



Leseprobe

Janet Nagel

Nachhaltige Verfahrenstechnik

Grundlagen, Techniken, Verfahren und Berechnung

ISBN (Buch): 978-3-446-44387-7

ISBN (E-Book): 978-3-446-44415-7

Weitere Informationen oder Bestellungen unter

<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-44387-7>

sowie im Buchhandel.

Vorwort

Das Thema Nachhaltigkeit hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. Die Diskussion um die Energiewende wie auch die Bereitstellung von Ressourcen zur Deckung des Bedarfs an neuer Technik im Bereich der Nanotechnologie machen dieses Thema allgegenwärtig. Dies stelle ich auch in meinem Fachkreis für „Nachhaltigkeit und Qualitätsmanagement“ bei der Deutschen Gesellschaft für Qualität immer wieder fest.

In den letzten Jahren ging es dabei nicht mehr nur noch um das Thema Umwelt, sondern der Bogen wird sehr viel weiter gespannt; es treten auch soziale und gesellschaftsrelevante Themen mehr in den Vordergrund. Und doch ist das Thema der Schonung der Umwelt und der Ressourcen eine wichtige Basis, denn ohne die Lösung dieser Aufgaben treten die anderen Themen in den Hintergrund.

Die Verfahrenstechnik ist die Wissenschaft, die sich mit all jenen Vorgängen auseinandersetzt, bei denen Stoffe in ihrer Stoffeigenschaft, -zusammensetzung oder auch Stoffart verändert werden. Dabei reicht die Verfahrenstechnik in viele Anwendungsgebiete hinein, z. B. die Lebensmittelindustrie, die Chemische Industrie wie auch die Steine-Erden-Industrie, die Umwelt- und Biotechnologie und viele andere Bereiche bis hin zur Energietechnik.

Die Verfahrenstechnik ist als interdisziplinäres Fachgebiet sehr komplex. Dies verleiht ihr ein hohes Potenzial, um einen wesentlichen Beitrag zur Schaffung einer nachhaltigen Gestaltung von Produktionsabläufen bis hin zur Entsorgung von Produkten zu leisten. Dabei gestaltet die Verfahrenstechnik nicht nur die Abläufe der Herstellung, sondern sie kümmert sich auch um die während der Produktion auftretenden Stoffströme, wie z. B. umweltschädliche Abluftströme, für deren Aufbereitung angemessene Verfahren entwickelt werden müssen.

Wenn es um das Thema „Nachhaltige Verfahrenstechnik“ geht, kommt der Verwendung von Mikroorganismen ebenso wie dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe bzw. Einsatzstoffe auf biogener Basis eine wesentliche Rolle zu. Aus diesem Grund widmet sich dieses Buch der Beschreibung von Verfahren, die auf diesen Ausgangsstoffen bzw. die auf der Mitwirkung von Mikroorganismen beruhen. Doch nicht jedes Verfahren, das auf diesen Ansätzen beruht, ist gleich nachhaltig. Um dies bewerten

zu können, findet eine intensive Auseinandersetzung mit dem Thema Nachhaltigkeit statt. Um Diskussionen, die auch in der Gesellschaft geführt werden, Rechnung zu tragen, wird nicht nur auf den ökologischen Aspekt der Nachhaltigkeit eingegrenzt, sondern wird das Thema in seiner vollen Breite vorgestellt.

Aufgrund der momentan intensiv geführten Diskussionen zur Energiewende wird auf das Thema der Energieverfahrenstechnik ein besonderes Augenmerk gelegt. Die Novellierung des EEG (Erneuerbaren Energie Gesetz) fiel mitten in die Ausarbeitung dieses Buchs, so dass die gesetzlichen Änderungen nur eingeschränkt Eingang gefunden haben. Doch auch mit dem neuen EEG und der weiterhin bestehenden Zustimmung zur Energiewende kann gerade die Biogaserzeugung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der politisch gesetzten Ziele leisten. Es werden zukünftig aufgrund der neuen Nachfrage, hervorgerufen durch die neuen politischen Gegebenheiten, neue Verfahren entwickelt werden müssen. Dieser Trend hat in der Vergangenheit bereits begonnen, was sich an den Entwicklungen in der Abfallbehandlung erkennen lässt. Dort wird die Biogaserzeugung zur Schaffung eines Mehrwertes bei der Behandlung von biologischem bzw. organischem Abfall zukünftig eine immer wichtigere Rolle spielen. Insgesamt ist die Branche der Abfallbehandlung in großem Aufbruch, was in diesem Buch durch einen aktuellen Beitrag belegt wird. Das erzeugte Biogas bzw. Biomethangas kann als ein speicherbares Medium einen wichtigen Beitrag dazu leisten, flexibel den Bedarf an Strom und auch an Wärme zu decken. Die Speicherung des Gases im Erdgasnetz hat Potenzial, das noch weiter ausgebaut werden kann.

Kraftstoffe auf der Basis nachwachsender Rohstoffe zur Schonung fossiler Ressourcen sind in Zeiten der „grenzenlosen“ Mobilität natürlich ebenfalls ein wesentliches Thema. Ausschlaggebend wird das Zusammenspiel mit der Automobiltechnik zur Weiterentwicklung bzw. Neuentwicklung von Verfahren sein. Es wird u. a. auf die Politik ankommen, welche Weichen zukünftig gestellt werden.

Auch im Fahrzeugbereich finden Kunststoffe immer mehr Einsatz. In Summe sind sie aus unserem Alltag nicht mehr wegzudenken. Der Trend zurück zu biologischen Kunststoffen hat auch hier bereits vor längerer Zeit begonnen. Doch sind noch viele Fragen offen, wie die Aspekte der Ressourcenschonung und der Umweltverträglichkeit besser berücksichtigt werden können. Neueste Untersuchungen beschäftigen sich mit Mikroplastik in Meeren, die durch Abrieb oder Verwendung in Kosmetikprodukten, wie Peelings oder Zahnpasten, hervorgerufen werden. Oder denken wir an das Waschen moderner Kleidung aus Kunstfasern aller Art, über das bis zu 2000 Kunstfasern pro Waschgang ins Waschwasser gelangen. Daraus ergeben sich viele Themen, die noch zu bearbeiten sind.

Die Beschäftigung mit Abwasser- und Abluftströmen spielt in der Umweltverfahrenstechnik von jeher eine wichtige Rolle. Da die Abwassertechnologie ein sehr umfangreiches Fachgebiet ist, konzentriert sich dieses Buch auf die Luftreinhaltung auf bio-

logischer Basis. Während diese Technologie früher vorrangig zur Beseitigung von Geruchsstoffen durch Mikroorganismen eingesetzt wurde, werden heute auch immer mehr giftige Stoffe in der Abluft mit dieser Technologie abgebaut.

