agar. Die durchschnittliche Koloniezahl auf Sabouraud-Agar betrug $2,9 \times 10^5$ KBE/g Probe, während auf Hefeextrakt-Glucose-Chloramphenicol-Agar wurden 3×10^4 KBE/g gezählt wurden. Da durch den Zusatz des Antibiotikums Chloramphenicol Bakterienwachstum auf dem Hefeextrakt-Glucose-Chloramphenicol-Agar unterdrückt wurde, wurden auf Sabouraud-Agar Kolonien beweglicher Langstäbchen nachgewiesen. Diese wurden als Ursache für die höhere Koloniezahl auf diesem Nährmedium angesehen. Hefen wurden auf beiden Nährböden nur vereinzelt beobachtet.

Die Nährböden waren z.T. von einem unseptischen spinnwebenartigen weißgrauen Pilzmycel überwachsen, an dem kugelförmige weiße bis schwarze Sporangien sichtbar waren. Daneben traten Schimmelpilze mit einem gelblich-grauen, relativ derben Mycel auf, aus dem ebenfalls lange Sporangienträger herauswuchsen. Nach dem mikroskopischen Befund waren die Schimmelpilze den Mucoraceae zuzuordnen.

Die mikrobiologischen Untersuchungsergebnisse ließen die Schlußfolgerung zu, daß das Brotpulver hygienisch unbedenklich war. Aus seiner Verwendung als Rohstoff für seine vorgesehene Rückbrotverarbeitung konnte sich weder für die Durchführung des Prozesses noch den Verzehr der mit den Produkten aus dem Prozeß hergestellten Brote ein Gefährdungsrisiko ergeben. Abgesehen davon, daß die Keime ubiquitär vorkommen, konnte von ihnen auch deshalb kein Gefährdungsrisiko ausgehen, weil die Verfahrensbedingungen eine Vermehrung der Mikroorganismen nicht zuließen. Unter den genannten Verfahrensbedingungen wäre insbesondere das Wachstum pathogener Mikroorganismen unterbunden worden.

5.1.3 Amylytischer Abbau, Versäuerung und Masseverteilung

Die Verfahrenstechnik zum amylytischen Abbau wurde von einer früheren Verfahrensentwicklung (13) übernommen. Anders als bei diesem Verfahren, das lediglich auf das Erreichen eines konstanten Hydrolysegrads angelegt ist, war es für die Auslegung dieses Verfahrensschritts bei der Rückbrotherstellung zusätzlich erforderlich, einen möglichst hohen, wenn auch nicht maximalen, Hydrolysegrad zu erzielen. Der Hydrolysegrad ist im Zusammenhang mit der Ausbeute an Fraktionen aus dem Brotsirup und deren Verwendung mitentscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens. Diese Zusammenhänge werden an anderer Stelle abgehandelt (vgl. 5.5ff).

Erschwerend für die Auslegung des Verfahrensschritts im Vergleich zum bekannten Stand der Technik, der auch die Glucoseherstellung aus Stärke (43) einbezieht, wirkte es sich aus, daß als Rohstoff nur Rückbrot eingesetzt werden konnte und alle Produkte aus dem Rückbrot für die Brotherstellung verwendet werden sollten. Da im Brot bereits ein großer Anteil der Stärke im verkleisterten Zustand vorliegt, konnte

deshalb kein Heißmaisverfahren eingesetzt werden, wie das beispielsweise bei der Stärkeverflüssigung möglich ist, weil beim Einmaisern mit hoher Feststoffkonzentration durch die Zugabe von Heißwasser oder durch Dampfeinleitung in die Suspension schlagartig eine so hohe Viskosität entstehen würde, daß die Maische weder rühr- noch pumpbar wäre. Es konnte für das Brechen der Viskosität auch keine thermostabile α -Amylase eingesetzt werden, weil diese im Verfahrensablauf nicht mit Sicherheit vollständig inaktiviert werden kann.

Zwar wäre es möglich, die beim Einmaisern entstehende Viskosität der Maische durch Wahl einer niedrigen Feststoffkonzentration so einzustellen, daß die genannten Probleme mit der Rühr- und Pumpbarkeit der Maische nicht aufträten, doch ergäbe sich daraus der Nachteil eines mit fallendem Feststoffgehalt steigenden Energieaufwands für das Erwärmen der Maische. Das hätte gleichzeitig zur Folge, daß die Behältergröße für den Maischeinsatz entsprechend dem steigenden Volumen größer gewählt werden müßte. Das Gleiche träfe für einen kontinuierlichen Viskositätsabbau mit einer Rohrschlange zu. Der Einsatz eines kontinuierlichen Verfahrens kam jedoch wegen der hohen Anfangsviskosität bei hoher Einmischkonzentration und dem sich daraus ergebenden Problem für den Betrieb eines entsprechenden Systems nicht in Frage. Deshalb wurde für die verschiedenen Versuchsanordnungen bei der Entwicklung des Verfahrens auf Behälter mit Rührwerken zurückgegriffen, um die Anfangsviskosität über ein Kaltmaisverfahren abzubauen. Der Verfahrensschritt des Viskositätsabbaus wird bei der Verzuckerung von Stärke zur Herstellung von Glucose als Verflüssigung der Stärke bezeichnet. Dieser Fachbegriff wird ebenso wie der Fachbegriff Verzuckerung deshalb auch hier für Brot verwendet.

5.1.3.1 Verflüssigung

Das Einmaisern zur Verflüssigung des Brotpulvers oder von Rückbrot wurde in der Weise vorgenommen, daß die Behälter (Labor- und Technikumssirupkocher) allmählich mit der außerhalb der Behälter kontinuierlich zusammen mit dem Enzym angesetzten Maische befüllt wurden. Während des Befüllens wurde die Maische gleichzeitig gerührt und erwärmt. Der Vorgang des Befüllens, Rührens und Erwärmens der Maische wurde so geführt, daß sich die für die Rührerleistung

zulässige höchste Viskosität am Ende des Befüllens einstellte. Diese Möglichkeit der Prozeßführung ergab sich dadurch, daß der bei der Temperatur von 20-50°C von der schnell verquellenden Stärke ausgehende Viskositätsanstieg durch die mit steigender Temperatur ansteigende Wirkung der α -Amylase aufgefangen wurde. Die für die vollständige Verkleisterung der Stärke erforderliche weitere Temperatur-erhöhung der Maische führte oberhalb 50°C dann zu einem schnellen Abfall der Viskosität.

Das Endergebnis der Versuche zur Führung der Verflüssigung und Verzuckerung der Maische ist bezogen auf den Viskositätsverlauf in der Tabelle 4 dargestellt. Die Zahlen lassen die Problematik der hohen Anfangsviskosität für die Führung des Prozesses deutlich erkennen. Die Einmaischkonzentration in dem Technikumssirupkocher betrug in diesem Beispiel 40%. Die Durchführung der Versuchsreihen zur Führung des Kaltmaischverfahrens, die hier nur als Endergebnis dargestellt sind, dienten vor allem dazu, die Kenngröße für die Auslegung des Rührers und seines Antriebs zu ermitteln.

Tabelle 4: Viskosität der Maische und des Brotsirups

Produkt	dynamische Viskosität η (Pa s)	Temperatur (°C)
Maische ¹	164	50
Maische ²	33	90
Maische ³	10	60
Brotsirup ⁴	5	60

- 1) Anfang Verflüssigung; 2) Ende Verflüssigung
 3) Anfang Verzuckerung; 4) Ende Verzuckerung

5.1.3.2 Verzuckerung

Der Viskositätsabbau bei der Erwärmung der Maische geht weitgehend von der Wirkung der α -Amylase auf den molekularen Abbau der Stärke in der Brotkrume zurück. Dieser Abbau ist in Verbindung mit der nachfolgenden Verzuckerung der Abbauprodukte aus der Amylose und dem Amylopektin zu sehen. Diesbezüglich ist es aus der Verzuckerung von mit α -Amylase hergestellten Sirupen aus reiner Stärke bekannt, daß die Hydrolysegeschwindigkeit von der Molekülgröße der Abbauprodukte der α -Amylolyse abhängt. Je kleiner die Moleküle sind, desto langsamer schreitet die Hydrolyse voran. Deshalb war zu prüfen, wie weit die α -Amylolyse fortschreiten muß, um sowohl eine schnelle wie auch weitgehend vollständige Hydrolyse der Abbauprodukte zu von Hefe resorbierbaren Zuckern zu erzielen. Die Kenntnis darüber ist für die Auslegung der Behälter zur Verflüssigung und Verzuckerung und die Prozeßführung der Gewinnung des Fermentationssubstrats notwendig.

Die Prüfung erfolgte im Labormaßstab mit dem Laborsirupkocher über die Variation der Wirkung der α -Amylase bei konstanter Vorgabe der Reaktionszeit der Glucoamylase für 3 h und 23 h. Die α -Amylase- und Amyloglucosidase-Konzentration war für diese Versuche konstant festgelegt. Sie betrug bezogen auf den Stärkegehalt der Trockenmasse des Brotpulvers für α -Amylase 0,5% (Optiamyl 840, Genencor) und für Amyloglucosidase 0,5% (Optidex, Genencor). Der optimale pH-Wert für diese Enzympräparate liegt zwischen 5,5 und 6,5 und das Temperaturoptimum beträgt für das α -Amylase-Präparat 70°C und für das Amyloglucosidase-Präparat 60°C. Der Ansatz wurde auf diese Temperaturoptima eingestellt. Der pH-Wert wurde auf dem pH-Wert der Maische von 4,8 belassen. Als Maß für die Hydrolyse der Stärke im Brot zu von Hefe resorbierbaren Zuckern diente der Grad der Hydrolyse der Stärke zu Glucose, weil diese von Hefe vollständig resorbierbar ist. Dabei wurde vernachlässigt, daß bei der enzymatischen Hydrolyse der Stärke mit Amyloglucosidase in kleinem Umfang auch Maltose und Isomaltose entstehen, die ebenfalls von Hefe resorbiert werden. Diese Vernachlässigung war tolerierbar, weil sie die aus dem Ergebnis zu ziehende Schlußfolgerung nicht beeinflußt.

Aus der Tabelle 5 ist zu erkennen, daß der Hydrolysegrad sowohl von der Reaktionszeit der α -Amylase als auch insbesondere von der Reaktionszeit der

Glucoamylase abhing. Da die Anwendungskonzentration der Enzyme Herstellerangaben entsprach, ergab sich außerdem, daß selbst nach der sehr langen Reaktionszeit der Amyloglucosidase von 23 h nur ein Hydrolysegrad von ca. 90% erreicht wurde.

Der Einfluß der Reaktionszeit der α -Amylase ist daran zu erkennen, daß sowohl für die Reaktionszeit der Amyloglucosidase von 3 h als auch die von 23 h ein Optimum des Hydrolysegrads für eine Reaktionszeit der α -Amylase von 2 h erreicht wurde. Das Optimum im Hydrolysegrad und das langsame Fortschreiten des Hydrolysegrads bis zu seinem Maximalwert ließen vermuten, daß der Molekülabbau durch die α -Amylase unter den Versuchsbedingungen zu weit fortgeschritten war. Eine so lange Reaktionszeit der α -Amylase ist aber weder für den Viskositätsabbau erforderlich, was durch die in der Tabelle 5 dargestellten Ergebnisse belegt ist, noch für die Prozeßführung wünschenswert. Deshalb wurde in einer weiteren Versuchsreihe die Verflüssigung der Maische bei sonst konstanten Bedingungen bei einer α -Amylase-Konzentration von 0,1% über eine Reaktionszeit von nur 1 h und die Verzuckerung anschließend bei drei verschiedenen Amyloglucosidase-Konzentrationen (0,11; 0,22 und 0,44%) durchgeführt.

Tabelle 5: Hydrolysegrad des Brotsirups in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen der enzymatischen Hydrolyse mit α -Amylase und Amyloglucosidase

Reaktionszeit (h)			Hydrolysegrad (%)
A: α -Amylase	B: Glucoamylase	A + B	
1	3	4	63,1
2	3	5	76,6
3	3	6	73,9
1	23	24	87,8
2	23	25	89,1
3	23	26	87,2

Aus der Abbildung 3 geht hervor, daß trotz einer Einschränkung des molekularen Abbaus durch Absenkung der α -Amylase-Konzentration in der Verflüssigungsstufe auf 0,1% die Hydrolysegeschwindigkeit für eine Amyloglucosidase-Konzentration von ca. 0,5% der des Vergleichsversuchs mit einer α -Amylase-Konzentration von 0,5% entsprach. Der Hydrolysegrad lag aber mit ca. 93% deutlich über dem des Vergleichsversuchs und war bereits nach 12 h erreicht. Die Kurven für den Hydrolysegrad für die Amyloglucosidase-Konzentrationen von 0,11% und 0,22% belegen zusätzlich, daß es offenbar ein optimales Verhältnis für den molekularen Abbau durch α -Amylase und Amyloglucosidase gibt, das von dem Verhältnis der Anwendungskonzentration der Enzyme abhängt. Dieses Verhältnis resultiert jeweils in einem von der Reaktionszeit der Amyloglucosidase abhängigen Optimum für den Hydrolysegrad.

Das Optimum für das Verhältnis der Anwendungskonzentration der hier eingesetzten Enzympräparate lag bei 0,1% α -Amylase zu 0,5% Amyloglucosidase. Für dieses Verhältnis wurde gegenüber den beiden anderen Verhältnissen der höchste Hydrolysegrad (93%) erhalten, der zusätzlich in der kürzesten Zeit (<12 h) erreicht wurde.

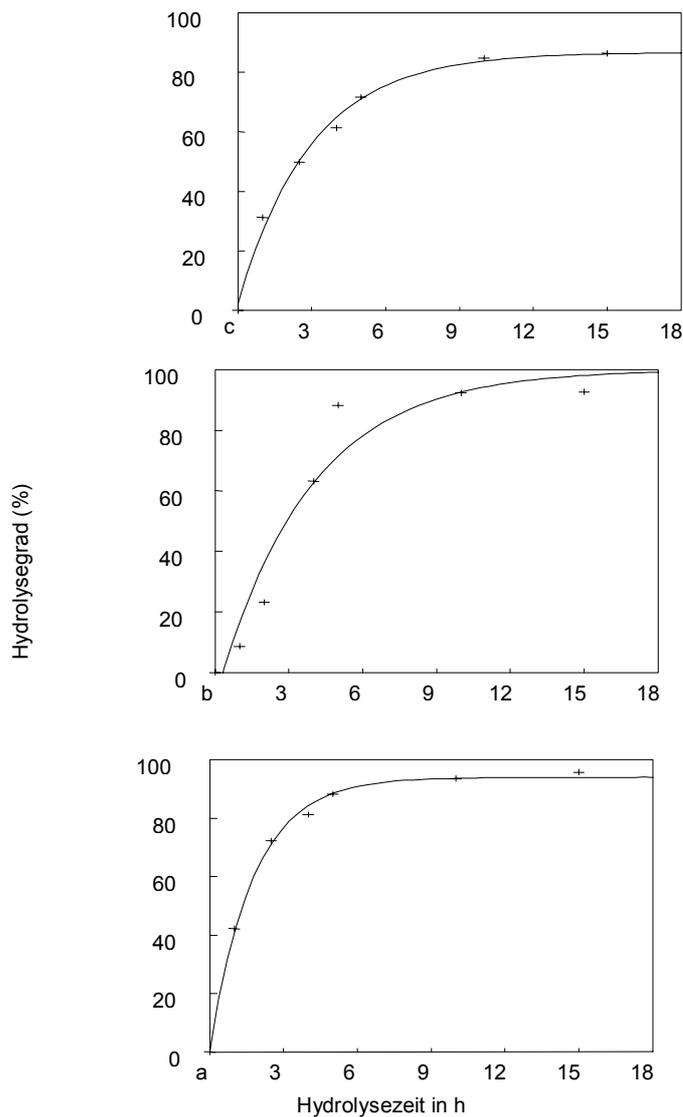


Abbildung 3: Verlauf des Hydrolysegrades in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen (Glucoamylasekonzentration a:0,44%, b:0,22%, c:0,11%).

Dieses mit dem Laborsirupkocher erzielte Ergebnis konnte auf den Technikumssirupkocher bis zu der prozeßtechnisch maximalen möglichen Brotpulverkonzentration von 40% Trockenmasse in der Maische übertragen werden. Es stellte sich unter dieser Bedingung ein Hydrolysegrad ca. 90% über den gesamten Zyklus der Sirupbereitung von 12 h ein. Da die Verzuckerung im Verfahrensablauf die längste Zeit in Anspruch nimmt, wird von ihr die Auslegung der Sirupanlage entscheidend bestimmt.

5.1.3.3 Versäuerung

Der Brotsirup wurde in Anlehnung an das beschriebene russische Verfahren zur Herstellung eines flüssigen Backferments mit *Lactobacillus delbrueckii* versäuert. Die Versäuerung ist eine einfache Maßnahme, um den Brotsirup mikrobiologisch zu stabilisieren. Die Durchführung der Versäuerung wurde als erforderlich angesehen, weil aufgrund unvermeidlicher Mehlstaubbelastungen in der Brotfabrik verschiedenartigste mikrobiologische Kontaminationen möglich sind, die bis zum Verderben des Brotsirups führen können. Das ergibt sich aus der Zusammensetzung des Brotsirups, der für viele Mikroorganismen ein ideales Nährsubstrat ist. Der Glucosegehalt des Brotsirups ist nicht groß genug, um aus dem daraus resultierenden osmotischen Druck Mikroorganismenwachstum unterdrücken zu können. Besonders anfällig ist der Brotsirup für das Wachstum wilder Hefen, die in den Arbeitsräumen von Brotfabriken vorkommen. Deren Wachstum kann jedoch nicht allein durch die mit der Versäuerung einhergehende pH-Wertabsenkung verhindert werden, weil sie selbst noch bei pH-Werten $<4,0$ wachsen können, sondern es müssen dafür durch Anhebung der Temperatur zusätzlich selektive Bedingungen geschaffen werden. Aus diesem Grunde erfolgte die Versäuerung bei 50°C . Bei dieser Temperatur können Hefen nicht mehr wachsen. *L. delbrueckii* ist durch die Größe des Inokulums der einzige Mikroorganismus, der sich unter diesen selektiven Bedingungen unter Bildung von Milchsäure im Brotsirup bei ca. 20-25% Glucosekonzentration vermehrt.

Die Versäuerung erfolgte in der Weise, daß *L. delbrückii* über eine Reinzucht herangeführt wurde, mit der ein Aliquot des Brotsirups beimpft wurde. Nach der Versäuerung dieses Aliquots, das als Anstellsauer bezeichnet wird, wurde die jeweilige Charge des Brotsirups versäuert. Dabei betrug das Verhältnis von Anstellgut zu Brotsirup 1:10 in der Technikumsanlage und die Versäuerungszeit war auf 24 h festgelegt. Diese Fermentationszeit wurde gewählt, um die Versäuerung auf den auf 24 h bezogenen Rhythmus der Brotsirupherstellung abzustimmen.

Die Versäuerung des Brotsirups erwies sich sowohl aus mikrobiologischer wie auch aus verfahrenstechnischer Sicht als relativ unproblematisch, weil sie mit großer Sicherheit immer gleichartig ablief (Tab.6). Allerdings muß ihr in dem Gesamtverfahrensablauf dennoch große Aufmerksamkeit geschenkt werden, weil die

gebildete Milchsäure über den im Verfahren entstehenden Flüssigsauer zur Säuerung des neu zu backenden Brotes eingesetzt werden soll. Dafür ist es aus backtechnischen Gründen erforderlich, daß die Schwankungsbreite in der Milchsäurekonzentration im Flüssigsauer nicht allzu groß ist. Schwankungen in der Milchsäurekonzentration können sich durch Unterschiede in der im Brotpulver für die Säurebildung vorhandenen Pufferkapazität ergeben, die weitgehend von der Art der Zusammensetzung des Brotpulvers (Vollkornbrot oder Weißbrot) abhängt. Außerdem kann sich darauf die Vitalität der Impfkultur auswirken, die von den Einflußgrößen der Versäuerung abhängt. Darauf soll hier nicht näher eingegangen werden, weil das zum allgemeinen Kenntnisstand zur Führung von Sauerteigen gehört.

Tabelle 6: Fermentation des Sirups mit *Lactobacillus delbrueckii*

Parameter	Wert
pH-Wert	5,0 → 3,8
Temperatur	48-52°C
Fermentation	Chargenweise, 20-24 h
Anstellmenge	10% der vorherigen Charge
Glucose	180-240 g/kg Sirup
Milchsäure	10 g/kg Sirup

In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Versäuerung von acht Brotsirupen aufgeführt, die aus verschiedenen Brotpulvern hergestellt worden waren. Daraus ergibt sich, daß die Schwankungsbreite der Säurekonzentration in den Brotsirupen, die durch den Säuregrad gekennzeichnet ist, beträchtlich war. Der Mittelwert des Säuregrads von 11,2 führte zu einem pH-Wert des versäuerten Brotsirups von 4,0.

Diese Mittelwerte des Säuregrads und pH-Werts stellen das für den Verfahrensablauf erstrebenswerte Ergebnis dar. Ein Säuregrad des Brotsirups im Bereich von 12

entspricht einer Umwandlung von etwa 5% der im Brotsirup vorhandenen Glucose zu Milchsäure. Im Brotsirup beträgt die Milchsäurekonzentration dann etwa 1%.

Tabelle 7: Einstellung des pH-Werts und Säuregrads des Flüssigsauers

Kriterium	Anzahl der Versuche	Mittelwert	kleinster Wert	größter Wert
pH-Wert	8	4,0	3,7	4,7
Säuregrad	8	11,2	5,0	15,5

5.1.3.4 Aufarbeitung

Der Brotsirup mußte zur Gewinnung des Fermentationssubstrats, welches das Hauptprodukt für den weiteren Verfahrensablauf darstellt, aufgearbeitet werden. Das geschah durch siebtechnische und zentrifugale Abscheidung seines Feststoffanteils. Es entstanden dabei durch Absieben und Abpressen der Preßkuchen und durch Zentrifugalabscheidung als Oberlauf das Fermentationssubstrat und als Unterlauf ein Proteinschlamm. Letzterer wurde durch Auswaschen mit Wasser und nachfolgende erneute Zentrifugalabscheidung zur Proteinfraction aufgereinigt. Der Oberlauf aus der zweiten Zentrifugalabscheidung, der nachfolgend als Extrakt bezeichnet wird, wurde zum Teil für das Einmischen von Brotpulver und zum Teil zum Verdünnen des Brotsirups vor dem Sieben eingesetzt. Die Verdünnung des Brotsirups mit Wasser oder dem Oberlauf aus der Auswaschung des Proteinschlammes führte dazu, daß die Glucosekonzentration im Fermentationssubstrat auf 15-18 g Glucose/l Fermentationssubstrat absank (Abb. 4).

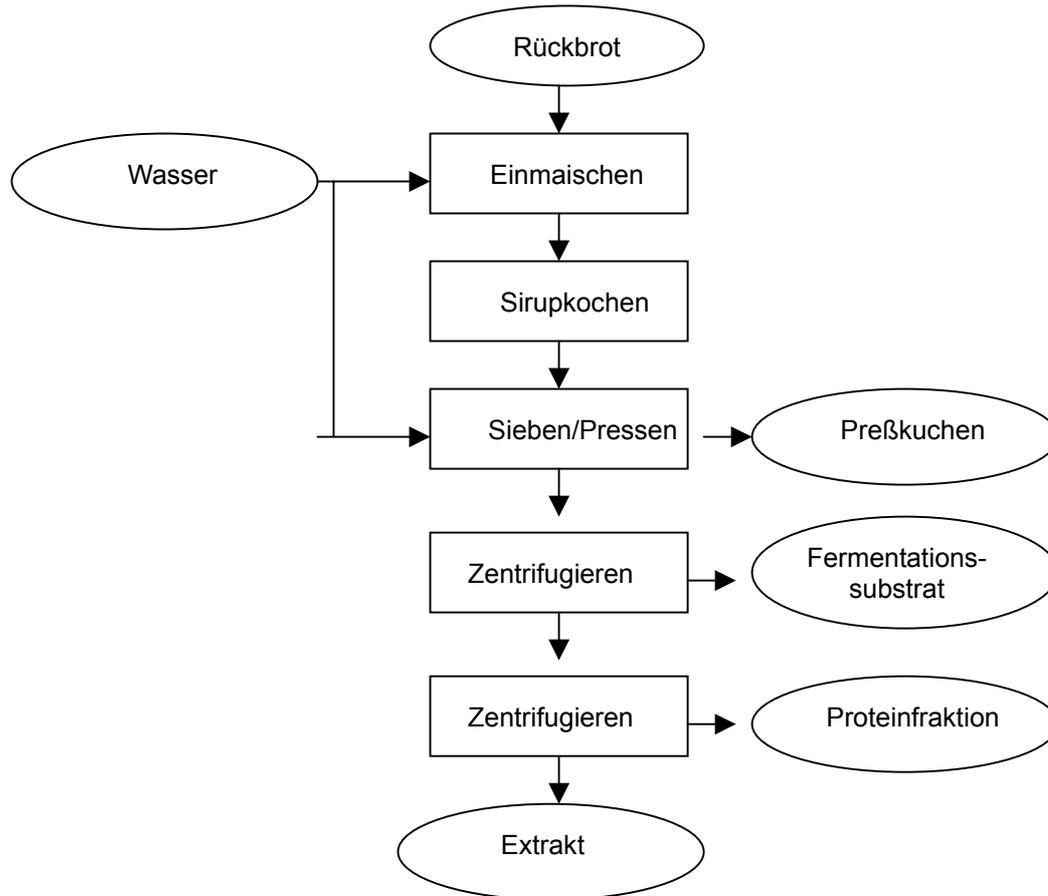


Abbildung 4: Führung der Prozeßströme bei der Bereitung und Aufarbeitung von Brotsirup aus Rückbrot (Brotpulver).

