

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I

Optimierung der Hefetechnologie mit dem Ziel einer
Verbesserung der Geschmacksstabilität im Praxismaßstab

Axel Hartwig

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. H.-Chr. Langowski

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. W. Back
2. Univ.-Prof. Dr. K. Wackerbauer (em.),
(Technische Universität Berlin)
3. Priv.-Doz. Dr. M. Krottenthaler

Die Dissertation wurde am 05.08.2008 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 09.10.2008 angenommen.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde unter Betreuung meines Doktorvaters Prof. Werner Back am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I in Freising/Weihenstephan unter engster Zusammenarbeit mit der Flensburger Brauerei Emil Petersen GmbH & Co. KG, wo auch alle Versuche durchgeführt wurden, erstellt. Prof. Back möchte ich an dieser Stelle besonders danken für die Überlassung des Themas, die Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit sowie die vielen produktiven Anregungen. In gleichem Maße gilt mein Dank dem technischen Direktor der Flensburger Brauerei, Herrn Diplom-Braumeister Werner Sauer, der mir die Möglichkeit zur Durchführung der Arbeit bot und diese auch finanziell ermöglichte. Weiter gilt mein ganz herzlicher Dank meinem Betreuer Dr.-Ing. Frithjof Thiele, dessen Fachkompetenz, Anregungen und Diskussionsbereitschaft maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Für die gute Zusammenarbeit bezüglich des Umbaus und der Inbetriebnahme der Hefeassimilationsanlage möchte ich mich bei Herrn Diplom-Braumeister Peter Frischmann und Dr. Kain sowie allen weiteren an dem Projekt beteiligten Mitarbeitern der Fa. Albert Frey bedanken.

Bei Dr.-Ing. Mark Schneeberger bedanke ich mich für seine Bemühungen, als er mir die Durchführung der Analysen zur Bestimmung der Bieraromastoffe sowie Alterungsindikatoren beibrachte.

Ich danke Dr. Markus Herrmann sowie Dipl.-Ing. Stefan Hanke für die Möglichkeit zur Analysendurchführung im GC-Labor, sowie den Laborantinnen Doreen Besthorn und Michaela Marschmann für die tatkräftige Unterstützung bei den GC-Auswertungen.

Des Weiteren möchte ich mich bei dem Laborpersonal der Flensburger Brauerei, Frau Cornelia Uphoff, Frau Dunja Zaedow, Frau Gabriele Plagemann sowie Herrn Henning Laubrock und Herrn Volker Albrecht für die Möglichkeit der Labormitbenutzung sowie Durchführung und Auswertung zahlreicher Analysen bedanken.

Über dies hinaus gilt mein Dank Herrn Gunar Kramp von der Flensburger Brauerei für die gute Zusammenarbeit und das Einbringen seiner Erfahrung bei der Planung und Durchführung des Umbaus der Reinzuchtanlage sowie bei der Realisierung der Gärversuche im laufenden Produktionsbetrieb. Generell gilt mein

großes Dankeschön allen Mitarbeitern im Bereich Produktion der Flensburger Brauerei für die Mithilfe und Unterstützung bei der Versuchsdurchführung und der laufenden Probenahme.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungsverzeichnis.....	VI
Abbildungsverzeichnis.....	X
Tabellenverzeichnis.....	XV
1 Einleitung und Aufgabenstellung.....	1
2 Grundlagen	3
2.1 Hefeherführung	3
2.1.1 Methoden der Hefeherführung.....	3
2.1.1.1 Klassische Hefereinzucht	3
2.1.1.2 Aerobe Herführmethoden	4
2.1.1.3 Spezielle Herführsysteme.....	9
2.1.2 Überblick Hefeherführung.....	13
2.2 Hefeernte und Behandlung der Erntehefe.....	20
2.3 Anstelltechnologie	27
2.4 Hefestoffwechselprodukte.....	29
2.4.1 Bildung der Ester und höheren Alkohole.....	29
2.4.2 SO ₂ -Bildung	29
2.5 Geschmacksstabilität	35
2.6 Bestehende Verfahrensweise in der Flensburger Brauerei.....	37
2.6.1 Hefereinzucht.....	37
2.6.2 Anstellen, Gärung und Schlauchen des Jungbieres	40
2.6.3 Hefeernte und Hefelagerung.....	42
2.6.4 Lagerung, Filtration und Abfüllung des Bieres	44
2.7 Problematik der Sauerstoffpermeation.....	45
3 Material und Methoden.....	47
3.1 Routineanalysen	47
3.1.1 Chemisch-technische Analysen	47
3.1.2 Zellzahl und Viabilität	48
3.1.3 Sauerstoffgehalt.....	48
3.1.4 Gaschromatographische Analysen	49
3.2 Sensorische Analysen.....	50

3.2.1	Verkostung nach dem DLG-Schema	50
3.2.2	Alterungsverkostung nach Eichhorn	50
3.3	Forcierte Alterung.....	51
3.4	Hefevitalitätsmessung	51
3.5	Sauerstoffpermeationsmessungen.....	52
3.6	Eingesetzte Hefestämme	52
3.7	Durchführung der Assimilationsversuche	53
3.7.1	Belüftungseinrichtungen	53
3.7.2	Versuchsvariation	56
3.8	Durchführung der Gärversuche.....	58
3.8.1	Gärversuche im Großmaßstab.....	58
3.8.2	Gärversuche im Kleinmaßstab.....	58
3.9	Behandlung der Biere nach der Gärung.....	59
4	Ergebnisse und Diskussion	61
4.1	Hefeherführung	61
4.1.1	Bau der neuen Assimilationsanlage.....	61
4.1.2	Funktionsweise der Assimilationsanlage	65
4.1.3	Assimilationsversuche	68
4.1.3.1	Durchführung der Assimilationen.....	68
4.1.3.2	Variation Assimilationsparameter	69
4.1.3.3	Vergleich der drei Belüftungssysteme	75
4.1.3.4	Diskussion Assimilationsversuche	79
4.1.4	Zustand der Assimilationshefe	79
4.1.5	Hefelagerung	82
4.1.6	Gesamtdiskussion Assimilationsanlage	84
4.2	Gärversuche	85
4.2.1	Variation Hefestämme	85
4.2.2	Versuche Variationen Anstellzellzahl	95
4.2.3	Belüftungsversuche	101
4.2.3.1	Belüftungsversuche Hefestamm 34/70	101
4.2.3.1.1	Versuchsreihe mit variierter Belüftung Stamm 34/70.....	101
4.2.3.1.2	Versuchsreihe mit Variation Drauflasszeitpunkt Stamm 34/70 .	
	107

4.2.3.2	Belüftungsversuche Hefestamm 321	110
4.2.3.2.1	Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1	110
4.2.3.2.2	Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/2	117
4.2.3.2.3	Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3	124
4.2.3.2.4	Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4	128
4.2.3.2.5	Gesamtdiskussion Belüftungsversuche	134
4.2.4	Versuche im Kleinmaßstab Stamm 34/70	135
4.2.5	Untersuchung der Hefegenerationen	140
4.3	SO ₂ -Stufenkontrolle	143
4.4	Hefeernte und Ertehefelagerung	145
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	153

Abkürzungsverzeichnis

°	Grad
°C	Grad Celsius
%	Prozent
α	alpha
Abb.	Abbildung
AH	Anhang
AI	Alterungsindikatoren
BA	Bieraromastoffe
BE	Bittereinheiten
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
CIP	cleaning in place
CO ₂	Kohlendioxid
d	Tage
d.h.	das heißt
Dr.	Doktor
EBC	European Brewery Convention
etc.	et cetera
Es	scheinbarer Extrakt
evtl.	eventuell
Ew.	wirklicher Extrakt
Fa.	Firma
FAN	Freier Amino Stickstoff
Fe	Eisen
FID	Flammenionisationsdetektor
G	Gärung
g	Gramm
GC	Gaschromatograph
Gew.%	Gewichtsprozent
ggf.	gegebenenfalls
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GT	Gärtank

h	Stunde
HA	höhere Alkohole
HDE	Hochdruckeinspritzung
hl	Hektoliter
HT	Hefetank
HZZ	Hefezellzahl
ICP	intracellulärer pH-Wert
IDM	Induktions-Durchfluß-Messer
i.d.R.	in der Regel
k.A.	keine Angabe
Kap.	Kapitel
KE	Kühlende
Konz.	Konzentration
KW	Kilowatt
KZE	Kurzzeiterhitzung
l	Liter
L	Lagerung
LMKV	Lebensmittelkennzeichnungsverordnung
max.	maximal
MB	Methylenblau
MEBAK	Mitteleuropäische Brautechnische Analysenkommission
mg	Milligramm
mg/l	Milligramm pro Liter
µg/l	Mikrogramm pro Liter
MHD	Mindesthaltbarkeitsdatum
min	Minuten
Mio.	Million(en)
ml	Milliliter
mo	Monat
m/s	Meter pro Sekunde
n.a.	nicht auswertbar
nm	Nanometer
n.n.	nicht nachweisbar

Nr.	Nummer
O ₂	Sauerstoff
o.B.	ohne Befund
pH-Wert	Wasserstoffionenkonzentration
PP	Polypropylen
ppb	Parts per Billion
ppm	Parts per Million
PrA	Proteinase A
Prof.	Professor
PVPP	Polyvilylpolypyrrolidon
r	Radius
S	Schwefel
S.	Seite
s	Sekunden
scheinb.	Scheinbar
SIP	Sterilisation in Place
Sp.	Spuren
sog.	sogenannt
SO ₂	Schwefeldioxid
T	Temperatur
Tab.	Tabelle
TBZ	Thiobarbitursäurezahl
techn.	technisch
TPE	thermoplastische Elastomere
Trs.	Trockensubstanz
U/min	Umdrehungen pro Minute
u.U.	unter Umständen
u.s.w.	und so weiter
U	Units
ug.	Untergärig
v	Geschwindigkeit
versch.	Verschiedenen
vgl.	vergleiche

VGs	scheinbarer Vergärungsgrad
VGw	wirklicher Vergärungsgrad
VHT	Verkaufshefetank
Vol.%	Volumenprozent
z.B.	zum Beispiel
ZHF	Zentrifugal-Hochleistungs-Filter
ZKG	zylindrokonischer Gärtank
ZKL	zylindrokonischer Lagertank
ZKT	zylindrokonischer Tank
z.T.	zum Teil
ZZ	Zellzahl

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Eintank Reinzuchtverfahren nach Prof. Wackerbauer	5
Abbildung 2: Hefeherführsystem Conti-Prop [6]	6
Abbildung 3: Assimilationsanlage nach BACK [6]	8
Abbildung 4: Frings-Hefepropagator	9
Abbildung 5: KHS Innopro LOG-1	11
Abbildung 6: KHS Innopro LOG-2	11
Abbildung 7: Verteilung von Schwefeldioxid in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung [94]	30
Abbildung 8: SO ₂ -Bildungsweg während der Gärung [98].....	31
Abbildung 9: Funktionsdreieck der SO ₂ -Bildung [5].....	34
Abbildung 10: Metallkatalysierte Radikalentstehung im Bier [5]	36
Abbildung 11: techn. Zeichnung eines alten Reinzuchttanks	38
Abbildung 12: tech. Zeichnung eines Erntehefetanks	44
Abbildung 13: Intensiv-Belüftungsdüse nach dem Venturi-Prinzip	54
Abbildung 14: Einblaserohr	54
Abbildung 15: Schnitt durch die Entspannungskammer der Düse.....	55
Abbildung 16: Belüftungseinrichtung T-Stück mit Einblaserohr	55
Abbildung 17: Ausschnitt aus dem Fließschema der Assimilationstanks	61
Abbildung 18: Berechnung des Volumenstroms bei einer Umpumpgeschwindigkeit von 1 m/s.....	63
Abbildung 19: Darstellung der Bedieneroberfläche	65
Abbildung 20: Biersteinbeläge an der Umpumpleitung.....	68
Abbildung 21: Vergleich Assimilationsstart aus Log- und Lag-Phase.....	70
Abbildung 22: Zellzahlverläufe der Assimilationen mit variierten Parametern unter Einsatz der Venturi-Düse	73
Abbildung 23: Zellzahlzunahme und FAN-Verbrauch der Assimilation Nr. 6.....	74
Abbildung 24: Fließgeschwindigkeit und Volumenstrom der versch. Düsen in Abhängigkeit von der Umpumpintensität.....	76
Abbildung 25: Zellzahlverläufe der Testassimilationen unter Einsatz der versch. Belüftungssysteme	78
Abbildung 26: ICP-Werte von fertig assimilierten Reinzuchtheferchargen	80

Abbildung 27: Zellzahlgehalte sowie Totzellenanteile von fertig assimilierten Reinzuchthefechargen	80
Abbildung 28: Rest einer gebildeten und an der Konuswandung heruntergerutschten Hefeschicht in einem Assimilationstank	81
Abbildung 29: Temperaturverlauf der Assimilationshefe während des Herunterkühlens auf Lagertemperatur	82
Abbildung 30: ICP-Veränderung und Totzellenzunahme einer Assimilationshefe während einer einwöchigen Kaltlagerung bei 2 °C.....	83
Abbildung 31: Verläufe versch. Parameter bei der Lagerung einer Assimilationshefe	84
Abbildung 32: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen	87
Abbildung 33: Zellzahlverlauf der Gärungen der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen	87
Abbildung 34: SO ₂ -Gehalte der drei Versuchsgärungen mit den unterschiedlichen Hefestämmen.....	88
Abbildung 35: gamma-Nonalctongehalte der Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen in µg/l.....	91
Abbildung 36: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen	94
Abbildung 37: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen	94
Abbildung 38: Extraktabbau der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl ..	96
Abbildung 39: Zellzahlverlauf der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl.	97
Abbildung 40: SO ₂ -Gehalte der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl ...	97
Abbildung 41: Extraktabbau der drei Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70	102
Abbildung 42: Zellzahlverlauf der drei Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70	102
Abbildung 43: SO ₂ -Gehalte der drei Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70	103
Abbildung 44: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70	106

Abbildung 45: Akzeptanz der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70.....	106
Abbildung 46: Extraktabbau, Zellzahl- sowie Diacetylverlauf der Gärungen mit Variation Drauflasszeitpunkt bei Hefestamm 34/70.....	109
Abbildung 47: SO ₂ -Gehalt der Biere mit Variation Drauflasszeitpunkt bei Hefestamm 34/70.....	109
Abbildung 48: Extrakt- sowie Diacetylverläufe bei den Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1	111
Abbildung 49: Zellzahlverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1	112
Abbildung 50: pH- sowie FAN-Verläufe während der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1	112
Abbildung 51: SO ₂ -Gehalte der Biere aus der Versuchsreihe Stamm 321/1.....	113
Abbildung 52: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1	115
Abbildung 53: 2-Furfuralgehalte der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1	115
Abbildung 54: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1	116
Abbildung 55: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1	116
Abbildung 56: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/2.....	118
Abbildung 57: SO ₂ -Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2	119
Abbildung 58: Konzentration an Ethylacetat sowie Isoamylacetat der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2.....	119
Abbildung 59: Sauerstoffindikatoren der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2.....	121
Abbildung 60: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2.....	123
Abbildung 61: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2.....	123
Abbildung 62: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/3.....	125

Abbildung 63: FAN- sowie pH-Verläufe der Gärungen der Versuchsreihe 321/3	125
Abbildung 64: SO ₂ -Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/3	126
Abbildung 65: Alterungskomponenten der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/3.....	127
Abbildung 66: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/4.....	129
Abbildung 67: Zellzahlverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/4	129
Abbildung 68: SO ₂ -Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4	130
Abbildung 69: Konzentrationen an Ethylacetat sowie Isoamylacetat der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4.....	130
Abbildung 70: Alterungskomponenten der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4.....	132
Abbildung 71: 2-Furfural-Gehalte der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4.....	132
Abbildung 72: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4.....	133
Abbildung 73: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4	133
Abbildung 74: Extrakt- sowie Zellzahlverläufe der Biere aus den Kleingärversuchen	137
Abbildung 75: Alterungsindikatoren der frischen Biere aus den Kleingärversuchen mit Belüftungsvariation.....	139
Abbildung 76: 2-Furfural-Gehalte der frischen und gealterten Biere aus den Kleingärversuchen mit Belüftungsvariation	139
Abbildung 77: ICPs und Totzellenanteile der Hefen sowie SO ₂ -Gehalte der Biere von der Reinzuchtgärung bis zum Einsatz der 11. Führung.....	141
Abbildung 78: SO ₂ -Gehalt eines Bieres während verschiedener Produktionsschritte.....	144
Abbildung 79: SO ₂ -Abbau während der Lagerung eines Flaschenbieres.....	145
Abbildung 80: ICP-Werte sowie Totzellenanteile in der Erntehefe einer Gärcharge zu zwei versch. Erntezeitpunkten.....	146
Abbildung 81: ICP-Werte und Totzellenanteile in der Erntehefe nach der neuen Ernte-Verfahrensweise.....	148

Abbildung 82: Veränderung des Zustandes einer Erntehefe unter nicht optimalen Bedingungen	149
Abbildung 83: Temperaturverlauf der Erntehefe am Auslauf des Hefetiefkühlers vor der Optimierung (Ausgangstemperatur 13 °C)	149
Abbildung 84: Temperaturverlauf der Erntehefe am Auslauf des Hefetiefkühlers nach der Optimierung (Ausgangstemperatur 13 °C)	150
Abbildung 85: Veränderungen zweier Erntehefen während ihrer Kaltlagerung ..	151
Abbildung 86: Note der monatlichen DLG-Verkostung des frischen Bieres von Dezember 2006 bis Februar 2008.....	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zellzahlmaxima sowie Vermehrungsdauer bei verschiedenen Herföhrtemperaturen [8].....	16
Tabelle 2: Übersicht der auf die Hefe wirkenden Stressfaktoren [55].....	21
Tabelle 3: Sauerstoffdurchlässigkeit versch. TPEs	46
Tabelle 4: Sauerstoffpermeation durch einen Bűgelverschluss wöhrend eines Monats	46
Tabelle 5: Sauerstoffdurchlässigkeit versch. Kronenkorkenqualitäten	46
Tabelle 6: Übersicht Assimilationsversuche mit der „Belűftungseinrichtung Intensivbelűftungsdüse“	57
Tabelle 7: Übersicht Assimilationsversuche mit der "Belűftungseinrichtung T-Stűck mit Einblaserohr" sowie "Belűftungseinrichtung T-Stűck"	57
Tabelle 8: Beispielparametersatz für ein Assimilationsprogramm	66
Tabelle 9: Cip-Sequenzen einzelner Bauteile der Assimilationstanks.....	67
Tabelle 10: Ergebnisse der Parametervariation bei Assimilationen unter Einsatz der Venturi-Dűse	74
Tabelle 11: höhere Alkohole der Biere aus den drei Versuchsgărungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [mg/l]	89
Tabelle 12: Bieraromastoffe der Biere aus den drei Versuchsgărungen mit unterschiedlichen Hefestämmen in µg/l	90
Tabelle 13: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere aus den drei Versuchsgărungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [µg/l]	92
Tabelle 14: Zunahme der Alterungsindikatoren im Rahmen der forcierten Alterung der Biere aus den drei Versuchsgărungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [µg/l].....	93
Tabelle 15: höhere Alkohole der Biere aus den drei Gărversuchen mit variiertes Anstellzellzahl [mg/l].....	98
Tabelle 16: Bieraromastoffe der Biere aus den drei Gărversuche mit variiertes Anstellzellzahl [µg/l].....	99
Tabelle 17: Alterungsindikatoren der frischen und gealterten Biere mit Anstellzellzahl 6 und 10 Mio./ml [µg/l]	100
Tabelle 18: Übersicht Belűftungsvariation Hefestamm 34/70	101

Tabelle 19: Bieraromastoffe der Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70 [$\mu\text{g/l}$]	104
Tabelle 20: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70 [$\mu\text{g/l}$]	105
Tabelle 21: Versuchsschema Variation Drauflasszeitpunkt Hefestamm 34/70...	108
Tabelle 22: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/1	110
Tabelle 23: Ausgewählte Aromastoffe der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1 [mg/l]	114
Tabelle 24: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1 [$\mu\text{g/l}$]	114
Tabelle 25: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/2	117
Tabelle 26: Bieraromastoffe und höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]	120
Tabelle 27: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]	121
Tabelle 28: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]	122
Tabelle 29: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/3	124
Tabelle 30: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/4	128
Tabelle 31: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4 [$\mu\text{g/l}$]	131
Tabelle 32: Übersicht Belüftung Gärversuche im Kleinmaßstab	136
Tabelle 33: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere aus den Kleingärversuchen [$\mu\text{g/l}$]	138
Tabelle 34: höhere Alkohole und Bieraromastoffe der Biere von der Reinzuchtgärung bis zur 11. Führung	142
Tabelle 35: ICP-Werte sowie Methylenblau-Tote Zellen der normalen Betriebserntehefe	145

1 Einleitung und Aufgabenstellung

Die Hefetechnologie und die daraus resultierende Hefequalität haben einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der produzierten Biere. Dabei umfasst der Begriff Hefetechnologie die Herführung der Hefe, die Anstelltechnologie, die Durchführung der Hefeernte und die Behandlung der Hefe nach der Ernte bis zu ihrer weiteren Verwendung.

In der Praxis wurde der Hefequalität bisher oftmals nicht die notwendige Aufmerksamkeit geschenkt. In den Brauereien war lediglich entscheidend, dass zum entsprechenden Zeitpunkt genügend Erntehefe vorhanden war, bzw. die Hefereinzucht eine ausreichend hohe Zellzahl aufwies.

Eine im Jahr 2007 durchgeführte Untersuchung bestätigte eindeutig, dass der Zustand der Hefe in vielen Brauereien verschiedenster Größenordnungen als nicht zufrieden stellend bezeichnet werden kann [1]. Die Beurteilung des Zustandes der Hefe erfolgt in vielen Brauereien durch die Ermittlung des Anteils an toten Zellen (Hefeviabilität). Der eigentliche physiologische Zustand der Hefezellen, welcher z.B. durch die Bestimmung der Hefevitalität (z.B. intracellulärer pH-Wert) eindeutig besser zu charakterisieren ist, wird nicht berücksichtigt [2, 3].

Eine Schwankung der Hefequalität kann sowohl die Geschmacksstabilität negativ beeinflussen als auch andere qualitative Veränderungen der Biere zur Folge haben und damit die Produktkonstanz gefährden sowie Schwankungen in der Produktionsdauer, z.B. durch einen verlangsamten Diacetylabbau oder mikrobiologische Risiken aufgrund eines zu geringen pH-Sturzes hervorrufen.

Im Rahmen dieser Arbeit sollte die Hefetechnologie in einer mittelständischen Brauerei mit dem Ziel einer Verbesserung der Geschmacksstabilität optimiert werden, da die Geschäftsleitung hier deutlichen Handlungsbedarf sah und alle im Betrieb durchgeführten Maßnahmen bisher keinen nachhaltigen Erfolg brachten.

Ein weiterer wesentlicher Einflussparameter, der außer der Hefequalität mit der Geschmacksstabilität korreliert, ist der SO₂-Gehalt des Bieres [4]. Der Gehalt an SO₂ bei den Bieren der betreffenden Brauerei lag gegen Ende der Gärung mit Werten unter 1,0 mg/l auf einem äußerst niedrigen Niveau, hier sollte eine deutliche Steigerung möglich sein. An dieser Stelle galt es, die bisher sowohl im Labor- als auch im Großmaßstab gefundenen Beeinflussungsmöglichkeiten der

SO₂-Bildung durch Variation der Anstellparameter Hefezellzahl, Belüftungsrate sowie Belüftungszeitpunkt und Zustand der Hefe auf ihre Praxistauglichkeit zu untersuchen. Es sollte nach Möglichkeit eine Verfahrensweise zur Erhöhung der SO₂-Gehalte im Bier gefunden werden, die ohne zusätzlichen technischen und zeitlichen Aufwand praktikabel umzusetzen und anzuwenden ist.

Eine Grundvoraussetzung dafür war, dass zum jeweils gewünschten Anstellzeitpunkt eine gleichbleibende, qualitativ hochwertige Hefe zur Verfügung steht; dies beinhaltet sowohl Reinzucht- als auch Erntehefe.

Ausgangspunkt waren Untersuchungen zur Hefeführung an einer neu geplanten Hefereinzuchtanlage in der Brauerei. Bei der Wahl der Art der Reinzuchtanlage fiel die Entscheidung seitens der Geschäftsleitung auf eine Assimilationsanlage, da diese gegenüber den anderen Systemen den geringsten Handlungsaufwand sowie die höchste Flexibilität aufweist. Der Bau der Assimilationsanlage sollte unter Berücksichtigung der für eine optimale Hefevermehrung notwendigen Aspekte [5] erfolgen:

- Geometrische Verhältnisse des Assimilationstanks
- Technologische Einbindung in den Produktionsprozess
- Wachstumsansprüche der Hefe

In weiteren Schritten folgten systematische Untersuchungen zu der Hefephysiologie während der Gärung, zum Zeitpunkt der Hefeernte und während der Aufbewahrung der Erntehefe.

Da durch die teilweise veränderten technologischen Maßnahmen ggf. der Biergeschmack verändert werden könnte, erfolgte ebenfalls eine Untersuchung des Einflusses der geänderten Parameter auf die Aromastoffe der Biere.

2 Grundlagen

2.1 Hefeherführung

2.1.1 Methoden der Hefeherführung

2.1.1.1 Klassische Hefereinzucht

Die klassische Reinzucht ist das Verfahren, welches von nahezu allen Brauereien jahrzehntelang praktiziert wurde. Erst mit einem technologischen Wandel Ende der 80er Jahre stiegen die ersten Brauereien auf andere Verfahren um. Bis dahin war es die einzige Möglichkeit, die aufgrund von Degenerationserscheinungen und nachlassender Gäraktivität mehrmals geführte Erntehefe durch eine frische Reinzucht zu ersetzen. Bei der klassischen Reinzucht erfolgt die Herführung nicht mit einer kontinuierlichen Hefebelüftung, es handelt sich hierbei also nur um ein zeitweise aerobes Verfahren. KUNZE [6] beschreibt das Verfahren folgendermaßen:

Die im Labor nach den üblichen Verfahren (z.B. Tröpfchenkultur nach Lindner, Plattenkultur) vereinzelte und in steriler Würze vermehrte Einzelzelle wird im Hochkräusenstadium im Verhältnis 1:3 - 5 in belüftete Kaltwürze gegeben. Es findet ein wiederkehrendes Überimpfen in eine größere Menge Kaltwürze statt, sobald sich die Hefe im Zustand ihrer maximalen Aktivität (Hochkräusen) befindet. Dies wiederholt sich solange, bis eine ausreichende Hefemenge vorhanden ist, um einen kompletten Sud/ Gärtank anzustellen. Um eine neue Reinzucht in den Betrieb einzuführen, ist mit einer Zeitdauer (abhängig von Anlagen- und Sudgröße) von 10 bis 14 Tagen zu rechnen [7, 8]. Bei diesen herkömmlichen Verfahren wird die Temperatur von Raumtemperatur langsam auf Anstelltemperatur gesenkt, um einen Temperaturschock zu vermeiden.

Ein Vorteil ist, dass für diese Art der Herführung keine speziellen Anlagen angeschafft werden müssen. Die dafür benötigten kleinen Tanks oder Bottiche sind von Haus aus im Betrieb vorhanden. Somit ist dieses Verfahren für kleine Brauereien oftmals praktikabler als die Anschaffung einer kompletten Herführanlage. Dem gegenüber stehen allerdings die schwierige

Automatisierbarkeit und der damit verbundene Arbeitsaufwand für das Personal. Außerdem ist die Infektionsgefahr bei der offenen Herführung in Bottichen ein nicht zu unterschätzendes Risiko für die Anstellhefe und den gesamten Produktionsverlauf. Da außer dem in der Kaltwürze gelösten Sauerstoff keine weitere Möglichkeit zur Belüftung besteht, geht die Hefe relativ schnell in Gärung über, was zu einer Verlangsamung des Prozesses, zu niedrigeren Zellausbeuten und zum Anfall von Reinzuchtbier minderer Qualität führt, welches anschließend verschnitten oder verworfen werden muss [9, 10]. Im Rahmen der klassischen Reinzucht wurden selten Zellzahlen von über 60 Mio./ml erreicht.

2.1.1.2 Aerobe Herführmethoden

Bei der aeroben Herführung wird die Hefe im Gegensatz zur klassischen Reinzucht permanent mit Sauerstoff versorgt, um die Vorteile des aeroben Stoffwechsels auszunutzen. Die Möglichkeiten, eine Hefe aerob herzuführen, sind vielseitig und werden im Folgenden näher erläutert.

Eintank-Reinzuchtverfahren nach Prof. Wackerbauer

Beim Eintank-Reinzuchtverfahren nach Prof. Wackerbauer wird für jede neue Charge eine frisch im Labor hergeführte Reinzucht verwendet [11]. Es verbleibt also kein Sumpf zum Anstellen der nächsten Reinzucht im Behälter. Der Tank ist ein beheiz- und kühlbarer zylindrokonischer Behälter mit den üblichen Armaturen. Zusätzlich besitzt er zur Hefebelüftung noch eine Belüftungslanze [6]. In nachfolgender Abbildung 1 ist ein Hefereinzuchttank für ein Eintankverfahren mit Anschlüssen schematisch dargestellt.

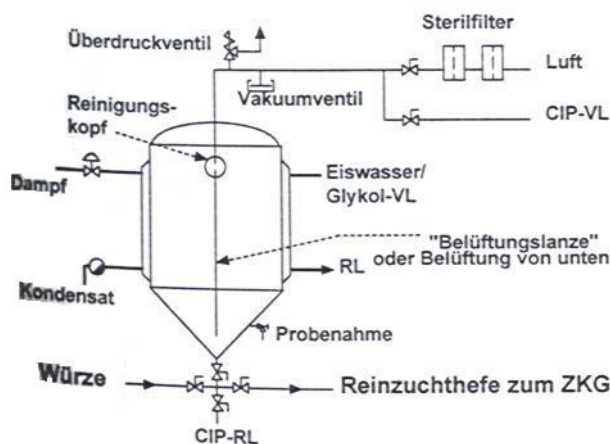


Abbildung 1: Eintank Reinzuchtverfahren nach Prof. Wackerbauer

Zur Propagation wird ein entsprechender Tank mit heißer trubfreier oder kalter Würze befüllt. Anschließend wird diese 15 min drucklos sterilisiert, auf 20°C abgekühlt und mit der Laborreinzucht beimpft. Mittels Lanze wird die Hefe in regelmäßigen Abständen belüftet. Da am ersten Tag noch kein so starkes Wachstum vorliegt, wird in den ersten Stunden nur alle 15 Minuten für 60 Sekunden belüftet. Mit einsetzendem Wachstum steigt der Sauerstoffbedarf, so dass die Belüftungsrate erhöht wird (alle 5 Minuten für 60 Sekunden belüften). Sobald der Behälter im Hochkräusenstadium steht, kann in einen nächst größeren Tank umgedrückt werden, um die Menge an Reinzuchtheife zu erhöhen oder es kann ein Sud bzw. Gärtank angestellt werden. Unter Berücksichtigung normaler Vermehrungsgeschwindigkeiten von ca. 2 Tagen kann ein solcher Behälter zweimal pro Woche eine Reinzucht zum Anstellen liefern [12].

Als Vorteile des Verfahrens werden die reine aktive Hefe durch kontinuierliche Belüftung und die Reduzierung der Kontaminationsgefahr durch kurze Wege im System sowie durch CIP nach jeder Reinzucht genannt.

Da nach jeder Führung neu beimpft wird, ist ein Degenerieren der Hefe nahezu ausgeschlossen. Weiterhin werden die geringen Kosten und die Einfachheit des Systems als Vorzüge aufgezählt [6].

Ein eventueller Nachteil dieses Verfahrens ist die Belastung des Labors durch die ständige Herführung einer neuen Reinzucht bis zum Propagator.

System Conti Prop

Das System Conti Prop wurde von der Firma Esau & Hueber, Schrobenhausen in Zusammenarbeit mit der TUM-Weihenstephan für die aerobe Propagation von Hefe entwickelt. Der Name „Conti-Prop“ deutet schon auf eine kontinuierliche Propagation hin. Dieses System besteht aus zwei Tanks, wobei ein Tank als Sterilwürzevorrattank und der andere als Propagator genutzt wird. Abbildung 2 zeigt den schematischen Aufbau des Systems.

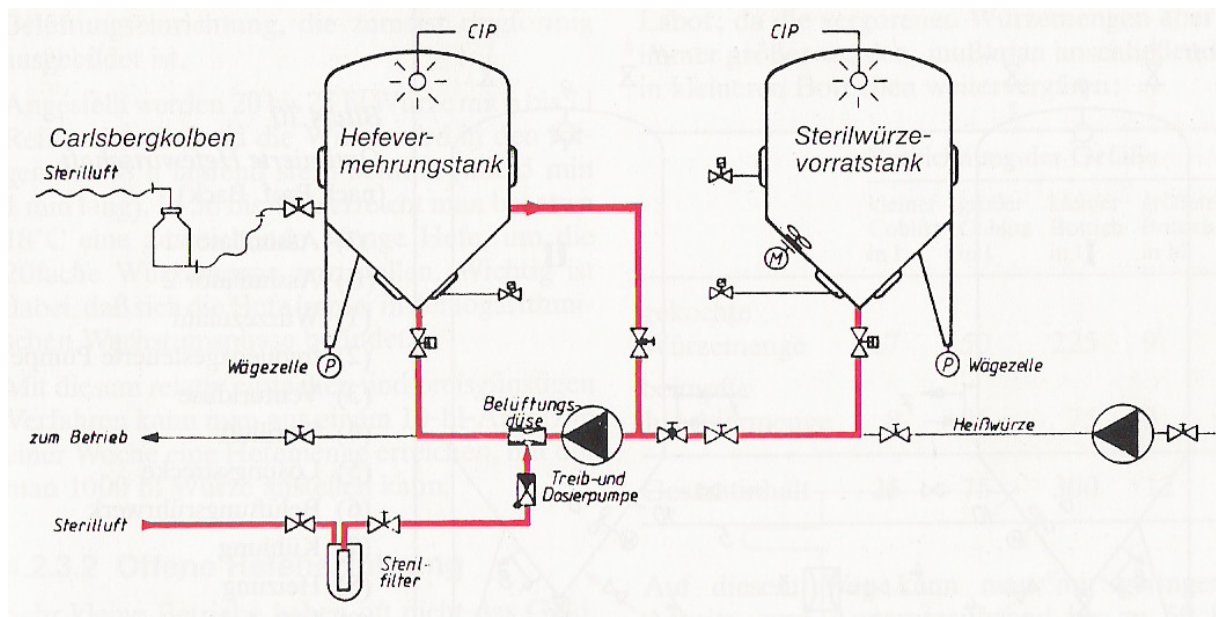


Abbildung 2: Hefeherführsystem Conti-Prop [6]

Die Sterilwürze wird entweder vor dem Plattenkühler entnommen und im Sterilwürzetank auf Herführtemperatur abgekühlt oder es findet eine zweite Sterilisation bei 100°C für mindestens 30 Minuten im Sterilisator mit anschließender Kühlung statt [6]. Das Anstellen der Würze geschieht direkt mit der Laborreinzucht aus dem Carlsbergkolben bei Neuansatz. Um die Hefe permanent mit Sauerstoff zu versorgen, wird der komplette Vermehrungstankinhalt ständig umgepumpt und über eine Zweistoffdüse nach dem Venturiprinzip belüftet [10]. Die Hefesuspension wird hier am Zargenbereich abgezogen und am Konus wieder zurück in den Tank gepumpt.

Wenn die erforderliche Hefemenge erreicht ist, wird aus dem Vermehrungstank die Kräusensuspension entnommen und in den Gärtank gegeben. Im Behälter bleibt ein Rest an Suspension im Hochkräusenstadium zurück, der sofort wieder mit Sterilwürze aus dem Vorrattank versetzt wird, um den Vermehrungszyklus

erneut zu starten. Bei ausreichender Dimensionierung der Anlage ist es möglich, die gesamte Produktion mit Reinzucht anzustellen.

Für den Anwender ergeben sich laut dem Hersteller Esau & Hueber viele Vorteile. Die biologische Sicherheit des Systems wird durch keinerlei Einbauten gefährdet. Ebenso entstehen vitale Zellen, die einen hohen Selektionsdruck auf andere Organismen ausüben. Durch die eingesetzte Zweistoffdüse ist eine Feinstverteilung der Luft und somit eine intensive Sauerstoffaufnahme für gutes Hefewachstum gesichert. Es wird eine einfache und unkomplizierte Handhabung gewährleistet.

Assimilationsverfahren nach Prof. Back

Das Assimilationsverfahren nach Prof. Back ist eine Weiterentwicklung eines ursprünglichen Zweitankverfahrens, bei dem die Hefe in einem Tank hergeführt wurde und der zweite Tank als Vorratsbehälter für Sterilwürze diente [13]. Dabei wird die Würze in einem Assimilator verarbeitet. Dieser ist ein stehender Tank mit den üblichen vorgeschriebenen Armaturen. Eine typische Assimilationsanlage mit 2 Assimilatoren ist in Abbildung 3 gezeigt. Die für die Hefe essentielle Belüftung erfolgt durch Umlagern des Behälterinhaltes von einem Tank in den anderen mittels steriler Druckluft oder frequenz geregelter Pumpen, wobei über eine Venturidüse gefahren wird. Zusätzlich ist eine Luftzufuhr in den Behältern durch das Belüftungsrührwerk möglich. Eine Auslegung im Eintankverfahren ist ebenfalls möglich.

Die Assimilation unterscheidet sich von den anderen Verfahren grundsätzlich dadurch, dass keine zusätzliche Sterilisation der Würze durchgeführt wird. Somit werden die vorhandenen Nährstoffe in der Würze geschont (keine Denaturierung von Eiweißen) und Energie eingespart, der Arbeits- und Reinigungsaufwand fällt ebenfalls geringer aus. Es kommt hier eine Belüftung im Umpumpverfahren zum Einsatz, durch das Umpumpen erfolgt zudem eine Durchmischung des Tankinhaltes. Ein weiterer bedeutender Unterschied zu allen anderen Systemen besteht bei der Assimilation darin, dass durch eine gezielte Anlagenauslegung und Anpassung an den Produktionsrhythmus sich alle Hefezellen zu jedem Zeitpunkt in der logarithmischen Phase befinden.

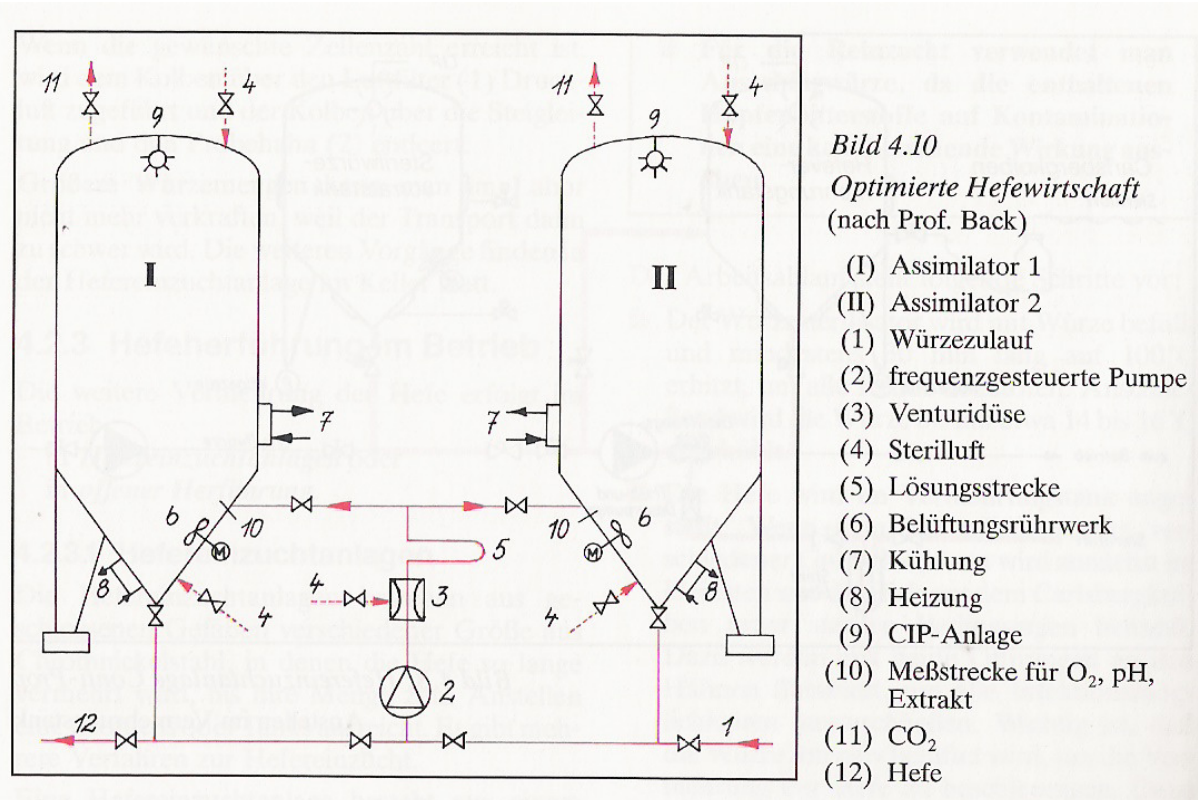


Abbildung 3: Assimilationsanlage nach BACK [6]

Ein Neuanfang erfolgt durch eine Laborreinzucht im Hansenkolben und Carlsbergkolben mit anschließendem Überimpfen in einen Assimilationstank. Dann wird gekühlte Ausschlagwürze draufgelassen. Die Hefe-Würze-Suspension wird kontinuierlich oder intervallweise umgepumpt und belüftet. Sobald die gewünschte Zellzahl erreicht ist, werden ca. 80 bis 90 % des Inhaltes entnommen und zum Anstellen verwendet. Die Restsuspension wird wieder mit kalter Würze aufgefüllt und neu assimiliert. Die Assimilationen werden gegenüber den anderen Herführverfahren so gesteuert, dass maximal eine Hefezellzahl von 100 Mio. Zellen/ml zum Anstellzeitpunkt im Assimilationsmedium vorhanden ist, damit einher geht eine nur geringe Extraktabnahme ($E_S = 6$ bis 7 GG%). Durch das Assimilieren mit anschließender Dosage, sofortigem Auffüllen und Prozessneustart handelt es sich hierbei um ein kontinuierliches Verfahren.

Wie bei allen Herführanlagen ist auch hier darauf zu achten, dass lediglich eine geringe Schaumbildung auftritt, da ein Übersäumen ein Kontaminationsrisiko darstellt. Außerdem sind Übersäumverluste auch Biomasseverluste. Die

Schaumbildung ist somit limitierender Faktor und alles sollte auf eine geringe Schaumbildung ausgelegt werden [5, 14].

2.1.1.3 Spezielle Herführsysteme

In der Zwischenzeit sind viele Anlagen diverser Anbieter auf dem Markt erhältlich, bei denen sich die grundlegenden Gedanken der drei eben beschriebenen Verfahrensweisen wieder finden lassen.

Einige dieser Systeme werden im Folgenden vorgestellt.

Frings Bierhefe propagation

Die Firma Heinrich Frings, Bonn, hat einen Propagator auf dem Markt, der auf ein alternatives Belüftungskonzept setzt. Es erfolgt eine kontinuierliche und dynamische Belüftung durch den im Behälter eingebauten Belüfter. Dieser soll die Reinzucht beschleunigen, so dass nach 24 Stunden bereits wieder eine ausreichende Hefemenge vorhanden ist.

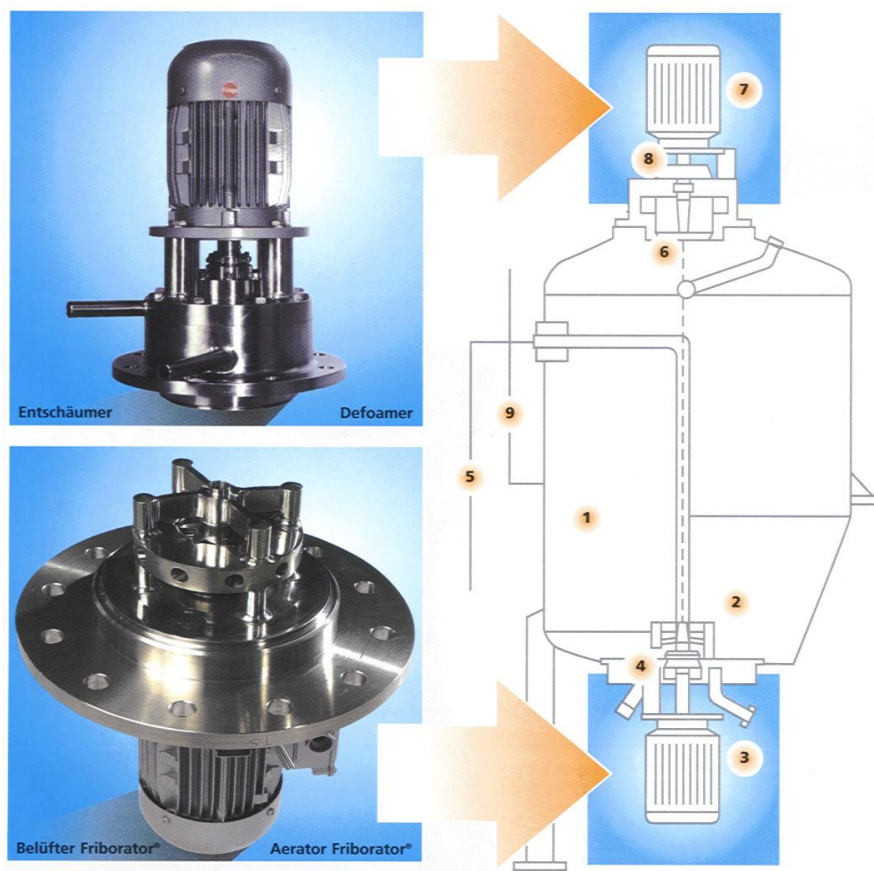


Abbildung 4: Frings-Hefepropagator

Der prinzipielle Aufbau kann aus Abbildung 4 entnommen werden. Der im Boden eingebaute spezielle Belüfter (Nr. 3, Friborator) sorgt für feinste Primärblasen. Durch die entstehende turbulente Strömung, die aufsteigenden Blasen und die Zirkulation im Behälter ist für eine ausreichend gute Durchmischung des Reaktors gesorgt. Zur Schaumreduzierung ist im Deckel (Nr. 6) ein mechanischer Entschäumer (durch Zentrifugation wird der Schaum zerstört) installiert. Der entstehende Schaum wird darin in einen Abgasstrom (Abluft) und in die Schaumflüssigkeit (Schaumkonzentrat) getrennt. Der flüssige Anteil wird wieder zurückgeführt (Nr. 9), so dass die Hefe nur eine geringe Verweilzeit im Schaum aufweist. Somit sind Füllstände größer 50 % des Reaktorvolumens realisierbar. In den ersten Referenzanlagen konnten hohe Zelldichten mit einem guten physiologischen Zustand der Zellen ermittelt werden. Es ist ein variables Repeated-Fed-Batch-Verfahren (mit zyklischer Entnahme bestimmter Teilmengen und anschließendem Auffüllen mit Betriebswürze) mit kurzen Prozesszeiten möglich, wobei kontinuierlich begast wird [15]. Der Hersteller verspricht gegenüber herkömmlichen Verfahren eine Verkürzung der Propagationszeit um den Faktor 3 [16]. Explizite Daten oder ein konkreter Bezug bezüglich des Vergleiches auf ein bestimmtes Herführsystem werden an dieser Stelle aber nicht genannt.

KHS Innopro LOG-1 und 2

Für die Herstellung vitaler gärkräftiger Hefen hat die Firma KHS, Bad Kreuznach ein Eintankverfahren entwickelt, welches an die jeweiligen Betriebsverhältnisse individuell angepasst werden kann.

Die Anlage Innopro Log-1 besteht, wie in Abbildung 5 dargestellt, aus einem Propagationstank, einem Carlsbergkolben und einem CIP-Tank. Beim Innopro Log-1-System wird von außen stetig sterile Würze zugeführt. Für den ersten Propagationsschritt wird die Würze nur in dem Ausmaß wie benötigt vorgelegt. Im Anschluss erfolgen die Propagationsschritte Umpumpen, Belüften, Kühlen. Die Laborhefe wird mittels Sterilluft in den Propagator gedrückt. Nach erfolgter Propagation wird erneut sterile Würze in den Reaktor gegeben und der nächste Zyklus findet analog zum ersten statt. Dieses Auffüllen findet solange statt, bis eine genügend große Hefemenge vorhanden ist. Zum Anstellen wird der Behälter

teilentleert und der Rest verbleibt als Impfmenge im Tank und wird mit frischer steriler Würze neu angestellt.

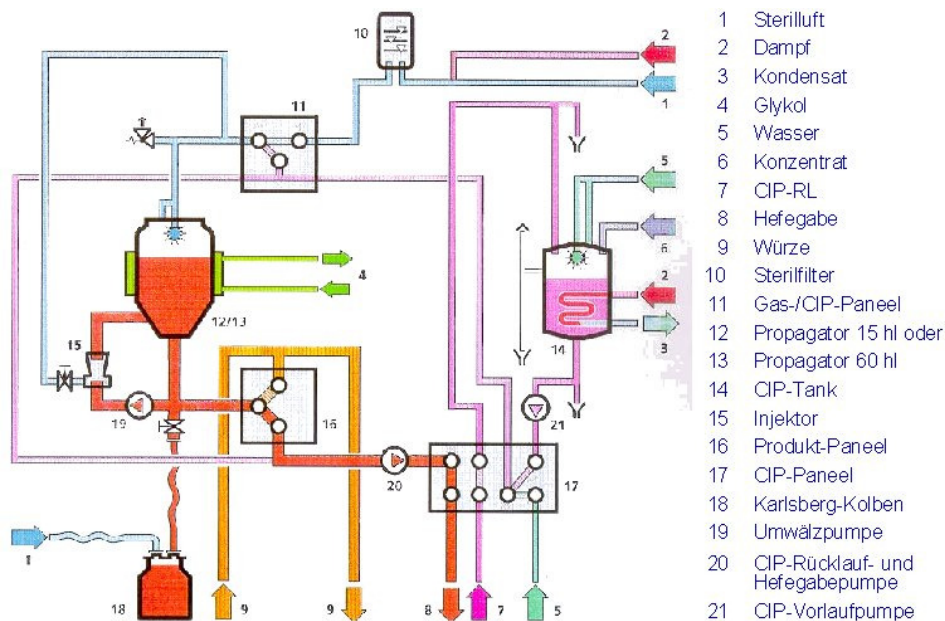


Abbildung 5: KHS Innopro LOG-1

Weiterhin hat KHS ein Zweitankverfahren zur Hefeherführung im Programm. Wie aus Abbildung 6 zu erkennen ist, wurde hier zusätzlich ein Vorpropagator vorgesehen.

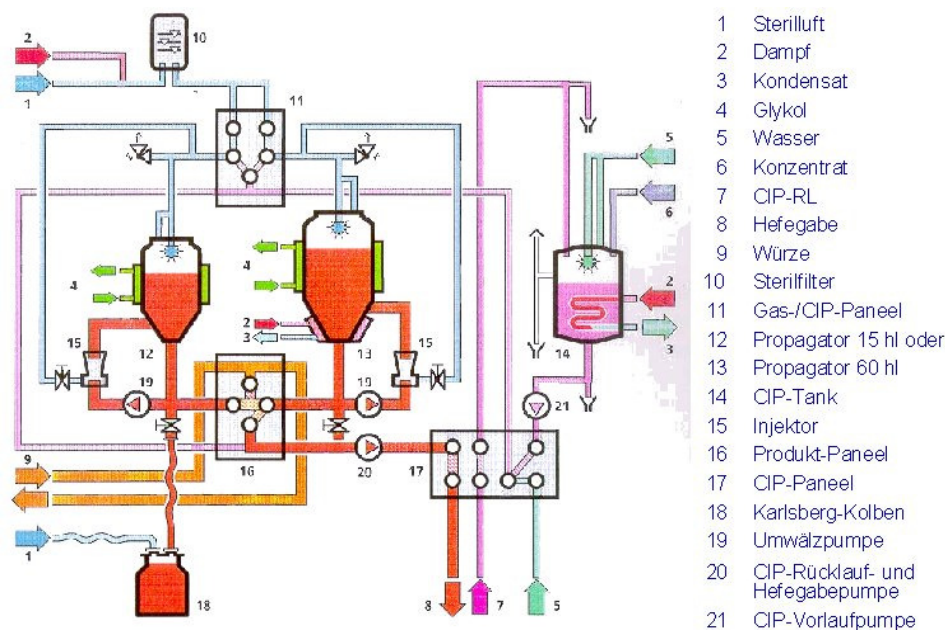


Abbildung 6: KHS Innopro LOG-2

Beim standardmäßigen Verfahrensablauf wird die Würze im Propagator mittels Konusheizung sterilisiert und auf die entsprechende Temperatur gekühlt. Nun wird ein Teil in den Vorpropagator gedrückt und mit der Hefe aus dem angeschlossenen Carlsbergkolben beimpft, umgepumpt und belüftet. Nach einer individuell bestimmten Zeitspanne (abhängig von der Zellzahl) gelangt die Vorpropagatorsuspension in den Hauptpropagator und die zweite Stufe der Propagation wird eingeleitet. Die Propagationsschritte Umpumpen, Belüften und Kühlen erfolgen analog zur Vorpropagation. Nach Beendigung der Herführung wird der Propagator entleert, gereinigt sowie sterilisiert und steht erneut zur Verfügung.

Beide Systeme, Innopro LOG-1 und Innopro LOG-2, haben ihre Vorteile im jeweiligen Einsatzgebiet. So ist laut KHS die Anlage Innopro LOG-2 besonders dazu geeignet, im schwierigen betrieblichen Umfeld eine optimale und sichere Reinzucht zu liefern. Allerdings ist diese durch den erhöhten apparativen Aufwand etwas kostenintensiver als die Anlage Innopro LOG-1 [17].

Hefeherführsystem Fa. Alfalaval

Die Fa. Alfalaval bietet eine sog. Eintank-Propagationsanlage an. Je nach Bedarf kann die Größe der Anlage entsprechend ausgelegt werden, die Bedienung kann manuell erfolgen, eine vollautomatische Steuerung der Anlage ist ebenfalls möglich [18]. Nach einer CIP und SIP wird der Tank mit einer entweder heißen oder bereits sterilisierten Würze befüllt. Diese wird anschließend über eine integrierte Belüftungslanze belüftet und schließlich die Starterkultur aus einem speziellen Carlsbergkolben (Carlsberg-Flask) überführt. Danach wird die Propagation gestartet. Nachdem die gewünschte Zellzahl erreicht ist, kann der Tankinhalt entweder komplett oder bis auf einen Sumpf, der dann die neue Starterkultur darstellt, entleert werden. Ein Herunterkühlen und Lagern des Tankinhalts ist ebenfalls möglich, eine Homogenisierung des Tankinhaltes erfolgt durch einen „Hygenic Yeast Mixer“.

Die Bauart dieses Systems entspricht dem Eintank-Verfahren nach Prof. Wackerbauer (vgl. Abbildung 1).

Weitere Herführsysteme

Zusätzlich zu den eben beschriebenen Verfahren bzw. Methoden ist noch eine Vielzahl anderer Herführsysteme verschiedener Anbieter auf dem Markt erhältlich, so bieten z.B. die Firmen Nerb, GEA Huppmann Tuchenhagen, Kaspar-Schulz entsprechende selbstentwickelte Systeme an.

2.1.2 Überblick Hefeherführung

Für gleichmäßige Gärungen, aus denen qualitativ hochwertige Biere hervorgehen, benötigt der Brauer eine Hefe mit gutem physiologischen Zustand und einem hohen Lebendanteil. Um diese Ziele zu verwirklichen, wird die Hefe, sofern keine Erntehefe zum Anstellen eingesetzt wird, im Betrieb solange vermehrt, bis eine ausreichende Zellzahl zum Anstellen eines Sudes vorhanden ist. Das Ziel der Propagation hat Wackerbauer [12] in einem Satz formuliert: „In kürzester Zeit möglichst viel Hefe unter sterilen Bedingungen zu produzieren, mit einem korrekten Stoffwechsel, der zu normaler Gärung und damit zu guter Bierqualität führt.“

Zahlreiche Autoren beschreiben die Vorteile moderner Hefeherführsysteme [7, 10, 13, 19-26]:

- Schnellere Angärung
- Verringerung der Gärdauer
- Geringer Anteil toter Zellen in der Anstell- und Erntehefe
- Schnellerer pH-Sturz und niedrigerer End-pH
- Verbesserte Diacetylreduktion
- Höhere mikrobiologische Sicherheit durch Selektionsdruck
- Verbesserte sensorische Eigenschaften der produzierten Biere
- Verbesserung der Geschmacks- und kolloidalen Stabilität

In den letzten Jahren wird vermehrt über die erfolgreiche Inbetriebnahme von Herführanlagen im Eintank-Verfahren berichtet [25, 27, 28]. WESTNER [29] liefert eine Gegenüberstellung von Ein- und Zwei-Tank-Verfahren. Während das Eintankverfahren einen geringeren apparativen Aufwand mit sich bringt, ist hier ein mikrobiologisches Restrisiko aufgrund einer fehlenden Würzesterilisations-

möglichkeit vorhanden. Diese mikrobiologische Sicherheit bietet das Zwei-Tank-Verfahren, dafür ist der technische Aufwand hier größer.

Die Belüftung erfolgt dabei oftmals im Umpumpbetrieb [20, 21, 26, 27, 30]. Bezüglich der Rückführung der Umpumpleitung in den Herföhrtank berichtet ein Autor über eine tangentielle Einleitung [27]. Laut anderen Veröffentlichungen [31, 32] muss die Rückführung in den Tank im optimalen Durchmischungswinkel von 23° zum Radius erfolgen. Eine tangentielle Einleitung führt analog dem Whirlpoolprinzip zu einer Rotation des Tankinhaltes, es bildet sich im Zentrum eine Totzone ohne Durchmischung und Belüftung aus. In den meisten Veröffentlichungen wird nur über ein Umpumpverfahren berichtet, auf die Art der Rückführung in den Tank wird nicht näher eingegangen.

Alle Autoren nennen die gleichen Anforderungskriterien an die technische Ausstattung der Herföhranlagen. So sollte eine größtmögliche biologische Sicherheit durch ein geschlossenes System und konstruktive Aspekte wie Behälterdesign, Hygienic-Design, Oberflächengestaltung, Verrohrung und möglichst wenig innere Einbauten gewährleistet werden [27, 30]. Des Weiteren ist es notwendig, dass die Belüftungseinheit eine Feinstverteilung der Luft garantiert. Eine Möglichkeit zur Sterilbeimpfung, Homogenisierereinrichtungen, Temperier- und Dosiersysteme sowie die Möglichkeit zur repräsentativen Probenahme sollte bei allen modernen Anlagen verwirklicht sein [30]. Innere Einbauten sollten aus mikrobiologischer Sicht vermieden werden. GEIGER [33] gibt hier aber zu bedenken, dass bei Verzicht auf ein Rührwerk und vorhandener Innenbelüftungseinrichtung eine Homogenisierung des Tankinhaltes nur durch Luftzufuhr erfolgen kann.

SPECKNER [26] nennt einen notwendigen Steigraum von 50 % des Tankvolumens, um der Schaumbildung zu begegnen. Laut LEHMANN [34] soll ein Steigraum von 30 bis 40 % eingeplant werden. Die gleiche Zahl von 40 % nennt BÖE [21], allerdings nur bei Einsatz einer Belüftungslanze, auf deren Bauart nicht weiter eingegangen wird. KAUFMANN [27] berichtet dagegen über eine Anlage mit einem Bruttoinhalt von 80 hl, die aber lediglich mit 35 hl befüllt wird, um genügend Steigraum für den Schaum zur Verfügung zu haben, was 56 % entspricht. THIELE et al. [35] sprechen in Hinsicht auf eine gute Vermehrungsrate

bei möglichst geringer Extraktabnahme von der Notwendigkeit einer weitestgehenden Vermeidung einer Schaumbildung. In diesem Zusammenhang weisen ANNEMÜLLER et al. [36] auf einen Entzug von für die Hefewachstumsrelevanten Substanzen hin, die sich im Schaum ansammeln.

Bei den Verfahren mit Belüftung im Umpumpbetrieb gibt es verschiedene Aussagen zur Fließgeschwindigkeit während des Umpumpens sowie der Tankumwälzhäufigkeit. LEHMANN [22] nennt eine maximale Fließgeschwindigkeit von 1,5 m/s, um eine übermäßige Schaumbildung zu vermeiden und die Hefe nicht unnötig zu belasten. Weiter empfiehlt er, die Pumpe für das Umpumpen so zu dimensionieren, dass eine Umwälzung des Tankinhaltes einmal pro Stunde gewährleistet ist. Bei der Fließgeschwindigkeit bezieht er sich auf eine Leitung mit konstant gleichem Durchmesser, da bei eingebauten Belüftungsdüsen die Fließgeschwindigkeit im verengten Bereich um ein Vielfaches ansteigt. Weiter befürwortet er aufgrund seiner Erfahrungen, bei Zweistoffdüsen vorhandene Querschnittsveränderungen zu entfernen. Bewährt hat sich nach seiner Aussage ein einfaches T-Stück, sofern nach der Belüftung noch eine 2 – 3 m lange Durchmischungsstrecke bis zur Rückführung in den Tank folgt.

Ziel der verschiedenen Propagations- und Assimilationsverfahren auf dem Markt ist die reproduzierbare, mikrobiologisch einwandfreie Gewinnung von Hefe. Dabei sollen die erhaltenen Zellen hochaktiv sein und sich möglichst in der log-Phase befinden. Allerdings ist bei der Herführung darauf zu achten, dass die Zellzahl nicht zu weit ansteigt, da ab ca. 100 Mio. Zellen/ml die Vitalität der Hefe sowie die Qualität des Propagatorjungbieres leidet und somit die Vorteile der Propagation aufheben würde [20, 23, 25, 32, 35, 37]. Andere Autoren nennen dagegen angestrebte Zellzahlbereiche von 160 - 180 Mio./ml [27] bzw. 100 bis 150 Mio. Zellen/ml [29]. SCHMIDT [38] spricht von erreichten Zellzahlen von 170 Mio./ml innerhalb von 24 h bei entsprechenden Propagationstemperaturen. Ein Artikel nennt sogar mögliche Zellzahlen von über 180 – 250 Mio./ml [39]. McLAREN et al. [24] erwähnen in diesem Zusammenhang, dass das Ziel möglichst hoher Vermehrungsraten nicht im Vordergrund stehen darf. Weiter nennen sie mögliche Vermehrungsraten um den Faktor 15 - 20, geben aber zu bedenken, dass eine zu weit führende Vermehrung zu einer Verarmung bestimmter Wachstoffsstoffe führt.

MATTHES [28] bezeichnet erreichte Zellzahlen von 138 Mio./ml bei ersten Propagationen mit neu gebauten Anlagen als einen Garant für das System.

Laut mehreren Autoren ist unter optimalen Bedingungen eine Zellzahlverdopplung innerhalb von 8 h zu erzielen [40]. NIELSEN [41] nennt Verdopplungszeiten von 7,0 bis 7,9 h bei einem System mit innen liegender Belüftung und zusätzlicher Durchmischungsrichtung. Diese Versuche wurden allerdings in einem Pilotmaßstab durchgeführt. Mit einem identischen System erhält CHOLERTON [42] die gleichen Ergebnisse bei Sauerstoffgehalten über 2,0 mg/l. Versuche mit Sauerstoffgehalten unter 0,1 mg/l führten hier überraschenderweise zu geringer ausfallenden Verdopplungszeiten von 6,4 bis 8 h.

In Abhängigkeit von der Herführtemperatur fand SCHMIDT [8] unter Verwendung des Hefestammes 308 in einem Versuchsfermenter ein Vermehrungsoptimum bei 25 °C, von ihm stammt auch die folgende Tabelle:

Tabelle 1: Zellzahlmaxima sowie Vermehrungsdauer bei verschiedenen Herführtemperaturen [8]

Temperatur	max. ZZ [Mio. Z./ml]	ZZ-Maximum nach h	Vermehrungs- faktor	spez. Wachs- tumsrate H ⁻¹
10 °C	78	96 h	7,8 x	0,035
15 °C	200	52 h	11,8 x	0,089
20 °C	204	45 h	12,8 x	0,093
25 °C	220	23 h	12,9 x	0,125
30 °C	139	40 h	8,2 x	0,098

Hieraus ist zu erkennen, dass zwischen den maximal erreichten Zellzahlen (Ausgangszellzahl jeweils 16 Mio./ml) bei Herführtemperaturen von 15 °C, 20 °C und 25 °C nur geringfügige Unterschiede bestehen, die Dauer bis zum Erreichen dieser Zellzahlmaxima aber extrem unterschiedlich ausfällt. Eine weitere Temperaturerhöhung auf 30 °C wirkt sich schließlich negativ aus. Vermutlich hat der verwendete Hefestamm ein Vermehrungsmaximum unter 30 °C (die meisten untergärigen Hefestämme vermehren sich über 33 °C kaum noch). Eine Untersuchung von WACKERBAUER [43] zeigt bei einer obergärigen Hefe eine deutlich schnellere und höhere Hefevermehrung bei 30 gegenüber 20 °C. Evt. liegt den Daten der Tabelle 1 auch ein Fehler zugrunde, z.B. durch eine extreme Schaumbildung infolge erhöhter Stoffwechselaktivität bei den Versuchsreihen mit

zunehmenden Temperaturen. Möglicherweise kam es hier zu einer Anreicherung des Schaums mit Hefezellen, wodurch die Zellzahl verfälscht wurde, oder zu einer Einschränkung des Prozesses infolge einer übermäßigen Schaumbildung. Auffällig ist in der Tabelle 1 der deutliche Unterschied der Zellzahlmaxima und der Dauer bis zu deren Erreichen bei den Herführtemperaturen von 10 °C und 15 °C. Bei 10 °C wird nicht einmal eine Verfünffachung der Ausgangszellzahl von 16 Mio./ml innerhalb von 96 h erreicht, bei 15 °C dagegen eine Verzwölfachung innerhalb 52 h. Dieser Temperaturbereich ist für viele Brauereien untergäriger Biere interessant, da die Gärtemperatur in diesem Bereich liegt. Ist die Differenz zwischen Anstelltemperatur und Herführtemperatur groß, so ist beim Auffüllen der Herführanlage eine Temperaturanpassung der Würze notwendig, was einen separaten Aufwand bedeutet. Besonders bei hohen Herführtemperaturen ist der Nährstoffvorrat schnell verbraucht und der Hefezustand verschlechtert sich bei hohen Zellzahlgehalten und längerer Einhaltung dieses Temperaturniveaus. Über dieses hinaus ist bei extrem hohen Herführtemperaturen die Dauer zum Herunterkühlen des Tankinhaltes auch wesentlich verlängert. WACKERBAUER [43] warnt in diesem Zusammenhang vor zu hohen Differenzen zwischen Herführ- und Anstelltemperatur in Hinsicht auf eine mögliche Schockexkretion von niedermolekularen Zellinhaltsstoffen der Hefe. Eine andere Quelle rät zu Temperaturdifferenzen von max. 4 °C [44], die BACK et al. [13] mit 2 – 4 °C bestätigen. Weiter führten die Versuche von Wackerbauer in Hinsicht auf das Flockulationsverhalten mit Gärungen unter Einsatz der ersten Hefeführung zu dem Ergebnis, dass eine Gärung mit bei einer Herführtemperatur von 10 °C gewonnenen Hefe zu der besten Flockulation mit anschließendem Absetzen führt. Diese Aussage sollte allerdings kritisch betrachtet werden, da die Flockulation zum einen sehr hefestammspezifisch und von diversen weiteren Faktoren, die auch kurzfristig deutlichen Schwankungen unterlegen sein können, wie z.B. dem Calciumgehalt der Würze, abhängig ist [45, 46].

In einer weiteren Veröffentlichung nennen WACKERBAUER et al. [12] die Temperatur, den Sauerstoff- sowie den CO₂-Gehalt als entscheidende Parameter für höchste Vermehrungsraten. Der Sauerstoff ist für die Bildung von ungesättigten Fettsäuren sowie Lipiden und Sterolen essentiell [47]. Zu hohe CO₂-

Gehalte hemmen die Hefevermehrung. ANNEMÜLLER und MANGER [36] berichten über eine Hemmung ab einer CO₂-Konzentration von 1 g/l.

In Hinsicht auf die notwendige Belüftung während der Hefevermehrung wird teilweise vor zu hohen Sauerstoffgehalten gewarnt [36]. Die in der Literatur genannten Belüftungsvorschläge sind sehr vielseitig. WACKERBAUER et al. [12] empfehlen eine fünfminütige Belüftung und anschließend eine Pause von 1 min. Weiter raten sie aber zu einer Steuerung des O₂-Eintrags nach der Gewährleistung eines Mindestanteils an gelöstem Sauerstoff von 0,1 mg/l. Nach BACK et al. [13] sollten dagegen O₂-Konzentration von 1 – 5 mg/l aufrecht erhalten werden. PÖTZL [48] rät zu 5 min Belüftung pro 30 min Propagationsdauer.

