

# **Gärung und Reifung des Bieres**

**Grundlagen  
Technologie  
Anlagentechnik**

3. überarbeitete Auflage 2020

Prof. Dr. sc. techn. Gerolf Annemüller

Dr. sc. techn. Hans-J. Manger



Im Verlag der VLB Berlin

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek  
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über:  
portal.dnb.de abrufbar.

**Kontaktadresse:**

Dr. Hans-J. Manger  
Pflaumenallee 14  
15234 Frankfurt (Oder)  
Email: hans.manger@t-online.de

3. aktualisierte Auflage 2020

ISBN 978-3-921690-94-9

© VLB Berlin, Seestraße 13, D-13353 Berlin, [www.vlb-berlin.org](http://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.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen in Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürfen.

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: BestPreisPrinting, Gilching

## Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	25
Vorwort	31
1. Einführung, Stellung und Bedeutung der Gärung und Reifung des Bieres im Prozess der Bierherstellung, Begriffe, Einflussfaktoren	33
2. Die Brauereihefen	37
3. Stoffumwandlungen und Veränderungen während der Gärung und Reifung des Bieres	74
4. Nebenprodukte der Gärung und Reifung und ihre Bedeutung für die Qualität des Bieres	114
5. Wichtige technologische und technische Einflussfaktoren zur Steuerung der Gärung und Reifung	159
6. Klassische Verfahren der Gärung und Reifung	212
7. Verkürzte Gär- und Reifungsverfahren in klassischen Gefäßsystemen	253
8. Optimierung der diskontinuierlichen Gärung durch die Anwendung von zylindrokonischen Tanks (ZKT)	263
9. Halbkontinuierliche Gärungs- und Reifungsverfahren	398
10. Kontinuierliche Verfahren zur Gärung und Reifung von Bier	400
11. Obergärige Biere und Besonderheiten der Obergärung	432
12. Spezialbiere - ihre Besonderheiten bei der Gärung und Reifung	451
13. High-gravity-brewing - Vergärung höher konzentrierter Würzen	502
14. Technologische Maßnahmen im Prozess der Gärung und Reifung zur Gewährleistung der Endproduktqualität	517
15. Anforderungen an das fertig vergorene, ausgereifte, geklärte und vorstabilisierte Unfiltrat	577

16. Anlagen für die Wasserentgasung	589
17. Separation und Separatoren	599
18. Berechnung des Schwandes und der Kapazität von Gär- und Reifungsabteilungen	625
19. Hefebiergewinnung und Verwertungsmöglichkeiten von Hefebier und Überschusshefe	638
20. Reinigung und Desinfektion im Gär- und Lagerkeller	661
21. Hinweise für die Gestaltung von Anlagen und Anforderungen an die Anlagen	693
22. Hinweise zum Einsatz von Pumpen	754
23. Werkstoffe und Oberflächen	760
24. CO <sub>2</sub> -Rückgewinnungsanlagen	771
25. Druckluftversorgung	791
26. Arbeits- und Gesundheitsschutz, technische Sicherheit	791
27. Hinweise zur Nachhaltigkeit der Biergärung und -reifung	798
Anhang	800
Stichwortverzeichnis	807
Quellennachweise	837

# Inhaltsverzeichnis, detailliert

Häufig verwendete Abkürzungen und Formelzeichen	25
Vorwort	31
1. Einführung, Stellung und Bedeutung der Gärung und Reifung des Bieres im Prozess der Bierherstellung, Begriffe, Einflussfaktoren	33
1.1 Teilprozesse der Biergärung und -reifung	33
1.2 Ablaufende Qualitätsprozesse bei der Gärung und Reifung des Bieres	34
1.3 Klassische Gärung und Reifung und moderne Großtanktechnologie	34
1.4 Einflussfaktoren und Auswirkungen der Verfahrensführung	36
2. Die Brauereihefen	37
2.1 Vorbemerkungen	37
2.2 Ober- und untergärrige Hefen	38
2.3 Zur Auswahl eines untergärrigen Hefestammes	39
2.4 Anzeichen für die Degeneration eines Hefesatzes	41
2.5 Mögliche Ursachen für eine Degeneration des Hefesatzes	42
2.6 Physiologischer Zustand der Hefe und die Notwendigkeit ihrer Regenerierung	43
2.7 Die Anforderungen an die Anstellhefe in der Brauerei	44
2.8 Flockung und Sedimentation	46
2.8.1 Bruchbildung der Hefe und ihre Einflussfaktoren	46
2.8.2 Hefezellgrößen und Sedimentationsgeschwindigkeit der Hefe	47
2.9 Einflussfaktoren auf die Geschwindigkeit der Hefevermehrung und Richtwerte für die Generationsdauer in der logarithmischen Wachstumsphase	48
2.9.1 Fermentationstemperatur	48
2.9.2 Einfluss der Substratkonzentration	49
2.9.3 Einfluss der Konzentration der extrazellulären Stoffwechselprodukte Ethanol und Kohlendioxid	49
2.9.4 Einfluss des Fermentationsverfahren	50
2.9.5 Die Vitalität der Satzhefe	51
2.9.6 Die Anstellkonzentration der Stellhefe	51
2.9.7 Beeinflussung des Hefestoffwechsels durch weitere physikalisch-chemische Faktoren	51
2.10 Biomasse-, Produkt- und Energiebilanz der Hefe bei der Bierherstellung	52
2.11 Stoffwechselwege der Hefezelle und bei der Biergärung zu beachtende Regulationsmechanismen	54
2.11.1 Stoffwechselwege	54
2.11.2 Pentosephosphat-Weg (Horecker-Weg, PP-Weg)	57

2.11.3 Anaerobe Zuckerassimilation zur Realisierung anabolischer Synthesereaktionen	57
2.11.4 Anaplerotische Reaktionen bei der oxidativen Zuckerassimilation	57
2.11.5 Regulationsmechanismen	58
2.12 Hefefernte	60
2.12.1 Die klassische Hefefernte	60
2.12.2 Hefefernte aus einem zylindrokonischen Gärtank	61
2.12.3 Die Hefefernte mittels Jungbierseparation	64
2.13 Hefebehandlung	65
2.13.1 Kühlung der Hefe	65
2.13.2 Das Sieben der Hefe	65
2.13.3 Das Aufziehen der Hefe	66
2.13.4 Das moderne Aufziehen oder „Vitalisieren“	66
2.13.5 Die Hefewäsche	67
2.14 Die Hefelagerung	67
2.15 Einige Hinweise zur Hefepropagation und deren Belüftung	68
2.16 Einige Hinweise zur Verwendung von Trockenhefe	70
3. Stoffumwandlungen und Veränderungen während der Gärung und Reifung des Bieres	74
3.1 Allgemeines zur Einheit von Gärung und Reifung	74
3.2 Vergärung, Vergärungsgrad, Geschwindigkeit der Vergärung	75
3.2.1 Stoffumsätze im Prozess der Gärung	75
3.2.2 Reihenfolge der Zuckerverwertung	76
3.2.3 Vergärungsgrade und andere Kontrollwerte für die Vergärung	77
3.2.4 Die Geschwindigkeit der Vergärung	79
3.3 Veränderungen der Stickstoffsubstanzen und die Bedeutung für die Hefevermehrung und die Bierqualität	82
3.3.1 Der freie $\alpha$ -Aminostickstoffgehalt (FAN) und seine Kontrolle	83
3.3.2 Veränderung des Gesamtstickstoffgehaltes	84
3.3.3 Ausscheidungs- und Exkretionsvorgänge der Hefe	84
3.3.4 Proteinase A und ihre Bedeutung für die Bierschaumhaltbarkeit	86
3.3.5 Nucleobasen und Nucleoside	87
3.4 Pufferung und pH-Wert	87
3.4.1 Die Veränderungen des pH-Wertes bei Gärung und Reifung	87
3.4.2 Die Ursachen für den pH-Wert-Abfall	88
3.4.3 Bedeutung des Bier-pH-Wertes für die Bierqualität	89
3.4.4 Pufferstoffe und die Veränderungen des Pufferungsvermögens	89
3.5 Redoxverhältnisse des Bieres und ihre Bedeutung für die Alterung des Biergeschmacks	90
3.5.1 Oxidation und Alterung des Bieres	90
3.5.2 rH- und ITT-Werte	92
3.5.3 Die Reduktone des Bieres und ihre unterschiedlichen Wirkungen	93
3.5.4 Einige Hinweise zur Abschätzung der voraussichtlichen Geschmacksstabilität	94

3.5.5 Einige Leitsubstanzen für die Ursachen von Geschmacks- veränderungen	95
3.6 Die Farbe des Bieres	96
3.6.1 Die normale Farbaufhellung des Bieres bei der Gärung und Reifung	96
3.6.2 Die gezielte Zufärbung mit Röstmalzbier	96
3.7 Die Bitterstoffe und Gerbstoffe des Bieres	97
3.8 CO <sub>2</sub> -Gehalt und Spundung des Bieres	99
3.8.1 Höhe des CO <sub>2</sub> -Gehaltes im fertigen, gelagerten Bier (Unfiltrat)	99
3.8.2 Einflussfaktoren auf die CO <sub>2</sub> -Lösung in Getränken	100
3.8.3 Spunden und erforderlicher Spundungsdruck	103
3.8.4 Die Nachcarbonisierung	105
3.9 Klärung und kolloidale Stabilisierung des Bieres	110
3.10 Die Thermodynamik der Biergärung	111
3.11 Weitere Veränderungen des Bieres im Verlauf der Gärung und Reifung	113
4. Nebenprodukte der Gärung und Reifung und ihre Bedeutung für die Qualität des Bieres	114
4.1 Einführung	114
4.2 Biochemismus der vicinalen Diketone im Prozess der Bierherstellung und seine Bedeutung für die Steuerung des Reifungsprozesses	117
4.2.1 Bedeutung der vicinalen Diketone	118
4.2.2 Die drei Stufen des Metabolismus der vicinalen Diketone im Prozess der Bierherstellung	118
4.2.2.1 Erste Stufe: Bildung der Vorstufen der vicinalen Diketone durch die Hefezellen	118
4.2.2.2 Zweite Stufe: Umwandlung der Vorstufen in ihre vicinalen Diketone außerhalb der Hefezelle	123
4.2.2.3 Dritte Stufe: Die Reduktion der vicinalen Diketone durch die Hefezellen	125
4.2.3 Konzentrationsverlauf der Acetohydroxysäuren und der vicinalen Diketone bei der klassischen Haupt- und Nachgärung	128
4.2.4 Schlussfolgerungen für die Prozessführung ohne enzymatische Fremdzusätze	128
4.2.5 Beschleunigung des Abbaues der vicinalen Diketone mithilfe bakterieller Enzympräparate	131
4.3 Aldehyde	133
4.3.1 Bildungswege	133
4.3.2 Technologische Einflussfaktoren	133
4.3.3 Richtwerte	134
4.4 Schwefelhaltige Verbindungen	135
4.4.1 Übersicht über die Veränderungen der Schwefelverbindungen im Bier	135
4.4.2 Bedeutung der Schwefelverbindungen für die Qualität des Bieres	136
4.4.3 Schwefelwasserstoff	138
4.4.4 Thiole	139
4.4.5 Dimethylsulfid (DMS)	140

