
Die Hefe in der Brauerei

Hefemanagement

Kulturhefe – Hefereinzucht

Hefepropagation im Bierherstellungsprozess

3. überarbeitete Auflage

Prof. Dr. sc. techn. Gerolf Annemüller

Dr. sc. techn. Hans-J. Manger

Dr. Peter Lietz



Im Verlag der VLB Berlin

Die Hefe in der Brauerei

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über dnb.ddb.de abrufbar.

Kontaktadresse der Autoren:

Prof. Dr. sc. techn. Gerolf Annemüller
Buschiner Str. 34 A
12683 Berlin
E-Mail: g.annemueller@t-online.de

Wir danken den Inserenten für die Unterstützung unserer Arbeit

1. Auflage 2004
2. überarbeitete Auflage 2008
3. überarbeitete Auflage 2013

ISBN 978-3-921690-76-5

© VLB Berlin, Seestraße 13, D-13353 Berlin, www.vlb-berlin.org

Alle Rechte, insbesondere die Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten.
Kein Teil des Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form reproduziert werden.

All rights reserved (including those of translation into other languages).
No part of this book may be reproduced in any form.

Herstellung: VLB Berlin, PR- und Verlagsabteilung

Druck: Best Preis Printing, Seefeld

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen	10
Vorwort	12
1. Einleitung und Begriffsbestimmungen	15
2. Zur geschichtlichen Entwicklung der Züchtung von reinen Bierhefen	25
2.1 Die Entdeckung der Hefe als lebender Mikroorganismus	25
2.2 Die Entwicklung der verschiedenen Bierheferassen und ihre Reinzüchtung	38
2.2.1 Die Mikroflora des Bieres	39
- <i>Sacch. cerevisiae</i> Meyen ex Hansen (1883)	42
- Untergärige Bierhefe	43
- Obergärige Bierhefen	46
- <i>Brettanomyces bruxellensis</i>	47
- Bierschädliche Mikroorganismen	48
- <i>Sacch. pastorianus</i> Hansen	49
- <i>Sacch. cerevisiae</i> var. <i>ellipsoideus</i> (Hansen) Stelling-Decker	51
- <i>Sacch. cerevisiae</i> var. <i>diastaticus</i>	52
- <i>Saccharomycodes ludwigii</i>	52
- <i>Schizosacch. pombe</i>	52
- Aerobe „Wilde Hefen“ als Begleitflora	53
- <i>Candida mycoderma</i> (Rees) Lodder et van Rij	54
- <i>Pichia farinosa</i> (Lindner) Hansen	54
- <i>Pichia membranaefaciens</i>	54
- <i>Hansenula anomala</i> (Hansen) H. et P. Sydow	54
2.2.2 Die Geschichte der Hefereinzucht	56
3. Die Notwendigkeit zur Regenerierung des Hefesatzes und die Anforderungen an die Anstellhefe in der Brauerei	69
3.1 Anzeichen für die Degeneration eines Hefesatzes	69
3.2 Mögliche Ursachen für eine Degeneration des Hefesatzes	70
3.3 Stressfaktoren	71
3.4 Zur Notwendigkeit des Hefewechsels	73
3.5 Vorteile eines in einer Propagationsanlage hergestellten Hefesatzes	75
3.6 Anforderungen an eine Anstellhefe	76
4. Wichtige mikrobiologische und biochemische Grundlagen der Bierhefevermehrung und ihre Bedeutung für die Hefereinzucht und Hefepropagation	79
4.1 Die chemische Zusammensetzung der Hefe	79
4.1.1 Der Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Hefetrockensubstanzgehalt	79