In einer Modellberechnung geben ANNEMÜLLER et al. [36] eine Luftmenge von 110 l Luft/hl Ausschlagwürze an, die für den höchstmöglichen Hefezuwachs (2,75 g Hefetrockensubstanz/l Ausschlagwürze) innerhalb von 42 – 44 h bei einer Temperatur von 15 °C notwendig ist. Hier wird aber darauf verwiesen, dass die Hefevermehrung nicht linear verläuft und dieser Wert nur einen Durchschnittswert bezogen auf die gesamte Herföhrdauer darstellt. Eine weiterführende Modellrechnung führt zu dem Ergebnis, dass schon bei einer Hefeherföhranlage mit nicht optimaler Sauerstofftransportrate von 2,86 mg O₂/l*min in der Endphase der Hefevermehrung eine Belüftung von 4 x 21 min während 10 h Herföhrdauer (und dem in dieser Zeit möglichen Hefezuwachs) ausreichend ist. KURZ [49] stellte fest, dass Sauerstoffkonzentrationen zwischen 1 und 8 mg/l nur einen geringen Einfluss auf die Wachstumsgeschwindigkeit haben, erst bei besonders niedrigen Konzentration unter 1,5 mg/l ist ein Rückgang der Wachstumsgeschwindigkeit zu verzeichnen.

Eine Reinzucht mit Belüftung mittels reinem Sauerstoff führte bei WACKERBAUER et al. [12] zu einer leichten Verzögerung des Vermehrungsbeginns gegenüber einer Reinzucht mit normaler Belüftung. Hier wurde anhand der Versuchsergebnisse eine förderliche Wirkung des reinen Sauerstoffs ausgeschlossen. Weiter kommen sie zu dem Ergebnis, dass eine kontinuierliche Belüftung gerade bei höheren Zellzahlgehalten zu besten Vermehrungsergebnissen führt. Dies ist sinnvoll, da gerade bei hohen

Zellzahlgehalten der gelöste Sauerstoff während Phasen ohne Belüftung schnell aufgezehrt sein kann und die Hefezellen dann in die Gärung verfallen.

Eine ausreichend hohe Zinkversorgung durch die Würze wird von vielen Autoren vorausgesetzt [43, 50], ebenso ist der FAN-Gehalt zu beachten. ANNEMÜLLER et al. [44] vergleichen den Bedarf an Nähr-, Wuchs- sowie Mineralstoffen der gut erforschten Backhefe mit dem Angebot der entsprechenden Substanzen in einer Bierwürze. In diesem Zusammenhang stellen sie ein deutliches Defizit (bezogen auf die Verstoffwechslung von 100 kg Zucker) an assimilierbarem Stickstoff, Zink sowie Eisen fest. Darüber hinaus ist in der Bierwürze ein Mangel an dem essentiellen Vitamin Pantothenensäure festzustellen.

Untersuchungen zur Propagation mit Würzen unterschiedlichen Stammwürzegehaltes führten CAHILL et al. [51] durch. Dabei führten Propagationen mit erhöhten Stammwürzegehalten zu gesteigerten Gewichtsmengen an Hefe. Damit einhergehend wiesen die bei höheren Platograden hergeführten Hefezellen deutlich höhere Zellvolumina auf als bei der Herführung mit Würzen geringerer Stammwürzegehalte. Beim Anstellen von High-Gravity Gärungen mit einer Hefemenge nach Gewicht pro angestelltem Volumen führten die bei hohen Platograden vermehrten Hefen zu deutlich verzögerten Gärungen, bzw. zu einem verlangsamten Extraktabbau. Ein Anstellen nach Hefezellzahl führte zu gleichmäßigen Gärungen. In diesem Fall resultiert aus den höheren Zellvolumina kein praxisrelevanter Vorteil.

Sofern eine Herföhranlage im Einsatz ist, die nach dem Repeated-Feed-Batch Verfahren arbeitet, wird ein kompletter Neuansatz alle 3 bis 6 Monate empfohlen. FISCHBORN et al. [50] raten an dieser Stelle zu einer regelmäÙigen Stamm- und Typvariantenkontrolle auf Basis einer DNA-Analyse.

Mehrere Autoren sehen ein Problem in der genauen Abstimmung zwischen ausreichender Belüftung der Hefe sowie der Homogenität im Tank, um keine Nährstoffgefälle zu erzeugen und auch gebildetes CO₂ auszutreiben sowie einer Minimierung von Hefestress [36, 52].

QUAIN und BOULTON [53] erzielten Hefe überragender Qualität aus Propagationen mit Mannitolzusatz. Diese Hefe ist hochwertiger als alle Hefen aus konventionellen Herführverfahren. Aufgrund erhöhter intrazellulärer Sterolgehalte kann beim Anstellen von Gärungen mit dieser Hefe die Anstellzellzahl reduziert werden. Ebenso fanden die Autoren während der Lagerung dieser Hefe bei 4 °C lediglich eine Abnahme der Viabilität über einen Zeitraum von 300 Tagen von nicht einmal 10 %.

2.2 Hefeernte und Behandlung der Erntehefe

Überblick der Entwicklung

Bis zur Einführung von ZKGs wurden die Gärungen früher in offenen Bottichen durchgeführt. Die Hefeernte erfolgte schließlich nach dem Schlauchen des Jungbieres. Die sedimentierte Hefe wurde mit Hilfe eines Hefeschiebers zu einem Auslass des Bottichs geschoben, unter dem sich ein geeignetes Sammelbehältnis, z.B. in Form einer Hefewanne, befand. Aus dieser Zeit stammen noch die bekannten Begriffe Vorzeug oder Oberhefe, Kernhefe und Unterzeug oder Unterhefe, wobei die Kernhefe die gesunden und gärkräftigen Hefen repräsentiert [6]. Eine separate Ernte der einzelnen Schichten ist aufgrund der geringen Schichtdicken schwierig und von der Art und Form des jeweiligen Gärbehältnisses abhängig. Die Hefe wurde üblicherweise in Hefewannen unter Kühlung von 0 bis 2 °C gelagert.

Durch die zunehmende Automatisierung und Umrüstung auf ZKGs werden die früher üblicherweise praktizierten Hefebehandlungsverfahren nicht mehr in allen Brauereien angewendet.

Hefeernte, Behandlung der Erntehefe, Hefelagerung und Stress

Die Hefe ist grundsätzlich in allen Abteilungen einer Brauerei Stress ausgesetzt und kann entsprechend geschädigt werden, dabei spielt in den meisten Fällen eine Schädigung der Zellmembran eine Rolle. Eine Übersicht gibt VAN ZANDYCKE [54] entsprechend folgender Tabelle:

Tabelle 2: Übersicht der auf die Hefe wirkenden Stressfaktoren [55]

Herführung	Anstellen	Gärung	Ernte	Lagerung
Oxidation	Oxidation	Alkohol	Alkohol	Oxidation
Scherkräfte	Scherkräfte	Scherkräfte	Scherkräfte	Scherkräfte
		Osmotischer Druck (Stark- + High-Gravity Biere)	Mangel an Wuchsstoffen	Mangel an Wuchsstoffen
		Hydrostatischer Druck		Temperatur
		pH-Wert		Alkohol
				pH-Wert

Dabei ist ersichtlich, dass während der Lagerung die meisten Stressfaktoren auf die Hefe einwirken können.

Bezüglich der Scherkräfte muss zwischen technisch vermeidbaren und technisch unvermeidbaren unterschieden werden. Auftretende Scherkräfte durch falsche Pumpentypen bzw. falsche Pumpenauslegung oder Rührwerke sollten auf jeden Fall minimierbar sein. Technisch nicht vermeidbare Scherkräfte treten z. B. in Rohrleitungen, Rohrleitungsbögen, Querschnittsverengungen durch Ventilknoten u.ä. auf, die dabei auftretenden Scherkräfte sind auch von der Hefekonsistenz abhängig.

Der hydrostatische Druck während der Gärung ist von den jeweiligen baulichen Gegebenheiten in den Brauereien abhängig. Da die Hefe erst im Laufe der Gärung sedimentiert, kann der negative Einfluss aus dem Druck durch eine frühzeitige Hefeernte minimiert werden, wobei ein Druck von bis zu einem bar als nicht besonders nachteilig angesehen wird. Grundsätzlich wird geraten, mehrfache Hefeerntes durchzuführen [5, 56]. Dies gilt insbesondere, wenn es um die Gewinnung einer hochvitalen Hefe zum Anstellen geht. Durch eine verfrühte Hefeernte lässt sich auch die Problematik des Nährstoffmangels sowie der ansteigenden Temperatur im Inneren der sedimentierten Hefe zum Gärnde hin umgehen.

In einigen deutschen Brauereien und im Ausland ist das früher regelmäßig praktizierte Hefewaschen heute noch eine übliche Verfahrensweise der Hefebehandlung nach der Ernte. KIENINGER et al. [57] beschreiben in diesem

Zusammenhang eine Beurteilung des Hefezustandes anhand der Farbe (1984). Dieses mag früher vielleicht eine Möglichkeit gewesen sein, die Qualität einer Hefe abzuschätzen. Aus heutiger Sicht ist diese Aussage eindeutig überholt, da auch Hefen mit schlechter Vitalität sowie hohen Anteilen toter Zellen optisch gut erscheinen können. Weiter raten sie aufgrund ihrer Ergebnisse, bei Verzicht auf eine Hefewäsche die Hefe maximal über zwei bis drei Führungen einzusetzen. Bereits einige Zeit zuvor (1981) hatten sie darauf hingewiesen, dass es durch das nicht-Waschen und nicht-Sieben zu deutlichen Anreicherungen mit Polyphenolen, Anthocyanogen und Bitterstoffen seitens der Hefe kommt [58]. Diese Aussage ist zwischenzeitlich überholt, der beschriebene Sachverhalt ist heute Stand der Technik, da die Brauereien ihre Hefe mehrmals führen und dies in den meisten Fällen ohne irgendeine Behandlung. SCHMIDT [59] rät grundsätzlich von einem Schlämmen der Hefe mit Wasser ab, die letzten Nährstoffe werden dabei aus der Hefe entfernt und es werden auch Bitterstoffe ausgeschwemmt, die bei der nächsten Gärung wieder vermehrt adsorbiert werden, wodurch es hier zu erhöhten Verlusten im Bier kommt. Er empfiehlt, die Erntehefe unter einer Schicht Jungbier aufzubewahren [38]. Eine andere Veröffentlichung bezeichnet Jungbier mit etwas Restextrakt bzw. endvergorenes Bier mit anteiligem Würzezusatz als optimal geeignet [56].

Detailliert beschreibt NARZIß [60] sämtliche möglichen Vorrichtungen zum Waschen der Hefe wie Hefewanne, Schlämbottich, Schlämmtrichter und Schlämmring. Diese Verfahren wurden früher in fast allen Brauereien angewendet, heute sind sie nur noch vereinzelt in kleineren Brauereien vorzufinden.

CUNNINGHAM und STEWART [61] verweisen im Zusammenhang des Hefewaschens mit Säurezusätzen auf Louis Pasteur (1873). Seitdem er erkannt hat, dass die Fehlgeschmäcker im Bier auf einer Kontamination der Hefe mit anderen Mikroorganismen beruhen, wurde das Hefewaschen mittels einer Weinsäurelösung praktiziert, um Bakterien zu entfernen. Nach BOULTON und QUAIN [46] wird der pH-Wert zum Waschen auf 2,2 bis 2,5 erniedrigt und die Hefe so einige Stunden bei einer Temperatur von unter 4 °C aufbewahrt. Als Säure kommt hauptsächlich Phosphorsäure evt. in Kombination mit Ammoniumpersulfatlösung zum Einsatz. Dabei soll eine Hefewäsche bei

Kombination beider Substanzen und einem pH-Wert von 2,8 effektiver sein als eine Wäsche ausschließlich mit Phosphorsäure bei einem pH von 2,2. Versuche von CUNNINGHAM und STEWART [61] zum Hefewaschen über fünf Führungen mittels Wasser, Phosphorsäure und Ammoniumpersulfatlösung zeigten keinen signifikanten Einfluss auf Gärungen mit 12 ° Plato-Würzen. Bei Gärungen mit 20 ° Plato-Würzen waren dagegen signifikante Unterschiede zu verzeichnen. Hier dauerten die mittels Ammoniumpersulfatlösung sowie Phosphorsäure gewaschenen Hefen angestellten Gärungen deutlich länger als die Vergleichsgärung der ersten Führung. Durch den erhöhten Stress aufgrund des hohen Extraktgehaltes sowie hohen Alkoholgehaltes zum Gärende war die Fähigkeit der Hefen, die Waschlösungen zu tolerieren, herabgesetzt. Später berichtet STEWART [62], dass sich dieses Problem nicht einstellt, wenn die Hefe vor der Säurezugabe auf unter 5 °C abgekühlt wird und die Waschlösung ebenfalls die gleiche Temperatur aufweist. VAN BERGEN und SHEPPARD [63] verweisen in diesem Zusammenhang auf zunehmende Gehalte des Anteils toter Zellen von Hefen, die mittels Phosphorsäure bzw. Phosphorsäure mit Ammoniumpersulfatzusatz gewaschen und anschließend Scherkräften ausgesetzt werden. Bei mit Wasser gewaschener Hefe fiel die Zunahme toter Zellen dagegen gering aus.

Bereits 1985 führten McCAIG und BENDIAK [64] Versuche zur Lagerung von Erntehefen durch. Sie zeigten eindeutig, dass erhöhte Aufbewahrungstemperaturen zu schneller ansteigenden Gehalten an toten Zellen führen. Gärungen mit den wärmer gelagerten Hefen wiesen verlängerte Gärzeiten sowie erhöhte Diacetylmaxima und –endkonzentrationen auf als die Gärungen mit bei niedrigeren Temperaturen gelagerten Hefen. Im Jahr 2000 zeigten Versuche von EILS et al. [65], dass die Lagerung einer Erntehefe bei einer erhöhten Temperatur bereits innerhalb von 3 Tagen zu einer deutlichen Zunahme des Totanteils führt. Die Hefeernte erfolgte hierbei mit Gärtemperatur in einen kühlbaren Hefetank. Während der dreitägigen Lagerung nahm die Hefetemperatur lediglich von 11,4 °C auf 8,3 °C ab. Hier wurde auf eine Studie über die Ausbildung thermischer Gradienten bei Erntehefe verwiesen, die zeigt, dass eine gleichmäßige Kühlung der Hefe ohne eine Homogenisierung des Tankinhaltes nicht realisierbar ist. Aus

mikrobiologischen Bedenken sollte der Einsatz eines Rührwerks aber vermieden werden.

Heute wird geraten, die Hefe möglichst bei Temperaturen von 0 - 3 °C aufzubewahren, um die Stoffwechselvorgänge zu minimieren [5]. Eine Veröffentlichung nennt 4 °C als Maximaltemperatur [66]. Bewährt hat sich hierzu das Herunterkühlen der Hefe während der Ernte durch einen Hefetiefkühler, der dem Erntehefetank vorgeschaltet ist [5, 67]. In diesem Zusammenhang erwähnen HEGGART et al. [68], dass die Hefezellwände durch die plötzliche Abkühlung Risse bekommen können. Um die Membranfluidität bei kalten Temperaturen zu erhalten, erfolgt in der Hefezellwand eine Veränderung des Sterolgehalts sowie des Verhältnisses von ungesättigten zu gesättigten Fettsäuren und deren Kettenlänge. Laut EILS et al. [65] entfällt bei Herunterkühlen der Hefe über einen Tiefkühler im Verlauf der Ernte die Notwendigkeit eines Rührwerks im Erntehefetank oder einer Umpumpvorrichtung zur Gewährleistung einer besseren Wärmeübertragung und damit effektiveren Abkühlung der Hefe. Eine gut gekühlte Hefe bleibt dann auch im Tankinneren für mehrere Tage kalt. Eine Homogenisierung wird dadurch überflüssig. In diesem Zusammenhang zeigten Versuche von STOUPIŠ et al. [69] eindeutig, dass eine mechanische Behandlung zur Homogenisierung von Hefesuspensionen gegenüber einer Hefelagerung ohne Bewegung zum schnelleren Absterben von Zellen führt. Zusätzlich ist in den behandelten Hefen ein Anstieg der Proteinase A-Aktivität sowie des pH-Wertes nachzuweisen. Auf die Gärverläufe hatte die Hefebehandlung keinen signifikanten Einfluss, die Biere wiesen aber deutlich verschlechterte Schaum- und Trübungswerte auf. Eine andere Veröffentlichung [64] bestätigt die Zunahme toter Zellen bei kontinuierlicher Bewegung der Erntehefe, dies führt zudem zu einem deutlichen pH-Anstieg in der Hefesuspension. In diesem Fall führte die Verwendung der permanent gerührten Hefe gegenüber einer unbehandelten sowie einer zwei Stunden pro Tag gerührten Hefe zu einer deutlich verlängerten Gärzeit und zu einem nicht akzeptablen Diacetylgehalt. Sie raten anhand der Ergebnisse zu einer Hefeaufbewahrung unter Bier. Es sollte nur kurzzeitig gerührt werden, sofern eine homogene Hefe benötigt wird.

POWELL et al. [70] führten Untersuchungen zu Schichtungen der sedimentierten Hefe in ZKGs durch. Sie berichten über eine Ansammlung älterer Hefezellen im Zentrum der sedimentierten Hefe. Trotz deutlich erhöhter pH-Werte in den zuerst sedimentierten Hefeschichten waren hier entgegen den Erwartungen die höchsten Anteile lebender Zellen vorzufinden. An anderer Stelle [71] berichten sie über schnellere Vergärungen bei Einsatz von älteren Hefezellen gegenüber Zellen, die noch nicht gesprosst haben. Zellen, die bereits eine Sprossung hinter sich haben, besitzen eine höhere Oberflächenhydrophobizität gegenüber jungfräulichen Hefezellen, des Weiteren weisen sie eine höhere Flockulationsneigung auf.

MÖNCH et al. [72] berichten, dass die toxische Wirkung hoher Alkoholkonzentrationen eher die Vermehrung und den Lebendanteil der Zellen negativ beeinflusst als deren Gärleistung.

JENKINS et al. [73] untersuchten eine Erntehefe über 6 Führungen. Dabei konnten keine signifikanten Veränderungen der Viabilität der Erntehefe sowie ihres Glycogengehalts über die Führungen festgestellt werden. Untersuchungen an einer Alehefe von POWELL und DIACETICS [74] über 98 Führungen zeigten keine Veränderungen im Gärverhalten auf. Über diesen Zeitraum erfuhr die Hefe ebenfalls keine genetischen Veränderungen.

Mehrmals wird über die Vorteile einer Vitalisierung der gelagerten Erntehefe vor dem Anstellen berichtet [48, 75]. Zu diesem Zweck erfolgt eine Belüftung der Erntehefe vor dem Anstellen. Die so behandelten Hefen weisen im Vergleich zu unbehandelten Hefen nach einer Aufbewahrungszeit von 24 h einen erhöhten Lebendanteil, höheren Glycogengehalt und höhere Gärkraft auf [72]. Andere Autoren verweisen in diesem Zusammenhang ebenfalls auf die Vorteile, empfehlen aber einen raschen Verbrauch der belüfteten Hefe. WACKERBAUER et al. [56] raten in Zusammenhang mit ungünstigen Gärbedingungen sogar zu einem Belüften der Hefe direkt nach der Ernte sowie einer Zweitbelüftung vor dem Anstellen. Versuche von OHNO und TAKAHASCHI [76] zeigten in einer Erntehefe während der ersten vier Stunden nach einer Belüftung deutliche Zunahmen des Gesamtfettgehaltes. Nach BACK et al. [22] darf die Hefe zum Zeitpunkt der Ernte

auf keinen Fall aktiv belüftet werden, da sonst aufgrund eines fehlenden Zuckerangebotes ein Abbau der Reservestoffe und somit eine Schwächung der Zellen erfolgt. Eine Belüftung der Hefe sollte grundsätzlich nur erfolgen, wenn sie unmittelbar danach verbraucht wird oder wenn vor dem Vitalisieren frische Würze zugesetzt wurde, um einem Nährstoffmangel vorzubeugen.

Laut SALL et al. [77] korreliert der intrazelluläre Glycogengehalt nicht mit der Gärleistung einer Hefe. Dies bestätigen CANTRELL und ANDERSON [78], sie weisen in Hinsicht auf die Gärleistungen dem Lipidgehalt der Würze einen wesentlich höheren Stellenwert zu als dem Glycogengehalt der Hefe. Dagegen fanden MURRAY et al. [79] eindeutig verlängerte Gärzeiten bei Hefen mit vermindertem Glycogengehalt. Bei einer warmen Hefelagerung wird intrazelluläres Glycogen wesentlich schneller abgebaut als bei einer kalten Aufbewahrung, das bestätigen auch McCAIG und BENDIAK [64]. Der gleiche Effekt tritt bei einer Hefeaufbewahrung unter Sauerstoff ein.

In einer neuen Publikation aus dem Jahr 2005 berichtet EDGERTON [80] über einen Zusammenhang zwischen den Bittereinheiten eines Bieres und der Viabilität der daraus geernteten Hefe. Er zeigt hier auf, dass die aus Jungbieren mit hohen Bittereinheiten (45 - 50 BU, n = 36) geerntete Hefe über 46 Führungen durchschnittlich 8 % mehr tote Zellen aufwies als die aus einem Bier mit weniger Bittereinheiten (18 - 25 BU, n = 30) geerntete Hefe. Genaue Angaben zum Zeitpunkt der Hefeernte und den Gärbedingungen werden an dieser Stelle aber nicht gemacht, daher kann die festgestellte Differenz möglicherweise auch andere Ursachen haben.

DAISUKE et al. [81] fanden einen Zusammenhang zwischen der Hefebelüftung und daraus resultierenden intrazellulären Trehalosegehalten. Hefen ohne Trehalosevorrat weisen veränderte Gär- sowie Esterbildungseigenschaften auf. In diesem Zusammenhang sollte auch ein Sauerstoffeintrag vor oder während einer längeren Hefeaufbewahrung vermieden werden, da dieser zum Trehaloseabbau führt. ALEXANDRE et al. [82] fanden heraus, dass Trehalose der Hefezelle als Schutzsubstanz gegenüber Stressfaktoren und hier besonders gegenüber einem durch erhöhte Temperaturen induzierten Stress dienen kann.

JENKINS et al. [73] zitieren eine Vielzahl bestehender Veröffentlichungen, laut denen Trehaloseanhäufung in Hefezellen mit Ethanolstress, Hitzeschocks, Austrocknung, Scherkräften, osmotischem Stress, Exposition toxischer Substanzen sowie abnehmender thermischer Stabilität von Proteinen einhergeht. Der Zweifachzucker dient der Zelle als Stressschutz, kann an der Plasmamembran angehäuft der Stabilität und der Zelle als Kohlenstoffquelle während Mangelzuständen dienen.

2.3 Anstelltechnologie

Sofern in einem Gärtank mehrere Sude nacheinander angestellt werden, hat sich die Dosage der gesamten Hefe für den Tank zum jeweils ersten Sud sowohl auf die Gärung als auch auf die Bierqualität als am günstigsten erwiesen [83, 84]. Dies bestätigen EILS et al. [65]. Eine auf alle Sude aufgeteilte Hefegabe führte zu verlängerten Gärzeiten, einer schlechteren Endvergärung, einem geringeren pH-Sturz sowie einem erhöhten Diacetylgehalt zum Gärende. Die Erntehefe der mit aufgeteilter Hefegabe angestellten Sude zeigte zudem schlechtere ICP-Werte auf und die so hergestellten Biere wiesen erhöhte Gehalte an Alterungsindikatoren im forciert gealterten Zustand auf.

Laut KUNZE [6] soll das Anstellen mit einer Hefezellzahl von 20 – 30 Mio./ml erfolgen. WACKERBAUER [11] kommt nach zahlreichen Untersuchungen zu dem Ergebnis, dass die Erhöhung der Hefegabe die wichtigste Möglichkeit ist, die Gärung zu beschleunigen, ohne dass sich nachteilige Folgen einstellen. Nach NARZIß [60] sollte die Hefegabe etwa 15 Mio. Zellen/ml betragen, in Abhängigkeit von weiteren Faktoren, wie z.B. der Gärtemperatur, kann sie variiert werden. Hier wird die Verkürzung der Gärzeit durch Erhöhung der Anstellzellzahl bestätigt. In diesem Zusammenhang wird auf aus höheren Anstellmengen resultierende geringere Erntehefemengen verwiesen. Generell führen erhöhte Anstellzellzahlen zu einer Konkurrenz der Hefezellen um Sauerstoff sowie Wachstumsstoffe, daraus resultiert eine geringere Vermehrung und es kommt zu einer mangelnden Verjüngung der Kultur [85]. Im Zusammenhang mit Erhöhungen der Anstellzellzahl sollten unbedingt die neuen Erkenntnisse von THIELE [3] bedacht werden. Er zeigt deutlich, dass erhöhte Hefegaben zu Bieren mit verschlechterter Alterungsstabilität führen.

Das Anstellen mit einer hitzeschockbehandelten Hefe (20-minütige Erwärmung auf 37 °C vor dem Anstellen) führte in Versuchen sowohl bei drucklosen Gärungen mit 12 °C als auch bei Druckgärungen mit einer Gärtemperatur von 20 °C zu deutlich verkürzten Gärzeiten [72]. Diese Aussage sollte aber nicht als allgemeingültig aufgefasst werden. Bei hochvitalen Hefen mag die Erwärmung positiv auf die Stoffwechselaktivitäten wirken, so dass daraus die festgestellten verkürzten Gärzeiten resultieren. Bei Hefen, die sich in einem schlechten physiologischen Zustand befinden, kann sich diese Erwärmung aber auch in einem extremen Stress äußern, der zu einer weiteren Verschlechterung der Hefequalität führt.

In mehreren Brauereien haben sich inzwischen Systeme etabliert, bei denen die Hefegabe qualitativ sowie quantitativ erfolgt [86, 87]. Während der laufenden Hefedosage beim Anstellen wird die dosierte Lebendzellzahl gemessen und die Hefegabe ggf. angepasst.

Aus finanziellen und technologischen Gründen wird eine Vermischung von Assimilationshefe und Erntehefe als günstig angenommen [22, 88, 89]. Die Erntehefe ist bereits an den Gärprozess adaptiert und es findet somit in den ersten Führungen ein schneller Extraktabbau statt, während die Assimilationshefe auf pH-Sturz, Diacetylreduktion, Geschmack und Geruch durch ihre hohe Vitalität und Aktivität großen Einfluss nimmt [22, 88].

Die meisten Autoren empfehlen eine Würzebelüftung auf die unter normalen Umständen maximal erreichbaren 8 bis 10 mg O₂/l [5]. Eine interessante Übersicht diesbezüglich zeigen BOULTON und QUAIN [46]. Während bei einer Würzebelüftung mit Luft je nach Abhängigkeit der Würzedichte sowie ihrer Temperatur maximal Gehalte an gelöstem Sauerstoff von bis zu 11 mg/l erreicht werden können, führt die Verwendung von reinem Sauerstoff zu Sauerstoffkonzentrationen von bis zu 55 mg/l. BACK [5] bestätigt Gehalte von über 20 mg/l an gelöstem Sauerstoff in der Würze bei Einsatz von reinem Sauerstoff zur Belüftung. Dadurch kann es zu einem veränderten Gärungsprofil und geringerer Gärungseffizienz kommen, da ein großer Teil des Extraktes für die Biomasseneubildung verwendet wird.

Nach OHNO et al. [76] reicht eine Würzebelüftung von 10 mg O₂/l je nach dosierter Hefemenge nicht aus, damit die Hefe den theoretisch maximal möglichen Fettstoffwechsel durchführen kann. In diesem Fall raten sie bereits zu einer Hefebelüftung vor dem Anstellen. Das gleiche empfehlen DAISUKE et al. [81] für den Fall, dass die angemessene Belüftung von 2 g O₂/g Hefe nicht zu dem gewünschten Gärungsverlauf führt.

Laut SASAKI et al. [90] führte eine 30-minütige Belüftung unmittelbar nach dem Anstellen mit steigenden Sauerstoffgehalten zu verlängerten Gärzeiten, später einsetzender Zellteilung, höheren Gehalten an Essigsäure im Bier sowie einem geringer ausfallendem FAN-Abbau. NARZIß [60] bestätigt ebenso wie BACK [5] mögliche negative Beeinflussungen der Hefe unter Verwendung von reinem Sauerstoff zum Anstellen.

2.4 Hefestoffwechselprodukte

2.4.1 Bildung der Ester und höheren Alkohole

Durch die Variation der Gärungsparameter Hefestamm, Belüftungszeitpunkt und -intensität sowie Anstellzellzahl im Rahmen der Versuche dieser Arbeit werden teilweise auch einige der Bieraromastoffe deutlich beeinflusst. Da die Bildung dieser Stoffe ein sehr komplexes Thema darstellt, wird an dieser Stelle auf die Bildungswege bzw. die Beeinflussung der Bildung nicht näher eingegangen. Eine sehr gute Übersicht über die Esterbildung sowie die Entstehung der höheren Alkohole ist in der Dissertation von THIELE [3] ausführlich beschrieben.

2.4.2 SO₂-Bildung

Allgemeines

Das SO₂ stammt grundsätzlich aus dem Aminosäurestoffwechsel der Hefezellen und wird während der Gärung an das Jungbier abgegeben. Es kann durch seine reduzierende Eigenschaft sowie seine Fähigkeit, mit Carbonylverbindungen Komplexe zu bilden, Einfluss auf die Geschmacksstabilität des Bieres ausüben [91, 92]. Die aus dem Sudhaus kommende Würze enthält nur gelegentlich geringe Mengen an SO₂ [93]. Selbst wenn das Malz intensiv geschwefelt worden sein sollte und ein ebenfalls geschwefelter Hopfen verwendet wurde, ist in der

Anstellwürze praktisch kein SO_2 mehr vorhanden, da es sich hierbei um eine leichtflüchtige Substanz handelt (Siedepunkt $-10,02\text{ °C}$), die spätestens während des Würzekochens ausgetrieben wird.

Auch wenn das SO_2 auf natürlichem Wege in das Bier gelangt, muss es entsprechend der LMKV ab einem Gehalt von $10,0\text{ mg/l}$ deklariert werden.

In dem üblichen pH-Bereich des Bieres von $4,0$ bis $4,5$ liegt das Schwefeldioxid fast ausschließlich in Form von Hydrogensulfit (HSO_3^-), auch als Bisulfit bezeichnet, vor [94].

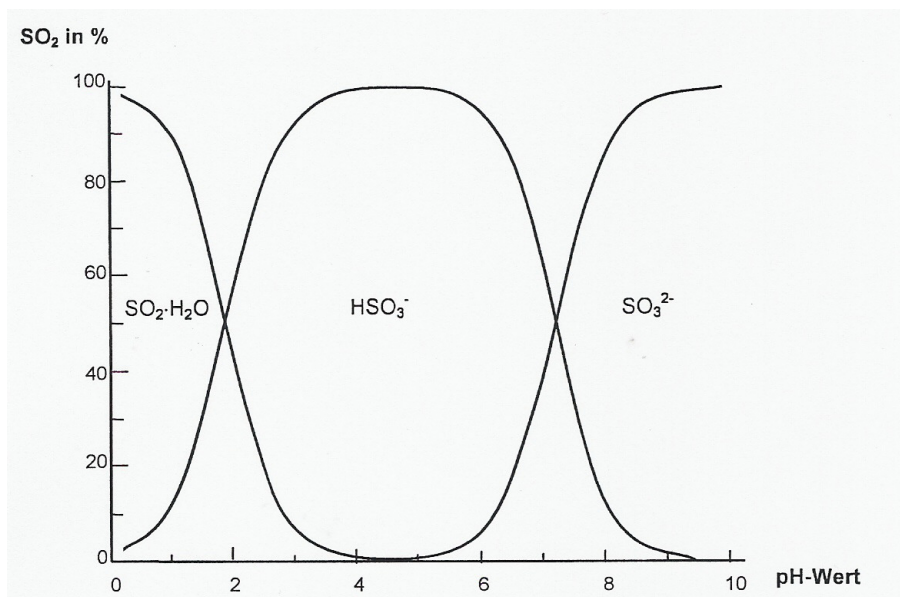


Abbildung 7: Verteilung von Schwefeldioxid in Abhängigkeit vom pH-Wert der Lösung [94]

Bildungsweg

Schwefeldioxid stellt ein Zwischenprodukt im Aminosäurestoffwechsel der Synthese der schwefelhaltigen Aminosäuren Cystein und Methionin dar. Es entsteht während der Gärung und der Gehalt im Bier steigt ab etwa dem dritten Gärtag an. Während der Lagerung des Bieres nimmt der SO_2 -Gehalt wieder langsam ab [92].

Sind die Gehalte an schwefelhaltigen Aminosäuren sowohl in der Hefezelle als auch in der Würze erschöpft, so wird in der Würze enthaltenes Sulfat von der Hefezelle aufgenommen und dort zu Sulfit reduziert [91, 95, 96]. Während des exponentiellen Hefewachstums wird es zur Neubildung von Aminosäuren und Aufbau neuer Zellen eingesetzt.

Während des Übergangs der Hefezellen in die stationäre Phase kommt es durch die nachlassende Vermehrung zu einer intrazellulären Anreicherung mit SO_2 . Da es ein Zellgift darstellt, wird es aus der Zelle ausgeschleust oder an Acetaldehyd gebunden - der entstehende Komplex ist nicht toxisch - und anschließend ausgeschleust.

Zum Gärnde hin lässt die Sulfatassimilation verursacht durch die nachlassenden Stoffwechselaktivitäten der Hefe aufgrund Energiemangels nach [97].

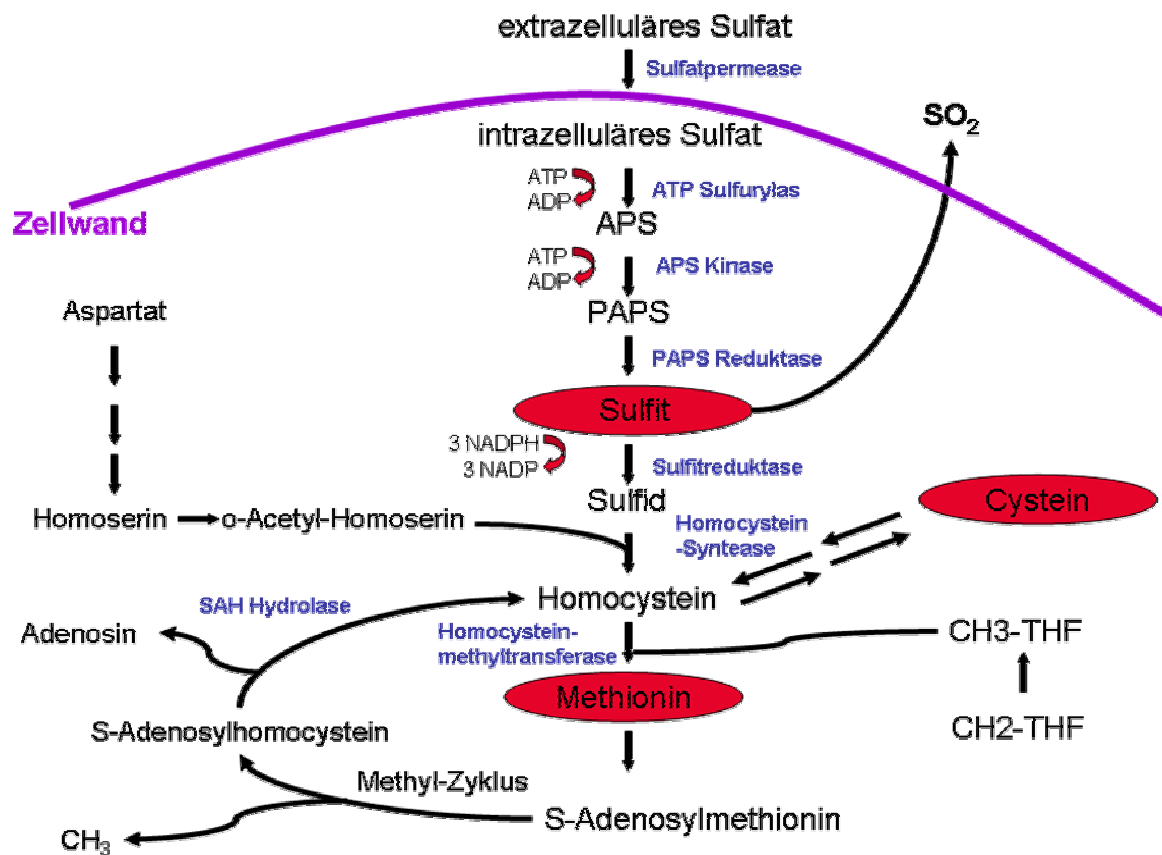


Abbildung 8: SO_2 -Bildungsweg während der Gärung [98]

Hefestamm

Einen entscheidenden Einfluss auf die SO_2 -Bildung hat der verwendete Hefestamm [3, 91, 99, 100]. Stark bruchbildende Hefen neigen zur Bildung höherer Gehalte an SO_2 gegenüber Staubhefen. Obergärige Hefen bilden im Gegensatz zu untergärigen grundsätzlich nur geringe Mengen an SO_2 .

Das SO₂-Bildungsvermögen beruht auf genetisch festgelegten Enzymsystemen und –aktivitäten sowie Regulationsmechanismen zur Sulfatassimilation und Aminosäuresynthese [3, 101, 102].

Hefezustand

Alle Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, dass Hefen mit schlechter Vitalität mehr Sulfid bilden als Hefen mit höherer Vitalität unter ansonsten gleichen Bedingungen [3, 97, 99, 103, 104]. Aus Gärungen unter Verwendung hochvitaler Reinzuchthefen resultieren Biere mit geringen SO₂-Konzentrationen [3, 32, 103]. Oft wird über eine zunehmende SO₂-Bildung mit steigender Führungszahl berichtet, aber auch das Gegenteil ist der Fall [105]. Diese Tatsache beruht vermutlich darauf, dass sich in vielen Brauereien der Hefezustand mit der Führungsanzahl verschlechtert.

WURZBACHER et al. [99] führten Gärungen mit Gemischen aus Ernte- und Assimilationshefen durch. Dabei fanden sie geringere SO₂-Konzentrationen in den Bieren, die mit zunehmenden Anteilen an Assimilationshefen vergoren wurden. Auf den Zustand der verwendeten Erntehefe gehen sie nicht weiter ein, ihre Vitalität war vermutlich deutlich schlechter als die der Assimilationshefe. Daraus kann eine erhöhte SO₂-Bildung mit steigenden Mischungsanteilen an Erntehefe resultieren.

Würzebeschaffenheit

Einen Einfluss auf die SO₂-Bildung haben die Würzeparameter Stammwürzegehalt, Aminosäurezusammensetzung und –menge, Lipidgehalt und Würze-pH.

Mit zunehmendem Stammwürzegehalt werden erhöhte Mengen an SO₂ gebildet [99, 100, 106]. Durch die bei hohen Stammwürzegehalten ungünstigen Konzentrationsgradienten und die daraus resultierenden osmotischen Verhältnisse kommt es zu einer Hemmung der Alkohol-Dehydrogenase. Durch die abnehmende Gärgeschwindigkeit kommt es in der Zelle zu einem Anstieg der Acetaldehydkonzentration, welches aus der Zelle exkretiert wird. Da SO₂ überwiegend an Acetaldehyd gebunden von der Zelle abgegeben wird, resultiert

aus der erhöhten Acetaldehydabgabe ein SO_2 -Anstieg im Bier [107]. Der Zusammenhang mit Acetaldehyd wird mehrmals beschrieben [92, 103].

Versuche von GYLLANG et al. [107] an Würzen mit gesteigerten Glucosegehalten führten entsprechend zu höheren SO_2 -gehalten der Biere.

Da SO_2 ein Zwischenprodukt im Aminosäurestoffwechsel darstellt, kann durch einen erhöhten Methioningehalt der Würze die Neubildung von Methionin herausgezögert werden. Das führt zu geringeren SO_2 -Konzentrationen im Bier.

Mangelnde Lipidkonzentrationen in der Würze führen zu einer verminderten Bildung an Sterolen und ungesättigten Fettsäuren, daraus resultiert eine geringere Hefevermehrung und eine erhöhte SO_2 -Abgabe an das Bier [97]. Erhöhte Lipidgehalte sowie Trub in der Anstellwürze führen dagegen zu deutlich reduzierten SO_2 -gehalten im Jungbier.

Erhöhte Würze-pH-Werte führen zu einer erhöhten SO_2 -Bildung [92]. Der pH-Sturz während des Gärverlaufes hat ebenfalls einen Einfluss [92, 102].

Anstelltechnologie

Je intensiver belüftet wird, desto weniger SO_2 bildet die Hefe [3-5, 93, 99, 100, 102, 108]. Dieses ist auch bei Belüftung mittels reinem Sauerstoff der Fall [97]. Zurückzuführen ist dies auf die wesentlich bessere Hefevermehrung durch zunehmende Sauerstoffgehalte und die daraus resultierende gesteigerte Bildung von ungesättigten Fettsäuren und Sterolen.

Eine Zweitbelüftung eines bereits angestellten Tanks nach 6 Stunden führte nach FORSTER und BACK [109] zu deutlich erniedrigten SO_2 -gehalten gegenüber einer Zweitbelüftung nach 12 Stunden oder später. Ein Drauflassen eines zweiten belüfteten Sudes nach 6 h führte in ihren Versuchen genauso wie das Drauflassen eines unbelüfteten Sudes zu keiner Beeinflussung (gesamte Hefe jeweils zum ersten Sud), während ein Drauflassen eines belüfteten Sudes mit zusätzlicher Hefe wieder zu einer geringeren SO_2 -Bildung im Bier führte. Der Einfluss des Drauflassens eines belüfteten Sudes ist vom Drauflasszeitpunkt abhängig. Der für eine hohe SO_2 -Bildung ungünstige Zeitraum des Drauflassens eines zweiten

belüfteten Sudes bei einem 2-Sud-ZKG liegt laut BACK [5] zwischen 2 und 6 Stunden nach dem Anstellen des ersten Sudes.

TENGE et al. [110] fanden bei Versuchen zur Befüllung von 4-Sud-ZKGs mit einem Sudrhythmus von zwei Stunden die höchsten SO_2 -Werte bei den Gärungen mit Belüftung des ersten Sudes. Eine Belüftung mehrerer Sude resultiert in erniedrigten Gehalten. Ebenso führt eine Belüftung späterer Sude zu geringeren Werten. Hier wird zu bedenken gegeben, dass durch eine reduzierte Belüftung zwar mehr SO_2 gebildet wird, dieses aber mit deutlichen Gärzeitverlängerungen einhergeht.

Über den Einfluss der Anstellzellzahl wird widersprüchlich berichtet, so resultieren laut einigen Veröffentlichungen aus gesteigerten Anstellzellzahlen Biere mit erhöhten SO_2 -Gehalten [93, 100]. Andererseits wird über steigende SO_2 -Konzentrationen mit sinkenden Anstellzahlen berichtet [5, 92, 99].

Die Interaktion zwischen Anstellzellzahl, Belüftung und vorhandenem Extrakt lässt sich gut an dem Funktionsdreieck der SO_2 -Bildung gemäß Abbildung 9 veranschaulichen.

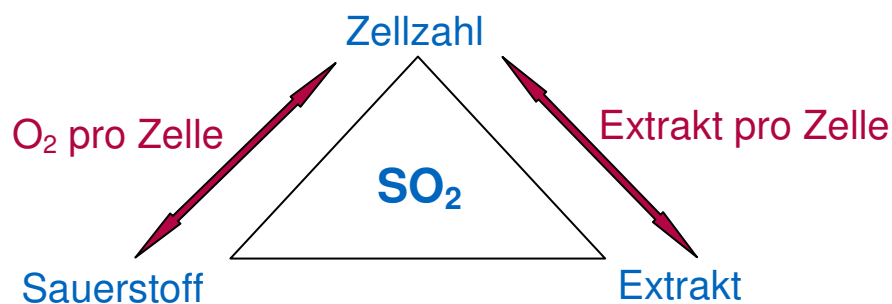


Abbildung 9: Funktionsdreieck der SO_2 -Bildung [5]

Weitere Einflussfaktoren

Die SO_2 -Bildung weist ein Temperaturoptimum zwischen 14 und 17 °C auf [92]. Mit weiter steigender Temperatur fällt die Menge an gebildetem SO_2 wieder ab [92].

Untersuchungen an Druckgärungen zeigten keine Abhängigkeit der SO_2 -Bildung vom Druck [103].

2.5 Geschmacksstabilität

Die Geschmacksstabilität des Bieres ist von einer Vielzahl von Faktoren beginnend mit den Rohstoffen und deren Herstellung bis zur Aufbewahrung des fertig abgefüllten Bieres abhängig. An dieser Stelle wird daher nur eine kurze Übersicht des für diese Arbeit relevanten Einfluss des SO₂-Gehaltes gegeben. Eine sehr gute Übersicht über den gesamten Zusammenhang der Anstell- und Gärungsparameter und der Geschmacksstabilität liefert die Dissertation von THIELE [3]. Dort wird auch eine ausführliche Übersicht über die Auswirkungen des Hefezustandes auf die Geschmacksstabilität gegeben.

Die Geschmacksstabilität beschreibt die Eigenschaft eines Bieres, die sensorischen Eigenschaften, die es im frischen Zustand aufweist, bis zum Verbrauch möglichst unverändert zu bewahren. Aufgrund der heute von den Brauereien angegebenen MHDs und der teilweise langen Transport- und Exportwege sowie damit verbundener ungünstiger Lagerbedingungen muss der Geschmacksstabilität ein besonderer Stellenwert beigemessen werden.

Neben einer Veränderung der Rezenz sowie der Bittere erfährt das Bier mit fortschreitender Aufbewahrung eine Zunahme des sog. Alterungsgeschmacks. Das Auftreten dieses Alterungsgeschmacks verläuft in mehreren Stufen. Zu Beginn entsteht ein beerenartiges Aroma (ribes-Flavour), welches über einen „Bierdeckelgeschmack“ (Cardboardflavour) in ein brotartiges Aroma übergeht. Im Laufe der fortschreitenden Alterung nehmen die Biere ein sherryartiges Aroma an [6, 111, 112].

Dieser Alterungsgeschmack wird zum größten Teil durch oxidative Prozesse verursacht. Dabei entstehen aus Sauerstoff reaktionsfreudige Hydroxylradikale, die unspezifisch mit Bierinhaltsstoffen reagieren [111]. Die dabei gebildeten Substanzen sind z.B. längerkettige oder ungesättigte Carbonyle. Die Bildung der Hydroxylradikale stellt dabei eine metallkatalysierte Reaktion gemäß Abbildung 10 dar.

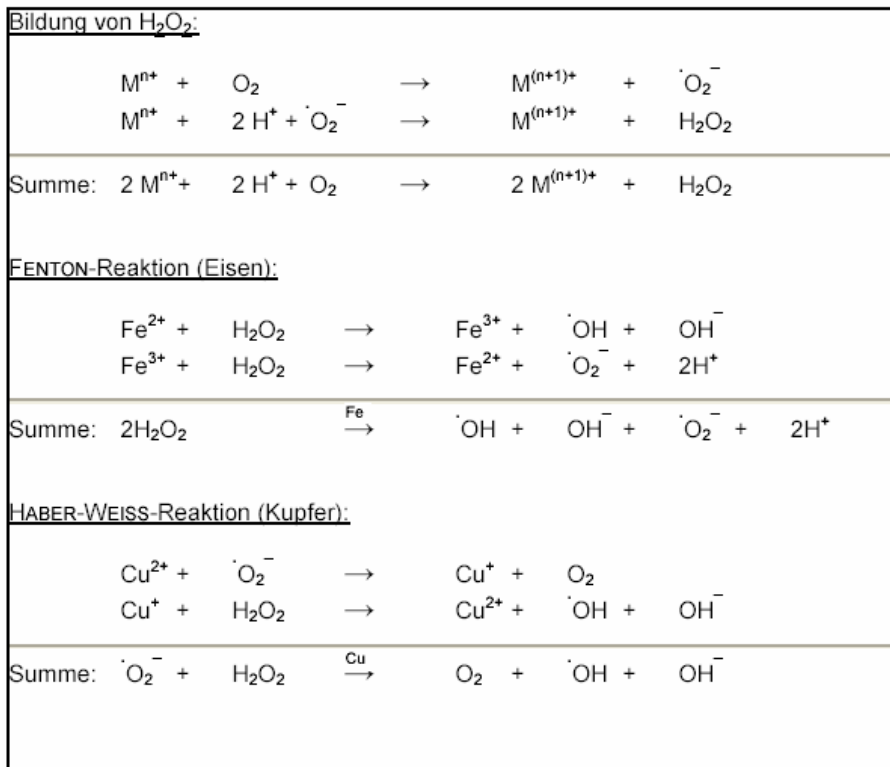


Abbildung 10: Metallkatalysierte Radikalentstehung im Bier [5]

In diesem Zusammenhang ist hinsichtlich der Geschmacksstabilität zu bedenken, dass gerade während der Filtration unter Verwendung von Kieselgur besonders der Gehalt von Eisenionen im Bier noch durch die Eisenabgabe der eingesetzten Gur erhöht wird.

Die Radikalbildung beginnt jedoch nicht direkt mit der Abfüllung von Bier, sondern erst nach einer bestimmten Aufbewahrungs- bzw. Lagerungsdauer und der dabei herrschenden Temperatur. Es wird angenommen, dass diese Zeitspanne von der endogenen antioxidativen Aktivität des Bieres abhängt, die für jedes Bier anders ist. Sie wird mittels Elektronenspinresonanz-Spektroskopie (ESR) als so genannte "Lag-Time" bestimmt und kann damit als objektives Bewertungskriterium genutzt werden [4, 5, 113-115].

Wirkung des Schwefeldioxids als Antioxidationsmittel

Die antioxidative Wirkung des Sulfit ist auf die Hemmung der Radikalgenerierung zurückzuführen. Es reagiert mit organischen und anorganischen Peroxiden und verhindert so die Bildung von Radikalen [116-118]. Bei der Oxidation des Schwefeldioxids durch Sauerstoff entsteht Sulfat.

Maskierende Effekte

Das im Bier enthaltene SO_2 kann den auftretenden Alterungsgeschmack dadurch maskieren, dass es mit den entstehenden Alterungscarbonylen eine Verbindung eingeht [5, 91, 97, 107, 119-121]. Diese Verbindungen weisen deutlich höhere Geschmacksschwellenwerte als die Carbonyle selbst auf. Daher können diese nicht aromaaktiven Komplexe die Ausbildung eines Alterungsgeschmacks verzögern, bis schließlich das gesamte Sulfid im Bier zu Sulfat oxidiert ist und die Alterungscarbonyle aus den Sulfid-Carbonylkomplexen entbunden werden.

Die Affinität zur Bindung an Carbonyle ist umso größer, je geringer die Kettenlänge des Carbonyls ausfällt [97]. Daher liegt ein großer Teil des im Bier vorhandenen Sulfids in an Acetaldehyd gebundener Form vor. Da die Acetaldehydkonzentration während der Lagerung des Bieres zunimmt, werden länger-kettige Carbonyle zugunsten der Bildung neuer Komplexe mit Acetaldehyd aus bestehenden verdrängt und somit freigesetzt. Dadurch kommt es zu einem Anstieg der Alterungsnote [120].

Es wurde angenommen, dass dieser Mechanismus für alle Aldehyde gilt und postuliert, dass (E)-2-Nonenal schnell aus diesen Komplexen herausgelöst wird [120]. Jedoch konnte gezeigt werden, dass durch die im (E)-2-Nonenal enthaltene Doppelbindung die Verbindungen der Komplexe irreversibel werden, und damit wird das so gebundene (E)-2-Nonenal nicht freigesetzt [122]. Vermutungen zu diesem Sachverhalt äußerte bereits LUSTIG [91] auch in Bezug auf andere Aldehyde mit Doppelbindungen wie (E)-2-Hexenal und (E,E)-2,4-Heptadienal.

2.6 Bestehende Verfahrensweise in der Flensburger Brauerei

Im Folgenden wird die in der Flensburger Brauerei bis zu Beginn dieser Forschungsarbeit praktizierte übliche Verfahrensweise der Hefereinzucht, des Anstellens, der Technologie der Gärung und des Schlauchens sowie der Hefeernte und Erntehefebehandlung beschrieben.

2.6.1 Hefereinzucht

Die in der Flensburger Brauerei im Jahr 2005 vorhandene Reinzuchtanlage bestand aus zwei zylindrokonischen Tanks Baujahr 1961 mit einem Bruttovolumen von 110 hl, das nutzbare Volumen lag bei 80 hl. Der Konusinhalt betrug 11 hl, an

der Zarge waren zwei Kühltaschen im Füllstandsbereich von 12 - 28 hl sowie von 48 - 62 hl vorhanden. Die Belüftung erfolgte über ein nachträglich am Konus installiertes Rohr, das bis zum Punkt **P** (s. Abbildung 11) in den Tank hineinragt. Zur Belüftung wurde Sterilluft zugeführt, der Druck in der Sterilluftleitung lag bei ca. 2,8 bar.

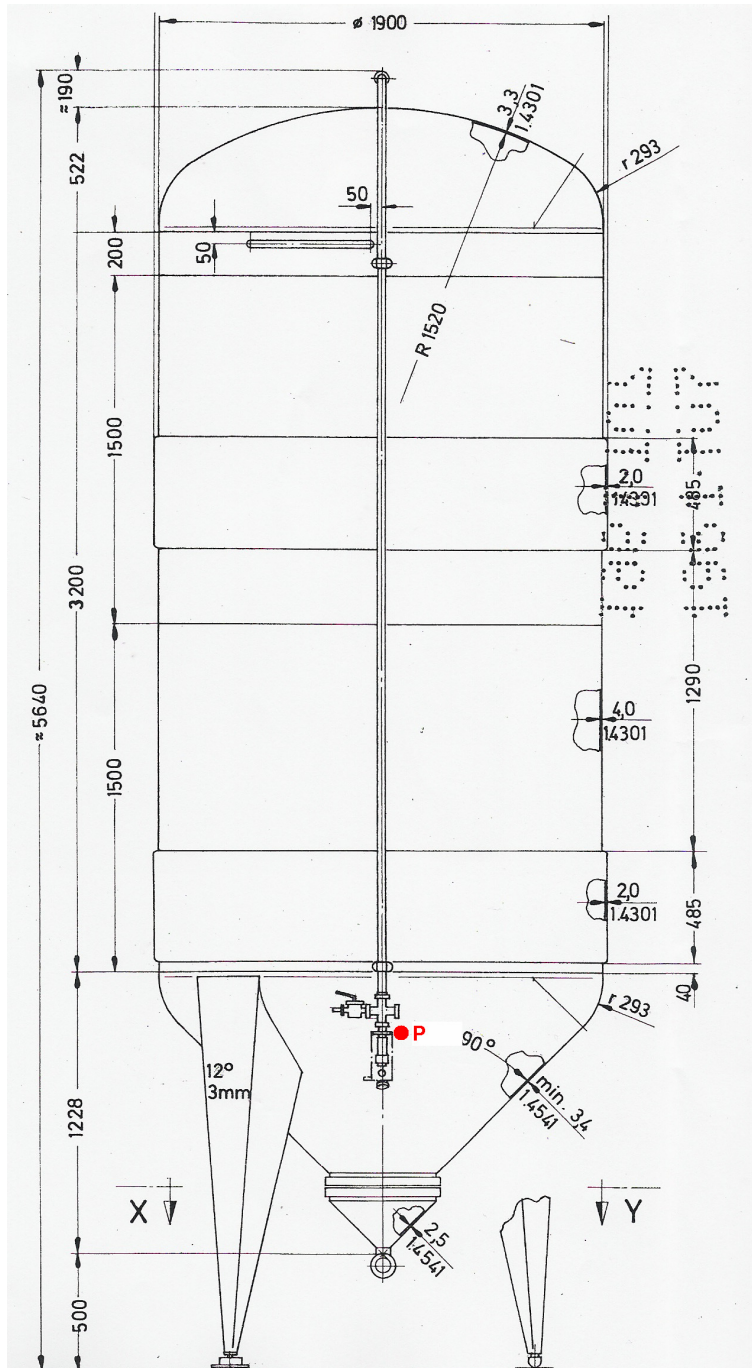


Abbildung 11: techn. Zeichnung eines alten Reinzuchtanks

Einmal pro Woche wurden jeweils 50 hl des Inhalts beider Tanks einer Anstellwürze beidosiert und anschließend wieder auf das Ausgangsvolumen von 60 hl aufgefüllt. Anschließend begann die Hefeherführung durch das Starten der Belüftung. Eine Regulierung der Belüftung des Tankinhaltes war nur über eine Handklappe möglich. Oftmals kam es daher zu einer Überbelüftung, die zu einer übermäßigen Schaumbildung führte. Der Schaum trat dann über die Abluftleitung aus. In diesem Fall musste die Belüftung an der Handklappe etwas gedrosselt werden.

Da an den Tanks keine Temperaturmesseinheit vorhanden war, konnte der Temperaturverlauf während der Herführung nicht nachvollzogen werden. Eine Steuerung des Temperaturverlaufes war überdies hinaus nicht möglich, da die Kühlung lediglich an- oder abgeschaltet werden konnte. Im Falle des Anschaltens wurde der Tankinhalt bis etwa auf die Kälteträgervorlaufemperatur abgekühlt. Während der Herführung stieg die Temperatur oftmals auf deutlich über 20 °C an. Nach dem Erreichen einer Sollzellzahl von 100 Mio./ml wurde die Herführung durch Herunterkühlen des gesamten Tankinhaltes gestoppt und die Hefesuspension kalt gelagert.

Oftmals wurde die gewünschte HZZ von 100 Mio./ml nicht erreicht, in diesen Fällen wurde der entsprechende Gärtank zusätzlich noch mit Erntehefe angestellt. In anderen Fällen stieg die HZZ ohne ersichtlichen Grund innerhalb zwei Probenahmen um ein Vielfaches an und lag dann bei Zellzahlen um 200 Mio./ml Die Gründe für die schwankenden Hefezellzahlen waren vielseitig:

- Aufgrund ungünstiger Verhältnisse wurde der größte Teil des Extraktes vergoren, bevor die gewünschte ZZ erreicht ist
- Da die Ausgangszellzahl zum Start der Vermehrung immer starken Schwankungen unterlegen war, dauerte die Hefeherführung oftmals viele Tage
- Durch vorhandene Temperaturschwankungen im Kälteträgervorlauf wurde die Hefe manchmal nur sehr langsam heruntergekühlt bzw. nur soweit heruntergekühlt, dass sie weiterhin Gärungsstoffwechsel betrieb, der Extrakt aber schon vollkommen vergoren war
- Aufsteigen der Hefezellen mit dem Schaum bei übermäßiger Schaumbildung

- Mangelnde Durchmischung des Tankinhaltes während der Herführung, da diese ausschließlich durch die Belüftung erfolgte
- Totzone ohne Durchmischung und Belüftung im Konus unterhalb des Belüftungsrohres
- Aufgrund ungenauer Inhaltsmessungen wurde die gewünschte Sumpfmenge von 10 hl oftmals deutlich über- oder unterschritten
- Fehler bei der Probenahme sowie Durchführung der Zellzahlbestimmung
- Fehlende Durchmischung während der Hefekaltlagerung
- Absinken der Hefezellen während der Kaltlagerung in den Konus mit anschließender Erwärmung

Die eben aufgeführten Punkte führten häufig auch zu einem hohen Anteil toter Hefezellen in der Reinzuchtheffe. Die Hefevitalität war vermutlich ebenfalls starken Schwankungen unterlegen, Messungen in diese Richtungen wurden nie durchgeführt.

Des Weiteren kam es in der Hefereinzucht mehrfach zu mikrobiologischen Problemen. Die Ursachen dafür sind wahrscheinlich in ungünstig konstruierten Probenehmern, langen Luftwegen ohne Sterilluftfilter, der Schaumproblematik sowie teilweise geschwächten Hefepopulationen zu finden.

2.6.2 Anstellen, Gärung und Schlauchen des Jungbieres

Grundsätzlich sind alle Gärungen in der Flensburger Brauerei Gärungen in 3-Sud-ZKGs. Die Ausnahme bilden Restbier-ZKGs sowie Gärungen von speziellen Bieren und Obergärungen. Die Größe eines Vollbier-Sudes liegt bei etwa 385 hl (370 - 400 hl), der ZKG-Inhalt liegt bei max. 1200 hl. Der Sudrhythmus liegt bei 160 - 180 min. Daraus folgt eine ZKG-Neubefüllung im 8- bis 9 Stunden-Rhythmus. Die ZKG-Höhe beträgt 15,5 m, der Durchmesser 3,63 m, daraus resultiert ein Verhältnis von Durchmesser zu Höhe von 1:4,27. Der Konuswinkel beträgt 65,23°.

Verfahrensweise beim Anstellen der Würze

Die Kühlung der Würze auf Anstelltemperatur erfolgt bereits im Sudhaus. Die gekühlte Würze durchläuft in einer Leitung DN100 nach einem Weg von 60 m die

neben dem Hefekeller gelegene Anstellregelung. Dort erfolgt zunächst die Hefedosage. Diese erfolgt automatisiert, wobei sowohl vor als auch nach der Hefedosage die Würzetrübung über eine optische Kontrolle „Optek Control 4000“ der Fa. Optek gemessen wird. Die ermittelte Trübungsdifferenz wird mit in der Steuerung hinterlegten Werten verglichen und die Hefedosage entsprechend der vorgegebenen Zellzahl sowie der aktuellen Trübung angepasst. Die Sollzellzahl beim Anstellen liegt bei 15 Mio./ml. Anschließend erfolgt die Luftdosage (Sterilluft) über eine entsprechende Vorrichtung. Unmittelbar nach der Belüftung durchläuft das Medium eine Venturidüse und wird schließlich in den Gärkeller in einen Gärtank gepumpt. Der Weg zwischen der Anstellregelung und dem Gärtank weist, je nach gewähltem Tank, aufgrund baulicher Gegebenheiten noch einmal eine Strecke von 10 bis 40 m auf. Die Kühlung von 385 hl Würze dauert etwa 40 - 45 min.

Bezüglich der Verfahrensweise beim Anstellen der 3-Sud ZKGs gibt es keine einheitliche Philosophie. So wird die gesamte Hefe für den Gärtank meistens komplett zum Anstellen des ersten Suds des entsprechenden Tanks gegeben (45 Mio./ml). Bei auftretenden Gärverzögerungen erfolgt eine Erhöhung der Anstellzellzahl von 15 auf 18 Mio./ml (entsprechend 54 Mio./ml bezogen auf den ersten Sud). Führt dies zu keiner Verbesserung, erfolgt eine Hefegabe zu jedem Sud.

Grundsätzlich wird jeder Sud belüftet, die Belüftung erfolgt mit 10 l Sterilluft pro hl Würze.

Verfahrensweise der Gärung

Die Hauptgärung findet im Tank bei einer vorgegebenen Temperatur von 11 °C statt. Hier muss beachtet werden, dass es bei der automatischen Temperaturführung zu technisch unvermeidbaren Schwankungen von max. +/- 1,0 °C kommen kann. Bei Gärproblemen wie z.B. extrem langsam ankommender oder schleppender Gärung wird die Gärtemperatur für die betroffenen sowie in der Sudwoche noch folgenden Gärtanks auf 12 °C erhöht.

Ein am Tankdom vorhandenes Druckregelventil steht während der Tankbefüllung und zu Gärbeginn auf Abluft, nach einer vorgegebenen Zeit schaltet dieses Ventil dann auf den Weg zur CO₂-Rückgewinnungsanlage um.

Von den in Gärung befindlichen Tanks erfolgt täglich eine Probenahme zur chem.-techn. Analyse sowie zur Diacetylbestimmung.

Die Gärdauer beträgt im Normalfall 7 - 10 Tage, bei auftretenden Gärstörungen bis zu 14 Tage.

Am unteren Zargenbereich der ZKGs ist ein Rohr DN20 installiert, das über eine Pumpe in den Tankeinlauf mündet. Diese Umwälzpumpe wird eingeschaltet, sobald der erste Sud im Tank angestellt ist. Etwa einen Tag vor dem Schlauchen bzw. der Hefeernte wird die Pumpe wieder ausgeschaltet, um das Absetzen der Hefe nicht negativ zu beeinflussen. Sinn dieser Pumpe ist, dass dadurch jederzeit eine repräsentative Probenahme aus dem Tank ohne langes Vorschießen möglich ist.

Das Bier wird grundsätzlich im Gärkeller endvergoren, der Gärkellervergärungsgrad entspricht somit dem Endvergärungsgrad.

Verfahrensweise des Schlauchens

Sobald der Diacetylgehalt auf unter 0,09 mg/l gesunken ist, wird das Bier geschlaucht. Ist das Schlauchen zu dem Zeitpunkt nicht möglich, wird der komplette Gärtank auf ca. 2 °C abgekühlt, wobei das Herunterkühlen 12 - 15 h dauert. Während des Schlauchens wird das Jungbier zur Reduzierung der Hefezellzahl über einen Separator gefahren und mittels eines Tiefkühlers auf die Lagertemperatur von ca. -2 °C abgekühlt.

2.6.3 Hefeernte und Hefelagerung

Die Hefeernte erfolgt grundsätzlich vor dem Schlauchen des Jungbieres. Je nach vorhandenem Bedarf wird sie zum weiteren Anstellen in einen Hefetank geerntet. Die nicht zum Wiederanstellen benötigte Hefe wird direkt in einen Verkaufshefetank geerntet.

Die Hefeernte erfolgt mittels einer Kreiskolbenpumpe. Diese Pumpe zeichnet sich durch eine besonders schonende Förderung aus. Eine früher installierte Kreiselpumpe führte nachweislich zu einem deutlichen Anstieg des Gehaltes an toten Hefezellen. Die Hefesuspension wird während der Ernte über einen im Jahr 2000 installierten Hefetiefkühler (Plattenwärmetauscher der Fa. GEA Ecoflex GmbH) gefahren, als Kälteträger dient Eismatsch mit einer Vorlauftemperatur von

-3,5 °C (Sollwert (-3,0) - (-4,0) °C). Während der Ernte soll die Hefe auf eine Temperatur zwischen 0 °C und 3 °C abgekühlt werden. Die Hefeernte beginnt mit einer Fließgeschwindigkeit von 120 hl/h, in Abhängigkeit von der Hefetemperatur am Tiefkühlerauslauf wird diese Geschwindigkeit dann automatisch geregelt. Allerdings ist ein Betrieb unter 80 hl/h nicht möglich, da es dann zum Ausfall der Pumpe kommt. Dieser Wert von 80 hl/h ist steuerungsseitig als Minimalwert hinterlegt. Selbst wenn bei einer schon heruntergeregelten Geschwindigkeit von 80 hl/h die Hefetemperatur am Kühlerauslauf noch größer als der maximale Sollwert ist, erfolgt hier keine weitere Regulierung, um einen Pumpenausfall zu vermeiden. In diesem Fall erfolgt die Ernte dann mit dieser Minimalgeschwindigkeit, eine Fehlermeldung bezüglich des Nichterreichens der Hefesolltemperatur wird nicht generiert.

Die Lagerung der gekühlten Erntehefe bis zum Wiederanstellen erfolgt in zylindrokonuschen Hefetanks mit Zargenkühlung (s. Abbildung 12). Die Tankkühlung erfolgt wiederum mit Eismatsch.

Im Hefekeller sind sechs Erntehefetanks vorhanden. Außer der Kühlung mittels der Kühltaschen am Zargenbereich ist zusätzlich noch eine Raumkühlung installiert.