Zu guter Letzt schauen wir noch auf die Herstellung von sogenannten Bodenhilfsstoffen. Die Wirkweise dieser Bodenhilfsstoffe beruht auf der Aktivität von Mikroorganismen. Eine Beurteilung des Einsatzes von Bodenhilfsstoffen unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit ist Thema laufender Untersuchungen, so dass an dieser Stelle zunächst erste Zwischenergebnisse vorgestellt werden können. Dieses Thema kann zukünftig auf die Verwendung von Gärprodukten anstelle oftmals eingesetzter Steinwollewürfel ausgeweitet werden. Dabei spielen die Auswirkungen sowohl auf die ökologischen Aspekte, aber vor allem auch auf die gesellschaftspolitischen Aspekte, nämlich der Steigerung des Geschmacks, eine wichtige Rolle.

Wie wir sehen können, spielen viele aktuelle Themen in diesem Buch eine wichtige Rolle. Ohne den Austausch und die Unterstützung namhafter Experten wäre dieses Buch nicht zustande gekommen. Alle Personen, die an diesem Buch mitgewirkt haben, haben mir durch ihre Bereitschaft, mir ihre knappe Ressource Zeit zur Verfügung zu stellen und mich durch den fachlichen Austausch und zum Teil durch die Bereitstellung interessanter Bilder an ihrem Wissen teilhaben zu lassen, eine sehr große Ehre erwiesen. All diesen mir wichtigen Persönlichkeiten möchte ich meine größte Hochachtung und Wertschätzung aussprechen. Dabei möchte ich im Besonderen folgenden Menschen sehr herzlich danken:

Ganz zu Beginn möchte ich meinen Eltern für ihre Unterstützung auf meinem bisherigen Weg danken. Im Besonderen danke ich meiner Familie. Ohne ihr Verständnis, aber auch das Interesse und die aktive Beteiligung bei der Bearbeitung und Fertigstellung dieses Buches, hätte ich mich dieser Aufgabe nicht erfolgreich stellen können.

Weiterhin danke ich meinem Verlag, vertreten durch Volker Herzberg, der dieses Thema und die damit verbundene Aufarbeitung als Buchprojekt übernommen hat. Im Besonderen möchte ich Herrn Herzberg für sein stets offenes Ohr danken; durch seine Beiträge gerade bei der Erstellung der Grafiken hat er mich sehr inspiriert.

Einen roten Faden durch die gesamte Arbeit stellte die Zuarbeit von Dr. Silvia Porstmann, Geschäftsführerin der Seramun Diagnostica GmbH, dar. Sie hat umfangreich alle Kapitel gegengelesen, sich der Literatur angenommen und im Besonderen das Kapitel 2, Biologische Grundlagen, redigiert. Ohne ihr Mitwirken hätte dieses Buch einen sehr viel längeren Zeitraum zur Fertigstellung benötigt.

Im Kapitel 3, Thermische Prozesse, stand mir mein früherer Professor für Thermodynamik Prof. Dr.-Ing. Prof. e. h. Dr. h. c. George Tsatsaronis vom Institut für Energietechnik der TU Berlin zur Seite. Durch seinen konstruktiv kritischen Blick war es mir möglich, das notwendige Fachwissen darzulegen.

In enger Diskussion mit Dr. Matthias Plöchl, Geschäftsführer der Bioenergie-Beratung Bornim GmbH, entstand das Kapitel 4 der Energieverfahrenstechnik. Auch hier sind wichtige komplexe Zusammenhänge dargestellt, die durch den fachlichen Exkurs auf ihre Richtigkeit hin geprüft wurden.

Im Bereich der ORC Anlagen unterstützten mich Professor Piero Colonna, Professor of Propulsion and Power der Delft University of Technology, und Dr. Wilhelm Althaus vom Fraunhofer-Institut Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) mit hilfreichen Anmerkungen und Beiträgen zu diesem sehr aktuellen Thema.

Sehr intensiv hat sich Andreas Warnstedt, Rhein-Lahn-Kreis Eigenbetrieb Abfallwirtschaft, mit dem Thema der biologischen Abfallbehandlung im Kapitel 5 beschäftigt. Er gab mir wichtige Impulse zur Darstellung des Themas. Durch die Diskussion und die Beiträge von ihm wie auch von Herrn Dr. Ketel Ketelsen, Ingenieurbüro für Abfallwirtschaft und Energietechnik (iba) GmbH, können die aktuellen Entwicklungen in diesem Bereich vorgestellt werden.

Ebenfalls in Kapitel 5 wurde ich von Dr. Ralf Forkmann, Geschäftsführer der TS Umweltanlagenbau GmbH und Jens Oliver Ortlinghaus, Beratender Ingenieur, Labor für innovative Umwelttechnik (Liutec) UGh, intensiv beim Thema der biologischen Abluftbehandlung unterstützt.

Das Kapitel 6 „Bioverfahrenstechnik“ mit dem Thema der Biokunststoffe wurde durch das Vertrauen und die intensive Zuarbeit von Kollegen Prof. Dr.-Ing. Hans-Josef Endres, Institut für Biokunststoffe und Bioverbundwerkstoffe der Hochschule Hannover (IfBB), geprägt. Durch die Unterstützung bei der thematischen Auseinandersetzung mit diesem Thema als auch die Bereitstellung von Grafiken aus seinem aktuellen Buch „H.-J. Endres, A. Siebert-Raths: Technische Biopolymere“ konnte dieses Kapitel fachlich abgerundet werden.

Beim Thema Bodenhilfsstoffe in Kapitel 6 wurde ich von Dr. Helmut Junge, Geschäftsführer der ABiTEP GmbH, und seinem Produktionsleiter Dipl. Ing. Oliver Mucha, unterstützt. Das Interesse am Thema Nachhaltigkeit führte bei der ABiTEP GmbH zu umfangreichen Investitionen für eine Einsparung von Ressourcen im Produktionsprozess von Bodenhilfsstoffen.

Meinen Lesern wünsche ich nun viel fachlichen Input und eine interessante Auseinandersetzung mit dem komplexen Thema der nachhaltigen Verfahrenstechnik. Ich hoffe, dass dieses Buch dazu beitragen kann, das Bewusstsein für die zukünftigen Aufgaben für uns als Ingenieure in Richtung eines ganzheitlichen Ansatzes weiter zu steigern, so dass die notwendigen Schritte auch gegangen werden können.