Die Hefe in der Brauerei

4.1.2 Die chemische Zusammensetzung der Hefetrockensubstanz	81
4.1.2.1 Molformel und Makroelemente der Hefe	81
4.1.2.2 Rohproteingehalt	81
4.1.2.3 Gesamtkohlenhydrate	84
4.1.2.4 Nucleinsäuren und Nucleotide	88
4.1.2.5 Lipide (Rohfette)	88
4.1.2.6 Porphyrine	92
4.1.2.7 Vitamine und Wachstumsstoffe der Hefe	93
4.1.2.8 Aschebestandteile	94
4.2 Einige für die verfahrenstechnische Auslegung von Hefebearbeitungsanlagen und für technologische Berechnungen ermittelte physikalische Stoffkennwerte der Hefezellen und Hefesuspensionen	97
4.2.1 Größe einer Hefezelle, Zellzahl und Biomassekonzentration	97
4.2.2 Oberfläche der Hefezelle	103
4.2.3 Dichte der Hefezelle	104
4.2.4 Dichte und Trockensubstanzwerte von Hefesuspensionen und Hefeprodukten	105
4.2.5 Rheologische Parameter von Hefesuspensionen	108
4.2.6 Druckverlustberechnung für Hefesuspensionen in Rohrleitungen	120
4.2.7 Wärmephysikalische Kennwerte von Hefeprodukten	122
4.2.8 Oberflächenladung	123
4.2.9 Osmotischer Druck	123
4.2.10 Sedimentationsgeschwindigkeit der Hefe	124
4.2.11 Berechnungsbeispiel für den Einfluss des Feststoffvolumenanteils der Erntehefe auf die mögliche Hefebiergewinnung	139
4.3 Aufbau der Hefezelle und die Funktionen ihrer Organellen	142
4.3.1 Das Cytoplasma (Zellplasma)	143
4.3.2 Zellwand mit Plasmamembran	144
4.3.2.1 Die äußere Zellwand	144
4.3.2.2 Hefeflockung und Flockungstheorien	146
4.3.2.3 Flockungstest	148
4.3.2.4 Sprossnarben	148
4.3.2.5 Protoplasten	149
4.3.2.6 Plasmamembran (Plasmalemma)	149
4.3.3 Zellkern	151
4.3.4 Mitochondrien	151
4.3.5 Vakuolen	151
4.3.6 Endoplasmatische Membranen	153
4.3.7 Ribosomen	153
4.3.8 Speicherstoffe der Zelle	153
4.3.9 Die Mechanismen des Stofftransportes durch die Hefezellwand	154
4.4 Grundlagen der Hefevermehrung und ihre Kinetik	157
4.4.1 Vegetative und geschlechtliche Vermehrung	157
4.4.2 Desoxyribonucleinsäuren und Ribonucleinsäuren - die Träger des genetischen Codes der Hefezelle	160
4.4.3 Die Wachstumskurve von Hefepopulationen in einer Batchkultur und der Zellzyklus bei der vegetativen Vermehrung einer Einzelzelle	168
4.4.4 Vermehrungskinetik der Hefe	171

4.4.5 Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit der Hefevermehrung und Richtwerte für die Generationsdauer in der logarithmischen Wachstumsphase	174
4.4.5.1 Fermentationstemperatur	174
4.4.5.2 Einfluss der Substratkonzentration	175
4.4.5.3 Einfluss der Konzentration der extrazellulären Stoffwechselprodukte Ethanol und Kohlendioxid	178
4.4.5.4 Fermentationsverfahren	181
4.4.5.5 Die Vitalität der Satzhefe	182
4.4.5.6 Die Anstellkonzentration der Stellhefe	183
4.4.5.7 Beeinflussung des Hefestoffwechsels durch weitere physikalisch-chemische Faktoren	183
4.4.5.7.1 Verfügbares Wasser und osmotischer Druck	184
4.4.5.7.2 Statischer Druck und Druckimpuls	184
4.4.5.7.3 Die extra- und intrazelluläre Wasserstoffionenkonzentration (pH-Wert) und ihre Veränderungen	185
4.4.5.7.4 Redoxpotenzial	187
4.4.5.7.5 Oberflächenspannung	187
4.4.5.8 Schlussfolgerungen	187
4.4.6 Berechnungsbeispiele für die Auslegung von Hefepropagationsanlagen unter Verwendung der aufgeführten Richtwerte und Gleichungen	188
4.5 Stoffwechselwege der Hefe und Regulationsmechanismen	192
4.5.1 Energie- und Baustoffwechsel	192
4.5.2 Stoffwechselwege der Hefezelle	199
4.5.3 Regulationsmechanismen im Hefestoffwechsel	210
4.5.4 Die Gärungsnebenprodukte im Stoffwechsel der Bierhefe	215
4.5.4.1 Bukett- und Jungbukettstoffe des Bieres	216
4.5.4.2 Der Schwefelstoffwechsel der Hefe und sein Einfluss auf die Bierqualität	216
4.6 Der Nährstoffbedarf der Hefe <i>Saccharomyces cerevisiae</i> für die Vermehrung	221
4.6.1 Die erforderlichen Kohlenstoff- und Energiequellen	222
4.6.2 Reihenfolge der Zuckerverwertung	223
4.6.3 Die Hefeausbeute in Abhängigkeit vom <i>Crabtree</i> -Effekt und aerober Gärung	224
4.6.4 Der assimilierbare Stickstoffbedarf	225
4.6.5 Der freie α -Aminostickstoffgehalt (FAN) und seine Kontrolle	226
4.6.6 Die Vorteile der assimilierbaren N-Versorgung der Hefe durch Aminosäuren-gemische im Vergleich zur anorganischen Ammoniumionen-Dosage	228
4.6.7 Die Dosage der N-Quelle und der Rohproteingehalt (RP) der Erntehefe	228
4.6.8 Der Mineralstoffbedarf	229
4.6.9 Der Wuchsstoff- bzw. Vitaminbedarf	233
4.6.10 Kalkulation der mit normalen Brauereivollbierwürzen erreichbaren Hefevermehrung ohne Zufütterung von Nährstoffen	237
4.6.11 Anforderungen an die für die Hefevermehrung eingesetzte Bierwürze	242
4.6.11.1 Grundsätzliche Zielstellungen	242
4.6.11.2 Konkrete Anforderungen an die Würzen	242