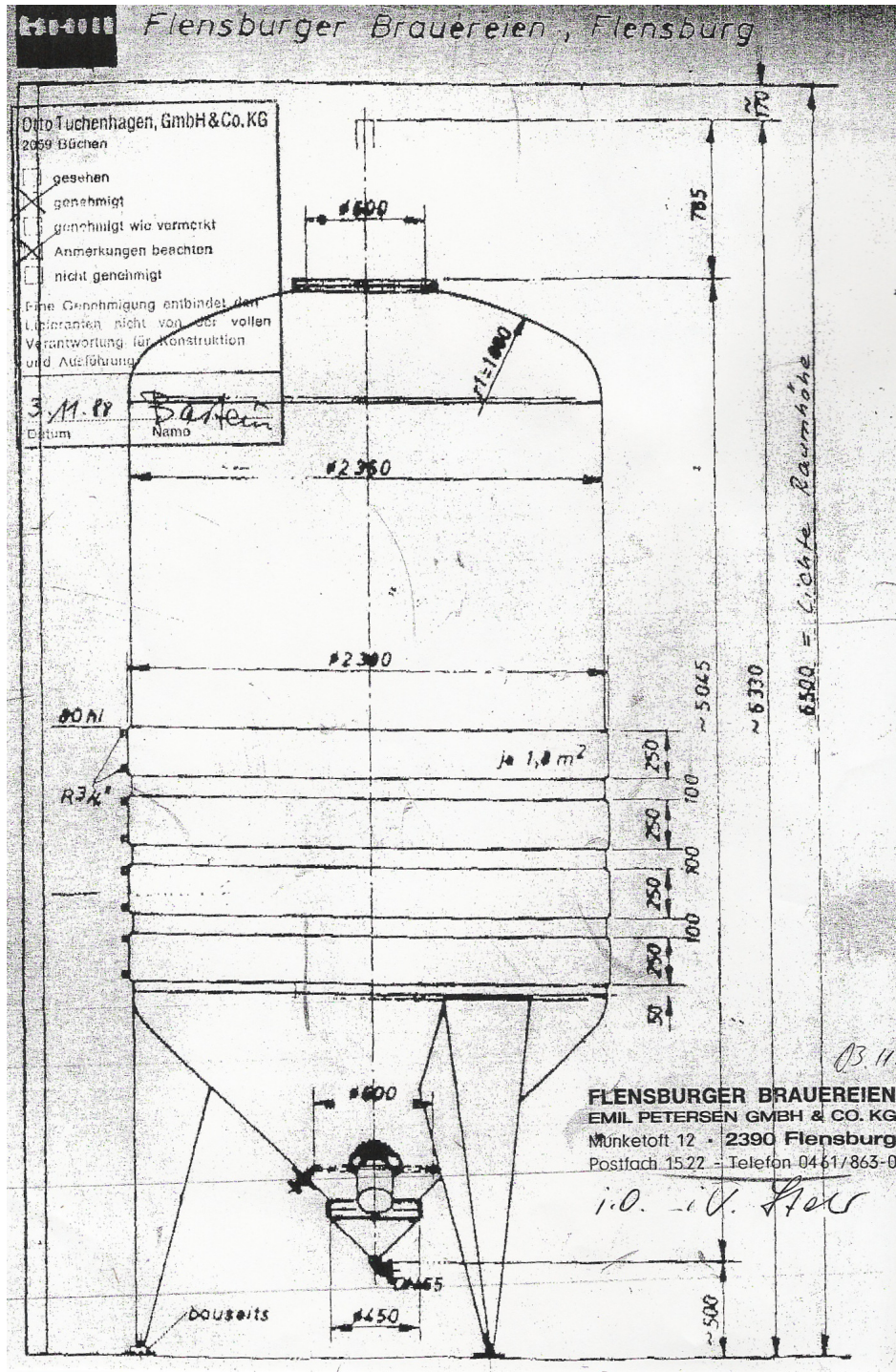


Abbildung 12: tech. Zeichnung eines Erntehfetanks

2.6.4 Lagerung, Filtration und Abfüllung des Bieres

Das über den Tiefkühler geschlauchte Bier gelangt bereits mit der Lagertemperatur von ca. $-1,5\text{ °C}$ in den Lagertank, die Kühlung während der Lagerung erfolgt durch Ammoniakdirektverdampfung in entsprechenden

Kühltaschen in den Zargenmänteln der ZKLs. Bei der Hauptbiersorte Pils werden jeweils 3 - 4 ZKGs in einen Lagertank (4000 hl) geschlaucht.

Die Lagerung dauert mindestens 10 Tage, vor der Freigabe zur Filtration erfolgt eine Analyse sowie Verkostung.

Es werden in der Regel zwei Lagertanks im Verschnitt zur Filtration geleitet. Die Lagertanks werden mit Sterilluft leergedrückt. Die Filtration erfolgt mittels einer Zentrifugal-Hochleistungs-Filtrationsanlage (ZHF/Kieselgurfiltration) mit Vor- und Nachfilter sowie anschließender PVPP-Stabilisierung.

Das Filtrat kann auf dem Weg in den Drucktank noch auf einen gewünschten CO₂-Gehalt aufcarbonisiert werden.

Auf dem Weg zur Abfüllung durchläuft das Bier eine vor dem Puffertank befindliche KZE, die Abfüllung erfolgt entsprechend dem Stand der Technik. Die befüllten Flaschen fahren vom Füller in eine Bügelverschlussmaschine, dort erfolgt eine HDE und das anschließende Verschließen der Flaschen.

2.7 Problematik der Sauerstoffpermeation

Über 95 % der in der Flensburger Brauerei abgefüllten Biere werden in Bügelverschlussflaschen abgefüllt. Der Flaschenpool umfasst schätzungsweise 45 Mio. Flaschen, die teilweise schon deutlich länger als 10 Jahre im Umlauf sind. Daher sind auch zahlreiche verschiedene Bügelverschlussvarianten mit verschiedensten Gummischeiben bzw. Gummimaterialien im Umlauf. Bis zum Jahr 1995 wurden Gummischeiben aus Naturkautschuk eingesetzt. Da dieses Material aber besonders empfindlich gegenüber Witterungseinflüssen sowie UV-Licht ist und relativ leicht durch Schimmelwachstum optisch beeinträchtigt wird, erfolgte schließlich der Einsatz anderer Materialien, sog. Thermoplastischer Elastomere (TPEs). In einer weiteren Entwicklung wurden aus qualitativen Gründen neue Bügelverschlüsse entwickelt, die nicht nur aus einem Keramikkörper mit loser Gummischeibe bestehen, sondern bei denen das Gummimaterial auf eine Polypropylenscheibe aufgespritzt ist und diese Kappe auf die Keramikköpfe aufgeklipst wird. Somit sind im Flaschenpool zahlreiche Varianten an Gummi- bzw. Kunststoffmaterialien vorhanden. Alle diese Materialien weisen unterschiedliche Sauerstoffpermeationseigenschaften auf. Die

Sauerstoffdurchlässigkeit liegt je nach Verschlussart und Material zwischen 0,01 und 0,04 ml O₂/d*bar*Verschluss.

Tabelle 3: Sauerstoffdurchlässigkeit versch. TPEs

	Messung 1	Messung 2	Mittelwert
TPE 1	0,011	0,012	0,0115
TPE 2	0,036	0,038	0,0370
TPE 3	0,015	0,016	0,0155
TPE 4	0,024	0,029	0,0265
TPE 5	0,038	0,040	0,0390

Folgende Tabelle zeigt die Berechnung der Sauerstoffmenge, die in einem Monat durch einen Bügelverschluss mit einer mittleren Sauerstoffpermeation von 0,02 mg O₂/d*bar wandert:

Tabelle 4: Sauerstoffpermeation durch einen Bügelverschlusses während eines Monats

Durchlässigkeit VS = 0,02 ml/d*bar	→ Multiplikation O ₂ -Partialdruck 0,21 bar
Durchlässigkeit VS = 0,0042 ml/d	→ Division durch Füllmenge 0,33 l
Durchlässigkeit VS = 0,0127 ml/d*l Bier	→ Multiplikation O ₂ -Dichte 1,4 mg/ml
Durchlässigkeit VS = 0,018 mg/d*l Bier	→ Multiplikation 30 d/mo
Durchlässigkeit VS = 0,53 mg/l Bier*mo	

Bei Kronenkorken ist diese Permeationsproblematik weniger stark ausgeprägt, die Sauerstoffdurchlässigkeit liegt bei den Standart-Kronenkorken schon auf dem Niveau der besten Bügelverschlüsse:

Tabelle 5: Sauerstoffdurchlässigkeit versch. Kronenkorkenqualitäten

Kronenkorken Standart	0,01 ml/d*bar
Kronenkorken mit Barriereeigenschaften	0,005 ml/d*bar
Kronenkorken mit Scavenger	0,001 ml/d*bar

Da durch die erhöhte Sauerstoffdurchlässigkeit beim Bügelverschluss das Bier schneller oxidiert, bestand seitens der Brauerei die Hoffnung, durch einen erhöhten SO₂-Gehalt als natürliches Antioxidationsmittel hier eine deutliche Verbesserung der Geschmacksstabilität erzielen zu können.

3 Material und Methoden

3.1 Routineanalysen

3.1.1 Chemisch-technische Analysen

Das Assimilationsmedium bzw. die Jungbiere während der Gärung sowie die fertigen Biere wurden in der Flensburger Brauerei auf folgende Merkmale hin analysiert:

- Stammwürze
- Extraktgehalt
- Alkoholgehalt
- pH-Wert
- Vergärungsgrad
- FAN

Zusätzlich erfolgte von den fertig produzierten Bieren eine Bestimmung des SO₂-Gehaltes im Bierlabor des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I.

Stammwürze, Extraktgehalt, Alkoholgehalt und pH-Wert

Die Stammwürze, der Extrakt- und Alkoholgehalt sowie der pH-Wert wurden zunächst mit Messsystemen der Fa. Foss Tecator AB (SCABA 5610 Automatic Beer Analyzer Unit) bestimmt. Durch eine Neuanschaffung im Labor der Flensburger Brauerei erfolgte die Bestimmung dieser Parameter ab April 2007 mit Messsystemen der Fa. Anton Paar (Alcolyser plus sowie DMA 4500 – Density Meter). Die Ermittlung des Vergärungsgrades erfolgte automatisch durch die Software der Geräte anhand des ermittelten Stammwürze- und Extraktgehaltes.

FAN

Die Bestimmung des freien Aminostickstoffs wurde gemäß den Vorschriften der MEBAK [123] durchgeführt.

Schwefeldioxid

Alle vorgenommenen Schwefeldioxidanalysen wurden im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen an dem schlauchreifen Bier durchgeführt, da zum Gärende hin erfahrungsgemäß die höchsten Konzentrationen vorhanden sind. Für die Probenahme wurde eine Wendel eingesetzt, dadurch war eine schaumfreie Probenahme gewährleistet. Die Probenahme erfolgte in eine Flasche, welche zuvor mit CO₂ ausgeblasen wurde, um einen Sauerstoffeintrag möglichst zu vermeiden.

Die Schwefeldioxidbestimmung wurde mit einer Applikation auf einem Automatic Wet Chemistry Analyser der Fa. Skalar Analytic GmbH durchgeführt. Bei der Methode wird durch Ansäuern und Temperierung der Probe auf 90 °C gebundenes SO₂ freigesetzt. Gasförmiges SO₂ wird dialysiert und in Formaldehydlösung aufgefangen. Hier reagiert das SO₂ mit para-Rosanilin zu einem roten Komplex, dessen Extinktion bei 560 nm bestimmt wird. In der Originalmethode wird das Ansäuern mit Schwefelsäure durchgeführt. Untersuchungen am Lehrstuhl zeigten jedoch, dass dadurch deutlich höhere SO₂-Werte gemessen werden als mit der Referenzmethode (Destillation). Daher wurde die Methode modifiziert, wobei die Ansäuerung durch ortho-Phosphorsäure erfolgt.

Da das SKALAR-Modul wegen eines Defektes ausfiel, wurde ein Teil der Schwefeldioxidanalysen mit der Referenzmethode nach MEBAK [4] bestimmt.

3.1.2 Zellzahl und Viabilität

Die Zellzahl wurde mit Hilfe eines Hämocytometers (Thomakammer) bestimmt und die Ermittlung des Totanteils erfolgte durch Anfärbung mit Methyleneblau. Als Farbstofflösung kam eine citratgesäuerte Lösung nach Back [5] zum Einsatz.

3.1.3 Sauerstoffgehalt

Die Sauerstoffgehalte in der Anstellwürze bzw. im Jungbier wurden mittels eines Sauerstoffmessgerätes Modell O₂-Digox 5 der Fa. Dr. Thiedig bestimmt.

Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes an abgefüllten Flaschen erfolgte nach der Methode der MEBAK [124] Gesamtsauerstoff von Flaschen- und Dosenbier.

3.1.4 Gaschromatographische Analysen

Die fertiggestellten Biere wurden gaschromatographisch auf folgende Merkmale hin analysiert:

- Vicinale Diketone (Diacetyl und 2,3-Pentandion)
- Höhere Alkohole und Ester
- Bieraromastoffe
- Alterungsindikatoren

Die Bestimmung der vicinalen Diketone erfolgte in der Flensburger Brauerei, diese Analyse wurde während der durchgeführten Testgärungen am Jungbier täglich durchgeführt. Die übrigen gaschromatographischen Untersuchungen erfolgten im GC-Labor des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I.

Vicinale Diketone

Die Bestimmung der vicinalen Diketone Diacetyl und 2,3-Pentandion erfolgte gemäß der Vorschrift nach MEBAK (MEBAK Band III, 1.2.1, Angabe in mg/l). Bei dieser Methode handelt es sich um eine Headspace-Methode, bei der durch eine vorhergehende Wärmebehandlung (65 °C für 90 min) sämtliche Vorläufersubstanzen in die entsprechenden vicinalen Diketone umgewandelt werden. Die Bestimmung erfolgt mittels GC-ECD.

Höhere Alkohole und Ester

Die Bestimmung der höheren Alkohole und Ester wurde gemäß einer Methode von THUM [125] durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine Headspace-Methode mit einer Bestimmung mittels GC-FID.

Bieraromastoffe

Die Bestimmung der Bieraromastoffe wurde gemäß einer lehrstuhlinternen Vorschrift durchgeführt, die mit einigen Modifikationen der Analyse der wasserdampfvlüchtigen Würzearomastoffe entspricht [91]. Die modifizierte Probenaufbereitung wird wie folgt durchgeführt:

- 100 ml Bier wird mit 1 ml interner Standardlösung und einer berechneten Menge Ethanol p.a. versetzt, so dass insgesamt 10 ml Ethanol in der Probe

enthalten sind.

- Quantitatives Überführen der Probe unter Zugabe von Antischaumreagenz in das Destillationsglas und Überdestillieren von 100 ml Destillat in einem in Eis gekühlten Messkolben.
- Von diesen 100 ml werden nach kräftigem Durchmischen 80 ml mit 20,0 g NaCl und 1 g H₂S₂O₅ sowie mit 0,5 ml CH₂Cl₂ (destilliert) versetzt und in einem Zentrifugenglas 30 min geschüttelt.
- Anschließend wird 15 min bei 2700 U/min zentrifugiert.
- Von den getrennten Phasen wird die untere organische gewonnen und chromatographisch via GC-FID analysiert.

Alterungsindikatoren

Die Ermittlung der Alterungskomponenten erfolgte ebenfalls nach einer lehrstuhlinterne(n) Vorschrift [126]. Die Probenaufbereitung erfolgte durch eine Wasserdampfdestillation mit anschließender Flüssig-Flüssig-Extraktion mittels destilliertem Dichlormethan und anschließendem Einengen im Stickstoffstrom. Die chromatographische Bestimmung erfolgte mittels GC-FID. Die Ermittlung der Alterungsindikatoren erfolgte jeweils am frischen und forciert gealterten Bier.

3.2 Sensorische Analysen

3.2.1 Verkostung nach dem DLG-Schema

Zur sensorischen Beurteilung der Bierqualität wurde nach dem 5-Punkte DLG-Schema verkostet [127]. Die DLG-Verkostung erfolgte an den frischen und forciert gealterten Bieren.

3.2.2 Alterungsverkostung nach Eichhorn

Bei der Alterungsverkostung nach Eichhorn wird die Alterung der Biere in den Kategorien Geruch, Trunk und Bittere nach folgender Skala in Halbotenschritten beurteilt [Eichhorn 1991]:

- 1 = frisch
- 2 = leicht gealtert
- 3 = stark gealtert
- 4 = extrem gealtert

Die Prüfer geben zusätzlich noch die Akzeptanz des gealterten Bieres in 20 % Schritten an (100 %, 80 %, 60 %, 40 %, 20 %, 0 %). Eine Gesamtnote ergibt sich aus den Einzelkriterien, dabei gehen Geruch und Trunk mit dem Faktor zwei in die Wertung ein. Die Verkostung erfolgte jeweils an den frischen und forciert gealterten Bieren. An den Verkostungen nahmen mindestens 5 geschulte Verkoster teil.

3.3 Forcierte Alterung

Zur Vorhersagbarkeit der Geschmacksstabilität wurden die Biere einer forcierten Alterung unterzogen. Um diese 3-monatige Alterung zu simulieren, wurden die Biere 24 Stunden geschüttelt, wodurch der Transport simuliert wird, und anschließend 4 Tage dunkel bei 40 °C gelagert.

3.4 Hefevitalitätsmessung

Die Bestimmung der Hefevitalität erfolgte durch Messung des intracellulären pH-Wertes (ICP) nach der von IMAI [128] entwickelten und nach THIELE [129] modifiziert Methode am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I. Dabei werden 2 ml abzentrifugierte Hefe (3000 U/min., 3 min, 2 °C) 3-mal mit 8 ml kaltem Puffer A (50 mM Citronensäure / 50 mM Natriumhydrogenphosphat-Puffer (pH 3,0 mit 110 mM NaCl, 5 mM KCl und 1 mM MgCl₂)) gewaschen. Die abzentrifugierte Hefe wird mit kaltem Puffer A auf 3,5 ml aufgefüllt, mit 0,3 ml einer 10 mM CF-DA-Lösung versetzt und sofort 1 min lang kräftig geschüttelt. Daraufhin werden jeweils 0,25 ml der Mischung in 8 ml Puffer A gegeben (Doppelansatz) und diese direkt bei 30 °C für 15 min. in einem Wasserbad inkubiert.

Anschließend wird die Suspension abzentrifugiert und noch 2-mal mit kaltem Puffer A gewaschen. Die abzentrifugierte Hefe wird daraufhin mit 3 ml Puffer A in Lösung gebracht. Diese Mischung wird in einem Fluoreszenzspektrometer bei einer Emissions-Wellenlänge von 518 nm und Anregungs-Wellenlängen von 441 nm und 488 nm gemessen.

Diese Methode bietet gegenüber der ursprünglichen Methode [66, 128] eine deutliche Zeitersparnis.

Die Hefeproben wurden nach der Probenahme für jeweils 2 h in einem Kühlraum mit einer Temperatur von 1 °C gelagert. Dadurch sollten – auch bei warm geernteten Hefen - eine gleichmäßig kühle Temperatur gewährleistet und eine Veränderung des ICP-Wertes während des Transportes vermieden werden. Der Transport erfolgte mittels eines Kurierdienstes in einem gekühlten Paket.

3.5 Sauerstoffpermeationsmessungen

Die Ermittlung der Sauerstoffdurchlässigkeit an Bügelverschlüssen mit verschiedenen TPEs als Dichtungsmaterial erfolgte beim Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung in Freising.

Die zu untersuchenden Bügelverschlüsse werden auf eine Musterflasche aufgesetzt. Der Innenraum der Flasche wird eine bestimmte Zeit mit Stickstoff (Formiergas) gespült, um den Restsauerstoff zu entfernen. Über die Flasche wird eine Glocke gestülpt, diese Glocke dichtet nach außen hin ab, so dass ein geschlossenes System entsteht. Der Luftraum in der Glocke wird mit reinem Sauerstoff gespült, um eine reine Sauerstoffatmosphäre zu schaffen. Sowohl das Formiergas als auch der Sauerstoff strömen mit einer konstanten Geschwindigkeit nach. Nach 24 h hat sich ein Gleichgewicht zwischen durch den Verschluss permeierendem Sauerstoff und aus der Flasche abfließendem Formiergas eingestellt. Der im abfließenden Formiergas enthaltene Sauerstoff wird durch ein Sensorsystem ermittelt. Zur Erhöhung der Genauigkeit wird jeweils eine Doppelbestimmung über einen Zeitraum von 7 Tagen durchgeführt.

3.6 Eingesetzte Hefestämme

Seit etwa 15 Jahren wurde in der Flensburger Brauerei für die Produktion der untergärigen Biere der Hefestamm 34/70 verwendet. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Gärversuche mit zwei weiteren untergärigen Hefestämmen durchgeführt, Hefestamm S 321 (ein Hebru-Abkömmling) sowie Hefestamm S 285. Diese Hefestämme wurden von der mikrobiologischen Abteilung des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I zur Verfügung gestellt und sind dort in der

Stammsammlung unter den eben genannten lehrstuhlinterne Nummern hinterlegt.

Im Laufe des Jahres 2007 erfolgte aufgrund der durch die Versuche gewonnenen Erkenntnisse die komplette Umstellung von dem Hefestamm 34/70 auf den Hefestamm 321. Der erste Teil der durchgeführten Versuche ist daher mit dem Hefestamm 34/70 erfolgt, die folgenden Versuche wurden dann mit dem Hefestamm 321 durchgeführt.

3.7 Durchführung der Assimilationsversuche

3.7.1 Belüftungseinrichtungen

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Assimilationsversuche an der neu gebauten Anlage wurden drei verschiedene Belüftungssysteme eingesetzt.

Intensivbelüftungseinrichtung nach dem Venturiprinzip

Im Rahmen der Umbaumaßnahmen von Erntehefe- zu Assimilationstanks wurden zunächst Belüftungsdüsen vom Typ „Belüftungssystem Vario Air 7400X“ der Fa. Handtmann in die Umpumpleitungen eingebaut. Diese Düsen werden einbaubereit geliefert und durch eine Milchrohrverschraubung in die Umpumpleitung integriert. Durch den Einbau mittels Verschraubung ist hier jederzeit ein Ausbau (z.B. zu Reinigungszwecken oder Dichtungswechsel) bzw. Austausch gegen ein anderes Belüftungssystem möglich.

Im Eingangsbereich der Belüftungseinrichtung weist die Düse einen Durchmesser von 65 mm auf, das entspricht dem Durchmesser der gesamten Umpumpleitung. Die Luftzufuhr erfolgt über ein sog. Einblaserohr (Abbildung 14), dieses Rohr führt senkrecht durch die Belüftungseinrichtung und weist am Umfang 24 kleine Bohrungen mit einem Durchmesser von 2 mm auf. Dadurch wird die zugeführte Luft bereits fein im flüssigen Medium verteilt. Um eine ordnungsgemäße Reinigung und mikrobiologische Sicherheit zu gewährleisten, ist dieses Einblaserohr CIP- und SIP-fähig. Der Leitungsdurchmesser verjüngt sich bis auf 14,5 mm (Abbildung 15) im eigentlichen Düsenbereich. Durch diese Querschnittsverengung steigt die Fließgeschwindigkeit etwa um das 20-fache an. Unmittelbar nach der Düse erfolgt eine Erweiterung auf den

Ursprungsdurchmesser von 65 mm, diese schlagartige Entspannung führt zu einer feinporigen Verteilung der Luft im Medium. Durch das vorhandene Schauglas kann dieses gut beobachtet werden.

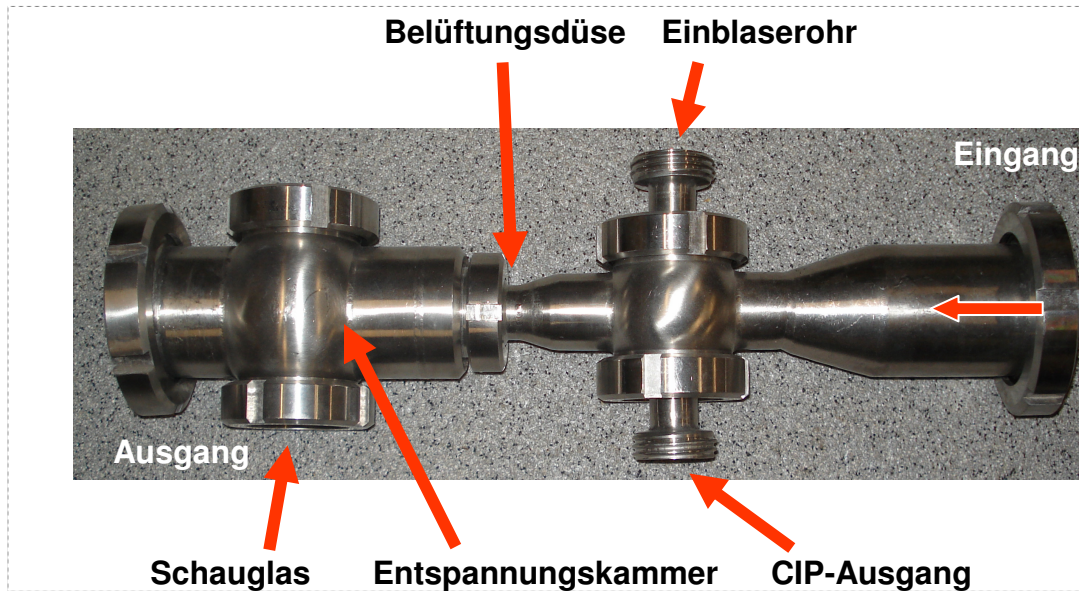


Abbildung 13: Intensiv-Belüftungsdüse nach dem Venturi-Prinzip



Abbildung 14: Einblaserohr

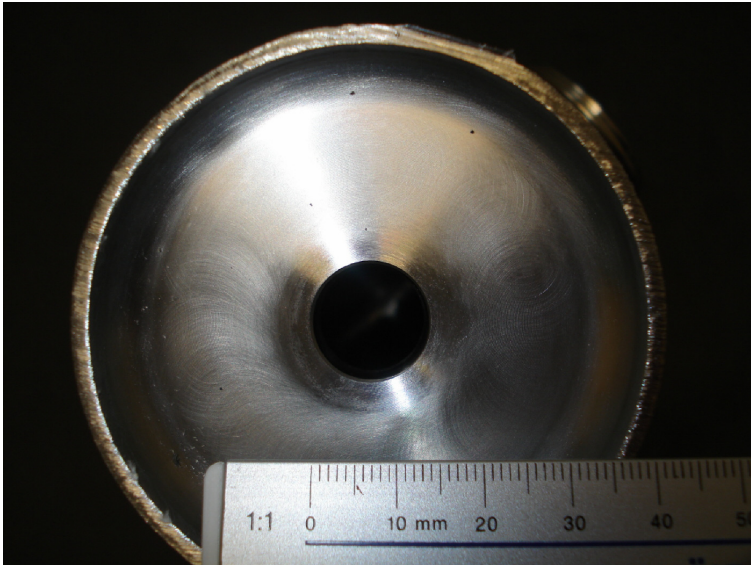


Abbildung 15: Schnitt durch die Entspannungskammer der Düse

Belüftungseinrichtung T-Stück mit Einblaserohr

Diese Belüftungseinrichtung wurde von der brauere internen Schlosserei angefertigt. Sie besteht aus einem durchgängigen Rohr DN 65 ohne Querschnittsverengung. Es wurde hier wiederum, um einen feinen Lufteintrag zu erzielen, ein Einblaserohr mit 2 mm Bohrungen senkrecht zur Strömungsrichtung integriert. Das Einblaserohr ist wiederum CIP- und SIP-fähig. Zur Beobachtung der Durchmischung wurde ebenfalls ein Schauglaselement implementiert.

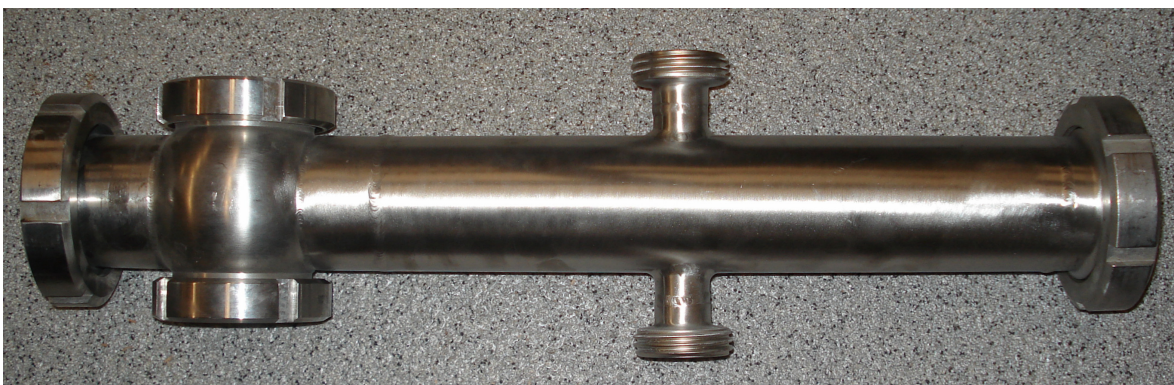


Abbildung 16: Belüftungseinrichtung T-Stück mit Einblaserohr

Belüftungseinrichtung T-Stück

Bei dieser Belüftungseinrichtung handelt es sich ebenfalls um eine Eigenanfertigung. Sie besteht ebenfalls aus einem durchgängigen Rohr DN 65 ohne Querschnittsverengung. Das Luftrohr trifft senkrecht auf die Leitung und

endet hier. Es handelt sich hierbei also um ein wirkliches T-Stück. Die Luft wird nicht fein verteilt zugeführt, sondern gelangt je nach vorhandenen Betriebsbedingungen in Form grober Blasen in die Belüftungseinrichtung. Hier wurde ebenfalls ein Schauglas installiert.

3.7.2 Versuchsvariation

Grundsätzlich können bei der Hefeassimilationsanlage steuerungsseitig folgende Parameter variiert werden:

- Dauer Umpumpen mit Belüftung
- Dauer Umpumpen ohne Belüftung
- Dauer Ruhephasen zwischen den Umpumpzyklen
- Menge der zugeführten Luft während der Belüftung [0 – 15 hl/h]
- Pumpenleistung während des Umpumpens [0 – 100 %]
- Assimilationstemperatur

Da die Versuche im laufenden Produktionsbetrieb stattfanden, mussten sie auch permanent mit der aktuellen Produktion bzw. Produktionsplanung abgestimmt werden. Grundsätzlich wurden die Assimilationstanks nur mit Würze der Sorte „Pils“ aufgefüllt und die fertig assimilierte Hefe auch ausschließlich zum Anstellen von Pils-Gärungen eingesetzt. Da alle anderen produzierten Biere deutliche Abweichungen bei den Bittereinheiten und der Farbe gegenüber der Sorte Pils aufweisen, bestand hier die berechtigte Befürchtung seitens der Qualitätssicherung, dass das Anstellen einer anderen Sorte als Pils mit der in Pilswürze assimilierten Hefe zu signifikanten Geschmacks- sowie Qualitätsveränderungen führen könnte.

Je nach saisonalen Schwankungen werden in der Brauerei in einer Woche 4 – 15 ZKGs der Sorte Pils angestellt, die entsprechenden Pilssude werden jeweils montags begonnen und sind in Abhängigkeit von der zu produzierenden Menge zwischen Dienstag und Donnerstag beendet. Entsprechend konnten pro Woche ein bis drei Assimilationen pro Assimilationstank durchgeführt werden.

Aufgrund dieser produktionstechnischen Gegebenheiten musste die mögliche Anzahl an variierten Versuchsassimilationen entsprechend eingeschränkt werden. Für die Testassimilation wurden ausschließlich die Parameter Umpumpdauer mit Belüftung sowie Umpumpintensität variiert. Alle Assimilationen erfolgten bei einer

Temperatur von 14 °C, das entspricht der Würzeanstelltemperatur. Die Menge an zugeführter Luft während der Belüftung wurde bei allen Versuchen konstant bei einem Volumenstrom von 15 hl/h gehalten.

Unter Einsatz der Intensivbelüftungsdüse wurden 9 Testassimilationen entsprechend folgender Tabelle mit dem Hefestamm S 321 durchgeführt:

Tabelle 6: Übersicht Assimilationsversuche mit der „Belüftungseinrichtung Intensivbelüftungsdüse“

Standardnummer	Belüftungszeit [min]	Pumpenleistung [%]
1	10	25
2	35	25
3	60	25
4	10	45
5	35	45
6	60	45
7	10	65
8	35	65
9	60	65

Mit den Belüftungssystemen „Belüftungseinrichtung T-Stück mit Einblaserohr“ sowie „Belüftungseinrichtung T-Stück“ wurden jeweils vier Versuchsreihen gemäß Tabelle 7 ebenfalls mit dem Hefestamm S 321 durchgeführt:

Tabelle 7: Übersicht Assimilationsversuche mit der "Belüftungseinrichtung T-Stück mit Einblaserohr" sowie "Belüftungseinrichtung T-Stück"

Standardnummer	Belüftungszeit [min]	Pumpenleistung [%]
1	10	25
2	60	25
3	10	65
4	60	65

An den Testassimilationen sollte jeweils der Zeitraum für eine Zellzahlvermehrung von einer Ausgangszellzahl von 10 Mio./ml auf 60 Mio./ml untersucht werden sowie der damit einhergehende FAN- und Extraktabbau.

Um zu gewährleisten, dass sich alle Zellen schon zu Beginn der jeweiligen Assimilation in der logarithmischen Phase befanden, wurden für die Versuche Assimilationen ausgewählt, denen in der jeweiligen Woche bereits eine Assimilation vorausgegangen war. In einigen Fällen war dies aus

produktionstechnischen Gründen (zu geringe Sudzahl, um in einer Woche zwei aufeinander folgende Assimilationen durchzuführen) nicht möglich. In diesen Fällen lag die Assimilationshefe zu Wochenbeginn gekühlt vor, die Hefezellen befanden sich somit in der Lag-Phase. Hier wurde versucht, die Assimilation mit einer Zellzahl von 6 - 8 Mio./ml zu starten, so dass beim Erreichen der Zellzahl von 10 Mio./ml sich auch alle Zellen in der logarithmischen Phase befanden, um konstante Versuchsbedingungen zu gewährleisten.

3.8 Durchführung der Gärversuche

Da sich der Versuchszeitraum über mehrere Monate erstreckte und in Hinsicht auf die Würzebeschaffenheit möglichst konstante Bedingungen herrschen sollten, wurden alle Versuche mit variierten Parametern beim Anstellen oder während der Gärung mit Würze bzw. an Jungbier der Sorte „Pils“ durchgeführt. Dieses stellt die mengenmäßig am häufigsten produzierte Sorte dar. Alle Gärversuche wurden an Gärungen von 3-Sud ZKGs durchgeführt, bei den Darstellungen der Gärverläufe stellt der Nullpunkt jeweils den Zeitpunkt des Vollwerdens des Gärtanks dar.

3.8.1 Gärversuche im Großmaßstab

Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Reihe von Testgärungen unter Variation der Parameter Hefestamm, Gärtemperatur, Belüftungsintensität sowie Belüftungsdauer und Belüftungszeitpunkt, Drauflasszeitpunkt eines zweiten belüfteten Sudes und der Gärtemperatur durchgeführt:

- Variation des Hefestamms
- Variation der Anstellzellzahl
- Variation der Belüftung
 - Belüftungsversuche mit Hefestamm 34/70
 - Belüftungsversuche mit Hefestamm 321

3.8.2 Gärversuche im Kleinmaßstab

Da hochvitale Reinzuchthefen nur wenig SO₂ bilden, sollten Versuchsreihen mit Assimilationshefe unter Variation der Belüftung durchgeführt werden, zusätzlich

sollte ebenfalls die Veränderung auf die SO₂-Bildung, die aus einer Kaltlagerung einer fertig assimilierten Hefe resultiert, untersucht werden.

Da für eine Versuchsdurchführung im Großmaßstab nicht genügend Assimilationshefe zur Verfügung gestellt werden konnte und besonders die Auswirkungen einer fehlenden Belüftung nicht abzusehen waren und diese ggf. zu einer stark abweichenden Bierqualität führen konnte, wurde diese Versuchsreihe in der Flensburger Versuchsbrauerei im Kleinmaßstab mit einem Volumen von jeweils einem Hektoliter pro Gärung durchgeführt.

3.9 Behandlung der Biere nach der Gärung

Aufgrund der technischen Gegebenheiten in der Brauerei war es nicht möglich, jeden Gärversuch ohne Verschnitt bzw. Vermischung durch die weiteren Produktionsschritte Lagerung, Filtration und Abfüllung zu führen. Überdies hinaus wäre es in Hinsicht auf die durch die teilweise extremen Versuchsbedingungen stark schwankende Bierqualität einzelner ZKGs nicht vertretbar gewesen, die Biere ohne Verschnitt bis zur Abfüllung zu bringen. Es wurde daher von den Bieren aus den Gärversuchen jeweils während der laufenden Jungbierseparation am Separatorauslauf ein 50 l Keg unter Vermeidung eines Sauerstoffeintrags abgenommen. Das Bier wurde in diesen Kegs dann entsprechend der Großmaßstabverfahrensweise 14 Tage bei 0 °C gelagert. Anschließend wurden die Biere über einen 200x200 mm Schichtenfilter mit Filterschichten vom Typ K7-Super der Fa. Strassbourger Filterschichten filtriert, auf einen CO₂-Gehalt von ca. 5 g/l aufcarbonisiert und mittels eines 1-Organ-Handfüllers in 0,33 l Flaschen abgefüllt. Vor der Abfüllung erfolgte eine 10 s dauernde CO₂-Spülung (CO₂-Druck = 3,0 bar) der leeren Flaschen, um den Sauerstoffeintrag beim Abfüllen zu minimieren und auf möglichst gleichmäßig niedriges Niveau zu bringen. Die Abfüllung erfolgte isobarometrisch bei einem Abfülldruck von 3 bar. Die gefüllten Flaschen wurden zum Verdrängen der Luft im Flaschenhals zum Überschäumen gebracht und verschlossen. Bis zur Durchführung der Analysen bzw. Verkostungen erfolgte eine Aufbewahrung im Dunklen bei 0 °C.

Bei den im Kleinmaßstab produzierten Bieren erfolgte die Behandlung nach dem Erreichen einer Diacetylkonzentration von 0,09 mg/l analog, es wurde allerdings

keine Jungbierseparation durchgeführt, da diese in der Größenordnung nicht möglich war.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Hefeherführung

4.1.1 Bau der neuen Assimilationsanlage

Der Umbau der vorhandenen Erntehefetanks zu Assimilationstanks erfolgte von März bis Mai 2006. Im Rahmen der Umbauarbeiten erfolgte die Installation diverser Komponenten (in der Abbildung 17 rot dargestellt. Achtung, die Kühltaschen sind in dieser Abbildung nicht originalgetreu dargestellt, siehe unter Abbildung 12: tech. Zeichnung eines Erntehefetanks).

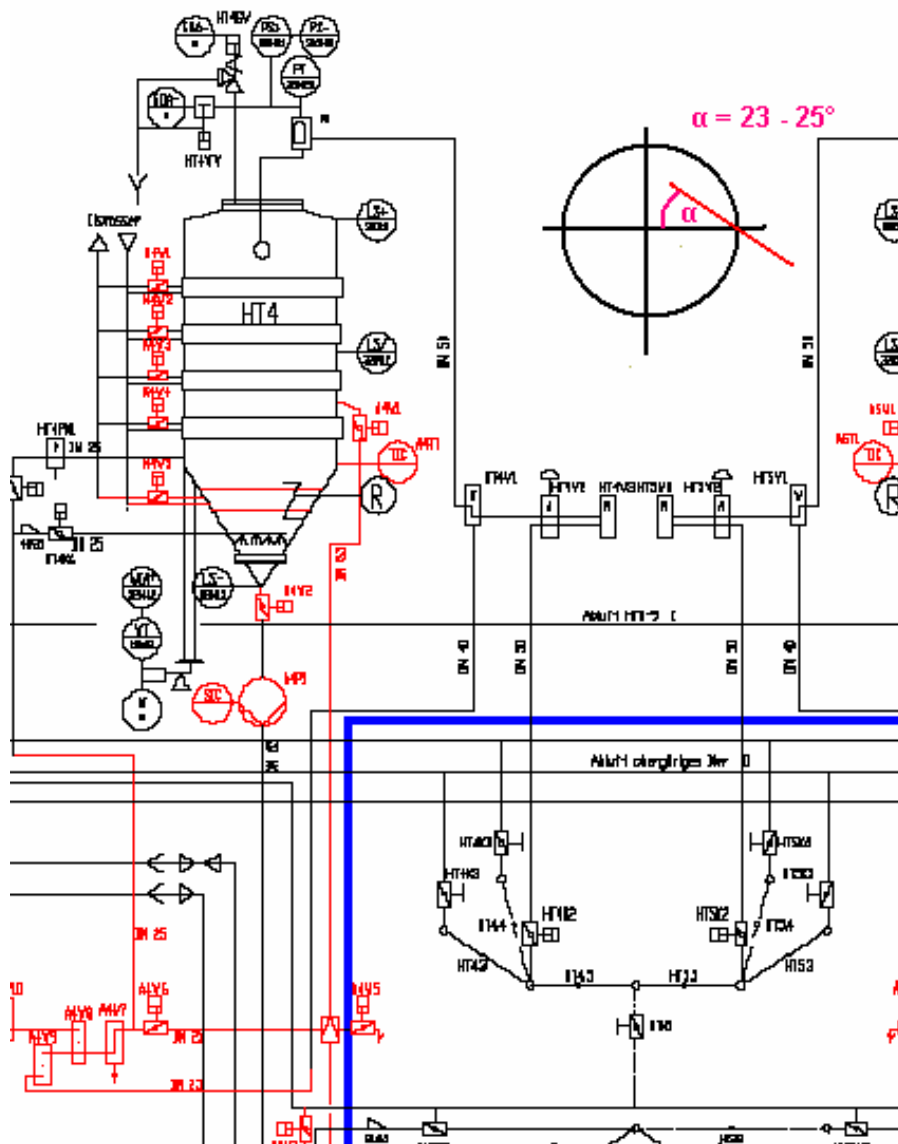


Abbildung 17: Ausschnitt aus dem Fließschema der Assimilationstanks

Kreiselpumpe

Am Auslauf der Tanks wurde jeweils eine selbstansaugende Kreiselpumpe (Hilge Pumpe Typ SIPLA 28.1 Bloc) installiert. Die Pumpen wurden für den Anwendungszweck des Umpumpens während der Assimilation bewusst groß dimensioniert gewählt, die Fördermenge liegt bei 280 hl/h. Daraus sollte ein Umpumpen während des Assimilationsbetriebs bei niedrigen Drehzahlen resultieren. Das Spaltmaß zwischen dem Laufrad und dem Pumpengehäuse liegt bei 0,3 – 0,35 mm, dadurch soll ein Quetschen oder Reiben von Hefezellen während des Umpumpens vermieden werden. Diese Pumpen dienen außer zum Umwälzen des Tankinhaltes auch zum Dosieren der Assimilationshefe während des Anstellens.

Umpumpleitung

Die Umpumpleitung führt von der Pumpe am Tankkonus zu einem Paneel. Hier wird ein Schwenkbogen je nach gewünschtem Vorgang (Assimilation bzw. Hefedosage oder Tankauffüllen) per Hand umgestellt. Auf aufwendige Ventiltechnik wurde aus Kostengründen verzichtet. Von dem Paneel führt die Umpumpleitung zurück in den Tank. Unmittelbar hinter dem Paneel ist die Belüftungsdüse eingebaut, nach der Düse folgt noch eine etwa drei Meter lange Durchmischungsstrecke bis zur Rückführung in den Tank. Die Umpumpleitung weist einen Durchmesser von 65 mm auf. Dies entspricht ebenfalls dem Durchmesser der Rohrleitungen, die vor dem Umbau bereits vorhanden waren (Tanksauslaufleitung, Hefedosageleitung). Im Rahmen der Planung der Assimilationsanlage wurde eine Umpumpgeschwindigkeit von etwa 1 m/s angestrebt. Bei einer angenommenen Fließgeschwindigkeit $c = 1 \text{ m/s}$ und dem gegebenen Durchmesser von 65 mm ergab sich gemäß nachfolgender Berechnung ein umzupumpendes Volumen von knapp 12 m^3 pro Stunde.

$$\begin{aligned} \dot{V} &= c \cdot A \\ \dot{V} &= 1 \text{ m/s} \cdot (0,0325 \text{ m})^2 \cdot \pi \\ \dot{V} &= 0,003316625 \text{ m}^3/\text{s} \quad | \cdot 3600 \text{ s/h} \\ V &= 11,94 \text{ m}^3/\text{h} \end{aligned}$$

Abbildung 18: Berechnung des Volumenstroms bei einer Umpumpgeschwindigkeit von 1 m/s

Das entspricht etwa 43 % der maximalen Förderleistung der Pumpe. Um dieses Volumen zu fördern, muss die Pumpe im mittleren Leistungsbereich arbeiten, wie es aufgrund der möglichst schonenden Hefeförderung auch gewünscht war. Aus diesem Grund wurde die gesamte Umpumpleitung im bereits vorhandenen Durchmesser von 65 mm ausgelegt.

Rückführung der Umpumpleitung

Die Umpumpleitung mündet im Zargenbereich zwischen der ersten und zweiten Kühltasche in den Tank. Die Rückführung erfolgt hier in dem für eine optimale Durchmischung beschriebenen Winkel von 23° zum Radius. Die Rückführung zwischen der ersten und zweiten Kühlzone wurde aus zwei Gründen gewählt. Zum einen war eine andere Positionierung ungünstig, da eine etwas höhere oder etwas tiefere Einmündung in den Tank durch eine Kühltasche geführt hätte. Dies hätte einen wesentlich höheren Arbeitsaufwand zur Folge und wäre nicht ganz unproblematisch gewesen. Zum anderen sollte die Rückführung etwa auf der Hälfte der normalerweise vorhandenen Flüssigkeitssäule erfolgen. Erfolgt die Rückführung kurz unter der Flüssigkeitsoberfläche, steigt die zugeführte Luft sofort auf und es wird evtl. nicht genug Sauerstoff gelöst. Des Weiteren wird dann der Tankinhalt im unteren Bereich nicht optimal durchmischt. Erfolgt die Rückführung zu tief, so wird evtl. immer der gleiche Flüssigkeitsbereich umgewälzt, die Luft steigt zwar auf, aber gerade bei höheren Zellzahlgehalten kann es zu einer vermehrten Sedimentation kommen. Diese Hefezellen würden sich dann im unteren Tankbereich ansammeln und es wäre keine Homogenität im Assimilator mehr gewährleistet.

Belüftungseinrichtung

Die Belüftungseinrichtung der Assimilationsanlage wurde an das Sterilluftnetz der Brauerei angeschlossen, der Druck liegt hier in der Regel bei etwa 7 bar. Der Luftweg führt zunächst durch einen Druckminderer, über den der für die Anlage gewünschte Sterilluftdruck eingestellt werden kann. Hier wurde ein Druck von 2,8 bar gewählt. Es folgt eine elektronische Drucküberwachung der Fa. Endress & Hauser (Modell Ceraphant). Sollte der Druck in der Sterilluftleitung während des laufenden Betriebes mit Belüftung unter den aktuellen Tankinnendruck absinken, wird automatisch das Luftventil an der Düse geschlossen, um ein Eindringen von Flüssigkeit in die Luftwege und -armaturen zu vermeiden. Weiter führt die Leitung durch einen Sterilluftfilter und wird anschließend auf zwei Leitungen (eine für jeden Assimilationstank) aufgeteilt.

Der jeder Düse zugeführte Volumenstrom kann an einem Kleindurchflussmesser (Fa. ABB, Modell „SNAP IN“, Serie 10A6100) per Hand reguliert und kontrolliert werden.

Die gesamte Belüftungseinrichtung mit allen Armaturen ist komplett dämpfbar, das Dämpfen kann bei einem leeren Tank bis in die Düse erfolgen. Bei gefülltem Tank ist ein Dämpfen bis zu dem Luftventil vor der Düse möglich.

Weitere Komponenten

Im Zargenbereich knapp über dem Konus wurde ein sog. Aufsatzthermometer (Fa. Negele, Modell TFP-44) angeschweißt. Mit diesem Thermometer kann die Temperatur zuverlässig ermittelt werden, es ist kein aufwendiger Einbau in den Tank mit anfallenden Schweiß- und anschließenden Polierarbeiten notwendig.

Jede der vier am Zargenbereich vorhandenen Kühltaschen erhielt ein separates Absperrventil. Die Kühlzonen werden in Abhängigkeit vom jeweiligen Füllstand und der Differenz zwischen aktueller und vorgegebener Temperatur einzeln zu- oder abgeschaltet.

Um die Möglichkeit zu schaffen, auch einen evtl. vorhandenen Sumpf kühlen zu können, wurde am Konus eine neue Kühltasche mit Absperrventil angebracht.

Ein im Tank vorhandener Belüftungsring sowie ein Magnetrührwerk wurden vorerst nicht entfernt.

Die vorhandenen Tanksicherheitseinrichtungen wie Über- und Unterdruckventil blieben bestehen.

4.1.2 Funktionsweise der Assimilationsanlage

Steuerung, Bedienung und Programme

Die Assimilationsanlage besitzt eine S7-Steuerung, die mit der S5-Steuerung des Gärkellers gekoppelt wurde. Die Benutzeroberfläche ist entsprechend Abbildung 19 einfach und logisch aufgebaut:

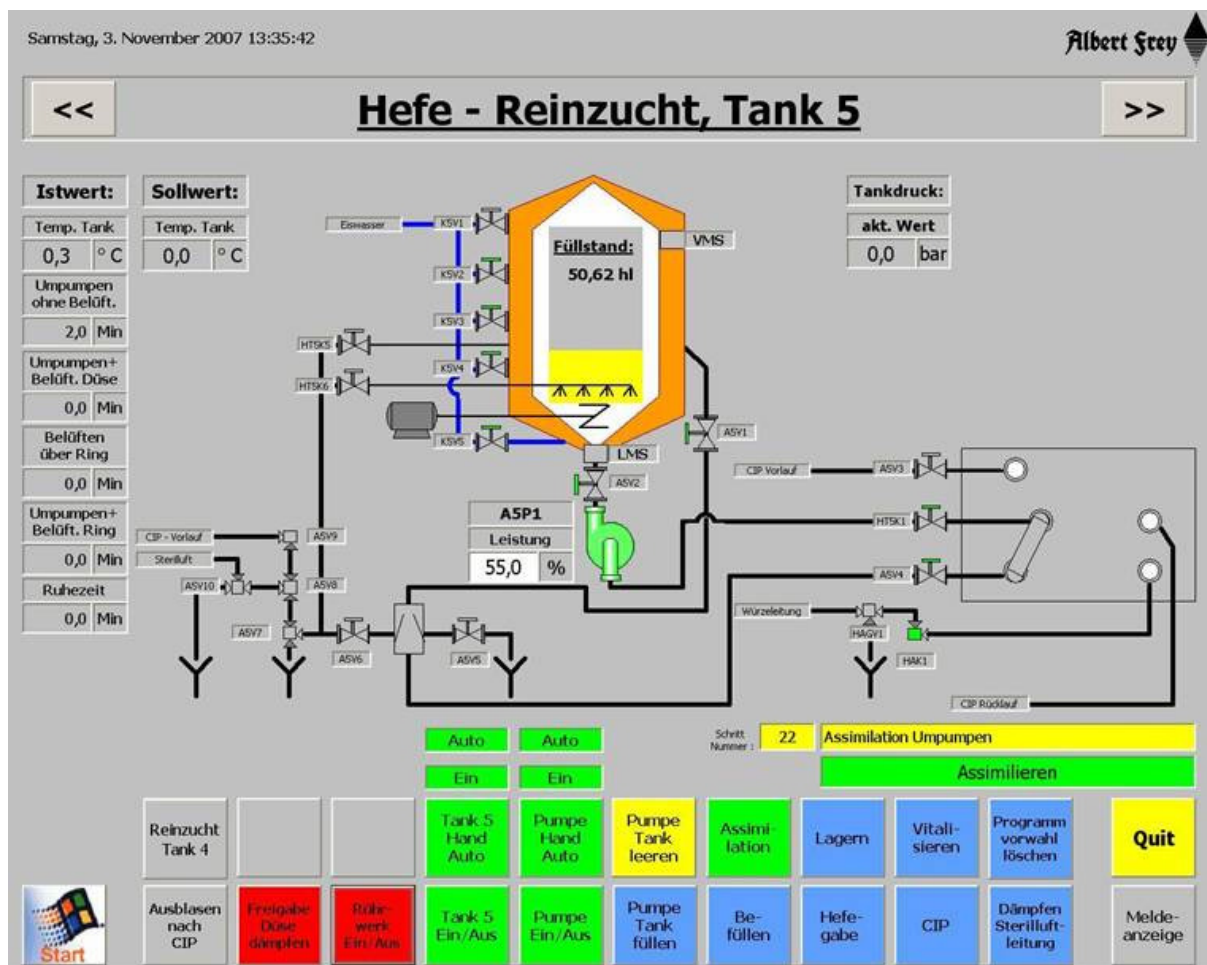


Abbildung 19: Darstellung der Bedieneroberfläche

Es sind folgende Programme anwählbar:

- Assimilation
- Lagerung
- Hefegabe
- Befüllen
- Vitalisieren
- CIP
- Dämpfen Sterilluftleitung

Bei den Programmen Assimilation sowie Lagerung sind zusätzlich verschiedene Parametersätze anwählbar, bei denen folgende Programmabläufe variiert werden können:

- Dauer Umpumpen mit Belüftung
- Dauer Umpumpen ohne Belüftung
- Leistung der Pumpe während Umpumpen mit Belüftung
- Leistung der Pumpe während Umpumpen ohne Belüftung
- Dauer Ruhepause
- Impulszeit Rührwerk

Beispiel Assimilation

Folgende Tabelle zeigt den Parametersatz für ein 10-minütiges Umpumpen mit 45 % Pumpenleistung und anschließender 50-minütiger Pause.

Tabelle 8: Beispielparametersatz für ein Assimilationsprogramm

Dauer Umpumpen mit Belüftung	10 min
Dauer Umpumpen ohne Belüftung	0 min
Leistung der Pumpe während Umpumpen mit Belüftung	45%
Leistung der Pumpe während Umpumpen ohne Belüftung	0%
Dauer Ruhephase	50 min
Impulszeit Rührwerk (Laufzeit/Ruhezeit)	5/30 min

Das Programm wird gestartet und läuft anschließend solange im Kreislauf, bis ein anderes Programm angewählt wird oder eine Störung auftritt.

CIP

Die Tankreinigung erfolgte zunächst nach der Inbetriebnahme etwa alle 4 Wochen analog der ursprünglich vorhandenen Hefetankreinigung mit den Schritten:

- Restentleerung
- Vorspülung (7 min)
- Laugereinigung (NaOH, 2,0%ig; 30 min)
- Zwischenspülung (5 min)
- DESI-Reinigung (Peressigsäure, 0,375%ig; 30 min)
- Nachspülung (4 min)
- Restentleerung (3 min)

In jedem Reinigungsschritt wird die normale Tankreinigung für eine bestimmte Zeit angehalten. Während dieses Zeitraums erfolgt die CIP der zusätzlichen Assimilations-Tankarmaturen wie Umpumpleitung und Düse mit Luftrohr gemäß Tabelle 9, wobei die Taktfolge in jedem Reinigungsschritt fünfmal hintereinander durchlaufen wird.

Tabelle 9: CIP-Sequenzen einzelner Bauteile der Assimilationstanks

	Bauteil	Dauer [s]
Takt 1	Düse AV5 / AV6	3
Takt 2	Belüftungsventil AV7	4
Takt 3	Belüftungsventil AV10	4
Takt 4	Belüftungsring HTK6	15
Takt 5	Probenahmehahn HTK5	10

Durch die im Vergleich zu anderen Tanks, die nach jeder Charge gereinigt werden, relativ langen Reinigungsintervalle kam es zu Verkrustungen an der Konuswandung und der Umpumpleitung, hervorgerufen durch Biersteinbildung (Calciumoxalatbeläge) während der Kaltlagerphasen des Mediums. In Abbildung 20 sind die Beläge am Auslauf bzw. der Ventilklappe der Umpumpleitung zu erkennen.

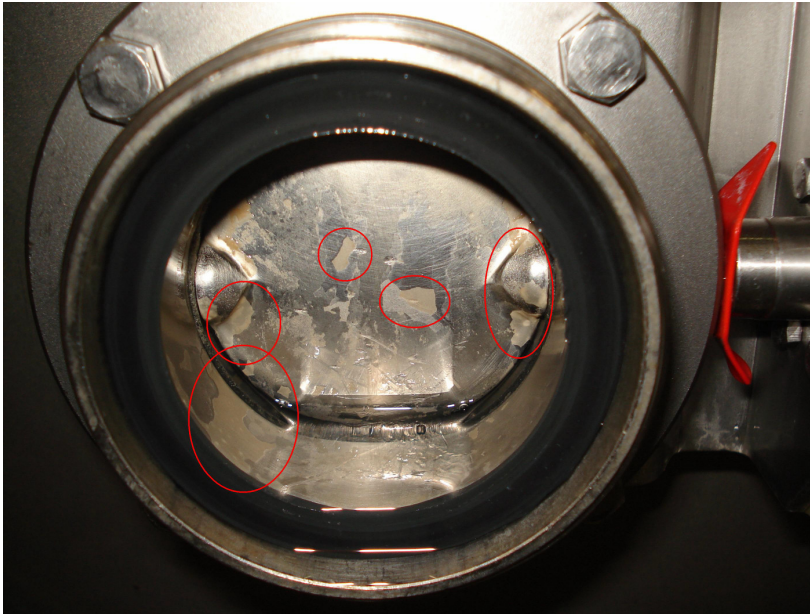


Abbildung 20: Biersteinbeläge an der Umpumpleitung

Im Rahmen der üblichen Reinigung konnten diese Beläge nicht entfernt werden, was aber allein schon aus mikrobiologischen Gründen zwingend notwendig ist. Zu diesem Zweck wurde ein Säurereinigungsverfahren (Salpetersäure, 2,5%ig) mit anschließender Wasserspülung vor der DESI-Reinigung in das Reinigungsprogramm integriert. Diese Säurereinigung wird jeweils nach Stärke der Beläge ausgerichtet (Dauer 60 bis 120 min).

4.1.3 Assimilationsversuche

4.1.3.1 Durchführung der Assimilationen

Neuansatz

Eine Hefekultur wird im Labor analog der üblichen Verfahrensweise bis zum Carlsbergkolben herangezogen. Ist hier eine ausreichende Zellzahl vorhanden, so werden in einen Assimilationstank ca. 5 hl Würze mit Anstelltemperatur von 14 °C vorgelegt. Dann wird der Inhalt des Carlsbergkolbens über den Probenehmer in den Tank gedrückt. Es wird das Assimilationsprogramm gestartet. Hierbei darf nur vorsichtig belüftet und umgepumpt werden, da aufgrund der geringen Flüssigkeitsmenge die Pumpe Luft ziehen kann oder die Leermeldesonde des Tanks anspricht. Ist hier eine Zellzahl von mindestens 60 Mio./ml erreicht, wird der Tank auf einen Inhalt von 20 hl aufgefüllt und erneut die Assimilation gestartet.

Sobald wiederum die gewünschte Zellzahl erreicht ist, werden 10 hl des Tankinhaltes in den zweiten noch leeren Tank umgedrückt. Beide Tanks werden anschließend mit Würze auf 60 hl Inhalt aufgefüllt und die reguläre Assimilation gestartet.

Assimilationsablauf

Ab der Inbetriebnahme der Assimilationsanlage wurde im Rahmen der laufenden Produktion zunächst folgende Verfahrensweise praktiziert:

- Assimilation mit einem Tankinhalt von 60 hl bis zu einer Zellzahl von ca. 80 bis 100 Mio. Zellen/ml
- Dosage von 50 hl Assimilationshefe zur Anstellwürze mit anschließendem Wiederauffüllen des Assimilators auf 60 hl
- Start der Assimilation mit Umpumpen und Belüftung (15 hl/h) für 10 min mit 45 % Pumpenleistung und anschließender Ruhepause von 20 min
- Bei Erreichen der gewünschten Zellzahl Neudosage oder Herunterkühlen des Tankinhalts und Lagerung bei 2 °C unter 5-minütigem Umpumpen alle 30 Minuten

Zu einem späteren Zeitpunkt wurden das Assimilationsvolumen im Rahmen der Reduzierung der Anstellzahl von 60 auf 50 hl und der angestrebte Zellzahlbereich auf 75 bis 85 Mio./ml reduziert. Es wurden ab diesem Zeitpunkt jeweils 45 hl Hefesuspension aus den beiden Assimilatoren einer Würzekühlung (jeweils dem ersten Sud pro 3-Sud-ZKG) beidosiert und die Tanks wieder auf das Ausgangsvolumen aufgefüllt. Daraus ergab sich eine Anstellzahl von ca. 6 Mio. Zellen/ml Würze bezogen auf den gesamten ZKG-Inhalt von 1200 hl.

4.1.3.2 Variation Assimilationsparameter

Das ursprünglich angestrebte Vorhaben, die Versuchsassimilationen über die Dauer der Zellzahlvermehrung von 10 bis 60 Mio./ml zu verfolgen, erwies sich zunächst in der Umsetzung als äußerst problematisch. Oftmals lag die Zellzahlkonzentration direkt nach dem Auffüllen der Tanks schon über 10 Mio./ml, des Weiteren lag die Tanktemperatur mehrmals nicht bei den gewünschten 14 °C. Dies war der Fall, wenn die Hefe zur Überbrückung von Braupausen kalt gelagert

wurde, die Würzetemperatur musste in diesen Fällen zum Tankauffüllen deutlich angehoben werden. Aufgrund der langen Würzewege vom Plattenwärmetauscher bis zum Hefekeller und der daraus resultierenden langen Reaktionszeit kam es zu erhöhten oder erniedrigten Temperaturen zu Assimilationsbeginn. Diese Assimilationen waren somit für die vergleichenden Versuche nicht geeignet und mussten wiederholt werden.

Die Auswertung der 13 Versuchsreihen über diesen Zellzahlbereich zeigt schließlich keine signifikanten Zusammenhänge auf. Eine Ursache ist, dass die aus einer Lagerung des Assimilationsmediums stammenden Hefezellen unterschiedlich lange brauchten, um von der Lag- in die logarithmische Phase überzugehen. Selbst bei einem Assimilationsbeginn bei deutlich unter 10 Mio. Zellen/ml waren beim Erreichen der 10 Mio. Zellen/ml offensichtlich noch ein großer Teil der Zellen in der stationären Phase (vgl. Abbildung 21). Da bei vielen Assimilationen sämtliche Hefezellen vermutlich erst zwischen Zellzahlgehalten von 10 bis 20 Mio./ml in die logarithmische Phase übergegangen waren, wäre ein Vergleich des Vermehrungszeitraumes von 10 bis 60 Mio./ml nicht sinnvoll gewesen.

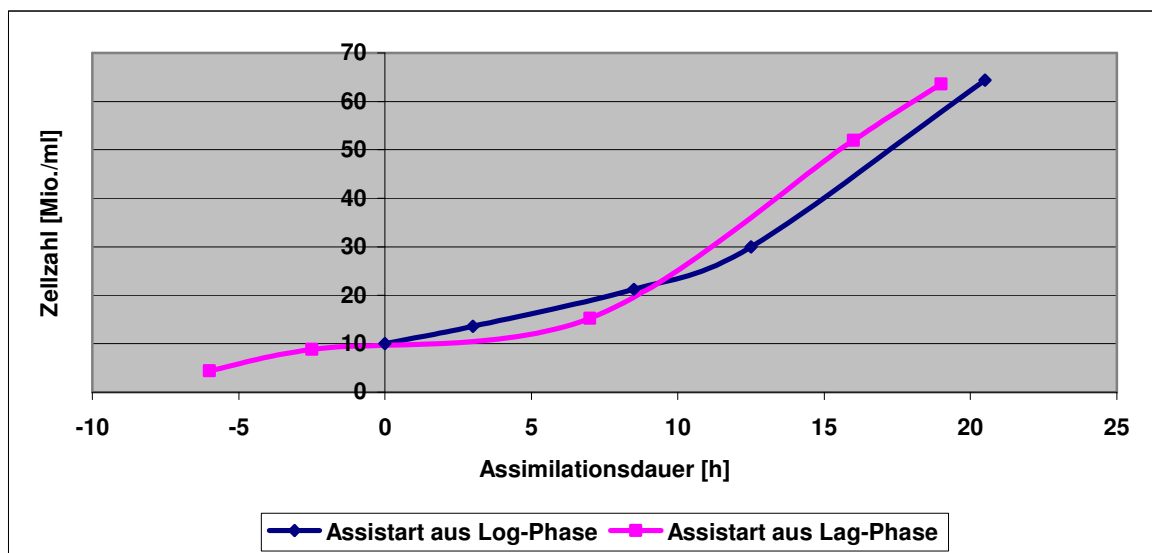


Abbildung 21: Vergleich Assimilationsstart aus Log- und Lag-Phase

Um trotzdem noch eine sinnvolle Aussage über die Wirkung der Variation der Assimilationsparameter treffen zu können, wird hier im folgenden der Zeitraum für eine Zellzahlverdopplung von 30 auf 60 Mio./ml untersucht.

Beim Vergleich der verschiedenen Assimilationen gemäß Abbildung 22 fällt auf, dass bei den Assimilationen mit einer Umpumpdauer von 10 Minuten und anschließender 50-minütiger Pause die Dauer für die Zellzahlverdopplung am längsten ausfällt. Dabei fällt die Verdopplungsdauer beim Umpumpen mit 65 % Pumpenleistung kürzer aus als bei den Assimilationen mit geringerer Umpumpleistung. Aufgrund der langen Pause ohne Umpumpen kommt es bei diesen Assimilationen in der Hefesuspension offenbar zu einem Sauerstoffmangel, der zu einer verminderten Hefevermehrung führt. Eine höhere Umpumpintensität führt tendenziell zu einer geringfügig besseren Vermehrung, hier wird vermutlich durch das intensive Umpumpen und die daraus folgende bessere Durchmischung mehr Sauerstoff in Lösung gebracht und der Tankinhalt besser homogenisiert, so dass auch in allen Bereichen eine Sauerstoffversorgung vorhanden ist. Ein weiteres Indiz hierfür ist, dass die zwei Zellzahlkurven mit 10-minütigem Umpumpen mit 45 sowie 65 % Pumpenleistung einen abflachenden Verlauf zeigen. Bis zu einer bestimmten Zellzahl steht für die Hefevermehrung ausreichend Sauerstoff zur Verfügung, ab der Überschreitung dieser Zellzahl kommt es bei den herrschenden Betriebszuständen zu einem Sauerstoffmangel. Dies ist am Knick im Verlauf der Vermehrungskurve zu erkennen. Hier sind folglich nicht alle Hefezellen in der logarithmischen Phase bzw. die Vermehrung ist ab dieser Zellzahl aufgrund eines Sauerstoffmangels limitiert.

Bei den Assimilationen mit einer Umpumpleistung von 25 % zeigt sich, dass eine verlängerte Umpumpdauer zu einer Verkürzung der Verdopplungsdauer führt. Ein kontinuierliches Umpumpen führt hier zu der kürzesten Verdopplungszeit. Das ist auf den zunehmend homogenen Zustand des Tankinhaltes zurückzuführen, in Hinblick auf die Hefevermehrung sind durch die Verlängerung der Umpumpzeit für einen längeren Zeitraum Sauerstoff sowie Nährstoffe für die Hefezellen zugänglich. Das Gleiche gilt für die Assimilationsverläufe mit 65 % Pumpenleistung.

Die Verläufe der Assimilationen 4 und 5 sind hier auf den ersten Blick nicht nachvollziehbar, da hier trotz geringerer Umpumpleistungen und teilweise vorhandenen Pausenintervallen kürzere Zellzahlverdopplungszeiten vorliegen als bei kontinuierlichem Umpumpen mit der höchsten Leistung von 65 %. Möglicherweise sind einige Assimilationsverläufe aufgrund von Probenahme- oder

Analysenfehlern nicht korrekt dargestellt. Eine andere mögliche Erklärung wäre, dass durch das kontinuierliche Umpumpen bei der Assimilation Nr. 9 zwar eine dauernde Homogenität des Tankinhaltes gewährleistet ist, die hohe Pumpenleistung von 65 % und die daraus resultierende extreme Fließgeschwindigkeitserhöhung im Düsenbereich aber einen Stress für die Hefe darstellen, was zu einer verminderten Vermehrung führt und den Vorteil der besten Homogenisation zunichte macht. Das würde bedeuten, dass bei den Assimilationen mit 45 % Umpumpleistung sowie kontinuierlichem Umpumpen und Umpumpen für 35 Minuten mit 25 Minuten Pause hier ein Optimum erzielt wird, da die Hefezellen beim Umpumpen weniger stark belastet werden und durch das Umpumpen mit mittlerer Leistung immer noch eine ausreichende Homogenität der Hefesuspension gewährleistet ist. Eine weitere mögliche Erklärung für die offensichtlich geringere Vermehrung bei 65 % Pumpenleistung wäre, dass durch die sehr starke Schaumbildung ein erheblicher Teil der Hefezellen im Schaum angereichert wird und daraus eine geringere Hefezellzahl im Assimilationsmedium resultiert.

Eine physiologische und morphologische Veränderung der Hefezellen durch das Umpumpen mit 65 % Pumpenleistung konnte in diesem Zusammenhang aber nicht nachgewiesen werden.

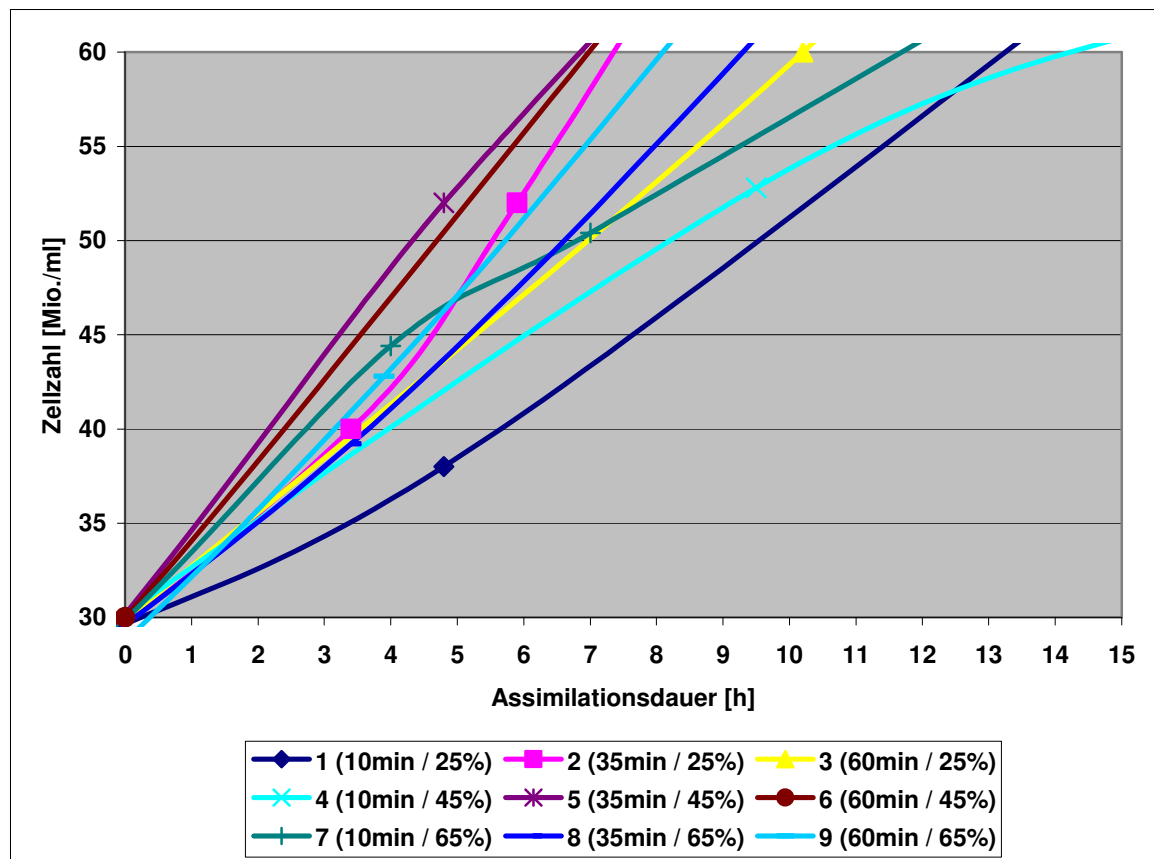


Abbildung 22: Zellzahlverläufe der Assimilationen mit variierten Parametern unter Einsatz der Venturi-Düse

Mit der langsamen Vermehrung bei den Assimilationen mit 10 Minuten Belüftungsdauer einhergehend sind hier auch die Extraktabnahme sowie der FAN-Abbau am höchsten ausgefallen. Hier hat neben dem aeroben Stoffwechsel vermehrt auch Gärungsstoffwechsel stattgefunden.