Inhalt

Vorwort	V
1 Einführung	1
1.1 Nachhaltigkeit	3
1.2 Möglichkeiten der Verfahrenstechnik	6
1.3 Ökobilanzen	9
1.3.1 Vorausgehende Definition der Zielstellung	12
1.3.2 Ziel und Untersuchungsrahmen der Ökobilanz	13
1.3.3 Sachbilanz	17
1.3.4 Wirkungsabschätzung	19
1.3.5 Auswertung	24
1.4 Carbon Footprint von Produkten (CFP)	25
1.4.1 Beachtung spezifischer Treibhausgasemissionen	28
1.4.2 Berichterstattung des CFP	30
1.5 Nachhaltigkeitsbericht	34
1.6 Ansätze zur Einbeziehung ökonomischer Aspekte	39
1.7 Kritische Würdigung der Ansätze	46
2 Biologische Grundlagen	49
2.1 Mikroorganismen	49
2.1.1 Klassifizierung von Mikroorganismen	50
2.1.2 Struktureller Aufbau der Zellen	57
2.1.3 Technischer Einsatz von Bakterien, Hefen und Pilzen	61
2.2 Stoffwechsel und Energieumwandlung	63
2.2.1 Thermische Prozesse der Zelle	63
2.2.2 Energiegewinnung im Rahmen des Stoffwechsels	69
2.2.3 Die Bedeutung der Stickstoffe und Phosphate	77

2.3	Anaerobe Prozesse	80
2.3.1	Gärung	82
2.3.2	Methanogenese	84
2.4	Funktionsweise der Enzyme	86
2.5	Reaktionskinetik	88
2.5.1	Wachstum und Vermehrung	89
2.5.2	Wachstumskurve	91
2.5.3	Monod-Kinetik	94
2.6	Modellierung der Reaktionskinetik	96
2.6.1	Reaktorfahrweisen	97
2.6.2	Batchreaktor	99
2.6.3	Bilanzierung	101
2.7	Stofftransport	110
2.8	Bioreaktoren	114
2.8.1	Submersreaktoren	115
2.8.2	Bettreaktoren	123
2.8.3	Membranbioreaktor	127
2.8.4	Methoden zur Immobilisierung	128
3	Thermische Prozesse	129
3.1	Thermodynamische Grundlagen	132
3.1.1	Systeme in der Thermodynamik	132
3.1.2	Der Begriff „Zustand“ in der Thermodynamik	134
3.1.3	Arbeit und Wärme	138
3.1.4	Erster Hauptsatz der Thermodynamik (1. HS)	141
3.1.5	Thermische Zustandsänderungen	144
3.1.6	Energieumwandlung – Zweiter Hauptsatz der Thermodynamik (2. HS)	149
3.1.7	Kreisprozesse	153
3.1.8	Thermischer Wirkungsgrad	154
3.1.9	Exergie und Anergie	155
3.1.10	Dampfprozesse	157
3.2	Konzepte zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)	164
3.2.1	Blockheizkraftwerk (BHKW)	167
3.2.2	Gas-Otto-Motoren	170
3.2.3	Zündstrahlmotoren	172
3.2.4	Stirling-Prozess	173
3.2.5	Gasturbinen	178
3.2.6	Organic Rankine-Cycle (ORC)	187

4	Energieverfahrenstechnik	193
4.1	Energiegewinnung aus Biomasse	202
4.2	Ethanolherstellung aus Biomasse	203
4.2.1	Schritte der Vorbehandlung bei der Ethanolproduktion	204
4.2.2	Alkoholische Gärung (Fermentation)	210
4.2.3	Destillation und Rektifikation	214
4.2.4	Entwässerung	225
4.2.5	Aufbereitung des Reststoffs	228
4.2.6	Bioethanol aus der Sicht der Nachhaltigkeit	229
4.3	Biogas	235
4.3.1	Mikrobiologischer Prozess	236
4.3.2	Einsatzstoffe	243
4.3.3	Lebensbedingungen für Bakterien	255
4.3.4	Verfahrenskette	260
4.3.5	Prozessparameter	269
4.3.6	Biogasreinigung und -aufbereitung	275
4.3.7	Gärprodukt	279
4.3.8	Einsatzmöglichkeiten für Biogas	281
4.3.9	Diskussion der Nachhaltigkeit für die Erzeugung von Biogas	285
5	Umwelttechnik	293
5.1	Biologische Verfahren zur Luftreinhaltung	293
5.1.1	Biofilter	300
5.1.2	Biowäscher	310
5.1.3	Biorieselbettreaktoren	314
5.1.4	Biomembranverfahren	315
5.1.5	Nachhaltigkeitsaspekte biologischer Luftreinhaltung	317
5.2	Biologische Abfallbehandlung als Element der Kreislaufwirtschaft	321
5.2.1	Abfallbehandlung – allgemeine Betrachtungen	321
5.2.2	Kompostierung – Prinzipdarstellung	325
5.2.3	Mieten als Verfahrensvariante	331
5.2.4	Prozessschritte der MBA	332
5.2.5	Konzepte zur Nachhaltigkeit Mechanisch-Biologischer Abfallbehandlungsanlagen	342
6	Bioverfahrenstechnik	359
6.1	Biokunststoffe	359
6.1.1	Übersicht Biokunststoffe	364
6.1.2	Nachwachsende Rohstoffe	367
6.1.3	Herstellungsprozesse von Biokunststoffen	369

6.1.4	Zertifizierung „biobasiert“	377
6.1.5	Nachhaltigkeit von Biokunststoffen	378
6.2	Bodenhilfsstoffe	391
6.2.1	Pflanzenernährung	391
6.2.2	Bedeutung des Bodens	395
6.2.3	Einsatz spezifischer Mikroorganismen für eine ökoefiziente Pflanzenernährung	398
6.2.4	Mikrobielle Nutzorganismen	400
6.2.5	Herstellungsprozess eines Bodenhilfsstoffs am Beispiel des <i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	402
6.2.6	Exkurs: Chemische Dünger	410
6.2.7	Aspekte zur Nachhaltigkeit von Produkten zur Verbesserung des Pflanzenwachstums	415
	Literatur	421
	Index	437