4.4.6 Schwefeldioxid	141
4.4.6.1 Herkunft und Bildungswege des SO <sub>2</sub> im Bier	141
4.4.6.2 SO <sub>2</sub> -Richtwerte	142
4.4.6.3 Technologische Einflussfaktoren auf die SO <sub>2</sub> -Bildung	142
4.4.6.4 Zusammenfassung der Optimierungsvorschläge zur SO <sub>2</sub> -Einstellung im Bier	144
4.5 Höhere Alkohole	144
4.5.1 Bildungswege	144
4.5.2 Technologische Beeinflussung	146
4.5.3 Technologieempfehlung - Ergebnisse aus großtechnischen Versuchen	148
4.5.4 Richtwerte	149
4.6 Ester	150
4.6.1 Bildungswege	150
4.6.2 Technologische Einflussfaktoren	151
4.6.3 Richtwerte	153
4.7 Glycerin	154
4.7.1 Bildungswege	154
4.7.2 Bedeutung des Glycerins für die Hefezelle	154
4.7.3 Technologische Beeinflussung	154
4.7.4 Richtwerte	155
4.8 Organische Säuren	155
4.8.1 Bildungswege	155
4.8.2 Technologische Einflussfaktoren	156
4.8.3 Oxalsäure	156
4.8.4 Richtwerte für organische Säuren im Bier	157
4.9 Umwandlung der Malz- und Würzearomastoffe durch die Hefe	158
4.10 Veränderungen der aus dem Getreide stammenden Phenolcarbon- säuren durch obergärende Hefen bei der Weizenbierherstellung	158
5. Wichtige technologische und technische Einflussfaktoren zur Steuerung der Gärung und Reifung	159
5.1 Qualität der Anstellwürzen	159
5.1.1 Sauerstoffgehalt	159
5.1.2 Gehalt an assimilierbaren Stickstoffverbindungen	160
5.1.3 Gehalt an vergärbarem Extrakt	163
5.1.4 Mineralstoffgehalt	165
5.1.5 Gehalt an Vitaminen und Wuchsstoffen	167
5.1.6 Biologischer Zustand und Infektionsgrad	168
5.1.7 pH-Wert der Anstellwürzen	171
5.1.8 Trubgehalt	171
5.1.9 Gehalt an nicht vergärbaren Kohlenhydraten	173
5.1.10 Gehalt an Bitterstoffen und anderen Stoffgruppen	176
5.1.10.1 Gehalt an Bitterstoffen in der Würze	176
5.1.10.2 Polyphenole und Anthocyanogene	177
5.1.10.3 Lipide	177



5.1.10.4	Reduzierende Substanzen der Würze	179
5.1.11	Zusammenfassung der technologischen Orientierungswerte für Anstellwürzen	179
5.2	Die Qualität der verwendeten Betriebshefe	179
5.2.1	Der Betriebshefestamm	179
5.2.2	Der betriebliche Hefesatz	180
5.3	Technologische Möglichkeiten zur Variation der Prozessführung	183
5.3.1	Anstellen der Würze	183
5.3.1.1	Die Höhe der Hefegabe	184
5.3.1.2	Der Zeitpunkt und die Art und Weise der Hefegabe	188
5.3.1.3	Varianten der Hefedosage	190
5.3.1.4	Technologie der Hefedosage	190
5.3.1.5	Die Anstelltemperatur	192
5.3.1.6	Die Zeitdauer des Anstellens und die Würzebelüftung	193
5.3.1.7	Technologische Schlussfolgerungen für den Anstellvorgang	197
5.3.2	Temperatur-Druck-Führung im Prozess der Gärung und Reifung	197
5.3.2.1	Auswirkungen einer Temperaturänderung bei der Biergärung	197
5.3.2.2	Auswirkungen einer Druckerhöhung	199
5.3.2.3	Die Regelgrößen Temperatur und Druck in großtechnischen Versuchen	199
5.3.2.4	Technologische Schlussfolgerungen zur Temperatur-Druck-Führung	200
5.3.3	Das Verhältnis zwischen vergärbarem Restextrakt und der noch in Schwebel befindlichen Hefekonzentration im Gär- und Reifungsprozess	201
5.3.4	Bewegung des Bieres im Gär- und Reifungsprozess	204
5.3.5	Beschleunigung der Hefeklämung	206
5.4	Einfluss der verwendeten Apparate auf den Gär- und Reifungsprozess	206
6.	Klassische Verfahren der Gärung und Reifung	212
6.1	Geschichte und Bedeutung der klassischen Gär- und Reifungsverfahren	212
6.2	Durchführung der klassischen Gärung und Reifung	212
6.2.1	Anstellen	212
6.2.2	Hauptgärung	214
6.2.3	Schlauchen des Jungbieres und Hefeerte	218
6.2.4	Nachgärung, Reifung und Klärung des Bieres	219
6.2.5	Einige Probleme bei der Durchführung der klassischen Gärung und Reifung und mögliche Bierfehler	222
6.3	Apparate und Anlagen für die klassische Gärung und Reifung	229
6.3.1	Wichtige Geräte und Gestaltung der Räume	229
6.3.1.1	Gärkeller-Raumgestaltung	229
6.3.1.2	Lagerkeller-Raumgestaltung	229
6.3.1.3	Einschätzung der klassischen Apparate und Anlagen	230
6.3.2	Gärbottiche	231
6.3.2.1	Charakteristik der Gärbottiche	231
6.3.2.2	Werkstoffe	231

6.3.2.3	Reinigung und Desinfektion	238
6.3.2.4	Bottichkühlung	238
6.3.3	Kombitanks	239
6.3.4	Lagerbehälter	242
6.3.4.1	Charakteristik der klassischen Metall-Lagertanks	242
6.3.4.2	Der Lagertank aus Aluminium oder CrNi-Stahl	242
6.3.4.3	Emaillierte Lagerbehälter	243
6.3.4.4	Lagerbehälter aus Beton	244
6.3.4.5	Zubehör für Lagerbehälter	245
6.3.4.6	Lagerfass	245
6.3.4.7	Erforderliche Armaturen und Zubehör für den klassischen Lagerbehälter	247
6.3.5	Ergänzungs- und Zusatzeinrichtungen für den Bereich Gärung und Reifung	250
6.3.5.1	Verschneidbock	250
6.3.5.2	Jungbierseparation	251
6.3.5.3	Maschinen und Anlagen für die Restbiergewinnung aus Hefe	251
6.3.5.4	Beleuchtung	252
7.	Verkürzte Gär- und Reifungsverfahren in klassischen Gefäßsystemen	253
7.1	Drucklose Hauptgärung mit Aufkräusen des geschlauchten Jungbieres im Lagerkeller	253
7.2	Drucklose Hauptgärung mit Warmreifung und kalter Lagerung	254
7.3	Druckgärverfahren	255
7.3.1	Druckgärverfahren nach <i>Lietz</i>	257
7.3.2	Druckgärverfahren nach <i>Wellhoener</i>	258
7.4	Rühhgärung	259
8.	Optimierung der diskontinuierlichen Gärung durch die Anwendung von zylindrokonischen Tanks (ZKT)	263
8.1	Entwicklungsstadien des zylindrokonischen Tanks (ZKT)	263
8.2	<i>Nathan</i> -Verfahren als Vorläufer aller diskontinuierlichen beschleunigten Gär- und Reifungsverfahren und als Vorläufer der zylindrokonischen Großtanktechnologie	266
8.3	Gärung und Reifung in drucklosen zylindrischen Großtanks	268
8.4	Der zylindrokonische Behälter für die Biergärung und -reifung aus technologischer Sicht	270
8.4.1	Allgemeine Charakteristik und Einsatzmöglichkeit	270
8.4.2	Die zwei unterschiedlich kühlbaren ZKT-Typen	271
8.4.2.1	Vergleich der Kühl- und der davon abhängigen Verfahrensvarianten der ZKT	273
8.4.2.2	Temperaturverteilung im ZKT mit Mantelkühlung beim Tiefkühlen	275
8.4.2.3	Inhomogenität durch ober-schichtige „Warmzone“ bei Überfüllung	276
8.4.2.4	Die Anstellphase beim ZKT	278
8.4.2.5	Parallele Betriebsversuche mit beiden ZKT-Gärtanktypen	288

8.4.2.6 Beispiele für den variablen Einsatz des ZKT mit externer Kühlung	290
8.4.3 Untersuchungen über das Homogenitätsverhalten der ZKT-Inhalte im Prozess der Biergärung und -reifung	292
8.4.3.1 Untersuchungen zur Temperaturhomogenität	294
8.4.3.2 Homogenität des Tankinhaltes im Extraktgehalt, pH-Wert und im Gehalt an Gärungsnebenprodukten	295
8.4.3.3 Homogenitätsuntersuchungen zum CO <sub>2</sub> -Gehalt	295
8.4.3.4 Homogenitätsuntersuchungen in der Hefekonzentration	299
8.4.3.5 Orientierende Versuche zur Ermittlung der Verteilungsgeschwindigkeit von Zusätzen und der erforderlichen Homogenisierungszeit	303
8.4.3.6 Strömung im ZKT	304
8.4.4 Gär- und Reifungsverfahren in zylindrokonuschen Großtanks	304
8.4.4.1 Variante 1: Mäßig warme Gärung und Reifung im Eintankverfahren mit dem ZKT mit externer Kühlung und unter $p_{\bar{u}} < 1,0$ bar	304
8.4.4.2 Variante 2: Beschleunigte und nicht beschleunigte Zweitankverfahren im ZKT, zum Teil kombiniert mit einer klassischen Lagerung	308
8.4.4.3 Variante 3: Beschleunigte Gärung und Reifung als Eintankverfahren im ZKT mit Mantelkühlung	311
8.4.5 Zur Problematik des kombinierten Produktionsbetriebes	312
8.4.6 Mögliche weitere Verfahrensvarianten	312
8.5 Der zylindrokonusche Behälter	318
8.5.1 Aufbau und technische Gestaltung	318
8.5.1.1 Gestaltung eines ZKT	318
8.5.1.2 Werkstoffe und Werkstoffoberflächen	319
8.5.1.3 Tankgeometrie	319
8.5.1.4 Konusgestaltung	320
8.5.1.5 ZKT-Transport	320
8.5.2 Aufstellungsvarianten für ZKT	322
8.5.2.1 Allgemeine Hinweise	322
8.5.2.2 Varianten der Auflagergestaltung bei ZKT	322
8.5.2.3 Gestaltung der Bedienungsfläche	325
8.5.2.4 ZKT-Montage auf der Baustelle	332
8.5.3 ZKT-Zubehör	332
8.5.3.1 Laufpodest auf den ZKT	332
8.5.3.2 Leerrohre in der Wärmedämmung des ZKT	333
8.5.3.3 Tankdom-Verkleidung	333
8.5.3.4 Begleitheizung	333
8.5.3.5 Mannloch/Schwenkkonus	333
8.5.4 Sensoren für ZKT	335
8.5.5 Inspektionsmöglichkeiten bei ZKT	336
8.6 Armaturen, Rohrleitungen und andere Ergänzungen	337
8.6.1 Allgemeine Hinweise	337