Die Hefe in der Brauerei

4.6.11.3 Zur Problematik der Belüftung und Sauerstoffanreicherung der Anstellwürze	242
4.6.11.4 Zum erforderlichen mikrobiologischen Status der verwendeten Würzen	244
4.6.11.5 Einflussfaktoren auf den erforderliche Aufwand zur Erreichung der Sterilität	246
4.6.11.6 Über die Sterilisation der Würze	247
4.6.11.7 Vorschläge für die Auslegung der thermischen Behandlung einer Brauereireinzuchtwürze	249
4.6.11.8 Schlussfolgerungen	250
4.6.12 Der Einfluss der Hefevermehrung auf den Extraktschwand	252
4.6.13 Verbesserung des Nährstoffangebotes der Bierwürze durch Zusätze	253
4.7 Die technologischen Grundlagen der Sauerstoffversorgung der Hefe	254
4.7.1 Vorbemerkungen	254
4.7.2 Zu einigen biochemischen Zusammenhängen aus der Sicht des Sauerstoffbedarfes	255
4.7.3 Zum Stand des Wissens über die erforderliche O ₂ -Versorgung bei der Brauereihefevermehrung	256
4.7.4 Sauerstoffbedarf und Sauerstoffaufnahme von <i>Saccharomyces cerevisiae</i> bei höheren Zuckerkonzentrationen	258
4.7.5 Berechnung des erforderlichen Sauerstoff- und Luftertrages bei der Hefevermehrung (Hefeherführung, Hefereinzucht) in Bierwürze	261
4.7.5.1 Modell 1: Berechnung des Gesamtsauerstoff- und Luftbedarfes, bezogen auf den erreichbaren Gesamtheferzuwachs von 1,5 g HTS _Z /I _{AW}	262
4.7.5.2 Modell 2: Berechnung des Hefezuwachses für die Start- und Endphase und Ermittlung der in diesen Phasen maximalen Sauerstoffaufnahme der vorhanden Hefe	262
4.7.5.3 Modell 3: Abschätzung der erforderlichen Belüftungszeit von Hefefermentationen in Brauereiwürze	265
5. Maschinen, Apparate und Anlagen für die Hefereinzucht und Hefepropagation	268
5.1 Hefereinzucht und Hefeherführung als Verfahren	268
5.2 Ausrüstungen für die Hefereinzucht im Labor	271
5.3 Ausrüstungen für die Hefevermehrung im Betriebsmaßstab	273
5.3.1 Allgemeiner Überblick	273
5.3.2 Beispiel für eine Hefepropagationsanlage	273
5.3.3 Propagationsgefäße	274
5.3.4 Sensoren für Hefepropagationsanlagen	277
5.3.5 Anlagen zur Sauerstoffzufuhr	278
5.3.6 Anlagen für die Würzeentkeimung	280
5.3.7 Zubehör	280
5.3.8 Ausgeführte Anlagen	281
5.4 Die verfahrenstechnischen Grundlagen der Sauerstoffversorgung der Hefe	284
5.4.1 Gesetzmäßigkeiten der Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten	284
5.4.2 Die Gaslösung beeinflussende Faktoren	287
5.4.3 Technische Lösungen für die Belüftung	289