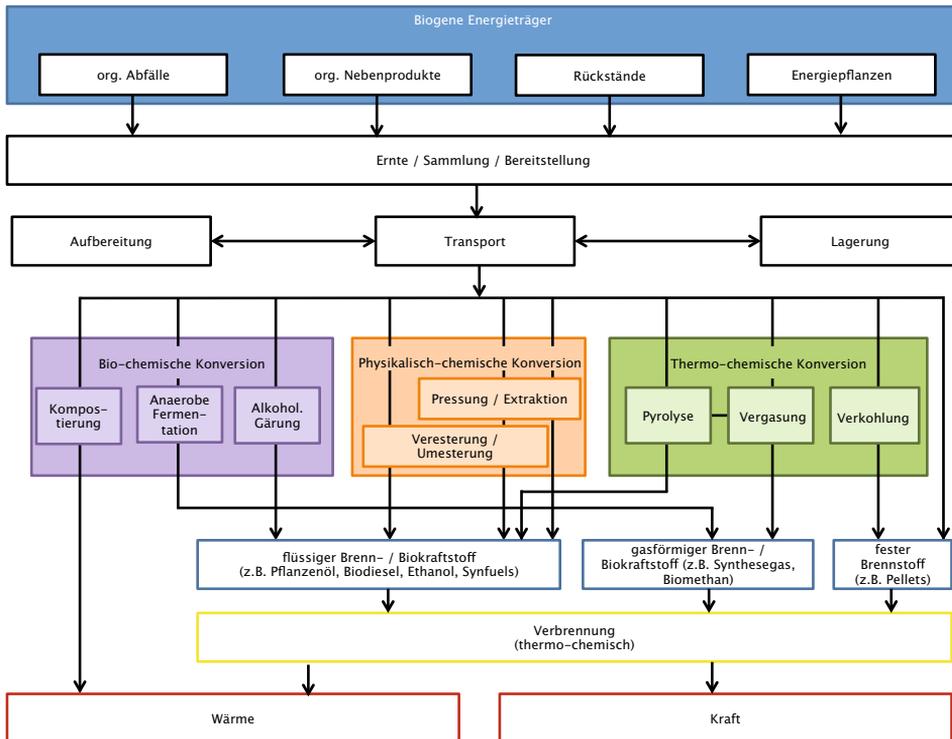


Bild 4.10 Einordnung der biogenen Energieträger in deren Nutzungspfade zur Erzeugung von End-/Nutzenergie (nach FNR 2010)

■ 4.2 Ethanolherstellung aus Biomasse

Ethanol ist ein vielseitig nutzbarer Grundstoff. Er wird unter anderem in der Pharmaindustrie, der chemischen Industrie, bei der Kosmetikherstellung, im Medizinbereich und bei der Treibstoffherstellung eingesetzt. Auch in der Genussmittelindustrie findet Ethanol Verwendung. Ausgangsstoff für die biologische Herstellung bilden zuckerhaltige Einsatzstoffe, wie Zuckerrohr, Zuckerrüben, Melasse, Molke sowie Früchte und deren Säfte. Neben diesen können auch stärkehaltige Einsatzstoffe, z.B. Kartoffeln oder verschiedene Getreidesorten, Eingang finden. Aber auch Holzabfälle oder Stroh können verwendet werden.

Ethanol wird unter anaeroben Bedingungen durch Gärung gebildet. Für die Prozessführung sind auch hier die pH-Wert- und die Sauerstoffregelung elementar. An der Gärung sind Hefen und Bakterien beteiligt. Ethanol wirkt hemmend auf die beteiligten Mikroorganismen. Darum ist bei der Auswahl der Bakterien auf die Ethanoltoleranz zu achten, welche stammspezifisch ist. Ethanol zerstört die Zell-

membran. Dies führt ab einer Konzentration von 12 Vol.-% Ethanol dazu, dass die Hefen die Gärung einstellen (Leuchtenberger 1998). Es sind Ausbeuten von ca. 0,6 l Ethanol pro kg Zucker zu erwarten (Leuchtenberger 1998). Eingesetzte Hefen sind z.B. *Saccharomyces cerevisiae*, *Kluyveromyces fragilis* und andere. Als Bakterien sind beispielsweise *Clostridium*-Arten und *Zygomonas mobilis* zu finden. Cellulose, Hemicellulose und andere Polysaccharide können von Vertretern der Bakteriengattung Clostridien, etwa *Clostridium thermocellum*, abgebaut werden (Leuchtenberger 1998).

Hefen stellen bei Verfügbarkeit von Sauerstoff die Alkoholproduktion ein. Sie sind damit fakultativ anaerob. Bei den Bakterien sind nur wenige Arten bekannt, die ausschließlich Alkohol produzieren (Schlegel 2007). Sie sind in der Regel strikt anaerob. Dazu zählt z.B. *Zygomonas mobilis*.

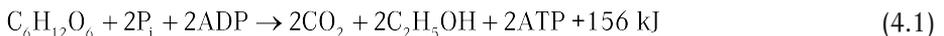
In der technischen Produktion kommen kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren zum Einsatz. Die Stufen Einsatzstoffaufbereitung, Fermentation, Alkoholabtrennung und Alkoholreinigung sind allen Verfahren gemeinsam.

Wird Stärke eingesetzt, so können aus 1 kg Stärke ca. 0,65 l Ethanol erzeugt werden (Präve 1994).

4.2.1 Schritte der Vorbehandlung bei der Ethanolproduktion

Mikroorganismen können Alkohol ausschließlich aus Zucker über den Prozess der Gärung produzieren. Die Gärung stellt dabei im Vergleich zur Photosynthese und zur Atmung die einfachste Möglichkeit des Stoffwechsels dar. Alle drei Prozesse (Gärung, Atmung, Photosynthese) sind prinzipielle Möglichkeiten der ATP-Regeneration in der Natur.

Der Weg der Alkoholbildung läuft bei Hefen und Bakterien unterschiedlich ab. Die Umsetzung von Glucose zu Ethanol erfolgt in der Form:



Am Beispiel der Hefe *Saccharomyces cerevisiae* wird der Prozess der Vergärung exemplarisch aufgezeigt (s. Bild 4.11). Der Weg geht über Fructosebisphosphat. In zwei Schritten erfolgt die Umwandlung des beim Glucoseabbau produzierten Pyruvat zu Ethanol. Im ersten Schritt wird unter Beteiligung von Thiaminpyrophosphat unter Einwirken des Enzyms Pyruvat-Decarboxylase (1) Acetaldehyd und 2 CO₂ gebildet. Im nächsten Umwandlungsschritt (2) wird mit dem Wasserstoff-Carrier NADH und dem Enzym Alkohol-Dehydrogenase Ethanol erzeugt. Es werden insgesamt 4 ATP-Moleküle gebildet.