8.6.2	Armaturen	337
8.6.2.1	Auslaufarmatur	337
8.6.2.2	Probeentnahmearmaturen	338
8.6.2.3	Reinigungsvorrichtung	339
8.6.2.4	Sicherheitsarmaturen	339
8.6.2.5	Armaturen zum Schutz gegen Unterdruck/Vakuum	341
8.6.2.6	Tankdomarmatur	342
8.6.3	Rohrleitungen am ZKT-Kopf	343
8.6.4	Rohrleitungen	344
8.6.5	Ergänzungs- und Zusatzeinrichtungen für die Gärung und Reifung	346
8.7	Ergänzungen für die ZKT-Optimierung	347
8.7.1	Das System Poseidon der Firma Krones zur Optimierung der Gärung und Reifung unter Verwendung von ZKT	347
8.7.2	Vorschlag von GEA Brewery Systems	351
8.7.3	Das Iso-Mix-System der Fa. Alfa Laval	353
8.8	Kühlung der ZKT	354
8.8.1	Abzuführende Wärmemengen	354
8.8.1.1	Gärungsenthalpie	354
8.8.1.2	Flüssigkeitswärme	354
8.8.1.3	Energieverluste	354
8.8.2	Grundsätzliche Varianten zur Wärmeabführung	355
8.8.3	Vorteile und Nachteile der ZKT-Kühlvarianten	357
8.8.3.1.	ZKT mit Umluftkühlung/ Berieselungskühlung	357
8.8.3.2.	ZKT mit Mantelkühlung	357
8.8.3.3.	ZKT mit externem Kühlkreislauf	359
8.8.3.4.	ZKT ohne Kühlmöglichkeit	364
8.8.4	Die direkte Verdampfungskühlung	365
8.8.5	Die indirekte Kühlung	366
8.8.6	Konuskühlung	368
8.8.7	Maximale Dichte des Bieres und Gefrierpunkt	370
8.8.8	Die Vor- und Nachteile von Mehrtankverfahren	371
8.8.9	Schlussfolgerungen	371
8.9	Wärmedämmung der ZKT	372
8.9.1	Einleitung	372
8.9.2	Grundsätzliche Überlegungen zur Aufstellung von Gär- und Lagerbehältern	372
8.8.2.1	Technologische Anforderungen oder Ansprüche	373
8.8.2.2	Aufstellung in Freibauweise oder mit Umhausung	373
8.8.2.3	Sonstige Festlegungen	374
8.8.2.4	Überlegung zur Installation von Gär- und Lagerbehältern	374
8.9.3	Modellrechnung	377
8.9.4	Dämmwerkstoffe und -systeme für Gär- und Lagerbehälter	383
8.9.4.1	Untersuchte Dämmstoffe	383
8.9.4.2	Einschätzung der Dämmstoffe bezüglich ihrer Eignung	383
8.9.4.3	Anforderungen an Dämmsysteme für Gär- und Lagerbehälter	385

8.9.4.4	Elemente einer ökologischen Bilanzierung	386
8.9.4.5	Dampfbremse und mechanischer Abschluss der Wärmedämmung	386
8.9.4.6	Korrosionsschutz für ZKT	387
8.9.5	Empfehlungen und Erfahrungen	387
8.9.5.1	ZKT-Wärmedämmung, optimale Gestaltung	387
8.9.5.2	Rohrleitungen	388
8.9.5.3	Gewährleistungen	391
8.9.6	Normen, Richtlinien und AGI-Arbeitsblätter	391
8.9.6.1	Angaben zur Baustelle	391
8.9.6.2	Normen, AGI-Arbeitsblätter, Richtlinien	392
8.10	Reinigung und Desinfektion	397
9.	Halbkontinuierliche Gärungs- und Reifungsverfahren	398
9.1	Draufflassverfahren nach <i>Schalk</i>	398
9.2	Semikontinuierliches Gärverfahren von <i>Hlaváček</i>	398
9.3	Sonstige halbkontinuierliche Verfahren	399
9.4	Beurteilung der halbkontinuierlichen Verfahren	399
10.	Kontinuierliche Verfahren zur Gärung und Reifung von Bier	400
10.1	Geschichtliche Einordnung und Bewertung	400
10.2	Allgemeine Charakteristika der kontinuierlichen Gärung und Reifung	402
10.2.1	Der Unterschied zwischen semikontinuierlicher und vollkontinuierlicher Gärung	402
10.2.2	Das Fließgleichgewicht	402
10.2.3	Formeln und Begriffe für den kontinuierlichen Gärprozess	403
10.2.4	Varianten des kontinuierlichen Gärprozesses	403
10.3	Einige klein- und großtechnisch ausgeführte Gär- und Reifungssysteme für Bier	408
10.3.1	Gär- und Reifungsverfahren mit einem Hefe-Pfropfenfermenter	408
10.3.2	Die separate Vergärung von reinen Saccharose- oder verzuckerten Stärkelösungen	409
10.3.3	Kontinuierliche Gärung und Reifung mit einer Gärkolonne	410
10.3.4	Konti-Gärungs- und -Reifungsanlage - Verfahren Gotha-	412
10.3.5	Kontinuierliches Gär- und Reifungsverfahren nach <i>Wellhoener</i>	414
10.3.6	Gär- und Reifungsverfahren nach <i>Coutts</i>	415
10.3.7	Der APV-Gärturm	416
10.3.8	Gärreaktoren mit immobilisierter Hefe	420
10.4	Allgemeine Voraussetzungen für eine kontinuierliche Gärung und Reifung des Bieres	423
10.5	Der Versuch eines Ausblickes zum Einsatz kontinuierlicher Gärverfahren	423
10.6	Dimensionierungsentwurf einer kontinuierlichen Gäranlage für die Bierproduktion, Modellbeispiel	426
10.6.1.	Modellvorstellung	426
10.6.2	Propagationsfermenter V1	427
10.6.3	Berechnung der erforderlichen kontinuierlichen Hefedosage in die Anstellwürze	428

10.6.4 Kalkulation des erforderlichen Sauerstoff- bzw. Luftbedarfes für den erwünschten Hefezuwachs	428
10.6.5 Berechnung der für die zusätzliche Belüftung erforderlichen Luftmenge	428
10.6.6 Gärfermenter V2	429
10.6.7 Reifungsfermenter V3	429
10.6.8 Abkühl- und Klärbehälter V4	430
10.6.9 Gesamtbehältervolumen	430
10.6.10 Erforderliche Hefeabsetzzeit	430
10.6.11 Abschätzung des Hefeabschlämmvolumens	431
11. Obergärige Biere und Besonderheiten der Obergärung	432
11.1 Bedeutung der obergärigen Biere in Deutschland	432
11.2 Besonderheiten der Obergärung	432
11.2.1 Verwendete Bierhefe	432
11.2.2 Gärführung	433
11.2.3 Hefeernte	435
11.2.4 Nachgärung und Konditionierung beim bayerischen Weizenbier und den obergärigen Bieren des Rheinlandes	435
11.2.5 Probleme bei der Durchführung der Obergärung	436
11.3 Zu einigen Besonderheiten der obergärigen bayerischen Weizenbiere und ihren Herstellungsvarianten	437
11.3.1 Aromatypen der bayrischen Weizenbiere	438
11.3.2 Möglichkeiten zur Beeinflussung des Aromas	440
11.3.2.1 Zur Verstärkung des Weizenbieraromas, besonders des Phenolgeschmackes	440
11.3.2.2 Der Einfluss der Gärgefäßform auf die Aromabildung	441
11.3.2.3 Zur Verstärkung des Bananenaromas	442
11.3.3 Verfahrensvarianten bei der Gärung und Reifung von obergärigem Weizenbier	442
11.3.4 Nachbehandlung des auf Flaschen abgefüllten Weißbieres	443
11.3.5 Zur Herstellung einer relativ konstanten Trübung im abgefüllten Hefeweizen	444
11.3.6 Weizenbierherstellung im ZKG	446
11.3.7 Hefelagerung und Hefemanagement bei obergäriger Hefe	446
11.3.8 Zur Herstellung von Kristallweizen	447
11.3.9 Einige Forderungen und gesetzliche Bestimmungen in Deutschland bei der Herstellung von obergärigen Weizenbieren	447
11.3.10 Einige technische Voraussetzungen zur Herstellung von Weizenbieren	447
11.4 Zur Herstellung von niederrheinischem Altbier	448
11.5 Zur Herstellung von Kölsch	448
11.6 Das Berliner Weißbier	448