Der geringste FAN- und Extraktverbrauch ist bei den Assimilationen 5 und 6 mit der kürzesten Zellzahlverdopplungsdauer vorzufinden. Dies bestätigt die Annahme, dass hier für eine Hefevermehrung optimale Zustände im Assimilationstank vorherrschen. Besonders auffällig ist der niedrige FAN-Verbrauch für die Zellzahlverdopplung von 30 auf 60 Mio. Zellen/ml in Höhe von 15 mg/l bei der Assimilation Nr. 6. Eine explizite Erklärung dafür kann an dieser Stelle nicht gegeben werden, aber gemäß Abbildung 23 ist ersichtlich, dass hier bereits vor dem Erreichen einer Zellzahl von 30 Mio./ml eine deutliche FAN-Abnahme stattgefunden hat.

Bei der Assimilation Nr. 9 mit kontinuierlichem Umpumpen bei 65 % Pumpenleistung ist gegenüber den Assimilationen 5 und 6 lediglich der FAN-Verbrauch minimal erhöht. Die Theorie, dass sich das permanente Umpumpen bei 65 % in einer Art Stress auf die Hefe auswirkt, ist anhand der hier gefundenen Daten nicht nachvollziehbar.

Tabelle 10: Ergebnisse der Parametervariation bei Assimilationen unter Einsatz der Venturi-Düse

Assimilationsnummer	Belüftungszeit [min]	Pumpen-leistung [%]	Verdopplungs-dauer [h]	FAN-Abbau [mg/l]	Es-Abnahme [GG%]
1	10	25	13,3	60	1,7
2	35	25	7,2	k.A.	1,1
3	60	25	9,0	40	1,2
4	10	45	14,3	50	1,4
5	35	45	6,9	35	1,0
6	60	45	6,9	15	1,2
7	10	65	11,5	55	1,9
8	35	65	9,4	40	1,1
9	60	65	8,2	40	1,0

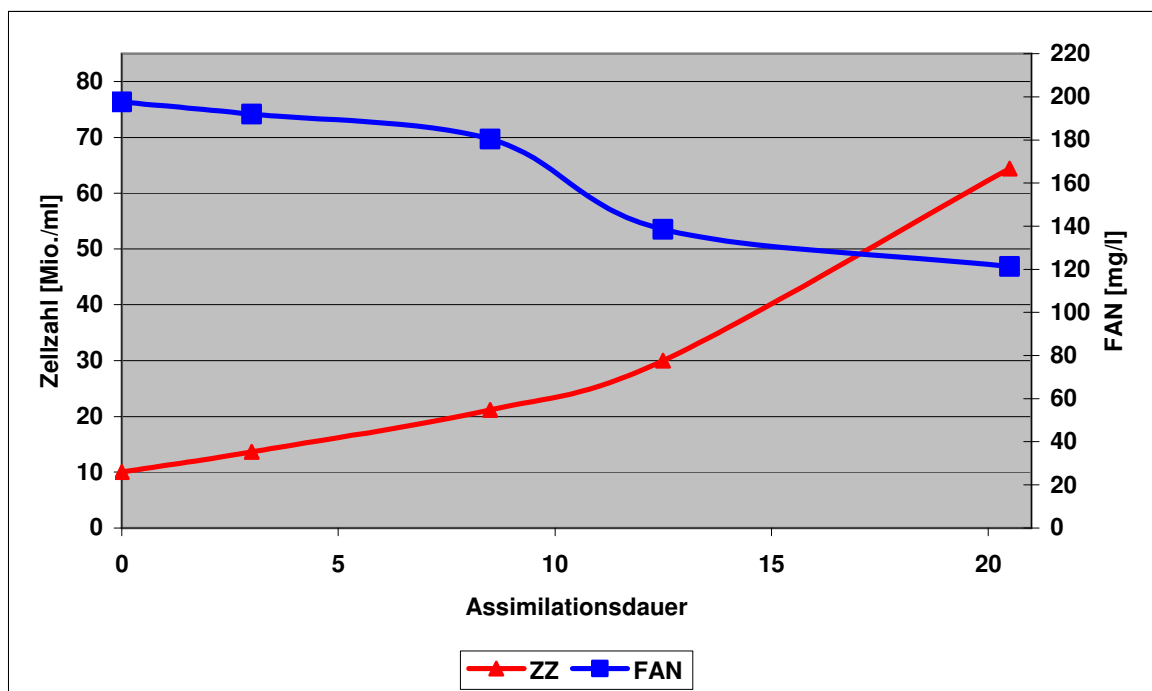


Abbildung 23: Zellzahlzunahme und FAN-Verbrauch der Assimilation Nr. 6

Problematisch fiel die Düse bei den hier durchgeführten Versuchsreihen in zweierlei Hinsicht auf. Zum ersten bildete sich eine Schaumdecke aus, die besonders bei kontinuierlichem Umpumpen sowie bei Betrieb mit höheren

Pumpenleistungen an Höhe zunahm. Bei mehreren Assimilationen mit andauerndem Umpumpen mit 65 % Pumpenleistung erreichte die Schaumdecke die Vollmeldesonde des Tanks, bevor der gewünschte Zellzahlbereich erreicht war. Das Programm geht in diesem Fall automatisch auf Störung. Die Höhe der Schaumdecke beträgt dann etwa 2 m und nimmt ein Volumen von ca. 70 hl ein bei einem Volumen der Hefesuspension von lediglich 60 hl. Nachdem der Schaum etwas zusammengefallen ist, kann das Programm erneut gestartet werden. Während dieses Zeitraumes besteht aber die Möglichkeit, dass die Hefekultur bereits in Gärung übergeht. Zum zweiten war gelegentlich eine Anreicherung von Hefezellen in der Schaumdecke zu beobachten (visuelle Kontrolle über Schauglas am Tankdom). Nach einer evtl. Kaltlagerphase, in der die gesamte Schaumdecke wegen der fehlenden Belüftung zusammenfällt, lag dann regelrecht eine Hefedecke auf der Assimilationssuspension. Da dieser Hefe sämtliche Nährstoffe fehlen, die Zellen austrocknen können und zudem durch in der Flüssigkeit fehlende Zellen die Zellzahl verfälscht wird, sollte die Ausbildung einer solchen Hefeschicht vermieden werden.

4.1.3.3 Vergleich der drei Belüftungssysteme

Vergleich der effektiven Umpumpleistung

Zur Ermittlung der tatsächlichen Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der entsprechenden Pumpenleistung wurde unter Einsatz der drei Belüftungssysteme ein IDM in die Umpumpleitung eingebaut. Die Ergebnisse sind in Abbildung 24 dargestellt. Wie hier ersichtlich wird, führt der Einsatz der Venturi-Düse im Vergleich zu den anderen Düsen bei gleicher Pumpenleistung zu einer deutlich reduzierten Fließgeschwindigkeit, der Unterschied zwischen den beiden T-Stück-Düsen ist dagegen nur minimal ausgeprägt. Resultiert aus einem Umpumpen mit 40 % Pumpenleistung bei den T-Stück-Düsen eine Fließgeschwindigkeit von etwa 0,9 m/s, so beträgt sie bei der Venturi-Düse lediglich 0,4 m/s. Durch die verringerte Fließgeschwindigkeit, die auch die Einmündungsgeschwindigkeit bei der Rückführung in den Tank darstellt, wird der Tankinhalt weniger durchmischt. Dieser Effekt wird noch verstärkt, da ebenfalls ein verringerter Volumenstrom vorhanden ist. Der ursprünglich angestrebte Betriebszustand mit einer gewünschten Fließgeschwindigkeit von etwa 1 m/s ist mit der Venturi-Düse gar

nicht realisierbar. Der größte Teil der Pumpenleistung wird hier benötigt, um den Widerstand der Verengung zu überwinden.

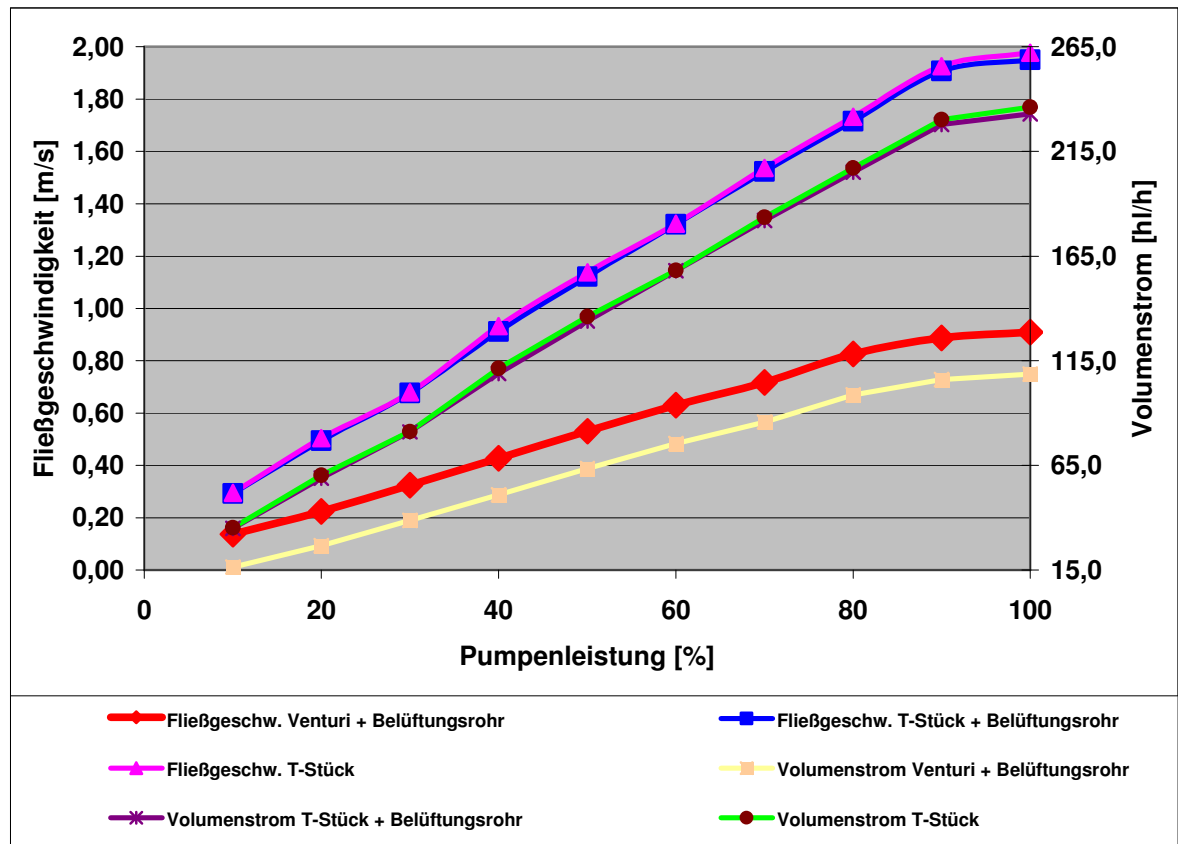


Abbildung 24: Fließgeschwindigkeit und Volumenstrom der versch. Belüftungssysteme in Abhängigkeit von der Umpumpintensität

Vergleichsassimilationen

Aufgrund der bereits unter 4.1.3.2 erwähnten Problematik wird bei diesen Versuchsassimilationen wiederum der Zeitraum für eine Zellzahlverdopplung von 30 auf 60 Mio./ml zur Auswertung herangezogen.

Bei allen drei Düsen führt eindeutig der Betrieb während der Assimilation mit 10-minütigem Umpumpen mit 25 % Pumpenleistung und anschließender 50-minütiger Pause zu der langsamsten Hefevermehrung. Den längsten Zeitraum für die Zellzahlverdopplung benötigt bei diesen Betriebsparametern die Assimilation mit der einfachen T-Stück-Düse, gefolgt von der Venturi-Düse. Aus der Assimilation mit der T-Stück-Düse mit Einblaserohr resultiert dabei die geringste Zellzahlverdopplungsdauer. Offensichtlich führt der Einsatz der T-Düse mit Einblaserohr hier zum höchsten Sauerstoffeintrag in Kombination mit der besten

Durchmischung des Tankinhaltes. Die T-Stück-Düse ohne Einblaserohr führt zwar zu einer angemessenen Durchmischung der Hefesuspension im Tank, aufgrund der groben Luftblasen kommt es aber nur zur einer mäßigen Sauerstofflösung, ein Teil der groben Luftblasen steigt direkt nach der Rückführung in den Tank an die Flüssigkeitsoberfläche auf. Die Venturi-Düse gewährleistet durch die intensive Verwirbelung den höchsten Sauerstoffeintrag in das umgepumpte Medium, die extrem langsame Fließgeschwindigkeit führt aber zu einer mangelhaften Homogenisierung des Tankinhaltes. Das Optimum stellt bei diesen Bedingungen das T-Stück mit Belüftungsrohr da.

Bei der Venturi-Düse führte das kontinuierliche Umpumpen mit 65 % Pumpenleistung zu der schnellsten Zellzahlverdopplung. Fast zeitgleich damit erreichte die Assimilation der T-Stück-Düse mit Einblaserohr bei gleichen Bedingungen diese Verdopplung. Hier führt der Betriebszustand bei beiden Düsen offenbar zu gleich optimalen Bedingungen hinsichtlich der Hefevermehrung im Assimilator. Der Nachteil eines schlechteren Sauerstoffeintrags bei der T-Stück-Düse gegenüber der Venturi-Düse wird durch die deutlich höhere Fließgeschwindigkeit und daraus resultierende Tankhomogenisierung ausgeglichen. Die Assimilation der T-Stück-Düse mit Belüftungsrohr und 10-minütigem Umpumpen bei 65 % Pumpenleistung führte entgegen den Erwartungen zu der gleichen Verdopplungszeit. Hier muss entweder ein Fehler vorliegen, oder das intensive Umpumpen mit der hohen Umpumpleistung führt selbst innerhalb von 10 Minuten zu solch einer nachhaltigen Durchmischung und Sauerstoffversorgung, dass während der folgenden 50-minütigen Pause keine Nachteile für die Hefevermehrung eintreten.

Die weiteren Versuche mit dem normalen T-Stück ohne Einblaserohr führten weiter zu keinen aussagekräftigen Zusammenhängen.

Insgesamt betrachtet zeigt sich die Tendenz, dass die Assimilationen mit dem T-Stück inklusive Luftrohr zu den schnellsten Zellzahlverdopplungen führen. Überdies hinaus beträgt die Differenz zwischen der langsamsten und schnellsten Assimilation hier nur 2,6 h, bei der Venturi-Düse dagegen 5 h und beim einfachen T-Stück 6,9 h.

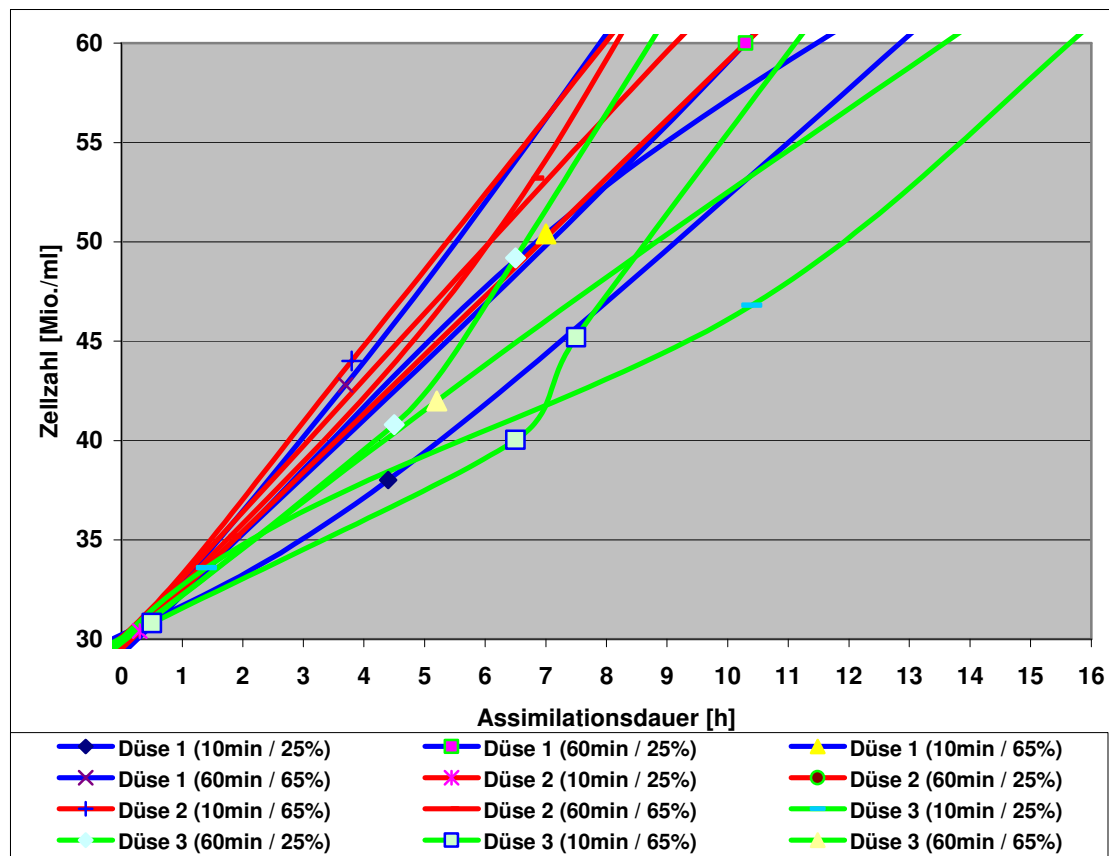


Abbildung 25: Zellzahlverläufe der Testassimilationen unter Einsatz der versch. Belüftungssysteme

Die Schaumbildung bei den beiden T-Stück Düsen war als gering zu bezeichnen. Selbst bei extremsten Betriebszuständen mit kontinuierlichem Umpumpen bei 65 % Pumpenleistung stieg ihre Höhe auf maximal einen Meter an, wobei sie bei der Düse mit Einblaserohr durch die bereits feine Luftzufuhr in die Umpumpleitung geringfügig stärker ausfiel.

Das bei der Venturi-Düse zeitweise aufgetretene Problem einer Hefezellenanreicherung in der Schaumdecke war bei den beiden T-Stück Düsen nicht zu beobachten. Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die entstehenden Luftbläschen bei der Venturidüse die kleinsten sind. Bei den T-Stück Düsen fallen die Blasen dagegen größer aus. Die kleinen Blasen weisen eine deutlich längere Haltbarkeit auf, bis sie platzen. Steigt jetzt mit einer feinen Blase eine Hefezelle auf, so gelangt diese schließlich an die Oberfläche der Schaumdecke. Wenn die feinporige Blase platzt, kann die Hefezelle aufgrund der dichten Blasenstruktur nicht nach unten rutschen und es bildet sich eine Hefeschicht aus.

Bei groben Blasen dagegen kann die Zelle aufgrund der geringeren Oberflächenstabilität wieder abrutschen, oder die Blase platzt bereits vor dem Aufsteigen, nämlich beim Erreichen der Kontaktfläche zwischen Flüssigkeit und Schaumdecke.

4.1.3.4 Diskussion Assimilationsversuche

Aufgrund verschiedener geschilderter Probleme erwies sich die Durchführung von aussagekräftigen Assimilationen als schwierig. Trotzdem sind einige eindeutige Aussagen treffbar. Alle eingesetzten Düsen haben bei den eingeschränkten Betriebszuständen zu einer zögernden Zellzahlverdopplung geführt. Diese dauerte bei dem normalen T-Stück infolge des mangelnden Sauerstoffeintrags am längsten. Die vermeintlich schnellste Zellzahlverdopplung erzielte die Venturi-Düse knapp gefolgt von der T-Stück-Düse mit Belüftungsrohr. Bei der Venturi-Düse führten die eingestellten Betriebszustände aber zu einer extremen Schaumbildung, die den Assimilationsverlauf einschränkte und gelegentlich zur Ausbildung einer nicht erwünschten Hefeschicht an der Flüssigkeitsoberfläche führte. Hier wird durch die Verengung der Umpumpleitung und anschließende Entspannung zwar der höchste Sauerstoffeintrag gewährleistet, aber die Querschnittsreduzierung führt zu einer deutlichen Einschränkung der Fließgeschwindigkeit und daraus resultierenden verminderten Durchmischung des Tankinhaltes. Insgesamt stellte das einfache T-Stück mit Belüftungsrohr hinsichtlich Vermehrungsdauer sowie Praxistauglichkeit das am besten geeignete Belüftungselement dar. Insgesamt bestätigt sich hiermit die Aussage von LEHMANN [22], dass möglichst Belüftungselemente ohne Querschnittsveränderungen zum Einsatz kommen sollten.

4.1.4 Zustand der Assimilationshefe

Ab der Inbetriebnahme im Mai 2006 erfolgte an einer Reihe von hergeführten Assimilationshefen eine Bestimmung der Hefevitalität. Bis auf eine Ausnahme lagen die intracellulären pH-Werte aller Hefen deutlich über 6,2 und deuten damit auf einen hervorragenden physiologischen Zustand der Hefe hin.

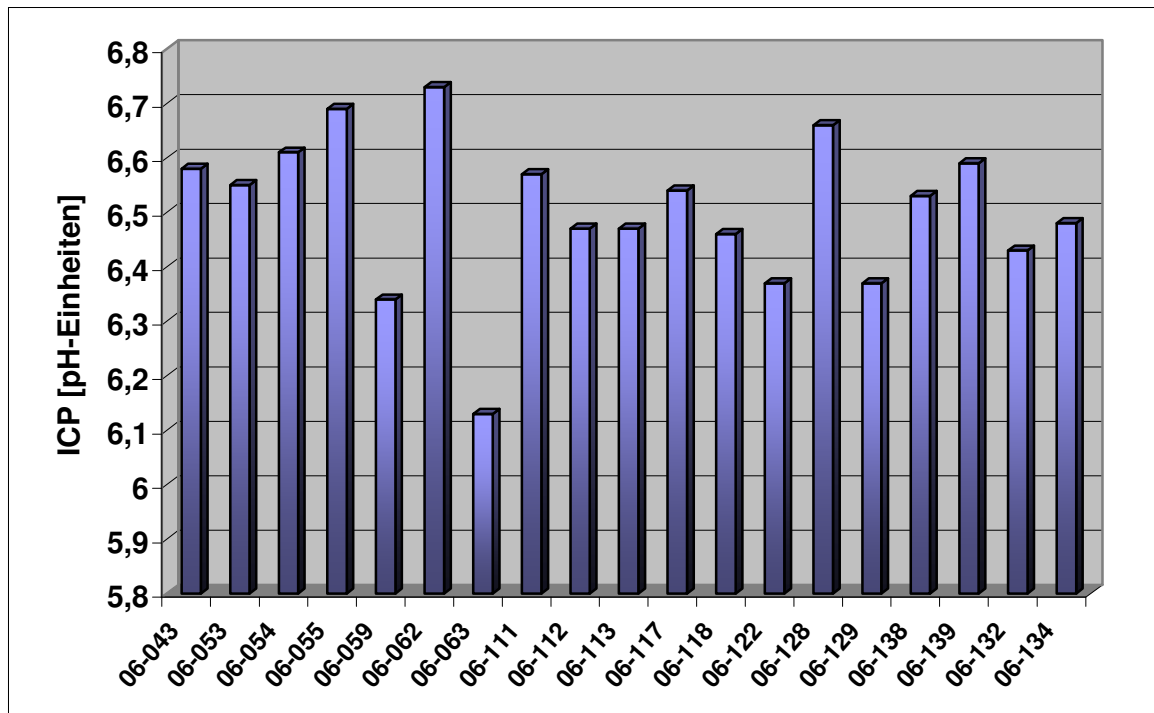


Abbildung 26: ICP-Werte von fertig assimilierten Reinzuchthefechargen

Die Anteile toter Zellen in der Assimilationshefe lagen in der Regel beim Erreichen der angestrebten Zellzahl unter 1,0 %.

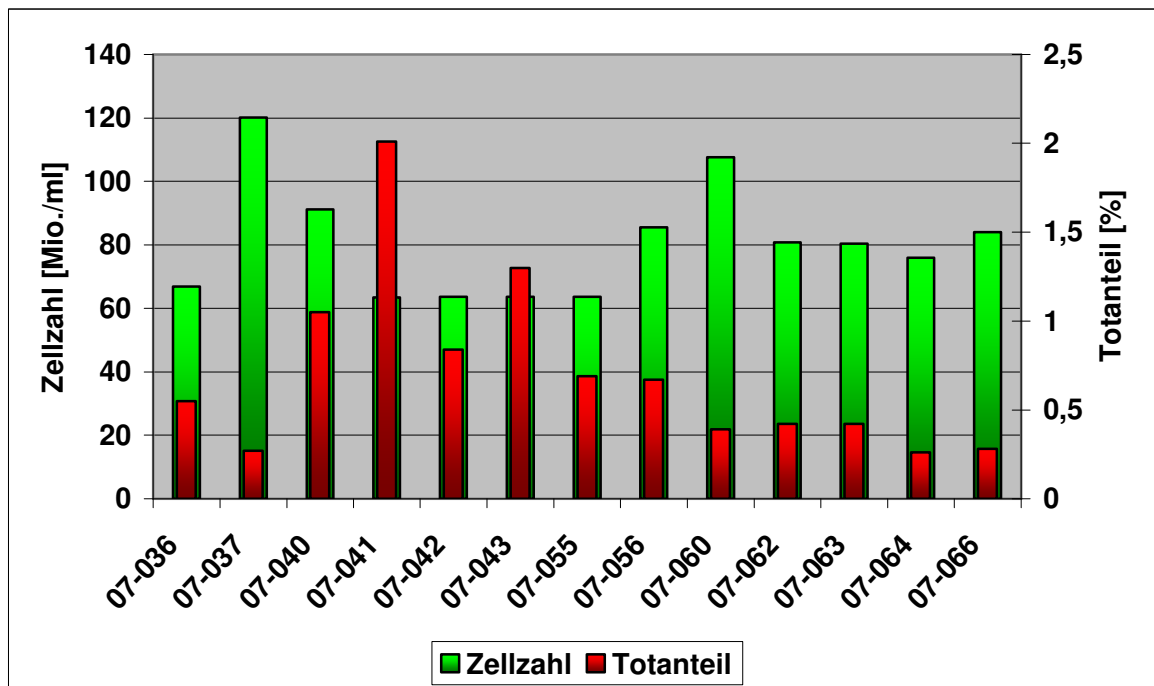


Abbildung 27: Zellzahlgehalte sowie Totzellenanteile von fertig assimilierten Reinzuchthefechargen

Nach der Hefedosage mit anschließendem Auffüllen der Tanks mit Würze und Neustart der Assimilation kam es häufig zu unerklärlichen Anstiegen der Gehalte toter Zellen, die oftmals zwischen 5 und 10 % betragen. Offenbar kam es während der längeren Lagerung der gekühlten Assimilationshefe zu einer verstärkten Sedimentation, es setzte sich eine Hefeschicht an der Konuswandung ab, die auch durch das Umpumpen nicht mehr aufgelöst wurde. In dieser Schicht kam es mit der Zeit zu einem Absterben von Hefezellen. Erst durch die intensiven Flüssigkeitsbewegungen und Temperaturunterschiede beim Wiederauffüllen des Tanks löst sich diese Schicht, woraus die erhöhten Totanteile zu Assimilationsbeginn resultierten. Während der Hefedosage rutscht die Hefeschicht mit der Abnahme des Flüssigkeitsspiegels langsam am Konus hinunter, wodurch das Problem zunächst nicht auffiel. Erst bei vollständiger Tankentleerung sind einige hängengebliebene Reste dieser Hefeschicht an den Einbauten zu finden.



Abbildung 28: Rest einer gebildeten und an der Konuswandung heruntergerutschten Hefeschicht in einem Assimilationstank

Um diesem Problem entgegenzuwirken wurde steuerungsseitig ein kleiner Eingriff vorgenommen: das im Tank vorhandene Rührwerk erhielt eine Taktung, durch die es während der Lagerung alle 30 Minuten einmal für 5 Minuten und während der

Hefedosage kontinuierlich mitläuft. Seit dem Einführen dieser Maßnahme sind die plötzlich auftretenden erhöhten Totanteile zu Assimilationsbeginn nur noch in geringem Maße aufgetreten. Diese sind wahrscheinlich auf sich lösende Brandhefepartikel zurückzuführen.

4.1.5 Hefelagerung

Wird eine fertig assimilierte Hefe nicht zum Anstellen benötigt, so wird der gesamte Tankinhalt von der Assimilationstemperatur von 14 °C auf eine Lagertemperatur von 3,0 °C heruntergekühlt. Mit den während der Lagerung angewandten Parametern dauert dieser Vorgang etwa 24 h, durch zusätzlichen Einsatz des Rührwerkes lässt sich das Herunterkühlen auf ca. 18 h verkürzen. Dieses ist auf die permanente Durchmischung des Tankinhaltes und die daraus resultierende gleichmäßige Wärmeübertragung zurückzuführen. Alternativ kann statt des Einsatzes des Rührwerks durch permanentes Umpumpen ebenfalls ein beschleunigtes Herunterkühlen erreicht werden. Der Temperaturverlauf während des Herunterkühlens ist in Abbildung 29 dargestellt.

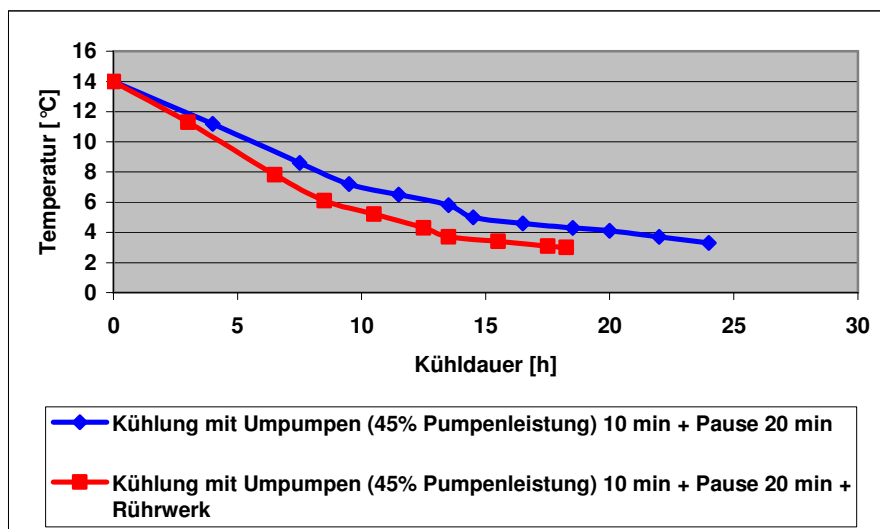


Abbildung 29: Temperaturverlauf der Assimilationshefe während des Herunterkühlens auf Lagertemperatur

Der Abkühlvorgang sollte rechtzeitig, d.h. bei einer Zellzahl von 60 bis 70 Mio./ml, eingeleitet werden, da sich die Hefe während des Herunterkühlens noch etwa bis zu einer Temperatur von 8 °C weiterhin vermehrt.

Die so heruntergekühlte Hefe wird unter gelegentlichem Umpumpen (Umpumpen für 10 min mit 45 % Pumpenleistung alle 30 min) gelagert. Über einen Zeitraum von 7 Tagen wurden bei einer Hefe eine ICP-Abnahme von 6,57 auf 6,42 und ein Anstieg des Totzellenanteils von 2,4 auf 2,7 % verzeichnet. Diese Veränderung ist als nicht signifikant zu bezeichnen, die Hefe befand sich nach der Lagerung folglich noch in einem hervorragenden physiologischen Zustand.

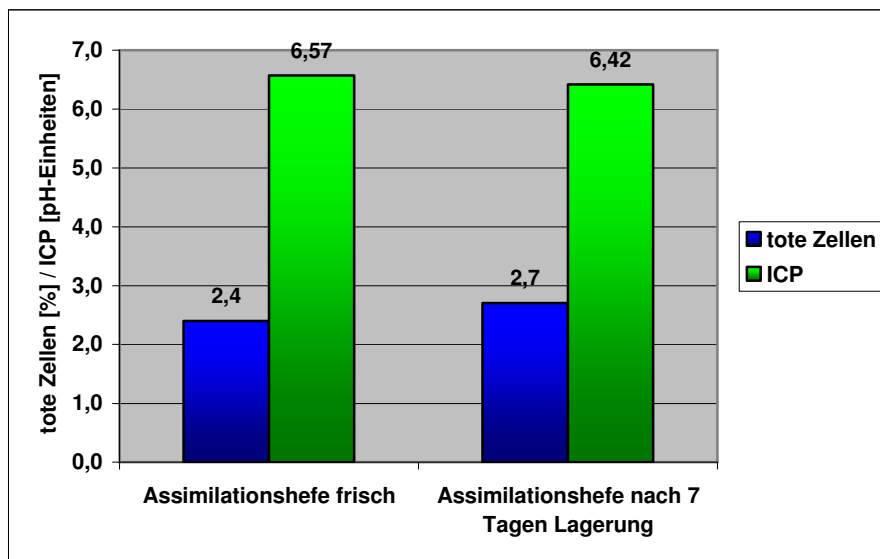


Abbildung 30: ICP-Veränderung und Totzellenzunahme einer Assimilationshefe während einer einwöchigen Kaltlagerung bei 2 °C

In einem anderen Fall wurde die Veränderung einer Assimilationshefe während der Lagerung im Rahmen einer zweiwöchigen Betriebspause untersucht. Der Anteil toter Zellen lag zu Beginn des Herunterkühlens bei 0,5 %, hier war noch ein scheinbarer Restextrakt von 6,05 GG% vorhanden. Der Extrakt nahm auch bei der Temperatur von 2,0 °C bis zum 8. Lagertag stetig ab. Zu dem Zeitpunkt lag er bei 2,07 GG%, das bedeutet einen etwa 5 % höheren Endvergärungsgrad als beim normalen Bier. Ab dem 8. Lagertag blieb der Restextrakt unverändert, während der Alkoholgehalt in der Assimilationssuspension noch von 5,15 auf 5,28 Vol.% anstieg. Dies ist auf die Verstoffwechslung intrazellulärer Glycogenvorräte der Hefe zurückzuführen. Der pH-Wert veränderte sich nur geringfügig, er erreichte vom 4. bis 6. Gärtag ein Minimum von 3,92 und stieg im Laufe der weiteren Lagerung wieder leicht bis auf 4,03 an. Evt. ist eine Autolyse weniger Zellen dafür

verantwortlich. Wahrscheinlicher ist aber, dass dieser pH-Anstieg durch das Ausscheiden von basischen Aminosäuren seitens der Hefezellen bewirkt wird [130]. Dies erklärt auch den leichten nachgewiesenen FAN-Anstieg ab dem 7. Lagertag. Der Anteil toter Zellen stieg während der Lagerung nur um 1,9 % an, der ICP der Hefe lag am Ende bei 6,04. Das stellt keinen herausragenden Wert mehr dar, aber dafür, dass die Hefe zwei Wochen lang gelagert wurde, ist er noch als absolut akzeptabel zu bezeichnen.

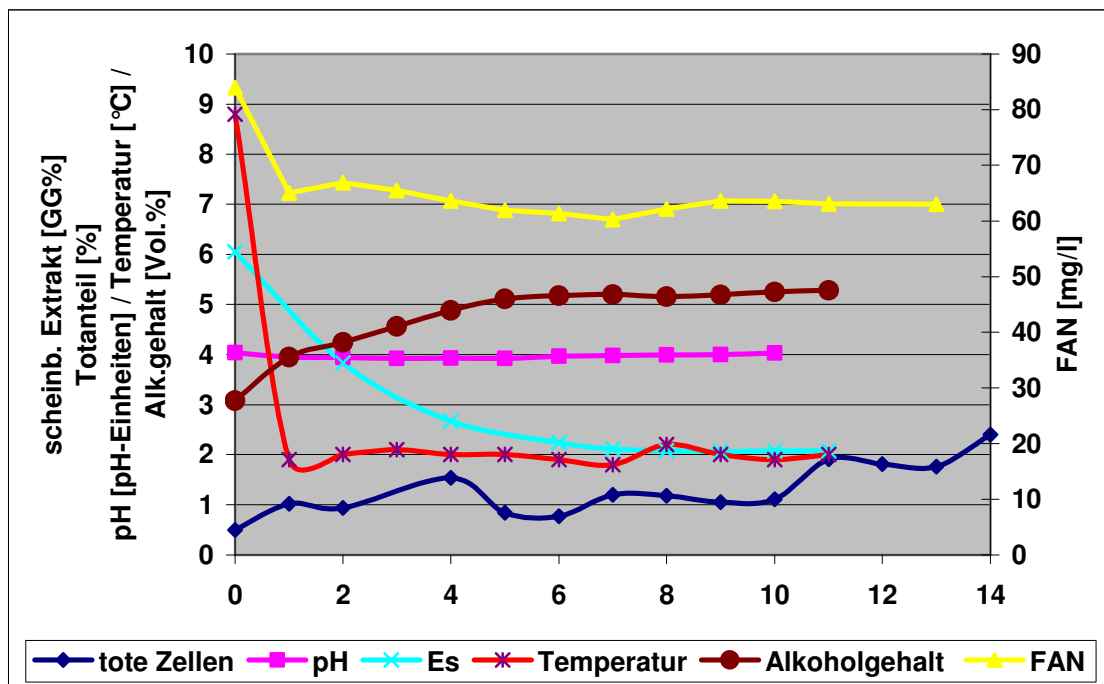


Abbildung 31: Verläufe versch. Parameter bei der Lagerung einer Assimilationshefe

4.1.6 Gesamtdiskussion Assimilationsanlage

Die Assimilationsanlage lieferte ab dem Zeitpunkt der Inbetriebnahme bis auf wenige Ausnahmen zufrieden stellende Assimilationsverläufe sowie qualitativ hochwertige Hefen. In keinem Fall konnten durch bestimmte Betriebszustände in Kombination mit den verwendeten Bauteilen hervorgerufene Deformationen oder beschädigte Hefezellen gefunden werden.

Das größte Problem plötzlich auftretender erhöhter Totzellzahlanteile durch die Bildung einer Hefeschicht an der Konuswandung konnte durch eine kleine Modifikation seitens der Steuerung behoben werden. In diesem Zusammenhang

sollte bei der Planung zukünftig zu bauender Anlagen ein Konus mit einem möglichst geringen Winkel bedacht werden.

Während einer Betriebsdauer von 23 Monaten kam es in keinem Fall zu einer mikrobiologischen Infektion, dabei erfolgte die CIP i.d.R. monatlich, der längste Zeitraum, über den keine CIP gefahren wurde, betrug 15 Wochen.

Der mit der Anlage bezüglich Dosage, Auffüllen und Reinigung notwendige Arbeitsaufwand ist als gering zu bezeichnen.

4.2 Gärversuche

4.2.1 Variation Hefestämme

Mit den Hefestämmen 34/70, 321 (Hebru) sowie 285 wurde jeweils eine Testgärung zum Vergleich des SO₂-Bildungsvermögens des jeweiligen Stammes durchgeführt, die Gärungen fanden bei 11 °C statt. Bei diesen Gärungen handelte es sich um Reinzuchtgärungen. Dazu wurde der jeweilige Hefestamm in einem Tank der Assimilationsanlage mit einem Volumen von 65 hl bis zu einer Zellzahl von 100 Mio./ml hergeführt. Mit dieser Hefe wurde dann ein 2-Sud-ZKG angestellt. Dabei wurde die gesamte Hefe zum ersten Sud gegeben. Dieser wurde ebenfalls belüftet. Der Sudrhythmus betrug 180 min.

Aus zwei Gründen konnte dieser Versuch nicht im üblichen 3-Sud-ZKG-Maßstab durchgeführt werden:

1. Aus Sicherheitsgründen sowie der Dauer einer Neuherführung sollte einer der zwei vorhandenen Assimilationstanks mit dem normalerweise verwendeten Hefestamm bestehen bleiben. In einem Tank war es nicht möglich, ausreichend Hefe zum Anstellen für einen 3-Sud-ZKG herzuführen.
2. Der Hefetank mit dem hergeführten Testhefestamm sollte komplett leergefahren werden, damit er wieder für die Assimilation des normalen Hefestamms zur Verfügung stand. Wäre der Inhalt für das Anstellen eines 3-Sud-ZKGs verwendet und komplett dazudosiert worden, ohne einen Teil der Würze wieder in den Assimilationstank zurückzuführen, so wäre der Nettoinhalt des ZKGs überschritten worden, was eine Vollmeldung zur Folge gehabt hätte.

Diese Versuchsreihe wurde erst im Laufe der Arbeit durchgeführt, da alle Versuche mit dem alten viele Jahre in der Brauerei eingesetzten Hefestamm 34/70 keinen Erfolg brachten und ein besser geeigneter Hefestamm gesucht werden sollte. Um die chronologische Reihenfolge der Belüftungsversuche nicht zu unterbrechen, wird diese Versuchsreihe ebenso wie die Versuchsreihe 4.2.2 (Versuche Variationen Anstellzellzahl) an dieser Stelle vorgezogen.

Gärungsverlauf

Die Versuchsgärungen verliefen relativ gleichmäßig, die mit Stamm 285 und 34/70 angestellten Tanks erreichten zeitgleich den Endvergärungsgrad. Der Extraktabbau der Gärung mit Hebru verlief zum Gärende hin etwas langsamer, der Endvergärungsgrad lag schließlich mit 77,0 % knapp unter dem Sollwert. Das Zellzahlmaximum fiel bei der Hebru-Gärung mit über 70 Mio./ml am höchsten aus und wurde zu Beginn des dritten Gärtages auch als erstes erreicht. Es folgte eine rasche Sedimentation, die bereits bei einem scheinbaren Restextrakt von etwa 7,0 GG% einsetzte und bis zu einer Zellzahl in Schwebelage von unter 5 Mio. Zellen/ml führte. Dies ist vermutlich auch der Grund für die zum Gärende hin etwas langsamer verlaufende Gärung. Überdies hinaus ist dieser Hefestamm als temperaturempfindlich bekannt, evtl. ist die relativ kalte Gärtemperatur von 11 °C für die etwas verlängerte Gärdauer mitverantwortlich. Die Gärung mit Stamm 285 erreichte ein Zellzahlmaximum während des vierten Gärtages von etwas über 50 Mio. Zellen/ml, die Sedimentation verlief hier wesentlich langsamer als bei der Hebru-Gärung. Beim Zellzahlverlauf des Versuchs mit Stamm 34/70 kam es zu nicht nachvollziehbaren Schwankungen.

Insgesamt fiel bei allen drei Gärungen auf, dass die gebildeten Diacetylmaxima auf einem äußerst niedrigen Niveau lagen. Durch die tägliche Probenahme ist auch auszuschließen, dass ein wesentlich höheres Maximum als festgestellt übersehen wurde. Aus der Gärung mit Stamm 285 resultierte ein Diacetylmaximum von unter 0,2 mg/l. Dafür dauerte der Abbau auf den Geschmacksschwellenwert hier allerdings einen Tag länger als bei den anderen beiden Gärungen, die nach etwa 180 h schlauchreif waren. Die gering ausfallende Diacetylbildung ist vermutlich auf die Tatsache zurückzuführen, dass die Anstellzellzahl relativ gering war und es sich bei den Gärungen um

Reinzuchtgärungen handelte, die Hefezellen befanden sich somit in einem hervorragenden physiologischen Zustand.

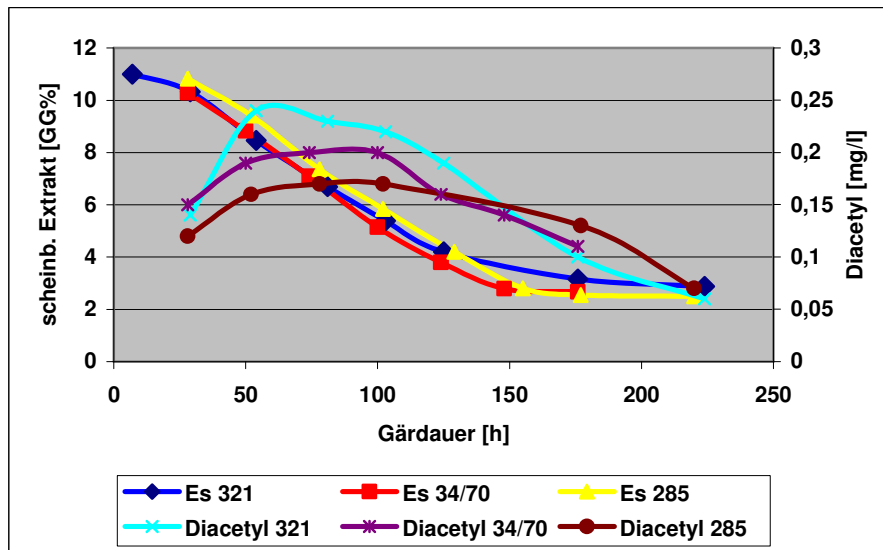


Abbildung 32: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen

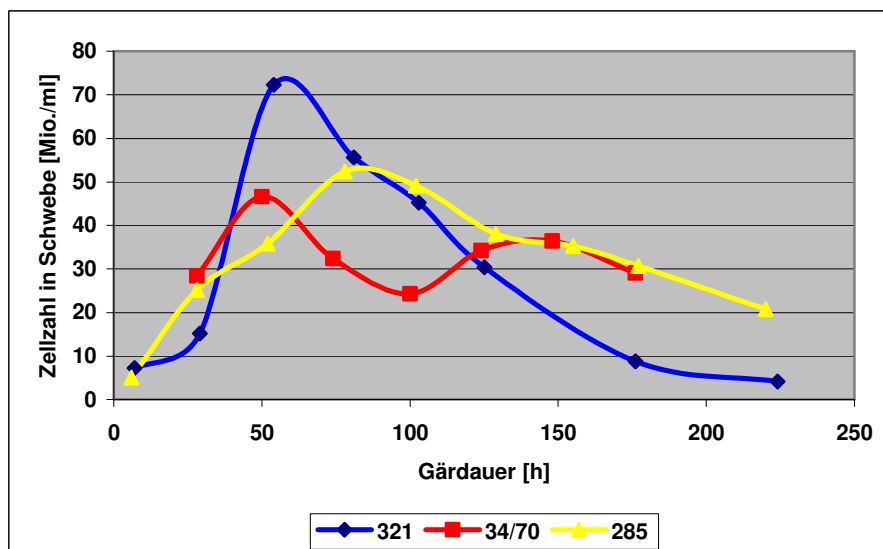


Abbildung 33: Zellzahlverlauf der Gärungen der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen

Schwefeldioxid

Das Bier aus der Testgärung mit Hefestamm 34/70 wies einen SO₂-Gehalt auf dem gewohnten niedrigen Niveau von 1,4 mg/l auf. Aus der Gärung mit Hebru resultierte dagegen eine Konzentration von 4,2 mg/l und aus der Gärung mit

Stamm 285 von sogar 7,8 mg SO₂/l. Da Reinzuchthefen aufgrund ihrer hohen Vitalität bekanntlich nur geringe Mengen an Schwefeldioxid bilden, sind diese Gehalte als beachtlich anzusehen.

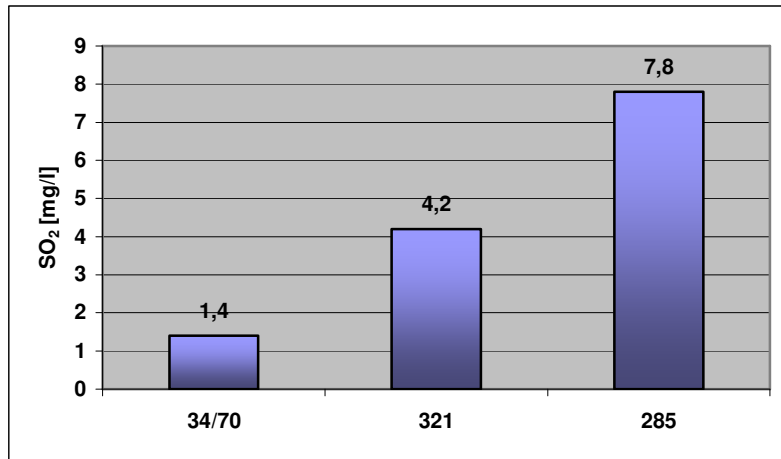


Abbildung 34: SO₂-Gehalte der drei Versuchsgärungen mit den unterschiedlichen Hefestämmen

Aromastoffe und höhere Alkohole

Die Konzentrationen der drei Biere an Acetaldehyd waren deutlich unterschiedlich und lagen sowohl bei der Gärung mit Hebru als auch mit dem Stamm 285 über den Werten des mit Stamm 34/70 produzierten Bieres. Der Gehalt liegt bei allen drei Bieren mit Gehalten unter 10 µg/l deutlich unter dem Geschmacksschwellenwert von 20 µg/l, dies ist als sehr gut zu bezeichnen und deutet auf eine hochvitale Hefe hin.

Die Gehalte an den Isoamylalkoholen 2-Methylpropanol sowie 2- und 3-Methylbutanol schwanken geringfügig.

Interessant fielen die Unterschiede beim Ethylacetat sowie Isoamylacetat (3-Methylbutylacetat) aus. Beide Substanzen liegen im 34/70-Bier in den geringsten Konzentrationen vor, das Stamm-321-Bier weist höhere Konzentrationen auf und gelangt beim Isoamylacetat bereits an den von HERRMANN [131] gefundenen Geschmacksschwellenwert im Bier von knapp 2,0 mg/l. Das mit dem Stamm 285 produzierte Bier überschreitet diesen Wert sogar geringfügig.

Tabelle 11: höhere Alkohole der fertigen Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [mg/l]

	34/70	321	285
Acetaldehyd	2,9	7,2	5,9
Propanol-1	10	11	9,9
Ethylacetat	17	19	24
2-Methylpropanol	8,9	12	10
3-Methylbutanol	46	46	44
2-Methylbutanol	12	14	12
2-Methylpropylacetat	Sp.	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	1,4	1,9	2,2
2-Methylbutylacetat	0,1	0,2	0,2
Hexansäurethalester	0,2	0,2	0,3

Bei den Bieraromastoffen sind teilweise deutliche Unterschiede zu verzeichnen. Hier liegen die mit Stamm 321 sowie Stamm 285 vergorenen Biere besonders bei dem Gehalt an 2-Phenyethanol sowie den meisten Essigsäureestern deutlich über denen des Stamm 34/70-Bieres. Weiter weist das Hebru-Bier bei allen Fettsäuren sowie deren Estern deutlich niedrigere Konzentrationen gegenüber dem Stamm 34/70-Bier auf. Das Stamm 285-Bier weist bei diesen Substanzen größtenteils leicht erhöhte Mengen auf. Da versucht wurde, die Gärbedingungen (Temperaturen und Anstellzellzahl) auf einem gleichen Niveau zu halten, sind diese Differenzen vermutlich zum größten Teil auf die Stammspezifität zurückzuführen.

Tabelle 12: Bieraromastoffe der Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen in µg/l (Abweichungen gegenüber dem Ursprungstamm von mehr als 10 % nach oben sind , von mehr als 10 % nach unten hinterlegt)

	34/70	321	285	Ø u.g. Vollbiere [5]
Hexanol-1	25	16	21	10-30
Heptanol-1	4,6	3,2	4,1	10-30
Octanol-1	10	11	9,6	20-40
Decanol-1	5,8	4,1	4,1	5-20
2-Phenylethanol	19872	27985	23785	10000-30000
Furfurylalkohol	110	24	48	500-4000
Essigsäure-Isobutylester	31	47	48	50-100
Essigsäure-Hexylester	5,8	6,6	8	3-15
Essigsäure-Heptylester	2,4	2,4	3,2	2-6
Essigsäure-Octylester	3,3	4,8	4,5	4-10
Essigsäure-Furfurylester	4,3	3,5	4,7	10-30
Essigsäure-2-Phenylethylester	403	655	676	100-300
Buttersäure-Ethylester	75	62	92	50-150
Hexansäure-Ethylester	230	185	291	50-300
Octansäure-Ethylester	313	225	342	100-500
Decansäure-Ethylester	77	51	81	10-50
Isovaleriansäure	108	29	117	200-1000
Hexansäure	2322	1169	2578	500-2000
Octansäure	6642	4310	7354	2000-10000
Nonansäure	26	16	22	10-70
Decansäure	1355	698	1436	100-2000
Dodecansäure	174	134	222	10-70
α-Terpineol	2,5	2,5	2,5	
Linalool	13	13	15	10-50
Nerol	3,8	2,9	3,3	4-8
γ-Nonalacton	35	23	29	20-40

Alterungsindikatoren

In den frischen Biere liegen nur beim Gehalt an gamma-Nonalacton signifikante Unterschiede vor, den geringsten Gehalt weist dabei das Stamm 321-Bier auf.

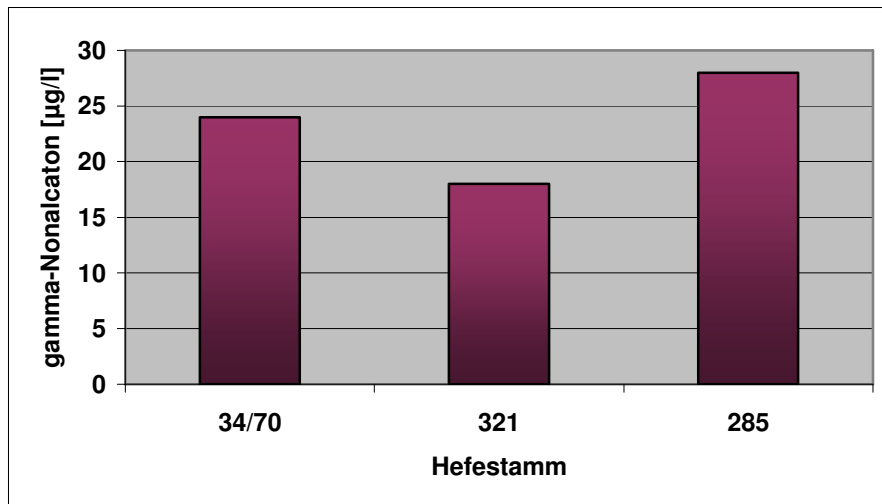


Abbildung 35: gamma-Nonalactongehalte der Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen in µg/l

Die Gehalte an Alterungsindikatoren der drei Biere weisen äußerst interessante Differenzen auf. Das mit dem normalen Hefestamm 34/70 vergorene Bier weist im forciert gealterten Zustand einen Gehalt von 170 µg/l auf. Die anderen zwei Biere liegen mit Konzentrationen von 129 µg/l (Stamm 321) und 119 µg/l (Stamm 285) auf einem deutlich niedrigeren Niveau. Möglicherweise ist diese Tatsache z.T. auf die unterschiedlichen SO₂-Gehalte zurückzuführen. Das würde bedeuten, dass die Menge von 4,2 mg SO₂/l gegenüber dem Bier mit 1,4 mg/l bereits eine deutlich erhöhte Alterungsstabilität gewährleistet. Eine weitere Zunahme wirkt sich zwar auch noch positiv aus, aber nicht mehr gravierend. Aus der SO₂-Zunahme von 1,4 auf 4,2 mg/l resultierte eine Abnahme der Alterungsindikatoren um 40 µg/l, die weitere Zunahme von 4,2 auf 7,8 mg/l führte lediglich noch zu einer Abnahme um 10 µg/l.

Die auf einem Niveau liegenden Gehalte an Sauerstoffindikatoren deuten auf keinen unsachgemäßen Eintrag von Sauerstoff während der Bierherstellung hin. Interessant ist wiederum der Gehalt an gamma-Nonalacton der Biere. Bei dem mit Stamm 321 hergestellten Bier liegt er mit 25 µg/l fast nur auf der Hälfte des Niveaus des 34/70-Bieres, dort beträgt die Konzentration 46 µg/l. Weiter wird der größte Teil der Alterungsindikatorendifferenz durch den 2-Furfuralgehalt verursacht, der Gehalt liegt aber bei allen drei Bieren noch deutlich unter dem von LUSTIG [91] genannten Schwellenwert im Bier von 150 µg/l.

Wenngleich die Differenzen der Konzentrationen einzelner Alterungsindikatoren zwischen den drei Bieren gemäß Tabelle 13 und deren Zunahme durch die Alterung entsprechend Tabelle 14 teilweise nur gering ausfallen und viele Substanzen deutlich unter ihren Geschmacksschwellenwerten liegen, so muss in diesem Zusammenhang bedacht werden, dass es durch die Kombination dieser Substanzen zu synergistischen und additiven Effekten kommen kann. Dadurch können sich auch kleine Konzentrationsdifferenzen oder -zunahmen schon deutlich sensorisch auswirken. Dies bestätigen aktuelle Untersuchungen am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I im Rahmen des Projektes „Bieraromen/-alterung“ (2007/2008).

Tabelle 13: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [$\mu\text{g/l}$]

		34/70	321	285
3-Methyl-Butanal	(S,A)	8,8	13	10
2-Furfural	(W,A)	86	69	53
5-Methyl-Furfural	(A)	6,7	4,9	5,1
Benzaldehyd	(S,A)	1,3	1,1	0,8
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	10	7,3	7,4
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	4,6	3,4	4,7
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		17	11	8
2-Acetyl-Furan	(A)	6,4	5	4,2
gamma-Nonalacton	(W,A)	46	25	34
Summe der Wärmeindikatoren		132	94	87
Summe der Sauerstoffindikatoren		20	21	18
Summe der Alterungskomponenten		170	129	119

Tabelle 14: Zunahme der Alterungsindikatoren im Rahmen der forcierten Alterung der Biere aus den drei Versuchsgärungen mit unterschiedlichen Hefestämmen [$\mu\text{g/l}$]

		34/70	321	285
3-Methyl-Butanal	(S,A)	3	3	1,4
2-Furfural	(W,A)	82,2	65,7	k.A.
5-Methyl-Furfural	(A)	2,4	0,3	0,7
Benzaldehyd	(S,A)	0,8	0	0
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	5,3	3,6	2
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,4	0,3	1,3
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		12	7,7	5
2-Acetyl-Furan	(A)	2,6	1	0,9
gamma-Nonalacton	(W,A)	22	7	6
Summe der Wärmeindikatoren		104	73	59
Summe der Sauerstoffindikatoren		9	7	3
Summe der Alterungskomponenten		119	81	65

Verkostungsergebnisse

Die Verkostungsergebnisse der forciert gealterten Biere sind in Abbildung 36 und Abbildung 37 dargestellt. Die Ergebnisse der Alterungsindikatorenanalyse werden hier bestätigt. Insgesamt liegen alle drei Biere auf einem relativ niedrigen Niveau bezüglich der Alterungsnote. Ein möglicher Grund dafür ist darin zu sehen, dass es sich um Reinzuchtgärungen mit frisch hergezogen hochvitalen Hefen handelt. Das unter Verwendung des alten Hefestammes 34/70 produzierte Bier schneidet sowohl bei der gemittelten Alterungsnote als auch bei der Akzeptanz am schlechtesten ab. Es folgt das Stamm 321-Bier und das beste Verkostungsergebnis erzielt das mit dem Hefestamm 285 produzierte Bier, das nach der Gärung auch den höchsten SO_2 -Gehalt aufwies.

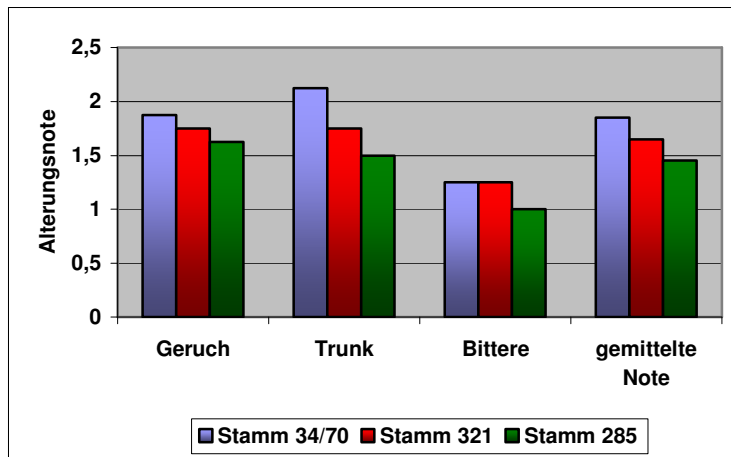


Abbildung 36: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen

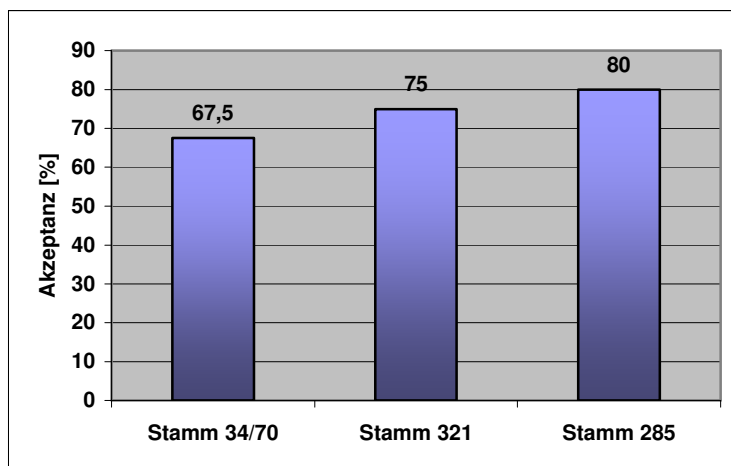


Abbildung 37: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe mit unterschiedlichen Hefestämmen

Diskussion

Die analytisch festgestellten Differenzen der Biere hinsichtlich der Aromastoffgehalte waren sensorisch nicht wieder zu finden. Darin bestand auch die Grundvoraussetzung für einen Austausch des verwendeten Hefestammes. Da das Gärverhalten während der drei Testgärungen relativ gleichmäßig war, bestanden auch hier keine weiteren Bedenken seitens eines Hefestammaustausches. Da die beiden mit den neuen Teststämmen produzierten Biere sowohl mehr SO_2 gebildet hatten als auch im forcierten Zustand wesentlich weniger Alterungskomponenten aufwiesen und sich dies auch sensorisch wieder

gefunden hatte, stand einem Austausch des Hefestammes nichts mehr im Wege. Die Wahl seitens der Brauerei fiel dann auf den Hefestamm 321. Dieser hatte zwar während der Gärung nicht den höchsten SO₂-Gehalt erreicht, aber aufgrund der guten Sedimentationseigenschaften erhoffte man sich hier weitere synergistische Vorteile.

4.2.2 Versuche Variationen Anstellzellzahl

Im Rahmen der Versuche zur Steigerung des SO₂-Gehaltes im Jungbier erfolgte eine Versuchsreihe mit variiertem Anstellzellzahl unter Verwendung des Hefestammes 321. Dazu wurden drei aufeinander folgende 3-Sud-ZKGs mit einer Zellzahl von 6, 8 und 10 Mio. Zellen/ml Würze angestellt. Die Gesamthefegabe erfolgte jeweils zum ersten Sud. Die Gärungen wurden bei einer Temperatur von 14 °C durchgeführt, der erste und dritte Sud pro ZKG wurden mit 10 l Luft pro hl Würze belüftet.

Gärungsverlauf

Trotz relativ geringer und deutlich unterschiedlicher Anstellzellzahlen verlief der Extraktabbau der drei Gärungen fast kongruent, lediglich bei der Gärung mit der höchsten Anstellzellzahl verlief er geringfügig schneller.

In Bezug auf die Diacetylbildung war eindeutig festzustellen, dass eine gesteigerte Anstellzellzahl zu einem erhöhten Diacetylmaximum führt. Bei Betrachtung der Bildungskurve ist ganz leicht die Tendenz zu erkennen, dass bei den mit höherer ZZ angestellten Gärtanks dieses Maximum auch geringfügig später erreicht wird, als es bei reduzierten Anstellzellzahlen der Fall ist. Die Diacetylreduktion verlief aber in allen Versuchen relativ zügig. Bei dem mit 6 Mio. Zellen/ml angestellten Gärtank war der Diacetylgeschmacksschwellenwert mit einem Zeitraum von etwa 160 h am schnellsten erreicht. Die anderen beiden Gärungen lagen etwa 15 h später auf diesem Niveau. Eine Reduzierung der Anstellzellzahl führte in Rahmen dieser Versuchsreihe eindeutig zu geringer ausfallenden Diacetylmaxima.

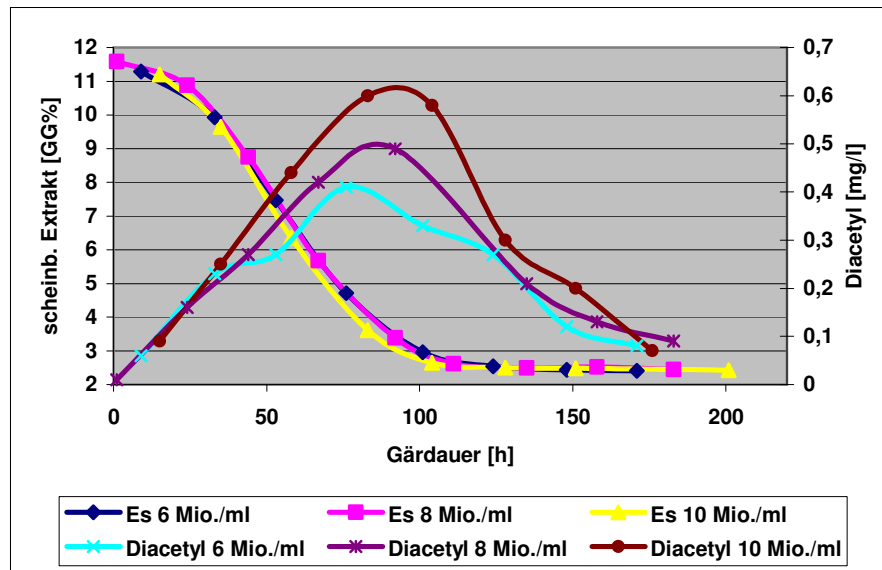


Abbildung 38: Extraktabbau der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl

Die ermittelten Zellzahlmaxima lagen alle im Bereich zwischen 52 und 57 Mio./ml und traten am dritten Gärtag auf. Anschließend folgte wieder die bereits beobachtete zügige Sedimentation ab einem vorhandenen Restextrakt von etwa 7 GG%. Aufgrund der schnellen Vermehrung mit anschließender schneller Abnahme der ZZ in Schwebelagern müssen die hier festgestellten Maxima keinesfalls den tatsächlich vorhandenen Zellzahlmaximalwerten entsprechen.

Im Gegensatz zu den bisherigen Ergebnissen mit diesem Hefestamm stoppte die Sedimentation bei dieser Versuchsreihe auf einem hohen Zellzahlniveau zwischen 18 und 27 Mio./ml. Eine Erklärung dafür kann hier nicht gegeben werden. Dabei ist eindeutig zu erkennen, dass bei der Gärung, die mit der geringsten ZZ angestellt wurde, die niedrigste ZZ in Schwebelagern zum Gärende vorliegt und aus der Gärung, die mit der höchsten ZZ angestellt wurde, dagegen zu Gärende die höchste ZZ in Schwebelagern resultiert. Möglicherweise resultiert aus der prozentual höheren Hefevermehrung bei geringeren Anstellzellzahlen eine Hefe mit erhöhtem Flockulations- und/oder Sedimentationsvermögen. Evt. ist dies auch darauf zurückzuführen, dass die höher ausfallende Hefevermehrung zu vitaleren Zellen führt, welche sich schneller absetzen, da die Nährstoffe in der umgebenden Würze rascher verbraucht sind.