Die in diesem Verfahrensschritt durchgeführte Verdünnung des Brotsirups ist erforderlich, weil der Brotsirup mit der vorliegenden Feststoffkonzentration und der Dichte seines flüssigen Anteils weder sieb- noch zentrifugierfähig ist. Die breiartige Viskosität des Brotsirups sowie die annähernd gleiche Dichte der Flüssigkeit und des Feststoffs erlauben es nicht, den Feststoff von der Flüssigkeit zu trennen. Für die Sirupbereitung ist aus Gründen des Energieaufwands und eines möglichst kleinen Behältervolumens jedoch eine möglichst hohe Feststoffkonzentration erstrebenswert.

Ein Feststoffgehalt von 40% in der Maische hat sich aus verfahrenstechnischer Sicht, die vor allem auf die Auslegung der Rührwerkzeuge gerichtet war, als optimal erwiesen. Diese Konzentration erwies sich auch für die Sirupaufbereitung mit Auswaschung des Proteinschlammes für die Durchführung der anaeroben Fermentation als optimal, weil dafür die Menge an Verdünnungswasser so gewählt

werden konnte, daß die Konzentration des Fermentationssubstrats an Glucose in einen für die Ethanolgewinnung optimalen Bereich gelangte. Diese Konzentration pendelte sich in der Vielzahl der durchgeführten Versuche zwischen 15-18 g Glucose/kg Fermentationssubstrat ein.

Aus den Versuchsergebnissen kann geschlossen werden, daß die Auswaschung des Proteinschlammes, in die auch eine Auswaschung des Preßkuchens eingeschlossen werden kann, so gestaltet werden kann, daß die Glucose und die anderen in kleinen Konzentrationen vorhandenen und von der Hefe resorbierbaren Kohlenhydrate zu >98% der aeroben und anaeroben Fermentation zugeführt werden können. Das wird durch das im folgenden beschriebene exemplarische Beispiel belegt, das für die Ermittlung der Masseverteilung durchgeführt wurde und das für alle anderen im Verlauf des Vorhabens für die Gewinnung des Fermentationssubstrats durchgeführten Versuche repräsentativ war, obgleich in diesem Versuch lediglich ein Hydrolysegrad von 82% erreicht wurde.

Der Versuch ist in den Tabellen 8 und 98 dargestellt. Die Darstellung ist auf den Einsatz von 100 kg Rückbrot bezogen, um damit Anschaulichkeit in die in dem Verfahren zu bearbeitenden und zu fördernden Massen und Massenströme zu bringen. Für das Rückbrot wurde für die Berechnung ein Wassergehalt von 40% zugrundegelegt. Das eingesetzte Brotpulver besaß einen Stärkegehalt von 63,8%.

In dem Versuch entstanden aus 67 kg Brotpulver (= 100 kg Rückbrot), 150 kg Brotsirup. Aus diesem entstanden bei der Aufarbeitung die in der Tabelle 7 angegebenen Fraktionen, die unterschiedlich große Anteile der eingesetzten Trockenmasse repräsentierten und unterschiedliche Frischmassen besaßen. Den größten Anteil an der Trockenmasse machte das Fermentationssubstrat I mit 165 kg aus. In der Angabe für die Trockensubstanz des Fermentationssubstrats I und des Fermentationssubstrats II ist auch der Massegewinn durch die Hydrolyse der Stärke zu Glucose enthalten, der sich in der Differenz zwischen der eingesetzten Trockenmasse von 60 kg und der analytisch im Brotsirup ermittelten von 63,7 kg widerspiegelt.

Tabelle 8: Frischmasseanfall an Fraktionen bei der Aufarbeitung des Brotsirups und ihr Gehalt an Trockenmasse, Glucose und Protein

Fraktion	Frischmasse (kg)	Trockensubstanz* (kg)	Glucose (kg)	Protein (kg)
Ferm.-Substrat	165	37,6	26,1	1,4
Proteinfraktion	23	6,3	0,3	2,7
Preßkuchen	10	5,0	1,1	1,7
Extrakt	185	14,9	7,2	2,1
Summe	382	63,7	34,7	7,8

*Bezogen auf 100 kg Rückbrot mit einem Stärkegehalt von 63,8% unter Berücksichtigung des Hydrolysegewinns bei der Stärkehydrolyse: Hydrolysegrad 77%.

Tabelle 9: Prozentuale Verteilung der Trockensubstanz, der Glucose und des Proteins auf die bei der Aufarbeitung des Brotsirups angefallenen Fraktionen

Fraktion	Trockensubstanz (%)	Glucose (%)	Protein (%)
Fermentationssubstrat	59,0	75,2	17,4
Proteinfraktion	9,8	0,9	36,4
Preßkuchen	7,8	3,1	21,4
Extrakt	23,4	20,8	26,6

Aus dem Stärkegehalt des Brotpulvers von 63,8% hätten bei vollständiger Hydrolyse 42,4 kg Glucose entstehen müssen. Da der Hydrolysegrad in diesem Fall jedoch mit nur 82% relativ klein ausgefallen war, waren nur 34,7 kg entstanden. Diese quantitative Betrachtung der gebildeten Glucosemenge ist jedoch für die Beurteilung ihrer Verteilung auf die Fraktionen ohne Belang, weil die Verteilungsrelationen bei höherem Hydrolysegrad gleich geblieben wären. Dies träfe auch deshalb zu, weil davon auszugehen ist, daß die hydrolysierte Stärke praktisch vollständig in Lösung vorlag.

In dem dargestellten Experiment ist die Glucose nicht aus dem Preßkuchen ausgewaschen worden. Ein entsprechender Auswaschschritt könnte jedoch mit der Auswaschung der Proteinfraction verbunden werden. Unter dieser Voraussetzung würden nur 2% der Glucose, respektive aller anderen von Hefe resorbierbaren Kohlenhydraten über diese Fraction aus dem Verfahren ausgeschleust werden und stünden der Fermentation somit nicht zur Verfügung. Anders wäre das für die im Fermentationssubstrat II Extrakt befindliche Glucose, da diese bei längerfristigem Produktionsrhythmus, z.B. von mehr als zwei Wochen, ständig im Verfahren weitergeführt würde und damit in die Fermentationen gelangte. Dort würde sie zu den vorgesehenen Produkten umgesetzt.

Aus diesen Überlegungen kann auf der Grundlage der in der Tabelle 8 enthaltenen Zahlen abgeleitet werden, daß mehr als 95% der gebildeten fermentierbaren Zucker in den Fermentationen umgesetzt werden können.

Die Angabe in der Tabelle 9 über die aus dem eingesetzten Rückbrot entstehende Proteinfraction und den Preßkuchen geben einen ersten Hinweis auf die Ausbeute an Produkten, die bei dem Verfahren entstehen.

Hinsichtlich der aufgezeigten Proteinverteilung ist es von Interesse festzustellen, daß das im Fermentationssubstrat und im Extrakt vorhandene Protein zum großen Teil in den Flüssigsauer aber auch in die Flüssighefe gelangt. Bei dem Protein im Extrakt handelt es sich überwiegend nicht um gelöstes Protein, sondern um kolloidal verteilte Proteinpartikel, die zentrifugal nicht abgeschieden werden konnten.

Das Beispiel gibt natürlich nur die Masseverteilung wieder, wie sie in dem statisch durchgeführten Versuch anfiel. In einem realen Prozeß ergäbe sich durch die Weiterführung des Extrakts in die aerobe oder die anaerobe Fermentation und dessen dortige Umwandlung zusammen mit dem Fermentationssubstrat in Flüssighefe, Ethanol, Kohlendioxid und Flüssigsauer eine von dem Beispiel verschiedene Trockenmassebilanz (vgl. Punkt 5.2.4).

5.1.4 Proteolyse

Es ist eingangs darauf hingewiesen worden, daß das im Brotsirup vorhandene Protein gegebenenfalls als Stickstoffquelle für die Hefevermehrung benutzt werden kann. Dazu muß das Protein aber in von Hefe resorbierbare N-Verbindungen abgebaut werden. Die Freisetzung von Aminosäuren aus dem Protein durch enzymatische Hydrolyse stellt dafür einen denkbaren Weg dar. Deshalb wurde Brotsirup nach Erreichen des gewünschten Hydrolysegrads mit verschiedenen proteolytisch wirkenden Enzymen behandelt.

Die Tabelle 10 zeigt das Ergebnis des proteolytischen Abbaus. Die Enzyme waren zwar alle in der Lage, die weit überwiegend unlöslich vorliegenden Proteine in Lösung zu bringen, die Abbauprodukte waren aber nur zu einem relativ kleinen Anteil in eine von Hefe resorbierbare Form übergeführt worden. Das geht aus den Angaben über den FAN (freien Aminostickstoff) hervor, der als Maß für die Resorbierbarkeit fungiert. Im günstigsten Fall wurde bei fast 90%iger Löslichkeit des Proteins mit 1,19 g/L nur etwa ein Sechstel des Proteins in FAN umgewandelt, im ungünstigsten Fall waren es mit 0,26 g/L nur ca. 4%.

Tabelle 10: Proteolytischer Abbau von Brotsirup

Enzyme	FAN* g/l	löslicher N g/l	Gesamt-N g/l
Corolase PP	1,19	5,60	6,40
Corolase PN-L	0,26	2,16	6,40
Corolase 7089	0,33	4,00	6,40
Corolase L10	0,89	4,42	6,40

*Freier Aminostickstoff

Die Übertragung des größten Wertes für den FAN auf einen mit Brotpulver hergestellten Brotsirup (40% Feststoffgehalt, 63% Stärkegehalt, 90% Hydrolysegrad) würde es ermöglichen, rund 23 g HTS oder 25 g Frischhefe zu erzeugen. Aus der Glucosekonzentration in dem Brotsirup könnten jedoch bei ausreichender Versorgung mit N-Verbindungen 138 g HTS oder 510 g Frischhefe entstehen. Daraus folgt, daß durch die enzymatische Hydrolyse des Proteins im Brotsirup nur ca. 17% des N-Bedarfs für die vollständige Verwertung der Glucose zur Hefevermehrung bereitgestellt werden könnten.

Wird diese Angabe auf den eingangs zitierten Bedarf an Frischhefe bezogen, der mit 5.000 t/a angegeben ist, dann ergibt sich, daß über die enzymatische Hydrolyse des Proteinanteils im Rückbrot nicht genug Backhefe erzeugt werden könnte, weil dazu aus der anfallenden Rückbrotmenge nicht genug resorbierbare N-Verbindungen zur Verfügung gestellt werden könnten. Es käme hinzu, daß für die Ausnutzung der resorbierbaren N-Verbindungen bei dem vorhandenen sehr großen Glucoseüberschuß die gesamte Masse an Brotsirup aerob fermentiert werden müßte. Sollte die Glucose gleichzeitig mit den resorbierbaren N-Verbindungen aufgebraucht werden, dann könnte die Fermentation auch nach dem Prinzip der „aeroben Gärung“ gefahren werden. Diese Möglichkeit konnte jedoch ausgeschlossen werden, weil im Verzicht auf die Proteolyse und der Aufteilung des Fermentationssubstrats auf eine aerobe und eine anaerobe Fermentation, die durch die in den Prozeßstufen entstehenden Masseströme verbunden wurden, eine einfachere, wenn auch sehr komplexe Lösung für das Problem der Glucoseumsetzung gefunden wurde.

Der Ausschluß der Anwendung einer Proteolyse erfolgte insbesondere aus der Überlegung, daß durch sie ein weiterer Verfahrensschritt in das Verfahren eingeführt werden müßte, der aufgrund der langsamen Hydrolyse die Herstellzeit für den Brotsirup deutlich verlängern würde. Außerdem wären für die technische Durchführung Anlagenteile, darunter zusätzliche Behältervolumina, notwendig und es müßten finanzielle Aufwendungen für die Enzyme gemacht werden. Schließlich ist auch zu bedenken, daß die Kosten für die aus dem Protein für die Hefevermehrung bereitstellbaren N-Verbindungen mit den Kosten für entsprechende anorganische N-Verbindungen in Relation gesetzt werden müssen. Da das Protein aus dem Rückbrot in den Prozeß der Brotherstellung zurückgeführt werden kann, ist der Mehlpreis der Referenzpreis für einen solchen Vergleich.

5.2 Aerobe und anaerobe Fermentation des Fermentationssubstrats und Verwendung der Produkte

Die Gestaltung der Fermentation des aus dem Brotsirup gewonnenen Fermentationssubstrats stellte die zentrale Problemstellung in der Entwicklung des Verfahrens dar. Für die Lösung der Aufgabe wurde anfänglich, ausgehend von dem zitierten russischen Fermentationssystem, versucht, die Fermentationen möglichst einfach und sicher zu gestalten. Diese Vorgabe ergab sich aus der Überlegung, daß die Fermentationsanlage genauso wie Sauerteig- und Vorteiganlagen oder die Anlage zur Herstellung des Flüssigferments unter den in Brotfabriken üblichen unsterilen Bedingungen zu betreiben sein würden.

Hinsichtlich dieser unsterilen Bedingungen ist darauf hinzuweisen, daß die genannten Verfahren hauptsächlich durch die während den Fermentationen entstehende pH-Wert-Absenkung vor Verderb geschützt werden. Dabei wirken die Verfahrensbedingungen so selektiv, daß sich im wesentlichen nur Mikroorganismen vermehren können, welche für die Teigeigenschaften entscheidend sind. Das gilt auch für die Herstellung des Flüssigferments, dessen Besonderheit gegenüber der Herstellung von Sauerteigen oder mit Hefe geführten Vorteigen darin besteht, daß zwei Fermentationen hintereinander ablaufen, die je für sich für die Herstellung der Endprodukte gleichbedeutend sind. Es handelt sich hierbei in der ersten Stufe um die mit pH-Wert-Absenkung verbundene Milchsäurebildung durch *L.delbrueckii* und in der zweiten um die Vermehrung von Backhefe. Die Fermentation mit *L.delbrueckii* erfüllt für die Backhefevermehrung die Funktion des Schutzes vor Verderbniserregern und für die Bildung des Brotteiges die Funktion seiner Säuerung. Die Backhefevermehrung ist auf die Gasbildung des Brotteiges gerichtet, die als Trieb bezeichnet wird. Das gesamte Verfahren der Flüssigfermentherstellung verläuft kontinuierlich und ist in einem kontinuierlichen Prozeß der Brotherstellung im wöchentlich ablaufenden Rhythmus integriert.

Demgegenüber zielen Sauerteigfermentationen und Vorteigfermentationen mit Hefe nur auf die Vermehrung einer Mikroorganismenart (Milchsäurebakterien) und/oder deren Stoffwechselleistung (Backhefe). Die Stoffwechselleistungen der Mikroorganismen sind dabei mit den im Teig ablaufenden enzymatischen Reaktionen

verbunden. Die StoffwechsellLeistungen und die enzymatischen Reaktionen führen zusammen zu den funktionellen sowie sensorischen Eigenschaften des Brots und haben daran quantifizierbare Anteile.

Die Quantifizierbarkeit der Einzelwirkungen an der Gesamtwirkung der Stoffwechsellistung der Mikroorganismen und der enzymatischen Reaktionen ergeben sich aus der Art der Teigführung. Erläuternd sei zu diesem Tatbestand darauf hingewiesen, daß es von der Höhe des Säuregrads im Sauerteig und dem Anteil des Sauerteigs am Gesamtbrotteig abhängt, wie sauer das Brot schmeckt. Ein weiteres Beispiel ist die Hefezugabe zum Teig. Je größer diese ist, um so größer ist die Volumenzunahme pro Zeiteinheit, so daß über die Hefezugabe die Geschwindigkeit der Teigbereitung und damit die Zeit für die Brotherstellung gesteuert werden kann.

Bezüglich der Verwendung des Flüssigferments in russischen Brotfabriken war für die erstrebte Verfahrensentwicklung dessen Gehalt an Hefe und Milchsäure sowie an Feststoffen aus dem Nährsubstrat für seine Verwendung zum Brotbacken von großem Interesse. Das auf der Basis von Getreide hergestellte Flüssigferment enthält pro kg bei optimaler Führung der beiden aufeinander abgestimmten Fermentationen etwa 10 g Milchsäure, 30-40 g Hefe, 50-60 g Ethanol und ca. 50-60 g aus Protein und Ballaststoffen bestehende Feststoffe, die hier aus Gründen der Verwendung gleicher Fachbegriffe zu dem neu entwickelten Verfahren als Proteinfraction bezeichnet wird (Tab.11). Diese Massebilanz wurde teilweise aus der Literatur übernommen (23) und teilweise aus Sekundärliteratur errechnet (15).

Tabelle 11: Zusammensetzung des Flüssigferments

Flüssigferment	Konzentration (g Stoff/kg Flüssigferment)
Backhefe	30-40
Milchsäure	10
Proteinfraction	50-60
Ethanol	50-60

Das Flüssigferment wird, bezogen auf eine Weizenmehlmenge von 1.000 g, in einer Menge von 150-250 g zum Teig herstellen und Brotbacken verwendet. Das bedeutet, daß der Teig mit einer auf die Mehlmenge bezogenen Hefezugabe von ca. 1% fermentiert wird. Gleichzeitig wird dabei der Trockenmasseanteil der Teigrezeptur durch die Proteinfraction um ca. 1% vergrößert. Die Proteinfraction wirkt sich zusammen mit der Milchsäurezugabe von ca. 0,2%, wiederum bezogen auf die Mehlmenge, geschmacksbildend aus. Es entstehen mit dieser russischen Rezeptur wohlschmeckende Weizenbrote mit einem im Vergleich zu deutschen Weizenbroten gleichen Gewichts deutlich kleinerem Volumen und dichterere Krume.

Das Flüssigferment dieser Zusammensetzung kann nicht dazu verwendet werden, um die Hefemenge zum Backen zu vergrößern, weil sich damit gleichzeitig die Zugabemenge an Säure und Proteinfraction erhöhte. Das hätte sowohl für die Krumenausbildung als auch den Geschmack des Brotes nachteilige Folgen. Für den Einsatz des Flüssigferments ist außerdem von Interesse darauf hinzuweisen, daß der Ethanolgehalt im Teig mit den Backschwaden ausgetrieben wird. Das Ethanol könnte aufgrund seiner hohen Konzentration im Backschwaden durch dessen Kondensation und Destillation zurückgewonnen werden. In ähnlicher Weise könnte das zum Ethanol korrespondierende Kohlendioxid bereits während der anaeroben Fermentation in der zweiten Fermentationsstufe, in der die Hefevermehrung erfolgt, durch Verflüssigung gewonnen werden.

Wird nun die Verfahrenstechnik zur Herstellung des Flüssigferments unter dem Gesichtspunkt der Verwendung von Rückbrot als Rohstoff auf die eingangs genannte Produktionsmenge der deutschen Brotfabrik in ihren Produktströmen quantifiziert, dann könnten für die Herstellung des für 300 t Brot aus 200 t Weizenmehl erforderlichen Flüssigferments von 40 t (Zugabemenge: 200 ml Flüssigferment auf 1.000 g Mehl) 11 t Rückbrot eingesetzt werden. Über die Herstellung und aus dem Flüssigferment könnten neben der vollständigen Verwertung seines der Proteinfraction entsprechenden Feststoffanteils von ca. 2,5 t, seines Hefeanteils von ca. 1,6 t und seines Säuregehalts von ca. 0,4 t, außerdem ca. 2,2 t Ethanol und ca. 2,0 t Kohlendioxid gewonnen werden. Dieses Beispiel könnte aber nur in einer Fabrik verwirklicht werden, die nur eine Brotsorte herstellt.

Das Beispiel ist aus verschiedenen Gründen für die beispielhaft betrachtete Fabrik unrealistisch. Diese produziert aus weit voneinander verschiedenen Rezepturen ein breites Sortiment an Brot und Kleingebäck. Darunter sind reine Weizenbrote, die ohne Sauerteig gebacken werden, ebenso wie Mischbrote, die mit Sauerteig gebacken werden. Allein deshalb würde der Einsatz des milchsauren Flüssigferments nicht für die Herstellung aller im Sortiment befindlichen Backwaren geeignet sein. Das wäre nur möglich, wenn aus dem Flüssigferment die Hefe abgetrennt würde, um auf diese Weise zwei Produkte zu erhalten, die je getrennt für sich eingesetzt werden könnten.

Die Brotfabrik müsste außerdem nicht nur 11 t Rückbrot mit der Fermentationsanlage zum Flüssigferment verarbeiten, sondern 30 t, die ihrer durchschnittlich täglich anfallenden Rückbrotmenge entsprechen (vgl. Kap.3). Dadurch würde aber bei gleicher Prozeßführung, insbesondere gleicher Hefekonzentration im Flüssigferment, eine ca. 3 mal größere Menge an Flüssigferment anfallen. Es würde dann zwar der Bedarf der Fabrik an Hefe von ca. 5 t/d gedeckt sein und die Gesamtmenge an Flüssigferment wäre auch nicht größer als die für die Teigbereitung erforderliche Wassermenge, doch ergäbe sich selbst dann, wenn die Hefe aus dem Flüssigferment abgetrennt würde, das Problem, daß die verbleibende Flüssigfermentmenge zu groß wäre, um auf die Herstellung der Teige verteilt werden zu können, die gesäuert werden müßten.

Damit verliert das russische Verfahren zur Herstellung des Flüssigferments für deutsche Brotfabriken aus der Sicht der Verwertung des Rückbrots an Bedeutung, obgleich es auch dafür einige wesentliche Vorteile aufweist. Diese Vorteile sollen hier noch einmal explizit erwähnt werden, um an ihnen die schrittweise Vorgehensweise zur Lösung der Aufgabenstellung im Bereich der Fermentation aufzeigen zu können. Die Vorteile bestehen darin, daß

- die Fermentationen kontinuierlich ablaufen
- aus den stabilen Fermentationen (Versäuerung und Hefevermehrung) der Aufbau eines einfachen und sicheren Prozesses und seiner entsprechend einfachen Kontrolle resultiert.

- unter den weitgehend anaeroben Bedingungen die Hefe relativ stabil vermehrt werden kann. Der Vorgang ist dem in Brauereien üblichen Gärverfahren vergleichbar.
- die Gewinnung von Nebenprodukten (Ethanol, Kohlendioxid) einfach wäre. Die Ethanolgewinnung ließe sich in diesem Fall besonders energieeffizient gestalten, weil das Ethanol beim Backen in hoher Konzentration in die Backschwaden gelangte. Der für das Backen erforderliche Energieaufwand könnte sozusagen in situ für die Destillation des Ethanols mitverwendet werden.

Stabil läßt sich die Hefe auch bei dem russischen Verfahren allerdings nur unter der Voraussetzung vermehren, daß gewisse Nährstoffe, darunter N-Verbindungen, zugeführt werden. Das ist erforderlich, weil das Protein unter den Verfahrensbedingungen weder aus Getreide (Malz) noch aus Mehl oder für den Fall des Einsatzes von Rückbrot als Rohstoff für die Hefe in Form von resorbierbaren N-Verbindungen zur Verfügung steht, um eine Hefekonzentration im Flüssigferment von 40-60g/L zu ermöglichen.