12. Spezialbiere - ihre Besonderheiten bei der Gärung und Reifung	451
12.1 Kohlenhydratreduzierte Biere (früher sog. „Diätbiere“)	451
12.1.1 Anforderungen und Charakteristik der ehemaligen „Diätbiere“	452
12.1.2 Verfahrensvarianten zur Herstellung von kohlenhydratreduziertem Bier (früher „Diätbier“) im Prozess der Gärung und Reifung	453
12.1.2.1 Zugabe von Malzmehl	454
12.1.2.2 Zugabe eines Malzauszuges	454
12.1.2.3 Zugabe von konzentriertem Malzauszug	455
12.1.2.4 Zugabe mikrobieller Glucoamylasepräparate außerhalb des Deutschen Reinheitsgebotes	463
12.1.2.5 Einsatz genmanipulierter, Dextrinase bildender Hefen	464
12.1.3 Messwerte von klassisch hergestellten ehem. deutschen Diätvollbieren	464
12.1.4 Zum Problem Ethanolkonzentration und Teilentalkoholisierung	464
12.2 Dry-Biere	467
12.2.1 Charakteristik der Dry-Biere	467
12.2.2 Herstellung im Prozess der Gärung und Reifung	467
12.3 Ethanolfreie Biere	468
12.3.1 Anforderungen und Charakteristik	468
12.3.2 Angewandte Methoden zur Ethanolreduktion	470
12.3.3 Verfahren zur Unterdrückung der Ethanolbildung im Prozess der Gärung und Reifung	471
12.3.3.1 Einsatz einer Maltose nicht vergärenden Hefe	471
12.3.3.2 Kälte-Kontaktverfahren	471
12.3.3.3 Gestoppte Gärung	472
12.3.3.4 Gärung mit immobilisierten Hefen	472
12.3.4 Thermische Trennverfahren	472
12.3.4.1 Allgemeine Hinweise	472
12.3.4.2 Entfernung durch Dünnschichtverdampfung	473
12.3.4.3 Ergebnisse und Einsatzkriterien	477
12.3.4.4 Entfernung mittels Zentrifugal-Verdampfer	478
12.3.4.5 Stripping-Verfahren	479
12.3.5 Membrantrennverfahren	480
12.3.5.1 Allgemeine Hinweise	480
12.3.5.2 Dialyse-Verfahren	480
12.3.5.3 Umkehrosmose-Verfahren	482
12.3.6 Sonstige Verfahren	483
12.3.7 Ermittelte Analysenwerte ethanolfreier bzw. -armer Biere	486
12.4 Leicht- bzw. Light-Biere - kalorienreduzierte Biere	486
12.4.1 Anforderungen und Charakteristik	486
12.4.2 Herstellung im Prozess der Gärung und Reifung	487
12.4.3 Zum Problem des ethanol- und gleichermaßen kalorienreduzierten Bieres	487
12.4.4 Ermittelte Analysenwerte von Leicht- und Schankbieren	489

12.5 Malzbier - Nährbier - Karameltrunk - Malztrunk	490
12.5.1 Anforderung und Charakteristik	490
12.5.2 Herstellung im Prozess der Gärung und Reifung	491
12.5.3 Messwerte von Malzgetränken	493
12.6 Biermischgetränke	493
12.6.1 Anforderungen und Charakteristik	493
12.6.2 Herstellung im Prozess der Gärung und Reifung	494
12.6.3 Messwerte von Biermischgetränken	494
12.7 Einige Bierspezialitäten	494
12.7.1 Eisbier bzw. Ice-Bier	494
12.7.2 Kräusenbier, Kellerbier und Zwickelbier	495
12.7.3 Belgische Spezialbiere	497
12.7.4 Hopfenaromatische und kalt gebitterte Biere	497
12.7.5 Weitere Sonderbiere und fermentierte Malzgetränke	499
12.7.5.1 Spezialbiere aus Spezialmalzen	499
12.7.5.2 Fermentationsgetränke auf Basis von Malzwürzen	500
12.7.5.3 Kwas	500
13. High-gravity-brewing - Vergärung höher konzentrierter Würzen	502
13.1 Wirtschaftliche Bedeutung des High-gravity-brewing und Herstellung konzentrierter Würzen	502
13.2 Zur Problematik der Herstellung von High-gravity-Würzen aus der Sicht der Gärung	504
13.3 Zum Hefemanagement beim High-gravity-brewing (HGB)	505
13.4 Die Vergärung konzentrierter Würzen	506
13.5 Zur erhöhten Ethylacetatkonzentration	508
13.6 Rückverdünnung und Konditionierung	510
13.6.1 Zeitpunkt der Rückverdünnung	510
13.6.2 Allgemeine Anforderungen an das Verschnittwasser	510
13.6.3 Zur Abschätzung der Gushing-Gefahr durch Calciumoxalat	511
13.6.4 Varianten der Verschnittwasserentkeimung	512
13.6.5 Die Entgasung des Verschnittwassers	512
13.7 Schema der kompletten Blendinganlage	513
13.8 Einige Hinweise zur überschlägigen Verdünnungsrechnung ohne Berücksichtigung der Bierdichte	514
13.9 Einige Hinweise zur Wirtschaftlichkeit des High-gravity-brewing	515
13.10 Zusammenfassende Aussagen zum High-gravity-brewing	516
14. Technologische Maßnahmen im Prozess der Gärung und Reifung zur Gewährleistung der Endproduktqualität	517
14.1 Allgemeine Anforderungen	517
14.2 Die Klärung des Bieres	517
14.2.1 Die Trübung als Maß für die erreichte Klärung und kolloidale Stabilität	517
14.2.1.1 Nicht biologische Trübungskomponenten im Bier	518
14.2.1.2 Nicht biologische Trübungsarten im Bier	522



14.2.1.3	Definitionen zur nicht biologischen Haltbarkeit und kolloidalen Stabilität	524
14.2.1.4	Über die Größenordnung der Kältetrübung	524
14.2.1.5	Zur Trübungsmessung	524
14.2.1.6	Richtwerte des Alkohol-Kälte-Tests nach Chapon zur Einschätzung der Klärung von ausgereiften Unfiltraten und zur Abschätzung der kolloidalen Haltbarkeit von Filtraten	525
14.2.1.7	Messung der Trübungsstabilität im filtrierten Bier durch den Forciertest	526
14.2.1.8	Analytische Richtwerte für die kolloidale Stabilität (Haltbarkeit) des filtrierten und stabilisierten Bieres	526
14.2.2	Die natürliche Klärung des Unfiltrates	527
14.3	Die Konzentration der Kulturhefen in der Klärphase und ihre Bedeutung für die Filtrierbarkeit	529
14.4	Klärhilfen in der Kaltlagerphase	531
14.4.1	Historische Verfahrensweisen zur Förderung der Bierklärung	531
14.4.2	Der Einsatz von Kieselol zur Unterstützung der natürlichen Klärung in der Neuzeit	535
14.4.2.1	Die Unterschiede von Kieselol und Kieselgel und ihre Wirkungsweisen	535
14.4.2.2	Kurzcharakteristik der Kieselsäuresole (Silica Sole)	537
14.4.2.3	Anwendungsempfehlungen für den Kieselsoleinsatz	537
14.4.2.4	Anwendungsergebnisse	537
14.5	Verfahren zur Vorstabilisierung von Unfiltraten im Prozess der Gärung und Reifung	540
14.5.1	Einführung	540
14.5.2	Der Einsatz proteolytischer Enzyme	540
14.5.3	Der Einsatz von Kieselgelen	541
14.5.3.1	Zur Charakterisierung von Kieselgelen	541
14.5.3.2	Wirkungsweise der Kieselgele	542
14.5.3.3	Der Einsatz von Kieselgel in der Kaltlagerphase	542
14.5.4	Der Einsatz von Bentoniten	544
14.5.4.1	Kurzcharakteristik von Bentoniten	544
14.5.4.2	Zur Wirksamkeit von Bentoniten als Adsorptionsmittel zur Bierstabilisierung	544
14.5.4.3	Anwendungsergebnisse	545
14.5.5	Der Einsatz von Tannin	546
14.5.5.1	Kurzcharakteristik von Tannin als Eiweißfällungsmittel und Dosageempfehlungen	546
14.5.5.2	Anwendungsergebnisse	547
14.5.6	Der Einsatz von Polyvinylpolypyrrolidon (PVPP)	548
14.5.6.1	Zur Geschichte des PVPP	548
14.5.6.2	Herstellungs- und Einsatzvorschrift von Polyvinylpolypyrrolidon für die Bierstabilisierung	548
14.5.6.3	Zur Wirkungsweise des PVPP	550
14.5.6.4	Dosageempfehlungen	551
14.5.6.5	Einfluss der PVPP-Stabilisierung auf die Bierqualität	551

14.5.6.6	Erforderliche Kontaktzeit	552
14.5.6.7	Anwendungsergebnisse und Wirksamkeit in Abhängigkeit von der Dosage	554
14.5.7	Zusammenfassung zu den Varianten der Vorstabilisierung	554
14.5.8	Überblick über die wichtigsten technologischen Maßnahmen zur Vermeidung von kolloidalen Trübungen im Bier	555
14.6	Vermeidung von Oxidationsprozessen im Prozess der Gärung und Reifung	556
14.7	Die Filtrierbarkeit des Unfiltrates	558
14.7.1	Die Filtrierbarkeit des Unfiltrates - ein wirtschaftlicher Faktor	558
14.7.2	Die Verursacher von Filtrationsproblemen	559
14.7.2.1	Hochmolekulare $\beta$ -Glucane	559
14.7.2.2	Höher molekulare und nicht jodnormale $\alpha$ -Glucane	563
14.7.2.3	Hochmolekulare Eiweiß-Gerbstoffverbindungen, der Resttrub- und Feststoffgehalt	564
14.7.3	Die Bewertung der Filtrierbarkeit eines Unfiltrates	568
14.7.3.1	Die Bestimmung der Filtrierbarkeit	569
14.7.3.2	Ursachenforschung bei Filtrationsproblemen	570
14.7.3.3	Die drei Säulen des Filtrations-Checks	570
14.7.4	Technologische Einflussfaktoren und Zusammenhänge bei der Überprüfung und Beeinflussung der Filtrierbarkeit	571
14.7.4.1	Positive Einflussfaktoren auf die Filtrierbarkeit und kolloidale Stabilität	572
14.7.4.2	Lösungsansätze zur Verbesserung der Filtrierbarkeit bei Filtrationsproblemen	573
14.7.4.3	Der pH-Wert des unfiltrierten Bieres und sein Einfluss auf die Filtrierbarkeit	573
15.	Anforderungen an das fertig vergorene, ausgereifte, geklärte und vorstabilisierte Unfiltrat	577
15.1	Allgemeine Anforderungen	577
15.2	Anforderungen an die Stammwürze	577
15.3	Anforderungen und Charakteristika eines ausgereiften Bieres	578
15.4	Der Kohlendioxidgehalt	578
15.5	Die mikrobiologischen Anforderungen und die Anforderungen an die Hefeklämung	579
15.5.1	Fremdhefen	580
15.5.2	Einige Hinweise zu den mikrobiologischen Analyseverfahren	580
15.5.3	Die Konzentration der betrieblichen Kulturhefe im fertigen Unfiltrat	581
15.6	Die sensorischen Anforderungen an ein Unfiltrat	581
15.7	Die Anforderungen an ein Unfiltrat, die die Haltbarkeit und Stabilität des Fertigbieres beeinflussen	583
15.8	Anforderungen an die Schaumhaltbarkeit eines Unfiltrates	584
15.8.1	Visuelle und analytische Qualitätsrichtwerte	584
15.8.2	Ursachen für Qualitätsmängel	584
15.9	Die Bierfarbe	587