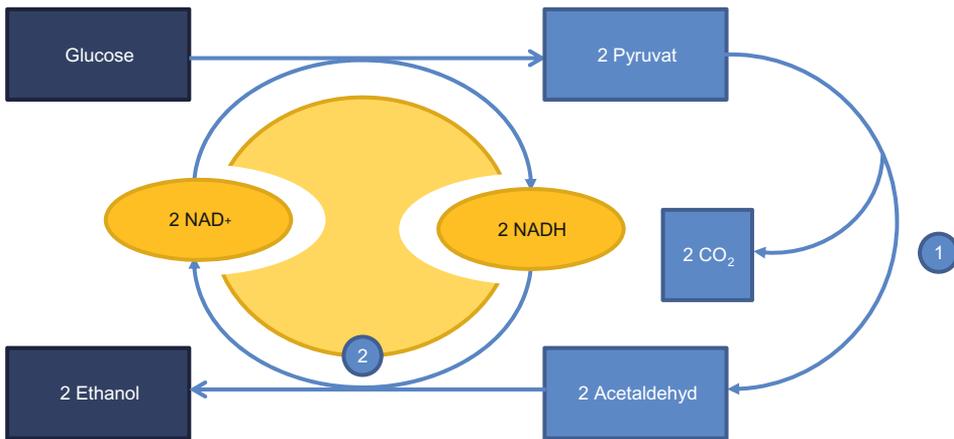


Bild 4.11 Alkohol-Gärung durch *Saccharomyces cerevisiae*: (1) Pyruvat-Decarboxylase, (2) Alkohol-Dehydrogenase (Schlegel 1992, Schwister 2010)

Die Verfügbarkeit von Zucker ist die Grundvoraussetzung, um über den Prozess der Gärung Alkohol zu produzieren. Da jedoch wie bei Stärke und cellulosehaltigen Einsatzstoffen der Zucker nicht direkt zur Verfügung steht, sind vorausgehende Zwischenschritte erforderlich. Dafür stehen zwei Mechanismen zur Verfügung (Kaltschmitt 2009):

- Stärkeabbau zu Zucker
- Lignocelluloseabbau zu Zucker

Stärke und Cellulose sind Polysaccharide. Die Pflanze baut zwei unterschiedliche Formen der Polysaccharide auf. Dazu gehören zum einen die Strukturpolysaccharide der Pflanzenzellwand und zum anderen die Speicherpolysaccharide (Schlegel 2007). Beides sind die Hauptprodukte der pflanzlichen Photosynthese. Wir erkennen sie als faserige oder verholzte Strukturen der Pflanze, die aus Zucker aufgebaut sind. Die Strukturpolysaccharide der Pflanzenzellwand bestehen zu 30 bis 50 % aus Cellulose, 20 bis 30 % aus Hemicellulose und 3 bis 5 % aus Pektin. Polysaccharidfasern sind häufig mit Lignin inkrustiert, also davon überzogen. Lignin besteht aus aromatischen Verbindungen und ist von den Mikroorganismen nur sehr langsam abbaubar. Die Speicherpolysaccharide sind zum einen transient, also kurzfristig, in den Chloroplasten gebildete Stärke. Zum anderen ist es die Stärke in Speichergeweben. Diese stellen die Hauptnahrungsquelle des Menschen dar.

Stärke ist ein Speicherkohlenhydrat der Mikroorganismen, das aus Glucose-Bausteinen besteht. Wir finden es als eines der Reserve-Kohlenhydrate in Getreide und Kartoffeln. Glucosemoleküle sind α -glykosidisch in 1,4-Stellung miteinander verknüpft und vielfach vernetzt (Schlegel 2007). Hierdurch sind die Glucoseketten schraubig gewunden. Bei Pflanzen wird die Stärke in Form von Körnern abgelagert. Diese bestehen aus Amylose und Amylopectin. Für die Verarbeitung der

Stärke ist deren Fähigkeit zur Kleberbildung relevant. Hierfür ist das Amylopectin verantwortlich.

Zucker kann auch aus lignocellulosen Einsatzstoffen hergestellt werden. Lignocellulose Einsatzstoffe bestehen aus Cellulose, Hemicellulose, Lignin sowie Spurenelementen (s. Bild 4.12).

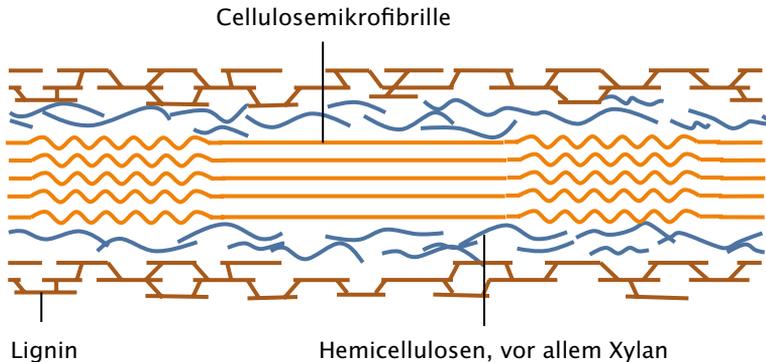


Bild 4.12 Aufbau einer Cellulosemikrofibrille aus Cellulose, Hemicellulose und Lignin (nach Schlegel 2007)

Sogenannte Cellulosefibrillen sind in einer Matrix aus Hemicellulosen und Lignin eingebunden. Anhand der Strukturänderung in Bild 4.12 ist zu erkennen, dass Cellulose kristalline und amorphe, also ungeordnete, Bereiche enthält. Die kristallinen Strukturen werden durch Wasserstoffbrücken zwischen benachbarten Zuckerketten gebildet. An diesen setzt der folgende Abbau an. Bestimmte Enzyme, z. B. Cellulasen, sind in der Lage, diese Bindungen zu hydrolysieren. Sie befinden sich auf der Oberfläche von Bakterien und Pilzen.

Neben der enzymatischen Hydrolyse kann dieser Prozess auch über den Einsatz von Säuren erfolgen. Beide Schritte sind für die Verfügbarmachung des in Holz oder Stroh enthaltenen Zuckers möglich. Erst nach Durchführung dieser Vorbehandlungsschritte kann der Gärprozess beginnen.

Prozessschritt Rohstoffreinigung und -aufbereitung

Die Rohstoffreinigung und -aufbereitung erfolgt für zucker-, stärke- und lignocellulosehaltige Rohstoffe jeweils in einem speziellen, geeigneten Verfahren.

Die Zuckerrübe muss zunächst durch Waschen von der Erde gereinigt und anschließend getrocknet werden. Durch die Zugabe von Kalk und Kohlensäure werden unerwünschte Begleitstoffe (30 bis 40%) herausgelöst. Der erhaltene klare hellgelbe Dünnsatz wird in einem mehrstufigen energieintensiven Prozess weiter

aufkonzentriert (Kaltschmitt 2009). Dies erhöht die Lagerfähigkeit und die Möglichkeit der ganzjährigen Alkoholproduktion auch außerhalb der Erntezeiten.