5.2.1 Nährstoffversorgung bei den Fermentationen

Die Nährstoffversorgung wurde zunächst über ein Modellexperiment überprüft. Dazu wurde das Verfahren zur Flüssigfermentherstellung im Labormaßstab mit einem aus Glucose und Weizenkleie hergestellten Modellsubstrat nachgestellt. Die Kleiezugabe erfolgte mit der Absicht, darüber außer der Kohlenstoffquelle alle anderen Nährstoffe, darunter auch die erforderlichen Mikronährstoffe (Vitamine, Wachstumsstoffe), sowohl in ausreichender Menge als auch in resorbierbarer Form zuzuführen.

Aus der Tabelle 12 geht hervor, daß unter der kontinuierlichen Führung der anaeroben Fermentation des zuvor mit *L. delbrueckii* gesäuerten und danach durch Sieben geklärten Modellsubstrats die Anfangskonzentration der Frischhefe über die Fermentationszeit nicht aufrecht erhalten werden konnte. Sie war nach 5 Tagen bereits von 41,7 g/L auf 26,5 g/L abgesunken. Dazu gleichförmig war ihre Triebkraft zurückgegangen und die Ausbeute an Backhefe aus dem Substrat hatte

entsprechend abgenommen. Sie lag mit 4,8 g HTS/100g Glucose deutlich unter der zu erwartenden Hefevermehrung bei anaerober Fermentation, die 7,5 g HTS/100g Glucose hätte betragen können. Die beobachtete Zunahme des Säuregrads über die Fermentationszeit war auf das Pufferungsvermögen des Kleieextrakts und die Vermehrung von *L. delbrueckii* unter den anaeroben Fermentationsbedingungen zurückzuführen.

Tabelle 12: Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung mit dem Modellsubstrat unter anaeroben Bedingungen: Laboranlage

Parameter	Zeit (h)				
	24	48	72	96	120
Frischhefe (g/l)	41,7	39,5	32,3	25,8	26,5
Triebkraft (%)	83,0	64,0	65,0	57,0	45,0
Ausbeute (g HTS/100g Glucose)	7,2	6,9	5,9	5,3	4,8
pH-Wert/ Säuregrad	3,9/16,6	3,9/17,8	3,9/21,2	3,7/23,6	3,7/28,8

Da aus diesen Versuchen nicht geschlossen werden konnte, ob die Abnahme der Hefekonzentration und daraus folgend der Ausbeute bei Überschuß der Kohlenstoffquelle (Glucose) von einer Limitierung des Angebots an den anderen Nährstoffen, vor allem an N-Verbindungen, oder von den sonstigen anaeroben Fermentationsbedingungen verursacht worden war, wurde der Verfahrensablauf der Modellfermentation um eine Fermentationsstufe erweitert. Das geschah, um die Fermentation auch unter aeroben Bedingungen quasi im Sinne der sogenannten „aeroben Gärung“ (15) führen zu können (Abb. 5).

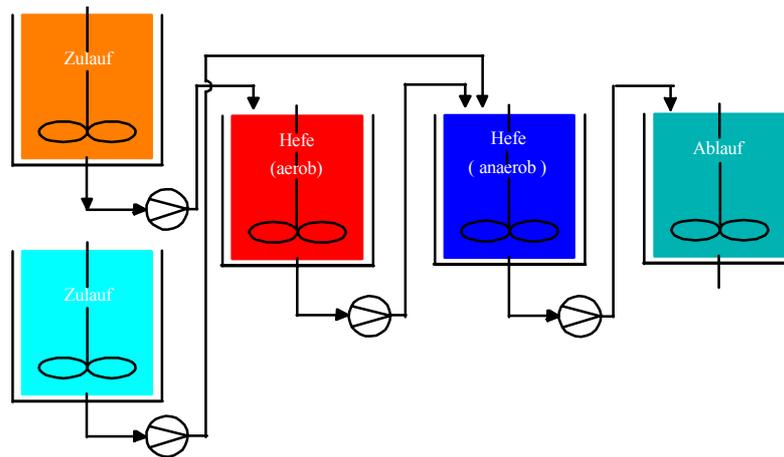


Abbildung 5: Schematischer Aufbau der Laboranlage zur aerob-anaeroben Backhefeproduktion.

Die Ergebnisse zeigen, daß die Nährstoffzufuhr, einschließlich die der Mikronährstoffe, nicht die Ursache für die Konzentrationsabnahme der Backhefe im Nährmedium des vorausgegangenen Versuchs gewesen war (Tab. 13), weil die Hefekonzentration unter den teilweise aeroben Fermentationsbedingungen dieses Versuchs über die Fermentationszeit von drei Tagen sogar leicht angestiegen war. Die Hefeausbeute war in diesem Zeitraum gleich geblieben und die Triebkraft hatte sich auf einem hohen Niveau stabilisiert. Die Triebkraft entsprach praktisch der Triebkraft der zum Vergleich herangezogenen kommerziellen Frischhefe. Unter diesen teilweise aeroben Bedingungen blieb der Säuregrad konstant, weil sich die strikt anaeroben Milchsäurebakterien unter diesen Versuchsbedingungen offenbar nicht mehr vermehrten. Der Ethanolgehalt korrespondierte mit der Hefeausbeute, die aufgrund der Sauerstoffzufuhr mit ca. 11g HTS/100g Glucose deutlich über der bei anaerober Fermentation zu erwartenden lag.

Damit war bewiesen, daß durch die Aufteilung der Fermentation in zwei aufeinander folgende und über die Verbindung des Ablaufvolumenstroms des ersten Fermenters mit dem zweiten voneinander abhängige Prozesse, wobei der erste nach dem Prinzip der aeroben Gärung arbeitete und der zweite eine rein anaerobe Fermentation war, die gesamte Hefemenge der Fabrik, die 1.350kg HTS/d beträgt (vergl. Kap. 3), hergestellt werden könnte. Dazu wäre entsprechend der Versuchsbedingungen eine Aufteilung der Glucose des Brotsirups zu 20% für die Hefevermehrung und zu 80% für die Ethanol- und Co₂-Bildung erforderlich. Die Aufteilung der Fermentation in zwei

Prozesse ist vor allem für die Gewinnung des CO₂ notwendig, weil damit nur ein Teil des Fermentationssubstrats belüftet werden muß. Die übliche Durchführung der aeroben Gärung hätte die Belüftung des gesamten Fermentationssubstrats zur Folge. Dadurch würde das CO₂ so stark mit Luft verdünnt, daß seine Gewinnung unwirtschaftlich wäre. Der Nachteil der Vorgehensweise bestünde aber darin, daß durch die Verbindung des ersten mit dem zweiten Fermenter und der für den Betrieb des ersten Fermenters notwendigen Verdünnung des Brotsirups das Fermentationssubstrat im zweiten Fermenter verdünnt würde.

Tabelle 13: Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung mit dem Modellsubstrat unter aeroben und anaeroben Bedingungen: Laboranlage

Parameter	Zeit (h)		
	24	48	72
Frischhefe(g/l)	29,7	35,0	34,7
Triebkraft (%)	47,0	96,0	91,0
Ausbeute, gesamt (g HTS/100 g Glucose)	10,6	11,0	11,2
pH-Wert/Säuregrad	4,1/10,8	4,0/12,4	3,9/12,2
Umsatzrate (g Ethanol/ 100 g Glucose)	n.b.	40,4	41,2

Es mußte nun gezeigt werden, daß mit Brotsirup die gleichen Ergebnisse wie mit dem Modellsubstrat erzielt werden können. Diesbezüglich geht aus der Tabelle 14 hervor, daß mit Brotsirup über 96h kontinuierliche Fermentation bei annähernd vergleichbarer Hefekonzentration zwar eine zum Modellsubstrat vergleichbare Backhefeausbeute erhalten werden konnte, deren Triebkraft war aber deutlich kleiner als die mit dem Modellsubstrat vermehrte. Für diesen Unterschied kamen drei Ursachen in Betracht. Sie waren in der Sauerstoff- und Nährstoffzufuhr sowie der Vermehrung von Fremdorganismen, vor allem Fremdhefen, zu suchen.

Zur Feststellung der Ursachen wurde ein Fermentationsversuch durchgeführt, bei dem die Nährstoffzufuhr durch den Zusatz von Nährsalzen und Mikronährstoffen so dosiert wurde, daß sie für eine Hefekonzentration von 150g/L ausreichend war. Die

Sauerstoffzufuhr entsprach der des vorausgegangenen Versuchs. Außerdem wurde der Versuch unter sterilen Bedingungen durchgeführt.

Tabelle 14: Ergebnisse der kontinuierlichen Hefevermehrung unter aeroben und anaeroben Bedingungen mit Brotsirup: Laboranlage

Parameter	Zeit (h)			
	24	48	72	96
Frischhefe (g/l)	38,1	32,8	30,0	27,4
Triebkraft (%)	78,0	75,0	71,0	67,0
Ausbeute, gesamt (g HTS/100g Glucose)	13,6	12,2	11,6	9,8
pH-Wert/Säuregrad:				
Substrat, aerob	3,6/8,7	3,6/8,8	3,8/9,4	3,4/14,6
Substrat, anaerob	3,6/14,0	3,6/14,6	3,6/16,6	3,5/16,8
Umsatzrate (g Ethanol/100 g Glucose)	39,8	34,3	41,3	41,0

Über die Versuchszeit der kontinuierlichen Fermentation von 14 Tagen kam es zu keiner Vermehrung von Fremdorganismen und die Triebkraft blieb auf dem Niveau der zum Vergleich eingesetzten kommerziellen Backhefe (Frischhefe) (Tab. 15). Die anfängliche Hefekonzentration von 150g/L ging in den ersten 6 Tagen jedoch schnell zurück und stabilisierte sich dann bei etwa 40g/L. Diese Hefekonzentration entsprach der bei den vorausgegangenen Versuchen gemessenen. Durch die Abnahme der anfänglichen Hefekonzentration um den Faktor 3-4 stand folglich ein entsprechend größeres Nährstoffangebot für die Vermehrung der Backhefe bei der niedrigen Hefekonzentration zur Verfügung. Damit ist belegt, daß die Ursache für die im vorangegangenen Versuch beobachtete Abnahme der Hefekonzentration hauptsächlich auf die Sauerstoffversorgung zurückzuführen war. Es hat sich ferner erwiesen, daß eine optimale Nährstoffzufuhr unter sterilen Bedingungen zu einer optimalen Triebkraft der Backhefe führte. Das Überangebot an Glucose wurde unter den Versuchsbedingungen zu Ethanol und CO₂ (aerobe Gärung) umgesetzt.

Tabelle 15: Ergebnis der kontinuierlichen Hefevermehrung mit Brotsirup unter sterilen Bedingungen bei einer anfänglichen Hefekonzentration von 150g/L:
Laboranlage

Tage	Zellkonzentration (g Frischhefe/L)	Anzahl an Fremdorganismen	Triebkraft (%)
1	152	0	112
2	143	0	104
3	143	0	109
4	120	0	115
5	86	0	98
6	38	0	85
7	40	0	110
8	43	0	102
9	42	0	86
10	38	0	89
11	35	0	97
12	36	0	105
13	42	0	96
14	36	0	85

Zur Bestätigung des Versuchsergebnisses wurde unter gleichen Bedingungen ein weiterer Versuch durchgeführt, bei dem die anfängliche Hefekonzentration auf 40g/L eingestellt wurde und die Nährstoffzufuhr, einschließlich der C-Quelle auf den stabilen Erhalt dieser Konzentration eingestellt wurde (aerobe Hefevermehrung). Die über 5 Tage durchgeführte Fermentation verlief unter Erhalt der Hefekonzentration, der Triebkraft und ohne Vermehrung von Fremdorganismen (Tab. 16).

Aus den Versuchsergebnissen konnte geschlossen werden, daß es für die Verwendung des Fermentationssubstrats aus Brotsirup zur Vermehrung von Backhefe erforderlich ist, den für die Hefevermehrung vorgesehenen Teilstrom zu belüften. Damit wird die Voraussetzung dafür geschaffen, daß sich bei ausreichender Nährstoffzufuhr eine stabile und hohe Triebkraft einstellt. Dies galt unabhängig

davon, ob die Hefevermehrung auf dem Weg der aeroben Gärung oder aerob erfolgte.

Tabelle 16: Konzentration an Backhefe und Fremdorganismen sowie Triebkraft der Backhefe bei der kontinuierlichen Fermentation über einen Zeitraum von 5 Tagen:
Laboranlage

Tage	Hefekonzentration (g Frischhefe/l)	Anzahl an Fremdorganismen	Triebkraft (%)
1	40	0	130
2	45	0	102
3	48	0	115
4	39	0	98
5	44	0	105

Da jedoch aus dem prozeßtechnischen Grund der CO₂-Gewinnung die Hefevermehrung auf einen Teilstrom des Fermentationssubstrats begrenzt werden muß, liegt es nahe, die Hefevermehrung vollständig aerob durchzuführen. Es kann dann der Vorteil genutzt werden, bei hoher Hefekonzentration im Fermentervolumen arbeiten zu können.

Gleichzeitig kann damit dann der vom Fermentationssubstrat abzunehmende Volumenstrom auf ein Fünftel seines Gesamtvolumens begrenzt werden. Entsprechend stünde auch nur ein Fünftel der Glucose nicht für die bei der anaeroben Umsetzung der Glucose zu Ethanol und CO₂ für die CO₂ Gewinnung zur Verfügung. Demgegenüber hinge die Größe dieses Volumenanteils bei der aeroben Gärung von der Sauerstoffzufuhr ab und wäre entsprechend der Ethanolbildung größer als bei rein aerober Hefevermehrung.

Der weitere Vorteil der aeroben Hefevermehrung aus einem Teil des Fermentationssubstrats besteht darin, daß der verbleibende Teil mit seiner bei der Herstellung anfallenden Glucosekonzentration direkt zur Ethanol- und CO₂-Herstellung verwendet werden kann. Beide Stoffe fallen dadurch in einer für ihre Gewinnung durch Destillation und Verflüssigung vorteilhaften Konzentration an. Das

ist für die Führung der Prozeßströme von ausschlaggebender Bedeutung, weil das in den Prozeß eingetragene Frischwasser über das Fermentationssubstrat und nach dessen Verwertung zur Milchsäurebildung und Hefevermehrung sowie Ethanol- und CO₂-Gewinnung als mit löslichen und teilweise suspendierten Stoffen aus dem Rückbrot beladenes Prozeßwasser als Schüttwasser und Teigsäuerungsmittel in den Prozeß der Brotherstellung eingeführt werden soll (vergl. Abb. 1, 4).

Es zeichnete sich folglich ab, daß die wichtigste Aufgabe für die Maßstabvergrößerung von der Laboranlage zur Technikumsanlage darin zu sehen war, die aerobe Fermentation im Hinblick auf einen möglichst kleinen Ablaufvolumenstrom zu optimieren, weil von ihm der Anfall an Flüssigsauer, respektive Schüttwasser entscheidend beeinflusst wird. Zur Erläuterung dieser Abhängigkeit sei darauf hingewiesen, daß der Ablaufvolumenstrom aus dem aeroben Fermenter um so kleiner ist, je höher die Hefekonzentration im Fermenter ist. Die Ablaufvolumenströme aus dem aeroben und dem anaeroben Fermenter dürfen nicht größer werden als es dem Bedarf der Brotfabrik an milchsaurem Teigsäuerungsmittel bzw. Schüttwasser entspricht, um das Verfahren der Rückbrotverwertung ohne Abwasseranfall durchführen zu können.

Aus dieser Problematik erklärt sich auch, weshalb die Entscheidung ganz unabhängig von dem russischen Verfahren der Flüssigfermentherstellung für eine kontinuierliche aerobe Hefevermehrung fiel. Der Grund dafür lag darin, daß bezogen auf die produzierte Hefemenge der Ablaufvolumenstrom eines kontinuierlich arbeitenden Fermenters kleiner ausfallen kann als es dem Füllvolumen eines Fermenters entspricht, der nach dem Zulaufverfahren betrieben wird.

Diese Überlegungen lassen erkennen, daß das russische Fermentationssystem nicht an die besonderen Bedingungen der Verwertung des Rückbrots in der deutschen Brotfabrik adaptiert werden kann. Dem stünde allein schon die für die Einstellung der Triebkraft erforderliche Einführung der aeroben Gärung entgegen, weil diese mit der CO₂-Gewinnung verbunden werden müßte.

5.2.2 Mikronährstoffversorgung für die aerobe Hefevermehrung

Die Abtrennung der Hefevermehrung von der Ethanol- und CO₂-Gewinnung warf die Frage nach der Mikronährstoffversorgung der Hefe über das Fermentationssubstrat auf. Die Hefe würde bei einer aeroben Gärung für ihre Vermehrung unter dem vorgegebenen Teilungsverhältnis für die Glucoseverwertung der gesamte Gehalt des Fermentationssubstrats an Vitaminen und Wuchsstoffen zur Verfügung stehen, im Falle der rein aeroben Hefevermehrung wäre es aber nur ein Fünftel davon. Deshalb wurde untersucht, welchen Beitrag die über die Stufen der Rückbrotaufarbeitung in das Fermentationssubstrat gelangten Vitamine Biotin, Pantothensäure und Thiamin sowie der Wuchsstoff m-Inosit zur Hefevermehrung leisten konnten. Da die Ergebnisse dieser Untersuchung bereits publiziert sind (42), sollen hier nur die wichtigsten daraus zu ziehenden Schlußfolgerungen zitiert werden.

Die Ergebnisse haben gezeigt, daß bezogen auf die im Fermentationssubstrat enthaltene Glucose eine ausreichende Versorgung der Hefe mit Vitaminen und Wuchsstoffen nicht gegeben war. Nur der Wuchsstoff Inosit lag in dafür ausreichender Menge vor. Der Vitaminmangel im Fermentationssubstrat führte zu einem Vitamingehalt in der Backhefe, der erheblich niedriger war als der aus der Literatur für Backhefe bekannte. Die Triebkraft der ohne Vitamin- und Wuchsstoffsupplementierung hergestellten Backhefe fiel deutlich niedriger aus als die in der Backhefe, die bei der Vermehrung optimal mit diesen Mikronährstoffen versorgt wurde. Das Fermentationssubstrat mußte deshalb für die aerobe Hefevermehrung zur Einstellung einer hohen Triebkraft mit Biotin, Pantothensäure und Thiamin supplementiert werden. Die Supplementierung betrug bezogen auf 100g im Fermentationssubstrat enthaltener Glucose 80-90% des Bedarfs. Aus dieser Aufgabe geht auch hervor, daß selbst wenn die Hefevermehrung für ein Fünftel des Glucoseangebots durch aerobe Gärung ohne CO₂-Gewinnung durchgeführt würde, die Versorgung mit diesen Vitaminen aus der Gesamtmasse des Fermentationssubstrats im Bereich der Unterversorgung läge.

5.2.3 Verwendung der Flüssighefe, des Flüssigsauers und der Proteinfraktion

Die Verwendung der verfahrenskonform hergestellten Backhefe und des Flüssigsauers stellte für die Maßstabvergrößerung von der Labor- zur Technikumsanlage einen entscheidenden Meilenstein dar, weil davon die Umsetzbarkeit des Verfahrens abhängt. Diesbezüglich wurde erstrebt, die aus dem aeroben Fermenter kontinuierlich abzuscheidende Backhefe ohne die bei der technischen Herstellung von Frischhefe übliche und notwendige Aufreinigung direkt für die Brotherstellung einzusetzen. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht in einer beträchtlichen Einsparung von Prozeßschritten, die entsprechend mit Kosten verbunden sind. Gleichzeitig bringt die Verwendung der dabei flüssig anfallenden Backhefe den weiteren Vorteil, daß damit ein Teil des Prozeßwassers direkt in der Brotherstellung aufgeht. Die Konzentration der Backhefe in diesem Backhefestrom läßt sich in weiten Grenzen variabel gestalten. Sie findet ihre Begrenzung ausschließlich in ihrer Wirkung auf die Qualitätsmerkmale des Brotes. Die im Prozeßwasser durch Zentrifugalabscheidung konzentrierte Hefe wird im Kontext dieser Arbeit als Flüssighefe bezeichnet.

Für die Verwendung des Flüssigsauers zur Brotherstellung war ebenfalls dessen Einfluß auf die Qualitätsmerkmale des Brotes entscheidend. Diesbezüglich wurde insbesondere der Einfluß der einzelnen Verfahrensschritte des gesamten Verfahrens auf die sensorischen Merkmale des erst nach der anaeroben Fermentation anfallenden Flüssigsauers als kritisch angesehen. Ähnliche Überlegungen waren für die Verwendung der Proteinfraktion zu treffen.

Zur Feststellung der vorgesehenen Anwendung der drei im Prozeß anfallenden Produkte wurden diese mit der Laboranlage gemäß der im Kapitel Material und Methoden gegebenen Angaben in für Laborversuche ausreichender Menge hergestellt. Die Produkte wurden dann in Rezepturen für Standardbackversuche eingearbeitet und es wurden mit den so hergestellten Teigen die entsprechenden Brote gebacken. Da sich geschmackliche Veränderungen beim Einsatz der Flüssighefe und des Flüssigsauers am ehesten in Weizenbrotten bemerkbar machen würden, wurden mit den Produkten Weizenkastenbackversuche durchgeführt. Darüber hinaus wurde der Flüssigsauer auch für die Herstellung eines Mischbrots

aus je 50% Weizen- und Roggenmehl eingesetzt. Die Proteinfraction wurde nur in Mischbrotrezepturen eingearbeitet. Die mit der jeweiligen Standardrezeptur hergestellten Brote dienten als Vergleich für die mit den drei Produkten gebackenen Brote.

Aus den in den Tabellen 17 und 18 beispielhaft dargestellten Ergebnissen geht hervor, daß der Einsatz der Produkte sich für die Brotherstellung als unproblematisch erwies und die Qualitätsmerkmale der Brote in der für die gewählten Brottypen üblichen Schwankungsbreite lag. Damit war der für die Fortsetzung der Verfahrensentwicklung besonders wichtige Meilenstein erfolgreich erreicht. Es konnte nun unter Verwendung der Erkenntnisse zur Gestaltung des Verfahrensablaufs daran gegangen werden, die Technikumsanlage aufzubauen, um Details zur Verfahrensführung zu erarbeiten.

Tabelle 17: Weizenbackversuche mit Flüssighefe und Flüssigsauer: Laboranlage

Rezeptur/Ergebnis	Vergleich	Backversuch	
		Flüssighefe	Flüssigsauer
Mehl			
Weizen (T 550) (g)	500	500	500
Hefe			
handelsübliche Hefe (g)	20	-	5
Flüssighefe (g)	-	35	-
Flüssigsauer (g)	-	-	100
Wasser (g)	300	279	200
Salz (g)	10	10	10
Knetdauer (g)	5	5	5
Teiggewicht (g)	817	827	820
Teigbeschaffenheit	normal	normal	normal
Teigausbeute	163	165	164
Teiggare (min)	20	20	20
Teigeinlage (g)	600	600	600
Stückgare (min)	50	80	50
Backzeit (min)	30	30	30
Gebäckgewicht (g)	514	533	536
Gebäckvolumen (ml)	1650	1420	1640
Porenbild	7	7	7
Eingesetzte Mehlmenge (g)	367	363	366
Brotausbeute (g)	140	147	147
Backverlust (5)	14	11	11
Volumenausbeute (ml)	449	391	448
Volumenfaktor	125	92	124
Porenfaktor	90	90	90
Backzahl	112	82	112
Form	noch normal	normal	normal
Bräunung	kräftig	kräftig	normal
Lockerung	20	20	20
Gleichmäßigkeit	0	0	5
Elastizität	0	0	0
Wertzahl	132	102	137
Geschmack	normal	normal	aromatisch

Tabelle 18: Roggenbackversuche mit Proteinfraction und Flüssigsauer: Laboranlage

Rezeptur/Ergebnis	Vergleich	Backversuch	
		Protein- fraktion	Flüssigsauer
Mehl			
Weizen ((T 550) (g)	500	500	500
Roggen (T 997) (g)	500	500	500
Hefe			
handelsübliche Hefe (g)	20	20	20
Trockensauerteig (g)	8	8	-
Proteinfraction (g)	-	200	-
Flüssigsauer (g)	-	-	680
Wasser (g)	680	680	-
Salz (g)	20	20	20
Teiggewicht/-einlage (g)	1700	1889	1737
Teigbeschaffenheit	normal	etwas feucht	normal
Teigausbeute	170	189	174
Teiggare (min)	20	20	20
Stückgare (min)	50	50	50
Backzeit (min)	60	60	60
Brotgewicht (g)	1492	1687	1557
Brotvolumen (ml)	3620	3840	3150
Brotausbeute (g)	149	169	156
Ausbackverlust (%)	12	11	10
Volumenausbeute (ml)	362	384	315
pH-Wert	5,15	4,54	4,31
Säuregrad	4,9	6,2	7,3
Wölbung	gut	etwas flach	etwas rund
Bräunung	normal	kräftig	normal
Krumenlockerung	gut	gut	gut
Porengleichmäßigkeit	gleichmäßig	gleichmäßig	gleichmäßig
Krumenelastizität	gut	gut	gut
Kaufähigkeit	gut	gut	gut
Geschmack	mild	einwandfrei	aromatisch

5.3 Backhefeherstellung mit der Technikums- sowie der Pilotanlage und Verwendung der Backhefe

Da aus den mit der Laboranlage erhaltenen Ergebnissen hervorging, daß die aerobe und die anaerobe Fermentation voneinander getrennt betrieben und der Ablaufvolumenstrom aus beiden Fermentationen im Hinblick auf einen kleinstmöglichen Anfall optimiert werden sollte, um den nach den Fermentationen verbleibenden Volumenstrom als Flüssigsauer in Form von Schüttwasser bei der Brotherstellung verwenden zu können, wurde der Stand der Technik für die Ethanolherstellung aus stärkehaltigen Substraten zusammen mit dem Teilungsverhältnis der für die Backhefe- und Ethanolherstellung erforderlichen Glucose aus dem Brotsirup für ein Konzept der Führung der Stoffströme herangezogen.