15.10	Checkliste für die Prozesskontrolle bei der Gärung und Reifung des Bieres	587
15.11	Unfiltratbereitstellung für die Filtration	587
16.	Anlagen für die Wasserentgasung	589
16.1	Allgemeine Hinweise	589
16.2	Varianten der Entgasung	590
16.2.1	Vakuum-Entgasung	590
16.2.2	Druck-Entgasung	591
16.2.3	Thermische Entgasung	593
16.2.4	Entgasung mittels Membranen	594
16.2.5	Katalytische Entgasung	597
16.2.6	Chemische Sauerstoffentfernung	598
16.2.7	Stapelung des entgasten Wassers	598
17.	Separation und Separatoren	599
17.1	Allgemeiner Überblick	599
17.2	Grundlagen der Zentrifugation/Separation	600
17.2.1	Grundfälle der Zentrifugation/Separation	600
17.2.2	Gesetzmäßigkeiten der Separation	601
17.2.3	Volumenstrom der Separatortrommel	604
17.3	Wichtige Baugruppen des Separators	606
17.3.1	Maschinengestell	606
17.3.2	Antriebsmotor	606
17.3.3	Kupplung	608
17.3.4	Getriebe	608
17.3.5	Trommelwelle/Spindellagerung	610
17.3.6	Trommel	612
17.3.7	Flüssigkeits-Zu- und Ablauf	614
17.3.8	Separatorenhaube	615
17.3.9	Aufstellungsbedingungen und Zubehör	616
17.4	Feststoffaustrag	616
17.4.1	Trommeln mit beweglichem Schleuderraumboden	617
17.4.2	Trommeln mit Ringkolben	620
17.4.3	Trommeln mit Kolbenschieber	622
17.4.4	Messung des Feststoff-Füllungsgrades in der Trommel	623
17.5	CIP-Reinigung	624
18.	Berechnung des Schwandes und der Kapazität von Gär- und Reifungsabteilungen	625
18.1	Definitionen, Bedeutung und geschichtliche Einordnung	625
18.1.1	Schwand	625
18.1.2	Kapazitätsermittlung	625
18.2	Schwandzahlen und Schwandberechnungen	626
18.2.1	Volumenschwand	627
18.2.1.1	Nutzvolumen der Gär- und Lagergefäße	629

18.2.1.2 Gärkellerschwand	630
18.2.1.3 Lagerkellerschwand	630
18.2.2 Extraktschwand	630
18.3 Die Kapazitäts- und Kostenberechnung für Anlagen der Gärungs- und Getränkeindustrie	631
18.3.1 Allgemeine Bemerkungen	631
18.3.2 Berechnung der Produktionskapazität für die Gärung und Reifung	632
18.3.2.1 Prozess- und Belegungsdauer	632
18.3.2.2 Angaben zum Saisonausstoß	632
18.3.2.3 Jährliche Produktionskapazität eines klassischen Gärkellers	632
18.3.2.4 Produktionskapazität eines klassischen Lagerkellers	633
18.3.2.5 Produktionskapazität der Gärung und Reifung in einer ZKT-Abteilung	634
18.3.2.6 Zur Nutzung von Formeln aus der Literatur	634
18.3.3 Die systematische Berechnung der Kapazität	635
18.3.3.1 Arbeitszeitfonds	635
18.3.3.2 Sortiment und Behältergröße	635
18.3.3.3 Belegzeit	636
18.3.3.4 Entleerungszeit	636
18.3.3.5 Monatlicher Spitzenbedarf	636
18.3.3.6 Bestimmung der Kapazität	636
18.3.3.7 Hilfsmittel für die Kapazitätsbestimmung	637
18.3.4 Die Berechnung der Investitions- und Betriebskosten	637
19. Hefebiergewinnung und Verwertungsmöglichkeiten von Hefebier und Überschusshefe	638
19.1 Die Hefebiergewinnung	638
19.2 Sedimentation	638
19.3 Separation	639
19.3.1 Einsatz von selbstentleerenden Tellerseparatoren für die Hefebiergewinnung	639
19.3.2 Einsatz eines Dekanters zur Hefebiergewinnung	640
19.3.3 Förderung der mittels Separators/Dekanters abgetrennten Hefe	641
19.3.4 Einsatz von Klärseparatoren vor der Filtration	641
19.3.5 Nutzung von Jungbier-Separatoren	642
19.4 Hefepresse	643
19.5 Membran-Trennverfahren	644
19.5.1 Crossflow-Mikrofiltration	644
19.5.2 Restbiergewinnung nach Alfa Laval	650
19.6 Einschätzung der Varianten	653
19.7 Qualitätseigenschaften und Aufarbeitung von Hefebieren	654
19.8 Verwertung der Überschusshefe	657
19.8.1 Bierhefe als Futtermittel	657
19.8.2 Bierhefe zur Maische	657
19.8.3 Sonstige Verwendungen	658

19.8.4 Lagerung der Überschusshefe	659
19.9 Überschusshefe und Abwasserbelastung	659
20. Reinigung und Desinfektion im Gär- und Lagerkeller	661
20.1 Geschichtliche Entwicklung	661
20.2 Begriffe und Stand der Technik	661
20.3 Wichtige Parameter der Reinigung und Desinfektion	662
20.3.1 Temperatur	662
20.3.2 Konzentration	664
20.3.3 Oberflächenspannung	664
20.3.4 Die Fließgeschwindigkeit	665
20.3.5 Der Rieselfilm	666
20.4 Anforderungen an Reinigungs- und Desinfektionsmittel	667
20.5 Reinigungs- und Desinfektionsmedien	668
20.6 CIP-Anlagen	672
20.6.1 Wesentliche Komponenten einer CIP-Station	672
20.6.2 Varianten für den Betrieb einer CIP-Station	672
20.6.3 Ansatz und Kontrolle der R/D-Medien	674
20.6.4 Die Trennung von Medien bei CIP-Anlagen	674
20.6.5 Beispiele für CIP-Anlagen	679
20.7 Reinigungsvorrichtungen für die Behälterreinigung	679
20.8 Hinweise zur Gestaltung und zum Betrieb von CIP-Stationen - Voraussetzungen für die automatische Reinigung und Desinfektion	682
20.8.1 Allgemeine Hinweise	682
20.8.2 Heißreinigung	684
20.8.3 Mikrobiologie	684
20.8.4 Empfehlungen für die Anlagenplanung	685
20.8.5 Reinigungssysteme für die verlorene Reinigung	686
20.8.6 Anforderungen an den Vorlaufbehälter	686
20.8.7 Minimierung der Medienvermischung	686
20.8.8 Rückförderung der CIP-Medien bei der Behälterreinigung	688
20.9 Voraussetzungen für optimale CIP-Systeme	689
20.10 Hinweise zur Chemikalienlagerung	690
20.11 Möglichkeiten der Kostensenkung bei der R/D	691
20.12 Arbeitsschutz und Unfallverhütung	691
21. Hinweise für die Gestaltung von Anlagen und Anforderungen an die Anlagen	693
21.1 Allgemeine Hinweise	693
21.2 Voraussetzungen für die Automation moderner Anlagen	693
21.3 Anforderungen an die Gestaltung von Rohrleitungen und Anlagen im Hinblick auf kontaminationsfreie Arbeiten	694
21.4 Ausschluss von Produktvermischung	696
21.4.1 Schwenkbogen	696
21.4.2 Leckage-Armaturenkombination	697
21.4.3 Doppelsitzventil	697

21.5 Hinweise für die Gestaltung von Rohrleitungen	699
21.5.1 Allgemeine Hinweise	699
21.5.2 Rohrleitungsverbindungen	699
21.5.3 Verlegung von Rohrleitungen und die Gestaltung von Rohrleitungs- halterungen, Wärmedehnungen	703
21.5.4 Die Fließgeschwindigkeit in Rohrleitungen, Druckverluste	707
21.5.5 Maßnahmen gegen Flüssigkeitsschläge und Schwingungen	712
21.5.6 Entlüftung der Rohrleitungen, Sauerstoffentfernung	712
21.5.7 Gestaltung von Wärmedämmungen bei Rohrleitungen	713
21.5.8 Gestaltung von Rohrausläufen	714
21.5.9 Sicherung der Rohrleitungen gegen Frost und Verstopfungen	714
21.5.10 Toträume in Rohrleitungen	715
21.5.11 Dampfleitungen	716
21.5.12 Einbau von Sensoren zur Onlinemessung von Prozessgrößen	716
21.6 Hinweise zur Gestaltung und Ausführung von Wärme- und Kälte­dämmungen	717
21.6.1 Allgemeine Hinweise	717
21.6.2 Vermeidung von Wasserdampfdiffusion und Schwitzwasserbildung	718
21.7 Hinweise zur Rohrleitungsverschaltung, zum Einsatz von Armaturen und zur Probeentnahme	719
21.7.1 Allgemeine Hinweise	719
21.7.2 Die manuelle Verbindungstechnik mittels Passstück oder Schwenkbogen	720
21.7.3 Schlauchverbindung	721
21.7.4 Die Festverrohrung	726
21.8 Armaturen für Rohrleitungen und Anlagenelemente	726
21.9 Rohrleitungszubehör	730
21.10 Probeentnahmearmaturen	731
21.11 Hinweise zum Einsatz und zur Gestaltung von MSR-Stellen und von automatischen Steuerungen	740
21.11.1 Allgemeine Hinweise	740
21.11.2 Anforderungen an die Messunsicherheit der verwendeten Messtechnik	740
21.11.3 Messwertauswertung	741
21.11.4 Anforderungen des Einbauortes und der Reinigung/Desinfektion	742
21.11.5 Anforderungen der Betriebssicherheit und Anlagensicherheit	744
21.11.6 Anforderungen der Wartung und Instandhaltung	744
21.11.7 Anforderungen an automatische Steuerungen	745
21.12 Wartung und Instandhaltung	749
21.12.1 Definitionen zur Instandhaltung	749
21.12.2 Instandhaltung	750
21.12.3 Voraussetzungen für die Instandhaltung	752
21.12.4 Schmierstoffversorgung	752
21.12.5 Hinweise für die Berücksichtigung der Wartung und Instand- haltung während der Planungsphase	753