Als weiterer zuckerhaltiger Einsatzstoff steht das Zuckerrohr zur Verfügung. Dieses bedarf einer anderen Vorbehandlung, unter anderem, weil die Pflanze Blätter besitzt. Die Blätter müssen zunächst entfernt werden. Traditionell erfolgt dies durch Abbrennen. Heutzutage nimmt die mechanische Blattaufbereitung immer mehr Raum ein. Nach dem Waschen und Entfernen von Verunreinigungen bestehen zwei Möglichkeiten zur Gewinnung des Zuckersaftes. Es erfolgt entweder der Einsatz von Walzenpressen oder eine mehrstufige Extraktion, bei der höhere Ausbeuten zu erzielen sind. Hierbei entsteht neben dem Zuckersaft auch noch die sogenannte Bagasse, faserige Rückstände, die in einem Biomassekraftwerk zur Erzeugung von Prozesswärme und Strom verbrannt werden können (Dauriat 2007, Macedo 2008).

Bei Getreide bedarf es keines großen Aufwands. Dieses kann direkt der Zerkleinerung zugeführt werden. Über diesen Schritt werden die im Rohstoff enthaltenen Stärkeanteile mit Mühlen oder Dispergiermaschinen aus dem Zellverband gelöst.

Kartoffeln lassen sich gut lagern. Vor der weiteren Verarbeitung müssen sie ebenfalls von der Erde gereinigt werden und können anschließend, ähnlich wie Getreide, zerkleinert werden, um die Stärkeanteile freizulegen.

Bei den lignocellulosen Rohstoffen kommt eine Vielzahl unterschiedlicher Stoffe in Betracht, wie Stroh oder Hölzer (weich, hart). Für jeden Stoff gibt es eine spezielle Technik zur Reinigung und Zerkleinerung. Im Rahmen der Zerkleinerung erfolgt ein Mahlen und Zerfasern des Rohstoffs.

Prozess des Substrataufschlusses

Der Substrataufschluss stellt die nun folgende Hydrolyse des Einsatzstoffes dar. Es stehen drei wichtige Verfahren zur Verfügung. Neben dem drucklosen Stärkeaufschlussverfahren steht das Stärkeaufschlussverfahren mit Druck. Abschließend kann noch das Lignocelluloseaufschlussverfahren unterschieden werden.

Als druckloses Stärkeaufschlussverfahren wird im Folgenden das in der Brenntechnologie am weitesten verbreitete Mahl-Maischverfahren vorgestellt (Kaltschmitt 2009). Mit diesem Verfahren können nahezu alle stärkehaltigen Rohstoffe verarbeitet werden (s. Bild 4.13).

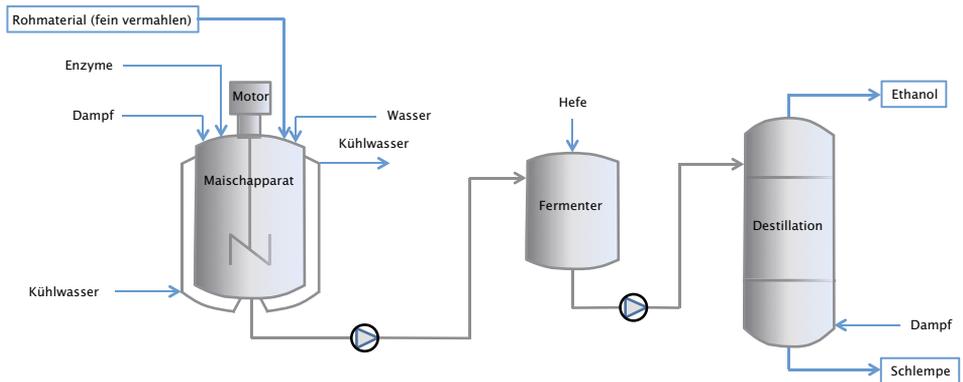


Bild 4.13 Mahl-Maischverfahren (Pieper 1985)

Über Hammermühlen wird der Rohstoff vermahlen und entweder nach einer möglichen Zwischenlagerung in einem Schrotsilo oder direkt der Maischanlage zugeführt. Um das Mahlgut aus der Mühle zu befördern, ist Wasser erforderlich. Bei der Verarbeitung von Getreide ist das Verhältnis von Rohstoff zu benötigter Wassermenge etwa eins zu eins. Bei Kartoffeln ist aufgrund des hohen eigenen Wasseranteils nur eine geringe Wassermenge erforderlich. Das mit Wasser versetzte Mahlgut gelangt gemeinsam mit dem Verflüssigungsenzym in den Maischeapparat. Um die Stärke zu verkleistern und zu verflüssigen, wird die Temperatur im Reaktor erhöht. Dies erfolgt rohstoffspezifisch. Bei Kartoffeln werden Temperaturen von 90 bis 95 °C, bei Weizen, Roggen und Triticale 65 bis 70 °C und bei Mais 80 bis 90 °C erreicht (Kaltschmitt 2009). In Abhängigkeit von den eingesetzten Enzymen wird mittels Kalkmilch der pH-Wert eingestellt. Bei der thermostabilen α -Amylase aus *Bacillus licheniformis* ist ein pH-Wert von 6,0 bis 6,2 erforderlich. Es folgt eine Verflüssigungsrast von etwa 30 min., nach der eine Abkühlung auf 55 °C und eine pH-Wert Anpassung auf 5,2 bis 5,4 vorgenommen wird. Die Verzuckerungstemperatur von 55 °C ist für alle Rohstoffe gleich. Ist diese erreicht, können die Verzuckerungsenzyme der Maische zugegeben werden. Nach einer 15- bis 30-minütigen Verzuckerungsrast wird weiter abgekühlt. Ab einer Temperatur von etwa 35 °C kann Hefe zugegeben werden. Eine Temperatur von 33 bis 36 °C sollte während des Gärprozesses nicht überschritten werden (Kaltschmitt 2009). Jede Anlage hat eine eigene spezifische Betriebsweise.

Erfolgt der Stärkeaufschlussprozess unter Druck, wird der Rohstoff durch Steigerung der Temperatur über 100 °C in einem sogenannten Henze-Dämpfer (Druckbehälter) einem Überdruck ausgesetzt (s. Bild 4.14). Die Rohstoffe werden meist ohne vorhergehende Zerkleinerung mit der erforderlichen Menge Wasser in den Dämpfer gefüllt. In einem Zeitraum von ca. 45 min. wird der Dämpfer je nach Rohstoff auf 4 bis 6 bar gebracht und auf diesem Niveau 40 bis 60 min. gehalten.