Dem Stand der Technik entsprechend sollte die Glucosekonzentration des für die Ethanolherstellung vorgesehenen Teilstroms zwischen 15-18% betragen. Eine höhere Glucosekonzentration kann nicht gewählt werden, weil die Hefe durch Ethanolkonzentrationen oberhalb 7% stark in ihrer Stoffwechselaktivität beeinträchtigt wird. Eine Glucosekonzentration in dem genannten Bereich kann aus dem Brotsirup leicht hergestellt werden, weil aus energiewirtschaftlichen Gründen die Einmischkonzentration auf einen Feststoffgehalt von ca. 40% eingestellt wird. Daraus resultiert für einen durchschnittlichen Stärkegehalt im Rückbrot von 63,8% in der Trockenmasse (vgl. Tab. 3) und einen in der Sirupbereitungsstufe erreichbaren Hydrolysegrad der Stärke zu Glucose von 90% (vgl. Abb. 3) eine Glucosekonzentration im gesäuerten Brotsirup von ca. 22%.

Für die Ethanolherstellung und die damit verbundene Kohlendioxidherstellung braucht der Brotsirup nur auf die vorgenannte Konzentration verdünnt zu werden. Dieser Verdünnungsschritt kann für die zusätzlich vorgesehene Backhefeerstellung dazu verwendet werden, um die dafür erforderliche Glucosemenge von einem Fünftel der Gesamtmenge in einem entsprechend großen Teilstrom abzuzweigen. Das kann, wie bereits gezeigt (vgl. 5.1.3.4), durch Zentrifugalabscheidung des aus dem verdünnten Brotsirup sedimentierbaren Feststoffanteils geschehen. Diesbezüglich ist es im Hinblick auf die direkte Verwertung der Backhefe in der Brotfabrik in Form von

Flüssighefe als vorteilhaft anzusehen, daß mit der Zentrifugalabscheidung nur eine Teilklärung des entstehenden Oberlaufs erforderlich ist.

Die verbleibenden vier Fünftel des verdünnten aber nicht geklärten Brotsirups, der zuvor zusätzlich zur Abscheidung von grobkörnigen Bestandteilen und Fremdstoffen durch Sieben gereinigt werden sollte, können direkt als Fermentationssubstrat für die Ethanol- und Kohlendioxidherstellung eingesetzt werden. Nach Abschluß der Fermentation kann das Ethanol gemäß dem Stand der Technik durch Destillation aus dem Fermentationssumpf ausgetrieben werden. Aus dem vom Ethanol befreiten Sumpf können dann durch Zentrifugalabscheidung die Proteinfraction und der Flüssigsauer gewonnen werden.

Nach diesem Konzept der Führung der Stoffströme bildet der aus dem anaeroben Fermenter anfallende Flüssigsauer einen nicht weiter reduzierbaren Volumenstrom. Demzufolge kann der entstehende Gesamtvolumenstrom an Flüssigsauer nur über die Führung des für die aerobe Fermentation vorgesehenen Teilstroms beeinflußt werden. Diesbezüglich war zu prüfen, welches Potential sich dafür aus der kontinuierlichen Backhefevermehrung gegenüber der Backhefevermehrung im Zulaufverfahren erschließen läßt. Dabei ging es nicht allein um eine Minimierung des Volumenstroms, sondern auch um die damit verbundene Konzentrierung der Säure. Das ist für die Verwendung des Flüssigsauers zur Herstellung des Brotsortiments der Fabrik wesentlich, das aus gesäuerten und ungesäuerten Backwaren besteht.

Dieses Konzept der Führung der Stoffströme weist im Hinblick auf die Produktherstellung den besonderen Vorteil auf, daß diese stark zugunsten der Backhefeherstellung ausgeweitet werden kann, wenn dafür die Fermenterkapazität entsprechend ausgelegt wird und eine entsprechende Abnahme für das Produkt vorhanden ist. Gemäß der in der Tabelle 8 dargestellten Masseverteilung können bis zu vier Fünftel der Glucose für die Backhefeherstellung über den vorgesehenen Verdünnungsschritt des Brotsirups mit einer Glucosekonzentration von 15% zur Verfügung gestellt werden.

Nur für den Fall, daß annähernd die gesamte Glucosemenge im Brotsirup zur Backhefeherstellung eingesetzt werden sollte, womit die Ethanol- und

Kohlendioxidherstellung entfielen, müsste aus dem Brotsirup die Glucose praktisch vollständig extrahiert werden. Das gälte insbesondere dann, wenn nur eine Teilmasse des Rückbrots verwertet werden sollte, beispielsweise zur schwerpunktmäßigen Herstellung der Backhefe. Einen Hinweis darauf gibt das in der Tabelle 8 und 9 aufgeführte Verteilungsschema für die Extraktion des Brotsirups über eine zusätzlich eingeführte Extraktionsstufe. Darauf soll später im Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Anwendung des Verfahrens gezielt eingegangen werden.

5.3.1 Optimierung der aeroben Fermentation mit der Technikumsanlage

Gemäß der schrittweisen Vorgehensweise zur Lösung der Aufgabenstellung, war vorgesehen, die Fermentationen für die Herstellung der Produkte in Anlehnung an das russische Verfahren so einfach wie möglich zu gestalten (vgl. 5.2). Darüber ist bereits über die mit der Laboranlage erhaltenen Ergebnisse im vorausgegangenen Kapitel berichtet worden. Aus diesen Ergebnissen war bereits zu erkennen, daß die aerobe Stufe der Fermentation unter sterilen Bedingungen betrieben werden muß, um die erforderliche Triebkraft der Backhefe erreichen zu können.

Aus der Bedingung der Sterilhaltung würde aber ein erheblicher technischer Aufwand für den Betrieb einer technischen Anlage für die vorgesehene Rückbrotverwertung entstehen. Deshalb wurde zunächst noch einmal mit der Technikumsanlage überprüft, ob die aerobe Gärung unter unsterilen Bedingungen nicht doch so geführt werden kann, daß sich unter stabiler Backhefevermehrung bei hoher Ausbeute und relativ hoher Zellkonzentration eine ausreichende Triebstärke der Backhefe ergeben kann. Ansatz für diese Überlegung war es, daß die Backhefevermehrung auf dem Wege der aeroben Gärung gegenüber der rein aeroben Vermehrung den Vorteil der schnelleren Vermehrung mit sich bringt. Es war zu prüfen, ob sich dies als Selektionsvorteil gegenüber dem Wachstum von Wildhefen ausnutzen ließe.

Wildhefen kommen in Brotfabriken überall vor, so daß Kontaminationen der Fermentationen mit diesen unausweichlich sind. Die Ausbreitung von Wildhefen im Fermenter war deshalb besonders zu untersuchen, weil sich die vorgesehene Rückführung eines Teils des nicht vollständig von Hefezellen freien

Ablaufvolumenstroms in den Fermenter darauf unterstützend auswirken kann. In dieser Rückführung besteht der wesentliche Vorteil der kontinuierlichen Fermentation gegenüber der Hefevermehrung im Zulaufverfahren, weil damit der Ablaufvolumenstrom zur Verdünnung des konzentrierten Substrats vorgenommen werden kann und so der Ablaufvolumenstrom insgesamt minimiert werden kann. Auf die Rückführung des von der Hefe befreiten Ablaufvolumenstroms kann deshalb nicht verzichtet werden.

Alle zur Backhefevermehrung durch aerobe Gärung durchgeführten Versuche haben jedoch gezeigt, daß das erstrebte Ziel unter keiner der angewendeten Versuchsbedingungen erreicht werden konnte. Es wurden lediglich die mit dem Laborfermenter erzielten Ergebnisse bestätigt. Auszugsweise sind in Tabelle 19 Versuche dargestellt, welche die Aussage belegen.

Tabelle 19: Kontinuierliche Backhefeproduktion unter unsterilen Bedingungen auf dem Wege der aeroben Gärung

Versuchsbedingungen/ Versuchsergebnisse	Versuchsnummer		
	119	126	128
Versäuerung	ja	ja	nein
Nährstoffzugabe	nein	ja	ja
Fermentationszeit (h)	24	26	60
Backhefe (g/l): Start	20	37	102
Backhefe (g/l): Ende	n.b.	12	38 (≈ 70)*
Ausbeute (g HTS/100 g Glucose)	6,6	11,9	9,8 (≈ 18)*
Mittlere Durchflußrate (h^{-1})	n.b.	0,41	0,25
Triebkraft (%): Start	100	100	100
Ende	n.b.	n.b.	< 60

n.b. = nicht bestimmt

* bezogen auf die Summe aus Backhefe und Wildhefe

Unter konstanter Belüftung blieb die Backhefeausbeute selbst bei kleiner anfänglicher Backhefekonzentration klein. Zwar konnte durch Nährstoffzugabe und einer im Vergleich zum zitierten Versuch höherer Backhefekonzentration die Ausbeute deutlich gesteigert werden, doch wurde die Backhefekonzentration durch die gewählten Versuchsbedingungen, die bei hoher Zuwachsrates von $H = 1,41$ an sich eine Ausbeute von $0,22$ g HTS/g Glucose hätte erbringen können, schnell von

anfänglich 37 g Backhefe/l auf gegen Ende des Versuchs 12 g Backhefe/l abgesenkt. Mit dieser Ausbeute hätten 50% der im Brotsirup vorhandenen Glucose der aeroben Gärung zugeführt werden müssen, um den Backhefebedarf der Fabrik zu decken.

Die Anpassung der Durchflußrate an die Wachstumsrate führte dann zwar zu einer relativ stabilen Hefevermehrung, so daß sich die Hefekonzentration über die Fermentationszeit auf einem annähernd konstanten und hohen Niveau (ca. 70 g Hefe/l) einpendelte, doch sank die Triebkraft der gebildeten Flüssighefe deutlich, was auf die starke Vermehrung von Wildhefen zurückgeführt werden konnte (Abb. 6). Der Rückgang in der Triebkraft folgte dabei dem Wachstum der Wildhefen, die sich in dem für diesen Versuch eingesetzten Fermentationssubstrat aus nicht versäuertem Brotsirup trotz der Führung der Fermentation bei einem pH-Wert von 4,0 vermehrten. Dieser pH-Wert entspricht dem des versäuerten Sirups.

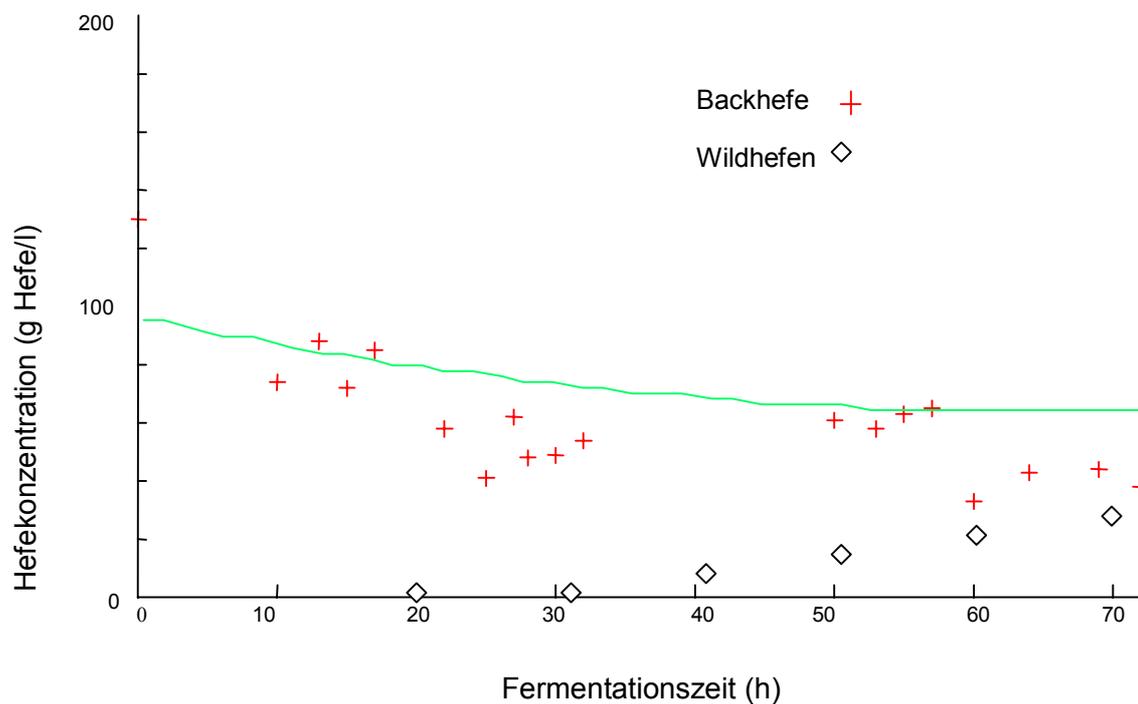


Abbildung 6: Verlauf der Konzentration der Backhefe und der wilden Hefen während der kontinuierlichen Backhefeproduktion unter unsterilen Bedingungen auf dem Weg der aeroben Gärung: Versuch Nr. 128.

Damit ist bewiesen, daß mit der Versäuerung des Brotsirups zwar Verderbniserreger unterdrückt werden können, nicht jedoch Wildhefen. Diese Erkenntnis ist für die Auslegung für das Gesamtverfahren bedeutsam. Es bleibt außerdem festzuhalten, daß sich die beiden anderen Vorteile der hier gewählten Führung der aeroben Gärung, nämlich die Ausnutzung einer gegenüber der rein aeroben Fermentation schnelleren Hefevermehrung und die Rückführung des von Hefe weitgehend befreiten Ablaufvolumenstroms zur Verdünnung des Fermentationssubstrats nicht verwirklichen haben lassen.

Es stand folglich fest, daß für die weitere Entwicklung des Verfahrensschrittes der Backhefevermehrung sterile Betriebsweise des Fermenters gewählt werden muß. Daraus folgt zwangsläufig auch, daß die rein aerobe Hefevermehrung der durch aerobe Gärung möglichen vorzuziehen ist, weil sie den Vorteil der optimalen Nutzung der Glucose zur Herstellung von Backhefe, Ethanol und Kohlendioxid unter der Vorgabe des betriebsbedingten Backhefebedarfs aufweist. Damit ist dann auch die Voraussetzung für eine zugehörige optimale Führung der Volumenströme geschaffen, von denen der Ablaufvolumenstrom des Backhefermenters das für die Minimierung des Schüttwassers, respektive Flüssigsauers entscheidende Potential besitzt.

5.3.2 Backhefevermehrung mit dem Technikumsfermenter

Die für die aerobe Backhefevermehrung mit dem Technikumsfermenter gestellte Aufgabe wurde durch technische Maßnahmen bei der Konstruktion und Steuerung des Fermenters gelöst, die in der Gewährleistung des Sterilbetriebs, eines ausreichenden Sauerstoffeintrags und der Entwicklung der Regelkreise bestanden (Abb. 7). Die Durchführung dieser Maßnahmen führte zu einer schrittweisen Optimierung der Backhefevermehrung. Das Ergebnis der Optimierung ist in der Tabelle 20 und Abbildung 8 anhand wesentlicher Teilergebnisse exemplarisch dargestellt.

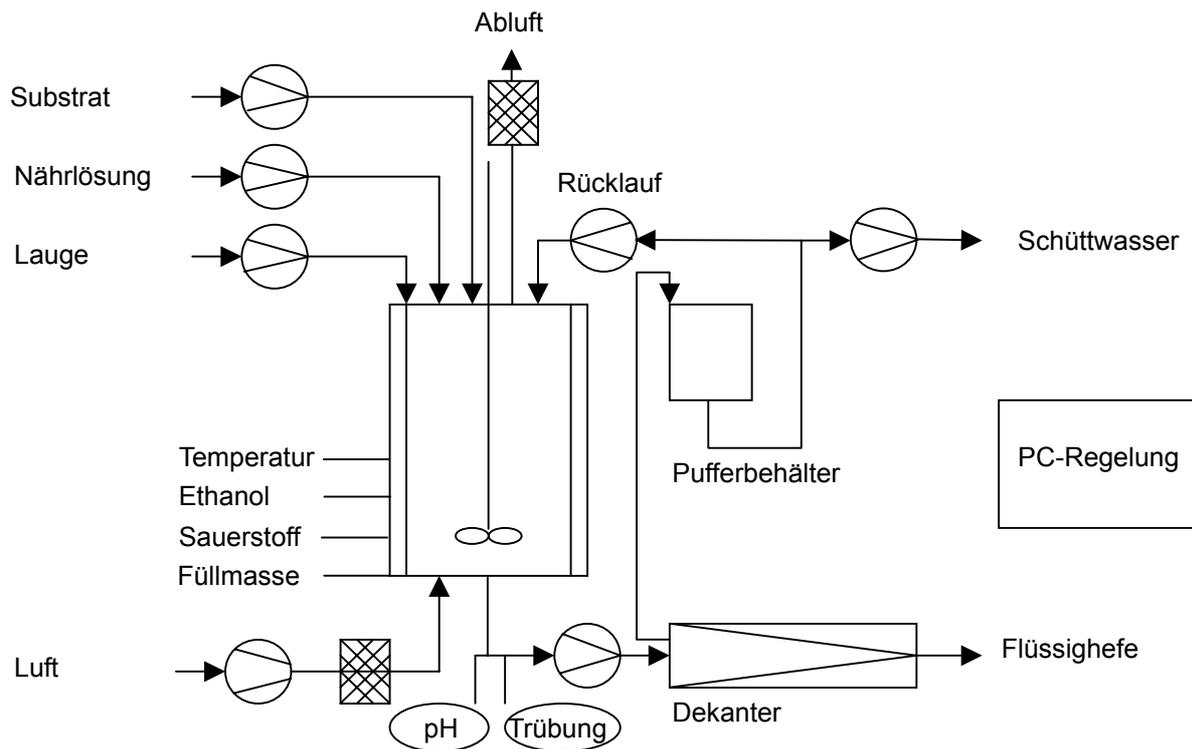


Abbildung 7: Fließbild des Technikumsfermenters.

Wesentliche Erkenntnis aus den Versuchen 155 und 157 war es, daß die Backhefekonzentration über den Versuchszeitraum von 91 h (Nr. 155) und 53 h (Nr. 157) in gewissen Grenzen (Tab. 20) und Schwankungsbreiten (Abb. 7) stabil gehalten werden konnte. Die Triebkraft änderte sich über den gesamten Versuchszeitraum nicht und entsprach der Triebkraft der zum Vergleich herangezogenen handelsüblichen Backhefe (Preßhefe). Allerdings war bei gleicher Durchflußrate die Ausbeute deutlich kleiner als die angestrebte maximal mögliche von 54 g HTS/100 g Glucose. Der Grund dafür lag in dem unzureichenden Sauerstoffeintrag in das Fermentationssubstrat durch das eingesetzte Propellerrührwerk. Dieses Rührwerk wurde deshalb durch ein effektiveres Rührwerk mit Rührscheiben anstelle der Propeller ersetzt.

Tabelle 20: Backhefeproduktion unter den Bedingungen der kontinuierlichen aeroben Fermentationen

Versuchsbedingungen/ Versuchsergebnisse	Versuchsnummer			
	Propellerrührer		Scheibenrührer	
	155	157	158	163
Fermentationszeit (h)	91	53	116	96
Backhefe (g/l): Start	60	50	50	55
Backhefe (g/l): Ende	30	60	40	70
Ausbeute (g HTS/100g Glucose)	22,2	27,2	44,9	52,0
Mittlere Durchflußrate (h ⁻¹)	0,13	0,13	0,12	0,15
Triebkraft (%) (Start/Ende)	100	100	100	100

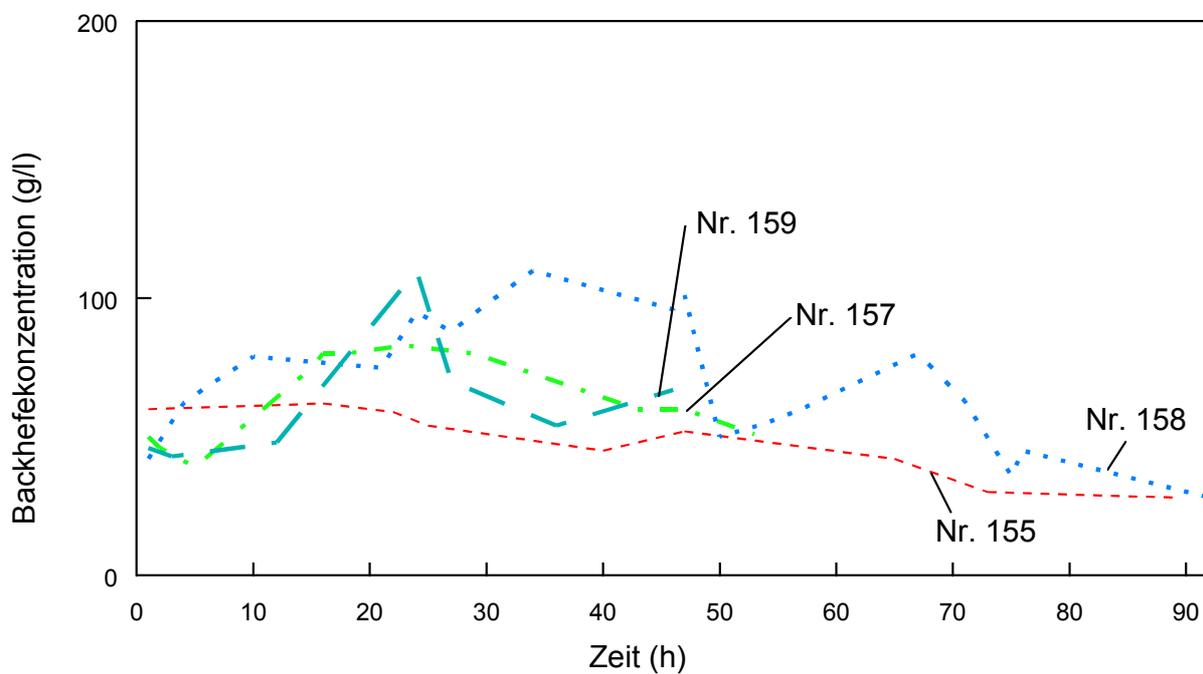


Abbildung 8: Verlauf der Backhefekonzentration während der kontinuierlichen aeroben Fermentation.

Die Optimierung des Scheibenrührwerks durch Einstellung der Rührelemente führte schließlich zu dem gewünschten Ergebnis. Das ist durch die Versuche Nr. 158 und Nr. 163 belegt. Die Regelung der Fermentation führte in allen Versuchen zu einer stabilen Betriebsweise des Fermenters. Die festgestellte Schwankungsbreite der Backhefekonzentration (Abb. 8) korrespondierte mit der entsprechenden Schwankungsbreite der Regelung der Betriebsparameter (Abb. 9). Die Schwankungsbreiten sind bezogen auf das Betriebsergebnis als sehr klein zu bezeichnen, so daß das Ergebnis für eine Modellrechnung für den Massestrom des Betriebs einer für die Fabrik erforderlichen Anlage verwendet werden konnte.