22. Hinweise zum Einsatz von Pumpen	754
22.1 Allgemeine Hinweise	754
22.2 Verdrängerpumpen	754
22.3 Zentrifugalpumpen	756
22.4 Scherkräfte	759
23. Werkstoffe und Oberflächen	760
23.1 Metallische Werkstoffe	760
23.2 Kunststoffe	765
23.3 Oberflächenzustand	766
23.4 Dichtungswerkstoffe	767
23.4.1 Unterscheidungsmöglichkeiten für Elastomere	767
23.4.2 Hinweise zur Beständigkeit der Dichtungswerkstoffe	768
23.4.3 Schmierstoffe für Dichtungen	769
23.4.4 Form der Dichtungen	769
23.4.5 Haltbarkeit von Dichtungen	770
24. CO <sub>2</sub> -Rückgewinnungsanlagen	771
24.1 Allgemeiner Überblick	771
24.2 Konzeptionen für den Bau und Betrieb von CO <sub>2</sub> -Rückgewinnungsanlagen	771
24.3 Rohgasgewinnung	773
24.4 Zur Bestimmung der gewinnbaren CO <sub>2</sub> -Menge	774
24.4.1 Welche Parameter bestimmen die gewinnbare CO <sub>2</sub> -Menge	774
24.4.2 Möglichkeiten zur Senkung von Verlusten bei der CO <sub>2</sub> -Rohgas- erfassung	776
24.4.3 Der Zusammenhang zwischen CO <sub>2</sub> -Rohgaskonzentration, Abgas- konzentration und CO <sub>2</sub> -Ausbeute	777
24.4.4 Möglichkeiten zur Senkung von Verlusten bei der CO <sub>2</sub> -Rück- gewinnung	777
24.5 Möglichkeiten zur Senkung des CO <sub>2</sub> -Eigenbedarfs	778
24.6 Die Ermittlung der täglich gewinnbaren CO <sub>2</sub> -Menge	778
24.7 Grundlagen für die Planung der Anlagengröße der CO <sub>2</sub> -Gewinnungs- anlage	785
24.8 Qualitätsanforderungen an Kohlendioxid	786
24.8.1 Qualitätsanforderungen an die Kohlensäure	786
24.8.2 Diskussion der Qualitätsforderungen aus der Sicht der Anwender in der Brauindustrie	786
24.8.3 Sauerstoffgehalt	788
24.8.4 Ölgehalt	788
24.8.5 Keimgehalt des CO <sub>2</sub>	790
24.8.6 Sonstige Beimengungen in der Gärungskohlensäure	790
25. Druckluftversorgung	791
26. Arbeits- und Gesundheitsschutz, technische Sicherheit	791
26.1 Allgemeine Hinweise	791
26.2 Gesetzliche Grundlagen zum Unfallschutz und zur technischen Sicherheit	792

26.3 Wichtige Dokumente zur Anlagenplanung, zum Unfallschutz und zum Gesundheitsschutz	792
26.3.1 Europäisches Recht	792
26.3.2 Nationale gesetzliche Grundlagen	793
26.4 Die gewerblichen Berufsgenossenschaften	794
26.5 Wichtige Informationsquellen zum Unfallschutz und der technischen Sicherheit	795
26.6 Sicherung der Anlage gegen unzulässige Drücke	796
26.6.1 Sicherung der Anlagen gegen unzulässigen Überdruck	796
26.6.2 Sicherung der Anlage gegen unzulässigen Unterdruck	796
26.7 Sonstige Literaturhinweise	797
27. Hinweise zur Nachhaltigkeit der Biergärung und -reifung	798
Anhang: Physikalisch-technische Messgrößen und ihre Umrechnung	800
Stichwortverzeichnis	807
Quellennachweis	837



# **Gärung und Reifung des Bieres**

**Grundlagen  
Technologie  
Anlagentechnik**

3. überarbeitete Auflage 2020

Prof. Dr. sc. techn. Gerolf Annemüller

Dr. sc. techn. Hans-J. Manger



Im Verlag der VLB Berlin

## 4. Nebenprodukte der Gärung und Reifung und ihre Bedeutung für die Qualität des Bieres

### 4.1 Einführung

Während der alkoholischen Gärung entstehen durch den Stoffwechsel der Bierhefen eine Vielzahl von Nebenprodukten unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung, wie vicinale Diketone, Aldehyde, höhere Alkohole, Ester, organische Säuren, Schwefelverbindungen u. a., die das Aroma und damit die sensorischen Qualität eines Bieres wesentlich beeinflussen (siehe Übersicht in Tabelle 27).

*Tabelle 27 Die wichtigsten Aromakomponenten des Bieres und ihre Herkunft*

Herkunft und Bildung	Aromagruppe	Wesentliche Komponenten
Aminosäurestoffwechsel der Hefe oder Kontamination	Vicinale Diketone	Diacetyl, Pentandion
Aminosäurestoffwechsel der Hefe	Höhere Alkohole	Isoamylalkohole, Isobutanol
Energiestoffwechsel der Hefe	Ester	Ethylacetat, Isoamylacetat
Fettsäurestoffwechsel der Hefe, Biologische Säuerung u. Gärungsstoffwechsel der Hefe	Organische Säuren	Capronsäure, Caprylsäure Milchsäure
Schwefelstoffwechsel der Hefe oder Kontamination Eintrag durch Malz	Schwefelverbindungen	H <sub>2</sub> S, Mercaptane Dimethylsulfid
Eintrag durch Malz + Stoffwechsel der Hefe Eintrag durch Wasser	Phenole	4-Vinylguajacol Chlor-Phenole
Zwischenprodukt der alkoholischen Gärung Oxidationsprozesse, verursacht durch Alterung, thermische Belastung, Licht	Carbonyle	Acetaldehyd  Trans-2-Nonenal
Hopfen	Hopfenöle	Linalool, Myrcen

Die Bildungswege dieser Stoffwechselprodukte sind, bedingt durch die Komplexität des Hefestoffwechsels, in ihrer Gesamtheit nicht darzustellen (s.a. Abbildung 4 in Kapitel 2.11). Bisher wurden über 400 Aromaverbindungen, die durch die Hefen gebildet werden, in alkoholischen Getränken nachgewiesen. Man unterteilt die Nebenprodukte in:

- Jungbierbukettstoffe (Aldehyde, vicinale Diketone, Schwefelverbindungen). Sie verleihen dem Bier einen unreinen, jungen, unreifen, unharmonischen Geschmack und Geruch und beeinflussen bei höheren Konzentrationen die Bierqualität negativ.

- Bukettstoffe (höhere Alkohole, Ester, organische Säuren). Sie bestimmen das Aroma des Bieres, und ihr Vorhandensein ist in bestimmten Konzentrationsbereichen Voraussetzung für ein Qualitätsbier.

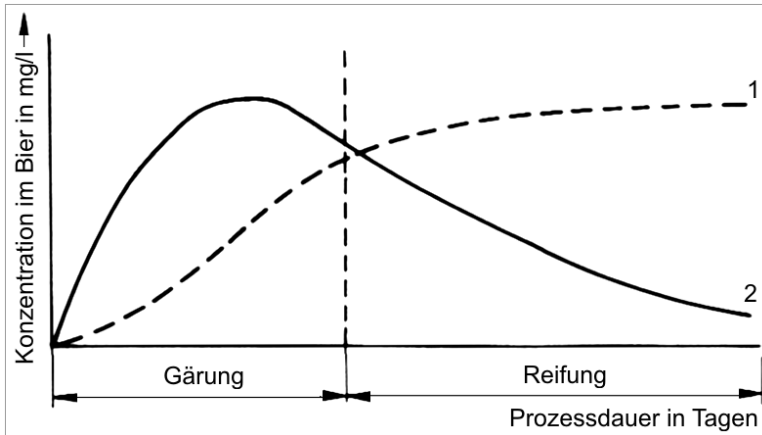


Abbildung 16 Verallgemeinerter Konzentrationsverlauf von Nebenprodukten während der Gärung und Reifung von Bier  
 1 Bukettstoffe 2 Jungbierbukettstoffe

Beide Stoffgruppen unterscheiden sich deutlich in ihrem Konzentrationsverlauf während der Gärung und Reifung des Bieres (Abbildung 16, Abbildung 17). Während die Jungbierbukettstoffe auf biochemischem Wege in weniger gefährliche Nebenprodukte umgewandelt bzw. aus dem Bier entfernt werden können, sind einmal gebildete Bukettstoffe durch normale technologische Maßnahmen aus dem Bier nicht mehr entfernbar. Ein Ziel der Gärung und Reifung besteht darin, die Konzentration an Jungbierbukettstoffen soweit als möglich im Bier zu verringern und die Bukettstoffe in den gewünschten Konzentrationsbereichen anzureichern. Einige Richtwerte für diese Nebenprodukte im fertigen Bier werden in Tabelle 28 aufgeführt.

Die Festlegung von geschmacklichen Richt- und Schwellenwerten bereitet bei vielen Substanzen Schwierigkeiten, da das Ergebnis ihrer Bestimmung in reinen wässrigen Lösungen meist nicht mit dem Geschmacks- oder Geruchseindruck, den sie dem Bier geben, identisch ist. Wechselwirkungen zwischen Aromaträgern können z. B. zu gegenseitigen Verstärkungs- oder Abschwächungseffekten führen. So wird z. B. für untergärrige Biere ein Bukettstoffverhältnis von höheren Alkoholen zu Estern = 3...4 zu 1 angestrebt. Eine Vergrößerung dieses Verhältnisses durch einen Anstieg der Konzentration der höheren Alkohole im Bier führt zu einem „trockneren“ und weniger aromatischen Biercharakter.

Auch die Hopfenaromakomponenten können durch aromatische Gärungsnebenprodukte in ihrem Aromaeindruck abgeschwächt oder auch gefördert werden, wie Hanke [79] konkret nachweisen konnte (siehe Tabelle 29).

Die Beeinflussung dieses Bukettstoffverhältnisses ist durch unterschiedliche technologische Maßnahmen möglich. Der Gehalt an Estern im Bier wird dabei stärker durch die Würzequalität und der Gehalt an höheren Alkoholen dagegen stärker durch die Prozessführung beeinflusst.