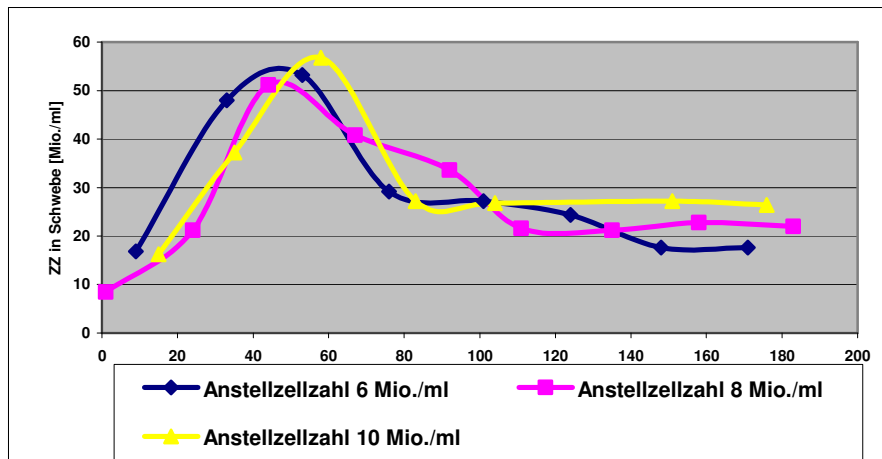


Abbildung 39: Zellzahlverlauf der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl

Schwefeldioxid

Die SO_2 -Gehalte aller drei Biere lagen auf einem zufrieden stellenden Niveau um die 10 mg/l. Allerdings war in dem mit 6 Mio. Zellen/ml angestellten Bier entgegen den Erwartungen mit 7,6 mg/l der geringste Wert vorhanden. Entsprechend der Dissertation von THIELE [3] wurde im Rahmen dieser Versuchsreihe eine Abnahme des SO_2 -Gehaltes mit zunehmender Anstellzellzahl erwartet. Möglicherweise ist die Abweichung auf einen Analysen- oder Probenahmefehler zurückzuführen. Die SO_2 -Konzentrationen der Biere mit einer Anstellzellzahl von 8 und 10 Mio./ml entsprechen wieder der bekannten Aussage, dass eine Zellzahlreduzierung und dem damit pro Zelle mehr zur Verfügung stehenden Extrakt zu einer vermehrten Bildung von SO_2 führt.

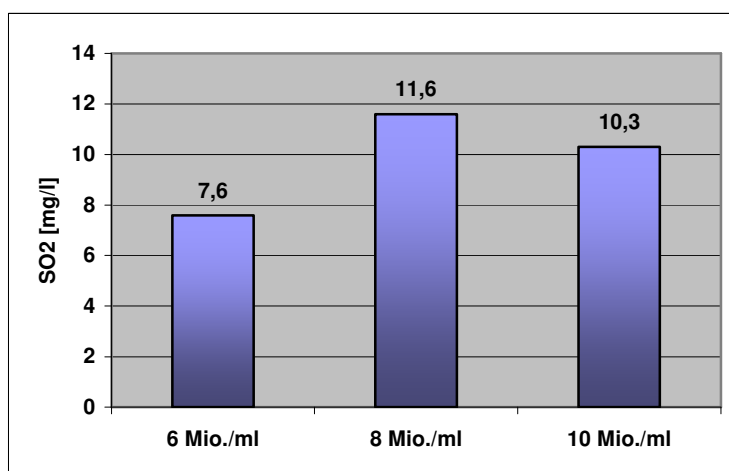


Abbildung 40: SO_2 -Gehalte der drei Gärversuche mit variiertes Anstellzellzahl

Aromastoffe und höhere Alkohole

Das mit der Anstellzellzahl in Höhe von 8 Mio. Zellen/ml produzierte Bier weist sowohl die höchste Konzentration an Isoamylacetat (3-Methylbutylacetat) als auch an Ethylacetat auf und überschreitet beim Ethylacetat den Geschmacksschwellenwert geringfügig, beim Isoamylacetat dagegen, wie auch die anderen zwei Biere, deutlich. Sowohl eine Erhöhung als auch eine Verringerung der Anstellzellzahl führt zu niedrigeren Gehalten dieser zwei Ester. Die Gehalte an 2-Methylpropanol sowie Acetaldehyd sinken mit zunehmender Anstellzellzahl geringfügig.

Tabelle 15: höhere Alkohole der Biere aus den drei Gärversuchen mit variierter Anstellzellzahl [mg/l]

	6 Mio./ml	8 Mio./ml	10 Mio./ml
Acetaldehyd	5,4	3,7	3,2
Ethylacetat	27	31	20
2-Methylpropanol	19	18	17
3-Methylbutylacetat	3,1	3,6	2,9

Bei den Bieraromastoffen zeigt sich mit zunehmender Anstellzellzahl ganz eindeutig eine Zunahme der höheren aliphatischen Alkohole, der Essigsäureester sowie der Fettsäuren.

Beim Essigsäure-2-Phenylethylester, der Isovaleriansäure sowie der Hexan- und Octansäure fällt die Zunahme bei Erhöhung der Anstellzellzahl von 6 auf 8 Mio./ml beachtlich aus. Die weitere Steigerung von 8 auf 10 Mio. Zellen/ml führt dagegen zu keinem weiteren ausgeprägten Anstieg. Bei der Decan- und Dodecansäure ist hier sogar wieder eine Abnahme zu verzeichnen.

Tabelle 16: Bieraromastoffe der Biere aus den drei Gärversuchen mit variierter Anstellzellzahl [$\mu\text{g/l}$]

	6 Mio./ml	8 Mio./ml	10 Mio./ml
Hexanol-1	21	22	24
Heptanol-1	2,9	3,3	8,1
Octanol-1	12	14	15
Decanol-1	4,3	5,5	6,1
2-Phenylethanol	34974	35767	34945
Furfurylalkohol	985	177	212
Essigsäure-Isobutylester	76	95	102
Essigsäure-Hexylester	7,7	9,2	9,4
Essigsäure-Heptylester	2,1	2,4	2,6
Essigsäure-Octylester	5,4	5,1	6
Essigsäure-Furfurylester	5,5	7,5	8,9
Essigsäure-2-Phenylethylester	988	1407	1445
Buttersäure-Ethylester	78	80	84
Hexansäure-Ethylester	180	180	178
Octansäure-Ethylester	264	294	300
Decansäure-Ethylester	75	92	84
Isovaleriansäure	32	94	110
Hexansäure	1837	2596	2610
Octansäure	4784	6167	6244
Nonansäure	16	21	20
Decansäure	819	1507	1252
Dodecansäure	111	165	142
α -Terpineol	7,4	7,7	7,9
Linalool	10	19	19
Nerol	2,3	2,7	2,2
γ -Nonalacton	37	40	44

Alterungsindikatoren

Von dem frischen Bier aus der Gärung mit Anstellzellzahl 8 Mio./ml ließ sich keine Analyse der Alterungsindikatoren durchführen, daher werden hier nur die Ergebnisse der Gärung mit 6 und 10 Mio. Zellen/ml verglichen.

Das mit höherer Zellzahl angestellte Bier weist im frischen Zustand bei einigen Alterungsindikatoren geringfügig erhöhte Gehalte auf. Im gealterten Zustand weist dieses Bier sowohl insgesamt einen höheren Anteil an Alterungskomponenten sowie auch eine deutlich höhere Zunahme während der Alterung gegenüber dem 6 Mio./ml-Bier auf. Dies bestätigt die Ergebnisse von THIELE [3]. In diesem Fall ist

die Differenz der Zunahme fast ausschließlich auf die des gamma-Nonalactons zurückzuführen.

In Bezug auf die Sauerstoffindikatoren der Biere sind weder im frischen noch gealterten Zustand signifikante Differenzen festzustellen.

Ein Zusammenhang mit dem SO₂-Gehalt der Biere ist hier nicht zu erkennen.

Tabelle 17: Alterungsindikatoren der frischen und gealterten Biere mit Anstellzellzahl 6 und 10 Mio./ml [$\mu\text{g/l}$]

		6 Mio./ml frisch	10 Mio./ml frisch	6 Mio./ml forciert	10 Mio./ml forciert	Zunahme 6 Mio./ml	Zunahme 10 Mio./ml
3-Methyl-Butanal	(S,A)	9	8	10	8	1	0
2-Furfural	(W,A)	7	7	70	71	63	64
5-Methyl-Furfural	(A)	4,2	5,3	4,7	6,7	0,5	1,4
Benzaldehyd	(S,A)	0,8	1,3	1,1	1,3	0,3	0
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	3,7	6	5,3	7,2	1,6	1,2
Bernsteinsäure-Diethyl- Ester	(A)	5,5	9,7	5,9	10,4	0,4	0,7
2-Acetyl-Furan	(A)	5,6	7,1	5,3	7,9	0	0,8
gamma-Nonalacton	(W,A)	20	15	25	34	5	19
Σ der Wärmeindikatoren		27	22	95	105	68	83
Σ der Sauerstoffindikatoren		14	14	16	17	2,4	2,5
Σ der Alterungskomponenten		56	59	127	147	71,3	87,5

Diskussion

Trotz sehr niedriger und zugleich deutlich variiertes Anstellzellzahlen verliefen die drei Gärungen sehr gleichmäßig. Alle Biere waren spätestens am 7. Gärtag schlauchreif. Vermutlich ist die Gärtemperatur, die bei 14 °C lag, mit für das schnelle Ankommen und den zügigen Gärungsverlauf bei derart reduzierten Zellzahlen verantwortlich. In Bezug auf die Diacetylbildung sowie den –abbau führte die geringste Anstellzellzahl zu den besten Ergebnissen.

Da das Bier, welches mit einer Zellzahl von 6 Mio./ml angestellt worden war, am schnellsten schlauchreif war und frisch sowie forciert gealtert die geringsten Konzentrationen an Alterungskomponenten aufwies, wurden von diesem Zeitpunkt an alle Gärungen von Vollbieren in der Flensburger Brauerei mit dieser Zellzahl angestellt.

4.2.3 Belüftungsversuche

4.2.3.1 Belüftungsversuche Hefestamm 34/70

Mit dem in der Brauerei lange eingesetzten Hefestamm 34/70 wurden zwei Versuchsreihen mit dem Ziel einer erhöhten SO₂-Bildung durchgeführt.

4.2.3.1.1 Versuchsreihe mit variiertes Belüftung Stamm 34/70

Versuchsreihe mit variiertes Belüftung

Im Rahmen der ersten Versuchsreihe wurden im normalen Produktionsbetrieb drei aufeinander folgende Testgärungen in normalen 3-Sud-ZKGs unter Variation der Belüftung durchgeführt. Alle Gärungen fanden bei 12 °C statt. Die Anstellzellzahl lag bei allen Gärungen bei 12 Mio./ml, wobei die gesamte Hefegabe jeweils beim ersten Sud pro Tank erfolgte. Beim ersten Gärtank wurde nur der erste Sud mit einer Menge von 10 l Luft pro hl Würze belüftet. Der zweite Gärtank wurde mit einer Belüftung des ersten und zweiten Sudes angestellt (je 10 l Luft pro hl Würze). Als Vergleich wurde der dritte Gärtank mit der üblichen Belüftung des ersten und dritten Sudes angestellt (je 10 l Luft pro hl Würze).

Tabelle 18: Übersicht Belüftungsvariation Hefestamm 34/70

	GT 1	GT 2	GT 3
Sud 1	10 l/hl	10 l/hl	10 l/hl
Sud 2	0	10 l/hl	0
Sud 3	0	0	10 l/hl

Gärverlauf

Die Gärung 1, bei der nur eine Belüftung des ersten Sudes erfolgte, wies im Gegensatz zu den beiden anderen Gärungen eine deutlich verlängerte Gärzeit bis zum Erreichen des Endvergärungsgrades auf. Zusätzlich wurde hier das höchste Diacetylmaximum gefunden, welches auch am spätesten erreicht wurde.

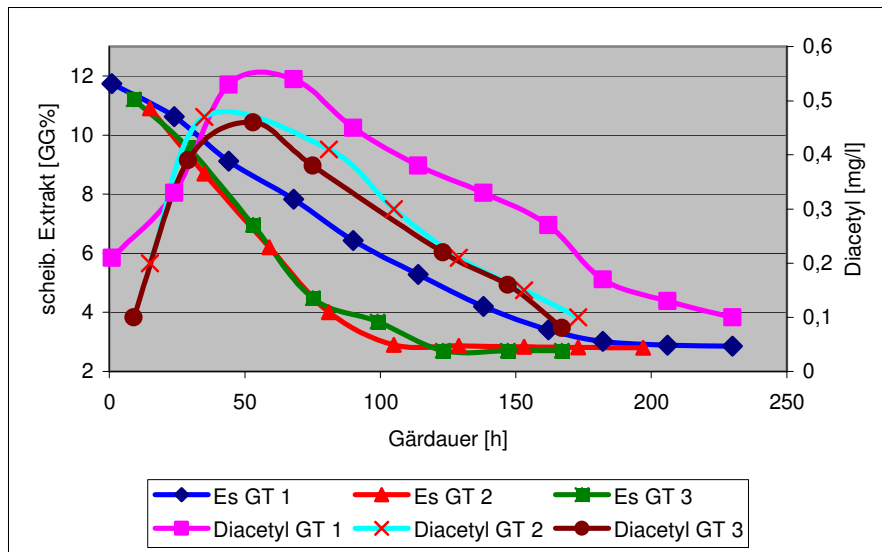


Abbildung 41: Extraktabbau der drei Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70

Offenbar kommt es durch die fehlende zweite Belüftung zu einer mangelnden Durchmischung des Tankinhaltes. Durch den zweiten und dritten Sud wird der erste Sud im ZKG nach oben geschoben. Die Hefevermehrung findet nur im Bereich dieses ersten Sudes statt. Durch eine fehlende zweite Sauerstoffzufuhr sowie evtl. auftretenden Nährstoffmangel fällt die Hefevermehrung nur etwa halb so hoch aus, wie bei einer Zweitbelüftung. Darauf deutet auch der geringere FAN-Abbau hin.

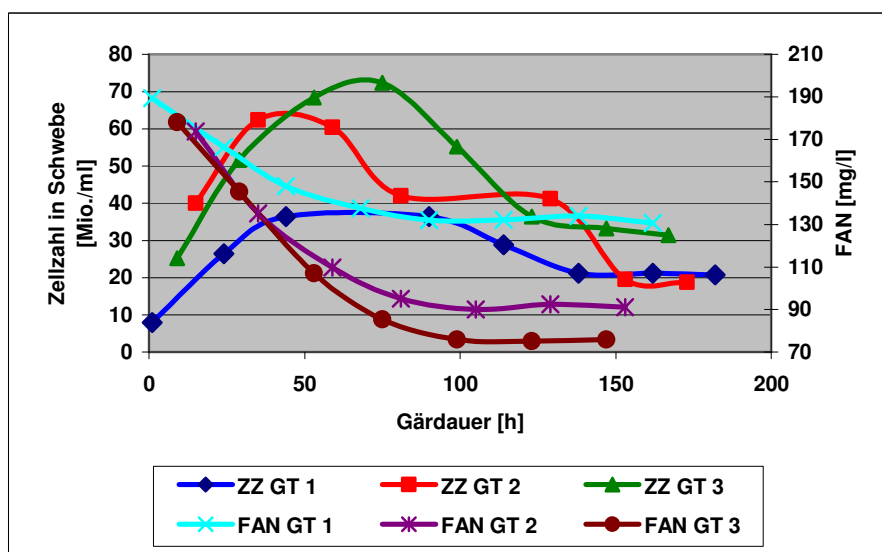


Abbildung 42: Zellzahlverlauf der drei Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70

Überdies hinaus kam es bei den Gärtanks 1 und 2 zu Beginn des zweiten Gärtages zu einer kochenden Gärung, welche über das Schauglas am Tankdom beobachtet werden konnte. Dabei fiel die bereits vorhandene Kräusendecke zeitweise zusammen, anschließend kam es zu enormen, explosionsartigen Wallungen an der Jungbieroberfläche. Dieses trat so plötzlich auf, dass das Jungbier in die CO₂-Rückgewinnungsleitung bis in den Gaswäscher (ca. 50 m Weglänge) schoss, bevor die Vollmeldesonde reagierte und die Abluftleitung öffnete. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde die Gärtemperatur für einen Tag von 12 °C auf 11 °C gesenkt.

Alle Gärungen mit fehlender Belüftung des dritten Sudes waren also nicht praktikabel.

Schwefeldioxid

Das Bier des Gärtanks mit ausschließlicher Belüftung des ersten Sudes wies einen SO₂-Gehalt von 13,4 mg/l auf. Hier bestätigen sich die bekannten Einflussgrößen der fehlenden Zweitbelüftung sowie der infolge der geringeren Hefevermehrung höheren vorhandenen Extraktmengen pro Hefezelle.

Der nach der üblichen Verfahrensweise mit Belüftung des ersten und dritten Sudes angestellte Gärtank wies 1,0 mg SO₂/l auf und lag damit auf dem durchschnittlichen Niveau, der Versuch mit Belüftung des zweiten Sudes brachte hier nur eine geringfügige Steigerung auf 2,3 mg/l.

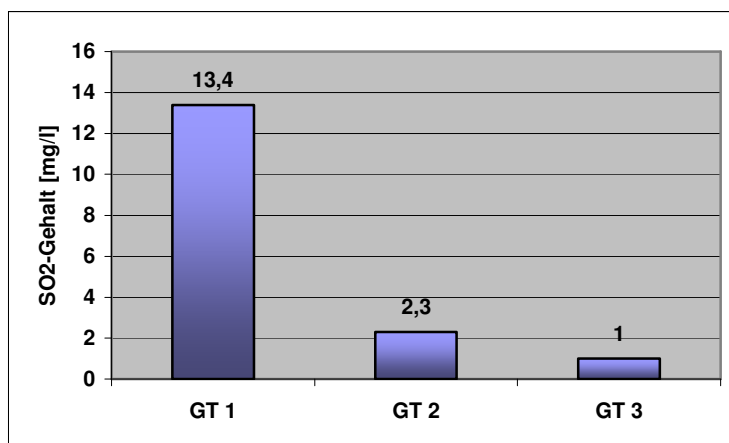


Abbildung 43: SO₂-Gehalte der drei Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70

Aromastoffe und höhere Alkohole

Die eingeschränkte Belüftung des Gärtanks 1 führte vermutlich infolge der geringer ausfallenden Hefevermehrung und der daraus resultierenden langsameren Gärgeschwindigkeit zu einer deutlich niedrigeren Bildung von 2-Phenylethanol. Eine andere Erklärung ist, dass durch das Abkühlen am 2. und 3. Gärtag auf 11 °C in Zusammenhang mit der geringeren Zellzahl hier deutlich geringere Mengen dieses Alkohols gebildet wurden, da es sich bei dem 2-Phenylethanol um einen Temperaturindikator bzw. Indikator der Gärintensität handelt [3, 5].

Alle Fettsäuren wiesen durch die Zweitbelüftung eine deutliche Konzentrationsabnahme im Bier auf. Dieser Effekt verdeutlichte sich bei später folgender Zweitbelüftung (zum 3. Sud).

Aufgrund eines GC-Defektes konnte von diesen Bieren keine Analyse im Umfang der normalen höheren Alkohole und Ester durchgeführt werden.

Tabelle 19: Bieraromastoffe der Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70 [$\mu\text{g/l}$]

	GT 1	GT 2	GT 3
2-Phenylethanol	17280	24967	29845
Furfurylalkohol	1071	949	485
Essigsäure-Isobutylester	40	39	36
Essigsäure-Hexylester	10	8,1	7,9
Essigsäure-Heptylester	2,5	2,2	2,4
Essigsäure-Octylester	3	3,4	4
Essigsre-2-Phenylethylester	429	465	512
Buttersäure-Ethylester	99	76	65
Hexansäure-Ethylester	272	181	172
Octansäure-Ethylester	259	363	336
Decansäure-Ethylester	6	5	6
Hexansäure	2461	2208	1403
Octansäure	7609	6076	5560
Nonansäure	21	20	17
Decansäure	1712	1095	940
Dodecansäure	242	93	79

Alterungsindikatoren

Bei allen Bieren, die im Rahmen dieser Arbeit auf die Alterungsindikatoren hin untersucht wurden, kam es bei der Auswertung der Substanzen 2- sowie 3-Methylbutanal zu Schwierigkeiten. Oftmals waren die entsprechenden Peaks von einem weiteren unbekanntem Peak verdeckt oder überlagert, so dass hier keine Auswertung möglich war.

Daher werden bei den folgenden Versuchsauswertungen diese Substanzen nicht immer mit aufgeführt, wie an dieser Stelle. Bei einem Vergleich der verschiedenen Versuchsreihen untereinander muss dieses berücksichtigt werden.

Tabelle 20: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70 [$\mu\text{g/l}$]

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Furfural	(W,A)	77	86	99
5-Methyl-Furfural	(A)	6,1	6,6	6,6
Benzaldehyd	(S,A)	1,6	1,9	2
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	8	6	6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	9,2	8,8	7,9
2-Acetyl-Furan	(A)	7,6	6,8	6,4
gamma-Nonalacton	(W,A)	51	53	56
Summe der Wärmeindikatoren		128	139	155
Summe der Sauerstoffindikatoren		9,6	7,9	8
Summe der Alterungskomponenten		160	169	184

Aus Tabelle 20 wird ersichtlich, dass das Bier mit Zweitbelüftung gegenüber dem Bier mit nur einer Belüftung im forcierten Zustand mehr Alterungskomponenten aufweist, was hauptsächlich auf einer Zunahme des 2-Furfurals beruht. Bei späterer Zweitbelüftung wird dieser Effekt noch verstärkt. Das ist verwunderlich, da hier die beste Hefevermehrung sowie die kürzeste Gärdauer vorhanden waren. Auf die unterschiedlichen SO_2 -Gehalte kann diese Differenz nicht ausschließlich zurückgeführt werden. Die Differenz im SO_2 -Gehalt zwischen GT 1 und GT 2 beträgt 11,1 mg/l, GT 2 weist 11 $\mu\text{g/l}$ mehr Wärmeindikatoren auf. Der SO_2 -Unterschied liegt bei GT 2 und GT 3 dagegen bei lediglich 1,3 mg/l, bei GT 3 sind aber 16 $\mu\text{g/l}$ mehr Wärmeindikatoren vorhanden.

Verkostungsergebnisse

Die fertigen Biere wurden anhand des Alterungsverkostungsschemas im frischen und forciert gealterten Zustand verkostet. Abbildung 44 und Abbildung 45 zeigen die Ergebnisse der Alterungsverkostung.

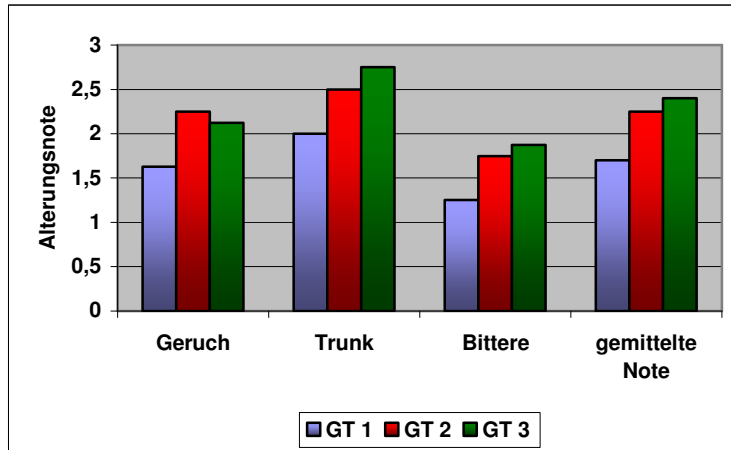


Abbildung 44: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70

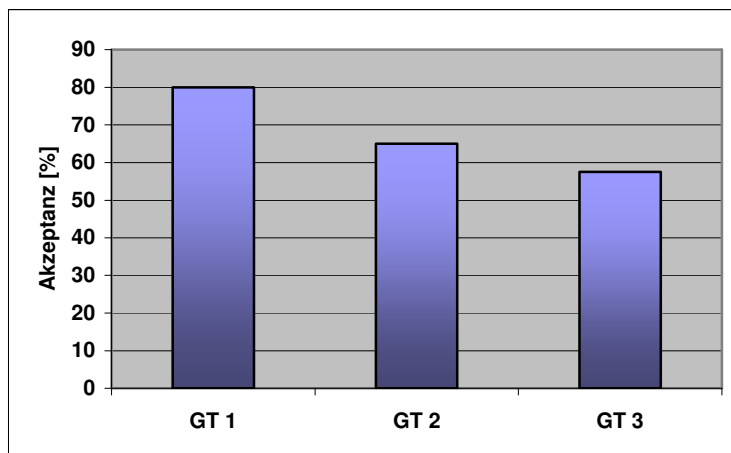


Abbildung 45: Akzeptanz der forciert gealterten Biere aus den Gärungen mit Variation der Belüftung bei Hefestamm 34/70

Das Bier aus der Gärung mit ausschließlicher Belüftung des ersten Sudes und dem daraus resultierenden höchsten SO_2 -Gehalt schneidet bei der Alterungsverkostung eindeutig am besten ab. Die Alterung ist hier nur leicht wahrzunehmen, während sie bei den anderen beiden Bieren schon deutlich hervortritt. Der Unterschied zwischen den Bieren der Gärungen 2 und 3 fällt nicht

mehr so stark aus wie der Unterschied zwischen den Bieren der Gärungen 1 und 2. Der deutlich erhöhte SO₂-Gehalt im Bier 1 wirkt sich offenbar deutlich positiv auf die Alterungsnote aus.

Diskussion

Die Durchführung von Gärungen mit Belüftungsvariationen unter Einsatz des alten Hefestammes 34/70 führten zwar zu dem gewünschten Ergebnis einer erhöhten Schwefeldioxidbildung, allerdings war diese Vorgehensweise aufgrund der Erscheinungen der kochenden Gärung und der deutlich verlängerten Gärdauer nicht praxistauglich. Die aufgetretenen Gärungserscheinungen sind auf eine Schichtung im Tank zurückzuführen, die durch die fehlende Belüftung des dritten Sudes hervorgerufen wird. Offenbar ist das vorhandene Verhältnis von Tankdurchmesser zu Tankhöhe von 1:4,3 für die schlechte Durchmischung des Tankinhaltes verantwortlich. Der erste Sud, der die gesamte Hefegabe enthält, wird im Tank nach oben geschoben. Dort setzt die Gärung ein und das Jungbier im oberen Tankbereich erwärmt sich, wodurch sich die Dichte verringert, während weiter unten im Tank tiefere Temperaturen herrschen, daher kommt es zunächst zu keiner natürlichen Konvektion. SCHUCH [132] zeigte in diesem Zusammenhang, dass deutliche Temperaturdifferenzen notwendig sind, um durch eine Kühlung mit der obersten Kühlzone auch unterhalb liegende Teile des Tanks zu kühlen.

Das Bier mit dem erhöhten SO₂-Gehalt zeigte gegenüber den anderen Bieren eine deutlich bessere Geschmacksstabilität. Auffällig war ebenfalls eine Zunahme des 2-Furfurals in den gealterten Bieren durch eine Zweitbelüftung und einen späteren Belüftungszeitpunkt.

4.2.3.1.2 Versuchsreihe mit Variation Drauflasszeitpunkt Stamm 34/70

Alle Versuche unter Einsatz des Hefestamms 34/70 mit einer reduzierten oder fehlenden Belüftung des dritten Sudes pro ZKG brachten nicht den gewünschten Erfolg oder waren nicht praxistauglich. Die Belüftung des dritten Sudes war unumgänglich. Aufgrund des Sudrhythmus von 160 – 180 min erfolgte das Drauflassen dieses belüfteten dritten Sudes auf den ersten Sud im für die SO₂-

Bildung ungünstigen Zeitfenster von 5 bis 6 h. Um dieses Zeitfenster zu umgehen, aber dabei noch eine im Gärkeller umsetzbare Verfahrensweise vorzuhalten, wurden zwei weitere Versuchsgärungen durchgeführt. Beide Gärungen wurden mit Hefe aus derselben Ernte angestellt, die Hefegabe mit einer Anstellzellzahl von 14 Mio./ml erfolgte jeweils bei dem ersten Sud pro ZKG, die belüfteten Sude wurden mit 10 l Luft pro hl Würze belüftet. Die Gärtemperatur betrug 12 °C. Das Anstellen des ersten Gärtanks erfolgte normal, der folgende Sud wurde ca. 3 h nach dem Anstellen ohne Belüftung draufgelassen. Der etwa 3 h später folgende Sud wurde im zweiten Gärtank angestellt, wieder 3 h später der vierte Sud hier ohne Belüftung draufgelassen. Der fünfte Sud wurde mit Belüftung auf das Jungbier des ersten Gärtanks draufgelassen, der sechste Sud schließlich wieder mit Belüftung auf das Jungbier im zweiten Gärtank. Somit ergibt sich ein Drauflasszeitpunkt eines weiteren belüfteten Sudes beim ersten Gärtank von 12 h nach dem Anstellen, beim zweiten Gärtank von etwa 9 h nach dem Anstellen.

Tabelle 21: Versuchsschema Variation Drauflasszeitpunkt Hefestamm 34/70

	GT 1	GT 2	Hefegabe	Belüftung
Start	Sud 1		X	X
3h	Sud 2			
6h		Sud 3	X	X
9 h		Sud 4		
12 h	Sud 5			X
15 h		Sud 6		X

Gärverlauf

Die Gärung verlief bei diesen zwei Versuchsreihen normal, es kam zu keinen ungewöhnlichen Gärungserscheinungen. Die Gärdauer lag mit einer Länge von etwa 8 Tagen im normalen Bereich. Beide Gärtanks erreichten zeitgleich den Endvergärungsgrad. Der Diacetylabbau dauerte bei GT 1 geringfügig länger als bei GT 2. Auffällig waren ein sehr schneller Anstieg sowie ein früh erreichtes Diacetylmaximum bei der zweiten Gärung.

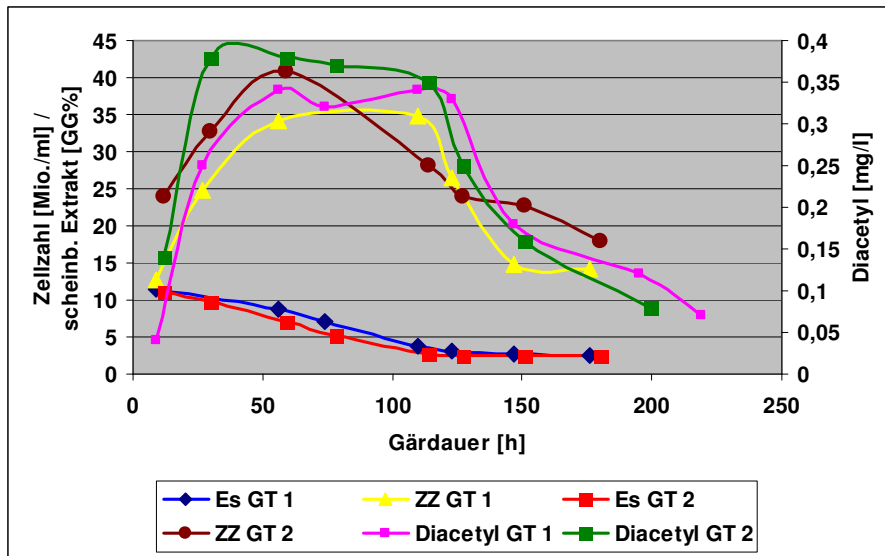


Abbildung 46: Extraktabbau, Zellzahl- sowie Diacetylverlauf der Gärungen mit Variation Drauflasszeitpunkt bei Hefestamm 34/70

Schwefeldioxid

Der Versuch, das für die SO_2 -Bildung ungünstige Zeitfenster zum Drauflassen eines zweiten belüfteten Sudes zu umgehen, brachte hier keinen Erfolg. Das Bier beider Gärversuche wies einen SO_2 -Gehalt im üblich geringen Bereich von unter 2,0 mg/l auf. Der Unterschied zwischen den Gehalten der beiden Biere ist mit 0,3 mg/l als nicht signifikant zu bezeichnen.

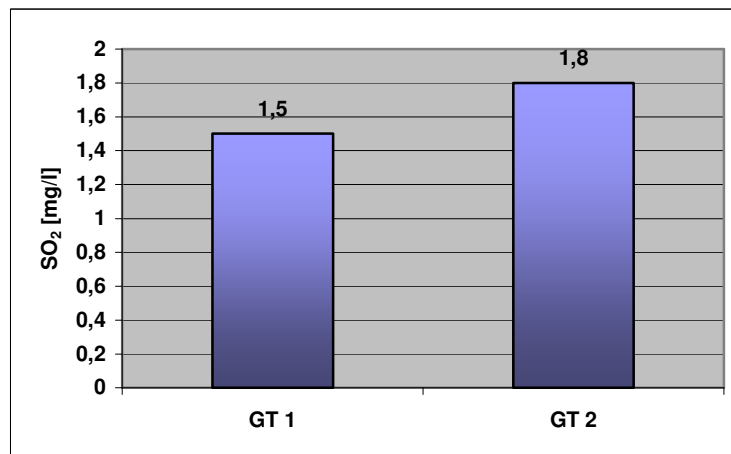


Abbildung 47: SO_2 -Gehalt der Biere mit Variation Drauflasszeitpunkt bei Hefestamm 34/70

Die zwei Biere aus dieser Versuchsreihe waren mit dem Kieselgurrahmenfilter nicht filtrierbar. Daher konnten alle Analysen, die am Filtrat durchgeführt werden, von den Bieren dieser Versuchsreihe nicht erfolgen.

4.2.3.2 Belüftungsversuche Hefestamm 321

Nach der Einführung wurden mit dem Hefestamm 321 mehrere Versuchsreihen mit variiertem Belüftung durchgeführt. Hier war es das Ziel, ein im Praxismaßstab einfach anzuwendendes Verfahren bzw. Belüftungsschema zu entwickeln, so dass das Bier nachhaltig eine angemessene SO_2 -Menge enthält. Dies sollte zu keiner negativen Qualitätsveränderung oder signifikanten Verlängerung der Gärzeit führen.

Alle diese Gärversuche wurden an in normaler Reihenfolge befüllten 3-Sud-ZKGs durchgeführt. Die gesamte Hefegabe erfolgte jeweils bei dem ersten Sud pro Tank, der jeweils zweite Sud wurde in keinem Fall belüftet.

4.2.3.2.1 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1

Im Rahmen dieser Versuchsreihe wurden drei ZKGs mit variiertem Belüftung angestellt. Dabei wurde der jeweils erste Sud pro ZKG mit 10 l Luft pro hl Würze belüftet. Bei dem ersten ZKG wurde der letzte Sud nur teilweise belüftet, hier erfolgte die Luftdosage von 10 l Luft pro hl Würze zu den letzten 150 hl Anstellwürze der Kühlung. Bei den zwei weiteren Gärtanks wurde der jeweils dritte Sud nicht belüftet, lediglich bei Gärtank 2 wurde nach dem Ende der Würzekühlung für eine Dauer von etwa 5 s Sterilluft in den Konus eingeblasen. Dadurch sollte eine gewisse Homogenisierung des Tankinhaltes bewirkt werden. Die Anstellzellzahl betrug 6 Mio./ml, die gesamte Hefegabe für den jeweiligen ZKG erfolgte beim ersten Sud, die Gärtemperatur lag bei 14 °C.

Tabelle 22: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/1

	GT 1	GT 2	GT 3
Sud 1	10 l/hl	10 l/hl	10 l/hl
Sud 2	0	0	0
Sud 3	10 l/hl ab 250 hl	Luftstoß nach KE	0

Gärungsverlauf

Der Gärtank mit Belüftung des ersten und Teilbelüftung des dritten Sudes hatte am fünften Gärtag den Endvergärungsgrad sowie den Diacetylgeschmacksschwellenwert erreicht und war somit schlauchreif. Bei den anderen beiden Gärungen verlief der Extraktabbau wesentlich verzögert und zum Gärende hin besonders langsam. Hier war der Diacetylgehalt von 0,1 mg/l bereits bei einem scheinbaren Vergärungsgrad von 70 % erreicht, der Extraktabbau bis zum Erreichen des EVGs dauerte von diesem Zeitpunkt an aber noch 4 Tage.

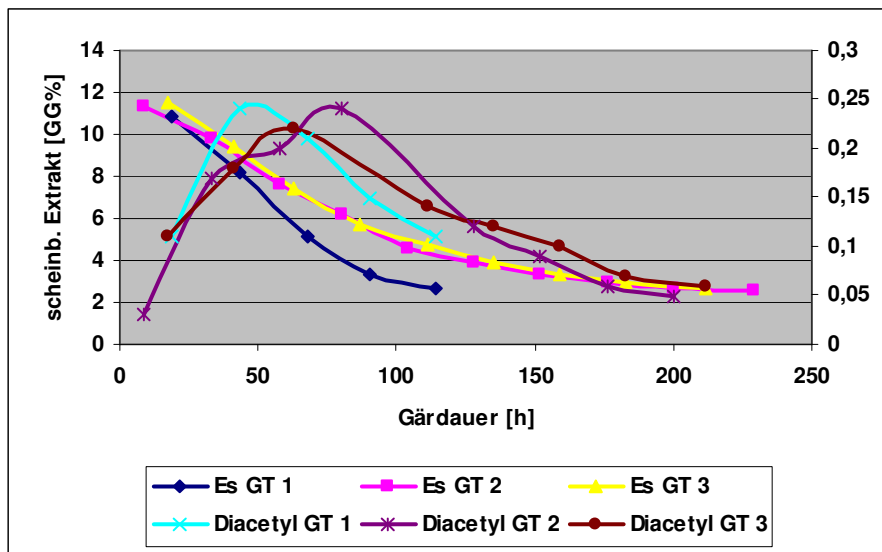


Abbildung 48: Extrakt- sowie Diacetylverläufe bei den Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1

Während der Zellzahlverlauf bei dem ersten Gärtank noch normal verlief, so war bei den anderen zwei Gärungen eine geringere Hefevermehrung und ebenso eine langsamere Sedimentation zu verzeichnen. Dies ist vermutlich wiederum auf eine Unhomogenität der Tanks durch die fehlende Belüftung, analog den Belüftungsversuchen mit dem Hefestamm 34/70, zurückzuführen. Der erste Sud, der die Hefe enthält, wird durch die nachfolgenden Sude im Gärtank nach oben geschoben, es kommt zu einer Schichtung. Der Hefe stehen nur die Nährstoffe im oberen Tankbereich zur Verfügung, evtl. kommt es hier sogar zu einer Nährstoffkonkurrenz. Im Laufe der Gärung kommt es dann durch die Konvektion im Tank zur Durchmischung, zu diesem Zeitpunkt ist der Sauerstoff aber bereits aufgezehrt und es kann keine Hefevermehrung mehr stattfinden. Der mangelnde

FAN-Verbrauch sowie geringer ausfallende pH-Sturz deuten ebenfalls hierauf hin. Hier war ab dem fünften Gärtag auch ein deutlicher Wiederanstieg des pH-Wertes zu beobachten.

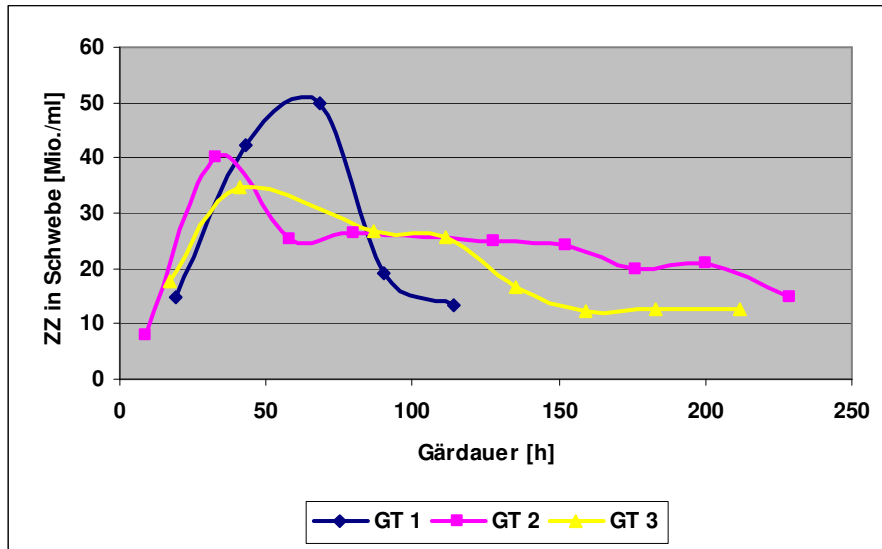


Abbildung 49: Zellzahlverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1

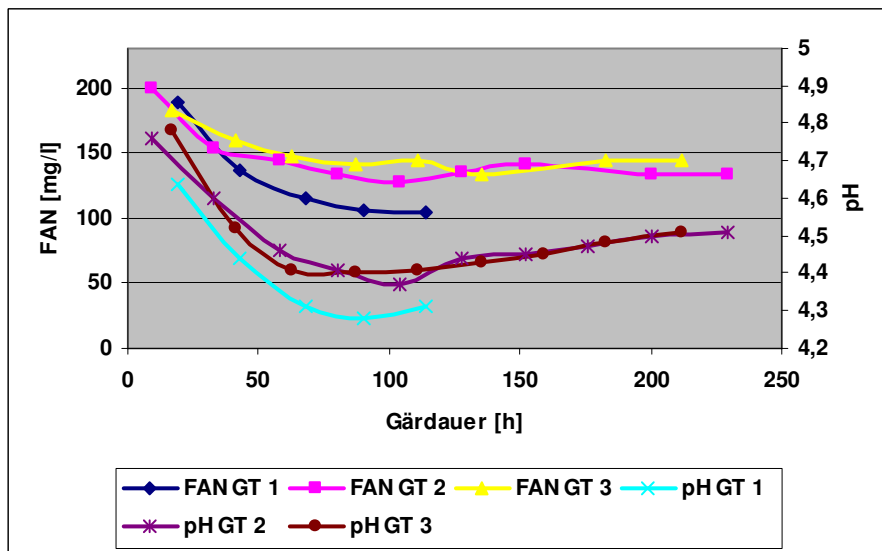


Abbildung 50: pH- sowie FAN-Verläufe während der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/1

Die Gärung des Gärtanks 1 verlief auch optisch normal, bei den anderen zwei Gärungen war während der Gärung keine Kräusendecke vorhanden, der blanke

Würzespiegel war zu sehen mit gelegentlichen Wallungen, wie es normalerweise beim Erreichen der Schlaucherdecke der Fall ist.

Schwefeldioxid

Bereits das Bier aus der Gärung mit eingeschränkter Belüftung des dritten Sudes wies hier einen SO_2 -Gehalt von 12,6 mg/l auf. Weiter war eindeutig zu erkennen, dass eine reduzierte bzw. fehlende weitere Belüftung zu stark steigenden Konzentrationen führte. Selbst das fünfsekündige Lufteinblasen in den zweiten Gärtank zeigte hier eine deutliche Reduzierung gegenüber der Gärung mit ausschließlicher Belüftung des ersten Sudes.

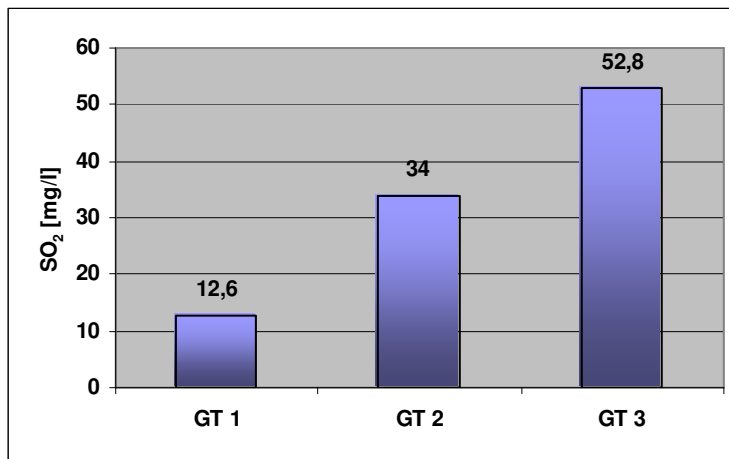


Abbildung 51: SO_2 -Gehalte der Biere aus der Versuchsreihe Stamm 321/1

Bieraromastoffe und höhere Alkohole

Die Gehalte an Isoamylacetat (3-Methylbutylacetat) sowie Ethylacetat liegen in den Bieren dieser Versuchsreihe teilweise deutlich über den von HERRMANN [131] und LUSTIG [91] genannten Geschmacksschwellenwerten von 30 mg/l beim Ethylacetat sowie 2,0 mg/l beim Isoamylacetat. Die Einschränkung der Belüftung beim Gärtank 2 (Luftstoß nach Kühlende) gegenüber dem Gärtank 1 führt zu einer minimalen Verringerung der zwei Substanzen, der komplette Wegfall der Drittsudbelüftung dagegen zu einem signifikanten Anstieg.

Tabelle 23: Ausgewählte Aromastoffe der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1 [mg/l]

	GT 1	GT 2	GT 3
Acetaldehyd	12	8,9	8,2
Propanol-1	10	7,5	7,1
Ethylacetat	33	29	38
2-Methylpropanol	13	14	14
3-Methylbutanol	56	50	49
2-Methylbutanol	17	17	17
3-Methylbutylacetat	3,3	3,0	4,0

Im Bereich der höheren Alkohole wies besonders der 2-Phenylethanol sinkende Gehalte mit Einschränken der Belüftung des dritten Sudes auf. Die Ester wiesen mit abnehmender Belüftung geringfügig steigende Konzentrationen auf, bei den Fettsäuren war diese Tendenz deutlich ausgeprägt, allerdings führte der komplette Wegfall der Drittsudbelüftung teilweise wieder zu leicht sinkenden Gehalten

Tabelle 24: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1 [µg/l]

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	12,0	11,8	11,7
Heptanol-1	4,0	3,5	2,7
Octanol-1	12,7	15,1	13,7
Decanol-1	4,5	2,6	2,3
2-Phenylethanol	33002	28118	25079
Essigsäure-Isobutylester	96	116	124
Essigsäure-Hexylester	7,9	8,4	9,9
Essigsäure-Heptylester	2,8	2,6	2,6
Essigsäure-Octylester	4,1	3,2	3,5
Essigsäure-Furfurylester	Sp.	Sp.	Sp.
Essigsre-2-Phenylethylester	799	743	793
Buttersäure-Ethylester	122	192	187
Hexansäure-Ethylester	184	196	186
Octansäure-Ethylester	202	298	308
Decansäure-Ethylester	47	82	74
Isovaleriansäure	15	16	17
Hexansäure	1485	1962	2028
Octansäure	5554	7351	7549
Nonansäure	11	17	16
Decansäure	990	1671	1426
Dodecansäure	407	636	633

Alterungsindikatoren

Wie in Abbildung 52 ersichtlich, wies das Bier mit Teilbelüftung des dritten Sudes gegenüber den anderen beiden Gärungen im forciert gealterten Zustand deutlich höhere Gehalte an Alterungskomponenten auf. Da hier zum ersten Mal auch deutliche Differenzen im Bereich der Sauerstoffindikatoren vorhanden sind, ist evtl. ein Fehler beim Probenhandling für diese Unterschiede verantwortlich.

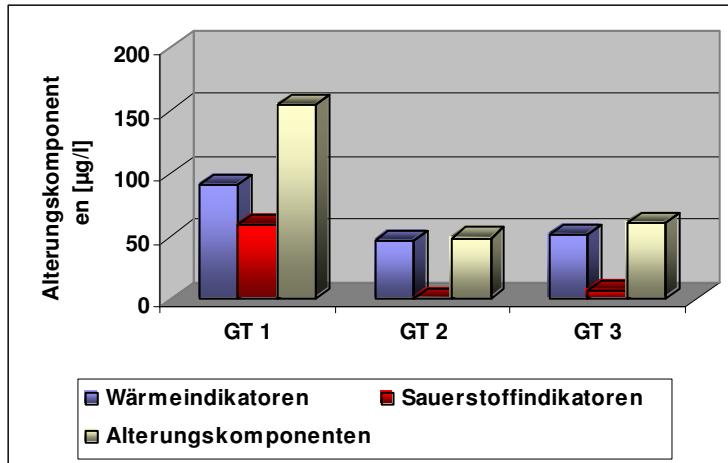


Abbildung 52: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1

Bei Betrachtung des 2-Furfuralgehaltes (Abbildung 53) der gealterten Biere zeigte sich wieder der bereits gefundene Zusammenhang, dass aus der Gärung mit stärkerer Belüftung und daraus resultierendem niedrigeren SO_2 -Gehalt ein Bier mit erhöhtem 2-Furfuralgehalt im gealterten Zustand hervorging.

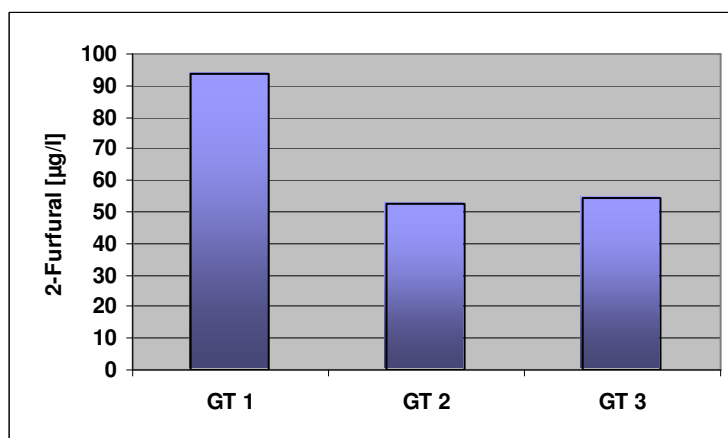


Abbildung 53: 2-Furfuralgehalte der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1

Verkostungsergebnisse

Die im Rahmen der Alterungsindikatorenuntersuchung gefundenen Ergebnisse bestätigen sich bei der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere. Das Bier aus der ersten Gärung weist hier einen deutlichen Alterungsgeschmack auf, die Biere aus den anderen beiden Gärungen schneiden dagegen eindeutig besser ab. Dabei ist zwischen Bier 2 und Bier 3 trotz der vorhandenen Differenz beim SO₂-Gehalt von 18,8 mg/l kein signifikanter Unterschied bei der Alterungsnote sowie der Akzeptanz zu finden.

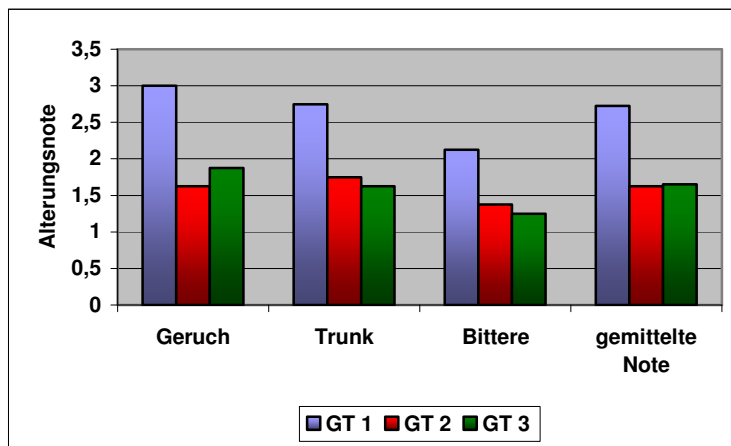


Abbildung 54: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1

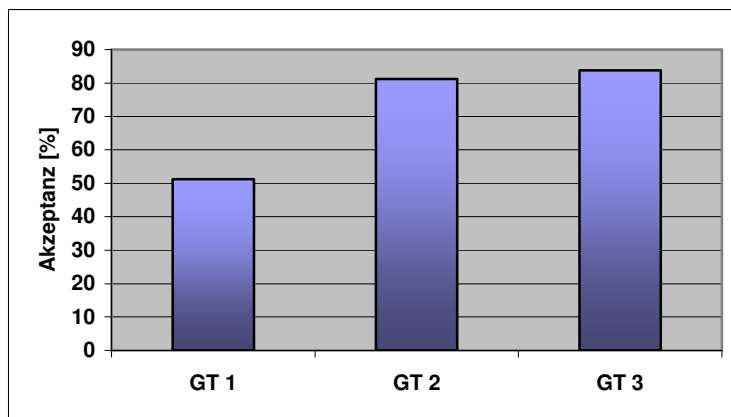


Abbildung 55: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/1

Diskussion

Die Durchführung von Gärungen mit Variation der Belüftung im Rahmen dieser Versuchsreihe führte zu enormen Unterschieden bezüglich der Schwefeldioxidgehalte der Biere sowie teilweise zu extrem hohen Werten von über 50 mg/l. Dabei lag der SO₂-Gehalt bei dem Bier mit einer Belüftung des dritten Sudes mit 12,6 mg/l bereits im angestrebten Bereich. Gegenüber den anderen zwei Gärungen verlief diese vom optischen Gärbild normal und war auch zügig abgeschlossen. Bei den zwei Gärungen mit Luftstoß nach Kühlende des dritten Sudes und ausschließlicher Belüftung des ersten Sudes traten die negativen Gärungserscheinungen wie beim Hefestamm 34/70 nicht auf, aber auch hier kam es zu einer deutlich verlängerten Gärdauer, die nicht mehr im praxistauglichen Rahmen liegt. Von dieser extremen Belüftungseinschränkung sollte also Abstand genommen werden.

4.2.3.2 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/2

Bei dieser Versuchsreihe wurde die Belüftung bei vier aufeinander folgenden Gärtanks verändert. Bei Gärtank 1, 2 und 3 erfolgte die Belüftung des ersten Sudes mit 10 l Luft pro hl Würze, bei Gärtank 4 wurde sie auf 15 l Luft erhöht. Die Belüftung des dritten Sudes erfolgte bei Gärtank 1 mit 10 l Luft pro hl Würze während des letzten Viertels der Kühlung, bei Gärtank 2 während der letzten Kühlhälfte, bei den Gärtanks 3 und 4 während der gesamten Kühldauer. Die Anstellzellzahl betrug hier 6 Mio./ml, die Gärtemperatur betrug 14 °C.

Tabelle 25: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/2

	GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
Sud 1	10 l/hl	10 l/hl	10 l/hl	15 l/hl
Sud 2	0	0	0	0
Sud 3	10 l/hl ab 300 hl	10 l/hl ab 200 hl	10 l/hl	10 l/hl

Gärungsverlauf

Alle Gärungen kamen relativ gleichmäßig an, wobei der Extraktabbau im Gärtank 4, der die höchste Belüftung erfahren hatte, etwas zögerlicher begann als bei den anderen Gärungen, dann aber eindeutig schneller verlief. Bei diesem Gärtank war auch die geringste Diacetylbildung zu beobachten, das ist auf die gute Hefevermehrung infolge der hohen Belüftung zurückzuführen. Ab dem

Schnittpunkt der Extraktverläufe bei 7,0 GG% verläuft der Extraktabbau der weniger belüfteten Gärtanks mit sinkender Belüftung auch eindeutig langsamer. Alle Gärtanks unterschritten nach ca. 150 h Gärdauer die Diacetylkonzentration von 0,1 mg/l. Auffällig war, dass bei dem Gärtank 1 der Extraktabbau während des 5. Gärtages bei 3,11 GG% stoppte und der Extrakt in den folgenden zwei Tagen nur noch auf 3,05 GG% abnahm. Das entspricht einem VGs von 75 % und liegt damit 3 % unter dem Sollwert. Eine Erklärung dafür kann nicht gegeben werden, die ZZ in Schwebelag zu diesem Zeitpunkt noch bei 12,0 Mio./ml.

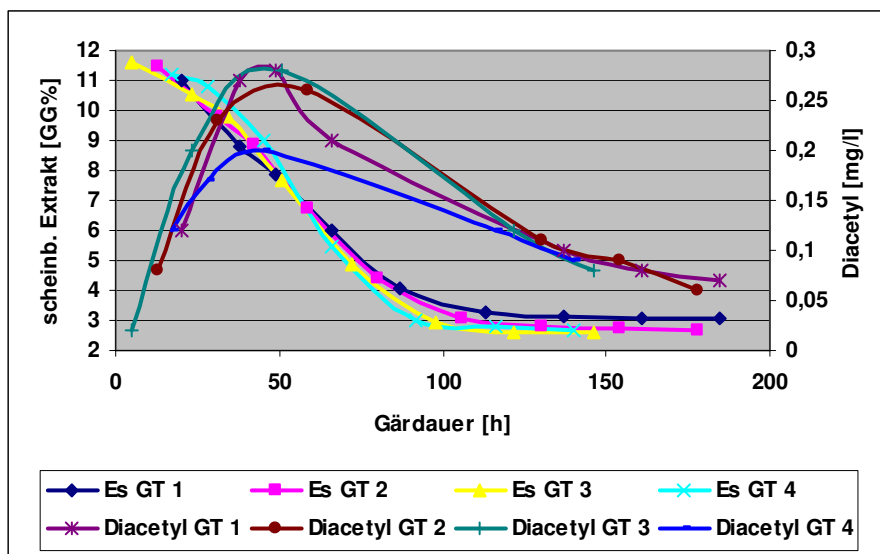


Abbildung 56: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/2

Hinsichtlich der Zellzahlverläufe, pH-Stürze und des FAN-Verbrauchs kam es bei allen vier Gärungen zu keinen signifikanten Differenzen. Bezüglich des Erscheinungsbildes der Gärdecke fiel bei GT 1 die schon in der vorangegangenen Versuchsreihe beschriebene offene Gärdecke auf, was hier wieder auf die stark eingeschränkte Belüftung des dritten Sudes zurückzuführen ist.

Schwefeldioxid

Hinsichtlich der SO_2 -Bildung wurde wieder der eindeutige Zusammenhang gefunden, dass eine zunehmende Belüftung des dritten Sudes zu geringeren SO_2 -Konzentrationen im Bier führt. Interessant ist der SO_2 -Unterschied der Gärtanks 3

und 4, bei denen lediglich die Belüftung des ersten Sudes variiert wurde. Auch hier zeigte sich ein geringerer Wert mit zunehmender Belüftung.

Die Gärung mit der höchsten Belüftung erzielte bereits einen SO_2 -Gehalt von 12,9 mg/l, was dem gewünschten Bereich entspricht.

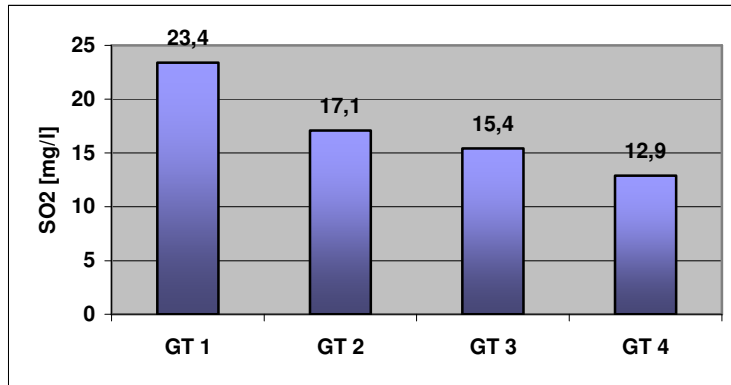


Abbildung 57: SO_2 -Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2

Aromastoffe und höhere Alkohole

Auffällig waren in dieser Versuchsreihe wiederum die Gehalte der Biere an Isoamylacetat, das bei allen Bieren deutlich über dem Geschmacksschwellenwert liegt, sowie das Ethylacetat, das bei dem Bier der Gärung 1 mit 30 mg/l den Geschmacksschwellenwert erreicht. Ein Zusammenhang mit der Belüftung wird hier nicht deutlich.

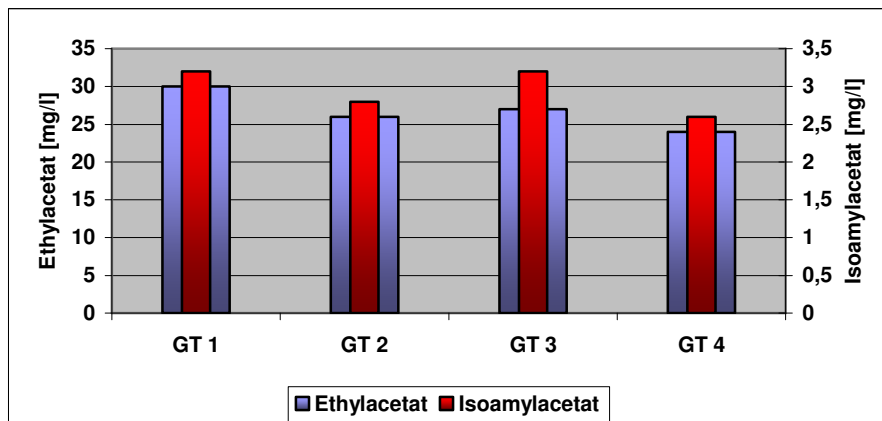


Abbildung 58: Konzentration an Ethylacetat sowie Isoamylacetat der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2

Im Bereich der höheren Alkohole und Ester waren keine deutlichen Unterschiede oder Zusammenhänge vorzufinden. Lediglich bei der Decan- und Dodecansäure resultierten aus steigender Belüftung geringere Gehalte im Bier.

Tabelle 26: Bieraromastoffe und höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]

	GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
Hexanol-1	8,1	6,7	8,5	8,5
Heptanol-1	3,1	3,1	4,0	4,7
Octanol-1	28,8	32,5	24,4	20,8
Decanol-1	4,3	3,9	3,2	3,3
2-Phenylethanol	32469	37199	37082	32056
Essigsäure-Isobutylester	112	113	98	76
Essigsäure-Hexylester	5,8	5,1	5,5	5,2
Essigsäure-Heptylester	3,3	3,3	3,4	2,8
Essigsäure-Octylester	3,7	4,0	4,3	4,0
Essigsre-2-Phenylethylester	648	620	669	615
Buttersäure-Ethylester	173	191	158	129
Hexansäure-Ethylester	128	132	133	124
Octansäure-Ethylester	237	225	196	214
Decansäure-Ethylester	66	54	40	48
Isovaleriansäure	35	34	27	30
Hexansäure	1132	898	1057	1147
Octansäure	5875	4976	5005	5104
Nonansäure	14	12	11	12
Decansäure	1362	1100	845	943
Dodecansäure	314	197	190	197

Alterungsindikatoren

Eine zunehmende Belüftung zum dritten sowie auch zum ersten Sud eines ZKGs führt zu einem geringeren Gehalt an Alterungskomponenten in den frischen Bieren. Dies beruht auf einer verminderten Bildung von 2-Furfural, 2-Phenyl-Ethanal sowie 2-Acetyl-Furan. Dies ist wahrscheinlich auf eine bessere Hefevermehrung bzw. einen verbesserten Hefestoffwechsel durch den erhöhten Sauerstoffanteil zurückzuführen. Dadurch kann die Hefe bereits in der Würze vorhandene Alterungssubstanzen besser reduzieren bzw. verstoffwechseln.

Tabelle 27: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]

		GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
3-Methyl-Butanal	(S,A)	14	13	13	11
2-Furfural	(W,A)	27	22	20	21
5-Methyl-Furfural	(A)	4,5	4,6	4,5	4,7
Benzaldehyd	(S,A)	1,3	1,3	0,7	0,8
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	10	8,5	6,6	6,9
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,2	1,5	1,4	1,4
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		6	5,4	4,1	4,5
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,8	0,8	0,8	0,7
2-Acetyl-Furan	(A)	9,8	9,6	7,5	7,1
2-Propionyl-Furan	(A)	1,8	2	1,9	1,8
gamma-Nonalacton	(W,A)	27	29	27	26
Summe der Wärmeindikatoren		54	51	47	48
Summe der Sauerstoffindikatoren		25	23	20	19
Summe der Alterungskomponenten		97	92	83	82

Des Weiteren ist ein interessanter Zusammenhang in Bezug auf die Sauerstoffindikatoren festzustellen. Die zunehmende Belüftung des dritten Sudes führt tendenziell zu weniger Sauerstoffindikatoren im frischen Bier. Die gleiche Wirkung hat die verstärkte Belüftung des ersten Sudes. Allerdings muss zu bedenken gegeben werden, dass die festgestellten Differenzen im einstelligen μg -Bereich liegen und an der Gesamtmatrix der Alterungskomponenten nur einen geringen Anteil haben.

Im gealterten Bier sind diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede zu erkennen.

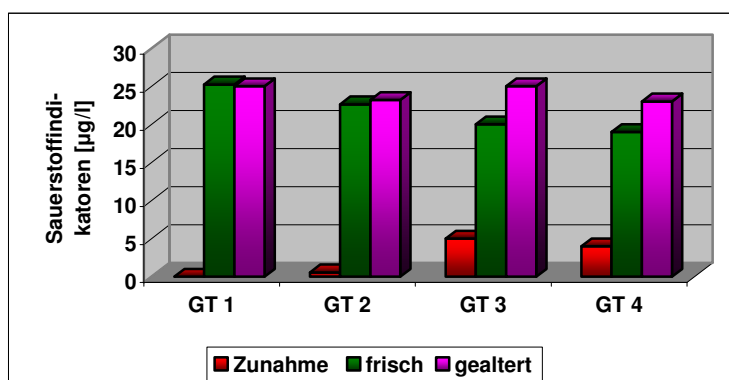


Abbildung 59: Sauerstoffindikatoren der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2

Entsprechend Tabelle 28 bestätigen sich die Erkenntnisse bezüglich der gealterten Biere der vorangegangenen Versuchsreihen. Je mehr der dritte Sud pro ZKG belüftet wurde (GT 1 – GT 3) und je höher die Belüftung zum ersten Sud ausfiel (GT 3 / GT 4), umso höher ist der Anteil der Alterungskomponenten in den gealterten Bieren. Diese Erhöhung ist auf einen Anstieg des 2-Furfurals sowie des gamma-Nonalactons zurückzuführen, die die Wärmeindikatoren darstellen. Die Biere der Gärungen, die weniger belüftet wurden, weisen hier wiederum die Eigenschaft auf, während der Alterung weniger dieser Substanzen nachzubilden.

Tabelle 28: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2 [$\mu\text{g/l}$]

		GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
3-Methyl-Butanal	(S,A)	12	12	12	11
2-Furfural	(W,A)	83	106	109	118
5-Methyl-Furfural	(A)	5,5	6,2	5,8	6,8
Benzaldehyd	(S,A)	1	1,2	1,8	0,9
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	12	10	11	11
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,4	1,4	1,5	2
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		14	12	10	12
Phenylelessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,7	1,5	1,3	1
2-Acetyl-Furan	(A)	10	8,9	8,7	10
2-Propionyl-Furan	(A)	2,2	2,6	2,8	2,6
gamma-Nonalacton	(W,A)	34	37	38	40
Summe der Wärmeindikatoren		117	143	147	158
Summe der Sauerstoffindikatoren		25	23	25	23
Summe der Alterungskomponenten		162	186	192	202

Verkostungsergebnisse

Abbildung 60 zeigt die Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere. Hier bestätigt sich erneut, dass die Biere aus den Gärungen mit reduzierter Belüftung des dritten Sudes und daraus resultierendem höheren SO_2 -Gehalt bei der Alterungsverkostung besser abschneiden als die Biere mit höherer Belüftung des dritten Sudes. Bei der Akzeptanz der Biere (Abbildung 61) zeigt sich diese Tendenz geringfügig.

Interessant ist in diesem Zusammenhang, dass eine erhöhte Belüftungsrate des ersten Sudes (GT 4) bei gleich bleibender Belüftung des dritten Sudes (GT 3) wieder zu einer leichten Verbesserung führt.

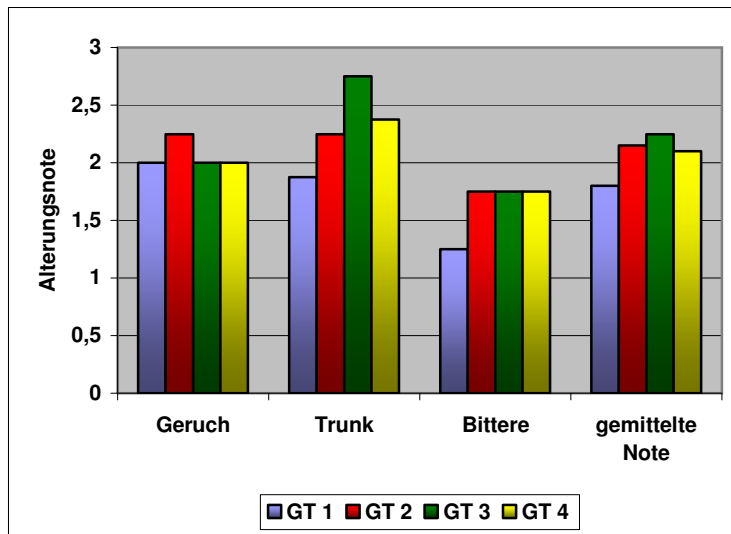


Abbildung 60: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2

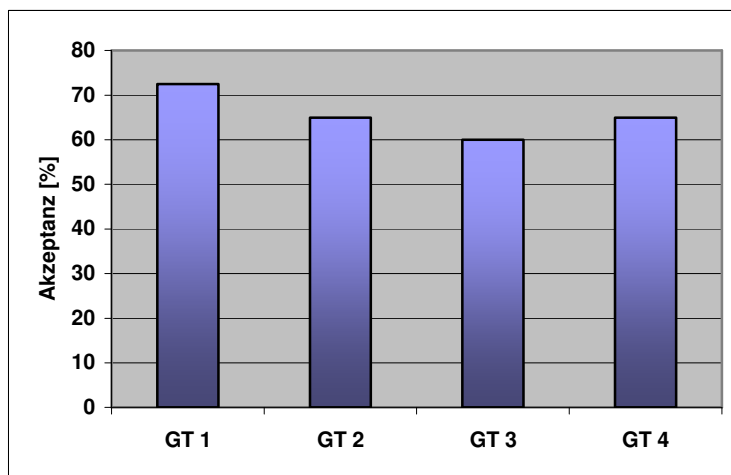


Abbildung 61: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/2

Diskussion

Die Gärung mit der höchsten Belüftung erzielte in dieser Versuchsreihe bereits einen SO_2 -Gehalt von 12,9 mg/l, was dem gewünschten Bereich entsprach. Durch weitere Variation der Belüftung des ersten und dritten Sudes pro ZKG war eine weitere Steigerung möglich, und das ohne eine bedeutsame Verlängerung der Gärdauer sowie ohne sensorische Einschränkungen. Lediglich eine Belüftung des letzten Viertels der Würze des dritten Sudes führte zu einem Bier mit einem

geringeren Endvergärungsgrad. Dies stellt aus produktions- sowie qualitätssicherungstechnischer Sicht in etwa die Grenze des technisch umsetzbaren dar.