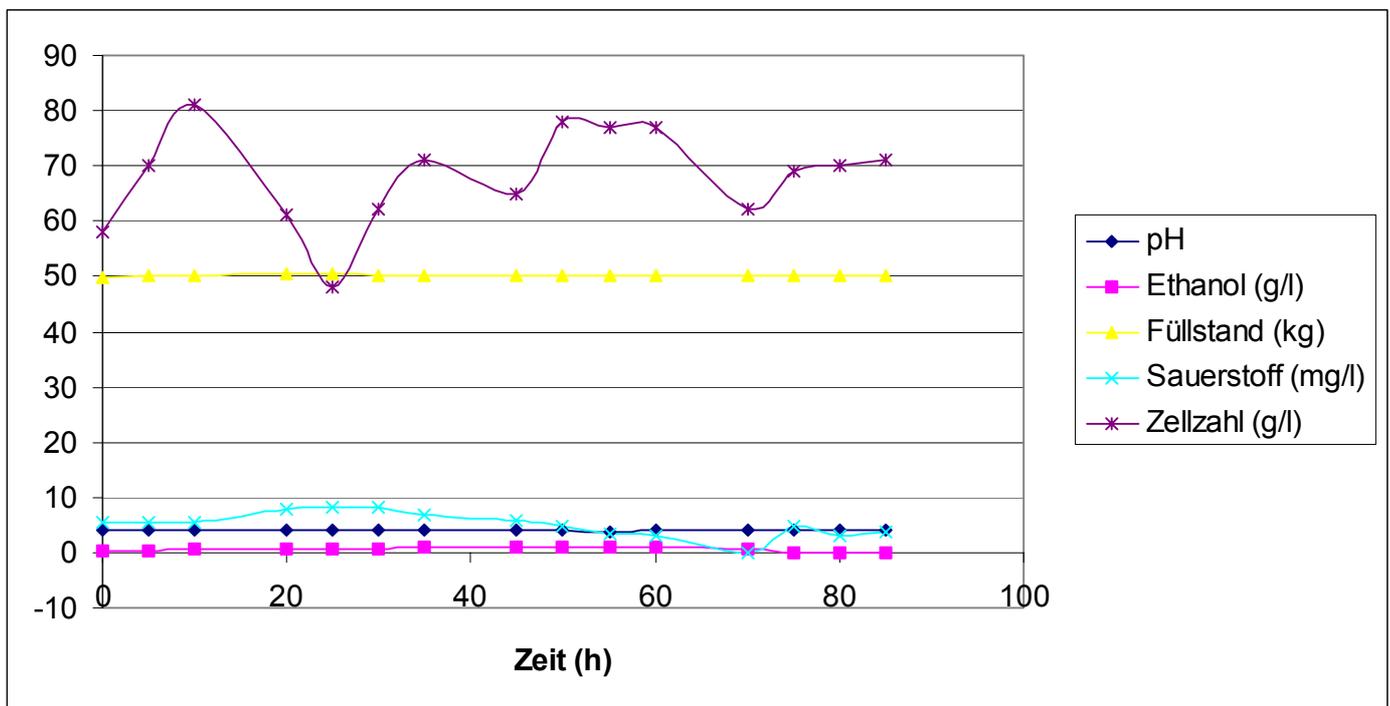


Abb. 9. Verlauf der Backhefekonzentration in Abhängigkeit von den Regelgrößen der kontinuierlichen Fermentation: Versuch Nr. 163.

Aus der Abbildung 9 geht für die Modellrechnung hervor, daß durch Belüftung die Backhefeausbeute nicht weiter hätte optimiert werden können. Das ergibt sich aus dem Sauerstoffeintrag, der über die ganze Fermentationszeit von 85 h durch die Belüftung so groß gewählt worden war, daß er die Backhefevermehrung nicht limitierte. Deshalb konnte die Backhefevermehrung über die Verwertung des zugeführten Fermentationssubstrats in das technische Optimum geführt werden. Die kleine Ethanolbildung beweist das Erreichen des Ziels. Die Backhefeausbeute wich

über die Fermentationszeit weniger als 3% vom theoretischen Optimum ab. Da die Glucosekonzentration im Fermentationssubstrat aus dem verfahrenstechnischen Grund seiner Aufbereitung aus dem Brotsirup auf 15% festgelegt war, ergab sich daraus zugleich die optimal erreichbare Backhefekonzentration im Fermenter und davon abhängig ergaben sich die optimalen Ablaufmassenströme.

Der Sauerstoffeintrag wurde auch deshalb so groß gewählt, weil es in der Anfahrphase des Fermenters durch die Rücklaufführung eines Teils des Fermenterablaufs zu einer Konzentrierung nicht fermentierbarer organischer und anorganischer Stoffe kommt, die einen erheblichen Einfluß auf die Sauerstofflöslichkeit ausüben. Es sollte vermieden werden, dadurch die Backhefevermehrung zu beeinträchtigen.

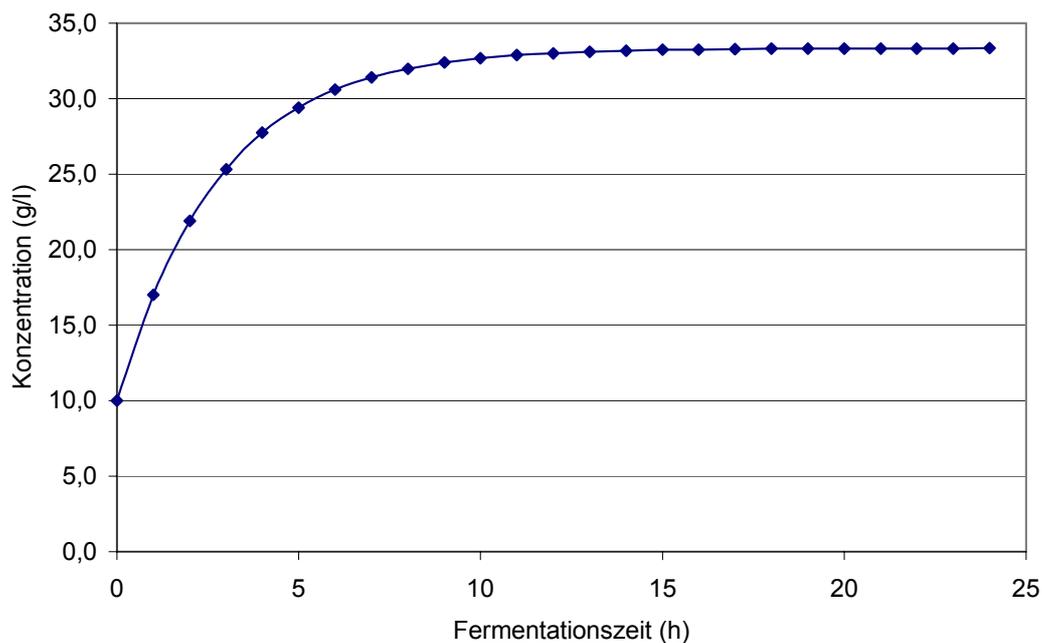


Abbildung 10: Erreichen des Gleichgewichtszustands der Konzentration an Chloridionen im Technikumsfermenter.

Die Abbildung 10 zeigt, daß nach ca. 15 h unter den gewählten Betriebsbedingungen ein Gleichgewichtszustand der Konzentration zwischen den zu- und abgeführten Stoffen eintrat. Der Gleichgewichtszustand wurde über die Chloridionenkonzentration berechnet, die exemplarisch für alle anderen nicht fermentierbaren Stoffe dazu ausgewählt wurde. Die Betrachtung des Gleichgewichtszustands und seines Niveaus

gibt wichtige Hinweise auf die Abscheidecharakteristik der Backhefe durch Zentrifugalabscheidung. Auf diese wirkt sich nämlich sowohl die Dichte des Fermenterablaufs als auch seine Viskosität aus. Aus beidem ergibt sich eine weitere begrenzende Größe für das Niveau des Gleichgewichtszustands.

Zur Vorbereitung auf die Modellrechnung wurden die in der Abbildung 9 dargestellten Ergebnisse auf die mittleren stündlichen einzelnen Masseströme umgerechnet. Damit waren diese für den Fermenter und unter den für seinen Betrieb gültigen Randbedingungen der Verfahrensgestaltung explizit dargestellt. Die in der Tabelle 21 angegebenen Werte für den Massestrom des Fermentationssubstrats von 1,86 kg/h, den Dekanterzulauf von 7,5 kg/h und den Rücklauf von 5,3 kg/h können damit als Schlüsselgrößen für die Maßstabsvergrößerung einer solchen Anlage in der Fabrik und die mit ihr zu erstellenden Leistung an Endprodukten gemäß der vorkommenden Rückbrotmenge verwendet werden.

Tabelle 21: Mittlerer Massestrom: Technikumsanlage

Stoffstrom	Massestrom (kg/h)
Fermentationssubstrat	1,86
Nährsalzlösung	0,27
Lauge	0,05
Dekanterzulauf	7,5
Flüssighefeablauf (20%TS)	0,77
= (Backhefe 27%TS)	(0,53)
= (Hefe TS)	(0,14)
Schüttwasser	1,41
Rücklauf	5,3

Unter der optimalen Betriebsweise des kontinuierlichen Fermenters fielen bei einer Betriebszeit von sechs Tagen, die dem Produktionsrhythmus der Fabrik entsprechen, unter Berücksichtigung des Abfahrmassestroms des Fermenters auf 1 kg Flüssighefe (20% TS), die 0,67 kg Frischhefe entsprechen, 2,1 kg Schüttwasser an. Dieser Wert ist mit dem Abfahrmassestrom eines nach dem Zulaufverfahren betriebenen

Fermenters zu vergleichen. Gemäß dem Stand der Technik kann unter der Annahme einer Backhefekonzentration von 180 g/l (15) in einem solchen Fermenter und der Abnahme einer zum kontinuierlichen Fermenter gleichen Flüssighefemenge davon ausgegangen werden, daß aus diesem auf 1 kg Flüssighefe 2,7 kg „Schüttwasser“ anfielen.

Aus diesem Vergleich geht hervor, daß der Vorteil der kontinuierlichen Fermentation gegenüber der Fermentation im Zulaufverfahren bezogen auf den als Schüttwasser bei der Brotherstellung verwertbaren Ablaufvolumenstrom nicht allzu groß wäre. Deshalb sind für die Auslegung des Verfahrens hinsichtlich der Backhefevermehrung grundsätzlich beide Möglichkeiten gegeben. Eine Entscheidung über den Einsatz des einen oder anderen Fermenters wird deshalb weniger vom Schüttwasseranfall als vielmehr von anderen Kriterien, wie der Sicherheit seines Betriebs und den für seine Beschaffung erforderlichen Investitionskosten abhängen.

Diese Erkenntnis hatte für die weitere Durchführung des Vorhabens eine wichtige Konsequenz. An sich wäre es bei Erreichen dieses Ergebnisses erforderlich geworden, die Untersuchung durch Bau einer Pilotanlage mit kontinuierlichem Fermenter in der Fabrik fortzuführen. Dem stand jedoch eine unverhältnismäßig große Investitionssumme für den Bau eines steril zu haltenden Fermenters entgegen. Da es in dieser Phase der Untersuchung aber nur noch darum ging, genügend Backhefe aus dem Brotsirup zu produzieren, wurde vom Bau einer Pilotanlage abgesehen. Die Versuche zur Backhefevermehrung wurden dafür in einer angemieteten Pilotanlage für die Backhefeherstellung durchgeführt. Diese Pilotanlage wurde mit den notwendigen Ausrüstungen für die Aufbereitung des Rückbrots zu Brotsirup ergänzt (vergl. Kap. 4.3).

5.3.3 Backhefevermehrung mit der Pilotanlage und Verwendung der Backhefe

Für den Einsatz des Pilotfermenters war es erforderlich, die technischen Möglichkeiten zur Fermentationssubstratherstellung und seiner Verwertung zur Herstellung von Flüssighefe auf den Einsatz in der Brotfabrik abzustimmen. Es gelang, diese Vorgabe auf einen Arbeitsablauf im wöchentlich Rhythmus einzustellen. Diese Einstellung orientierte sich pro Versuch an einer Backhefemenge (H 27) von 80-100 kg, die groß genug war, um in den normalen Produktionsbetrieb eines Betriebstags der Brotfabrik eingeschleust werden zu können. Da die Substratherstellung auf die Produktion dieser Backhefemenge limitiert war, mußte versucht werden, die Backhefevermehrung strikt aerob durchzuführen, um eine möglichst hohe Substratausbeute in Form von Backhefe zu erzielen.

Hinsichtlich des Einsatzes der Flüssighefe ist auszuführen, daß die Teigchargen in der Brotfabrik etwa 250 kg groß sind und die Backhefezugabe bezogen auf die Mehlmenge je nach Teig zwischen 2-5% beträgt. Im Mittel konnten mit der auf H 27 bezogenen Flüssighefe etwa 4 t Mehl zu 25 Teigchargen verarbeitet werden. Die aus diesen Teigen gebackenen Brote wurden sowohl als Ganzbrot wie auch als Schnittbrot über die übliche tägliche Qualitätssicherung blind verkostet. Außerdem wurden Gegenkontrollen durch Standardbackversuche vorgenommen. Dabei war allerdings die Probenzahl der Versuchsbrote gegenüber den Normalbroten aufgrund des kleinen Anteils der Versuchsbrote an der täglich produzierten Brotmenge wesentlich größer.

Die Aufgabenstellung der Backhefeherstellung mit dem Pilotfermenter erforderte eine besonders sorgfältige Planung der Versuche, weil ihre Durchführung mit erheblichen Kosten verbunden war. Deshalb mußte der Pilotfermenter im Hinblick auf einen sicheren Ablauf der Fermentation gefahren werden. Damit dies erreicht werden konnte, wurde darauf verzichtet, den Stand der Technik hinsichtlich der Backhefekonzentration im Fermenter und der technisch optimal erreichbaren Substratausbeute zu reproduzieren.

Die Backhefevermehrung wurde auf die Einstellung der Triebkraft und Geschmacksneutralität der Flüssighefe gerichtet. Da die Triebkraft im wesentlichen vom Proteingehalt der Backhefe abhing, mußte vor allem die N-Versorgung in ein

Optimum gebracht werden. Dabei stellte sich im Hinblick auf die Geschmacksneutralität heraus, daß die N-Versorgung gegen Ende der Backhefevermehrung von der Glucoseversorgung abgekoppelt werden mußte, um den beobachteten ammoniakalischen Geschmack und Geruch des Fermenterablaufs und der Flüssighefe zu beseitigen. Dazu wurde 120 min vor Ende der Fermentation die N-Versorgung gestoppt. Die Glucoseversorgung wurde dagegen noch 90 min weitergeführt.

Dieses Problem der geschmacklichen Beeinträchtigung der beiden Masseströme war bei der kontinuierlichen Backhefevermehrung nicht aufgetreten, weil die Backhefevermehrung unter diesen Bedingungen stets in der exponentiellen Wachstumsphase erfolgte, so daß das Gleichgewicht zwischen Nährstoffangebot und -aufnahme aufgrund der hohen Zuwachsrates ganz auf die Seite der Nährstoffaufnahme gelegt werden konnte. Deshalb brauchten keine prophylaktischen Maßnahmen für eine Stabilisierung des Geruchs und Geschmacks der Flüssighefe und des Schüttwassers ergriffen zu werden.

Tabelle 22: Backhefeherstellung mit dem Pilotfermenter im Zulaufverfahren und Hefeverwertung

Versuchsbedingungen/ Versuchsergebnisse	Versuchsnummer							
	202	203	204	205	206	207	225*	229*
Fermentationszeit (h)								
Frischhefevorlage (kg)	3,2	4,5	4,5	4,5	4,5	3,0	4,5	4,5
Wasservorlage (kg)	450	450	1000	1000	1000	1000	700	700
Substratzulauf (kg)	600	600	530	500	570	550	520	300
Glucose (kg)	36	36	68	65	67	47	74	48
Optimierung N-Versorgung	ja	ja	ja	•	•	•	•	•
<hr/>								
Frischhefeendkonzentration (g/l)	67	70	65	82	73	44	93	85
Frischhefeertrag (H 27) (kg)	71	73	99	123	117	65	109	85
Ausbeute (g HTS/100 g Glucose)	55	55	39	51	51	38	42	48
<hr/>								
Backversuche zur Hefeverwertung								
Gebäckvolumen (Triebkraft)	+	+	+	(+)**	(+)**	+	+	+
Geruch	-	-	+/-	+	+	+	+	+

* Verwendung von Teig an Stelle von Rückbrot

** Einschränkung war nur durch Versuchsanordnung begründet

Die Abbildung 11 zeigt eine exemplarische Fermentation, bei der die Backhefevermehrung mit 51% Ausbeute in der Nähe des theoretischen Optimums ablief (Tab.22). Bei diesem Versuch wurde aus einer Substratmenge von 500 l, die aus ca. 300 kg Rückbrot stammten, 200 kg Flüssighefe (= 127 kg H 27) hergestellt. Die Ergebnisse der anderen in der Tabelle 22 dargestellten Versuche lassen die Schwankungsbreite in der Ausbeute erkennen, die unter Berücksichtigung der Meßgenauigkeit <20% war. Darin kommt zum Ausdruck, daß ein rein aerober Ablauf der Backhefevermehrung nicht in allen Experimenten aufrecht erhalten werden konnte. Daraus resultierte jedoch kein Nachteil für die Triebkraft der Flüssighefen, die bei diesen Versuchen über die Volumenausbildung der Brote ermittelt wurde. Die Triebkraft der Flüssighefe wurde jedoch in zwei Fällen der Brotherstellung im Bereich des Ofenbetriebs leicht eingeschränkt. Das war jedoch nicht auf die Flüssighefe selbst, sondern auf die Änderung einer Verfahrensbedingung zurückzuführen, welche die Herstellung des Fermentationssubstrats betraf.

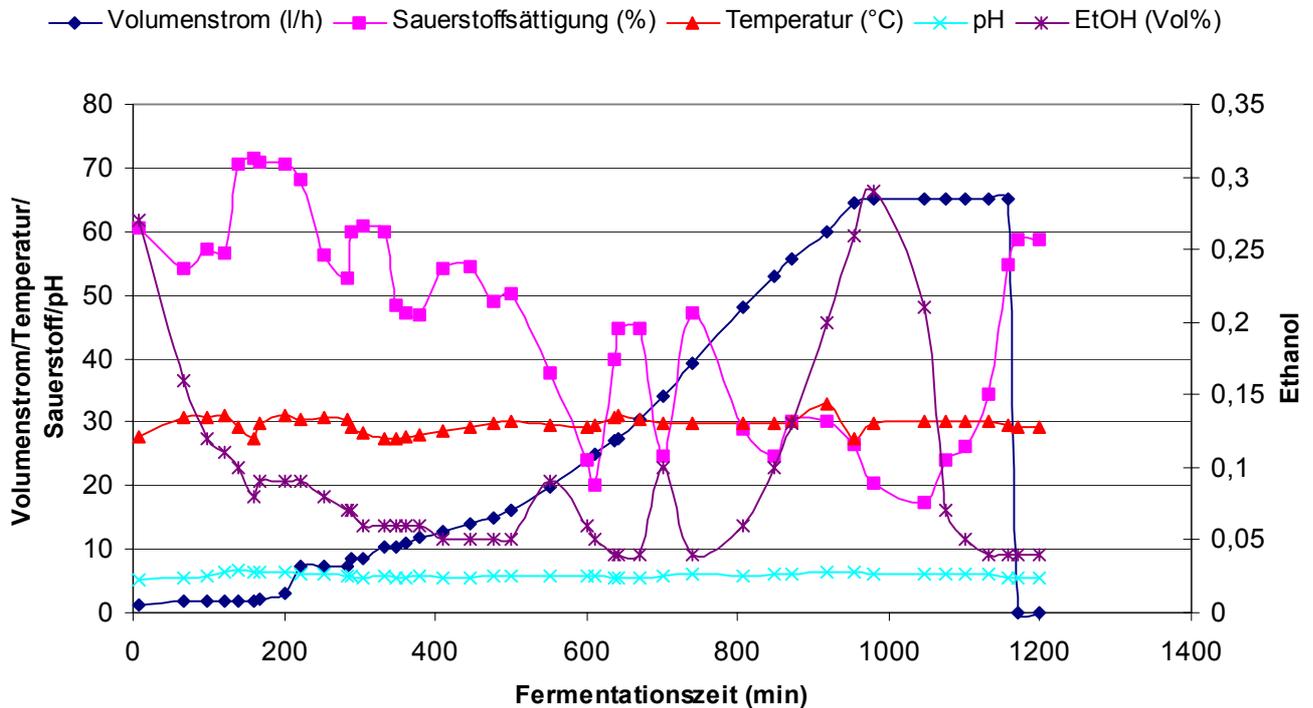


Abbildung 11: Darstellung der Temperatur, der Rührerdrehzahl, des Sauerstoffpartialdrucks, des Zulaufvolumenstroms und des Gesamtzulaufs über die Fermentationszeit (V205).

Die Änderung der Verfahrensbedingung bestand darin, daß der Brotsirup nach Absieben von Feststoffteilen direkt als Fermentationssubstrat eingesetzt wurde. Die Begründung für diesen Schritt ergab sich für die Versuche ab der Versuchs-Nr. 202 aus der Überlegung, daß bezogen auf die Trockenmasse der Anteil der aus dem Brotsirup herstellbaren Backhefe dem Anteil aller übrigen Stoffe entspricht, die nicht in Backhefe umwandelbar sind. Folglich wäre selbst für den Fall, daß alle diese Substanzen bei der Zentrifugalabscheidung in die Flüssighefe gelangten, die Belastung des Teiges nur sehr klein. Sie sollte für die Volumenausbildung all der Brote keine große Rolle spielen, die aus dunklen Mehltypen oder unter Mitverwendung von Schrotten hergestellt werden. Das gilt für einen großen Anteil des Brotsortiments der Brotfabrik.

Diese Überlegung wurde durch Backversuche mit entsprechenden Rezepturen bestätigt.

Die Backversuchsergebnisse belegen, daß nach der Geruchs- und Geschmacksjustierung mit der aus Rückbrot und Teigen hergestellten Flüssighefe Brote gebacken werden konnten, die der üblichen täglich in der Brotfabrik erzielten Brotqualität entsprachen. Die Beobachtung des leichten Rückgangs im Brotvolumen, der auf einem Rückgang im Ofentrieb beruhte und auf die Mitverwendung der Proteinfraction in der Flüssighefe zurückzuführen war, konnte toleriert werden, weil er sich in der üblichen Schwankungsbreite der Volumenausbildung der einzelnen Backwaren des Brotsortiments der Brotfabrik bewegte. Allerdings müßte für die ausschließliche Verwendung einer so zusammengesetzten Flüssighefe doch von einer begrenzten Absenkung des üblicherweise erreichten Niveaus des Backvolumens ausgegangen werden. Dem kann aber dadurch begegnet werden, daß die Proteinfraction entsprechend der verfahrenskonformen Vorgehensweise aus dem Brotsirup zentrifugal abgeschieden wird. Die Proteinfraction kann dann, wie bereits beschrieben, für die Brotsorten eingesetzt werden, für die ein kleines Backvolumen und eine dichte, dunkle Krume charakteristisch sind.

Die Verwendung der so hergestellten Backhefe als Flüssighefe brächte für die Brotfabrik den zusätzlichen Vorteil ihrer direkten Dosierbarkeit mit Dosierpumpen über die vorhandene Ringleitung. Bei der Verwendung von Preßhefe muß diese vor der Dosierung erst in einem zusätzlichen Verfahrensschritt verflüssigt werden. Heutzutage gehen Hefefabriken jedoch mehr und mehr dazu über, Brotfabriken anstelle von Preßhefe mit Heferahm zu beliefern, ohne diesen zu Preßhefe weiterzuverarbeiten. Dieser Heferahm, der auch als Flüssighefe bezeichnet wird, ist eine gereinigte Backhefe. Ihre Verwendung erfordert in Brotfabriken den Einbau eines gekühlten Tanklagers.

Für den Einsatz von Flüssighefe ist es nun von Interesse, daß die durch den deutlich höheren Wassergehalt des Heferahms verursachten höheren Transportkosten durch den Verzicht auf die Preßhefestufe bei der Hefeherstellung und die Handhabung der Preßhefe auf der Seite der Hefefabrik mehr als aufgewogen werden. Die Brotfabriken können deshalb bezogen auf die gleiche Triebleistung den Heferahm billiger als die Preßhefe beziehen. Diesem Vorteil stehen auf der Seite der Brotfabrik die Kosten für die Handhabung der Preßhefe und die Investition in die Tankanlage und deren

Betrieb gegenüber. Die sich ergebenden Differenzkosten müssen bei der Kalkulation des Referenzpreises für die verfahrenskonform hergestellte Flüssighefe, die eine nicht gereinigte Backhefe ist, berücksichtigt werden, für deren Einsatz ein gekühltes Tanklager ohnehin erforderlich ist.