## Gärung und Reifung des Bieres

Da weiterhin eine gezielte Steuerung aller für das Bieraroma verantwortlichen Substanzen im Prozess der Gärung und Reifung unmöglich ist, erfolgt die Ausrichtung der Technologie in den einzelnen Prozessstufen auf der Grundlage des derzeitigen Erkenntnisstandes anhand von Leitsubstanzen, deren wichtigste für den Reifungsprozess des Bieres die vicinalen Diketone und ihre Vorstufen sind. Verallgemeinert lässt sich sagen, dass alle Maßnahmen, die bei der Gärung zu einem überzogenen Kohlenhydrat- und Aminosäurenabbau und zu einer übersteigerten Hefevermehrung führen, eine erhöhte intrazelluläre Bildung von Stoffwechselprodukten und eine verstärkte Ausscheidung dieser sensorisch und diätetisch weniger erwünschten Nebenprodukte der alkoholischen Gärung verursachen. Nachfolgend können nur die wichtigsten Nebenproduktgruppen auszugsweise behandelt werden.

**Tabelle 28** Ausgewählte Gärungsnebenprodukte der Biergärung und ihre Richtwerte für untergärige Vollbiere (nach [100], [101])

	Richtwert in ppm	Geschmacks- schwellenwert in ppm	Bildungswege
<b>Bukettstoffe</b>			
2-Methylbutanol-1	10...15	15	1. Ehrlich-Weg mit den Stufen: ○ Desaminierung der Aminosäure, ○ Decarboxylierung der $\alpha$ -Ketosäure u. Reduktion des gebildeten Aldehyds zum höheren Alkohol
3-Methylbutanol-1	30...50	60...65	
Isobutanol	5...10	10...100	
n-Propanol	2...10	2...50	
$\Sigma$ höhere aliphatische Alkohole	70...90		
Aromatischer Alkohol: $\beta$ -Phenylethanol	6...44	100	2. Anabolischer Weg vom Pyruvat über $\alpha$ -Acetolactat
Ethylacetat	15...25	25...30	Energienstoffwechsel der Hefe unter Mitwirkung von Acetyl-Coenzym A
Isoamylacetat	0,5...1,5	1,0...1,6	
$\beta$ -Phenylethylacetat	1...5	3,0	
$\Sigma$ Ester	15...30		
Organische Säuren: Milchsäure	30...530	400	Biologische Säuerung u. Gärungsstoffwechsel der Hefe
Niedere Fettsäuren mit 4...10 C-Atomen	10...18		Bau- und Gärungsstoffwechsel der Hefe
Höhere Fettsäuren mit 12...18 C-Atomen	0...0,5		
<b>Jungbukettstoffe</b>			
Acetaldehyd	< 8	25	Gärungsstoffwechsel der Hefe
Butan-2,3-dion	< 0,05	0,1...0,2	Bei der Aminosäuresynthese Bildung der Acetohydroxysäuren und deren oxidative Decarboxylierung zu vicinalen Diketonen
Pentan-2,3-dion	< 0,02	0,5...0,6	
$\Sigma$ Gesamtdiacetyl = vicinale Diketone + Vorstufen (Acetohydroxysäuren)	< 0,10		

Richtwerte für die Schwefelverbindungen siehe Kapitel 4.4.2.

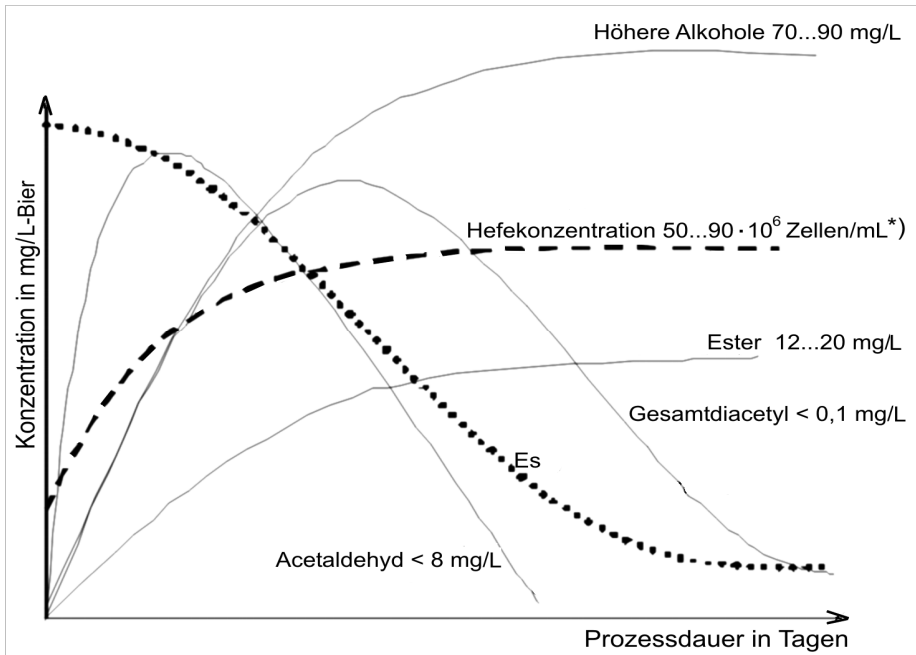


Abbildung 17 Konzentrationsverlauf und Richtwerte von Gärungsnebenprodukten der Biergärung (Bukettstoffe und Jungbukettstoffe) in Beziehung zur Hefevermehrung und Extraktvergärung (Es) eines untergärigen Bieres.  
\*) Anstellhefekonzentration 10...30 · 10<sup>6</sup> Zellen/mL

Tabelle 29 Geschmacksschwellenwerte von Gemischen aus Hopfenölkomponenten und ausgewählten Gärungsnebenprodukten

Hopfenölkomponente	Zusatz zum Hopfenöl	Geschmacksschwellenwert	
		Reinsubstanz	+ Zusatz
Linalool	-	ca. 27 µg/L	-
	+ 10 mg/L Ethylacetat	-	95 µg/L
	+ 2 mg/L Isoamylacetat	-	67 µg/L
Geraniol	-	ca. 90 µg/L	-
	+ 47 mg/L 2-Phenylethanol	-	149 µg/L
	+ 2 mg Isoamylacetat	-	77 µg/L

Auch Off-Flavour-Komponenten, wie Diacetyl können im geringen Umfang durch die o.g. Hopfenölkomponenten überdeckt werden.

#### 4.2 Biochemismus der vicinalen Diketone im Prozess der Bierherstellung und seine Bedeutung für die Steuerung des Reifungsprozesses

In Untersuchungen über das komplexe Gebiet der *vicinalen Diketone* konnte Folgendes festgestellt werden (zusammenfassende Berichte siehe [102], [103], [104]):

### 4.2.1 Bedeutung der vicinalen Diketone

Die vicinalen Diketone verleihen dem Bier beim Überschreiten der Geschmacksschwellenwerte (siehe Tabelle 28) einen unreinen, süßlichen und je nach Konzentration bis widerlichen Geschmack.

Das Pentan-2,3-dion hat durch den höheren Geschmacksschwellenwert dabei nicht diese Bedeutung wie das Butan-2,3-dion.

Der Abbau der vicinalen Diketone verläuft während des Bierreifungsprozesses parallel zu den anderen Teilvorgängen der Reifung und ist besonders bei beschleunigten kontinuierlichen wie diskontinuierlichen Verfahren, der die Reifungsgeschwindigkeit bestimmende Prozess. Deshalb kann der Gehalt an vicinalen Diketonen (richtiger: Die Summe der vicinalen Diketone und ihrer Vorstufen entspricht dem sogenannten Gesamtdiacetyl) im Fertigbier (Flasche, Fass) als ein wesentliches Kriterium für den Reifungsgrad angesehen werden (chemische Struktur und Begriffserklärung der vicinalen Diketone und ihrer Vorstufen siehe Abbildung 18).

Vorstufen der vicinalen Diketone		Ihre vicinalen Diketone	
$\alpha$ -Acetomilchsäure (2-Acetolactat)	$\begin{array}{c} \text{COOH} \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\    \quad   \\ \text{O} \quad \text{OH} \end{array}$	Butan-2,3-dion (Diacetyl)	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\    \quad    \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array}$
$\alpha$ -Acetohydroxy- buttersäure (2-Acetohydroxy- butyrat)	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2 \\   \\ \text{H}_3\text{C}-\text{C}-\text{C}-\text{COOH} \\    \quad   \\ \text{O} \quad \text{OH} \end{array}$	Pentan-2,3-dion	$\begin{array}{c} \text{H}_3\text{C}-\text{CH}_2-\text{C}-\text{C}-\text{CH}_3 \\    \quad    \\ \text{O} \quad \text{O} \end{array}$

Abbildung 18 Vicinale Diketone (VD) des Bieres und ihre Vorstufen

Begriffserklärung: vicinal von vicinales [lat.] = nachbarlich; VD: Diketon mit zwei nebeneinander liegenden bzw. benachbarten Ketogruppen

### 4.2.2 Die drei Stufen des Metabolismus der vicinalen Diketone im Prozess der Bierherstellung

#### 4.2.2.1 Erste Stufe: Bildung der Vorstufen der vicinalen Diketone durch die Hefezellen

Die vicinalen Diketone werden von der Hefe in ihrem Stoffwechsel nicht unmittelbar selbst gebildet, sondern nur ihre Vorstufen (engl.: precursor), zwei Acetohydroxysäuren, die als einzige Vorstufen der vicinalen Diketone angesehen werden müssen. Diese Vorstufen werden in das Bier abgegeben. Sie sind geschmack- und geruchlos, also sensorisch nicht feststellbar! Sie können aber gaschromatografisch bestimmt werden.

Die Entstehung dieser Vorstufen in der Hefezelle ist insbesondere gebunden an die Pantothersäure- und Aminosäuresynthese aus einfachen Verbindungen des Intermediärstoffwechsels. Ein Ausgangspunkt dieser Synthese ist das bei der Atmung

und Gärung entstehende Zwischenprodukt, die Brenztraubensäure (Pyruvat), siehe Abbildung 19.