Hinsichtlich der Alterungsindikatoren sowie –verkostung bestätigte sich, dass die Biere mit höherem SO₂-Werten besser abschneiden.

4.2.3.2.3 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3

Bei dieser Versuchsreihe wurde die Belüftung erneut bei vier aufeinander folgenden Gärtanks verändert. Die Anstellzellzahl betrug hier 6 Mio./ml, die Gärtemperatur lag bei 14 °C. Bei Gärtank 1 bis 3 erfolgte die Belüftung des ersten Sudes nun mit 20 l Luft pro hl Würze. Dieses hat den Hintergrund, dass in der Zwischenzeit Untersuchungen der Qualitätssicherung der Brauerei gezeigt hatten, dass bei einer Würzebelüftung mit 10 l Luft pro hl Würze der Sauerstoffgehalt der Würze im Tankeinlaufbereich der Tanks, die der Anstellregelung am nächsten liegen, teilweise nur bei 5 bis 6 mg/l lag. Offenbar löste sich bei den teilweise relativ kurzen Rohrleitungswegen zwischen der Belüftungseinrichtung und dem jeweiligen Tankeinlauf nicht der komplette in der dosierten Luft vorhandene Sauerstoff. Um bei allen Gärtanks gleichmäßige Zustände mit ca. 8 mg gelösten Sauerstoff pro Liter Würze zu gewährleisten, wurde die Belüftung grundsätzlich auf eine Einstellung von 20 Liter Luft pro Hektoliter Würze angehoben.

Bei Gärtank 1 wurde im Rahmen dieser Versuchsreihe der dritte Sud kontinuierlich mit 5 l Luft pro hl Würze belüftet, bei Gärtank 2 die zweite Hälfte der gekühlten Würze mit 10 l Luft pro hl Würze, bei Gärtank 3 ebenfalls die zweite Hälfte der gekühlten Würze aber nur mit 5 l Luft pro hl Würze.

Tabelle 29: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/3

	GT 1	GT 2	GT 3
Sud 1	20 l/hl	20 l/hl	20 l/hl
Sud 2	0	0	0
Sud 3	5 l/hl	10 l/hl ab 200 hl	5 l/hl ab 200 hl

Gärungsverlauf

Bei der Gärung 1 wurde der komplette dritte Sud mit einer Luftmenge von 5 l/hl Würze belüftet, bei der Gärung 2 die zweite Hälfte des dritten Sudes mit 10 l/hl,

das entspricht der gleichen effektiven Luftmenge pro Sud. Trotzdem verlief die Gärung im Tank 2 schneller. Zudem begann im GT 1 der Diacetylabbau wesentlich später, so dass hier der Geschmackschwellenwert erst zusammen mit dem GT 3 erreicht wurde, bei dem der dritte Sud mit 5 l/hl ab der Hälfte der Würzekühlung insgesamt am wenigsten belüftet wurde. Das führte im Vergleich zu den anderen Gärungen auch zu einem geringeren FAN-Verbrauch sowie einem weniger deutlichen pH-Abfall.

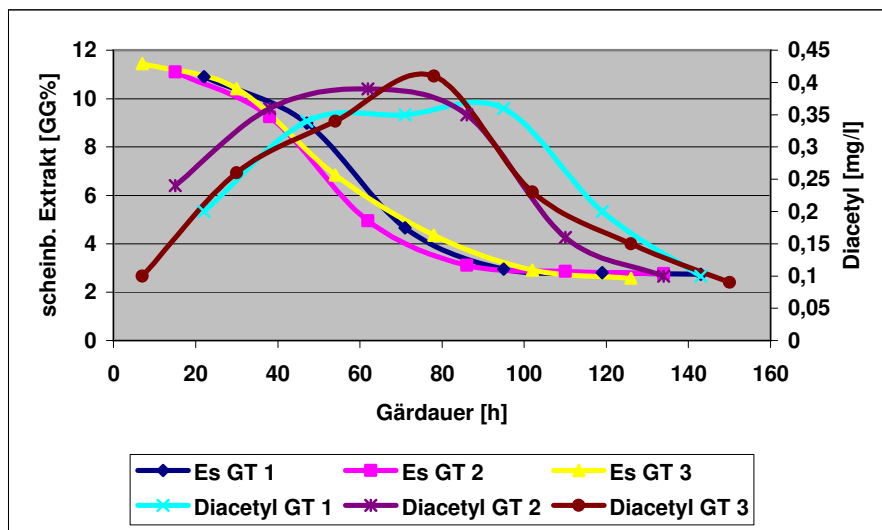


Abbildung 62: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/3

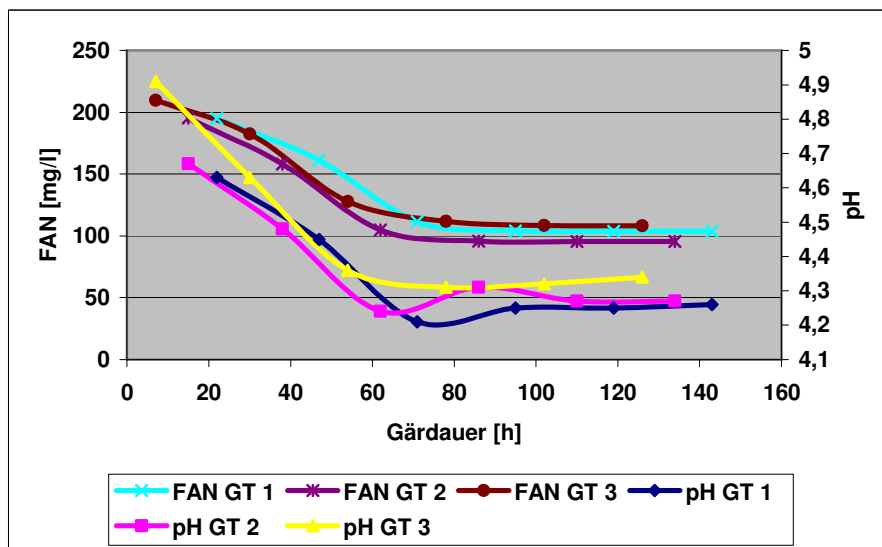


Abbildung 63: FAN- sowie pH-Verläufe der Gärungen der Versuchsreihe 321/3

Schwefeldioxid

Obwohl die effektiv zugeführten Luftmengen bei den dritten Suden der Gärtanks 1 und 2 identisch waren, weist das Bier im Gärtank 2 gegenüber dem Gärtank 1 einen geringfügig höheren SO_2 -Gehalt auf. Eine mögliche Erklärung für den höheren SO_2 -Gehalt ist, dass durch die Belüftung nur der zweiten Sudhälfte das Drauflassen der belüfteten Würze praktisch zu einem späteren Zeitpunkt erfolgt. Allerdings wäre im vorliegenden Fall nur eine Aufschiebung der Belüftung von ca. 23 Minuten vorhanden.

Wie bereits bekannt, führt die weiter eingeschränkte Belüftung bei Gärtank 3 erneut zu einem weiteren Anstieg der SO_2 -Konzentration im Bier.

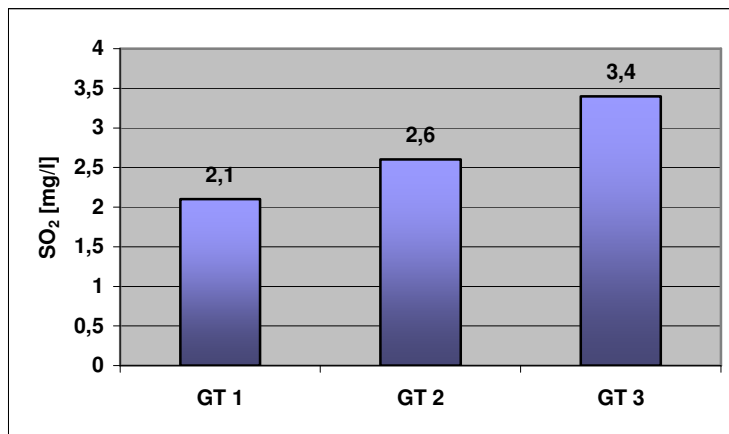


Abbildung 64: SO_2 -Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/3

Aromastoffe und höhere Alkohole

An dem Bier aus dem dritten Gärversuch ließ sich trotz mehrerer Versuche keine Bieraromastoffanalyse durchführen, die Dichlormethanperle, die die Bieraromastoffe während der Analyse aufnimmt, ist hier nicht entstanden. Laut Aussage des Laborpersonals ist diese Eigenschaft bei einigen Bieren beobachtet worden, eine Erklärung für dieses Phänomen gibt es nicht.

Die Bieraromastoffe der anderen Biere wiesen keine signifikanten Differenzen auf, die Analysen sind im Anhang zu finden (cf. AH Tab. 3.7 d + e).

Alterungsindikatoren

Im Rahmen der Gärversuche 1 bis 3 führte eine später einsetzende oder reduzierte Belüftung zu einer geringen Erhöhung der Alterungskomponenten im

frischen Bier. Im forciert gealterten Bier ist diese Tendenz ebenfalls zu erkennen, allerdings ist der Anstieg hier geringer ausgefallen, je höher der Gehalt bereits im frischen Bier war.

Insgesamt sind die Unterschiede bezüglich der Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere in dieser Versuchsreihe weniger stark ausgeprägt als in den vorangegangenen.

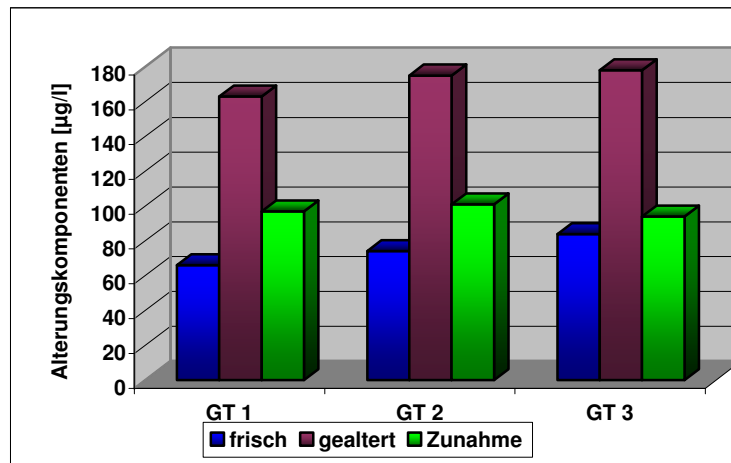


Abbildung 65: Alterungskomponenten der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/3

Der in den vorangegangenen Versuchsreihen gefundene Zusammenhang zwischen dem SO_2 -Gehalt und der Konzentrationen der Alterungsindikatoren in den forciert gealterten Bieren kann hier nicht bestätigt werden, die Tendenz ist hier sogar gegenläufig. Für eine Verkostung der Biere dieser Versuchsreihe stand nicht genügend Probenmaterial zur Verfügung.

Diskussion

Alle Versuchsvariationen waren als praxistauglich zu bezeichnen.

Insgesamt lagen die Schwefeldioxidgehalte der Biere dieser Versuchsreihe auf einem deutlich niedrigeren Niveau als in den zwei vorangegangenen Versuchsreihen, eine Erklärung dafür kann an dieser Stelle nicht gegeben werden. Dabei bestätigte sich, dass eine Reduzierung der Belüftung zu erhöhten SO_2 -Gehalten im Bier führt, allerdings waren hier keine extremen Veränderungen wie in den ersten Versuchsreihen zu beobachten. Trotz erhöhter SO_2 -Konzentrationen wiesen die Biere aus den Gärungen mit reduzierter

Belüftung im gealterten Zustand höhere Gehalte an Alterungsindikatoren auf, wenngleich die Unterschiede hier geringer ausfielen als in den vorangegangenen Versuchsreihen.

4.2.3.2.4 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4

Bei dieser letzten Versuchsreihe an drei Gärungen wurde noch einmal ausschließlich die Belüftung des jeweils dritten Sudes modifiziert, wobei der dritte Sud komplett und nicht nur teilweise belüftet wurde. Der jeweils erste Sud pro Gärtank erhielt eine Luftmenge von 20 l Luft pro hl Würze, der dritte Sud von Gärtank 1 wurde mit 5 l Luft pro hl Würze belüftet, der entsprechende Sud von Gärtank 2 mit 2 l Luft pro hl Würze. Der dritte Sud des dritten Gärtanks wurde nicht belüftet. Die Anstellzellzahl betrug hier wiederum 6 Mio./ml und wurde komplett beim jeweils ersten Sud pro ZKG gegeben, die Gärtemperatur lag bei 14 °C.

Tabelle 30: Belüftungsschema Versuchsreihe Stamm 321/4

	GT 1	GT 2	GT 3
Sud 1	20 l/hl	20 l/hl	20 l/hl
Sud 2	0	0	0
Sud 3	5 l/hl	2 l/hl	0

Gärungsverlauf

Die Gärverläufe der zwei mit 5 und 2 l/hl-Belüftung des dritten Sudes angestellten Tanks waren nahezu identisch. Lediglich das Diacetylmaximum fiel beim Gärtank 1 etwas niedriger aus, den Geschmacksschwellenwert erreichten beide Tanks zeitgleich, wobei der Restextrakt beim Gärtank 2 mit 2,9 GG% geringfügig höher lag als bei Gärtank 1. Der Tank ohne Belüftung des dritten Sudes wies einen deutlich verlangsamten Extrakt- sowie Diacetylabbau und ein späteres und niedrigeres Hefezellzahlmaximum auf. Hier führte die komplett fehlende Belüftung des dritten Sudes wieder zu einem verminderten Hefewachstum, darauf deuten auch ein geringer ausfallender pH-Sturz sowie eine geringere FAN-Abnahme hin. Bei diesem Tank stoppte der Extraktabbau bei einem Restextrakt von über 3,4 GG% gegenüber dem Sollwert von ca. 2,8 GG%. Dies ist zum Teil auf die extrem gute Hefesedimentation zurückzuführen, die ab einem Restextrakt von ca.

6,0 GG% einsetzte und schließlich bei allen drei Versuchen zum Schlauchzeitpunkt bei nur noch 1,2 Mio./ml lag.

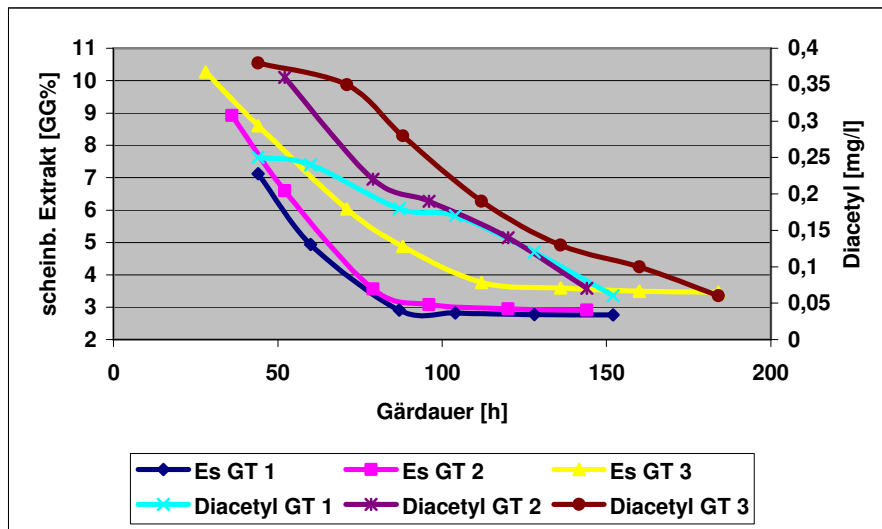


Abbildung 66: Extrakt- sowie Diacetylverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/4

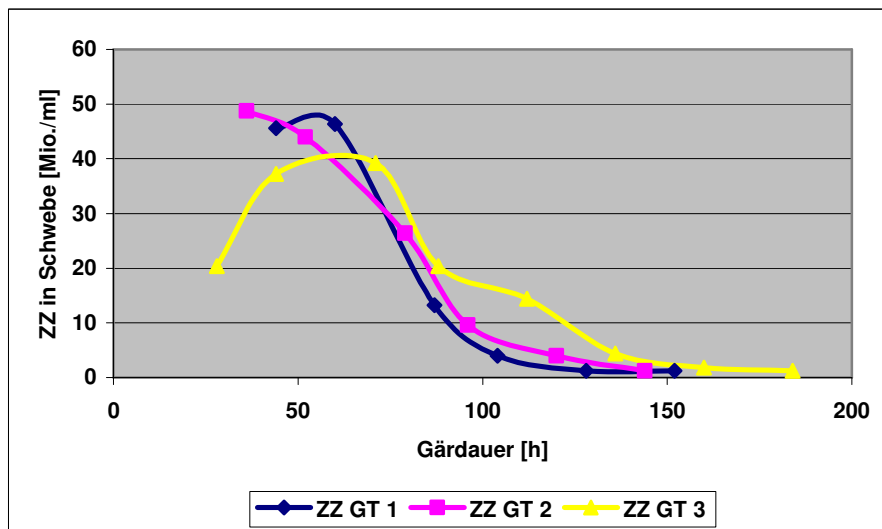


Abbildung 67: Zellzahlverläufe der Gärungen der Versuchsreihe Stamm 321/4

Schwefeldioxid

In Bezug auf die SO₂-Bildung zeigt sich wieder die schon bekannte Tendenz einer Erhöhung durch die Luftreduzierung der Belüftung des dritten Sudes sowie ein extrem ansteigender Wert beim kompletten Wegfall der Drittsudbelüftung.

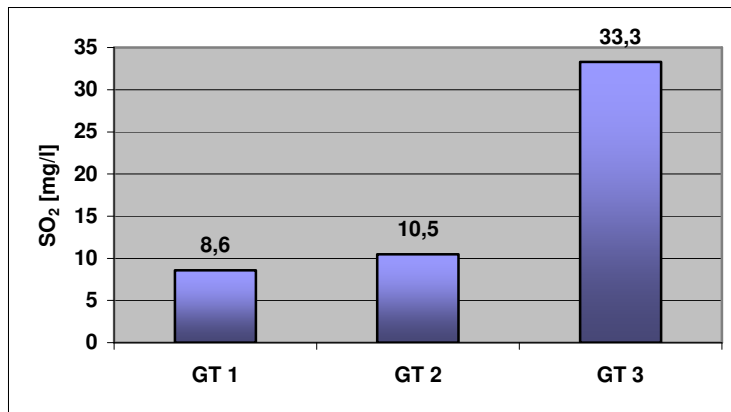


Abbildung 68: SO₂-Gehalte der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

Aromastoffe und höhere Alkohole

Im Rahmen dieser Versuchsreihe zeigte sich eindeutig, dass eine Reduzierung der Drittsudbelüftung sowie deren kompletter Wegfall zu deutlich steigenden Konzentrationen an Ethylacetat sowie Isoamylacetat führt.

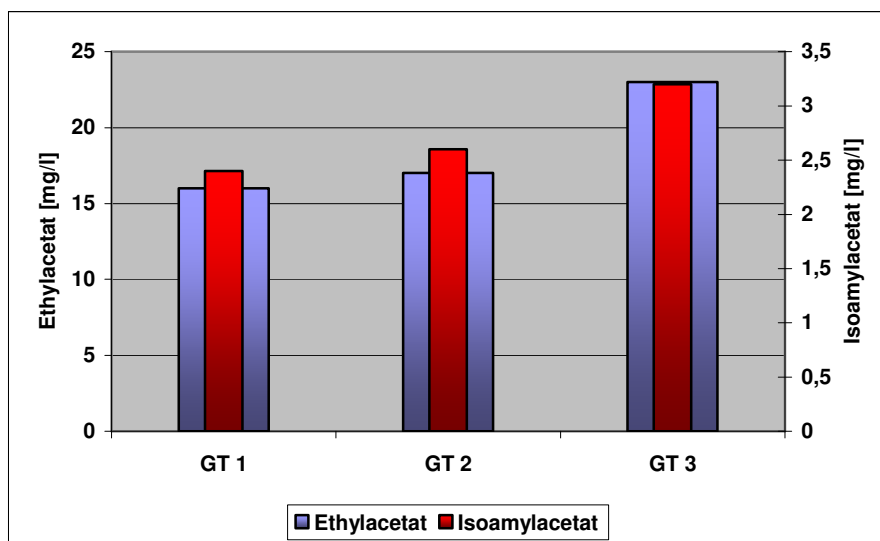


Abbildung 69: Konzentrationen an Ethylacetat sowie Isoamylacetat der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

Die Variation der Drittsudbelüftung mit 5 und 2 l Luft/hl führte zu keinen signifikanten Veränderungen der Bieraromastoffe. Der komplette Wegfall der Belüftung führte dagegen wie in Tabelle 31 ersichtlich zu einem deutlichen Anstieg der Ester und Fettsäuren.

Tabelle 31: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4 [$\mu\text{g/l}$]

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	19,0	19,0	20,0
Heptanol-1	3,3	3,8	3,9
Octanol-1	13,0	12,0	11,0
Decanol-1	5,1	5,1	4,7
2-Phenylethanol	29044	30284	23102
Essigsäure-Isobutylester	61	53	67
Essigsäure-Hexylester	9,1	8,2	10,0
Essigsäure-Heptylester	2,1	2,3	3,1
Essigsäure-Octylester	3,9	3,4	3,6
Essigsäure-Furfurylester	7,5	6,0	8,0
Essigsre-2-Phenylethylester	767	775	786
Buttersäure-Ethylester	78	77	89
Hexansäure-Ethylester	183	174	215
Octansäure-Ethylester	179	196	225
Decansäure-Ethylester	45	43	67
Isovaleriansäure	38	33	34
Hexansäure	1417	1555	2040
Octansäure	3929	4079	5507
Nonansäure	9	10	13
Decansäure	867	894	1426
Dodecansäure	322	295	471

Alterungsindikatoren

Während die Alterungskomponenten der frischen Biere auf dem Niveau von 80 $\mu\text{g/l}$ lagen, ist hier eindeutig zu erkennen, dass die abnehmende Belüftungsintensität des jeweils dritten Sudes zu einer reduzierten Zunahme der Alterungskomponenten während der Alterung führt.

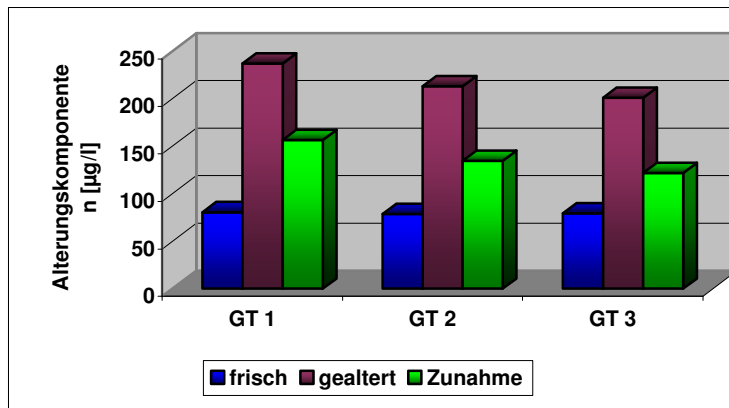


Abbildung 70: Alterungskomponenten der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

Diese verminderte Zunahme ist wiederum auf eine geringere Bildung von 2-Furfural zurückzuführen, alle anderen Alterungsindikatoren nehmen mit der Alterung gleichmäßig zu.

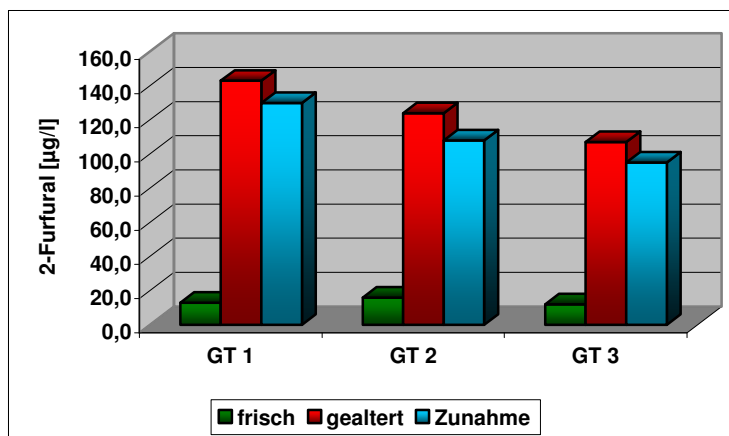


Abbildung 71: 2-Furfural-Gehalte der frischen und gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

Verkostungsergebnisse

Im Gegensatz zur Versuchsreihe 4.2.3.2.3 bestätigten sich hier erneut die Ergebnisse der Versuchsreihen 4.2.3.2.1 sowie 4.2.3.2.2. Die zunehmende Reduzierung der Drittsudbelüftung führt zu geschmacksstabileren Bieren mit einer höheren Akzeptanz im gealterten Zustand.

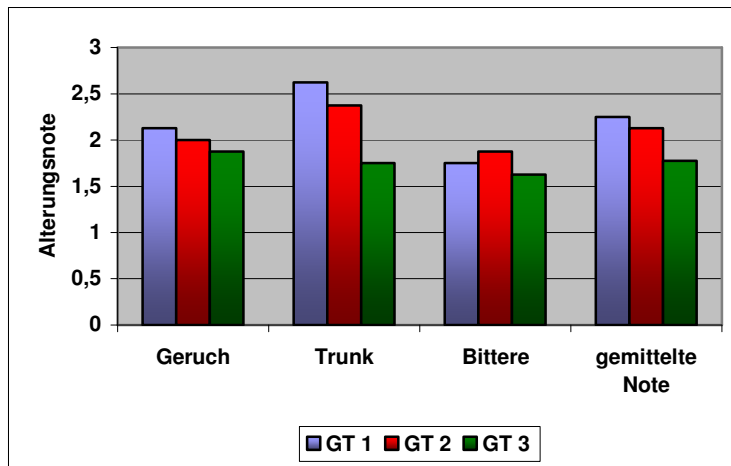


Abbildung 72: Ergebnisse der Alterungsverkostung der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

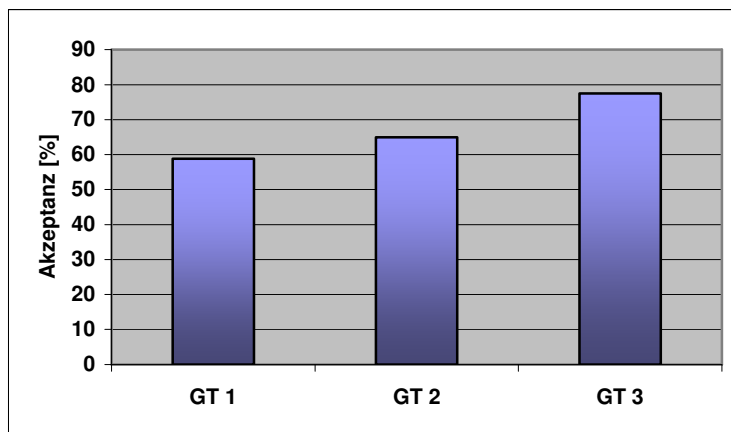


Abbildung 73: Akzeptanz der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Stamm 321/4

Diskussion

In dieser Versuchsreihe wurde wiederum bestätigt, dass durch eine moderate Belüftungsvariation im gewissen Umfang eine Erhöhung des SO_2 -Gehaltes erzielt werden kann, ohne eine Beeinträchtigung der Bierqualität oder produktionstechnische Einschränkungen in Kauf zu nehmen. Der komplette Wegfall der Drittsudbelüftung zeigte sich hier aufgrund der langen Gärdauer mit einem niedrigen Endvergärungsgrad erneut als ungeeignet.

4.2.3.2.5 Gesamtdiskussion Belüftungsversuche

Insgesamt konnte in mehreren Versuchsreihen aufgezeigt werden, dass durch eine Variation der Belüftung des dritten Sudes die SO_2 -Bildung während der Gärung deutlich beeinflussbar ist. Dabei zeigt sich bis auf eine Ausnahme die Tendenz, dass die Biere mit erhöhten SO_2 -Konzentrationen im gealterten Zustand niedrigere Gehalte an Alterungsindikatoren aufweisen als Biere mit geringeren SO_2 -Werten. Diese Ergebnisse standen im Einklang mit der Alterungsverkostung der entsprechenden Biere.

Bis auf die Ergebnisse der Versuchsreihe 4.2.3.2.3 bestätigte sich, dass der geringere Gehalt an Alterungsindikatoren der gealterten Biere mit höheren Sulfidgehalten auf verminderte Gehalte an 2-Furfural zurückzuführen ist. Als mögliche Ursache dafür können an dieser Stelle nur zwei Vermutungen geäußert werden:

1. Entweder geht das 2-Furfural mit dem SO_2 eine Verbindung ein, die im Rahmen der Analyse der Alterungsindikatoren nicht mit erfasst wird und die auch geschmacklich nicht zum Alterungsaroma beiträgt.
2. Durch eine zunehmende Belüftung werden möglicherweise eine chemische Reaktion bzw. Hefestoffwechselwege aktiviert, in deren Folge erhöhte Mengen an Vorläufersubstanzen des 2-Furfurals gebildet werden.

Ein kompletter Wegfall der Drittsudbelüftung erwies sich in keinem Fall als praxistauglich, bei diesen Gärungen kam es zu deutlich verlängerten Gärzeiten und der normale Endvergärungsgrad wurde nicht erreicht. Dazu kam es in diesen Fällen auch zu optisch nicht normalen Gärungserscheinungen.

Um relativ gleichmäßige, auf dem gewünschten Niveau von 10 mg/l liegende, SO_2 -Gehalte im Bier gewährleisten zu können, erfolgte eine Modifizierung der Steuerung der Anstellregelung. Beim Starten einer Würzekühlung konnte die Würzekühlung bis zu diesem Zeitpunkt lediglich entweder ohne oder mit Belüftung über die komplette Würzekühldauer erfolgen. Sollte die Menge der dosierten Luft verändert werden, so war dafür ein umständlicher zweiter Eingabeschritt notwendig. Seit der Modifikation der Anstellsteuerung kann der Bediener in einem Schritt vorwählen, ob die Würzekühlung mit oder ohne Belüftung erfolgen soll,

überdies hinaus kann ein beliebiger Startzeitpunkt der Belüftung nach Mengenvorgabe (z.B. Start der Belüftung nach gekühlter Würzmenge von 150 hl) angewählt sowie die zu dosierende Luftmenge vorgegeben werden. Dadurch ist eine auf jede Situation flexibel anpassbare Verfahrensweise gewährleistet.

Als Standard-Verfahrensweise wurde in der Brauerei nach Abschluss der Versuche eine Belüftung des ersten Sudes pro ZKG von 20 l Luft/hl Würze sowie des dritten Sudes pro ZKG von 5 l Luft/hl Würze vorgegeben. Von jedem Gärtank erfolgt vor dem Schlauchen eine Bestimmung des SO₂-Gehaltes. Sollte der Gehalt über einen längeren Zeitraum deutlich von dem gewünschten Bereich abweichen, so kann durch die Qualitätssicherung der Brauerei sowohl eine Reduzierung der Drittsudbelüftung bis auf 3 l Luft/hl Würze vorgegeben werden, als auch die Belüftung des ersten Sudes pro ZKG bis auf 10 l Luft/hl Würze reduziert werden. Durch diese Maßnahmen sollte eine Anpassung des SO₂-Gehaltes in einem gewissen Rahmen möglich sein, ohne dass es zu deutlichen Veränderungen der Gärdauer kommt.

4.2.4 Versuche im Kleinmaßstab Stamm 34/70

Für die Versuchsdurchführung wurden während einer laufenden Würzekühlung 3 hl Würze abgenommen und jeweils 1 hl in einen gereinigten Gärtank der Versuchsbrauerei überführt. Der Gärtank 2, in dem die Gärung ohne Belüftung stattfinden sollte, wurde zum Vermeiden eines Sauerstoffeintrags vor dem Befüllen intensiv mit CO₂ ausgeblasen. In Gärtank 1 und 2 wurden jeweils 10 l frische Hefesuspension aus einer laufenden Assimilation mit einer Zellzahl von 65 Mio./ml gegeben, woraus eine Anstellzellzahl von 6 Mio./ml resultierte, weitere 10 l der Hefesuspension wurden in einem verschlossenen Behältnis für 24 h in einem Kühlraum bei 0 °C gelagert. Der Inhalt des Gärtanks 1 wurde anschließend intensiv über eine Vorrichtung am Konus bis zu einem Sauerstoffgehalt von 6 mg/l belüftet, dadurch wurde auch eine Homogenisierung des Inhaltes erreicht. Ein höherer Sauerstoffgehalt konnte aufgrund einer starken Schaumbildung nicht erzielt werden. Der Inhalt des Gärtanks 2 wurde mittels eines Rührwerks homogenisiert. Die Würze im Gärtank 3 wurde nach 24 h mit der kalt gelagerten Assimilationshefe angestellt, hier erfolgte wiederum eine Belüftung bis auf einen Sauerstoffgehalt von 6 mg/l. Durch eine mikrobiologische Analyse konnte

ausgeschlossen werden, dass es in der Würze während der 24 h dauernden Aufbewahrung bis zum Anstellen zur einer Infektion kam, die das Versuchsergebnis evtl. beeinflussen konnte.

Tabelle 32: Übersicht Belüftung Gärversuche im Kleinmaßstab

	Gärtank 1	Gärtank 2	Gärtank 3
Würzebelüftung	ja	nein	ja
Hefekaltlagerung	nein	nein	ja

Diese Versuchsreihe wurde einmal mit dem Hefestamm 34/70 bei einer Gärtemperatur von 11 °C durchgeführt. Eine Probenahme erfolgte jeweils täglich.

Gärungsverlauf

Alle Gärungen verliefen gleichmäßig, wobei der Extraktabbau bei der Gärung mit frischer Reinzucht und Belüftung geringfügig schneller verlief als bei den anderen zwei Gärungen. Durch die Belüftung und die hochaktive Hefe kam es hier auch zu der größten Hefevermehrung. Bei der Gärung ohne Belüftung vollzog sich die Hefevermehrung gleich schnell wie bei der Gärung mit Belüftung, allerdings fiel die Vermehrung hier infolge des fehlenden Sauerstoffs in der Würze geringer aus. Bei der Gärung mit gelagerter Reinzucht setzte die Hefevermehrung dagegen erst deutlich zeitverzögert ein, hier lag das Zellzahlmaximum deutlich unter dem der Gärung mit frischer Reinzucht. Der Diacetylschwellenwert wurde am schnellsten (135 h) bei der Gärung 3 erreicht, der Vorsprung zur Gärung 1 mit frischer Reinzucht fällt beachtlich aus (179 h). Am längsten dauerte der Diacetylabbau bei der Gärung ohne Belüftung mit 197 h.

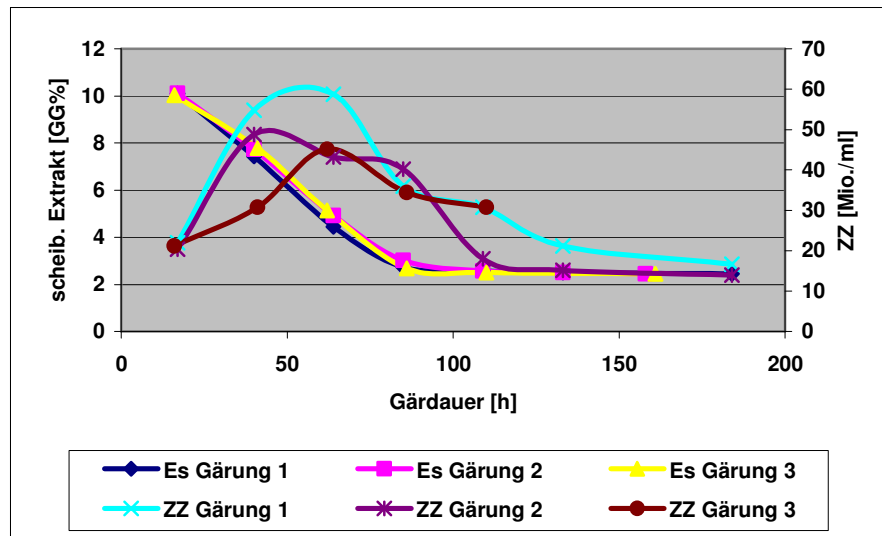


Abbildung 74: Extrakt- sowie Zellzahlverläufe der Biere aus den Kleingärversuchen

Schwefeldioxid

Hier zeigte sich die Tendenz, dass die fehlende Belüftung der Gärung zu einer erhöhten Bildung führt, allerdings liegt der Wert hier mit 0,9 mg/l nur geringfügig über denen der anderen Gärungen mit 0,4 mg/l. Es bestätigt sich also, dass hochvitale Reinzuchthefen kaum SO_2 bilden. Eine Kaltlagerung der Reinzuchtheffe vor dem Anstellen führte in dieser Hinsicht auch zu keiner Verbesserung.

Aromastoffe und höhere Alkohole

Das Bier aus der ersten Gärung wies mit Ausnahme des 2-Phenylethanol gegenüber den Vergleichsgärungen deutlich niedrigere Gehalte an höheren Alkoholen auf. Dies ist vermutlich auf die intensive Hefevermehrung und den damit verbundenen Aminosäurestoffwechsel zurückzuführen. Dagegen sind die Gehalte der meisten Ester bei diesem Bier deutlich erhöht.

Tabelle 33: Bieraromastoffe sowie höhere Alkohole der Biere aus den Kleingärversuchen [$\mu\text{g/l}$]

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	23	36	35
Heptanol-1	8,3	21,5	20,4
Octanol-1	15	18	17
Decanol-1	4,8	6	6
2-Phenylethanol	40075	37221	36547
Furfurylalkohol	919	1234	1479
Essigsäure-Isobutylester	108	71	71
Essigsäure-Hexylester	9,5	10,0	7,4
Essigsäure-Heptylester	3,6	3,5	2,8
Essigsäure-Octylester	5,6	2,9	3,8
Essigsäure-2-Phenylethylester	1484	1118	1022
Buttersäure-Ethylester	97	78	68
Hexansäure-Ethylester	156	129	129
Octansäure-Ethylester	223	170	201
Decansäure-Ethylester	20	10	23
Isovaleriansäure	732	803	1315
Hexansäure	1632	1424	1539
Octansäure	3941	3154	3635
Nonansäure	14	22	50
Decansäure	165	107	234
Dodecansäure	3,6	4	7

Alterungsindikatoren

Im frischen Zustand wies das Bier aus der Gärung mit frischer Reinzucht und Belüftung den geringsten Gehalt an Wärme- und Sauerstoffindikatoren sowie Gesamalterungskomponenten auf. Die jeweils höchsten Konzentrationen wies das ohne Belüftung angestellte Bier auf. Es fand hier schließlich trotz des fehlenden Sauerstoffs eine ausreichende Hefevermehrung statt, vermutlich führt der Sauerstoffmangel aber zu einer teilweise eingeschränkten Stoffwechselaktivität der Hefe, woraus dann eine Verringerung ihrer reduzierenden Eigenschaften und dadurch erhöhte Gehalte der Alterungsindikatoren resultieren.

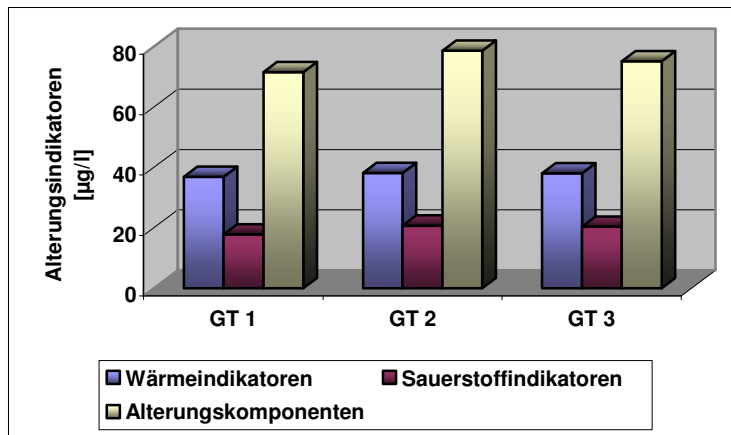


Abbildung 75: Alterungsindikatoren der frischen Biere aus den Kleingärversuchen mit Belüftungsvariation

Im forcierten Zustand weist ebenfalls das ohne Belüftung angestellte Bier den höchsten Anteil an Alterungskomponenten auf, die beiden mit Belüftung angestellten Biere liegen auf einem Niveau. Dieser Unterschied beruht fast ausschließlich auf einer erhöhten Zunahme des 2-Furfurals.

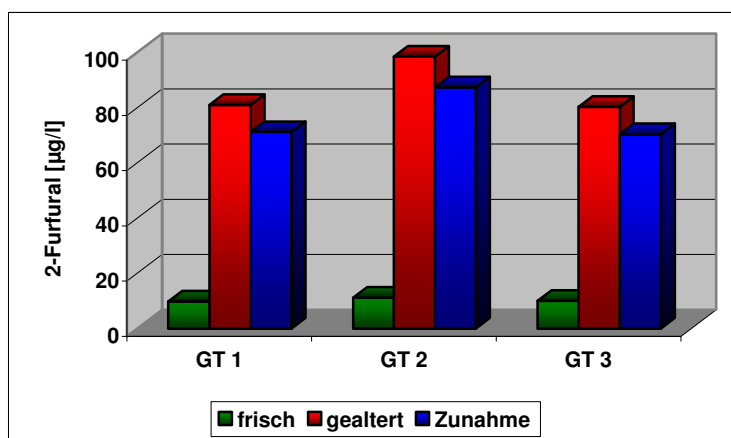


Abbildung 76: 2-Furfural-Gehalte der frischen und gealterten Biere aus den Kleingärversuchen mit Belüftungsvariation

Verkostungsergebnisse

Da nicht genügend Probenmaterial zur Verfügung stand, konnte an den Bieren dieser Versuchsreihe keine Verkostung durchgeführt werden.

Diskussion

Insgesamt bestätigte sich in dieser Versuchsreihe die Erkenntnis von THIELE [3], dass durch eine erhöhte Belüftung die SO_2 -Gehalte der daraus resultierende Biere geringer ausfallen, diese Biere mit höherer Belüftung aber sowohl analytisch als auch sensorisch besser abschneiden können.

4.2.5 Untersuchung der Hefegenerationen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde von Dezember 2006 bis Februar 2007 eine Hefe vom Anstellen als Reinzucht bis zur 11. Führung und die Auswirkungen bzw. Veränderungen über die Führungen beobachtet. Die Untersuchungen erfolgten dabei an der Hefe bzw. dem Bier von der Reinzuchtgärung bis zur Gärung der 7. sowie der 11. Führung.

Über die Führungen zeigten sich keine extremen Veränderungen der Gärdauer, des Extraktabbaus, der Diacetylbildung sowie der Zellzahlverläufe und Sedimentationseigenschaften der Hefe, die mit der Führungsanzahl in Zusammenhang gebracht werden könnten.

Aufschlussreich war der Zusammenhang zwischen dem Hefeerntezeitpunkt und dem jeweiligen physiologischen Zustand der Erntehefe. Wie in Abbildung 77 ersichtlich wies, die Hefe der Reinzuchtgärung im Rahmen der Ernte nach 150 h Gärdauer mit 6,23 noch einen guten ICP auf, der ICP der folgenden Ernte lag mit 6,39 sogar deutlich höher, hier erfolgte die Ernte auch etwa einen Gärtag früher. Der mit 158 h spätere Erntezeitpunkt der zweiten Führung führte schon zu einem deutlich schlechteren intracellulärem pH-Wert von 5,88. Durch die extrem frühe Ernte der dritten Führung (nach 106 h Gärdauer) konnte dieser wieder eindeutig auf 6,42 verbessert werden. Die folgenden zwei Führungen wurden aufgrund von Feiertagen jeweils relativ spät geerntet. Der sehr gute Ausgangs-ICP der dritten Führung von 6,42 verschlechterte sich bei der 4. Führung auf 5,99 und im weiteren Verlauf der 5. Führung auf einen extrem schlechten Wert von 5,66. Im Verlauf der 6. und 7. Führung fand hier trotz früherer Erntezeitpunkte keine nachhaltige Erholung mehr statt.

In diesem Zusammenhang ist die Verschlechterung nicht auf die zunehmende Führungsanzahl zurückzuführen, sondern eindeutig mit den unterschiedlichen Erntezeitpunkten in Zusammenhang zu bringen.

Ein Zusammenhang der Führungsanzahl mit dem SO₂-Gehalt ist nicht zu erkennen.

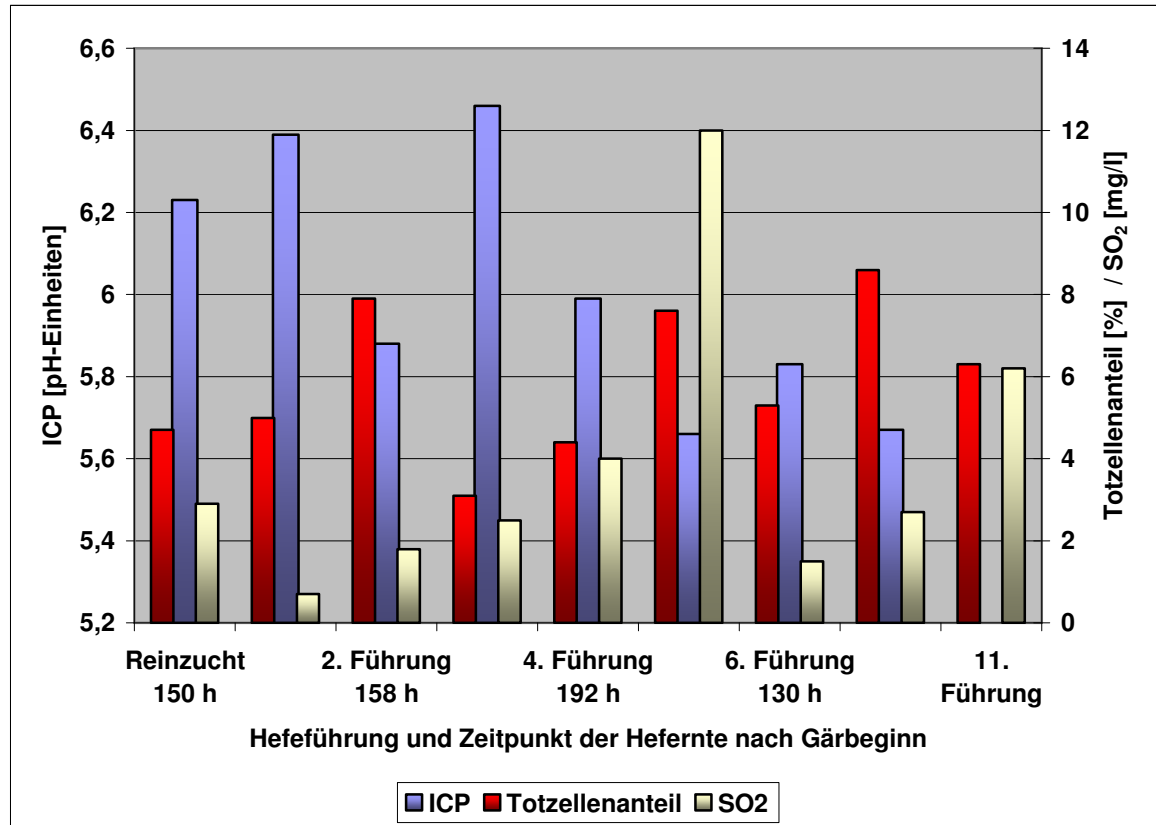


Abbildung 77: ICPs und Totzellenanteile der Hefen sowie SO₂-Gehalte der Biere von der Reinzuchtgärung bis zum Einsatz der 11. Führung.

Aromastoffe und höhere Alkohole

Im Bereich der höheren Alkohole und Bieraromastoffe fallen bei ausgewählten Substanzen, wie z.B. Hexanol-1, Octanol-1, Buttersäure- sowie Hexansäure-ethylester und der Decansäure, deutliche Schwankungsbreiten auf, die teilweise mehr als 100 % bezogen auf den niedrigsten gefundenen Wert betragen. Tendenzen oder Zusammenhänge, die mit der Führungsanzahl in Zusammenhang zu bringen sind, sind ausschließlich bei der Dodecansäure zu finden. Ihr Gehalt im Bier steigt systematisch beginnend mit 9 µg/l bei der Reinzuchtgärung über alle Führungen permanent an bis zu einer Konzentration von 240 µg/l bei der Gärung der 11. Führung. Dieser Wert liegt auch deutlich über dem Durchschnittsgehalt

untergäriger Vollbiere (10 - 70 µg/l). Der größte nachvollziehbare Sprung erfolgte zwischen der 5. und 6. Führung. Eine direkte Ursache kann hier nicht gefunden werden, die Nachhaltigkeit dieser Zunahme lässt aber auf eine genetische Veränderung eines Stoffwechselweges der Hefe schließen.

Weiter fällt noch auf, dass das Bier der 11. Führung die höchsten Konzentrationen an Octanol-1, Essigsäureisobutylester sowie Buttersäureethylester aufweist. Eine kontinuierliche Steigerung über die Führungen ist hier aber im Gegensatz zur Dodecansäure nicht ersichtlich.

Tabelle 34: höhere Alkohole und Bieraromastoffe der Biere von der Reinzuchtgärung bis zur 11. Führung

	Rein- zucht	1. Führung	3. Führung	5. Führung	6. Führung	7. Führung	11. Führung
Hexanol-1	16,5	14,6	13,9	11,3	13	9,1	13,7
Heptanol-1	3,8	4,4	3	2,9	3,4	2,4	2,5
Octanol-1	15,5	11,9	12,7	8,4	11	11	20,6
Decanol-1	5	3,8	4	2,8	3,1	2,8	4,2
2-Phenylethanol	41600	44829	47942	31264	43051	36300	42109
Essigsäure- Isobutylester	62	64	89	77	62	81	113
Essigsäure-Hexylester	6,3	6,5	8,1	9,5	5,2	8,6	8,6
Essigsäure- Heptylester	2,3	2,5	1,9	2,4	2,2	2,5	2,4
Essigsäure-Octylester	4,9	5,2	6,4	5,6	4,7	5,8	5,2
Essigsäure- Furfurylester	2,4	3	4	4	sp.	sp.	Sp.
Essigsäure-2- Phenylethylester	675	791	1140	806	777	893	950
Buttersäure-Ethylester	69	73	78	91	52	71	124
Hexansäure-Ethylester	128	167	190	209	142	184	166
Octansäure-Ethylester	157	207	211	280	164	228	234
Decansäure-Ethylester	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	30	42	50
Isovaleriansäure	n.a.	33	30	n.a.	38	36	28
Hexansäure	1237	1260	1422	1728	1196	1266	1465
Octansäure	3855	4800	4866	6405	3638	4504	5681
Nonansäure	12	9	8	11	9	11	13
Decansäure	427	684	677	1367	559	734	930
Dodecansäure	9	17	17	32	125	133	240

Alterungsindikatoren

Im Bereich der Alterungsindikatoren der frischen und forciert gealterten Biere waren keine signifikanten Auffälligkeiten vorhanden, die mit der Anzahl der Hefeführungen oder der Qualität der Anstellhefe in Zusammenhang zu bringen sind (cf. AH Tab. 5.1 I & m).

Diskussion Hefeführungen

In Bezug auf das Gärverhalten bzw. den Gärungsverlauf konnten keine Zusammenhänge gefunden werden, die mit der zunehmenden Führungszahl der Hefe in Verbindung stehen. Die physiologischen Zustände der Hefezellen der einzelnen Führungen wiesen deutliche Unterschiede auf, diese Differenzen waren aber nicht mit der Führungsanzahl, sondern eindeutig mit dem Zeitpunkt der jeweiligen Hefeernte in Verbindung zu bringen. Die in der Literatur oftmals vorgeschlagene Regel, die Hefe maximal drei- bis fünfmal zu führen, da es sonst infolge einer Verschlechterung des Hefezustandes – auch mitverursacht durch Trub- und Bitterstoffanreicherungen - zu verlängerten Gärzeiten kommt, kann daher an dieser Stelle nicht bestätigt werden. Möglicherweise tragen die Anstellparameter ebenfalls dazu bei. Aus der geringen Anstellzellzahl von 6 Mio. Zellen/ml und dem Zellzahlmaximum, das während der Gärungen zwischen 50 und 60 Mio. Zellen/ml liegt, resultiert praktisch bei jeder Gärung eine Verneun- bis Verzehnfachung der Zellzahl. Daraus resultiert eine kontinuierliche und deutliche Populationsverjüngung, die auch eine Anreicherung mit Trub ausschließt. Einzig auffällig waren die Zunahmen einiger Aromastoffe, diese sind aber zumindest bis zur 7. Führung nicht dramatisch ausgefallen.

4.3 SO₂-Stufenkontrolle

Zur Ermittlung des Verhaltens von SO₂ über die Produktionsschritte wurde an dem Bier eines Gärtanks eine SO₂-Stufenkontrolle durchgeführt. Zu diesem Zweck wurde der Gärtank ohne Verschnitt geschlaucht, filtriert und abgefüllt. Zusätzlich wurde ein Teil des abgefüllten Bieres warm bei 20 °C und ein Teil kalt bei 0 °C gelagert. Von diesem Bier wurde ebenfalls in entsprechenden Abständen der SO₂-Gehalt bestimmt.

Während des etwa drei Wochen dauernden Zeitraums vom Gärende bis zur Abfüllung des Bieres ist die Tendenz einer Abnahme des SO₂-Gehaltes zu beobachten. Dies bestätigt frühere Veröffentlichungen. Eine mögliche Erklärung wäre hier ein evtl. vorhandener Sauerstoffeintrag während des Schlauchens oder im Rahmen der Filtration.

Diese Abnahme fällt allerdings nicht sehr deutlich aus. Da die Analysengenauigkeit bei +/-1,0mg/l liegt, kann die ersichtliche Abnahme auch

hierauf beruhen. Diese Annahme wird dadurch bestätigt, dass die zwei Wochen kalt gelagerte Flasche wieder eine SO_2 -Konzentration von 12,4 mg/l aufwies.

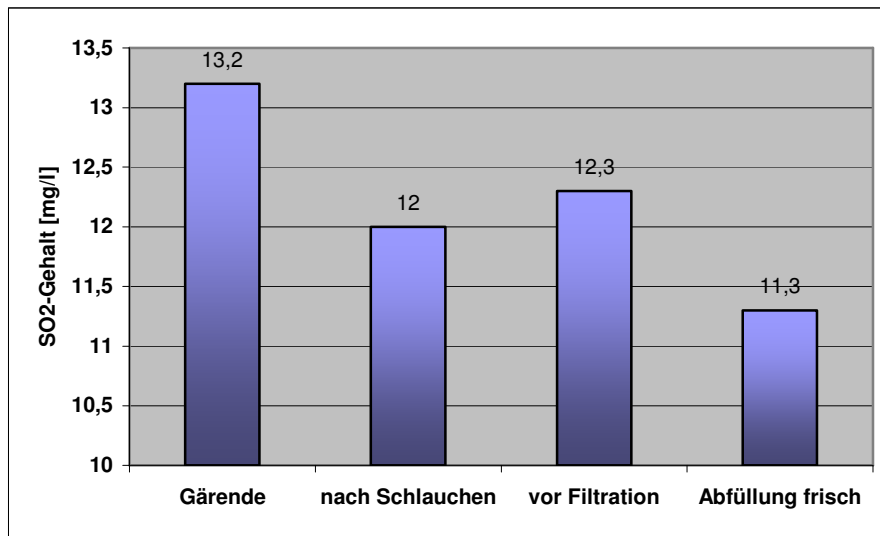


Abbildung 78: SO_2 -Gehalt eines Bieres während verschiedener Produktionsschritte

Interessant ist die Abnahme des SO_2 -Gehaltes in den abgefüllten Flaschen. Bereits nach einer Lagerung von zwei Wochen ist die SO_2 -Konzentration in einer warm gelagerten Flasche etwa 2 mg niedriger als in einer kalt gelagerten Flasche. Nach 15 Wochen ist im warm gelagerten Bier praktisch kein SO_2 mehr vorhanden, das kühl gelagerte Bier weist noch einen Wert von 3,7 mg/l auf. Bei warmer Lagerung sind über den Zeitraum von 15 Wochen pro Woche etwa 0,8 mg SO_2 abgebaut worden. Dieser Wert liegt deutlich über den in der Literatur genannten Werten von etwa 1,0 mg/l pro Monat. Möglicherweise ist für diese rapide Abnahme die erhöhte Sauerstoffpermeation durch den Bügelverschluss gegenüber einem Kronenkorkenbier verantwortlich.

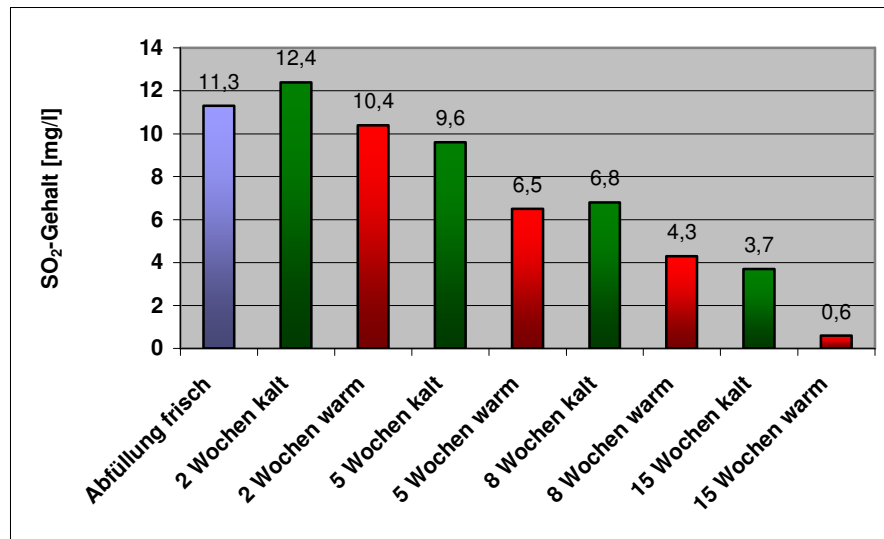


Abbildung 79: SO₂-Abbau während der Lagerung eines Flaschenbieres

4.4 Hefeernte und Erntehefelagerung

Gegen Ende des Jahres 2005 erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I eine Reihe von Untersuchungen der normal im Betrieb gewonnen Erntehefe, die Ergebnisse stellt die Tabelle 35 dar.

Tabelle 35: ICP-Werte sowie Methylenblau-Tote Zellen der normalen Betriebserntehefe

Probe Nr.	Führung	ICP	Methylenblau-Tote
1	k.A.	5,58	16,2
2	3.	5,98	9,7
3	3.	5,68	13,7
4	Reinzucht	6,27	1,0
5	Reinzucht	6,36	2,8
6	4.	5,78	13,3
7	4.	6,16	5,4

Die physiologischen Zustände waren abgesehen von den Reinzuchtproben als mittelmäßig bis schlecht zu bezeichnen. Es folgte daraufhin eine Reihe von Untersuchungen an Erntehefen. Hierbei wurde deutlich, dass die später geernteten Hefen immer eine schlechte Vitalität und höhere Totzellenanteile aufwiesen als die früher geernteten Hefen, wobei auch immer der Zustand der jeweils eingesetzten Anstellhefe eine Rolle spielt. Dieser Zusammenhang wurde bereits in Kapitel 4.2.5 angesprochen.

Die Ursache dafür liegt auf der Hand. Wenn die sedimentierte Hefe im Konus liegt, verschlechtert sich ihr Zustand durch zahlreiche Stressfaktoren. POWELL et al. [70] nennen Alkohol, osmotische Verhältnisse, den hydrostatischen Druck sowie Nährstoffmangel und eine Anreicherung der Hefezellen mit anderen Substanzen wie langkettigen Fettsäuren, Hopfenkomponenten, verschiedenen Proteinen und Trub als Stressfaktoren. Zusätzlich erzeugt der Hefestoffwechsel weiterhin Wärme, die aufgrund der guten Isolationseigenschaften der Hefesuspension nicht abgeführt werden kann und den Hefestoffwechsel noch zusätzlich anregt.

Zur Verdeutlichung dieser Problematik wurde von einer Gärung einmal am fünften Gärtag (nach 120 h Gärdauer) die bereits sedimentierte und am neunten Gärtag (nach 220 h Gärdauer) die im weiteren Verlauf der Gärung abgesetzte Hefe geerntet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 80 dargestellt. Während sich die Hefe am 5. Gärtag in einem hervorragenden physiologischen Zustand befindet, verschlechtert sie sich während der vier weiteren Tage in dramatischer Weise und befindet sich schließlich in einem sehr schlechten Zustand. Dieses Beispiel verdeutlicht, welchen gravierenden Einfluss der Zeitpunkt der Hefeernte besitzt.

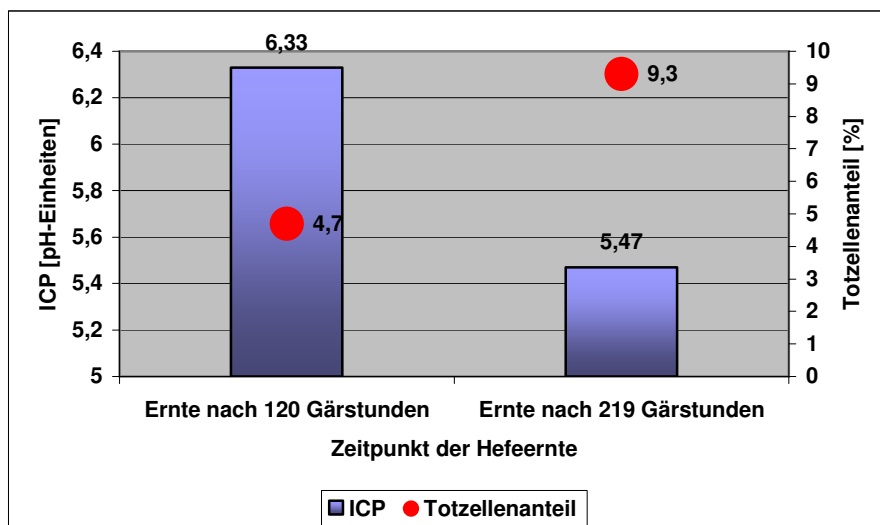


Abbildung 80: ICP-Werte sowie Totzellenanteile in der Erntehefe einer Gärcharge zu zwei versch. Erntezeitpunkten

Die Ernte sowohl der Verkaufshefe als auch der zum Anstellen gedachten Hefe erfolgte bis zum Sommer 2007 immer unmittelbar vor dem Schlauchen. Dadurch sollten ein erhöhter Schwand, der bei mehrteiligen Heferenten auftritt, und unnötiger Doppelaufwand vermieden werden. Zudem war eine frühe Hefeernte bei

Verwendung des alten Hefestammes 34/70 oftmals aufgrund der Staubhefeerscheinungen nicht möglich bzw. nicht sinnvoll. Wurde hier eine Ernte zu einem früheren Zeitpunkt durchgeführt, wurden oftmals nur wenige Hektoliter Hefe geerntet. Die Hefe war zu diesem Zeitpunkt noch sehr dünnflüssig, dadurch wurde eine große Menge Jungbier mitgeerntet und es kam zu starken Vermischungen mit den Ausschüben. Mit der Einführung des neuen, gut sedimentierenden Hefestammes 321 bestand dieses Problem nicht mehr. Die Ernte der Anstellhefe erfolgt seit Mitte des Jahres 2007 am 4. oder 5. Gärtag, wenn das Bier den Endvergärungsgrad noch nicht erreicht hat, der scheinbare Restextrakt aber schon unter 5,0 GG% gesunken ist. Es wird von den jeweiligen ZKGs eine vorgegebene Menge von 18 hl geerntet. Dass zu diesem Zeitpunkt nicht schon die gesamte sedimentierte Hefe geerntet wird, hat den Sinn, dass vor dem Schlauchen noch eine Menge sinnvollen Volumens für eine zweite Ernte in den Verkaufshefetank vorhanden sein muss.

Wie in der Abbildung 81 ersichtlich ist, liegen die intracellulären pH-Werte der Erntehefe seitdem mit Werten zwischen 6,2 und 6,5 durchweg im sehr guten Bereich und die Anteile toter Zellen liegen i.d.R. mit Werten unter 3,0 % auch auf einem äußerst guten Niveau. Dies ist sogar bei der Erntehefecharge 07-096 der Fall. Diese Hefe wurde aus einer Bockbieregärung geerntet, die dort herrschenden Bedingungen wie erhöhter Stammwürze- und Alkoholgehalt wirken sich normalerweise negativ auf die Hefe aus.

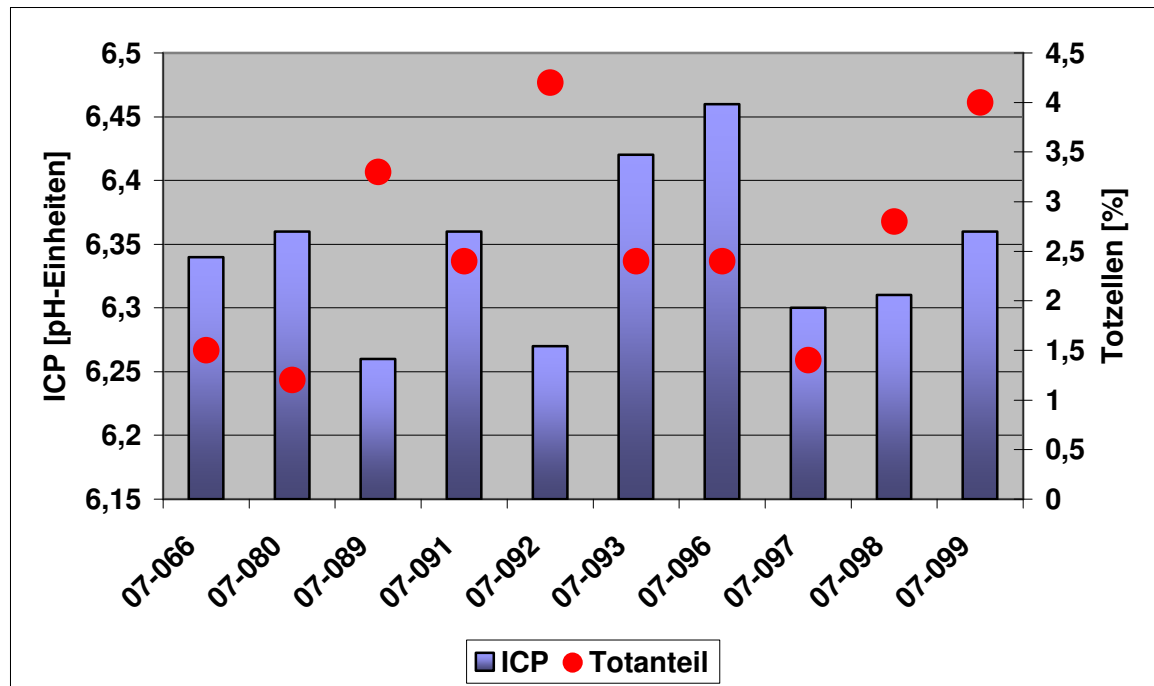


Abbildung 81: ICP-Werte und Totzellenanteile in der Erntehefe nach der neuen Ernte-Verfahrensweise

Nachdem die Erntehefen eine hervorragende Qualität aufwiesen, ergab sich das Problem einer schnellen Verschlechterung des Hefezustandes während der Lagerung im Erntehefetank. Wie in Abbildung 82 ersichtlich ist, sank der ICP einer sehr guten Erntehefe innerhalb von 7 Tagen von einem Wert von 6,3 auf 5,7 ab, der Anteil toter Zellen stieg innerhalb dieses Zeitraums um mehr als 100 % an (die Probenahme erfolgte hier immer nach Homogenisierung des Tankinhaltes und stellt somit eine repräsentative Probe für den gesamten Tankinhalt dar). Dieses erschien zunächst nicht nachvollziehbar, da sich die frische Erntehefe in einem sehr guten Zustand befand und die Hefeernte über den vorhandenen Hefetiefkühler erfolgte. In mehreren Untersuchungen wurde dieser Sachverhalt aber bestätigt. Die Ursache wurde schließlich darin gefunden, dass bei einer Steuerungserweiterung des Gärkellers auch die Steuerung der Hefeernte tangiert wurde, wodurch hier nur noch der Ausschub und ein Teil der eigentlichen Hefe gekühlt wurden. Dazu kam im Sommer 2007 noch ein Defizit seitens der Kälteträgervorlauftemperatur. Die Temperaturverläufe der „gekühlten“ Erntehefe sind in Abbildung 83 dargestellt. Die mittlere Hefetemperatur liegt auf einem Niveau von etwa 12 °C, dieser Wert ist absolut indiskutabel. Eine Erklärung,

warum dieser Missstand nicht bereits früher auffiel, ist folgende: der Temperaturmessfühler am Hefekühlerauslauf ist erst im Laufe des Jahres 2007 an die neu installierte Messdatenerfassung angeschlossen worden, hier bestand noch keine Routinekontrolle. Wie bereits in Kapitel 2.6.3 beschrieben, wurde die Hefe nur soweit heruntergekühlt, wie es die Drehzahlregulierung der Erntepumpe erlaubte.