Die Pilotversuche zur Backhefeherstellung führten in zwei Fällen zur Ausbeute des Substrats im theoretischen Optimum von 54%. Gemessen wurden einschließlich des Meßwertfehlers 55%. In zwei weiteren Fällen wurde das für Backhefeanlagen übliche technische Optimum von 51% erreicht. Die weiteren aufgezeigten Versuchsergebnisse weisen von diesen Optima zum Teil deutliche Unterschiede auf. Da der Pilotfermenter jedoch auf sicheren Betrieb und nicht auf höchste Leistung und Substratausbeute gefahren werden mußte, um das Hauptziel zu erreichen, das in der Herstellung einer ausreichenden Menge Backhefe mit zu konventionell hergestellter vergleichbar großer Triebleistung bestand, wurde darauf verzichtet, Sicherheit in der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu erlangen. Dies war für die Pilotversuche ohnehin ohne Belang, weil von ihnen keine Schlußfolgerungen auf Großversuche gezogen hätten werden können, mit denen die gesamte täglich verbrauchte Hefemenge der Brotfabrik hergestellt werden müßte.

Daraus könnte nun geschlossen werden, die Pilotversuche ließen sich nicht auf den für die Brotfabrik zu fordernden technischen Maßstab übertragen. Das ist jedoch nicht der Fall, weil es einen sicheren Beleg dafür gibt, daß Backhefe in genau dieser Größenordnung im täglichen Produktionsrhythmus mit hoher Sicherheit hergestellt werden kann. Der Beleg besteht in der Produktion einer Spezialbackhefe, den die Fa. Agrano aus Getreide herstellt, einem zum Rückbrot direkt vergleichbaren Substrat. Dazu betreibt sie den bereits zitierten Zulauffermenter mit einer Leistung von bis zu 5 t Backhefe (HTS) seit einigen Jahren bezüglich Substratausbeute und Leistung erfolgreich. Es kommen dabei aufgrund der sorgfältigen Herstellung des Anstellguts und des Betriebs des Fermenters keine Fehlchargen vor (44).

Dieser Hinweis ist für eine mögliche Umsetzung des Verfahrens zusammen mit dem Hinweis auf die Notwendigkeit der Installation eines kühlbaren Tanklagers für die Flüssighefe von großer Bedeutung. In der Brotfabrik geht es darum, täglich die notwendige Backhefemenge zur Verfügung zu haben. Die Erfüllung dieser Forderung

stellt für die Brotfabrik bisher kein Problem dar, weil sie mit Backhefe beliefert wird. Das Risiko der Bereitstellung von Backhefe wird ihr dadurch von der Hefefabrik vollständig abgenommen. Für den Fall, daß die Brotfabrik zum Hersteller ihres eigenen Backhefebedarfs wird, liegt dagegen das ganze Risiko der Backhefepreparierung bei ihr. Die Brotfabrik braucht deshalb eine sehr hohe Betriebssicherheit für den täglichen Betrieb des Fermenters, weil dessen Leistung aus technischen und ökonomischen Gründen nicht für eine größere Vorratshaltung von Backhefe ausgelegt werden kann.

Zu erwähnen bleibt, daß die Versuche mit dem Pilotfermenter nichts zur Entscheidungsfindung über die Backhefeherstellung im kontinuierlichen Verfahren oder im Zulaufverfahren hat beitragen können. Für beide Verfahren gibt es Vor- und Nachteile, die bei einer möglichen Umsetzung der Ergebnisse in den Bau einer entsprechenden Anlage zur Rückbrotverwertung zur Entscheidungsfindung für das eine oder andere Verfahren gegeneinander abgewogen werden müssen.

5.4 Masseanfall bei der Rückbrotverwertung

Aus den vorzitierten Angaben über die Verwertung von Rückbrot zur Herstellung von Flüssighefe, Schüttwasser (Flüssigsauer), Proteinfraction, Ethanol und Kohlendioxid aus Brotsirup, bzw. dem aus diesem gewonnenen Fermentationssubstrat, kann die Massebilanz für die Durchführung des Verfahrens aufgestellt werden. Ausgehend von einem Hydrolysegrad von 90% der Stärke im Rückbrot, der auf der Grundlage der Versuchsergebnisse im nicht gewichteten Mittel hier zu 63,8% angenommen sei, und einer Fraktionierung des entstehenden Brotsirups gemäß der in den Tabellen 8 und 9 gegebenen Verteilung sind dazu in der Tabelle 23 die Basisdaten für die auf 100 kg Rückbrot bezogene Verteilungsbilanz des Brotsirups dargestellt. Für diese ist angenommen, daß der Stärkegehalt im Rückbrot zu 90% hydrolysiert worden sei, so daß in 66,5 kg der Trockenmasse des Brotsirups 40,6 kg Glucose vorkommen. Nach den Prozeßschritten Versäuern, Sieben/Pressen und Zentrifugieren werden 8,8 kg Glucose der aeroben Hefevermehrung zugeführt, der Rest steht der anaeroben Fermentation zur Verfügung.

Tabelle 23: Grunddaten für die Massebilanzierung bei der Aufarbeitung eines Brotsirups aus Rückbrot

Fraktion	Frischmasse (kg)	TS (kg)*	Glucose (kg)	Protein (kg)
Fermentations-Substrat	165	39,2	30,5	1,4
Proteinfraktion	23	6,6	0,4	2,7
Preßkuchen	10	5,2	1,3	1,1
Extrakt	185	15,5	8,4	2,1
Summe	382	66,5	40,6	7,8

* Bezogen auf 100 kg Rückbrot mit einem Stärkegehalt von 63,8% unter Berücksichtigung des Hydrolysegewinns bei der Stärkehydrolyse: Hydrolysegrad = 90%

Unter Berücksichtigung des Verfahrensablaufs, der die Nutzung von ca. einem Fünftel der im Brotsirup vorhandenen Glucose für die aerobe Hefevermehrung vorsieht, ergibt sich bezogen auf 100 kg Rückbrot die in der Abbildung 12 dargestellte Massebilanz für die Rückbrotverwertung. In dieser Massebilanz ist die Backhefeherstellung nach dem kontinuierlichen Verfahren und dem Zulaufverfahren berücksichtigt. Die dieser Massebilanz zugrunde zu legende Führung der Masseströme zeichnet sich insbesondere durch die Aufteilung des verdünnten und gesiebten Brotsirups in ein teilgeklärtes und ein nicht geklärtes Fermentationssubstrat aus. Das teilgeklärte Fermentationssubstrat mit einer Glucosekonzentration von 15,0% wird für die Herstellung der Flüssighefe und letzteres für die Herstellung und Gewinnung von Ethanol, Kohlendioxid und der Proteinfraktion eingesetzt. Aus beiden Fermentationssubstraten wird darüber hinaus Schüttwasser (Flüssigsauer) gewonnen.

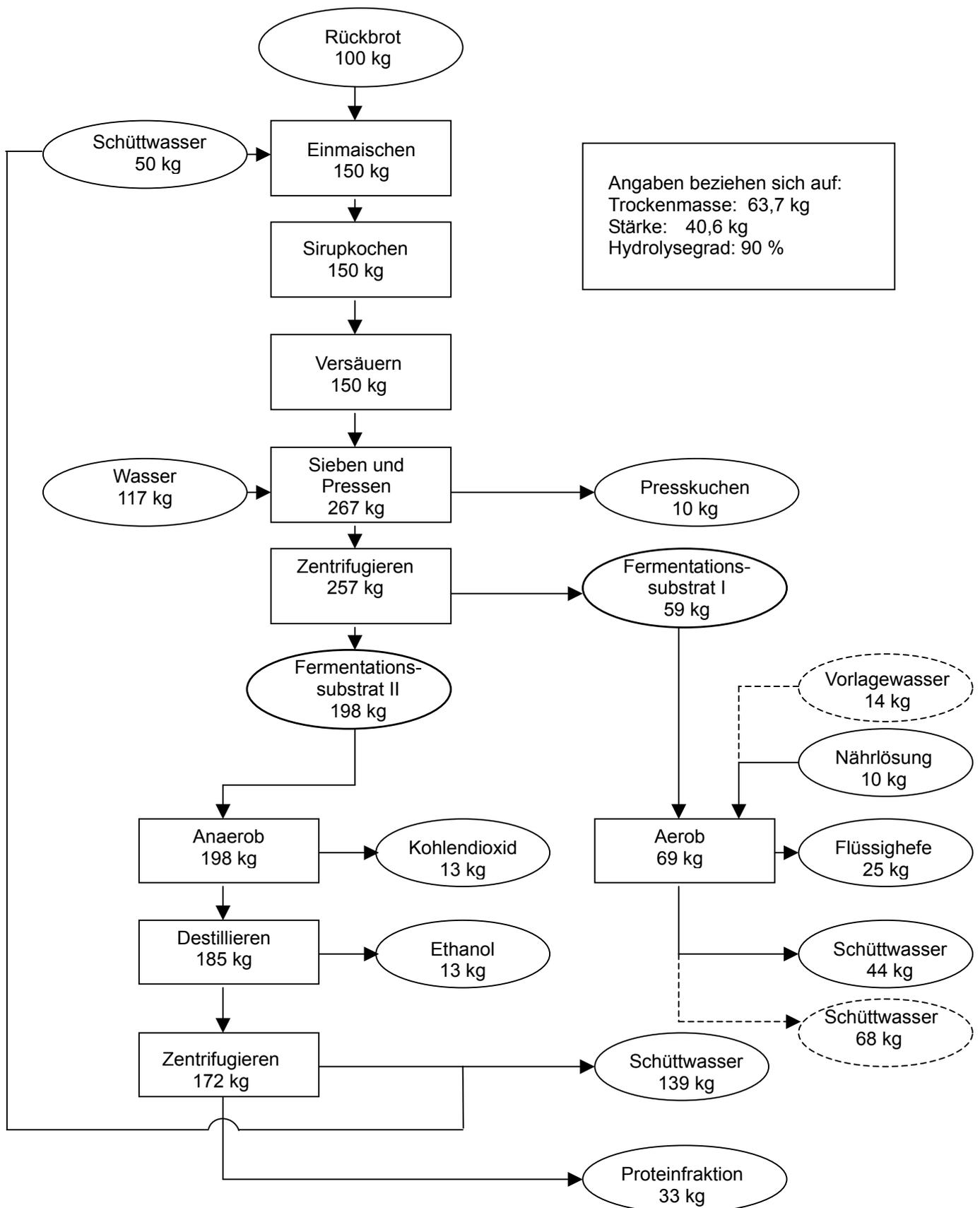


Abbildung 12: Massebilanz für die Rückbrotverwertung mit Backhefeherstellung nach dem kontinuierlichen Verfahren und dem Zulaufverfahren (gestrichelte Linie).

Die beiden das Schüttwasser bildenden Massen können zu einer Gesamtmasse vereinigt werden. Danach fallen bei kontinuierlicher Backhefeherstellung 191 kg Schüttwasser/100 kg Rückbrot und beim Zulaufverfahren 207 kg Schüttwasser/100 kg Rückbrot an. Der kleine Unterschied von etwa 17 kg Schüttwasser/100 kg Rückbrot zugunsten der kontinuierlichen Hefeherstellung ergibt sich daraus, daß die Schüttwasserrückführung über 6 Betriebstage des kontinuierlichen Fermenters zu einem entsprechend kleinerem Schüttwassermassestrom gegenüber dem Schüttwassermassestrom beim Zulaufverfahren führt. Die Differenz beruht im wesentlichen auf der Zellkonzentration in beiden Fermentern, die beim kontinuierlichen Fermenter 70 g Backhefe/l nicht übersteigen kann und beim Zulauffermenter dem Stand der Technik entsprechend 180 g Backhefe/l betragen kann.

Es wurde bereits darauf hingewiesen, daß das Rückbrot gegebenenfalls schwerpunktmäßig zur Herstellung von Backhefe verwendet wird. Für diesen Fall muß aus dem Brotsirup die Glucose möglichst vollständig extrahiert werden, weil die Brotsirupherstellung ein wesentlicher, kostenbestimmender Faktor für die Backhefeherstellung ist. Dabei muß aber wegen der Einbindung der Backhefeherstellung in die Brotproduktion darauf geachtet werden, daß die Glucosekonzentration im Fermentationssubstrat nicht zu klein wird, weil dadurch unter den gegebenen Fermentationsbedingungen im kontinuierlichen Fermenter (Zellkonzentration: 70 g/l) der Ablaufvolumenstrom an Schüttwasser zu groß würde.

Ein Kompromiß aus beiden Forderungen ist in der Abbildung 13 dargestellt, der sich ebenfalls auf die in der Tabelle 23 aufgezeigten Grunddaten bezieht. Danach verbleiben von der vorhandenen Glucosemenge 0,4 kg in der Proteinfraction, die folglich nicht der Hefevermehrung zur Verfügung stehen. Es entstehen jedoch keine weiteren Abgänge an Glucose gegenüber dem vorzitierten Beispiel. Danach gelingt es, den Glucosegehalt des Brotsirups bei vertretbarer Verdünnung des Substrats auf eine Glucosekonzentration von 10,7% bei einem Anfall der Glucose von 1% ihrer Gesamtmasse im Preßkuchen annähernd vollständig der Hefevermehrung zuzuführen.

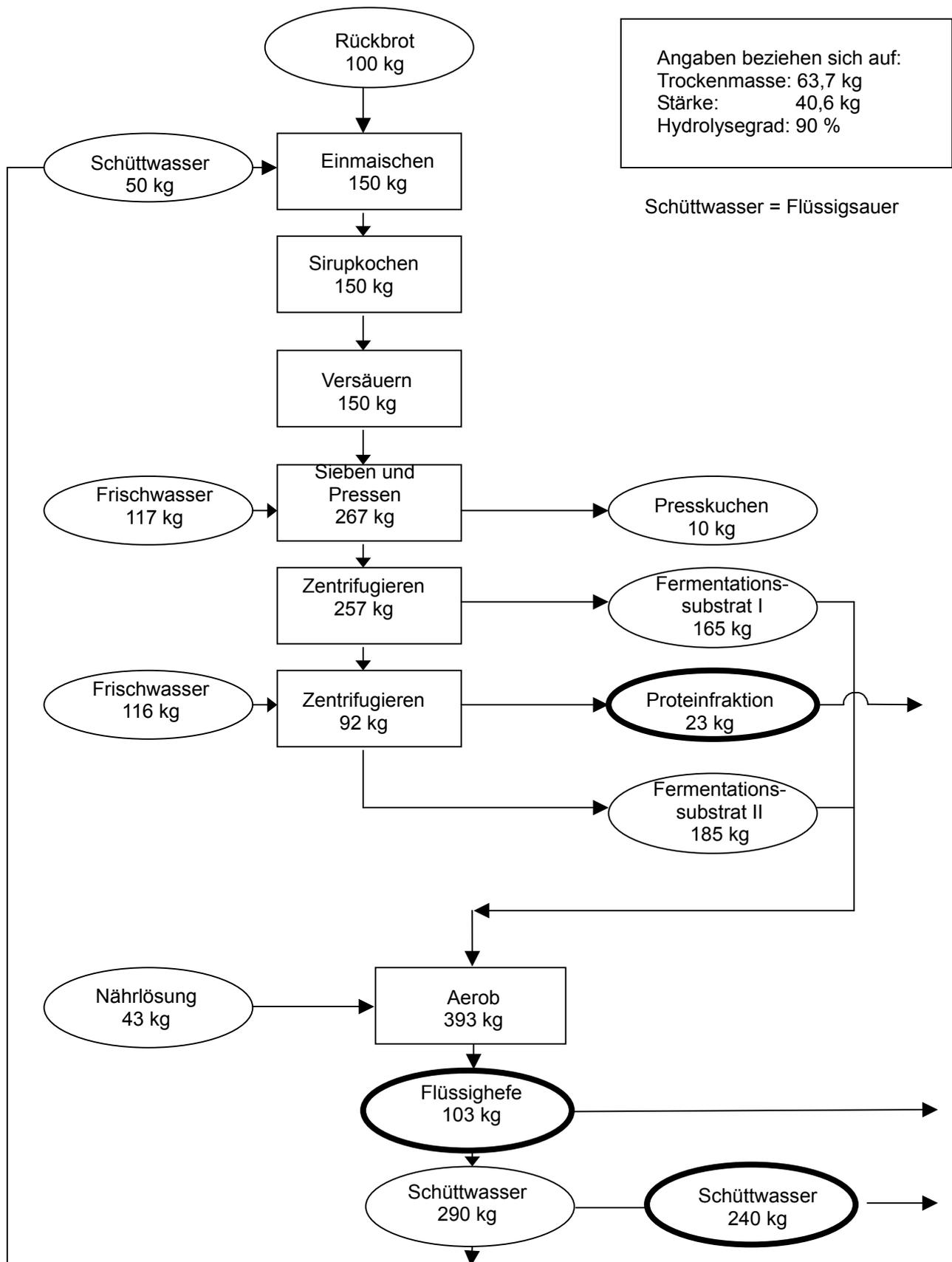


Abbildung 13: Massebilanz für die Rückbrotverwertung bei kontinuierlicher Backhefeherstellung.

Die Nutzung der gesamten Glucose des Brotsirups für die Hefevermehrung führt zu einem Flüssighefeanfall von 103 kg aus 37,3 kg Glucose. Der Schüttwasseranfall beträgt dabei 290 kg. Davon stehen 240 kg Schüttwasser (Flüssigsauer) für die Brotherstellung nach Abzug des Rücklaufs zum Einmaischn von 50 kg zur Verfügung. Die zugehörige Vergleichszahl aus der aerob-anaeroben Verwertung der Glucose beträgt 123 kg. Werden beide Werte auf die produzierte Flüssighefemenge bezogen, so ergibt sich für die ausschließlich aerobe Fermentation des Fermentationssubstrats aus dem Brotsirup ein Faktor von 2,3 (F_1) und für dessen aerob-anaerobe Fermentation ein Faktor von 5,3 (F_2). Das Verhältnis dieser Faktoren beträgt 2,3 (F_2/F_1) und drückt aus, daß das Schüttwasservolumen bei der aerob-anaeroben Fermentation 2,3 mal größer als bei aeroben Fermentation ist, obgleich für letzteres eine stärkere Verdünnung des Fermentationssubstrats als bei der aeroben Hefevermehrung der aeroben-anaeroben Fermentation vorgenommen wird.

5.5 Täglicher Masseanfall und Verfahrensablauf bei der Rückbrotverwertung

Auf der Grundlage der dargestellten Massen können die im Verfahrensablauf anfallenden Masseströme aufgestellt werden, nach denen die maschinentechnische Auslegung der Anlage zu erfolgen hat. Aus dieser Auslegung ergibt sich aus der Art der Verarbeitung der Masseströme der zugehörige Medienbedarf für die Herstellung der einzelnen Produkte. Aus der maschinentechnischen Auslegung und dem Medienbedarf können die Kosten für die Investition und die Kosten für den Betrieb der Anlage berechnet werden. Diese Berechnung bildet die Grundlage für die Wirtschaftlichkeitsberechnung, die hier im Sinne einer Kosten-Erlös-Rechnung aufgestellt wird.

Zur Herleitung der Masseströme im Verfahrensablauf sind nachstehend mit Blick auf eine mögliche Umsetzung der Ergebnisse in eine technische Anlage die täglich anfallenden Produktmassen für das Beispiel der aerob-anaeroben Aufarbeitung der Gesamtrückbrotmenge und der aeroben Aufarbeitung eines Teils davon aufgeführt. Darin stellt der Hefebedarf der Fabrik von 5.000 kg Backhefe/h 27 die Bezugsgröße dar (Tab. 24)

Tabelle 24: Täglich aus Rückbrot anfallende Produktmassen bei dessen Gesamt- und Teilverwertung

Produkt	Produktanfall (kg/d)	
	Rückbrot-Gesamtverwertung	Rückbrot-Teilverwertung
Rückbrot	30.000	7.300
Brotsirup	45.000	11.000
Flüssighefe	7.500	7.500
Schüttwasser	39.900	17.500
Proteinfraktion	9.900	1.700
Preßkuchen	3.000	700
Ethanol	3.900	-
Kohlendioxid	3.900	-

Der Verfahrensablauf läßt sich in diskontinuierliche und kontinuierliche Teilschritte unterteilen. Das ist sowohl für den Betrieb der einzelnen Anlageteile als auch die Umsetzung des Verfahrens aus wirtschaftlicher Sicht von großen Interesse. Grundsätzlich kann das Verfahren in die Blöcke Brotsirupbereitung, Brotsirupaufarbeitung, Backhefeherstellung sowie Gärung mit Ethanol- und Kohlendioxidgewinnung untergliedert werden. Diese Verfahrensblöcke werden im Verfahrensablauf durch Pufferbehälter voneinander getrennt, so daß sie quasi unabhängig voneinander betrieben werden können. Das ist für den Betrieb der gesamten Anlage deshalb vorteilhaft, weil dadurch Teilausfälle oder vollständige Stillsetzungen der einzelnen Blöcke nicht zur Stilllegung des Gesamtverfahrens führen. Damit ist eine hohe Betriebssicherheit gegeben.

Kennzeichnend für die Blöcke Brotsirupherstellung und Aufarbeitung ist es, daß diese diskontinuierlich betrieben werden. Die Hefevermehrung kann sowohl kontinuierlich als auch diskontinuierlich vorgenommen werden. Die Gärung sollte wegen der doch nur kleinen Leistung des Blocks „Gärung“ vorzugsweise chargen-weise quasi kontinuierlich erfolgen. Für die Kohlendioxid- und Ethanolgewinnung aus dem vergorenen Fermentationssubstrat bietet sich eine auf die Brotproduktion bezogene

kontinuierliche Betriebsweise an, weil damit für die Ethanoldestillation die Abwärme der Backöfen genutzt werden kann.

In der Nutzung der Abwärme der Backöfen liegt ein besonderer wirtschaftlicher Vorteil für das Gesamtverfahren. Dieser Vorteil ist jedoch mit Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des Gesamtverfahrens zu betrachten. Diesbezüglich ist festzustellen, daß gegenüber den anderen Produkten die größte Wertschöpfung aus dem Rückbrot in dessen Einsatz für die Backhefeherstellung liegt. Sie findet allerdings ihre Begrenzung im Backhefebedarf der Brotfabrik.

5.6 Wirtschaftlichkeit des Verfahrens

Die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens wird entscheidend von den Kosten für Energie und für Hilfsmittel für seine Durchführung, den Abschreibungskosten für die Investitionen in die Anlagenteile und den Personalkosten für den Betrieb der Anlage bestimmt. Die Kosten für den Rohstoff, der bei vergleichbaren Verfahren, wie der Ethanolherstellung aus Getreide oder der Backhefeherstellung aus Melasse, von wesentlicher Bedeutung sind, fallen bei dem Verfahren kaum noch ins Gewicht, weil der Erlös für Rückbrot, das als Futtermittel eingesetzt wird, bei der als Beispiel herangezogenen Brotfabrik auf 30 DM/t zurückgegangen ist. Dem steht ein Referenzpreis für Futtergetreide von 220DM/t gegenüber.

Auf die Trockenmasse bezogen ist das Futtergetreide fünfmal teurer als das Rückbrot. Vergleichbar teurer ist Melasse für die Backhefeherstellung. Der Preis für Melasse beträgt z.Z. etwa 260 DM/t (45). Da aus 100kg Melasse 100kg Backhefe (H27) und demgegenüber aus 100kg Rückbrot 70 kg Backhefe (H27) hergestellt werden können, ist Melasse als Rohstoff für die Backhefeherstellung sogar sechsmal teurer als Rückbrot. Ein ähnliches Verhältnis ergibt sich für die Verwendung von Melasse und Rückbrot zur Ethanolherstellung. Das Verhältnis von Melasse- zu Rückbrotkosten beträgt bei einer Ausbeute von 25,2 kg Ethanol aus 100kg Melasse und 19,2kg Ethanol aus 100kg Rückbrot 6,5. Diese jeweiligen Relationen werden allerdings sowohl für die Backhefe als auch die Ethanolherstellung dadurch verringert, daß die Kosten für die Aufarbeitung des Rückbrots zum

Fermentationssubstat in die Kalkulation für den Rohstoff einbezogen werden müssen.