5.4.3.1	Gemeinsame Voraussetzungen	289
5.4.3.2	Technische Möglichkeiten für die Verbesserung der Gaslösung	289
5.4.3.3	Begasungsvorrichtungen im Bereich der Backhefeindustrie und der Technischen Mikrobiologie	291
5.4.3.4	Möglichkeiten der Schaumverminderung bei der Begasung	291
5.4.3.5	Der Einsatz der un stetigen bzw. stetigen Querschnittserweiterung zur Gasverteilung	292
5.4.3.6	Beispiele ausgeführter Begasungssysteme bzw. Komponenten	295
5.4.3.7	Schlussfolgerungen	297
5.5	Anforderungen an die Ausrüstung	298
5.5.1	Werkstoffe und Oberflächen	298
5.5.2	Anforderungen an die Gestaltung von Rohrleitungen und Anlagen im Hinblick auf kontaminationsfreies Arbeiten	303
5.5.3	Hinweise zur Rohrleitungsverschaltung, zum Einsatz von Armaturen und zur Probeentnahme	305
5.5.3.1	Allgemeine Hinweise	305
5.5.3.2	Die manuelle Verbindungstechnik	306
5.5.3.3	Die Festverrohrung	308
5.5.3.4	Armaturen für Rohrleitungen und Anlagenelemente	310
5.5.4	Probeentnahmearmaturen	311
5.5.4.1	Allgemeine Hinweise zu Armaturen für die Probeentnahme	311
5.5.4.2	Armaturen für die manuelle und automatische Probeentnahme	312
5.5.4.2.1	Anforderungen an die Probeentnahme	312
5.5.4.2.2	Armaturen für die manuelle Probeentnahme	314
5.5.4.2.3	Armaturen für die automatische Probeentnahme	314
5.5.4.2.4	Dekontamination der Probeentnahmearmaturen	315
5.5.4.3	Gestaltung von Probeentnahmearmaturen	316
5.5.4.3.1	Membranventile	317
	- Ventile mit einer flachen Membranplatte	317
	- Ventile mit Faltenbalgdichtung	318
	- Ventile mit einer verformbaren Dichtung	321
5.5.4.3.2	Doppelsitzventile	324
5.5.4.3.3	Nadelventile	325
5.5.4.3.4	Einfache Ventile und sonstige Probeentnahmeverrichtungen	326
5.5.4.3.5	Probeentnahmehähnchen	328
5.5.4.4	Betätigungsvarianten	329
5.5.4.5	Einbau von Probeentnahmearmaturen	329
5.5.4.6	Automatische Probenahmesysteme	331
5.5.4.7	Wartung der Armaturen	335
5.5.5	Hinweise zum Einsatz von Pumpen	336
5.5.5.1	Allgemeine Hinweise	336
5.5.5.2	Verdrängerpumpen	336
5.5.5.3	Zentrifugalpumpen	338
5.6	Sterilisation der Würze	340
5.7	Anlagenplanung	342
5.8	Reinigung und Desinfektion, Sterilisation	342
5.8.1	CIP-Verfahren	342