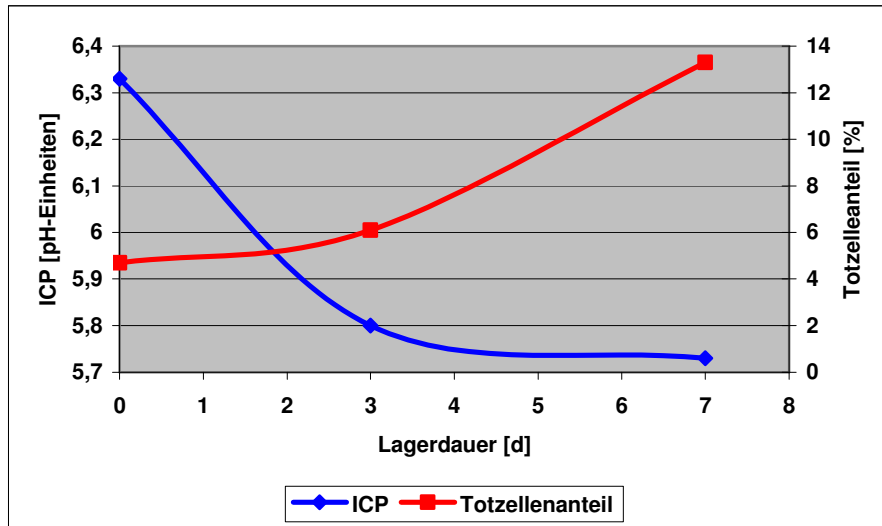


Abbildung 82: Veränderung des Zustandes einer Erntehefe unter nicht optimalen Bedingungen

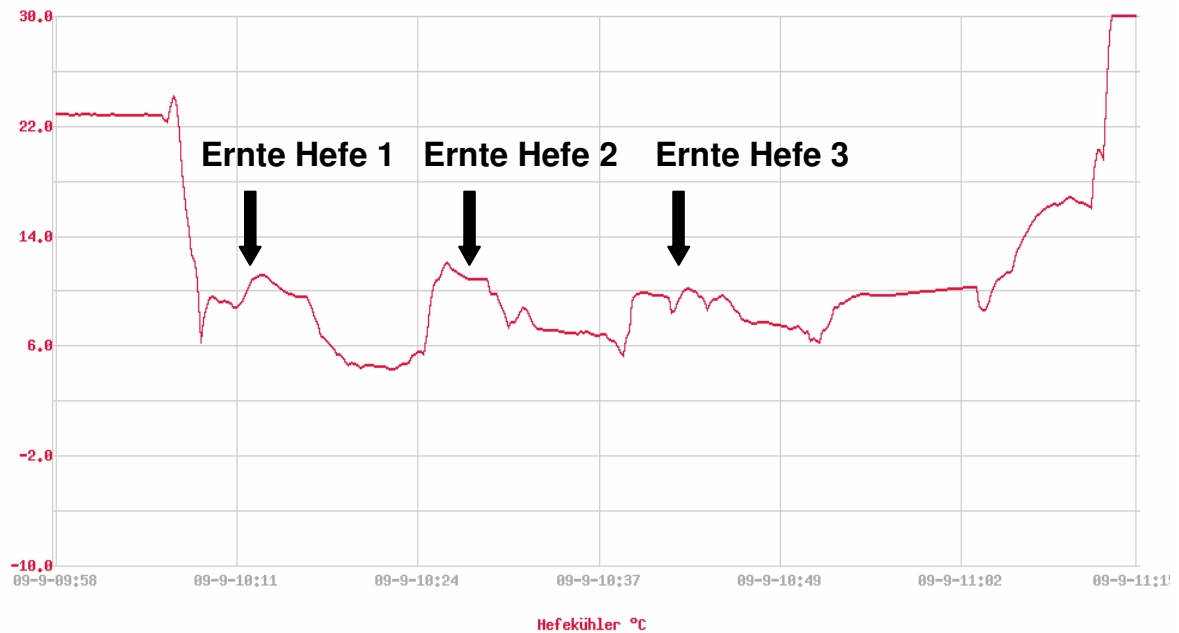


Abbildung 83: Temperaturverlauf der Erntehefe am Auslauf des Hefetiefkühlers vor der Optimierung (Ausgangstemperatur 13 °C)

Durch einen Eingriff in die Steuerung der Hefeernte konnte dieses Problem schnell behoben werden. Zusätzlich wurde das Plattenpaket des Hefetiefkühlers im Februar 2008 noch erweitert. Dadurch sollte sichergestellt werden, dass auch bei verringerter Kälte-trägerleistung der gewünschte Temperaturbereich der Erntehefe zwischen 0 und 3 °C dauerhaft eingehalten werden kann und die Pumpe dabei nicht an ihre Drehzahlgrenze gelangt. Der Temperaturverlauf einer sehr guten Hefeernte bzw.- kühlung nach der Optimierung ist in Abbildung 84 dargestellt, hier wurde bei einer ersten Hefeernte eine Durchschnittstemperatur von etwa 1,4 °C erreicht, bei der anschließenden zweiten Ernte lag die Durchschnittstemperatur noch bei ca. 2,3 °C. Die Temperaturdifferenz zwischen der ersten und zweiten Ernte ist auf eine Zunahme der Kälte-trägervorlauf-temperatur zurückzuführen.

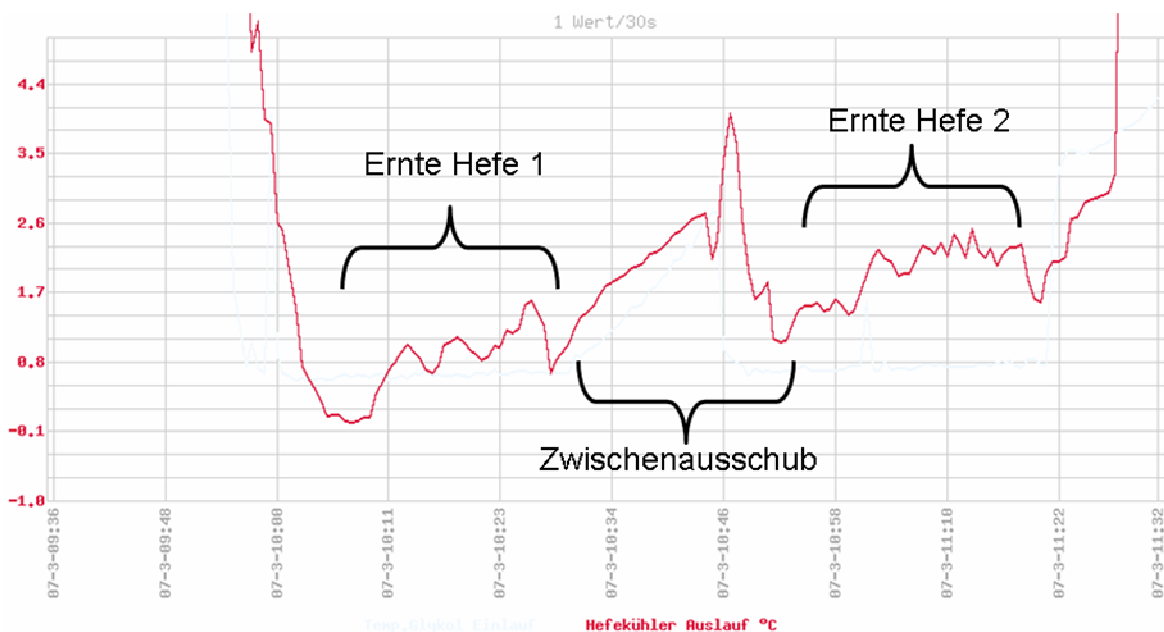


Abbildung 84: Temperaturverlauf der Erntehefe am Auslauf des Hefetiefkühlers nach der Optimierung (Ausgangstemperatur 13 °C)

Als vorerst letzte qualitätsverbessernde Maßnahme erfolgte die Installation von Kühlzonen an den Konen der Erntehefetanks. Die bauseitig am Zargenbereich vorhandenen Kühltaschen kühlen erst ab einem Tankinhalt von ca. 25 hl, die gesamte darunterliegende Hefe wurde praktisch nicht gekühlt. Zusätzlich wurden die Tanks im Konus- und Zargenbereich komplett isoliert, dadurch sollten Kälteabstrahlverluste minimiert werden.

Die unter optimalen Bedingungen geerntete und gekühlte Hefe lässt sich jetzt ohne nachhaltige Qualitätseinbußen über mehrere Tage lagern. Die Veränderung während der Lagerung zweier Erntehefen ist in Abbildung 85 ersichtlich. Eine Hefe wurde über den Zeitraum von 6, die andere von 9 Tagen im Erntehefetank gelagert. Während dieses Zeitraums verschlechterte sich der intracelluläre pH-Wert in beiden Fällen um nicht einmal 0,1 und der Anteil toter Zellen nahm um jeweils 1,3 % zu. Für die relativ lange Lagerdauer sind diese Veränderungen als gering zu bewerten, beide Hefechargen befinden sich nach der Lagerung noch in einem hervorragenden physiologischen Zustand.

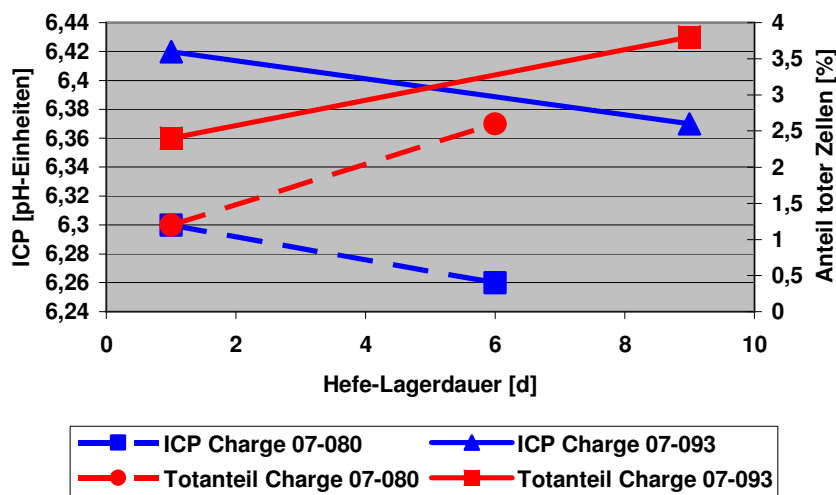


Abbildung 85: Veränderungen zweier Erntehefen während ihrer Kaltlagerung

Ab dem Zeitpunkt der Einführung der frühen ersten Hefeernte am 4. bzw. 5. Gärtag zur ausschließlichen Gewinnung von frischer und hochwertiger Anstellhefe im Juni 2007 erzielte das Bier bei der monatlich durchgeführten DLG-Verkostung an einem unabhängigen Institut eindeutig bessere Bewertungen als in den Vormonaten. Ab Januar 2008 fiel die Bewertung noch einmal geringfügig besser aus, dies steht zeitlich eindeutig mit der Erweiterung des Plattenpaketes des Hefetiefkühlers in Zusammenhang sowie den daraus resultierenden tieferen Hefetemperaturen.

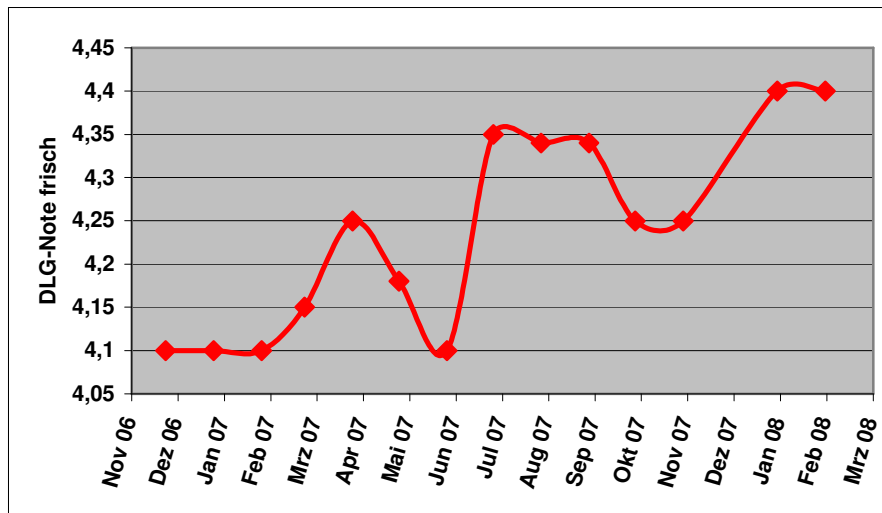


Abbildung 86: Note der monatlichen DLG-Verkostung des frischen Bieres von Dezember 2006 bis Februar 2008

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollte die Hefetechnologie in einer mittelständischen Brauerei mit dem Ziel einer Verbesserung der Geschmacksstabilität optimiert werden.

Dazu erfolgte zunächst die Planung eines neuen Hefereinzuchtssystems in Form einer Assimilationsanlage, die jederzeit hochaktive Assimilationshefen in gewünschter Menge liefert und auch an kurzfristige Produktionsänderungen und Braupausen adaptierbar ist. Des Weiteren erfolgten Untersuchungen unter Variation der Assimilationsparameter Umpumpdauer mit Belüftung, der Dauer von Ruhephasen ohne Umpumpen und der Umpumpintensität. Zudem wurden diese Untersuchungen unter Einsatz von drei verschiedenen Belüftungssystemen durchgeführt. Es konnte hier gezeigt werden, dass bei den ausgearbeiteten geometrischen Verhältnissen eine einfache selbstgebaute Belüftungsvorrichtung in Form eines T-Stücks mit Luftzufuhr durch ein perforiertes Rohr zu den kürzesten Vermehrungszyklen führte. Eine Schädigung der Hefezellen infolge von Scherkräften trat hier nicht auf. Ebenso konnte durch dieses Belüftungssystem eine störende Schaumbildung, wie sie bei Verwendung von Venturidüsen auftritt und zu Nachteilen der Handhabung des Prozesses, der Vermehrungsrate und Vitalität der Hefe sowie der mikrobiologischen Sicherheit führt, minimiert werden. Weiter konnten mehrere Probleme aufgezeigt und gelöst werden, die erfahrungsgemäß bei vielen anderen Hefeherführanlagen auch vorhanden sind und dort zu Einschränkungen führen. Dazu zählen vor allem eine schlechte Hefevermehrung infolge von mangelnder Durchmischung des Herführtanks aufgrund falscher geometrischer Auslegung sowie plötzlich auftretende erhöhte Totzellenanteile in der Reinzuchtheffe. Diese werden durch Sedimentation von Hefezellen mit anschließender Bildung von Hefeschichten im Herführtank, die durch das normale Umpumpen und dosieren nicht mehr dispergiert werden, hervorgerufen. Dieser Vorgang konnte durch den Einbau eines getakteten Rührwerks vermieden werden.

Im zweiten Teil der Arbeit folgten Gärversuche im großtechnischen Maßstab mit Variation der Belüftung während des Anstellens. Hier war es das Ziel, eine Erhöhung des SO₂-Gehaltes im Bier zu erzielen. Mit dem in der Brauerei viele

Jahre eingesetzten Hefestamm 34/70 konnte dieses Ziel trotz technologischer Verbesserungen nicht erreicht werden. Die Biere wiesen permanent SO_2 -Konzentration von unter 2,0 mg/l auf. Daher wurden Versuchsgärungen mit zwei weiteren untergärigen Hefestämmen durchgeführt. Hier konnte gezeigt werden, dass SO_2 -Bildungsvermögen eindeutig vom Hefestamm abhängt. Bei diesen Hefestämmen wirkte sich die stärkere SO_2 -Produktion positiv auf die Geschmacksstabilität der hergestellten Biere aus.

Nach dem erfolgreichen Austausch des alten Hefestammes 34/70 gegen den neuen Hefestamm 321 (ein Hebru-Abkömmling) konnte gezeigt werden, dass durch eine entsprechende Variation der Belüftung beim Anstellen die SO_2 -Bildung während der Gärung deutlich beeinflusst werden kann, ohne dass es zu verlängerten Gärzeiten oder anderen qualitativen Einschränkungen kommt. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte ein praxistaugliches Verfahren im Betrieb implementiert werden. Dadurch wurde nachhaltig eine wesentliche Verbesserung der Hefevitalität erzielt, die Gärverläufe zeigten einen idealen Verlauf und raschen Diacetylabbau auf. Die SO_2 -Werte der produzierten Biere lagen seit dem im gewünschten Bereich von 6 bis 10 mg/l.

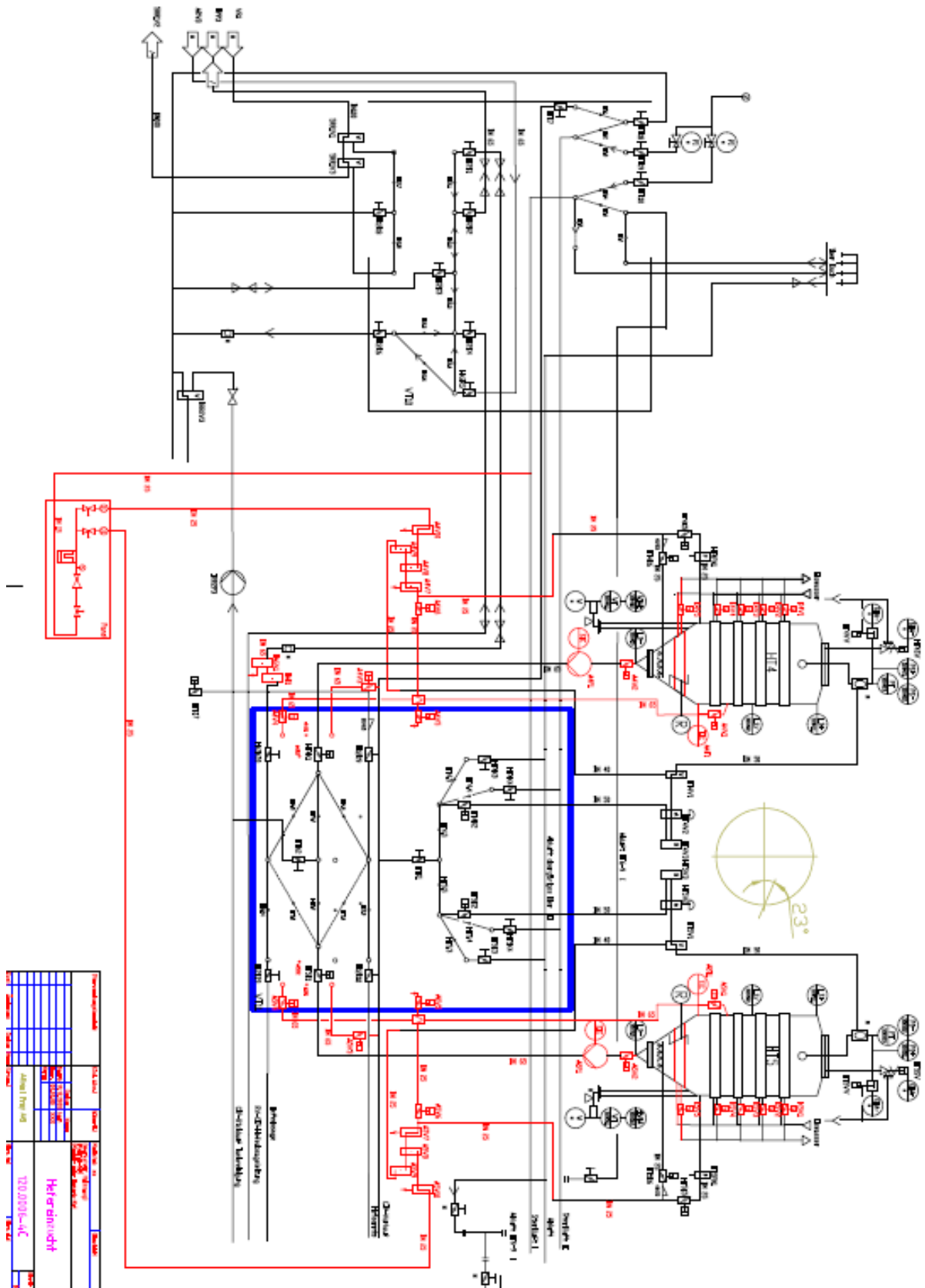
Im Rahmen der durchgeführten Verkostungen konnte eindeutig gezeigt werden, dass die Biere mit höheren SO_2 -Gehalten geschmacksstabiler waren. Diese Verbesserung der Geschmacksstabilität ging nachweislich mit einer geringeren Bildung des 2-Furfurals während der Alterung einher. Offensichtlich erfolgt eine Bindung des 2-Furfurals mit dem SO_2 , das gebildete Produkt ist sensorisch unauffällig und wird auch im Rahmen der Analyse der Alterungsindikatoren nicht erfasst.

Die in der Brauerei geernteten Hefen wiesen viele Jahre sehr schwankende Qualitäten und oftmals hohe Anteile toter Zellen sowie mangelnde Vitalitäten (ICP-Werte deutlich unter 5,8) auf, wodurch es häufig zu Gärproblemen kam. Dieses Problem besteht nachweislich in vielen Brauereien, unabhängig von ihrer Größe. Durch einfache Maßnahmen, die keinen Extraaufwand darstellen, konnte dieser Missstand in der Flensburger Brauerei behoben werden. Die Erntehefen weisen seitdem sehr gute ICP-Werte von über 6,2 auf, der Anteil toter Zellen liegt in den meisten Fällen unter 3,0 %.

Die hierfür im Rahmen dieser Arbeit eingeführten Maßnahmen können auch nach erfolgter betriebsspezifischer Anpassung problemlos in anderen Brauereien etabliert werden.

Anhang

AH Tab. 1.1: Fließschema Assimilationsanlage



AH Tab. 2.1 a: Übersicht Assimilationsversuche Venturidüse

Assimilationsnummer	Belüftungszeit [min]	Pumpenleistung [%]
1	10	25
2	35	25
3	60	25
4	10	45
5	35	45
6	60	45
7	10	65
8	35	65
9	60	65

AH Tab. 2.1 b: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 1

Assidauer [h]	0,0	8,0	15,0	26,0
Stw. [Gew.%]	11,74	11,59	11,62	11,59
Es [Gew.%]	11,3	10,81	10,21	8,16
Ew [Gew.%]	11,42	11,02	10,49	8,84
Alk [Vol.%]	0,22	0,4	0,77	1,85
pH	4,76	4,62	4,52	4,29
VGs [%]	3,63	7,98	12,66	30,49
ZZ Hand [Mio./ml]	9,2	26,0	38,0	66,8
tot [%]	2,1	0,9	0,78	0,55
FAN [mg/l]	205,61	179,05	160,04	99,19

AH Tab. 2.1 c: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 2

Assidauer [h]	0,0	8,0	13,5	16,0	21,0	32,0
Stw. [Gew.%]	11,26	11,16	11,2	11,2	11,12	10,94
Es [Gew.%]	10,62	10,24	9,72	9,39	7,88	5,8
Ew [Gew.%]	10,75	10,42	10,01	9,75	8,52	6,81
Alk [Vol.%]	0,34	0,5	0,81	0,98	1,74	2,74
pH	4,68	4,62	4,56	4,48	4,42	4,0
VGs [%]	5,89	8,62	13,79	16,74	30,05	48,0
ZZ Hand [Mio./ml]	10,4	24,8	40,0	52,0	80,0	120,2
tot [%]	1,54	0,86	0,44	0,69	0,19	0,27
FAN [mg/l]	187,62	172,13	148,09			91,99

AH Tab. 2.1 d: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 3

Assidauer [h]	0,0	16,0	24,0
Stw. [Gew.-%]	11,74	11,61	11,54
Es [Gew.-%]	10,61	8,9	7,42
Ew [Gew.-%]	10,84	9,43	8,23
Alk [Vol.-%]	0,62	1,47	2,22
pH	4,78	4,47	4,26
ZZ Hand [Mio./ml]	13,2	60,0	91,2
tot [%]	4,2	1,4	1,05
FAN [mg/l]	180,8	119,54	89,87

AH Tab. 2.1 e: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 4

Assidauer [h]	0,0	16,0	24,0
Stw. [Gew.-%]	11,68	11,66	11,64
Es [Gew.-%]	10,52	9,32	8,2
Ew [Gew.-%]	10,84	9,78	8,87
Alk [Vol.-%]	0,63	1,27	1,86
pH	4,76	4,53	4,41
ZZ Hand [Mio./ml]	14	52,8	63,4
tot [%]	1,4	0,6	0,8
FAN [mg/l]	187,1	149,97	105,22

AH Tab. 2.1 f: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 5

Assidauer [h]	0,0	3,5	13,0	22,0	25,0
Stw. [Gew.-%]	11,61	11,61	11,55	11,47	11,39
Es [Gew.-%]	11,4	11,33	10,81	9,83	9,12
Ew [Gew.-%]	11,44	11,39	10,95	10,16	9,57
Alk [Vol.-%]	0,12	0,15	0,4	0,89	1,23
pH	4,95	4,92	4,76	4,58	4,47
ZZ Hand [Mio./ml]	4,4	8,8	15,2	52,0	63,6
tot [%]	4,8	2,9	1,44	0,72	0,69
FAN [mg/l]	191,6	191,86	170,94	129,51	104,92

AH Tab. 2.1 g: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 6

Assidauer [h]	0,0	3,0	8,5	12,5	20,5	27,0
Stw. [Gew.-%]	11,39	11,33	11,33	11,26	11,18	11,04
Es [Gew.-%]	10,82	10,62	10,45	10,15	8,82	7,89
Ew [Gew.-%]	10,98	10,76	10,62	10,37	9,29	8,51
Alk [Vol.-%]	0,21	0,38	0,48	0,6	1,27	1,69
pH	4,82	4,77	4,61	4,51	4,37	4,22
ZZ Hand [Mio./ml]	10	13,6	21,2	30,0	64,4	84,0
tot [%]	2	1,75	1,6	1,05	0,51	0,28
FAN [mg/l]	197,69	191,94	180,39	138,5	121,28	

AH Tab. 2.1 h: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 7

Assidauer [h]	0,0	5,0	12,0	18,0	21,0	29,0
Stw. [Gew.-%]	11,74	11,68	11,7	11,67	11,63	11,57
Es [Gew.-%]	11,31	10,97	10,74	10,2	9,81	7,94
Ew [Gew.-%]	11,39	11,11	10,93	10,51	10,17	8,65
Alk [Vol.-%]	0,24	0,38	0,52	0,79	0,99	1,96
pH	4,93	4,82	4,74	4,65	4,61	4,3
ZZ Hand [Mio./ml]	8,8	15,0	24,0	44,4	50,4	66,8
tot [%]	2,7	1,1	0,85	0,35	0,34	0,41
FAN [mg/l]	206,31	182,8	179,45	150,26	147,25	87,0

AH Tab. 2.1 i: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 8

Assidauer [h]	0,0	3,5	13,0	22,0	25,0
Stw. [Gew.-%]	11,66	11,63	11,56	11,49	11,43
Es [Gew.-%]	11,31	11,16	10,38	9,12	8,31
Ew [Gew.-%]	11,38	11,26	10,62	9,58	8,92
Alk [Vol.-%]	0,2	0,26	0,64	1,28	1,68
pH	4,97	4,87	4,67	4,46	4,38
ZZ Hand [Mio./ml]	12,8	15,2	39,2	72,0	85,6
tot [%]	3,46	3,07	1,07	0,67	0,67
FAN [mg/l]	190,31	189,54	155,24	111,05	89,87

AH Tab. 2.1 j: Assimilationsverlauf Venturidüse Standartnr. 9

Assidauer [h]	0,0	6,0	12,0	16,0	18,0	22,0
Stw. [Gew.-%]	11,58	11,56	11,47	11,44	11,44	11,42
Es [Gew.-%]	11,12	10,79	10,47	9,92	9,61	9,17
Ew [Gew.-%]	11,21	10,94	10,67	10,22	9,97	9,61
Alk [Vol.-%]	0,25	0,42	0,54	0,82	0,99	1,22
pH	4,81	4,72	4,69	4,55	4,51	4,42
ZZ Hand [Mio./ml]	10,4	22,4	42,8	50,8	67,6	80,4
tot [%]	0,32	0,25	0,16	0,15	0,12	0,21
FAN [mg/l]	203,6	190,3	177,69	156,3	129	115,71

AH Tab. 2.2 a: Übersicht Assimilationsversuche Belüftungseinrichtung „T-Stück mit Einblaserohr“ sowie „T-Stück“

Assimilationsnummer	Belüftungszeit [min]	Pumpenleistung [%]
1	10	25
2	60	25
3	10	65
4	60	65

AH Tab. 2.2 b: Assimilationsverlauf T-Stück mit Einblaserohr Standardnr. 1

Assidauer [h]	0	8	14	23	29
Stw. [Gew.-%]	12,05	12,07	12,07	12,02	11,97
Es [Gew.-%]	11,68	11,39	10,72	9,92	8,85
Ew [Gew.-%]	11,75	11,53	10,99	10,33	9,46
Alk [Vol.-%]	0,2	0,37	0,73	1,14	1,69
pH	4,92	4,75	4,62	4,57	4,4
ZZ Hand [Mio./ml]	8,4	12,8	30,4	43,2	74,8
tot [%]	1,6	2,4	1,6	0,8	0,4
FAN [mg/l]	231,8	214	194,38	172,5	

AH Tab. 2.2 c: Assimilationsverlauf T-Stück mit Einblaserohr Standardnr. 2

Assidauer [h]	0	4,5	20,5	23,5
Stw. [Gew.-%]	11,68	11,64	11,55	11,52
Es [Gew.-%]	11,3	11,08	9,32	8,82
Ew [Gew.-%]	11,38	11,19	9,76	9,36
Alk [Vol.-%]	0,21	0,31	1,21	1,46
pH	4,7	4,73	4,33	4,22
ZZ Hand	8,8	12	63,6	68,4
tot [%]	7,14	4,67	0,67	0,53
FAN [mg/l]	215	203,79	133	117,38

AH Tab. 2.2 d: Assimilationsverlauf T-Stück mit Einblaserohr Standardnr. 3

Assidauer [h]	0,0	16,0	22,0	26,0	40,0
Stw. [Gew.-%]	11,91	11,88	11,85	11,84	11,73
Es [Gew.-%]	11,6	10,9	10,34	9,75	6,91
Ew [Gew.-%]	11,66	11,1	10,64	10,16	7,85
Alk [Vol.-%]	0,17	0,53	0,82	1,13	2,6
pH	4,85	4,64	4,53	4,45	4,05
ZZ Hand [Mio./ml]	6,4	21,2	29,6	44,0	98,6
tot [%]	10,0	3,11	1,88	1,42	0,94

AH Tab. 2.2 e: Assimilationsverlauf T-Stück mit Einblaserohr Standardnr. 4

Assidauer [h]	0,0	9,0	15,0	20,0	25,0	31,0
Stw. [Gew.-%]	11,51	11,49	11,46	11,4	11,36	11,31
Es [Gew.-%]	10,81	10,39	10,18	9,65	8,87	7,39
Ew [Gew.-%]	10,95	10,61	10,43	10,0	9,36	8,16
Alk [Vol.-%]	0,38	0,6	0,7	0,95	1,34	2,11
pH	4,91	4,76	4,74	4,63	4,52	4,25
ZZ Hand [Mio./ml]	9,6	16,0	22,0	35,2	53,2	86,0
tot [%]	7,38	4,02	1,64	1,82	0,87	0,87
FAN [mg/l]	200,0	188,0		171,0	141,4	94,6

AH Tab. 2.3 a: Assimilationsverlauf T-Stück Standartnr. 1

Assidauer [h]	0,0	8,0	14,0	23,0	29,0
Stw. [Gew.%]	11,9	11,92	11,9	11,84	11,83
Es [Gew.%]	11,5	11,14	10,33	9,45	8,41
Ew [Gew.%]	11,58	11,29	10,64	9,92	9,09
Alk [Vol.%]	0,22	0,43	0,85	1,3	1,85
pH	4,84	4,71	4,6	4,49	4,37
ZZ Hand [Mio./ml]	8,8	15,6	33,6	46,8	62
tot [%]	3,46	1,92	1,86	0,72	2,25
FAN [mg/l]	236,9		204,61	182,82	156,41

AH Tab. 2.3 b: Assimilationsverlauf T-Stück Standartnr. 2

Assidauer [h]	3,0	11,0	20,0	22,0	35,0
Stw. [Gew.%]	11,92	11,89	11,52	11,78	11,48
Es [Gew.%]	11,11	9,5	8,92	7,99	7,12
Ew [Gew.%]	11,27	10,83	10,18	9,12	7,97
Alk [Vol.%]	0,44	0,72	0,91	1,47	2,35
pH	4,61	4,53	4,43	4,36	4,09
ZZ Hand [Mio./ml]	12,8	20,8	40,8	49,2	112,8
tot [%]	13,51	7,33	6,11	2,97	0,16
FAN [mg/l]	239,97	203,61	169,8	150,46	111,2

AH Tab. 2.3 c: Assimilationsverlauf T-Stück Standartnr. 3

Assidauer [h]	0,0	16,0	22,0	23,0	27,5
Stw. [Gew.%]	12,11	12,09	12,04		11,94
Es [Gew.%]	11,78	10,79	9,95		8,89
Ew [Gew.%]	11,85	11,05	10,36		9,49
Alk [Vol.%]	0,18	0,71	1,14		1,65
pH	4,73	4,53	4,41		4,31
ZZ Hand [Mio./ml]	6,8	30,8	40,0	45,2	63,6
tot [%]	0,91	0,61	0,35		0,4
FAN [mg/l]	238,4	187,4	172,85		163,84

AH Tab. 2.3 d: Assimilationsverlauf T-Stück Standartnr. 4

Assidauer [h]	0,0	13,5	23,0
Stw. [Gew.%]	11,87	11,77	11,75
Es [Gew.%]	11,25	10,33	9,08
Ew [Gew.%]	11,38	10,61	9,61
Alk [Vol.%]	0,34	0,79	1,44
pH	4,72	4,43	4,35
ZZ Hand [Mio./ml]	10,0	42,0	62,4
tot [%]	0,54	0,64	0,58
FAN [mg/l]	240,0	204,0	156,2

AH Tab. 3.1 a: Gärverlauf GT 1 der Versuchsreihe mit variierter Belüftung**Stamm 34/70**

Gärdauer [h]	1	24	44	68	90	114	138	162	182	206	230
Stw. [Gew.%]	11,99	11,96	11,96	12,06	11,87	12,02	12,07	12,06			
Es. [Gew.%]	11,75	10,63	9,12	7,83	6,43	5,29	4,2	3,41	3,02	2,89	2,85
Ew. [Gew.%]	11,75	10,86	9,65	8,63	7,48	6,58	5,71	5,06			
Alk. [Vol.%]	0,16	0,75	1,56	2,3	2,94	3,62	4,22	4,62			
Vgs. [%]	1,9	11,4	24,5	36,1	46,9	57,1	66,2	72,6			
pH	4,73	4,57	4,45	4,39	4,37	4,34	4,34	4,36	4,37	4,4	4,43
Zellzahl [mio/ml]	7,9	26,4	36,4	31,6	36,4	28,8	21,2	21,2			
Diacetyl [mg/l]		0,33	0,53	0,54	0,45	0,38	0,33	0,27	0,17	0,13	0,1
Pentandion [mg/l]		0,34	0,53	0,6	0,54	0,49	0,4	0,38	0,22	0,18	0,12
FAN [mg/l]	189,46	166,5	148,03	137,58	132,1	132,12	134	130,67			
BE [EBC-Einh.]	52,06	49,29	44,64	43,7	42,3	42,66	44,24	45,34			
Farbe	8,98	7,44	7,6	7,09	7,43	6,6	6,62	7,79			
Polyphenole [mg/l]	205,25	229,4	216,46	221,32	220,34	208,47	229,15	217,38			
TBZ	56,55	53,81	52,11	49,37	48,49	46,79	46,5	45,38			
SO ₂ [mg/l]									13,4		

AH Tab. 3.1 b: Gärverlauf GT 2 der Versuchsreihe mit variierter Belüftung**Stamm 34/70**

Gärdauer [h]	15	35	59	81	105	129	153	173	197
Stw. [Gew.%]	11,95	11,82	11,95	11,83	11,87	11,91	11,89		
Es. [Gew.%]	10,91	8,7	6,21	4	2,9	2,68	2,83		
Ew. [Gew.%]	11,08	9,29	7,31	5,5	4,62	4,45	4,56		
Alk. [Vol.%]	0,59	1,7	3,1	4,19	4,78	4,91	4,83		
Vgs. [%]	8,9	27,1	49,1	67,2	76,3	78,2	77		
pH	4,63	4,43	4,29	4,24	4,23	4,28	4,29		
Zellzahl [mio/ml]	40	62,4	60,4	42	28,8	41,2	19,6		
Diacetyl [mg/l]	0,2	0,47		0,41	0,3	0,21	0,15	0,1	0,09
Pentandion [mg/l]	0,21	0,48		0,53	0,43	0,28	0,21	0,13	0,12
FAN [mg/l]	173,86	135,25	109,84	95,03	89,95	92,38	90,99		
BE [EBC-Einh.]	49,59	43,8	43,24	41,43	41,94	44,32	43,08		
Farbe	8,25	7,29	7,72	6,27	6,7	8,36	6,91		
Polyphenole [mg/l]	220,13	216,43	219,5	245,31	209,54	226,46	195,15		
TBZ	55,62	53,74	50,53	39,86	47,06	45,68	45,04		
SO ₂ [mg/l]								2,3	

**AH Tab. 3.1 c: Gärverlauf GT 3 der Versuchsreihe mit variierter Belüftung
Stamm 34/70**

Gärdauer [h]	9	29	53	75	99	123	147	167
Stw. [Gew.%]	11,8	11,77	11,77	11,71	11,48	11,8	11,74	
Es. [Gew.%]	11,21	9,58	6,96	4,48	3,69	2,7	2,7	
Ew. [Gew.%]	11,28	9,98	7,88	5,87	5,19	4,44	4,43	
Alk. [Vol.%]	0,35	1,21	2,61	3,87	4,15	4,84	4,81	
Vgs. [%]	5,1	19,2	41,9	62,7	68,7	77,8	77,8	
pH	4,71	4,49	4,33	4,22	4,1	4,23	4,25	
Zellzahl [mio/ml]	25,2	51,6	68,4	72,4	55,2	36,4	33,2	
Diacetyl [mg/l]	0,1	0,39	0,46	0,38		0,22	0,16	0,08
Pentandion [mg/l]	0,09	0,38	0,46	0,52		0,33	0,25	0,13
FAN [mg/l]	178,2	145,42	107,07	85,36	75,82	75,18	75,82	
BE [EBC-Einh.]	51,4	44,87	44,19	40,71	43,29	44,07	43,29	
Farbe	8,5	8,45	7,21	7,99	6,44	6	6,44	
Polyphenole [mg/l]	211,2	215,45	215,7	221,94	197,27	218,52	197,27	
TBZ	52,2	53,43	50,13	48,91	42,78	42,3	42,78	
SO ₂ [mg/l]								1

**AH Tab. 3.1 d: Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe mit variierter
Belüftung Stamm 34/70 in µg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	20	26	19
Heptanol-1	3,3	4,2	4
Octanol-1	8	14	14
Decanol-1	3,8	8,1	7,9
2-Phenylethanol	17280	24967	29845
Furfurylalkohol	1071	949	485
Essigsäure-Isobutylester	40	39	36
Essigsäure-Hexylester	10	8,1	7,9
Essigsäure-Heptylester	2,5	2,2	2,4
Essigsäure-Octylester	3	3,4	4
Essigsäure-Furfurylester	4,4	3,7	n.a.
Essigsre-2-Phenylethylester	429	465	512
Buttersäure-Ethylester	99	76	65
Hexansäure-Ethylester	272	181	172
Octansäure-Ethylester	259	363	336
Decansäure-Ethylester	6	5	6
Isovaleriansäure	0	0	0
Hexansäure	2461	2208	1403
Octansäure	7609	6076	5560
Nonansäure	21	20	17
Decansäure	1712	1095	940
Dodecansäure	242	93	78,5
α-Terpineol	0	0	0
Linalool	13	12	12
Nerol	5	6,8	5
γ-Nonalacton	42	52	52

AH Tab. 3.1 e: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe mit variiertes Belüftung Stamm 34/70 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	9,4	n.a.	5
2-Furfural	(W,A)	12,9	12	15,6
5-Methyl-Furfural	(A)	4,8	4	4,9
Benzaldehyd	(S,A)	1,2	0,8	1,3
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	4,6	3,3	5,6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	6,5	4,6	4,7
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3	2,4	2,9
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	6,1	n.a.	5
2-Propionyl-Furan	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
gamma-Nonalacton	(W,A)	34	33	34
Summe der Wärmeindikatoren		47	45	49
Summe der Sauerstoffindikatoren		15	4	12
Summe der Alterungskomponenten		80	58	76

AH Tab. 3.1 f: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe mit variiertes Belüftung Stamm 34/70 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	12	n.a.	7,1
2-Furfural	(W,A)	77	86	99
5-Methyl-Furfural	(A)	6,1	6,6	6,6
Benzaldehyd	(S,A)	1,6	1,9	2
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	8	6	6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	9,2	8,8	7,9
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3	3,3	3
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	7,6	6,8	6,4
2-Propionyl-Furan	(A)	0	0	n.a.
gamma-Nonalacton	(W,A)	51	53	56
Summe der Wärmeindikatoren		128	138	155
Summe der Sauerstoffindikatoren		21	8	15
Summe der Alterungskomponenten		172	169	191

AH Tab. 3.1 g: Ergebnisse der Alterungsverkostung der Versuchsreihe mit variiertes Belüftung Stamm 34/70

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	1
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1,5	1	85	1,2
2	2	2,5	1	75	2
3	2	2	1	80	1,8
4	1,5	2	2	80	1,8
Mittelwert	1,625	2	1,25	80	1,7
StAbW	0,47871355	0,40824829	0,5	4,0824829	0,346410162

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	2
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1,25
StAbW	0	0	0	0	0,5

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	2	3	1	60	2,2
2	2	2	2	75	2
3	2	2	1	65	1,8
4	3	3	3	60	3
Mittelwert	2,25	2,5	1,75	65	2,25
StAbW	0,5	0,57735027	0,95742711	7,07106781	0,525991128

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	2
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1,25
StAbW	0	0	0	0	0,5

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	2	2,5	1	60	2
2	2	3	2,5	55	2,5
3	2,5	3	2	55	2,5
4	2	2,5	2	60	2,6
Mittelwert	2,125	2,75	1,875	57,5	2,4
StAbW	0,25	0,28867513	0,62915287	2,88675135	0,27080128

**AH Tab. 3.2 a: Gärverlauf GT 1 Versuchsreihe mit Variation
Draufflasszeitpunkt Stamm 34/70**

Gärdauer [h]	9	27	56	74	110	123	147	176	195	219
Stw. [Gew.%]	11,73		11,78	11,75	11,78	11,77	11,84	11,9		
Es. [Gew.%]	11,41		8,66	7,01	3,84	3,08	2,69	2,57		
Ew. [Gew.%]	11,43		9,24	7,91	5,36	4,74	4,44	4,35		
Alk. [Vol.%]	0,21		1,71	2,57	4,25	4,63	4,87	4,97		
Vgs. [%]	2,7		27,2	41,4	68,4	74,7	78,1	79,2		
pH	4,82		4,47	4,4	4,29	4,29	4,27	4,29		
Zellzahl [mio/ml]	12,8	24,7	34,2		34,8	26,4	14,8	14,2		
Diacetyl [mg/l]	0,04	0,25	0,34	0,32	0,34	0,33	0,18		0,12	0,07
Pentandion [mg/l]	0,03	0,31	0,38	0,4	0,52	0,6	0,34			
FAN [mg/l]	163,24		117,81	100,01	70,84	74,19				
BE [EBC-Einh.]	51,07		44,58	42,81	42,75	42,85				
Farbe	8,62		8,4	8,75	9,12	8,48				
Polyphenole [mg/l]	215,75		211,53	212,04	225,02	227,05				
TBZ	57,6		53,38	51,85	48,48	46,8				
SO ₂ [mg/l]									1,5	

**AH Tab. 3.2 b: Gärverlauf GT 2 Versuchsreihe mit Variation
Draufflasszeitpunkt Stamm 34/70**

Gärdauer [h]	12	30	59	78	114	127	151	180	199
Stw. [Gew.%]	11,76		11,72	11,7	11,7	11,71	11,77	11,83	
Es. [Gew.%]	11,14	9,71	7,05	5,21	2,71	2,57	2,53	2,47	
Ew. [Gew.%]	11,22		7,94	6,46	4,42	4,31	4,3	4,26	
Alk. [Vol.%]	0,37		2,53	3,49	4,79	4,86	4,92	4,98	
Vgs. [%]	5,4		40,8	56,5	77,7	78,8	79,2	79,8	
pH	4,69		4,36	4,27	4,21	4,24	4,23	4,25	
Zellzahl [mio/ml]	24	32,8	40,8		28,2	24	22,8	18	
Diacetyl [mg/l]		0,38	0,38	0,37	0,35	0,25	0,16		0,08
Pentandion [mg/l]	0,12	0,31	0,43	0,58	0,74	0,59	0,28		
FAN [mg/l]	157,77	124,4	92,16	76,91	63,58	64,9			
BE [EBC-Einh.]	49,46	36,84	42,85	39,57	40,91	42,63			
Farbe	9,2	9,12	7,97	7,68	9,97	7,66			
Polyphenole [mg/l]	218,7	164	206,21	213,27	227,75	224,14			
TBZ	58,08	53,7	52,24	48,82	47,79	45,04			
SO ₂ [mg/l]									1,8

AH Tab. 3.3 a: Gärverlauf Gärung Stamm 34/70 der Versuchsreihe Variation

Hefestämme

Gärdauer [h]	28	50	74	100	124	148	176
Stw. [Gew.%]	11,85	11,86	11,84	11,93	12,04	12,06	12,05
Zellzahl [mio/ml]	28,4	46,6	32,4	24,3	34,2	36,4	29,1
Es. [Gew.%]	10,56	9,4	8	6,45	5,37	4,56	4,46
Ew. [Gew.%]	10,29	8,83	7,09	5,14	3,79	2,79	2,67
Alk. [Vol.%]	0,88	1,66	2,57	3,65	4,42	4,95	5
pH	4,52	4,43	4,36	4,29	4,29	4,29	4,31
Vgs. [%]	13,6	26,3	41,1	58	69,5	77,7	78,6
Diacetyl [mg/l]	0,15	0,19	0,2	0,2	0,16	0,14	0,11
Pentandion [mg/l]	0,13	0,18	0,18	0,16	0,16		
FAN [mg/l]	171,8	150,26	132,27	121,29	118,67	115,02	114,64
BE [EBC-Einh.]	46,74	43,04	50,62	53,51	53,41	50,44	50,62
Farbe	7,89	7,95	8,61	7,85	9,99		9,11
Polyphenole [mg/l]	215,03	213,87	220,93	236,89	239,61	220,91	226,48
TBZ	52,79	51,26	50,38	48,7	47,08	45,49	45,87

AH Tab. 3.3 b: Gärverlauf Gärung Stamm 321 der Versuchsreihe Variation

Hefestämme

Gärdauer [h]	7	29	54	81	103	125	176	224	
Stw. [Gew.%]	11,41	11,36	11,32	11,35	11,25	11,48	11,43	11,43	11,43
Zellzahl [mio/ml]	7,24	15,2	72,3	55,6	45,2	30,4	8,8	4,2	4,8
Es. [Gew.%]	11,04	10,49	8,99	7,58	6,5	5,6	4,74	4,5	4,39
Ew. [Gew.%]	11	10,32	8,46	6,69	5,38	4,2	3,16	2,87	2,73
Alk. [Vol.%]	0,25	0,59	1,56	2,51	3,15	3,89	4,4	4,55	4,62
pH	4,76	4,61	4,42	4,32	4,29	4,28	4,21	4,26	4,29
Vgs. [%]	3,6	9,4	26	42	53,2	64,4	73,2	75,7	76,9
T [°C]	11	11	11,5	11,5	11,5	12,5	12	13	13
Diacetyl [mg/l]		0,14	0,24	0,23	0,22	0,19	0,1	0,06	0,05
Pentandion [mg/l]						0,19	0,11	0,06	0,05
FAN [mg/l]	171,32	151,18	119,81	104,42	95,25	92,63	92,66	93,12	93
BE [EBC-Einh.]	43,17		41,69	40,47	36,35	37,7	39,4		
Farbe	7,92	7,43	7,19	6,39	6,97	7,21	8,13	7,39	6,4
Polyphenole [mg/l]	184,78	183,5	186,99	211,66	183,73	189,89	217,61	201,64	205,02
TBZ	46,74	45,82	42,6	42,05	39,04	38,85	35,79	36,3	35,71

AH Tab. 3.3 c: Gärverlauf Gärung Stamm 285 der Versuchsreihe Variation**Hefestämme**

Gärdauer [h]	6	28	52	78	102	129	155	177	220
Stw. [Gew.%]		11,69	11,67	11,75	11,76	11,73	11,8	11,83	11,86
Zellzahl [mio/ml]	5,1	25,2	35,8	52,4	49,2	38	35,2	30,7	20,8
Es. [Gew.%]		10,95	9,83	8,2	6,97	5,65	4,52	4,32	4,28
Ew. [Gew.%]		10,82	9,42	7,37	5,83	4,2	2,8	2,55	2,49
Alk. [Vol.%]		0,5	1,24	2,37	3,19	4,03	4,79	4,94	4,99
pH		4,59	4,39	4,25	4,21	4,16	4,16	4,19	4,2
Vgs. [%]		7,5	16,4	38,2	51,5	65,1	77,1	79,2	79,7
T [°C]	11	11	11	12	12	12			12
Diacetyl [mg/l]		0,12	0,16	0,17	0,17	0,25		0,13	0,07
Pentandion [mg/l]		0,12	0,19	0,17	0,16	0,16		0,12	0,08
FAN [mg/l]		156,18	126,91	105,52	98,83	93,96		90,92	91,37
BE [EBC-Einh.]		47,58	52,31	52,9	52,25	50,62		47,37	46,86
Farbe		7,75	7,29	7,63	7,46	10,66		10,42	11,53
Polyphenole [mg/l]		195,4	211,5	224,89	227,27	205,17		225,11	202,51
TBZ		50,83	49,95	48,42	46,15	43,93		43,74	42,75

AH Tab. 3.3 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Variation**Hefestämme in mg/l**

	Stamm 34/70	Stamm 321	Stamm 285
Acetaldehyd	2,9	7,2	5,9
Propanol-1	10	11	9,9
Ethylacetat	17	19	24
2-Methylpropanol	8,9	12	10
3-Methylbutanol	46	46	44
2-Methylbutanol	12	14	12
2-Methylpropylacetat	Sp.	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	1,4	1,9	2,2
2-Methylbutylacetat	0,1	0,2	0,2
Hexansäurethalester	0,2	0,2	0,3

AH Tab. 3.3 e: Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe Variation Hefestämme in µg/l

	Stamm 34/70	Stamm 321	Stamm 285
Hexanol-1	25	16	21
Heptanol-1	4,6	3,2	4,1
Octanol-1	10	11	9,6
Decanol-1	5,8	4,1	4,1
2-Phenylethanol	19872	27985	23785
Furfurylalkohol	110	24	48
Essigsäure-Isobutylester	31	47	48
Essigsäure-Hexylester	5,8	6,6	8
Essigsäure-Heptylester	2,4	2,4	3,2
Essigsäure-Octylester	3,3	4,8	4,5
Essigsäure-Furfurylester	4,3	3,5	4,7
Essigsäure-2-Phenylethylester	403	655	676
Buttersäure-Ethylester	75	62	92
Hexansäure-Ethylester	230	185	291
Octansäure-Ethylester	313	225	342
Decansäure-Ethylester	77	51	81
Isovaleriansäure	108	29	117
Hexansäure	2322	1169	2578
Octansäure	6642	4310	7354
Nonansäure	26	16	22
Decansäure	1355	698	1436
Dodecansäure	174	134	222
α-Terpineol	2,5	2,5	2,5
Linalool	13	13	15
Nerol	3,8	2,9	3,3
γ-Nonalacton	35	23	29

**AH Tab. 3.3 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe
Variation Hefestämme in µg/l**

		Stamm 34/70	Stamm 321	Stamm 285
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	5,8	10	8,6
2-Furfural	(W,A)	3,8	3,3	n.n.
5-Methyl-Furfural	(A)	4,3	4,6	4,4
Benzaldehyd	(S,A)	0,5	1,1	0,9
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	4,7	3,7	5,4
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	3,2	3,1	3,4
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		5	3,3	3
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	3,8	4	3,3
2-Propionyl-Furan	(A)	1,2	1,2	n.a.
gamma-Nonalacton	(W,A)	24	18	28
Summe der Wärmeindikatoren		28	21	28
Summe der Sauerstoffindikatoren		11	14	15
Summe der Alterungskomponenten		51	48	54

**AH Tab. 3.3 g: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der
Versuchsreihe Variation Hefestämme in µg/l**

		Stamm 34/70	Stamm 321	Stamm 285
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	8,8	13	10
2-Furfural	(W,A)	86	69	53
5-Methyl-Furfural	(A)	6,7	4,9	5,1
Benzaldehyd	(S,A)	1,3	1,1	0,8
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	10	7,3	7,4
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	4,6	3,4	4,7
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		17	11	8
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	6,4	5	4,2
2-Propionyl-Furan	(A)	n.a.	n.a.	0
gamma-Nonalacton	(W,A)	46	25	34
Summe der Wärmeindikatoren		132	94	87
Summe der Sauerstoffindikatoren		20	21	18
Summe der Alterungskomponenten		170	129	119

AH Tab. 3.3 h: Ergebnisse der Alterungsverkostung der Versuchsreihe Variation Hefestämme

34/70 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
	StAbW	0	0	0	0	0

34/70 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1,5	1,5	1	80	1,4
	2	2,5	2,5	1,5	40	2,3
	3	2	2,5	1	70	2
	4	1,5	2	1,5	80	1,7
	Mittelwert	1,875	2,125	1,25	67,5	1,85
	StAbW	0,47871355	0,47871355	0,28867513	18,9296945	0,387298335

321 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1,8
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1,2
	StAbW	0	0	0	0	0,4

321 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1,5	2	1,5	70	1,7
	2	2	2	1	70	1,8
	3	2	1,5	1,5	70	1,7
	4	1,5	1,5	1	90	1,4
	Mittelwert	1,75	1,75	1,25	75	1,65
	StAbW	0,28867513	0,28867513	0,28867513	10	0,173205081

285 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	2
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1,25
	StAbW	0	0	0	0	0,5

285 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1,5	1	90	1,2
	2	2,5	2	1	60	2
	3	1	1	1	90	1
	4	2	1,5	1	80	1,6
	Mittelwert	1,625	1,5	1	80	1,45
	StAbW	0,75	0,40824829	0	14,1421356	0,443471157

AH Tab. 3.4 a: Gärverlauf Gärung 6 Mio./ml 1 der Versuchsreihe Variation**Anstellzellzahl**

Gärdauer [h]	9	33	53	76	101	124	148	171
Stw. [Gew.%]	11,46	11,46	11,47	11,44	11,5	11,51	11,42	11,54
Es. [Gew.%]	11,29	9,93	7,47	4,71	2,96	2,54	2,44	2,41
Ew. [Gew.%]	11,28	10,2	8,23	6	4,59	4,25	4,15	4,16
Alk. [Vol.%]	0,12	0,85	2,17	3,6	4,55	4,77	4,77	4,85
Vgs. [%]	1,3	13,7	35,8	59,8	75,1	78,7	79,4	79,8
pH	4,81	4,51	4,33	4,18	4,14	4,19	4,2	4,2
Zellzahl [mio/ml]	16,8	48	53,2	29,2	27,2	24,4	17,6	17,6
Diacetyl [mg/l]	0,06	0,23	0,27	0,41	0,33	0,27	0,12	0,08
Pentandion [mg/l]	0,03	0,23	0,36	0,83	0,77	0,51	0,3	0,16
FAN [mg/l]	167,08	144,21	91,75	65,49	55,52	59,8		57,58
BE [EBC-Einh.]	51,04	57,07	41,52	38,79	38,6	40,11		39,52
Farbe	9,81	8,04	8,07	8,54		6,34		7,18
Polyphenole [mg/l]	227,5		204,18	219,11	234,12	216,59		218,26
TBZ	63,7	67,77	71,1	65,19		59,17		52,9
SO ₂ [mg/l]								7,6

AH Tab. 3.4 b: Gärverlauf Gärung 8 Mio./ml der Versuchsreihe Variation**Anstellzellzahl**

Gärdauer [h]	1	24	44	67	92	111	135	158	183
Stw. [Gew.%]	11,65	11,63	11,58	11,52	11,65	11,62	11,5	11,64	11,52
Es. [Gew.%]	11,58	10,88	8,75	5,68	3,38	2,62	2,49	2,52	2,45
Ew. [Gew.%]	11,58	10,99	9,28	6,8	4,96	4,34	4,21	4,26	4,18
Alk. [Vol.%]	0,05	0,43	1,55	3,14	4,41	4,78	4,79	4,85	4,82
Vgs. [%]	0,4	6,5	25,1	51,7	71,9	78,2	79	79,1	79,5
pH	4,89	4,66	4,39	4,19	4,13	4,16	4,19	4,18	4,23
Zellzahl [mio/ml]	8,4	21,2	51,2	40,8	33,6	21,6	21,2	22,8	22
Diacetyl [mg/l]	0,01	0,16	0,27	0,42	0,49		0,21	0,13	0,09
Pentandion [mg/l]	0	0,15	0,26	0,74	1,02		0,39	0,22	
FAN [mg/l]	173,81	149,03	95,5	60,09	52,14	56,24		51,94	
BE [EBC-Einh.]	56,09	51,23	45,36	43,2	41,05	42,4		42,78	
Farbe	10,53	10,2	11,4	7,84	8,71	6,89		7,37	
Polyphenole [mg/l]	232,17	225,07	226,49	213,99	210,51	214,98		211,67	
TBZ	65,83	63,18	60,34	62,15	58,35	62,77		53,1	
SO ₂ [mg/l]								11,6	

AH Tab. 3.4 c: Gärverlauf Gärung 10 Mio./ml der Versuchsreihe Variation**Anstellzellzahl**

Gärdauer [h]	15	35	58	83	104	128	151	176	201
Stw. [Gew.%]	11,56	11,55	11,51	11,65	11,54	11,41	11,53		11,47
Es. [Gew.%]	11,2	9,65	6,36	3,61	2,64	2,5	2,48		2,43
Ew. [Gew.%]	11,22	9,99	7,34	5,15	4,34	4,2	4,21		4,16
Alk. [Vol.%]	0,23	1,05	2,78	4,29	4,73	4,75	4,81		4,8
Vgs. [%]	3,1	16,9	45,8	69,9	77,9	78,9	79,2		79,5
pH	4,76	4,46	4,2	4,11	4,14	4,17	4,17		4,22
Zellzahl [mio/ml]	16,2	37,2	56,8	27,2	26,8		27,2	26,4	
Diacetyl [mg/l]	0,09	0,25	0,44	0,6	0,58	0,3	0,2	0,07	
Pentandion [mg/l]	0,08	0,25	0,84	1,15	0,87	0,44	0,28	0,13	
FAN [mg/l]	160,75	116,76	65,6	48,83	47,94		50,77		
BE [EBC-Einh.]	55,97	51,57	42,47	41,86	42,56		43,06		
Farbe	10,7	10,44	7,22		6,62		6,52		
Polyphenole [mg/l]	223,34	227,72	207,79	228,85	211,7		218,03		
TBZ	63,18	60,45	66,96		55,96		55,75		
SO2 [mg/l]								10,3	

AH Tab. 3.4 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Variation**Anstellzellzahl in mg/l**

	6 Mio./ml	8 Mio./ml	10 Mio./ml
Acetaldehyd	5,4	3,7	3,2
Propanol-1	12	12	12
Ethylacetat	27	31	20
2-Methylpropanol	19	18	17
3-Methylbutanol	54	51	52
2-Methylbutanol	18	18	18
2-Methylpropylacetat	0,1	0,2	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	3,1	3,6	2,9
2-Methylbutylacetat	0,3	0,4	0,3
Hexansäurethalester	0,4	0,4	0,2

AH Tab. 3.4 e: Bieraromastoffe der Versuchsreihe Variation Anstellzellzahl in µg/l

	6 Mio./ml	8 Mio./ml	10 Mio./ml
Hexanol-1	21	22	24
Heptanol-1	2,9	3,3	8,1
Octanol-1	12	14	15
Decanol-1	4,3	5,5	6,1
2-Phenylethanol	34974	35767	34945
Furfurylalkohol	985	177	212
Essigsäure-Isobutylester	76	95	102
Essigsäure-Hexylester	7,7	9,2	9,4
Essigsäure-Heptylester	2,1	2,4	2,6
Essigsäure-Octylester	5,4	5,1	6
Essigsäure-Furfurylester	5,5	7,5	8,9
Essigsre-2-Phenylethylester	988	1407	1445
Buttersäure-Ethylester	78	80	84
Hexansäure-Ethylester	180	180	178
Octansäure-Ethylester	264	294	300
Decansäure-Ethylester	75	92	84
Isovaleriansäure	32	94	110
Hexansäure	1837	2596	2610
Octansäure	4784	6167	6244
Nonansäure	16	21	20
Decansäure	819	1507	1252
Dodecansäure	111	165	142
α-Terpineol	7,4	7,7	7,9
Linalool	10	19	19
Nerol	2,3	2,7	2,2
γ-Nonalacton	37	40	44

AH Tab. 3.4 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Variation Anstellzellzahl in µg/l

		6 Mio./ml	10 Mio./ml
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	9	8
2-Furfural	(W,A)	7	7
5-Methyl-Furfural	(A)	4,2	5,3
Benzaldehyd	(S,A)	0,8	1,3
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	3,7	6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,5	9,7
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3	2
Phenylelessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	0
2-Acetyl-Furan	(A)	5,6	7,1
2-Propionyl-Furan	(A)	n.a.	0
gamma-Nonalacton	(W,A)	20	15
Summe der Wärmeindikatoren		27	22
Summe der Sauerstoffindikatoren		14	14
Summe der Alterungskomponenten		56	59

AH Tab. 3.4 g: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Variation Anstellzellzahl in µg/l

		6 Mio./ml	8 Mio./ml	10 Mio./ml
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	10	8,4	8
2-Furfural	(W,A)	70	76	71
5-Methyl-Furfural	(A)	4,7	6,2	6,7
Benzaldehyd	(S,A)	1,1	1,2	1,3
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	5,3	7	7,2
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,9	8,3	10,4
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		0	0	2,8
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	5,3	6,9	7,9
2-Propionyl-Furan	(A)	n.a.	n.a.	0
gamma-Nonalacton	(W,A)	25	32	34
Summe der Wärmeindikatoren		95	108	105
Summe der Sauerstoffindikatoren		16	17	17
Summe der Alterungskomponenten		127	146	147

AH Tab. 3.5 a: Gärverlauf GT 1 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1

Gärdauer [h]	19	43	68	90	114
Stw. [Gew.%]	11,55	11,57	11,59	11,66	11,66
Es. [Gew.%]	10,89	8,16	5,19	3,35	2,68
Ew. [Gew.%]	10,98	8,83	6,43	5,01	4,41
Alk. [Vol.%]	0,39	1,84	2,66	4,28	4,77
Vgs. [%]	5,8	29,43	55,33	71,58	77,05
pH	4,64	4,44	4,31	4,28	4,31
Zellzahl [mio/ml]	14,8	42,4	50	19,2	13,2
Diacetyl [mg/l]	0,11	0,24	0,21	0,15	0,11
Pentandion [mg/l]	0,1	0,25	0,25	0,16	0,16
FAN [mg/l]	188,08	136,5	114,49	105,88	104,76
BE [EBC-Einh.]	42,72	39,85	39,77	37,51	39,73
Farbe	8,6	8,69	8,1	13,36	8,37
Polyphenole [mg/l]	226,33	233,13	246,92	228,1	207,31
TBZ	47,09	43,64	42,8	39,31	39,21

AH Tab. 3.5 b: Gärverlauf GT 2 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1

Gärdauer [h]	9	33	58	80	104	128	152	200
Stw. [Gew.%]	11,54	11,6	11,58	11,62	11,62	11,68	11,75	11,78
Es. [Gew.%]	11,31	9,79	7,65	6,15	4,61	3,89	3,34	2,7
Ew. [Gew.%]	11,31	10,54	8,69	7,3	5,97	5,4	5,45	4,45
Alk. [Vol.%]	0,16	0,75	1,63	2,32	3,5	4,15	4,48	4,83
Vgs. [%]	1,9	15,6	33,95	48,17	60,38	66,65	71,6	77,11
pH	4,76	4,6	4,46	4,41	4,37	4,44	4,45	4,5
Zellzahl [mio/ml]	8	40	25,2	26,4	30,8	24,8	24,2	20,8
Diacetyl [mg/l]	0,03	0,17	0,2	0,24		0,12	0,09	0,05
Pentandion [mg/l]	0,05	0,17	0,24	0,26		0,16	0,11	0,06
FAN [mg/l]	199,27	154,08	144,61	133,66	126,57	134,88	141,57	133,96
BE [EBC-Einh.]	50,05	43,42	44	43,13	41,18	42,48	44,67	40,7
Farbe	7,6	7,26	7,41	6,87	6,62	7,82	8,1	6,86
Polyphenole [mg/l]	221,18	214,39	239,5	223,71	209,18	226,69	218,59	214,33
TBZ	46,76	41,18	42,02	39,27	36,58	37	39,73	34,82

AH Tab. 3.5 c: Gärverlauf GT 3 Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1

Gärdauer [h]	17	41	63	87	111	135	159	212
Stw. [Gew.%]	11,69	11,51	11,68	11,75	11,74	11,81	11,73	11,88
Es. [Gew.%]	11,51	9,41	7,47	5,76	4,78	3,92	3,31	2,69
Ew. [Gew.%]	11,65	9,92	7,27	6,93	6,13	5,45	4,93	4,46
Alk. [Vol.%]	0,27	1	1,82	2,48	3,72	4,21	4,49	4,89
Vgs. [%]	5,61	20,97	37,72	50,98	59,29	66,77	71,82	77,38
pH	4,78	4,52	4,41	4,4	4,41	4,43	4,45	4,51
Zellzahl [mio/ml]	17,6	34,8	20,4	26,8	25,8	16,8	12,4	12,8
Diacetyl [mg/l]	0,11	0,18	0,22		0,14	0,12	0,1	0,06
Pentandion [mg/l]	0,09	0,19	0,21		0,18	0,15	0,12	0,07
FAN [mg/l]	183,2	158,93	146,66	141,23	143,97	133		144,73
BE [EBC-Einh.]	48,7	49,46	45,22	44,8	44,87	40,77		43,97
Farbe	7,24	8,23	7,67	7,3	8,07	7,23		7,66
Polyphenole [mg/l]	198,9	215,7	210,65	207,55	215,37	221,05		212
TBZ	46,73	45,74	43,7	42,48	41,75	35,56		37,68

**AH Tab. 3.5 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/1 in mg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3
Acetaldehyd	12	8,9	8,2
Propanol-1	10	7,5	7,1
Ethylacetat	33	29	38
2-Methylpropanol	13	14	14
3-Methylbutanol	56	50	49
2-Methylbutanol	17	17	17
2-Methylpropylacetat	0,1	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,2	0,2
3-Methylbutylacetat	3,3	3	4
2-Methylbutylacetat	0,3	0,3	0,3
Hexansäurethalester	0,3	0,3	0,4

**AH Tab. 3.5 e : Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/1 in µg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	12,0	11,8	11,7
Heptanol-1	4,0	3,5	2,7
Octanol-1	12,7	15,1	13,7
Decanol-1	4,5	2,6	2,3
2-Phenylethanol	33002	28118	25079
Essigsäure-Isobutylester	96	116	124
Essigsäure-Hexylester	7,9	8,4	9,9
Essigsäure-Heptylester	2,8	2,6	2,6
Essigsäure-Octylester	4,1	3,2	3,5
Essigsäure-Furfurylester	Sp.	Sp.	Sp.
Essigsre-2-Phenylethylester	799	743	793
Buttersäure-Ethylester	122	192	187
Hexansäure-Ethylester	184	196	186
Octansäure-Ethylester	202	298	308
Decansäure-Ethylester	47	82	74
Isovaleriansäure	15	16	17
Hexansäure	1485	1962	2028
Octansäure	5554	7351	7549
Nonansäure	11	17	16
Decansäure	990	1671	1426
Dodecansäure	407	636	633