Grundsätzlich lassen diese Überlegungen erkennen, daß die Basis für einen wirtschaftlichen Einsatz des Rückbrots als Rohstoff für die Backhefe- und Ethanolherstellung gegeben ist. Dem kann allerdings entgegenstehen, daß die Wirtschaftlichkeit für den Einsatz des einen oder anderen Rohstoffs für die Backhefe- oder Ethanolherstellung nur erreicht wird, wenn eine bestimmte Anlagengröße nicht unterschritten wird. Das ist letztlich der Grund dafür, daß nur große Hefe- und Ethanolfabriken wirtschaftlich betrieben werden können. Es müssen deshalb von vornherein besondere Vorteile gegeben sein, wenn kleine Anlagen wirtschaftlich betreibbar sein sollen. Solche Vorteile bestehen beispielsweise für das beschriebene Verfahren der Produktgewinnung aus Rückbrot darin, daß

- die Verfahrensschritte zur Aufarbeitung der aus dem Fermenter abgezogenen Flüssighefe zu Backhefe (H27) entfallen können,
- kein Abwasser anfällt,
- die nicht fermentierbaren Begleitstoffe direkt in die Backrezeptur eingearbeitet werden können und
- die Abwärme aus den Brennern als Energiequelle für die Verfahrensdurchführung verwendet werden können.

In der Tabelle 25 ist einleitend zur Wirtschaftlichkeitsberechnung des Verfahrens, bzw. seiner beiden darzustellenden Versionen (Modell A und B) für die Flüssighefeherstellung (Modell A) bis zur Lagerung der Flüssighefe dargestellt. Daraus geht hervor, daß der Energiebedarf für die Brotsirupbereitung bis zur Kühlung des in den Fermenter übergebenen Substrats 37% des Gesamtenergiebedarfs ausmacht. Noch größer ist mit 60% vom Gesamtenergiebedarf allerdings der allein für die Kühlung des Fermenters erforderliche Energiebedarf.

Tabelle 25: Thermischer Energiebedarf bei der Flüssighefeherstellung

Aufheizen ----- Kühlen	Energiebedarf*	
	(kJ/100 kg Rückbrot)	(kWh/100 kg Rückbrot)
Brotsirupbereitung	50.000	13,8
Heißextraktion	59.000	16,4
Pasteurisieren	44.000	12,2
Summe Aufheizen -----	153.000	42,4
Brotsirupbereitung	25.000	6,9
Substratkühlung	59.000	16,4
Aerobe Fermentation	380.000	106,0
Flüssighefekühlung	20.000	5,6
Summe Kühlen	484.000	134,9
Gesamt	637.000	177,3

* Ohne Berücksichtigung möglicher Energierückgewinnungen

Im Hinblick auf die Nutzung der Abwärme aus den Öfen der Brotfabrik ist es nachteilig, daß der Energiebedarf zum Aufheizen bei der Brotsirupherstellung nur 24% des thermischen Energiebedarfs ausmacht. Diesbezüglich geht aus einer Energienutzungsstudie (46) für die Brotfabrik hervor, daß der Energieinhalt der nutzbaren Abwärmeströme aus Rauchgas und Schwadenabluft insgesamt 9.867 MWh/a beträgt (Tab. 26). Davon werden bisher weniger als 1.500 MWh/a genutzt (Tab. 27).

Tabelle 26: Abwärmeströme aus Rauchgas und Schwadenabluft in der Brotfabrik

Ofenlinien	Energieinhalt der nutzbaren Abwärmeströme* (kWh/a)
Brenner	6.160.677
Schwaden	3.699.586
Gesamt	9.860.263

*I.c. A. Penschke (2000)

Aus den dargestellten Möglichkeiten der Verwendung des Energieinhalts der Abwärmeströme in einzelnen Abteilungen des Betriebs geht hervor, daß davon knapp 60% nutzbar gemacht werden könnten. Die restlichen 40% stünden dann

beispielsweise für das Verfahren zur Rückbrotverwertung zur Verfügung. Diesbezüglich ist für die Nutzung des Energieinhalts die Lenkung der Abwärmeströme nach den betrieblichen Nutzungen als Heißwasser oder Dampf zu berücksichtigen. Für das Verfahren ist der Abwärmestrom aus den Brennern besonders relevant, weil mit ihm Dampf erzeugt werden kann, der als Energieträger sowohl für die Brotsirupherstellung als auch zum Sterilisieren und Destillieren des Ethanols (Modell B) eingesetzt werden kann.

Tabelle 27: Wärmeverbraucher für eine mögliche sowie eine bereits verwirklichte Nutzung der Abwärmeströme

Wärmeverbraucher	Notwendige Temperatur (°C)	Wärmeleistung (kW)	Wärmeverbrauch (kWh/a)	Derzeitige Energieträger
Verladehalle (Heizung)	50-60	140	873.600	Abwärme Rauchgase Linie 1-3
Brauchwarmwasser	50-60	93	637.120	Abwärme Kondensat Fernwärme (+ND-Dampf 1,4bar)
Versandhalle (Heizung)	50-60	-	407.808	Fernwärmedampf 4bar
LKW-Waschanlage	40	-	209.260	Heizöl
Kastenwaschanlage	>100	140	894.566	Fernwärmedampf 4bar
Backblechwaschanlage	(60-80)	-	-	ND-Dampf 1,4 bar
Heizung und Lüftung	50-60	-	1.223.423	ND-Dampf 1,4 bar
Pasteur	>100	272	1.414.400	Erdgas

*I.c. A. Penschke (2000)

Im Falle der Durchführung des Modells A würden nur weitere 1.600 MWh/a benötigt, um die Flüssighefe herzustellen. Damit würden dann 74% der nutzbaren Abwärme genutzt sein. Zwar beträgt der Wert dieses Wärmebedarfs 77.000DM/a (Tab. 28), doch kann dieser bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung nicht in voller Höhe zur Reduzierung der Energiekosten geltend gemacht werden, weil davon die Investitionen für die Wärmerückgewinnung abgezogen werden müssen. Eine überschlägige Berechnung auf der Grundlage der in der Energienutzungsstudie gegebenen Hinweise für die Amortisation hat ergeben, daß über einen Zeitraum der ersten 10 Betriebsjahre einer entsprechenden Rückbrotverwertungsanlage zwei

Drittel des Energierückgewinns kostenmäßig angerechnet werden können. Das bedeutet auf die vorgegebene Zahl von 77.000 DM/a einen geldwerten Rückgewinn von 50.000 DM/a für den Wärmebedarf von 1.600 MWh/a für das Modell A.

Für die Durchführung des Modells B ist aus den Zahlen in der Tabelle 28 zu erkennen, daß mit 7.100 MWh/a mehr thermische Energie, und zwar in Form von Dampf, benötigt wird, als an für die Dampfherstellung nutzbare Energie aus dem Abwärmestrom der Brenner anfällt. Deshalb lassen sich für diesen Bedarf aus dem Abwärmestrom der Brenner von 6.161 MWh/a unter Berücksichtigung der vorgenannten Berechnung für den Wert des Energierückgewinns nur 200.000 DM/a realisieren.

Das Modell B besitzt folglich den Vorteil zusammen mit den anderen in der Tabelle 27 gezeigten Möglichkeiten der Abwärmenutzung alle nutzbaren Abwärmeströme vollständig und vor allem kontinuierlich nutzen zu können. Der Gesamtwert dieser Rückgewinnung würde 316.000 DM/a betragen. Darüberhinaus besteht dann noch weiterer Bedarf für Wärmeenergie. Hier soll unberücksichtigt bleiben, daß natürlich auch noch Abwärme aus dem Verfahrensablauf nach den Modellen A und B gewonnen werden könnte, beispielsweise für den Betrieb einer Anlage zur Kältegewinnung durch Ammoniakverdampfung.

Tabelle 28: Gegenüberstellung des nutzbaren Energieinhalts aus den Brennern und des Wärmebedarfs bei der Brotsirupbereitung und -aufarbeitung

	Energieinhalt (MWh/a)	Wert (DM/a)
Nutzbarer Energieinhalt aus den Brennern (kWh/a)	6.161*	296.000
Wärmebedarf für die Brotsirupbereitstellung und –aufarbeitung** - Modell A **	1.600	77.000
Wärmebedarf für die Brotsirupbereitung und –aufarbeitung sowie die Ethanolherstellung Modell B***	7.100	341.000

* I.c. A. Penschke (2000)

** bezogen auf 12t Rückbrotverwertung/d x 6d pro Woche für 52 Jahreswochen

*** bezogen auf 30t Rückbrotverwertung/d x 6d pro Woche für 52 Jahreswochen

Damit nun unter Einbeziehen dieser Betrachtung des Gesamtenergiekonzepts des Betriebs eine Wirtschaftlichkeitsberechnung für die Durchführung der Modelle A und B erfolgen kann, muß der Bedarf an Betriebs- und Hilfsstoffen für die Herstellung der Produkte ermittelt werden. Diesbezüglich sind nur die Betriebs- und Hilfsstoffe für die Flüssighefe-, Ethanol- und Kohlendioxidherstellung von Interesse, weil die beiden anderen Produkte, das Schüttwasser und die Proteinfraction sozusagen als Folgeprodukte in den Prozeß der Brotherstellung überführt werden. Der Betriebs- und Hilfsstoffbedarf ist in Tabelle 29 für die Flüssighefe- und Ethanolherstellung auf der Grundlage der erzielten Versuchsergebnisse für das in der Anlage beigefügte Fließbild für die Flüssighefeherstellung (Modell A) errechnet worden. Die Zahlenangaben für die Ethanolherstellung wurden der Literatur (47) entnommen. Die Auslegung und Berechnung der Kosten für diesen Anlagenteil ist bewußt nicht auf heutige moderne Großanlagen (18) bezogen, sondern auf Kleinanlagen, die nach herkömmlichen Verfahren arbeiten. Gleiches erfolgte für die Berechnung der Kosten für die Kohlendioxidgewinnung, für die direkt die in der Literatur (46, 47) veröffentlichten Werte für die Gewinnungskosten herangezogen werden, wie sie bei Anlagen der hier vorgesehenen Größe anfallen.

Die Preise für die Betriebs- und Hilfsstoffe entsprechen außer für die Enzyme und Nährstoffe Angaben der Brotfabrik. Die Preise für die Enzyme entspricht den Angaben eines großen Enzymherstellers und die Preise für die Nährstoffe den Angaben eines großen Hefeherstellers.

Tabelle 29: Betriebs- und Hilfsstoffbedarf für die Flüssighefe- und Ethanolherstellung

Betriebs/Hilfsstoff	Flüssighefeherstellung	Ethanolherstellung*
Dampf	408 kWh/t	5.075 kWh/t
Strom	630 kWh/t	20 kWh/t
Reinigungswasser	1,6 m ³ /t	3,0 m ³ /t
Kühlwasser	2,8 m ³ /t	0,5 m ³ /t
Prozeßluft	4.700 m ³ /t	-
Preßluft	58 m ³ /t	-

*errechnet aus I.c. H. Kreipe (1972)

Da die Wirtschaftlichkeitsberechnung als Kostendeckungsrechnung durchgeführt ist, mußten die rechnerischen Erlöse für die im Verfahren anfallenden Produkte ermittelt werden, dazu wurden derzeit übliche Marktpreise angesetzt. Diese Preise wurden auf die erzeugten Produkte umgerechnet. Diesbezüglich wurde für die Proteinfraction der Mehlwert und für die Futtermittelfraction der Futterkleiepreis zugrunde gelegt. Es sei diesbezüglich erwähnt, daß aufgrund der Inhaltsstoffzusammensetzung der Protein- und der Futtermittelfraction leicht höhere Erlöse erzielt werden könnten, wenn diese als eine Fraction als Futtermittel abgegeben würden. Der erzielbare Erlös richtete sich in diesem Fall nach dem Sojaschrotpreis als Referenzpreis. Ergänzend sei darauf hingewiesen, daß für Ethanol- und Kohlendioxid die z.Z. unteren Marktpreise eingesetzt wurden.

Tabelle 30: Preise für die Betriebs- und Hilfsstoffe

Betriebs- und Hilfsstoff	Preis
Fernwärmedampf (DM/MWh)	48,00
Strom (DM/MWh)	80,00
Leitungswasser (DM/m ³)	2,50
Abwasser /DM/m ³)	2,50
Preßluft (DM/m ³)	0,008
Prozeßluft (DM/m ³)	0,016
Enzyme (DM/100 kg Rückbrot)	1,00
Nährstoffe (DM/100 kg Backhefe)	5,00

Für die Wirtschaftlichkeitsberechnung wird davon ausgegangen, daß für den Betrieb der Anlage nach Modell A 500.000 DM/a und nach Modell B 900.000 DM/a Personalkosten anfallen. Dies bedeutet die Beschäftigung von 7 Mitarbeitern im Modell A und von 13 Mitarbeitern im Modell B.

Die Personalkosten werden als Fixkosten behandelt, weil hier in einem ersten Ansatz für die Kostendeckungsrechnung von einer 100%igen Auslastung der Anlage ausgegangen wird. Diese Annahme ist deshalb berechtigt, weil der Hefeverbrauch der Brotfabrik seit langem stabil ist. Saisonale Schwankungen fallen bei dieser Betrachtung nicht ins Gewicht.

Weitere fixe Kosten sind die Kosten für die Investition in die Anlage und die Kosten für deren Wartung. Aus den Kosten für die Investition ergeben sich die Kosten für den Kapitaldienst. Diesbezüglich wird für beide Modelle eine zehnjährige Abschreibung bei einem linearen Zinssatz von 5%/a vorgegeben. Die hier angenommenen Investitionskosten für beide Modelle wurden in Zusammenarbeit mit der Fa. Reimelt ermittelt.

Tabelle 31: Rechnerischer Erlös für die erzeugten Produkte

Produkt	Referenzprodukt	Referenzpreis (DM/kg)	Rechnerischer Erlös (DM/kg)
Flüssighefe (18%TS)	Backhefe (27%TS)	1,20	0,80
Proteinfraktion (27%TS)	Mehl (86%TS)	0,40	0,13
Ethanol (100%)	Ethanol (96%TS)	0,88	0,91
Kohlendioxid (100%)	Kohlendioxid (99,9%)	0,30	0,30
Futtermittel (50%TS)	Futterkleie (85%)	0,13	0,15

Aus der Tabelle 32 geht hervor, daß sich in der Abschreibungszeit von 10 Jahren eine Rendite von 4,1% ergibt. Diese Rendite würde sich bei Nutzung der Abwärme aus den Brennern auf 5,1%/a erhöhen, weil das Ergebnis dadurch um den Geldwert der Abwärmenutzung größer ausfiele.

Tabelle 32: Kostendeckungsrechnung für den Betrieb der Rückbrotanlage zur Gewinnung von 1.560t Backhefe/a (H27) als Flüssighefe (2.340t/a) aus 2.280t/a Rückbrot bei 312 Betriebstagen – Modell A

	Summe (DM/Jahr)
Erlöse	
Flüssighefe	1.872.000
Proteinfraktion	69.000
Futtermittel	33.000
Summe Erlöse	1.974.000
Variable Kosten	
Strom	-118.000
Dampf	-46.000
Enzyme	-23.000
Nährstoffe	-78.000
Prozeßluft	-175.000
Preßluft	-1.000
Reinigungswasser (Zu- und Abwasser)	-19.000
Kühlwasser (Zuwasser)	-16.000
Mindererlös Rückbrot	-68.000
Summe Variable Kosten	-545.000
Fixe Kosten	
Wartung**	-100.000
Personal	-500.000
Kapitaldienst*	-625.000
Summe Fixe Kosten	-1.125.000
Ergebnis	+203.000
Rendite	+4,1%

Annahme : * 5,0 Mio. DM Investitionskosten,
Abschreibung in 10 Jahren linear bei 5 % Zins/Jahr
** 2% der Investitionssumme

Tabelle 33: Kostendeckungsrechnung für den Betrieb der Rückbrotanlage zur Gewinnung von 1.560t Backhefe/a (H27) als Flüssighefe (2.340t/a) aus 9.360t/a Rückbrot bei 312 Betriebstagen – Modell B

	Summe (DM/Jahr)
Erlöse	
Flüssighefe	1.872.000
Proteinfraktion	402.000
Ethanol	1.107.000
Kohlendioxid	365.000
Futtermittel	140.000
Summe Erlöse	3.886.000
Variable Kosten	
Strom	-122.000
Dampf	-342.000
Enzyme	-94.000
Nährstoffe	-78.000
Prozeßluft	-176.000
Preßluft	-1.000
Reinigungswasser (Zu- und Abwasser)	-54.000
Kühlwasser (Zuwasser)	-19.000
Mindererlös Rückbrot	-281.000
Kohlendioxidgewinnung	-207.000
Summe Variable Kosten	-1.374.000
Fixe Kosten	
Wartung**	-180.000
Personal	-900.000
Kapitaldienst*	-1.125.000
Summe Fixe Kosten	-2.205.000
Ergebnis	+307.000
Rendite	+3,4%

Annahme : * 9,0 Mio. DM Investitionskosten,
Abschreibung in 10 Jahren linear bei 5 % Zins/Jahr
** 2% der Investitionssumme

Diesbezüglich zeigt die Kostendeckungsrechnung für das Modell B, daß bei einer 10jährigen Abschreibung mit einem linearen Zins von 5%/a sich eine Rendite von 3,4%/a ergibt. Da für dieses Modell die Wärmerückgewinnung einen Beitrag von 200.000 DM/a leisten kann, erhöht sich die Rendite auf 5,6%/a. Der Vorteil des Modells B gegenüber dem Modell A besteht insbesondere darin, daß für dieses angenommen ist, die ganze anfallende Rückbrotmenge der Brotfabrik würde verfahrensgemäß verwertet.

Aus der Gegenüberstellung beider Kostendeckungsrechnungen kann abgeleitet werden, daß die Rendite für die verfahrensgemäße Rückbrotverwertung in Abhängigkeit von der Finanzierungsgestaltung eine flexible Größe ist, die zwischen den durch die Modellrechnung belegten Eckwerten variiert werden kann. Die Rendite wird darüber hinaus entscheidend auch von den Investitionskosten und dem Marktpreis für Backhefe bestimmt. Deshalb ist die Umsetzung des Verfahrens zur Rückbrotverwertung, trotz der günstigen Aussicht auf Rendite, mit einem Risiko behaftet. Deshalb bietet es sich gegebenenfalls auch an, nur Teilschritte des Verfahrens umzusetzen oder Teilschritte wegzulassen.

Letzteres ist in den Modellen für die Durchführung des Verfahrens für die verfahrensgemäß vorgesehene Milchsäurebildung im Schüttwasser geschehen. Dieser Verfahrensschritt war ursprünglich aus dem Grund, das Fermentationssubstrat mikrobiologisch stabilisieren zu müssen, für notwendig erachtet worden. Es konnte jedoch im Zuge der schrittweisen Erhöhung der Sterilbedingungen im Gesamtverfahrensablauf auf ihn verzichtet werden. Dadurch kann der Gesamtverfahrensablauf ohne Einschränkung der Nutzung des Schüttwassers sowohl verkürzt als auch vereinfacht werden.

Desweiteren muß darauf hingewiesen werden, daß zu der direkten Rendite für diese Art der Rückbrotverwertung auch eine „Umweltrendite“ gerechnet werden muß. Sie besteht darin, daß die Umweltbelastung durch das Brotbacken und die derzeitige Rückbrotverwertung vermindert werden kann. Diese Verminderung ergibt sich durch die produktionsintegrierte Primär- und Sekundärnutzung unabdingbarer Energieträger und Rohstoffe.

6 Zusammenfassung

In Deutschland werden Backwaren, die nicht mehr als ausreichend frisch empfunden werden, die aber noch zum Verzehr geeignet sind, aus dem Warenverkehr genommen. Die Menge dieser Backwaren ist auf 8-10% der Produktionsmenge zu veranschlagen. Aus dieser Situation ergab sich die Aufgabenstellung für diese Arbeit, dessen Gegenstand es war, einen neuen Weg zur biotechnologischen Aufarbeitung von unverkauften Backwaren unter umweltrelevanten und wirtschaftlichen Gesichtspunkten aufzuzeigen. Besondere Zielsetzung war es dabei, eine vollständige Verwertung von Rückbrot im Sinne eines geschlossenen Stoffkreislaufs zu verwirklichen.

Die vorstehend skizzierte Aufgabenstellung wurde schrittweise mit der Zielsetzung gelöst, eine möglichst einfache und sichere Prozeßtechnik für die in den Produktionsprozeß einer Brotfabrik zu integrierende biotechnologische Aufarbeitung und Umsetzung des Rückbrots in für die Brotherstellung direkt und indirekt verwertbare Produkte zu entwickeln. Aus den zur Lösung der Aufgabenstellung vorgesehenen fermentativen Prozeßschritten, die sich aus der Aufgabe der vollständigen Verwertung des Rückbrots im Produktionsbetrieb ergaben, zeichnete sich ab, daß dies Backhefe, ein milchsaures Prozeßwasser (Flüssigsauer), ein enzymatisch nicht verflüssigbarer Reststoff aus Proteinen und Ballaststoffen (Proteinfraktion), Ethanol und Kohlendioxid sein würden. Die Prozeßschritte bestanden folglich in der enzymatischen Aufarbeitung des Rückbrots zu einem Brotsirup, der Versäuerung des Brotsirups mit Milchsäurebakterien, der Aufarbeitung des versäuerten Brotsirups zum Fermentationssubstrat, der Verwertung des Fermentationssubstrats zur Herstellung von Backhefe-, Ethanol-, Kohlendioxid und Flüssigsauer, der Verwertung der Backhefe als aus dem fermentierten Substrat gewonnenes Konzentrat (Flüssighefe) zum Brotbacken, der Verwertung der Proteinfraktion zum Brotbacken, der Destillation des anaerob fermentierten Substrats, der Verwertung des vom Ethanol befreiten fermentierten Substrats als Flüssigsauer zum Brotbacken.

Der Prozeßschritt der Destillation des anaerob fermentierten Substrats ist nur in soweit durchgeführt worden, wie er für die Führung des Prozeßwasserstroms des

Flüssigsauers und seiner Verwertung erforderlich war. Die Verfahrensschritte der Destillation des Ethanol und der Verflüssigung des Kohlendioxids wurden nicht durchgeführt, weil sie zum Stand der Technik gehören. Sie wurden aber in der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf der Grundlage dafür bekannter Zahlen berücksichtigt.

Die enzymatische Aufarbeitung des Rückbrots zum Brotsirup und seine Versäuerung gelang auf der Grundlage bekannter Verfahren ohne Probleme. Auch die Aufarbeitung des versäuerten Brotsirups zum Fermentationssubstrat ließ sich in einer Weise verwirklichen, daß das Fermentationssubstrat sowohl für die aerobe als aber insbesondere für die anaerobe Fermentation in geeigneter Konzentration anfiel. Diesbezüglich war es für die anaerobe Fermentation wichtig, eine Glucosekonzentration von 15% im Fermentationssubstrat nicht zu unterschreiten, damit die Ethanolherstellung und Kohlendioxidgewinnung auf dem Stand der Technik erfolgen konnten. Es gelang mit einem einzigen Verdünnungsschritt, den nicht fermentierbaren Feststoffgehalt aus dem Brotsirup, der einen Feststoffgehalt von mehr als 40% aufwies, zentrifugal abzuscheiden. Damit war zugleich eine energetisch günstige Brotsirupherstellung und –aufarbeitung gewährleistet. Der abgeschiedene Feststoff ließ sich über eine Auswaschung praktisch vollständig von seinem Glucosegehalt trennen. Dabei wurde das Ziel erreicht, das Substratvolumen für den späteren Anfall an Schüttwasser so klein zu halten, daß das Schüttwasservolumen wesentlich kleiner blieb als das für die Brotherstellung der Brotfabrik erforderliche Schüttwasservolumen. Gleichzeitig fiel eine Proteinfraction mit einem Proteingehalt von 40% an. Außerdem fiel bei der Brotsirupaufbereitung durch Sieben ein Preßkuchen an, in den alle für die Verwertung der Proteinfraction und das Fermentationssubstrat nicht erwünschten Feststoffe übergingen. Der Preßkuchen hatte einen Getreideschroten vergleichbaren Futterwert. Das trübe Fermentationssubstrat konnte zur aeroben Hefevermehrung eingesetzt werden, die kontinuierlich erfolgte, ohne es weiter klären zu müssen.

Es konnte mit Pilotversuchen gezeigt werden, daß eine auf den wöchentlichen Produktionsrhythmus der Brotfabrik abgestimmte Hefeproduktion bei Einhaltung von in Brotfabriken verwirklichtbaren Sterilbedingungen möglich ist. Die im Prozeß anfallende Flüssighefe, die Proteinfraction und das Schüttwasser wurden ohne

jedwede Beeinträchtigung der Gebäckqualität in großtechnischen Backversuchen in der Brotfabrik eingesetzt. Damit kann es als bewiesen gelten, daß das Verfahren durchführbar ist. Die Herstellung von Ethanol und die Gewinnung von Kohlendioxid aus Getreidemaismischen vergleichbarer Zusammensetzung zum Fermentationssubstrat aus Brotsirup gehört ohnehin zum Stand der Technik. Sie brauchte deshalb nicht experimentell überprüft zu werden.