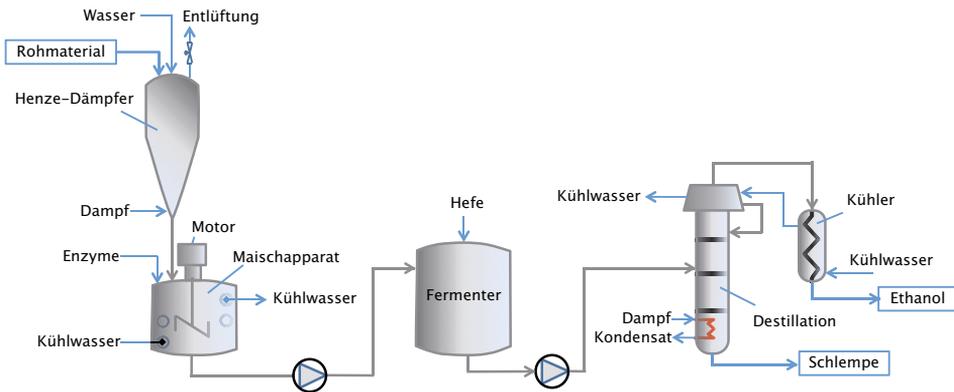


Bild 4.14 Hochdruck-Dämpf-Verfahren (Pieper 1985)

Unter den gegebenen Temperaturen und dem dazugehörigen Druck löst sich die Stärke im Wasser und verkleistert. Bevor die Maische aus dem Dämpfer in den Maischeapparat ausgeblasen wird, wird thermostabile α -Amylase aus *Bacillus licheniformis* zur Verflüssigung der Stärke zugegeben. Das Enzym wird zuvor in geringen Mengen Wasser gelöst.

Bei Getreide bleiben der Zellverband und damit die Form erhalten. Erst beim Ausblasen werden diese durch den plötzlichen Druckabfall und die dabei entstehenden Dampfblasen zerstört, wodurch noch bestehende Stärkekörner freigelegt werden und sofort verkleistern können (Kaltschmitt 2009).

Während des Ausblasprozesses in den Maischeapparat wird die Temperatur auf 90 °C und anschließend im Maischeapparat weiter auf 55 °C gesenkt. Bei dieser Temperatur werden die Verzuckerungsenzyme hinzugegeben und weiter auf 35 °C gekühlt. Nun kann die Hefe zugegeben und anschließend die Maische zur Fermentation in die Gärtanks gepumpt werden.

Dieses Verfahren weist einen hohen Energiebedarf auf, weshalb es weitgehend von drucklosen Verfahren verdrängt wurde. Vorteile des Stärkeaufschlussverfahrens unter Druck sind die hohe Betriebssicherheit, der weitgehende Aufschluss der Stärke und die nahezu „sterile“ Maische (Kaltschmitt 2009).

Eine Verzuckerung lignocellulosehaltiger Substrate kann auf Basis enzymatisch katalysierter oder säurekatalysierter Hydrolyse erfolgen (s. Bild 4.15).

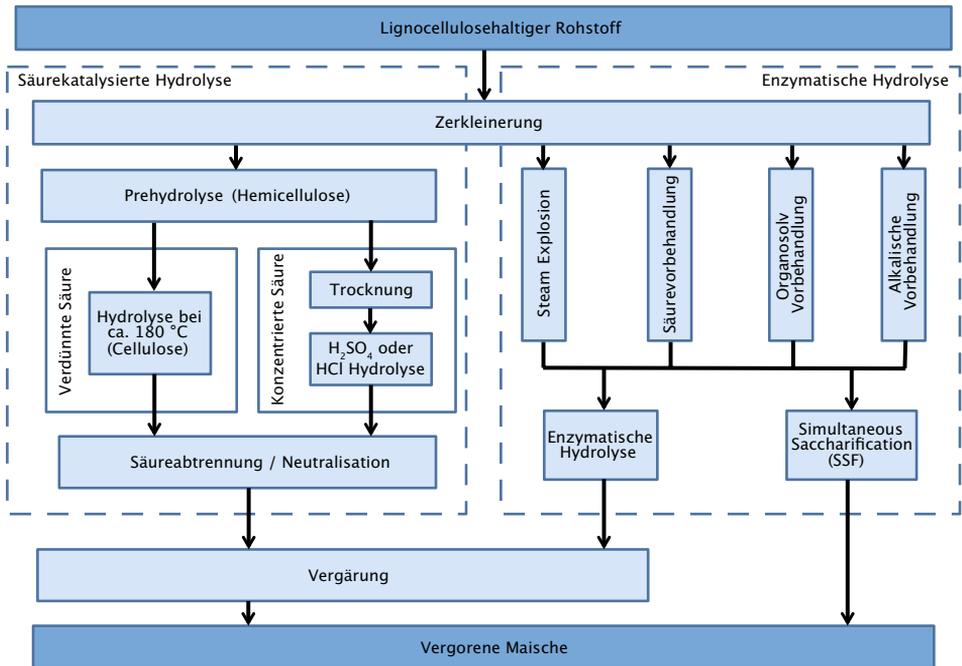


Bild 4.15 Enzym- und säurekatalysierte Verzuckerungsverfahren (nach Kaltschmitt 2009)

In enzymatisch katalysierten Hydrolyse-Verfahren kommen Enzyme zur Anwendung. Lignocellulose ist jedoch gegenüber Enzymen sehr widerstandsfähig. Aus diesem Grund ist eine Vorbehandlung erforderlich. Dafür stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, wie „Steam Explosion“, Alkalivorbereitung, Hydrothermolyse, Behandlung mit organischen Lösungsmitteln, CO_2 -Explosion, Bestrahlung, Behandlung mit Wasserstoffperoxid (H_2O_2), mechanische Zerkleinerung (Mahlen), Säurevorbereitung und/oder eine mikrobiologische Vorbehandlung (Kaltschmitt 2009). Bei diesen Verfahren handelt es sich entweder um den Einsatz von Chemikalien oder die Zuführung thermischer und/oder mechanischer Energie. Das Ziel der Vorbehandlungsstufe ist es, die komplexen Strukturen von Cellulose, Hemicellulose und Lignin aufzuschließen. Den Enzymen wird es dadurch möglich, schneller und tiefer in das Substrat einzudringen.

4.2.2 Alkoholische Gärung (Fermentation)

Bei der alkoholischen Gärung wird bei der mikrobiologischen Umwandlung der Maische unter Zugabe von Hefe Alkohol produziert. Die für den Start des Prozesses eingesetzten Hefen werden in einem separaten Verfahren bereitgestellt. Das Enzym Zynase, das bei entsprechendem Zuckergehalt, pH-Wert und gegebener

Temperatur von den Hefen gebildet wird, ist für die Umwandlung der Glucose in Ethanol und Kohlendioxid verantwortlich. Es sind kontinuierliche und diskontinuierliche Verfahren möglich, die sich in Batch-, Kaskaden- oder kontinuierliche Verfahren aufteilen. Die Verfahren wurden bereits in Kap. 2 erläutert. Auch das Kaskaden-Verfahren ist ein kontinuierliches Verfahren.