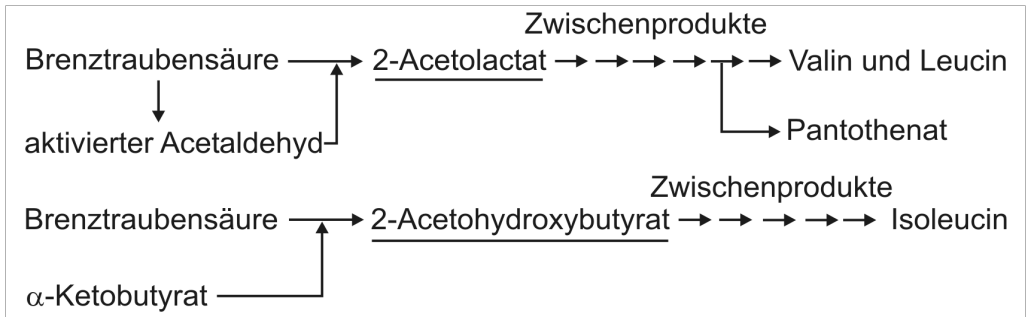


Abbildung 19 Bildungswege der Acetohydroxysäuren

Hohe intrazelluläre Gehalte der Hefe an Valin und Isoleucin (Aminosäurepool der Hefezelle) hemmen die Bildung der Acetohydroxysäuren merklich, erst nach deren Verbrauch steigt der Gehalt der Vorstufen der vicinalen Diketone im Bier an (siehe Abbildung 20).

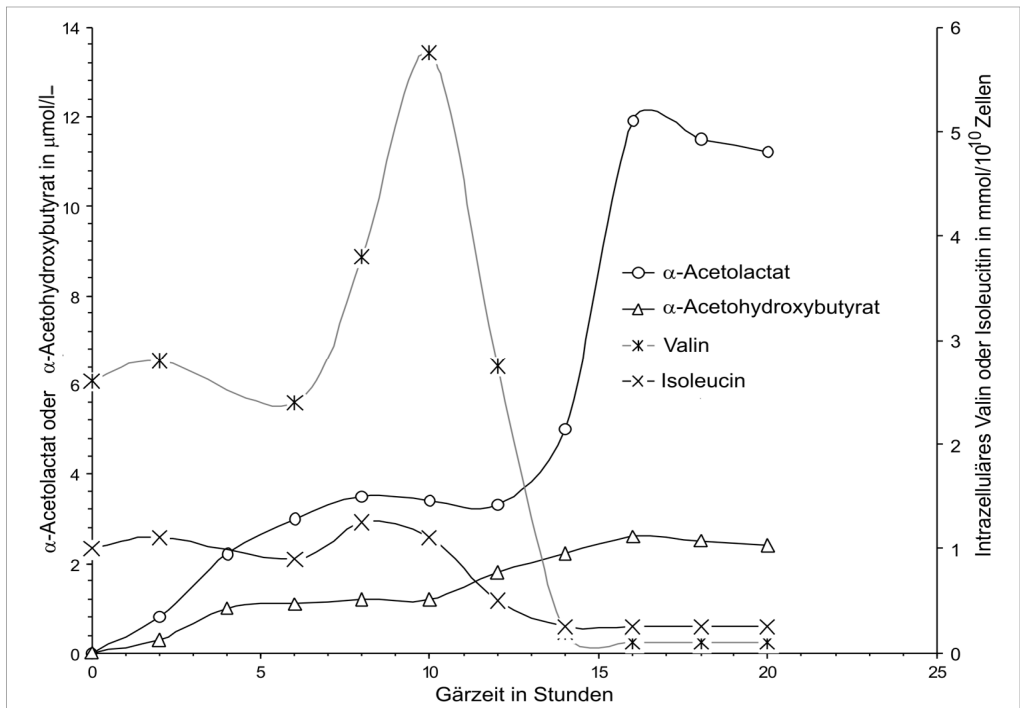


Abbildung 20 Der Zusammenhang zwischen dem intrazellulären Aminosäuregehalt der Hefe (Valin, Isoleucin) und der Bildung der Vorstufen der vicinalen Diketone (nach [138])

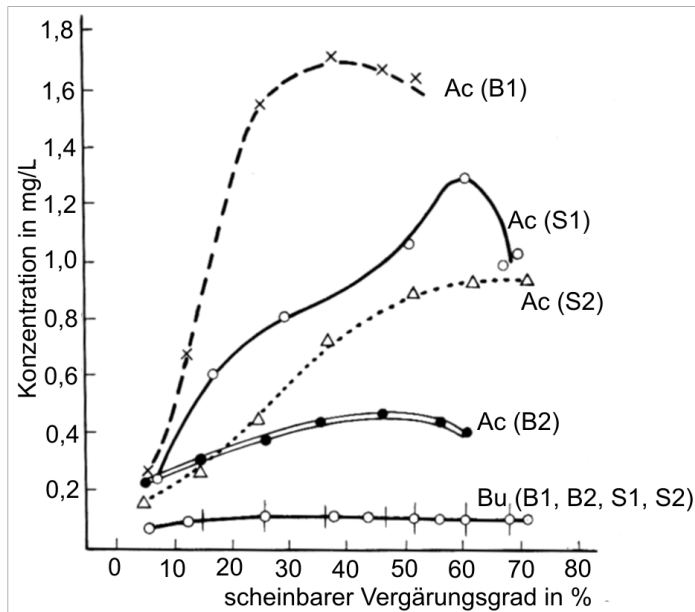


Abbildung 21 Einfluss des Hefestammes auf die Bildung von 2-Acetylactat nach [102]  
**B1** Bruchhefe 1 **B2** Bruchhefe 2 **S1** Staubhefe 1 **S2** Staubhefe 2  
**Ac** 2-Acetylactatkonzentration **Bu** Butan-2,3-dionkonzentration

Nach den bisherigen Erkenntnissen ist die Menge der während der Gärung gebildeten Acetohydroxysäuren von folgenden Faktoren abhängig:

### 1. Hefestamm

Der Zeitpunkt der Bildung und die Konzentration der Acetohydroxysäuren im Jungbier scheint ein spezifisches Merkmal des jeweiligen Hefestammes zu sein, wie die Untersuchungsergebnisse von *Mändl*, *Geiger* und *Piendl* [102] zeigen (Abbildung 21).

Deutliche Unterschiede wurden bei den geprüften Hefestämmen in der 2-Acetylhydroxybutyratbildung festgestellt. Hier ist zu beachten, dass sich die Hefestämme bei verschiedenen Würzen sehr unterschiedlich verhalten und eine Prüfung eines Hefestammes nur in der vorgesehenen Betriebswürze eine gesicherte Aussage liefert.

Es wurden bereits Hefemutanten isoliert, die keine 2-Acetylactatsynthese besaßen und damit keine Butan-2,3-dionbildung bei der Gärung verursachen. Wegen anderer Mängel (geringere Gärleistung, abartiger Biergeschmack) konnten derartige Mutanten bisher in die Praxis nicht eingeführt werden. Richtiger sollte hier nicht mehr von Diketonbildungsvermögen des Hefestammes, sondern von der Eignung eines Hefestammes zur Bildung von Acetohydroxysäuren gesprochen werden.

### 2. Hefegabe

Eine Erhöhung der Hefegabe kann bei druckloser Gärung zu einer stärkeren Bildung der Acetohydroxysäuren führen. Höhere Hefegaben fördern aber auch durch eine intensivere Gärung einen frühzeitigeren, schnelleren Abbau der vicinalen Diketone und ihrer Vorstufen im Bier.



### 3. Sauerstoffeinfluss

Sauerstoffeinfluss nach dem Anstellen der Würze mit Hefe führt je nach Eintragsmenge und Zeitpunkt des Eintrages zur erhöhten Bildung der Acetohydroxysäuren durch die Hefe.

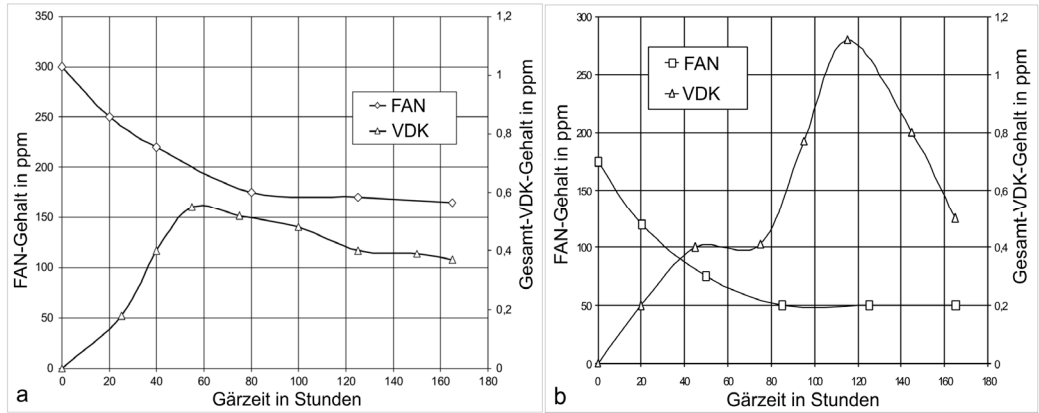


Abbildung 22 Einfluss des  $\alpha$ -Aminostickstoffgehaltes der Anstellwürzen (FAN) auf den Gesamtgehalt an vicinalen Diketonen (Gesamt-VDK) nach [138].  
**a** Hoher FAN-Gehalt      **b** Niedriger FAN-Gehalt

### 4. Würzezusammensetzung

Besonders der Gehalt der Würze an direkt assimilierbaren Stickstoffverbindungen ist eine wesentliche Einflussgröße. Bei einem Mangel an  $\alpha$ -Aminostickstoff wird die Bildung von Acetohydroxysäuren übermäßig angeregt, besonders bei einem intensiven Drauflassverfahren und einer verstärkten Hefevermehrung (siehe Abbildung 22).

### 5. Gärtemperatur und Druck

Der Einfluss auf den Gesamtdiacetylgehalt in der Gärphase ist davon abhängig, ob durch eine höhere Gärtemperatur die Hefevermehrung angeregt wird, oder durch eine kombinierte Drucksteigerung sie gebremst wird. Jede Steigerung der Hefevermehrung führt insbesondere bei FAN-armen Würzen zu überhöhten Gesamtdiacetyl-Werten in der Hauptgärphase. Die Konzentration der Vorstufen werden bei warmer Gärführung schneller und teilweise auch deutlich mehr gebildet, aber auch wieder schneller abgebaut, wie die Versuchsergebnisse in Abbildung 23 erkennen lassen.

Eine Druckerhöhung in der Gärphase erhöht den  $\text{CO}_2$ -Gehalt im gärenden Bier und drosselt dadurch die Hefevermehrung. Als Folge davon sinkt das Maximum der Gesamtdiacetylkonzentration im gärenden Bier mit steigendem Druck und  $\text{CO}_2$ -Gehalt in der Gärphase (siehe Abbildung 24).