5.8.2 Sterilisation, das Dämpfen der Anlage	344
5.9 Mess- und Steuerungstechnik für Hefepropagationsanlagen	345
5.9.1 Messtechnik	345
5.9.2 Steuerungstechnik	345
6. Hefemanagement in der Brauerei	347
6.1 Allgemeines und Begriffsbestimmung	347
6.2 Die Reinzucht und Propagation der Brauereibetriebshefen	347
6.2.1 Die Isolierung von Brauereihefestämmen	348
6.2.2 Zur Stammauswahl eines neuen Hefestammes	349
6.2.3 Die Herführung der Reinzuchtheffen im Brauereilabor	351
6.2.4 Die Pflege, Aufbewahrung und Konservierung der Hefestammkulturen im Labor	354
6.2.5 Die Vermehrung der Reinzuchtheffen im Brauereibetrieb	356
6.2.5.1 Offene Systeme zur Hefeherführung im Brauereibetrieb	356
6.2.5.2 Geschlossene Hefevermehrung im Brauereibetrieb	361
6.2.5.3 Zusammenfassende Schlussfolgerungen über die bei der Hefepropagation anwendbaren Einflussfaktoren	372
6.3 Kontrollverfahren bei der Dosierung der Anstellhefe und Methoden zur Bestimmung der Hefekonzentration	376
6.3.1 Bestimmung der Hefezellkonzentration mit Labormethoden	376
6.3.1.1 Die Zellzahlbestimmung mit der Zählkammer nach <i>Thoma</i>	376
6.3.1.2 Die Zellzahlbestimmung mit Teilchenzählgeräten	380
6.3.1.3 Probleme der Zellzahlbestimmung aus ZKT	382
6.3.2 Die Dosierung der Anstellhefe und ihre Kontrollverfahren	384
6.3.2.1 Dosierung nach Volumen	384
6.3.2.2 Dosierung nach Masse	386
6.3.2.3 Onlinebestimmung der Zellmenge	386
6.3.2.3.1 Dosierung durch Differenz-Trübungsmessung	386
6.3.2.3.2 Dosierung durch Erfassung der Teilchenzahl in der angestellten Würze	388
6.4 Das Anstellen	389
6.4.1 Die Höhe der Hefegabe	389
6.4.2 Der Zeitpunkt und die Form der Hefegabe	391
6.4.3 Technologie der Hefedosage	392
6.4.4 Die Anstelltemperatur	393
6.4.5 Die Zeitdauer des Anstellens und die Würzebelüftung	394
6.4.6 Anstellen mit Reinzucht- oder Propagationshefe	396
6.5 Die Gärführung	397
6.5.1 Temperaturführung	397
6.5.2 Einfluss des Druckes	398
6.5.3 Beeinflussung des Verhältnisses des vergärbaren Restextraktes zur in Schwebel befindlichen Hefekonzentration	399
6.5.4 Einfluss der Bewegung des Gärsubstrates	400
6.5.5 Beschleunigung der Hefeklämung	401
6.6 Die Hefeernte	402
6.6.1 Die klassische Hefeernte	402

6.6.2 Hefeernte aus einem zylindrokonischen Gärtank	402
6.6.3 Die Hefeernte mittels Jungbierseparation	406
6.7 Die Hefebehandlung	408
6.7.1 Kühlung der Hefe	408
6.7.2 Das Sieben der Hefe	408
6.7.3 Das Aufziehen der Hefe	409
6.7.4 Das moderne Aufziehen oder „Vitalisieren“	409
6.7.5 Die Hefewäsche	409
6.8 Die Hefelagerung	410
6.9 Presshefe	411
6.10 Trockenhefe	412
7. Hefebiergewinnung und Verwertungsmöglichkeiten von Hefebier und Überschusshefe	417
7.1 Die Hefebiergewinnung	417
7.2 Sedimentation	417
7.3 Separation	418
7.3.1 Einsatz von Tellerseparatoren für die Hefebiergewinnung	418
7.3.2 Einsatz eines Dekanters zur Hefebiergewinnung	419
7.3.3 Einsatz von Klärseparatoren vor der Filtration	420
7.3.4 Förderung der mittels Separators/Dekanters abgetrennten Hefe	421
7.3.5 Der Einsatz von Jungbier-Separatoren	421
7.4 Hefepresse	422
7.5 Membran-Trennverfahren	423
7.5.1 Crossflow-Mikrofiltration	423
7.5.2 Restbiergewinnung nach Alfa Laval	429
7.6 Einschätzung der Varianten	431
7.7 Qualitätseigenschaften und Aufarbeitung von Hefebieren	432
7.8 Verwertung der Überschusshefe	435
7.8.1 Bierhefe als Futtermittel	436
7.8.2 Bierhefe zur Maische	436
7.8.3 Bierhefefraktionen als pharmazeutische Produkte und Nahrungszusatzstoffe	437
7.8.4 Hefeextrakte	437
7.8.5 Lagerung der Überschusshefe	438
7.9 Überschusshefe und Abwasserbelastung	439
Index	441
Literatur- und Quellenverzeichnis	459