Die Produktivität in Batchverfahren liegt bei etwa 2 g Ethanol je Liter Fermentervolumen und Stunde. Dagegen kann die Produktivität in kontinuierlichen Verfahren 30 bis 50 g Ethanol je Liter Fermentervolumen und Stunde betragen (Kosaric 2001). Dies ermöglicht die Verwendung wesentlich kleinerer Fermentervolumina.

Die Ausbeuten sind in Batch-Fermentern mit 92% höher als in kontinuierlichen Verfahren, deren Ausbeuten bei etwa 89% liegen (Dorfler 2007).

Batchverfahren

Ein seit Jahrhunderten eingesetztes Gärverfahren ist das Batchverfahren (s. Bild 4.16). Zunächst wird im Gärbehälter ein Gäransatz aus Maische und Hefe hergestellt. Unter starker Belüftung wird so viel Hefe gezüchtet, dass diese für die Batchvergärung ausreichend ist. Dann kann die restliche süße Maische kontinuierlich in den Gärbehälter hinzugegeben werden, bis dieser gefüllt ist. Die Belüftung wird zu diesem Zeitpunkt beendet, so dass der Gärprozess beginnen kann.

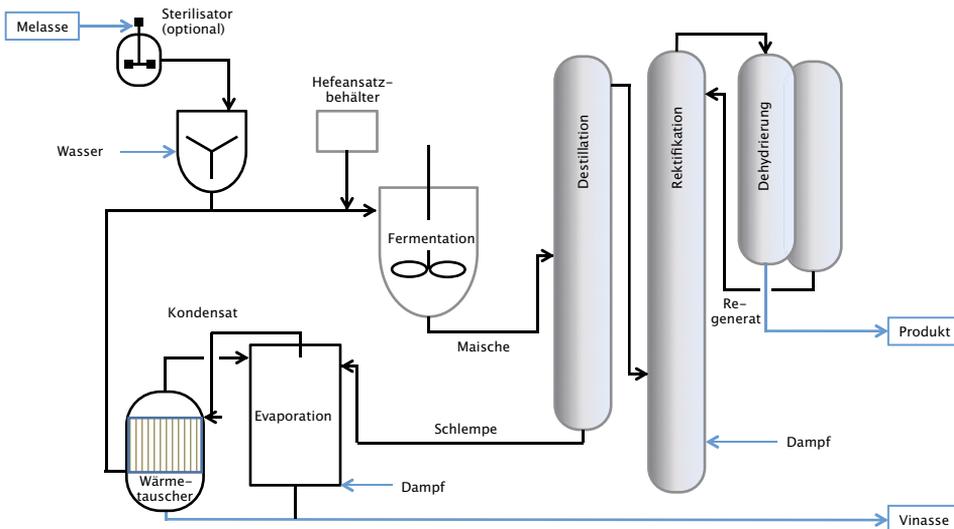


Bild 4.16 Verfahren der Bioethanolherstellung aus Melasse nach dem Batchverfahren (nach Schmitz 2003)

Der Prozess dauert so lange, bis unter anaeroben Bedingungen der Zucker weitestgehend abgebaut ist. Das Verfahren zeichnet sich durch eine stabile Prozessführung

Werden klare Substrate zugeführt, kann die Hefe im letzten Fermenter abgetrennt, gewaschen und vorne wieder eingesetzt werden.

Ein wichtiger Vorteil dieses Verfahrens sind die hohen Ethanolausbeuten und hohen Ethanolgehalte in der Maische (Schmitz 2003). Ist der Ethanolgehalt hoch, ist im Gegenzug der Wasseranteil in der Maische gering. Dies führt zu einem geringeren Energieverbrauch, da bei der Destillation weniger Wärmezufuhr für die Abtrennung des Wassers erforderlich ist. Ansonsten werden Standardapparate eingesetzt, so dass der Aufwand relativ gering ist. Auch bedarf es wenig Arbeitsaufwand beim Betrieb.

Kontinuierliches Verfahren

Bei diesem Verfahren laufen alle Prozesse von der Hefeanzucht über die Maischzugabe und die Ethanolproduktion bis hin zum Abzug der vergorenen Maische gleichzeitig in einem Fermenter ab (s. Bild 4.18). Dabei werden auch die leichteren Hefen ständig mit dem Maischeaustrag in die Destillation aus dem Fermenter entfernt. Dies verringert die Infektionsgefahr. Das Verfahren ist kompakt in der Bauweise und wenig aufwändig im Betrieb. Jedoch ist es aufgrund des höheren anlagentechnischen Aufwandes nur in großtechnischen Anlagen sinnvoll (Kaltschmitt 2009).

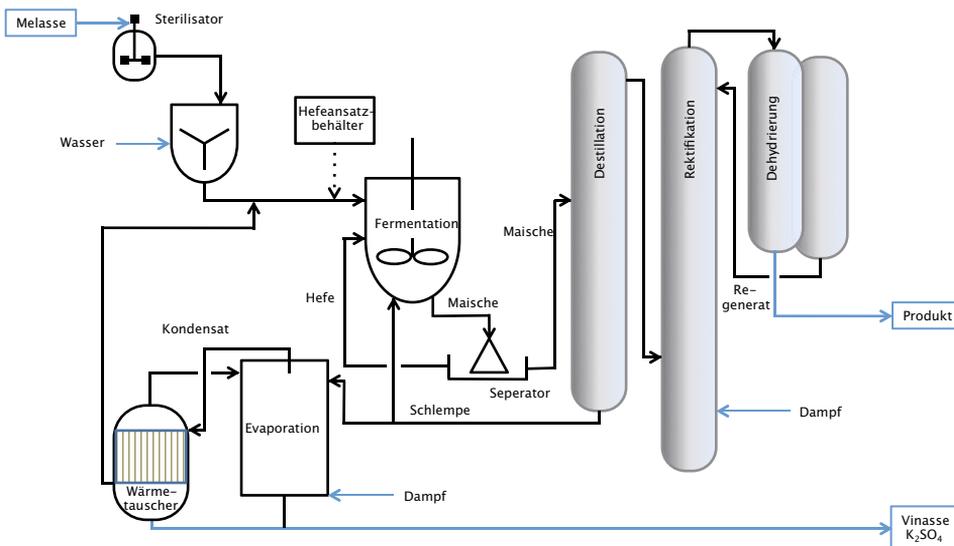


Bild 4.18 Verfahren der Bioethanolherstellung aus Melasse nach dem kontinuierlichen Verfahren (nach Schmitz 2003)