Auf der Grundlage dieser Ergebnisse zur Verfahrensentwicklung wurden Kostendeckungsrechnungen für zwei Modelle der Anwendung des Verfahrens durchgeführt. Das eine Modell bezieht sich auf die ausschließliche Herstellung von Flüssighefe aus einem Teil des täglich anfallenden Rückbrots einer Brotfabrik. Das andere Modell sieht die ausschließliche Verwertung des gesamten Rückbrots einer Brotfabrik vor, wobei deren Hefebedarf die Leitgröße darstellte.

Es konnte gezeigt werden, daß beide Modelle unter den gewählten Randbedingungen wirtschaftlich umgesetzt werden können. In dem Modell der ausschließlichen Flüssighefeherstellung ergab sich bei einer Amortisation des dafür eingesetzten Kapitals von 10 Jahren unter Nutzung der Abwärme aus den Backöfen eine Rendite von 5,1%, in dem anderen Modell unter den gleichen Bedingungen bei einer Amortisation des eingesetzten Kapitals von 10 Jahren von 5,6%.

Es ist zusätzlich darauf hinzuweisen, daß zu der direkten Rendite für das Unternehmen auch die indirekte Rendite für die Umweltentlastung durch das Verfahren zu rechnen ist. Diese Entlastung ergibt sich durch die produktionsintegrierte Primär- und Sekundärnutzung unabdingbarer Energieträger und Rohstoffe.

7 Literatur

- 1 Meuser, F., Brümmer, J.-M. and W. Seibel: Bread varieties in Central Europe. *Cereal Foods World* **39** (1994) 222-230.
- 2 Zentralverband des Deutschen Bäckerhandwerks e.V., Bad Honnef. Umsatzsteuerstatistik 1999.
- 3 Leitsätze für Brot und Kleingebäcke des Deutschen Lebensmittelbuches vom 31.1.1994 (Banz. Nr. 58a vom 24.3.1994). In: Textsammlung Recht der Brot- und Backwarenwirtschaft, G. Klein, H.-J. Rabe, H. Weiss, M. Horst (Hrsg.). Behr's Verlag, 65. Erg.-Lfg./Stand März 1994.
- 4 Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2000, pp187 und 189. Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrup, 2000.
- 5 Futtermittelverordnung. In: Futtermittelrecht. H.J. Entel, N. Förster und E. Hinckers. Blackwell Wissenschaftsverlag, Berlin, 1992, A-2.
- 6 Marktberichte: Mühle + Mischfutter **138** (2001) 474.
- 7 Meuser, F. und U. Martens: Führung von Stoffströmen in Brotfabriken. In: 4. Internationale Sommerakademie St. Mariensthal „Stoffstrommanagement – Herausforderung für eine nachhaltige Entwicklung. F. Brickwedde (Hrsg.), Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Steinbacher Druck, Osnabrück, 1999, S. 423-447.
- 8 Gesetz zur Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen, vom 27.09.1994. In: Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz: Textausgabe mit Erläuterungen. H. von Köller. Berlin: Erich Schmidt, 1995.
- 9 Meuser, F.: Einfluß der Fermentation auf Zusätze von Brot zu Isernhäger Sauerteigen. *Getreide Mehl und Brot* **41** (1987) 112-116.
- 10 Elsner, G. und K. Seiler: Die Bedeutung der Extrudierttechnologie für den Backbetrieb. *Brot und Backwaren* **31** (1983) 262-268.
- 11 Lieken-Batscheider Mühlen- und Backbetriebe GmbH: Verfahren zum Herstellen eines Brotteiges unter Verwendung eines Brühstückanteils. Deutsches Patent 34 02 778.
- 12 Müller Brot Neufahrn GmbH & Co. KG: Verfahren zur Herstellung eines Zuckersirups und Verwendung des Zuckersirups als Kultur- und Nährmedium für die Zucht von Bäckerhefe. Deutsches Patent 36 23 896.

- 13 Schäfer, R. and F. Meuser: Developments in the Production of High Quality German Whole Meal Breads. Paper presented at the 76th Annual Meeting of the American Association of Cereal Chemists, Seattle, 1991.
- 14 Autorenkollektiv: Lebensmittellexikon, VEB Fachbuchverlag Leipzig, 1981.
- 15 Dellweg, H.: Biotechnologie, Grundlagen und Verfahren, VCH Weinheim, 1987.
- 16 B. Wendeln jr. GmbH. Verfahren zum enzymatischen Abbau von Restbrot und Verwendung des erhaltenen Abbauprodukts. Europäische Patentschrift 02 29 979.
- 17 Biochemical Engineering and Biotechnology Handbook. Bernard Atkinson and Ferda Mavituna (Eds.). Ethanol, pp 397-407. Macmillan Publishers Ltd, 1983.
- 18 The ethanol plant in Norrköping. Firmenschrift Agroethanol AB, Norrköping, Sweden, 2001.
- 19 Meuser, F. and U. Martens: Recent Developments in Enzymic and Fermentative Process Steps for the Conversion and Inline Use of Bread in Industrial Bakeries. Ernährung/Nutrition **23** (1999) 159-163.
- 20 Ministerstwo Chleboproduktow SSSR NPO " Chlebprom": Sbornik technologitscheskich instruzij dlja proiswodstwa chleba i chlebobulotschnyk isdelij. Prejckurantisdat. Moskwa, SSSR, 1989.
- 21 Narziß, L.: Abriß der Bierbrauerei. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1986.
- 22 Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e.V.: DLG-Prüfbestimmungen für Brot, Feine Backwaren, Getreidenährmittel und Süßwaren, Frankfurt am Main, 1995.
- 23 Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung e.V.: Standard-Methoden für Getreide Mehl und Brot, Weizenbackversuch ff., 205-215. Verlag Moritz Schäfer, Detmold, 1978.
- 24 Baumgart, J.: Mikrobiologische Untersuchung von Lebensmitteln. Behr's Verlag, Hamburg, 1990.
- 25 Bronn, W.K.: Vorlesungsreihe „Technologie der Hefefabrikation“, Technische Universität Berlin, 1986.
- 26 Röcken, W.: Fremdhefennachweis in der obergärigen Brauerei mit dem Pnatothenat-Agar. Monatsschrift für Brauwissenschaft (1983) 2, 65-69.
- 27 The Practical Brewer. A Manual for the Brewing Industry. Harald M. Broderick

- (Ed.). Master Brewers Association of the Americans, 1977.
- 28 DIN. 1994. EN ISO 3188. Bestimmung des Stickstoffgehalts nach dem Kjeldahl-Verfahren. Deutsches Institut für Normung.
- 29 ICC-Standard Nr. 128: Verfahren zur Bestimmung der Stärke nach enzymatischem Aufschluß. Standard Methods of the International Association for Cereal Chemistry. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1980.
- 30 Boehringer Mannheim GmbH: Methoden der biochemischen Analytik und Lebensmittelanalytik, Bestimmung des Glucosegehalts. Mannheim, 1989.
- 31 ICC-Standard Nr. 156: Bestimmung des Gehalts an Gesamtballaststoffen. Standard Methods of the International Association for Cereal Chemistry. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1997.
- 32 ICC-Standard Nr. 104: Bestimmung der Asche von Getreide und Mahlprodukten aus Getreide. Standard Methods of the International Association for Cereal Chemistry. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1990.
- 33 ICC-Standard Nr.136: Bestimmung des Gesamtfettgehalts. Standard Methods of the International Association for Cereal Chemistry. Verlag Moritz Schäfer Detmold, 1980.
- 34 DIN. 1994. EN ISO 5381. Bestimmung des Wassergehalts, Modifiziertes Karl-Fischer-Verfahren. Deutsches Institut für Normung.
- 35 DIN. 1994. EN ISO 1666. Bestimmung des Feuchtegehalts, Wärmeschrankverfahren. Deutsches Institut für Normung.
- 36 Boehringer Mannheim GmbH: Methoden der biochemischen Analytik und Lebensmittelanalytik, Bestimmung des Ethanolgehalts. Mannheim, 1989.
- 37 Boehringer Mannheim GmbH: Methoden der biochemischen Analytik und Lebensmittelanalytik, Bestimmung des Milchsäuregehalts. Mannheim, 1989.
- 38 Boehringer Mannheim GmbH: Methoden der biochemischen Analytik und Lebensmittelanalytik, Bestimmung des Saccharosegehalts. Mannheim, 1989.
- 39 Arbeitsgemeinschaft für Getreideforschung e.V.: Standard-Methoden für Getreide Mehl und Brot, Kochsalzbestimmung in Backmitteln, Fertigmehlen, Brot, anderen Backwaren und Teigwaren, 198-200. Verlag Moritz Schäfer, Detmold, 1978.
- 40 Thomas, B. und A. Juretko: Vergleichende Beurteilung physikalischer Verfahren zum Messen der Krumenkonsistenz. Getreide Mehl und Brot **27** (1973) 292-299.

- 41 Thomas, B. und A. Juretko: Fertigung und Gebäckfrischhaltung. Brotindustrie (1974) 387-398.
- 42 Jährig, A., Martens, U und Meuser, F. Untersuchung über den Gehalt ausgewählter Vitamine und von m-Inosit über die Stufen einer biotechnologischen Aufarbeitung von Brot. Getreide Mehl und Brot **54** (2000) 2, 103-109.
- 43 Tegge, G.: Stärke und Stärkederivate. Verzuckerung von Stärke, pp 219-295. Behr's Verlag, Hamburg, 1984.
- 44 Fa. Agrano GmbH u. Co. KG, Riegel, Dr. B. Bohrer, persönliche Mitteilung vom 01.05.1999.
- 45 Internationaler Melasse- und Alkoholbericht, Preisstatistiken. **38** (2001) 13, 18.7.2001.
- 46 Penschke, A.: Minderung öko- und klimaschädigender Abgase aus industriellen Anlagen durch rationelle Energienutzung-Großbäckerei-, Abschlußbericht. Zentrum für Rationelle Energieanwendung und Umwelt GmbH, Regensburg, September 2000.
- 47 Kreipe, H.: Technologie der Getreide- und Kartoffelbrennerei, Verlag Hans Carl, Nürnberg, 1972.
- 48 Haffmans, B.: CO₂-Rückgewinnungsanlagen, Teil 1: Gründe für die CO₂ – Rückgewinnung Kostenrechnung, Aufgaben einer CO₂-Rückgewinnungsanlage. Brauindustrie (1996) 3, 172-175.
- 49 Crommentuyn, L. und J. Sloesen: Neues Rückgewinnungskonzept, mehr CO₂ mit höherer Qualität. Brauindustrie (1998) 6, 380-382.

8 Anhang - Beispielhafte Auslegung einer Anlage zur Aufarbeitung von Rückbrot zur Flüssighefeherstellung

Die nachstehend beschriebene Anlage sieht die Durchführung des aus mehreren Teilen bestehenden Verfahrens zur Rückbrotverwertung unter Schwerpunktsetzung auf die Herstellung des Fermentationssubstrats und die ihr folgende Herstellung einer Flüssigbackhefe ohne Berücksichtigung der möglichen Herstellung von Flüssigsauer vor. Es handelt sich bei dieser Schwerpunktsetzung um den technisch anspruchsvollsten, zugleich aber in seiner Wertschöpfung interessantesten Teil des gesamten Verfahrens. Die sich aus der Schwerpunktsetzung ergebende Anlage ist Teil einer modular aufgebauten Gesamtanlage. Dieser Aufbau der Gesamtanlage erlaubt die stufenweise Umsetzung des gesamten Verfahrens in den Produktionsablauf der Brotfabrik. Er bietet den zusätzlichen Vorteil der Begrenzung der anfänglichen Investition auf den Teil der größten Wertschöpfung.

Der besondere technische Anspruch der Anlage besteht in der vorgesehenen kontinuierlichen Herstellung der Flüssighefe. Daraus ergibt sich im Hinblick auf die Integration des Verfahrens in die kontinuierliche Backwarenherstellung der Vorteil eines gegenüber dem Zulaufverfahren kleineren Fermentervolumens und insbesondere der Vorteil kontinuierlicher Volumenströme der Prozeßwässer. Der modulare Aufbau der Anlage erlaubt jedoch auch den Bau einer Anlage für eine herkömmliche Hefeherstellung im Zulaufverfahren und eine entsprechende Führung der Prozeßwasserströme.

8.1 Funktionsbeschreibung der Anlage für die Flüssighefeherstellung

Die Anlage zur biotechnologischen Aufarbeitung des Rückbrots (Backwaren und Teige) ist auf einen Durchsatz von täglich 12 t ausgelegt, die ca. 7,2 t Trockenmasse entsprechen. Die zur Aufarbeitung vorgesehenen Partien an Rohstoffen werden in Rollwagen (Pos. 1) zwischengelagert. Die befüllten Rollwagen werden dann zur Aufbereitungsanlage (Pos. 2) geschoben.

Das aufzubereitende Rückbrot wird täglich in drei Chargen über eine Kippstation (Pos. 1) in einen Vorzerkleinerer (Kutter, Pos. 2) gefördert, in dem es unter Zugabe von warmem Einmaischwasser (Pos. 3) und α -Amylase intensiv zu einer Maische zerkleinert und vermischt wird. Das Einmaischwasser ist anfänglich Frischwasser und nach dem Anfahren und Einlaufen des Prozesses ist es Prozesswasser, das gemäß der für den Gesamtprozeß gewählten Definition als Schüttwasser bezeichnet wird.

Die Menge an Schüttwasser wird so bemessen, daß die Maische einen Trockensubstanzgehalt von ca. 40% aufweist. Der Maische wird zur Verflüssigung der Stärke mit einer Exzentrerschneckenpumpe, die mit einer speziellen Zuführvorrichtung (Pos. 2) für hochviskose Medien ausgestattet ist, in einen druckfesten, doppelwandigen und mit einem wandschabenden Rührwerk ausgestatteten Behälter (Verflüssigungsbehälter) (Pos. 5) gefördert.

Der Verfahrensablauf von der Kippstation bis zur Befüllung des Verflüssigungsbehälters erfolgt in Teilschritten zu 2.250kg/h Maische in 2h 40min. Die Befüllung des Verflüssigungsbehälters dauert 3 h. Bereits während der Befüllung wird die Maische auf 70°C aufgeheizt. Nach Beendigung der Befüllung wird noch 1 h aufgeheizt. Dabei wird eine Temperatur von 95°C erreicht, so dass die α -Amylase inaktiviert wird. Danach wird die verflüssigte Maische zur Verzuckerung der Stärke in 2 h mittels einer Pumpe über einen Wärmeaustauscher (Pos. 7), mit dem sie auf 60°C abgekühlt wird, in einen von zwei doppelwandigen , mit einem

wandschabenden Rührwerk ausgestatteten (Verzuckerungsbehälter) (Pos. 6), gefördert.

Der gesamte Vorgang vom Beginn des Einmischens bis zur Beendigung der Verflüssigung, die mit der Entleerung des Verflüssigungsbehälters und der Befüllung des einen Verzuckerungsbehälters abgeschlossen ist, dauert 6 h. Während der Befüllung des Verzuckerungsbehälters erfolgt die Zugabe des Enzyms Glucoamylase, das bei 60°C ihr Temperaturoptimum hat. Der befüllte Behälter wird 7 h bei 60°C gehalten und danach in 3 h entleert. Die verzuckerte Maische wird als Brotsirup bezeichnet.

Der Brotsirup wird mit einer Pumpe (Pos. 8) auf ein Schwingsieb (Pos. 9) gefördert. Dabei wird der Brotsirup mit Frischwasser (Pos. 4) auf einen Trockensubstanzgehalt von 26% verdünnt, um die groben Bestandteile, insbesondere Ölsaaten und Gewürze sowie Fremdstoffe, absieben zu können. Der Siebübergang (Pos. 9) wird mittels einer Schneckenpresse (Pos. 10) zu einem Preßkuchen entwässert. Der Preßkuchen wird als Futtermittel verwendet. Das abgepreßte Wasser (Pos. 10) wird wieder auf das Sieb zurückgegeben.

Der Siebdurchgang (Pos. 9) wird mit einem Dekanter (Pos. 11) zentrifugiert. Der Oberlauf (Klarlauf) wird mit einem Wärmeaustauscher (Pos. 13) thermisch behandelt. Die Einlauftemperatur beträgt ca. 50°C und die Auslauftemperatur 70°C. Der thermisch behandelte Klarlauf wird in einen von zwei einwandigen, isolierten Lagerbehältern (Pos. 13) gefördert. Dieser Oberlauf bildet ein Teil des Substrats für die Backhefeherstellung. Das beim Zentrifugieren anfallende Sediment wird in einem weiteren Pufferbehälter (Pos. 12) gesammelt.

Das Sediment wird zur Extraktion seines Glucosegehaltes mit Frischwasser (Pos. 4/12) vermischt und erneut mit dem Dekanter (Pos. 11) zentrifugiert. Der Oberlauf (Klarlauf) bildet den zweiten Teil des Substrats (Pos. 11/12), der nach thermischer Behandlung (Pos. 13) auf 70°C in zwei Vorratsbehältern für das Substrat gelagert wird. Das Sediment fällt in einen Rollwagen (Pos. 12) und kann als protein- und ballaststoffreiche Backzutat verwendet werden. Der Vorgang vom Sieben des Brotsirups bis zur Extraktion des Sediments dauert 3h.

Das in den Vorratsbehältern gelagerte Substrat (Pos. 13) wird im 24 h Takt kontinuierlich in den sterilisierbaren, mit einem Rührwerk ausgestatteten, doppelwandigen aeroben Fermenter (Pos. 13) gepumpt und dabei über einen Wärmeaustauscher (Pos. 13) auf 30°C abgekühlt.

Aus weiteren Vorratsbehältern (Pos. 16) werden außerdem kontinuierlich Lauge und Nährlösung in den Fermenter gepumpt. Im Fermenter wird bei einer Temperatur von 30°C und einem pH-Wert von etwa 4 kontinuierlich unter sterilen Bedingungen bei kräftiger Belüftung Backhefe vermehrt. Die Temperatur, der pH-Wert und die Belüftungsrate werden über entsprechende Meßgeräte geregelt. Der Fermenterablauf wird mit einem sterilisierbaren Tellerseparator (Pos. 17) zentrifugiert. Die dabei anfallende Flüssighefe wird in vier gekühlte Vorratsbehälter (Pos. 21) gefördert. Die Flüssighefe wird von 30°C auf etwa 6°C abgekühlt. Die Entnahme der Flüssighefe zur Backwarenproduktion erfolgt mit einer Pumpe über eine zu den Abnahmestationen geführte Ringleitung.

Ein Teil des im Tellerseparator als Oberlauf anfallenden Schüttwassers fließt zurück in den Fermenter, der andere Teil gelangt in einen Pufferbehälter (Pos. 19). Die Regelung dieser Volumenströme, respektive der Konzentration an Hefezellen im Fermenter, erfolgt im Hinblick auf eine konstante Zellzahldichte über die Messung der Zellzahldichte im Fermenterablauf und der Ethanolkonzentration im Fermenter-inhalt.

Die Produktion an Flüssighefe wird über ein in einem Reinzuchtfermenter (Pos. 15) vermehrtes Inokulum gestartet. Die Standzeit der kontinuierlichen Flüssighefeproduktion beträgt 6 Tage. Anschließend wird der Fermenter gereinigt, sterilisiert und neu angefahren (Pos. 23).

8.2 Zusammenstellung der Anlagenteile

- 1 Entpackungs- und Sichtungsanlage
(nicht gezeigt)
- 2 Rückbrotaufbereitungsanlage
Aufgabebehälter RH01
mit Brotzerkleinerung KU01
mit Maische-Förderung P01 in T01
- 3 Brotsirupbereitungsanlage
Behälter für Enzyme BD01 und BD02

mit Dosierung in KU01 sowie in TO2.1 und TO2.2
Wasserdosierung von T03.1 in KU01
mit Wassermisch- und Dosiereinheit WMU01
Kochbehälter für Verflüssigung T01
Behälter für Verzuckerung T02.1 und T02.2
Wärmeaustauscher HE01
4. Brotsirupaufbereitungsanlage
Schwingsieb SW01
Schneckenpresse SP01
Dekanter DE01
Pufferbehälter für Extraktion T03.2
Pufferbehälter für Frischwasser T03.1
- 5 Zulauffermenter für Hefezucht
Fermenter F01 mit Mess- und Regeltechnik sowie Dosierbehältern
- 6 Kontinuierlicher aerober Fermenter
Vorratsbehälter für Fermentationssubstrat T04.1, T04.2
Wärmeaustauscher HE02 und HE03
Pufferbehälter für Schüttwasser T07
Aerober Fermenter mit Meß- und Regeltechnik sowie Dosierbehältern
Tellerseparator SE02
- 7 Vorratsbehälter für Flüssighefe
Vorratsbehälter T08.1 bis T08.4
- 8 Halbautomatische CIP-Anlage
- 9 Elektrische Steuer- und Schaltanlage

8.3 Medienverbrauch und Leistungsangaben

Medium	Verbraucher	Leistung
Elektrische Energie		
1	Motor Kutter (KU01)	
1	Motor Rührwerk (RH01)	
1	Förderschnecke (RH01)	
2	Pumpen P01, P02	
1	Rührwerk T01	
2	Rührwerke T02.1, T02.2	
1	Schwingsieb SW01	
1	Dekanter DE01	
1	Tellerseparator SE02	
1	Schneckenpresse SP01	
1	Rührwerk F01	
1	Rührwerk F02	
10	Rührwerke	
13	Pumpen	
	Summe	370 kW
	Sicherheit	80 kW
	Gesamtanschlußwert	450 kW
Preßluft (6 bar) öl- und wasserfrei	Pneumatische Scheibenventile	18 Nm ³ /h
	Ausblasen Rohrleitung	6 Nm ³ /h
	Summe	24 Nm ³ /h
	Sicherheit	6 Nm ³ /h
	Gesamtpreßluftverbrauch	30 Nm³/h
Prozeßluft Fermenter (F01, F02)	Prozeßluft	40 Nm ³ /min
Dampf	Sattdampf	2,1 bar
	-Produktion ca.	1675 kg/d
	-Sterilhaltung ca.	500 kg/d
	Sterilisieren (1x wöchentlich) ca.	1.000 kg
Kälte	Kühlturm	
	Anschlußleistung	15 kW
	Verdunstung ca.	35 m ³ /d
	Kälteleistung	520 kW
	Kältemaschine	
	Anschlußleistung	20 kW
	Kälteleistung	30 kW
Wasser	Prozesswasser	
	(je Betriebstag): ca.	35 m ³ /d
	Reinigung	
	(bei täglicher Reinigung): ca.	20 m ³ /d

Lebenslauf

Udo Martens

Geburtsdatum: 11.05.1967
Geburtsort: Norden, Ostfriesland
Familienstand: verheiratet mit Dipl.-Volkswirtin Ursula Martens
14.02.1996 Geburt von Sohn Tyll Marten Martens
26.02.1998 Geburt von Sohn Sören Conrad Martens

Schulzeit:

Aug. 1973 - Jul. 1977 Grundschule am Schloßplatz, Varel
Aug. 1977 - Jul. 1979 Schulzentrum Arngaster Straße, Varel
Aug. 1979 - Jun. 1986 Lothar-Meyer-Gymnasium, Varel

Bundeswehr:

Jul. 1986 – Jun. 1988 Flugabwehrraketenbatallion 26, Wangerland
jetziger Dienstgrad: Oberleutnant der Reserve

Studium:

Okt. 1988 – Dez. 1993 Studium der Lebensmitteltechnologie mit Schwerpunkt
Getreidetechnologie an der Technischen Universität Berlin
mit Abschluß als Diplom-Ingenieur

Beruflicher Werdegang:

Jan. 1994 - Jul. 1999 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Lebensmittel-
technologie II, Fachgebiet Getreidetechnologie, der
Technischen Universität Berlin
Aug. 1999 - Jan. 2000 Assistent der Geschäftsleitung bei
Müller-Brot GmbH & Co KG, Neufahrn
Jan. 2000-Jul. 2001 Stv. Betriebsleiter bei Ankerbrot AG, Wien, Österreich
Seit Aug. 2001 Stv. Betriebsleiter bei Müller-Brot GmbH & Co KG,
Neufahrn

Neufahrn, 26.11.01