AH Tab. 3.5 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	16	14	16
2-Furfural	(W,A)	10	8	8,3
5-Methyl-Furfural	(A)	4,3	5,5	7,4
Benzaldehyd	(S,A)	1,0	1,2	1,1
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	9	7	7,4
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,5	1,6	1,7
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3	6	4,8
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,8	1,0	0,9
2-Acetyl-Furan	(A)	6,5	6,8	7,5
2-Propionyl-Furan	(A)	2,3	2,9	2,4
gamma-Nonalacton	(W,A)	28	32	30
Summe der Wärmeindikatoren		39	39	38
Summe der Sauerstoffindikatoren		26	22	25
Summe der Alterungskomponenten		79	79	83

AH Tab. 3.5 g : Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/1 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
3-Methyl-Butanal	(S,A)	36	14	19
2-Furfural	(W,A)	94	53	54
5-Methyl-Furfural	(A)	5,3	6,3	7,9
Benzaldehyd	(S,A)	2,3	0,9	1,2
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	47	8	12
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,9	1	1,2
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		9	12	12
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,8	1	1,0
2-Acetyl-Furan	(A)	9,3	8	8,7
2-Propionyl-Furan	(A)	2,3	2,3	2,1
gamma-Nonalacton	(W,A)	36	34	36
Summe der Wärmeindikatoren		130	87	90
Summe der Sauerstoffindikatoren		85	23	32
Summe der Alterungskomponenten		234	128	144

**AH Tab. 3.5 h: Ergebnisse der Alterungsverkostung der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/1**

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	1
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	3	2,5	2	55	2,6
2	2,5	2,5	2,5	60	2,5
3	3	2,5	1	50	2,4
4	3,5	3,5	3	40	3,4
Mittelwert	3	2,75	2,125	51,25	2,725
StAbW	0,40824829	0,5	0,85391256	8,53912564	0,457347424

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	1
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1,5	2	1,5	80	1,7
2	2	2	1,5	75	1,9
3	1,5	1,5	1,5	80	1,5
4	1,5	1,5	1	90	1,4
Mittelwert	1,625	1,75	1,375	81,25	1,625
StAbW	0,25	0,28867513	0,25	6,2915287	0,221735578

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1	1	1	100	1
2	1	1	1	100	1
3	1	1	1	100	1
4	1	1	1	100	1
Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0

Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
1	1,5	1,5	1	90	1,4
2	2,5	2	1,5	75	2,1
3	1,5	1,5	1	90	1,4
4	2	1,5	1,5	80	1,7
Mittelwert	1,875	1,625	1,25	83,75	1,65
StAbW	0,47871355	0,25	0,28867513	7,5	0,331662479

**AH Tab. 3.6 a: Gärverlauf GT 1 der Versuchsreihe Belüftungsvariation
Stamm 321/2**

Gärdauer [h]	20	38	49	66	87	113	137	161	185
Stw. [Gew.%]	11,97	11,93	11,82	11,98	11,67	11,67	12,05	12,04	12,13
Es. [Gew.%]	11,01	8,8	7,85	6	4,1	3,29	3,11	3,07	3,05
Ew. [Gew.%]	11,2	9,39	8,6	7,14	5,55	4,89	4,84	4,8	4,8
Alk. [Vol.%]	0,4	1,71	2,16	3,23	4,05	4,47	4,76	4,78	4,84
Vgs. [%]	8	27	34,6	51	65,9	82,7	74,17	74,48	74,85
pH	4,61	4,37	4,31	4,26	4,3	4,31	4,32	4,36	4,36
Zellzahl [mio/ml]	16		34,8	28,4	20,4	19,6	17,6	12,8	12
Diacetyl [mg/l]	0,12	0,27	0,28	0,21			0,1	0,08	0,07
Pentandion [mg/l]	0,12	0,26	0,26	0,25			0,12	0,09	0,08
FAN [mg/l]	199,49		150,96	134,43	123,26	134,32	135,52	135,92	137,07
BE [EBC-Einh.]	46,81		41,72	40,16	37,89	40,4	42,16	41,7	39,8
Farbe	8,47		7,72	6,83	6,15	7,67	7,41	7,65	7,75
Polyphenole [mg/l]	219,47		230,35	239,58	221,86	241,87	242,4	235,24	241,7
TBZ	53,29		49,35	47,04	42,71	44,9	44,53	44,3	44,15
SO ₂ [mg/l]									23,4

**AH Tab. 3.6 b: Gärverlauf GT 2 der Versuchsreihe Belüftungsvariation
Stamm 321/2**

Gärdauer [h]	13	31	42	59	80	106	130	154	178
Stw. [Gew.%]	11,99	11,92	11,75	11,94	11,72	11,64	12,09	12,09	12,13
Es. [Gew.%]	11,5	9,82	8,84	6,75	4,38	3,09	2,82	2,71	2,66
Ew. [Gew.%]	11,6	10,2	9,39	7,75	5,79	4,73	4,61	4,52	4,49
Alk. [Vol.%]	0,2	1,16	1,59	2,82	3,93	4,55	4,94	4,99	5,05
Vgs. [%]	4,1	18,1	25,5	44,6	63,6	74,2	76,67	77,55	78,07
pH	4,73	4,45	4,37	4,29	4,31	4,3	4,3	4,33	4,35
Zellzahl [mio/ml]	12,8		37,6	33,6	26	17,6	12,8	9,2	8
Diacetyl [mg/l]	0,08	0,23	0,24	0,26			0,11	0,09	0,06
Pentandion [mg/l]	0,07	0,23	0,26	0,27			0,12	0,1	0,08
FAN [mg/l]	218,76		164,91	140,78	136,95	136,73	136,08	139,64	137,35
BE [EBC-Einh.]	49,98		43,93	41,21	41,35	43,4	44,74	44,23	42
Farbe	8,12		7,16	6,69	7,26	8,18	7,69	7,85	7,28
Polyphenole [mg/l]	219,11		231,77	232,96	242,99	244,18	245,32	246,34	243,29
TBZ	48,47		44,42	42,05	42,12	41,36	40,77	41,04	39,62
SO ₂ [mg/l]									17,1

**AH Tab. 3.6 c: Gärverlauf GT 3 der Versuchsreihe Belüftungsvariation
Stamm 321/2**

Gärdauer [h]	17	28	45	66	92	116	140
Stw. [Gew.%]	11,8	11,83	11,84	11,17	11,13	11,99	11,97
Es. [Gew.%]	11,21	10,8	9	5,49	2,97	2,78	2,67
Ew. [Gew.%]	11,29	10,96	9,53	6,58	4,53	4,55	4,46
Alk. [Vol.%]	0,35	0,59	1,56	3,04	4,33	4,9	4,95
Vgs. [%]	5	9	24,8	51,8	74,1	76,83	77,7
pH	4,64	4,52	4,38	4,32	4,28	4,29	4,32
Zellzahl [mio/ml]		22,4	36	46,4	25,6	17,2	12
Diacetyl [mg/l]	0,12	0,17	0,2			0,12	0,09
Pentandion [mg/l]	0,1	0,16	0,2			0,14	0,11
FAN [mg/l]		190,71	152,06	126,8	119,9	118,6	119,98
BE [EBC-Einh.]		41,72	43,62	41,89	42,13	42,55	44,94
Farbe		7,72	6,8	6,69	7,63	8	7,58
Polyphenole [mg/l]		230,53	225,71	233,49	236,26	234,54	241
TBZ		49,34	42,68	41,27	40,42	39,25	39,61
SO ₂ [mg/l]							15,4

**AH Tab. 3.6 d: Gärverlauf GT 4 der Versuchsreihe Belüftungsvariation
Stamm 321/2**

Gärdauer [h]	5	23	34	51	72	98	122	146
Stw. [Gew.%]	11,8	11,74	11,65	11,71	11,72	11,58	11,88	11,88
Es. [Gew.%]	11,6	10,52	9,79	7,69	4,88	2,96	2,63	2,59
Ew. [Gew.%]	11,64	10,72	10,13	8,46	6,19	4,28	4,41	4,38
Alk. [Vol.%]	0,08	0,69	1,03	2,18	3,67	4,59	4,92	4,94
Vgs. [%]	1,71	10,6	16,4	35,2	59,4	75,3	77,89	78,18
pH	4,87	4,52	4,44	4,31	4,31	4,28	4,33	4,34
Zellzahl [mio/ml]	5,2		36	38,4	35,2	17,6	11,6	12,2
Diacetyl [mg/l]	0,02	0,2		0,28			0,12	0,08
Pentandion [mg/l]	0,01	0,17		0,26			0,14	0,1
FAN [mg/l]	224,15		177,41	144,87	127,45	122,87	125,47	125,9
BE [EBC-Einh.]	53,16		45,4	40,98	43,31	40,51	44	42,72
Farbe	8,25		7,15	6,72	6,79	7,3	7,58	7,5
Polyphenole [mg/l]	215,25		229,67	232,12	242,14	239,76	237	236,54
TBZ	47,12		44,4	42,76	41,54	39,57	38,36	39,15
SO ₂ [mg/l]								12,9

**AH Tab. 3.6 e: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/2 in mg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
Acetaldehyd	6,1	6,9	5,1	7,4
Propanol-1	8,3	9,3	9,2	10
Ethylacetat	30	26	24	27
2-Methylpropanol	11	12	11	12
3-Methylbutanol	58	62	61	65
2-Methylbutanol	16	17	16	17

**AH Tab. 3.6 f: Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/2 in µg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
Hexanol-1	8,1	6,7	8,5	8,5
Heptanol-1	3,1	3,1	4,7	4,0
Octanol-1	28,8	32,5	20,8	24,4
Decanol-1	4,3	3,9	3,3	3,2
2-Phenylethanol	32469	37199	32056	37082
Essigsäure-Isobutylester	112	113	75,6	98,0
Essigsäure-Hexylester	5,8	5,1	5,2	5,5
Essigsäure-Heptylester	3,3	3,3	2,8	3,4
Essigsäure-Octylester	3,7	4,0	4,0	4,3
Essigsre-2-Phenylethylester	648	620	615	669
Buttersäure-Ethylester	173	191	129	158
Hexansäure-Ethylester	128	132	124	133
Octansäure-Ethylester	237	225	214	196
Decansäure-Ethylester	66	54	48	40
Isovaleriansäure	35	34	30	27
Hexansäure	1132	898	1147	1057
Octansäure	5875	4976	5104	5005
Nonansäure	14	12	12	11
Decansäure	1362	1100	943	845
Dodecansäure	314	197	197	189

AH Tab. 3.6 g: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/2 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	14	13	11	13
2-Furfural	(W,A)	27	22	21	20
5-Methyl-Furfural	(A)	4,5	4,6	4,7	4,5
Benzaldehyd	(S,A)	1,3	1,3	0,8	0,7
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	10	8,5	6,9	6,6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,2	1,5	1,4	1,4
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		6	5,4	4,5	4,1
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,8	0,8	0,7	0,8
2-Acetyl-Furan	(A)	9,8	9,6	7,1	7,5
2-Propionyl-Furan	(A)	1,8	2,0	1,8	1,9
gamma-Nonalacton	(W,A)	27	29	26	27
Summe der Wärmeindikatoren		54	51	48	47
Summe der Sauerstoffindikatoren		25	23	19	20
Summe der Alterungskomponenten		97	92	82	83

AH Tab. 3.6 h: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/2 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3	GT 4
3-Methyl-Butanal	(S,A)	12	12	11	12,0
2-Furfural	(W,A)	83	106	118	109,0
5-Methyl-Furfural	(A)	5,5	6,2	6,8	5,8
Benzaldehyd	(S,A)	1,0	1,2	0,9	1,8
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	12	10	11	11,0
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,4	1,4	2	1,5
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		14	12	12	10,0
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,7	1,5	1	1,3
2-Acetyl-Furan	(A)	10,0	8,9	10	8,7
2-Propionyl-Furan	(A)	2,2	2,6	2,6	2,8
gamma-Nonalacton	(W,A)	34	37	40	38,0
Summe der Wärmeindikatoren		117	143	158	147
Summe der Sauerstoffindikatoren		25	23	23	25
Summe der Alterungskomponenten		162	187	202	192

**AH Tab. 3.6 i: Ergebnisse der Alterungsverkostung der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/2**

GT 1 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
	StAbW	0	0	0	0	0

GT 1 forcirt	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	2	2,5	1	60	2
	3	2	2	1	60	1,8
	4	3	2	2	70	2,4
	Mittelwert	2	1,875	1,25	72,5	1,8
	StAbW	0,81649658	0,62915287	0,5	18,9296945	0,588784058

GT 2 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
	StAbW	0	0	0	0	0

GT 2 forcirt	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2	2	1	60	1,8
	2	2	2	2	80	2
	3	2	2	1	60	1,8
	4	3	3	3	60	3
	Mittelwert	2,25	2,25	1,75	65	2,15
	StAbW	0,5	0,5	0,95742711	10	0,574456265

GT 3 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
	StAbW	0	0	0	0	0

GT 3 forcirt	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2	2,5	1	55	2
	2	2	3	2	50	2,4
	3	2	3	2	70	2,4
	4	2	2,5	2	65	2,2
	Mittelwert	2	2,75	1,75	60	2,25
	StAbW	0	0,28867513	0,5	9,12870929	0,191485422

GT 4 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
	StAbW	0	0	0	0	0

GT 4 forcirt	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2	2	2	80	2
	2	2	2,5	1	60	2
	3	2	2	1	60	1,8
	4	2	3	3	60	2,6
	Mittelwert	2	2,375	1,75	65	2,1
	StAbW	0	0,47871355	0,95742711	10	0,346410162

AH Tab. 3.7 a: Gärverlauf GT1 der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3

Gärdauer [h]	22	47	71	95	119	143
Stw. [Gew.%]	11,72	11,68	11,67	11,68	11,71	11,68
Es. [Gew.%]	10,91	8,99	4,66	2,96	2,81	2,75
Ew. [Gew.%]	11,07	9,52	6,02	4,65	4,52	4,47
Alk. [Vol.%]	0,44	1,46	3,75	4,64	4,73	4,74
Vgs. [%]	7,2	23,88	61,16	75,49	76,86	77,24
pH	4,63	4,45	4,21	4,25	4,25	4,26
Zellzahl [mio/ml]	19,6	40	45,6	9,2	7,6	3,2
Diacetyl [mg/l]	0,2	0,34	0,35	0,36	0,2	0,1
Pentandion [mg/l]	0,09	0,26	0,36	0,31	0,23	0,12
FAN [mg/l]	194,9	161,19	111,55	104,11	103,75	103,73
BE [EBC-Einh.]	49,6	46,62	42,11	43,45	41,96	43,82
Polyphenole [mg/l]	220,03	233,29	221	229,52	227,42	254,02
TBZ	47,75	44,83	47,1	41,45	40,32	39,84
SO ₂ [mg/l]						2,1

AH Tab. 3.7 b: Gärverlauf GT2 der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3

Gärdauer [h]	15	38	62	86	110	134
Stw. [Gew.%]	11,7	11,65	11,64	11,7	11,72	11,67
Es. [Gew.%]	11,1	9,25	4,95	3,11	2,87	2,77
Ew. [Gew.%]	11,22	9,72	6,25	4,77	4,58	4,49
Alk. [Vol.%]	0,33	1,3	3,58	4,57	4,7	4,73
Vgs. [%]	5,37	21,37	58,62	74,32	76,35	77,08
pH	4,67	4,48	4,24	4,31	4,27	4,27
Zellzahl [mio/ml]	16,4	35,6	28,8	14,4	6,8	3,2
Diacetyl [mg/l]	0,24	0,36	0,39	0,35	0,16	0,1
Pentandion [mg/l]	0,11	0,27	0,43	0,36	0,24	0,12
FAN [mg/l]	195,57	158,04	104,79	95,83	95,45	95,63
BE [EBC-Einh.]	52,33	44,82	44,46	43,42	43,12	44,8
Polyphenole [mg/l]	221,08	227,31	232,64	217,3	228,63	235,9
TBZ	45,61	43,41	42,37	40,35	40,13	39,11
SO ₂ [mg/l]						2,6

AH Tab. 3.7 c: Gärverlauf GT3 der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3

Gärdauer [h]	7	30	54	78	102	126	150
Stw. [Gew.%]	11,6	11,62	11,55	11,49	11,53	11,58	
Es. [Gew.%]	11,44	10,42	6,84	4,35	2,92	2,58	
Ew. [Gew.%]	11,47	10,66	7,76	5,74	4,58	4,32	
Alk. [Vol.%]	0,09	0,65	2,53	3,81	4,58	4,77	
Vgs. [%]	1,44	10,72	41,9	63,2	75,57	78,47	
pH	4,91	4,63	4,36	4,31	4,32	4,34	
Zellzahl [mio/ml]	9,6	42,2	57,6	32,4	7,2	6,2	
Diacetyl [mg/l]	0,1	0,26	0,34	0,41	0,23	0,15	0,09
Pentandion [mg/l]	0,18	0,17	0,3	0,31	0,28	0,18	0,1
FAN [mg/l]	209,66	182,6	127,9	111,92	108,49	108,16	
BE [EBC-Einh.]	57,69	50,7	46,36	44,53	46,6	46,45	
Polyphenole [mg/l]	229,31	221	234,68	230,11	234,6	234,85	
TBZ	47,63	47,1	44	42,41	40,77	38,76	
SO ₂ [mg/l]							3,4

AH Tab. 3.7 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3 in mg/l

	GT 1	GT 2	GT 3
Acetaldehyd	11	11	9,8
Propanol-1	9,3	9,8	8,9
Ethylacetat	16	17	21
2-Methylpropanol	13	14	13
3-Methylbutanol	49	51	50
2-Methylbutanol	16	16	16
2-Methylpropylacetat	0,1	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	2	2,1	2,5
2-Methylbutylacetat	0,2	0,2	0,2
Hexansäurethalester	0,3	0,2	0,3

AH Tab. 3.7 e: Bieraromastoffe der Biere der Gärungen GT1 und GT2 der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3 in µg/l

	GT 1	GT 2
Hexanol-1	22,0	22,0
Heptanol-1	4,2	4,1
Octanol-1	12,0	15,0
Decanol-1	3,0	2,8
2-Phenylethanol	21833	24222
Essigsäure-Isobutylester	63	75
Essigsäure-Hexylester	7,6	8,3
Essigsäure-Heptylester	1,8	1,8
Essigsäure-Octylester	3,4	3,9
Essigsäure-Furfurylester	5,8	4,4
Essigsäure-2-Phenylethylester	702	725
Buttersäure-Ethylester	70	79
Hexansäure-Ethylester	165	146
Octansäure-Ethylester	212	192
Decansäure-Ethylester	69	57
Isovaleriansäure	879	732
Hexansäure	1715	1338
Octansäure	4795	4193
Nonansäure	11	10
Decansäure	1055	865
Dodecansäure	421	351
α-Τερπινεολ	5,5	5,9
Linalool	14,0	19,0
Nerol	2,9	2,9
γ-Nonαλαχτον	42	40

AH Tab. 3.7 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	14,0	15,0	16,0
2-Furfural	(W,A)	5,0	7,4	8,5
5-Methyl-Furfural	(A)	3,4	4,4	4,9
Benzaldehyd	(S,A)	1,0	1,1	1,0
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	7,0	7,1	8,1
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,1	1,1	1,3
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3,7	3,8	3,6
Phenylessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,7	0,7	0,6
2-Acetyl-Furan	(A)	3,4	3,2	4,3
2-Propionyl-Furan	(A)	1,2	1,6	4,0
gamma-Nonalacton	(W,A)	29	33	35
Summe der Wärmeindikatoren		34	40	43
Summe der Sauerstoffindikatoren		22	23	25
Summe der Alterungskomponenten		66	74	84

AH Tab. 3.7 g: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/3 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	17	18	18
2-Furfural	(W,A)	73	85	92
5-Methyl-Furfural	(A)	4,7	5,1	5,5
Benzaldehyd	(S,A)	0,7	0,9	1,2
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	11	10	8
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,1	1,2	1
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		9	8	11
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,9	0,9	1
2-Acetyl-Furan	(A)	6,1	5,9	6
2-Propionyl-Furan	(A)	1,9	2,3	2,5
gamma-Nonalacton	(W,A)	46	46	43
Summe der Wärmeindikatoren		119	131	134
Summe der Sauerstoffindikatoren		29	29	27
Summe der Alterungskomponenten		163	175	178

AH Tab. 3.8 a: Gärverlauf GT 1 der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4

Gärdauer [h]	44	60	87	104	128	152
Stw. [Gew.%]	11,57	11,58	11,66	11,65	11,66	11,58
Es. [Gew.%]	7,12	4,94	2,91	2,82	2,77	2,76
Ew. [Gew.%]	7,99	6,23	4,6	4,53	4,48	4,46
Alk. [Vol.%]	2,39	3,55	4,65	4,69	4,73	4,68
Vgs. [%]	39,51	58,47	75,86	76,6	77,1	77
pH	4,33	4,23	4,17	4,2	4,21	4,2
Zellzahl [mio/ml]	45,6	46,4	13,2	4	1,2	1,2
Diacetyl [mg/l]	0,25	0,24	0,18	0,17	0,12	0,06
Pentandion [mg/l]	0,41	0,38	0,35	0,35	0,24	0,12
FAN [mg/l]	128,7	99,02	92,48	119,1	91,96	92,5
BE [EBC-Einh.]	36,6	74,8	47,7	50,5	46,5	48,7
Polyphenole [mg/l]	265	197,6	198,9	205,77	190,8	196,8
TBZ	63,3	43,53	41,05	41,07	39,1	39,6
SO ₂ [mg/l]						8,6

AH Tab. 3.8 b: Gärverlauf GT 2 der Versuchsreihe Belüftungsvariation**Stamm 321/4**

Gärdauer [h]	36	52	79	96	120	144
Stw. [Gew.%]	11,93	11,93	12,06	12,05	12,08	12
Es. [Gew.%]	8,93	6,6	3,56	3,08	2,95	2,91
Ew. [Gew.%]	9,52	7,64	5,2	4,81	4,71	4,66
Alk. [Vol.%]	1,63	2,87	4,54	4,78	4,86	4,84
Vgs. [%]	26,07	45,83	71,43	75,4	76,42	76,61
pH	4,44	4,29	4,18	4,2	4,2	4,22
Zellzahl [mio/ml]	48,8	44	26,4	9,6	4	1,2
Diacetyl [mg/l]		0,36	0,22	0,19	0,14	0,07
Pentandion [mg/l]		0,48	0,38	0,4	0,28	0,14
FAN [mg/l]	146,9	107,5	94,1	93,7	93,3	93,15
BE [EBC-Einh.]	36,6	50,4	48,3	49,8	204,7	49,27
Polyphenole [mg/l]	270,9	205,8	203,8	203,4	204,7	196,6
TBZ	63,7	50,4	48,3	40,65	40,3	39,6
SO ₂ [mg/l]						10,5

AH Tab. 3.8 c: Gärverlauf GT 3 der Versuchsreihe Belüftungsvariation**Stamm 321/4**

Gärdauer [h]	28	44	71	88	112	136	160	184
Stw. [Gew.%]	11,98	11,93	12,01	12,05	12,11	12,03	12,03	12,02
Es. [Gew.%]	10,27	8,61	6,04	4,88	3,76	3,59	3,49	3,46
Ew. [Gew.%]	10,61	9,27	7,2	6,27	5,37	5,22		
Alk. [Vol.%]	0,93	1,82	3,22	3,84	4,46	4,5		
Vgs. [%]	14,8	29,07	51	60,6	69,99	71,13		
pH	4,58	4,45	4,33	4,32	4,34	4,34	4,34	4,34
Zellzahl [mio/ml]	20,4	37,2	39,2	20,4	14,4	4,4	1,8	1,2
Diacetyl [mg/l]		0,38	0,35	0,28	0,19	0,13	0,1	0,06
Pentandion [mg/l]		0,49	0,44	0,48	0,56	0,25	0,19	0,12
FAN [mg/l]	178,6	133,86	128,4	125,1	122,12	119,1	119,8	118,68
BE [EBC-Einh.]		51,6	51,64	52,1	51,8	50,5	52,6	51
Polyphenole [mg/l]	264,5	203,1	204,85	205,3	205,1	205,8	206,4	192,4
TBZ	66,8	46,25	43,25	42,89	42,5	41,7	40,16	40,1
SO ₂ [mg/l]							33,3	

AH Tab. 3.8 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4 in mg/l

	GT 1	GT 2	GT 3
Acetaldehyd	7,8	8,8	8,5
Propanol-1	9,5	9,9	7
Ethylacetat	16	17	23
2-Methylpropanol	13	12	12
3-Methylbutanol	52	50	48
2-Methylbutanol	16	15	16
3-Methylbutylacetat	2,4	2,6	3,2

**AH Tab. 3.8 e: Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/4 in µg/l**

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	19,0	19,0	20,0
Heptanol-1	3,3	3,8	3,9
Octanol-1	13,0	12,0	11,0
Decanol-1	5,1	5,1	4,7
2-Phenylethanol	29044	30284	23102
Essigsäure-Isobutylester	61	53	67
Essigsäure-Hexylester	9,1	8,2	10,0
Essigsäure-Heptylester	2,1	2,3	3,1
Essigsäure-Octylester	3,9	3,4	3,6
Essigsäure-Furfurylester	7,5	6,0	8,0
Essigsre-2-Phenylethyles	767	775	786
Buttersäure-Ethylester	78	77	89
Hexansäure-Ethylester	183	174	215
Octansäure-Ethylester	179	196	225
Decansäure-Ethylester	45	43	67
Isovaleriansäure	38	33	34
Hexansäure	1417	1555	2040
Octansäure	3929	4079	5507
Nonansäure	9	10	13
Decansäure	867	894	1426
Dodecansäure	322	295	471

**AH Tab. 3.8 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe
Belüftungsvariation Stamm 321/4 in µg/l**

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	12,0	11,0	15,0
2-Furfural	(W,A)	13,0	16,0	12,0
5-Methyl-Furfural	(A)	5,8	5,1	5,3
Benzaldehyd	(S,A)	1,1	1,2	1,1
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	7,0	5,9	7,3
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	4,6	4,3	4,3
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		4,1	4,5	3,9
Phenylessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	1,2	1,1	1,0
2-Acetyl-Furan	(A)	4,9	4,2	4,4
2-Propionyl-Furan	(A)	Sp.	Sp.	Sp.
gamma-Nonalacton	(W,A)	32,0	31,0	30,0
Summe der Wärmeindikatoren		45	47	42
Summe der Sauerstoffindikatoren		19	17	22
Summe der Alterungskomponenten		81	79	79

AH Tab. 3.8 g: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	15	15	19,0
2-Furfural	(W,A)	143	124	107,0
5-Methyl-Furfural	(A)	7,6	7,3	6,2
Benzaldehyd	(S,A)	1,5	1,6	1,2
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	10	10	13,0
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,0	5,8	6,3
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		13	13	15,0
Phenylessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	1,5	1,2	1,2
2-Acetyl-Furan	(A)	6,4	6,2	6,0
2-Propionyl-Furan	(A)	Sp.	Sp.	Sp.
gamma-Nonalacton	(W,A)	47	42	41,0
Summe der Wärmeindikatoren		190	166	148
Summe der Sauerstoffindikatoren		27	27	33
Summe der Alterungskomponenten		237	213	201

AH Tab. 3.8 h: Ergebnisse der Alterungsverkostung der Versuchsreihe Belüftungsvariation Stamm 321/4

GT 1 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0	

GT 1 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2	2	2	55	2
	2	2,5	3	1,5	60	2,5
	3	2	3	2	55	2,4
	4	2	2,5	1,5	65	2,1
	Mittelwert	2,125	2,625	1,75	58,75	2,25
StAbW	0,25	0,47871355	0,28867513	4,78713554	0,238047614	

GT 2 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	4	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0	

GT 2 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2,5	3	2,5	60	2,7
	2	2	2,5	2	65	2,2
	3	2	2	1,5	65	1,9
	4	1,5	2	1,5	70	1,7
	Mittelwert	2	2,375	1,875	65	2,125
StAbW	0,40824829	0,47871355	0,47871355	4,0824829	0,434932945	

GT 3 frisch	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	1	1	1	100	1
	2	1	1	1	100	1
	3	1	1	1	100	1
	6	1	1	1	100	1
	Mittelwert	1	1	1	100	1
StAbW	0	0	0	0	0	

GT 3 forciert	Prüfer	Geruch	Trunk	Bittere	Akzeptanz	gemittelte Note
	1	2,5	2	2	75	2,2
	2	2	2	2	70	2
	3	1,5	1,5	1	80	1,4
	4	1,5	1,5	1,5	85	1,5
	Mittelwert	1,875	1,75	1,625	77,5	1,775
StAbW	0,47871355	0,28867513	0,47871355	6,45497224	0,386221008	

AH Tab. 4.1 a: Gärverlauf GT 1 der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70

Gärdauer [h]	2	25	49	70	94	118	143	169
Stw. [Gew.%]	11,45	11,43	11,51	11,42	11,43	11,41		11,37
Es. [Gew.%]	10,1	7,43	4,45	2,74	2,57	2,51		2,45
Ew. [Gew.%]	10,33	8,19	5,8	4,4	4,26	4,21		4,15
Alk. [Vol.%]	0,76	2,17	3,78	4,62	4,71	4,73		4,74
Vgs. [%]	12,1	35,9	62,3	76,8	78,3	78,7		79,2
pH	4,53	4,22	4,05	4,01	4,06	4,06		4,1
Zellzahl [Mio./ml]	22	54,8	58,8	36	30,8	21,2		
Diacetyl [mg/l]	0,64	0,88	0,88		0,8	0,32	0,17	0,09
Pentandion [mg/l]	0,56	0,77	1,23		0,72	0,36	0,19	0,09
FAN [mg/l]	151,83	82,54	41,83	37,3		39,12		
BE [EBC-Einh.]	51,29	42,68	39,98	37,48		41,93		
Farbe	8,11	7,33	7,49	6,79		7,12		
Polyphenole [mg/l]	200,88	208,43	218,93	216,04		216,14		
TBZ	79,32	75,04		68,83		68,2		

AH Tab. 4.1 b: Gärverlauf GT 2 der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70

Gärdauer [h]	2	25	49	70	94	118	143	169	193
Stw. [Gew.%]	11,46	11,43	11,45	11,49	11,43	11,43		11,37	
Es. [Gew.%]	10,11	7,73	4,92	3,02	2,57	2,51		2,46	
Ew. [Gew.%]	10,34	8,43	6,17	4,64	4,26	4,22		4,16	
Alk. [Vol.%]	0,75	2,01	3,5	4,51	4,71	4,74		4,73	
Vgs. [%]	12	33,2	58	74,6	78,3	78,7		79,1	
pH	4,52	4,28	4,1	4,03	4,08	4,09		4,16	
Zellzahl [Mio./ml]	20,4	48,8	43,2	40,2	18	15,2			
Diacetyl [mg/l]	0,67	0,95	0,71		0,56	0,67	0,31	0,14	0,08
Pentandion [mg/l]	0,58	0,81	0,94		0,71	0,69	0,31	0,11	
FAN [mg/l]	156,26	88,92	58,96	51,15		43,73			
BE [EBC-Einh.]	60,11	45,46	42,46			44,57			
Farbe	7,95	7,95	7,44	6,78		7,46			
Polyphenole [mg/l]	191,63	205,92	217,09			222,91			
TBZ	83,43	69,51	69,27			61,94			

AH Tab. 4.1 c: Gärverlauf GT 3 der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70

Gärdauer [h]	1	26	47	71	95	120	146
Stw. [Gew.%]	11,48	11,49	11,49	11,4	11,41		11,37
Es. [Gew.%]	10,04	7,78	5,14	2,69	2,51		2,45
Ew. [Gew.%]	10,29	8,48	6,36	4,36	4,21		4,16
Alk. [Vol.%]	0,81	2,01	3,41	4,63	4,73		4,74
Vgs. [%]	12,9	33,1	56,3	77,1	78,7		79,1
pH	4,5	4,32	4,13	4,02	4,08		4,04
Zellzahl [Mio./ml]	21,2	30,8	45,2	34,4	30,8		
Diacetyl [mg/l]	0,69	0,79			0,11	0,1	0,08
Pentandion [mg/l]	0,55	0,75			0,74	0,15	0,14
FAN [mg/l]	152,85	101,55	51,15		44,72		
BE [EBC-Einh.]		48,53					
Farbe		8,54					
Polyphenole [mg/l]		216,08					
TBZ		73,95					

AH Tab. 4.1 d: Höhere Alkohole der Biere der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70 in mg/l

	GT 1	GT 2	GT 3
Acetaldehyd	3	2,7	3,1
Propanol-1	16	20	18
Ethylacetat	32	25	25
2-Methylpropanol	20	18	20
3-Methylbutanol	58	56	55
2-Methylbutanol	16	14	14
2-Methylpropylacetat	0,2	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	4,2	2,9	3,1
2-Methylbutylacetat	0,3	0,2	0,3
Hexansäurethalester	0,3	0,3	0,4

AH Tab. 4.1 e: Bieraromastoffe der Biere der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70 in µg/l

	GT 1	GT 2	GT 3
Hexanol-1	23	36	35
Heptanol-1	8,3	21,5	20,4
Octanol-1	15	17,7	17
Decanol-1	4,8	6	6
2-Phenylethanol	40075	37221	36547
Furfurylalkohol	919	1234	1479
Essigsäure-Isobutylester	108	71	71
Essigsäure-Hexylester	9,5	10	7,4
Essigsäure-Heptylester	3,6	3,5	2,8
Essigsäure-Octylester	5,6	2,9	3,8
Essigsäure-Furfurylester	n.a.	17,3	7,2
Essigsre-2-Phenylethylester	1484	1118	1022
Buttersäure-Ethylester	97	78	68
Hexansäure-Ethylester	156	129	129
Octansäure-Ethylester	223	170	201
Decansäure-Ethylester	20	10	23
Isovaleriansäure	732	803	1315
Hexansäure	1632	1424	1539
Octansäure	3941	3154	3635
Nonansäure	14	22	50
Decansäure	165	107	234
Dodecansäure	3,6	4	7
α-Terpineol	6,9	8,8	7,2
Linalool	12	20	16
Nerol	2,6	3,2	2,6
γ-Nonalacton	41	44	39

AH Tab. 4.1 f: Alterungsindikatoren der frischen Biere der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	9	10,2	9,7
2-Furfural	(W,A)	9,8	11,1	10
5-Methyl-Furfural	(A)	4,1	6	4,9
Benzaldehyd	(S,A)	1,2	1,4	1,5
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	7,6	9,1	9,1
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,3	5,7	5,2
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		3,1	3,8	5
Phenylessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	6,2	6,5	5,2
2-Propionyl-Furan	(A)	1,3	1,6	1,5
gamma-Nonalacton	(W,A)	27	27	28
Wärmeindikatoren		36,8	38,1	38
Sauerstoffindikatoren		17,8	20,7	20,3
Alterungskomponenten		71,5	78,6	75,1

AH Tab. 4.1 g: Alterungsindikatoren der forciert gealterten Biere der Versuchsreihe im Kleinmaßstab Stamm 34/70 in µg/l

		GT 1	GT 2	GT 3
2-Methyl-Butanal		n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	10	8,3	8,6
2-Furfural	(W,A)	80,9	98,3	80,2
5-Methyl-Furfural	(A)	4,5	5,6	4,8
Benzaldehyd	(S,A)	2,1	2,2	1,8
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	9,6	7,5	8,9
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	4,8	5,8	4,9
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		10,6	10,6	15
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	n.a.	n.a.	n.a.
2-Acetyl-Furan	(A)	5,8	4,4	4
2-Propionyl-Furan	(A)	2,3	1,7	2
gamma-Nonalacton	(W,A)	34	35	35
Wärmeindikatoren		114,9	133,3	115,2
Sauerstoffindikatoren		21,7	18	19,3
Alterungskomponenten		154	168,8	150,2

**AH Tab. 5.1 a: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Reinzuchtgärung**

Gärdauer [h]	21	40	63	88	115	136
Stw. [Gew.%]	11,49	11,55	11,39	11,35	11,52	
Es. [Gew.%]	9,65	6,61	4,04	2,88	2,71	
Ew. [Gew.%]	9,98	7,56	5,45	4,5	4,39	
Alk. [Vol.%]	1,02	2,66	3,92	4,5	4,68	
Vgs. [%]	16,4	43,7	65,6	75,4	77,2	
pH	4,53	4,21	4,2	4,2	n.n.	
Diacetyl [mg/l]	0,26	0,27	0,2	0,13	0,08	
Pentandion [mg/l]	0,2	0,21	0,22	0,17	0,1	
FAN [mg/l]	146,47	96,33	77,92	72,46	72,76	
BE [EBC-Einh.]	46,83	41,55	41,47	40,25	39,66	
Farbe	8,85	10,06	13,77	11,82	13,53	
Polyphenole [mg/l]	235,16	238,08	230,06	228,41	228,53	
TBZ	61,42	54,67	51,08	48,16	47,78	
SO ₂ [mg/l]						4,7
ICP						6,23

**AH Tab. 5.1 b: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 1. Führung**

Gärdauer [h]	7	27	61	79	103	127	145
Stw. [Gew.%]	11,43	11,38	11,29	11,49	11,4	11,53	
Es. [Gew.%]	11,14	9,49	4,92	3,33	2,89	2,78	
Ew. [Gew.%]	11,15	9,83	6,14	4,89	4,51	4,45	
Alk. [Vol.%]	0,19	1,04	3,41	4,35	4,53	4,66	
Vgs. [%]	2,4	17,1	57,4	71,9	75,5	76,7	
pH	4,72	4,45	4,23	4,19	4,21	4,21	
Diacetyl [mg/l]	0,12	0,22	0,26	0,21	0,15	0,1	0,06
Pentandion [mg/l]	0,06	0,19	0,23	0,25	0,21	0,15	0,1
FAN [mg/l]	173,32	136,28	74,14	68,68	69,22	70,02	
BE [EBC-Einh.]	219,23	43,57	39,59	39,71	42,96	39,3	
Farbe	10,24	11,4	9,54	13,68	16,05	12,07	
Polyphenole [mg/l]	219,23	225,27	204,84	212,83	225,76	207,23	
TBZ	59,94	58,15	49,14	49,05	48,55	48,57	
SO ₂ [mg/l]							5,0

**AH Tab. 5.1 c: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 2. Führung**

Gärdauer [h]	19	38	64	82	106	136
Stw. [Gew.%]	11,72	11,66	11,48	11,52	11,69	11,7
Es. [Gew.%]	10,63	7,82	3,34	2,91	2,82	2,79
Ew. [Gew.%]	10,81	8,55	4,9	4,55	4,52	4,49
Alk. [Vol.%]	0,62	2,09	4,33	4,58	4,72	4,75
Vgs. [%]	9,6	33,8	71,7	75,5	76,6	77
pH	4,58	4,34	4,17	4,19	4,23	4,24
Diacetyl [mg/l]		0,28	0,22	0,16	0,1	0,06
Pentandion [mg/l]		0,26	0,38	0,28	0,17	0,1
FAN [mg/l]	176,89	120,62	73,53	72,08	71,69	73,98
BE [EBC-Einh.]	43,88	42,38	38,26	40,31	39,63	40,34
Farbe	10,89	10,07	16,85	17,08	13,71	9,64
Polyphenole [mg/l]	237,18	244,57	237,51	246,08	234,04	246,38
TBZ	67,13	63,3	58,46	56,33	54,38	54,5
SO ₂ [mg/l]						5,88

**AH Tab. 5.1 d: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 3. Führung**

Gärdauer [h]	15	37	61	75	102	125
Stw. [Gew.%]	11,5	11,41	11,38	11,34	11,38	11,68
Es. [Gew.%]	10,52	7,29	3,22	2,67	2,54	2,59
Ew. [Gew.%]	10,67	8,08	4,78	4,32	4,23	4,33
Alk. [Vol.%]	0,56	2,23	4,34	4,61	4,69	4,84
Vgs. [%]	8,8	37	72,5	77,2	78,4	78,6
pH	4,57	4,38	4,21	4,22	4,24	4,22
Diacetyl [mg/l]	0,21	0,27	0,22	0,18	0,1	0,07
Pentandion [mg/l]	0,17	0,23	0,36	0,31	0,17	0,1
FAN [mg/l]	178,35	110,83	71,84	68,38	69,98	70,77
BE [EBC-Einh.]	48,5	43,1	40,79	40,79	41,99	44,28
Farbe	11,27	15,35	15,35	15,04	12,68	10,89
Polyphenole [mg/l]	234,76	234,48	233,87	240,68	241,85	240,9
TBZ	70,17	65,18	60,87	59,06	58,63	57,66
SO ₂ [mg/l]					3,1	

**AH Tab. 5.1 e: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 4. Führung**

Gärdauer [h]	7	32	56	75	99	108	155	179
Stw. [Gew.%]	k.A	11,35	11,4	11,46	11,2	11,21	11,23	11,37
Es. [Gew.%]	k.A	8,03	4,24	2,79	2,5	2,47	2,44	2,44
Ew. [Gew.%]	k.A	8,66	5,61	4,45	4,16	4,14	4,12	4,14
Alk. [Vol.%]	k.A	1,81	3,82	4,61	4,61	4,63	4,66	4,74
Vgs. [%]	k.A	30,1	63,8	76,5	78,4	78,6	79	79,2
pH	k.A	4,4	4,18	k.A.	4,23	4,24	4,22	4,23
Diacetyl [mg/l]	0,08	0,29	0,38	0,55	0,3	0,21	0,11	0,06
Pentandion [mg/l]	0,04	0,22	0,54	0,57	0,32	0,22	0,11	0,07
FAN [mg/l]	168,28	100,02	57,19	51,46	58,53	59,53	54,49	54,88
BE [EBC-Einh.]	24,08	20,8	16,02	16,63	18,12	17,95		23,09
Farbe	10,78	10,9	10,1	9,37	9,58	9,59	9,27	9,65
Polyphenole [mg/l]	207,4	220,89	215,61	224,07	218,04	221,23	214,89	217,39
TBZ	75,89	67,85	60,07	58,81	56,1	55,69	55,06	54,96
SO ₂ [mg/l]								4,4

**AH Tab. 5.1 f: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen: Gärung
5. Führung**

Gärdauer [h]	10	32	66	90	138	162	186
Stw. [Gew.%]	11,47	11,47	11,41	11,39		11,44	
Es. [Gew.%]	11,17	9,28	6,27	4,17		3,06	3,1
Ew. [Gew.%]	11,19	9,68	7,25	5,55		4,66	
Alk. [Vol.%]	0,19	1,2	2,77	3,85		4,46	
Vgs. [%]	2,5	19,6	46	64,3		74,1	
pH	4,75	4,52	4,4	4,37		4,38	
Diacetyl [mg/l]	0,07	0,28	0,27	0,22		0,08	
Pentandion [mg/l]	0,04	0,23	0,29	0,25	0,14	0,1	
FAN [mg/l]	210,68	170,53	145,51	139,21		137,35	
BE [EBC-Einh.]	65,26	64,26	43,41	69,91		52,09	
Farbe	11,51	11,52	11,15	9,57		9,84	
Polyphenole [mg/l]	215,03	218,06	222,22	209		218,75	
TBZ	81,34	71,91	66,53	63,91		59,85	
SO ₂ [mg/l]							7,6

**AH Tab. 5.1 g: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 6. Führung**

Gärdauer [h]	21	45	69	93	115	141	165
Stw. [Gew.%]	11,42	11,37	11,27	11,51	11,37	11,61	11,51
Es. [Gew.%]	10,36	6,57	3,06	2,73	2,55	2,66	2,67
Ew. [Gew.%]	10,53	7,49	4,63	4,4	4,24	4,39	4,36
Alk. [Vol.%]	0,6	2,59	4,36	4,67	4,68	4,75	4,7
Vgs. [%]	9,5	43,2	73,6	77,1	78,3	77,1	77,6
pH	4,64	4,27	4,13	4,16	4,17	4,23	4,17
Diacetyl [mg/l]		0,42	0,36	0,3	0,22		
Pentandion [mg/l]	0,19	0,32	0,41	0,5	0,33		
FAN [mg/l]	160,96	85,82	55,38		57,99	57,57	58,16
BE [EBC-Einh.]	49,71	41,25	38,68			42,01	
Farbe	10,23	10,47	13,58		9,4	9,36	8,18
Polyphenole [mg/l]	220,45	221,82	232,99	204,96		234,43	232,08
TBZ	59,85	55,54	53,03	41,72		51,43	55,4
SO ₂ [mg/l]					5,3		

**AH Tab. 5.1 h: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen:
Gärung 7. Führung**

Gärdauer [h]	60	82	109	130
Stw. [Gew.%]	11,52	11,56	11,48	11,51
Es. [Gew.%]	4,53	3,11	2,77	2,73
Ew. [Gew.%]	5,87	4,72	4,44	4,4
Alk. [Vol.%]	3,74	4,5	4,63	4,67
Vgs. [%]	61,7	74	76,6	77,1
pH	4,19	4,16	4,21	4,22
Diacetyl [mg/l]		0,26	0,19	0,08
Pentandion [mg/l]		0,29	0,26	0,19
FAN [mg/l]	102,41	97,1	96,6	96,8
BE [EBC-Einh.]				
Farbe	10,9	12,75	8,89	8,61
Polyphenole [mg/l]	237,6	244,9	234,41	239,8
TBZ	57,9	57,8	55,03	55,9
SO ₂ [mg/l]				2,7

**AH Tab. 5.1 i: Gärverlauf der Versuche über mehrere Hefeführungen: Gärung
11. Führung**

Gärdauer [h]	16	40	62	85	109	134	153
Stw. [Gew.%]	11,45	11,57	11,5	11,39	11,6	11,64	
Es. [Gew.%]	10,51	7,27	3,85	2,64	2,44	2,42	
Ew. [Gew.%]	10,65	8,09	5,32	4,31	4,26	4,26	
Alk. [Vol.%]	0,54	2,33	4,08	4,65	4,86	4,86	
Vgs. [%]	7,2	38,1	67,4	77,5	79	79,2	
pH	4,6	4,28	4,76	4,15	4,19	4,2	
Diacetyl [mg/l]	0,2	0,3	0,18	0,13	0,11	0,07	
Pentandion [mg/l]	0,21	0,32	0,29	0,23	0,19	0,13	
FAN [mg/l]	195,18	125,83	87,53	82,02	82,95	83,95	
BE [EBC-Einh.]	49,75	43,55	42,08	42,92	42,97	44,45	
Farbe	8,82	7,83	9	9,79	8	7,68	
Polyphenole [mg/l]	230,18	219,34	221,61	218,94	232,37	229,13	
TBZ	50,43	34,34	41,25	39,78	39,05	39,13	
SO ₂ [mg/l]							6,2

AH Tab. 5.1 j: Höhere Alkohole bestimmter Biere der Versuche über mehrere Hefeführungen in mg/l

	Reinzucht	1. Führung	3. Führung	5. Führung	6. Führung	7. Führung	11. Führung
Acetaldehyd	7	6,2	5,9	10	5,1	11	5,3
Propanol-1	15	12	14	6,9	15	13	12
Ethylacetat	12	15	21	27	18	30	29
2-Methylpropanol	16	15	17	13	17	20	18
3-Methylbutanol	51	47	55	46	59	72	60
2-Methylbutanol	14	13	15	17	16	21	18
2-Methylpropylacetat	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	1,6	1,8	3	3,1	2,2	4,1	3,4
2-Methylbutylacetat	0,1	0,2	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3
Hexansäurethalester	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3

AH Tab. 5.1 k: Bieraromastoffe bestimmter Biere der Versuche über mehrere Hefeführungen in µg/l

	Reinzucht	1. Führung	3. Führung	5. Führung	6. Führung	7. Führung	11. Führung
Hexanol-1	16,5	14,6	13,9	11,3	13,0	9,1	13,7
Heptanol-1	3,8	4,4	3,0	2,9	3,4	2,4	2,5
Octanol-1	15,5	11,9	12,7	8,4	11,0	11,0	20,6
Decanol-1	5,0	3,8	4,0	2,8	3,1	2,8	4,2
2-Phenylethanol	41600	44829	47942	31264	43051	36300	42109
Furfurylalkohol	264	152,0	237,0	147,4			
Essigsäure-Isobutylester	62	64,25	88,66	76,65	62,00	81,0	113,1
Essigsäure-Hexylester	6,3	6,5	8,1	9,5	5,2	8,60	8,6
Essigsäure-Heptylester	2,3	2,5	1,9	2,4	2,2	2,5	2,35
Essigsäure-Octylester	4,9	5,2	6,4	5,6	4,7	5,8	5,2
Essigsäure-Furfurylester	2,4	3	4	4	sp.	sp.	Sp.
Essigsre-2-Phenylethylester	675	791	1140	806	777	893	950,3
Buttersäure-Ethylester	69	73	78	91	52	71	124
Hexansäure-Ethylester	128	167	190	209	142	184	166
Octansäure-Ethylester	157	207	211	280	164	228	234
Decansäure-Ethylester	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	30	42	50
Isovaleriansäure	n.a.	33	30	n.a.	38	36	28
Hexansäure	1237	1260	1422	1728	1196	1266	1465,43
Octansäure	3855	4800	4866	6405	3638	4504	5681,4
Nonansäure	12	9	8	11	9	11	12,9
Decansäure	427	684	677	1367	559	734	930,36
Dodecansäure	9	17	17	32	125	133	240,36
α-Terpineol	2,6	1,8	n.a.	1,5	9,0	4,9	4,78
Linalool	8,4	9	9	11	11	11	13,0
Nerol	4,3	3,8	3,1	3,3	6,2	4,6	3
g-Nonalacton	30	28	29	22	n.a.	n.a.	7,3

AH Tab. 5.1 I: Alterungsindikatoren bestimmter frischer Biere der Versuche über mehrere Hefeführungen in µg/l

		Reinzucht	1. Führung	3. Führung	5. Führung	6. Führung	7. Führung	11. Führung
2-Methyl-Butanal		13,1	89,9	7,5	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	10	14	11	17	7	12	9,3
2-Furfural	(W,A)	11	11	11	12	12	11	10
5-Methyl-Furfural	(A)	6,7	6,6	5,6	6,5	5,1	4,6	6,9
Benzaldehyd	(S,A)	1,1	1,2	0,8	1,2	0,8	1,0	1,3
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	1	8	4	1	4	8	5,7
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,5	6,0	5,9	7,6	1	2	1,8
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		2	2	2	n.a.	3	2	7,0
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	1,2	0,9	0,9	n.a.	1	1	1,0
2-Acetyl-Furan	(A)	6,8	7,8	8,3	8,3	5	5	5,9
2-Propionyl-Furan	(A)	n.a.	n.a.	0,9	n.a.	sp.	sp.	0,9
gamma-Nonalacton	(W,A)	32	28	28	30	27	25	37
Summe der Wärmeindikatoren		43	39	39	42	39	36	47
Summe der Sauerstoffindikatoren		12	23	16	20	11	22	16
Summe der Alterungskomponenten		75	83	76	84	61	69	80

AH Tab. 5.1 m: Alterungsindikatoren bestimmter forciert gealterter Biere der Versuche über mehrere Hefeführungen in µg/l

		Reinzucht	1. Führung	3. Führung	5. Führung	6. Führung	7. Führung	11. Führung
2-Methyl-Butanal		14,7	86,3	8,9	12,4	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	(S,A)	13	17	15	24	11	16	12,0
2-Furfural	(W,A)	109	118	133	84	130	137	97,0
5-Methyl-Furfural	(A)	6,9	7,1	7,1	7,7	6,3	5,4	7,4
Benzaldehyd	(S,A)	0,9	1,7	1,3	1,0	0,8	1,2	1,0
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	8	11	7	10	5	11	7,3
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	5,5	6,0	6,4	8,0	1	2	1,6
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		11	12	11	12	8	7	13,0
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	1,5	1,2	1,2	1,2	1	1	1,5
2-Acetyl-Furan	(A)	9,5	10,5	12,4	10,6	7	7	7,9
2-Propionyl-Furan	(A)	1,6	1,4	1,7	0,9	sp.	sp.	2,4
gamma-Nonalacton	(W,A)	42	40	42	38	36	33	48,0
Summe der Wärmeindikatoren		151	158	175	122	166	170	145
Summe der Sauerstoffindikatoren		22	29	23	35	17	28	20
Summe der Alterungskomponenten		198	213	227	185	199	214	186

Literaturverzeichnis

1. Thiele, F., Schneeberger, M., Back, W.: Physiologischer Zustand von Hefeproben aus verschiedenen Brauereien. *Brauwelt*, 2007. 147(18/19): p. 470–473.
2. Back, W., Imai, T., Forster, C., Narziß, L.: Hefevitalität und Bierqualität. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1998. Nr. 11/12, : p. S. 189-195.
3. Thiele, F.: Einfluß der Hefevitalität und der Gärparameter auf die Stoffwechselprodukte der Hefe und die Geschmacksstabilität. Dissertation TUM, 2007.
4. Franz, O.: Systematische Untersuchung zur endogenen antioxidativen Aktivität von hellem, untergärigem Bier unter besonderer Berücksichtigung technologischer Maßnahmen beim Brauprozeß. München, Technische Universität, Dissertation, 2004.
5. Back, W.: Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie. 2005, Nürnberg: Fachverlag Hans Carl.
6. Kunze, W.: *Technologie Brauer und Mälzer*. 7. völlig neu bearbeitete Auflage ed. 1994, Berlin: Versuchs und Lehrbrauerei Verlag.
7. von Nida, L.: Aerobe Hefeherführung. *Brauwelt*, 1996(36): p. 1685–1688.
8. Schmidt, H.-J.: Beschleunigte Herführung von Reinzuchthefen. *Brauwelt*, 1993. 445-45/1993: p. 2254-2274.
9. Westner, H., Kuplent, F.: Die Hefevermehrung in der Brauerei - Eine Übersicht. *Brauwelt*, 1999. 35: p. 1563-1566.
10. Geiger, E.: Kontinuierliche Hefevermehrung. *Brauwelt*, 1993(16): p. 646–649.
11. Wackerbauer, K.: Referat. *Brauwelt*, 1987. 32: p. 1419-1421.
12. Wackerbauer, K., Evers, H., Kunerth, S.: Hefepropagation und Aktivität der Reinzuchtheffe. *Brauwelt*, 1996. 136(37): p. 1736–1743.
13. Back, W., Bohak, I., Ackermann, T.: Optimierte Hefewirtschaft. *Brauwelt*, 1993(39): p. 1960–1963.
14. Vetterlein, K.: Hefeassimilation - Aspekte eines modernen Hefemangements. Vortrag Bad Kissinger Brauertag 2002. *Brauwelt*, 2002. 22/2202: p. 745.
15. Firmenprospekt, Firmenprospekt Fa. Heinrich Frings GmbH & Co. KG, D-53115 Bonn.
16. Internetquelle,
<http://www.frings.com/wDeutsch/hefetechnik/hefetechnik.shtml?navid=75>.
17. Westner, H., Firmeninformation KHS Maschinen- und Anlagenbau AG, D-55543 Bad Kreuznach.
18. Pejtersen, O.C.: Beer drinkers benefit from good yeast propagation. *The Alfa Laval International customer magazin*, 2006.
19. Back, W., Forster, C.: Hefemanagement und Anstelltechnologie mit ihren Auswirkungen auf Geschmack und Geschmacksstabilität. in *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1999.
20. Kühnl, H.: Hefemanagement. *Brauindustrie*, 2003(11): p. 34–37.
21. Böe, K.: Optimierte Hefepropagation. *Brauindustrie*, 2003(11): p. 38–39.
22. Lehmann, J., Back, W.: Praktische Umsetzung der Hefeassimilation. *Brauindustrie*, 1997(4): p. 225–228.

23. Wening, H., Pötzl, E.: Modernes Hefemanagement. Brauwelt, 2007. 147(46): p. 1366–1369.
24. McLaren, J., Fischborn, T., Briem, F., Englmann, J., Geiger, E.: Zinc-enriched yeast for the wort in beer brewing. Brauwelt, 1999. 139(45/46): p. 2158–2160.
25. Jakob, M.: Hefevitalität. Brauindustrie, 2005. 5/2005: p. 14-17.
26. Speckner, J.: Hefereinzucht. Brauindustrie, 2002. 11/2002: p. 20-23.
27. Kaufmann, B., Hopulele, D.: Eintank-Hefereinzucht in der Praxis. Brauwelt, 2005. 34-35/2005: p. 1092-1093.
28. Matthes, H.R.: Züchterfolge. Brauindustrie, 2002. 4/2002: p. 26-27.
29. Westner, H.: Ein-Tank- oder Zwei-Tank-Verfahren? Brauindustrie, 2000. 2: p. 83-86.
30. Brandl, J.: Hefereinzucht, Hefeführung, Hefeaufbewahrung. Brauwelt, 1994. 45/1994: p. 2470-1596.
31. Vetterlein, K., Back, W.: Praxiserfahrung mit der Assimilationstechnik. Der Weihenstephaner, 1999. 3: p. 134-137.
32. Forster, C., Back, W.: Hefemangement und Anstelltechnologie mit ihren Auswirkungen auf Geschmack und Geschmacksstabilität. Proceedings of the Congress - European Brewery Convention. 1999.
33. Geiger, E.: Optimierung der Hefetechnologie. Brauwelt, 2002. 44: p. 1594.
34. Lehmann, J.: Assimilation untergäriger Hefe. Brauwelt, 1996. 13: p. 606-607.
35. Thiele, F., Prof. Dr.-Ing. Back, W.: Die Assimilationstechnik als Basis für ein optimales Hefemangement. Brauwelt, 2005. 50/2005: p. 1594-1598.
36. Annemüller, G., Manger, H.-J.: Die Belüftung der Hefereinzucht - maximal ist nicht gleich optimal! Brauwelt, 1999. 139(21-22): p. 993–1007.
37. Zepf, M., Geiger, E., Nieten, I.: Parametersteuerung bei der aeroben Hefevermehrung. Brauwelt, 2000. 44: p. 1849-1851.
38. Schmidt, H.: Modernes Hefemanagement. Brauwelt, 1995. 14/1995: p. 652-654.
39. n.n.: Weltweit größte Hefepropagation. Brauwelt, 2000. 46-47: p. 2052.
40. Franke, P., Frischmann, P.: Abschließende Darstellung eines geförderten Forschungs- und Entwicklungsvorhabens im Bereich Biotechnologie-Brauwesen. Brauwelt, 1991. 17/1991: p. 684-686.
41. Nielsen, O.: Hefe-Propagation: Theorie und Praxis Teil 2. Brauwelt, 2004. 38/2004: p. 1162-1163.
42. Cholerton, M.: Yeast management under high-gravity brewing conditions. Technical Quarterly & the MBAA Communicator, 2003. 40(3): p. 181–185.
43. Wackerbauer, K.: Die Propagation der Hefe. Brauwelt, 2002. 23/24: p. 785-796.
44. Annemüller, G., Manger, H.-J.: Grenzen und Konsequenzen der Hefevermehrung in Bierwürze. Brauwelt, 1998(49/50): p. 2478–2481.
45. Smart, K.: Brewing Yeast Fermentation Performance - Second Edition. Blackwell Publishing. 2003.
46. Bouton, C., Quain, D.: Brewing Yeast & Fermentation. Blackwell Publishing Ltd, 2006.
47. David, M.H., Kirsop, B., H.: Yeast growth in relation to the dissolved Oxygen and sterol content of wort. J. Inst. Brew., 1979. 79: p. 20-25.
48. Pötzl, E.: Hefevitalisierung. Brauwelt, 1998(31/32): p. 1448–1450.

49. Kurz, T., Mieleitner, J., Becker, T., Delgado, A.: A model based simulation of brewing yeast propagation. *Journal of the Institute of Brewing*, 2002. 108(2): p. 248–255.
50. Fischborn, T., McLaren, J., Geiger, E., Briem, F., Glass, K., Engelmann, J.: *Servomyces - A Biological Nutrient*. Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas, 2004. 41(4): p. 366–370.
51. Cahill, G., Murray, D.M., Walsh, P.K., Donnelly, D.: Effect of the concentration of propagation wort on yeast cell volume and fermentation performance. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2000. 58(1): p. 14–20.
52. Nielsen, O.: Control of the Yeast Propagation Process - How to Optimize Oxygen Supply and Minimize Stress. Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas, 2005. 42(2): p. 128–132.
53. Quain, D.E., Boulton, C.A.: The propagation of yeast on oxidative carbon sources - advantages and implications. *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1987.
54. Van Zandycke, S., Siddique, R., Smart, K.A.: The role of the membrane in predicting yeast quality. *Technical Quarterly & the MBAA Communicator*, 2003. 40(3): p. 169–173.
55. van Zandycke, S.: Hefestress in allen Stadien. *Brauwelt*, 2003. 9/10: p. 251.
56. Wackerbauer, K., Tayama, T., Fitzner, M., Kunerth, S.: Zeitgemäßes Management der Anstellhefe. Förderung von Vitalität und Gäraktivität der Hefe (Teil 1). *Brauwelt*, 1997. 137(3): p. 80–87.
57. Kieninger, H., Parsche, I.: Behandlung der Hefe - Auswirkungen auf die Bierqualität. *Brauwelt*, 1984. 124(7): p. 242–250.
58. Kieninger, H., Durner, G.: Bitter- und Gerbstoffgehalte von Erntehefen. Untersuchungen bei mehrmaliger Führung. *Brauwelt*, 1981. 121(13): p. 434–438.
59. Schmidt, H.: Hefe und Gärung. *Brauwelt*, 1996. 9: p. 414–416.
60. Narziß, L.: *Abriß der Bierbrauerei*. 5., ergänzte Auflage; Ferdinand Enke Verlag Stuttgart 1986. 1986.
61. Cunningham, S., Stewart, G.G.: Effects of high-gravity brewing and acid washing on brewers' yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1998. 56(1): p. 12–18.
62. Stewart, G.G.: Yeast Management - The Balance Between Fermentation Efficiency and Beer Quality. Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas, 2001. 38(1): p. 47–53.
63. van Bergen, B., Sheppard, J.D.: The effect of acid washing and fermentation gravity on mechanical shear resistance in brewing yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2004. 62(2): p. 87–91.
64. McCaig, R., Bendiak, D.S.: Yeast handling studies. II. Temperature of storage of pitching yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1985. 43(2): p. 119–22.
65. Eils, H.-G., Eidtmann, A., Back, W.: Massnahmen zur Verbesserung der Hefetechnologie und Umsetzung in der Praxis. *Brauwelt*, 2000. 140(15): p. 590–595.
66. Back, W., Imai, T., Forster, C., Narziß, L.: Hefevitalität und Bierqualität. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1998. 51(11/12): p. 189–195.

67. Geiger, E., Tenge, C.: Optimierungsaspekte der Hefetechnologie. *Brauwelt*, 2004. 8 (2004): p. 185-187.
68. Heggart, H.M., Margaritis, A., Pilkington, H., Stewart, R.J., Dowhanick, T.M., Russell, I.: Factors Affecting Yeast Viability and Vitality Characteristics: A Review. *Technical Quarterly Master Brewers Association of America*, 1999. 36(4): p. 383–406.
69. Stoupis, T., Stewart, G.G., Stafford, R.A.: Mechanical agitation and rheological considerations of ale yeast slurry. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2002. 60(2): p. 58–62.
70. Powell, C.D., Quain, D.E., Smart, K.A.: The impact of sedimentation on cone yeast heterogeneity. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2004. 62(1): p. 8–17.
71. Powell, C.D., Quain, D.E., Smart, K.A.: The impact of yeast cell age on fermentation, attenuation and flocculation, in *Brewing Yeast Fermentation Performance (2nd Edition)*, K.A. Smart, Editor. 2003, Blackwell Science Ltd.: Oxford. p. 272–280.
72. Mönch, D., Krüger, E., Stahl, U.: Wirkung von Streß auf Brauereihefen. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1995. 48(9–10): p. 288–299.
73. Jenkins, C., Kennedy, A.I., Thurston, P.A., Hodgson, J.A., Smart, K.A.: Impact of wort composition and serial repitching on lager brewing yeast fermentation performance and organelle integrity. *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 2001.
74. Powell, C.D.: Diacetis, A.N., Long term serial repitching and the genetic and phenotypic stability of Brewer's yeast. *Journal of the Institute of Brewing*, 2007. 113(1): p. 67–74.
75. n.n.: Einsatz von Belüftungsdüsen. *Brauwelt*, 1996. 38/39: p. 1829.
76. Ohno, T., Takahashi, R.: Role of wort aeration in the brewing process. Part 1: Oxygen uptake and biosynthesis of lipid by the final yeast. *Journal of the Institute of Brewing*, 1986. 92(1): p. 84–87.
77. Sall, C.J., Seipp, J.F., Pringle, A.T.: Changes in brewers' yeast during storage and the effect of these changes on subsequent fermentation performance. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1988. 46(2): p. 23–25.
78. Cantrell, I.C., Anderson, R.G.: Yeast performance in production fermentations. *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1983.
79. Murray, C.R., Barich, T., Taylor, D.: The effect of yeast storage conditions on subsequent fermentations. *Technical Quarterly Master Brewers Association of America*, 1984. 21(4): p. 189–194.
80. Edgerton, J.: The impact of bitterness on the viability of harvested yeast. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2005. 63(1): p. 28–30.
81. Daisuke, F., Tamai, Y.: Aeration Prior to Pitching Increases Intracellular Enzymatic and Transcriptional Responses Under Nonnutritional Conditions. *ASBC*, 2003. 61: p. 99-104.
82. Alexandre, H., Plourde, L., Charpentier, C., Francois, J.: Lack of correlation between trehalose accumulation, cell viability and intracellular acidification as induced by various stresses in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology-Sgm*, 1998. 144: p. 1103–1111.

83. Lustig, S., Eidtmann, A.: Technological Factors to improve Fermentation performance an beer quality. European Brewery Convention, 1999. Monograph 28: p. 128-137.
84. Boulton, C., Quain, D.: Handle with Care. *Brewers Guardian*, 2007. 136/10: p. 20-26.
85. Schütz, M., Hartmann, K., Herrmann, M., Keßler, M., Kreis, S., Krottenthaler, M., Schneeberger, M., Thiele, F., Zarnkow, M., Back, W., Mezger, R.: Analytische Kontrollmöglichkeiten technologischer Prozesse, Teil 2. *Brauwelt*, 2006. 146(11): p. 312–316.
86. Lösche, A., Baron, C.: Prozessoptimierung mittels Durchflusszytometrie. *Brauwelt*, 2005(6): p. 138–142.
87. Carvel, J., Siems, G.: Studie zur Verwendung des Yeats Minotor für die automatisierte Hefedosage. *Brauwelt*, 2006. 31-32: p. 928-930.
88. Thiele, F., Back, W.: Assimilation technology as a basis for optimum yeast management. *Brauwelt International*, 2007. 25(2): p. 82–85.
89. Speck, J.: Hefemanagement mit Touch. *Brauwelt*, 2002. 3 (2002): p. 58-60.
90. Sasaki, N., Yasuda, Y., Imai, T., Takeuchi, T., Ohkochi, M.: The effect of wort aeration using a high oxygen concentration on fermentation, yeast physiology and the quality of the finished beer. *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas*, 2000. 37(1): p. 27–30.
91. Lustig, S.: Das Verhalten flüchtiger Aromstoffe bei der Lagerung von Flaschenbier und deren technologische Beinflussung beim Brauprozess, in Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft. 1994, Technische Universität München: Freising-Weihenstephan.
92. Nordlöv, H.: Formation of sulfur dioxide during beer fermentation. in *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1985.
93. Narziß, L., Reicheneder, E., Nothaft, H.: Über den Schwefeldioxidgehalt des Bieres. *Brauwelt*, 1982. 122(12): p. 502–519.
94. Wedzicha, B.L.: *Chemistry of sulfur dioxide in foods*. London - Elsevier:Applied Science Publishers 1984: p. 10.
95. Hysert, D.W., Morrison, N.M.: Sulfate metabolism during fermentation. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1976. 34(1): p. 25–31.
96. Thomas, D., Surdin-Kerjan, Y.: Metabolism of sulfur amino acids in *Saccharomyces cerevisiae*. *Microbiology and molecular biology reviews* : MMBR, 1997. 61(4): p. 503–532.
97. Dufour, J.P.: Influence of industrial brewing and fermentation working conditions on beer sulfur dioxide level and flavor stability. in *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1991.
98. Duan, W., Roddick, F.: A parallel analysis of H₂S and SO₂ formation by brweing yeast in response to sulfur-containing amino acids and ammonium ions. *ASBC*, 2004. 62/1: p. 36.
99. Wurzbacher, M., Franz, O., Back, W.: Control of sulphite formation of lager yeast. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 2005. 59(11/12): p. 10–17.
100. Narziß, L., Reicheneder, E., Nothaft, H.: Über den Schwefeldioxidgehalt des Bieres. *Brauwelt*, 1982. 122(15): p. 627–636.
101. Angelino, S.A.G.F., Mockingbode, H.C.M., Vermeire, H.A.: Activity of Sulfate-Metabolizing Enzymes and Sulfur-Dioxide Formation during Main

- Fermentation. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1989. 42(12): p. 476–481.
102. Brewer, J.D., Fenton, M.S.: The formation of sulfur dioxide during fermentation. *Proceedings of the Convention - Institute of Brewing (Asia Pacific Section)*, 1980. 16th: p. 155–164.
103. Pickerell, A.T.W., Hwang, A., Axcell, B.C.: Impact of yeast-handling procedures on beer flavor development during fermentation. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1991. 49(2): p. 87–92.
104. Narziß, L.: Flüchtige Schwefelsubstanzen. *Brauwelt*, 1996. 9: p. 409-411.
105. Bößendorfer, G., Birkenstock, B., Thalacker, R.: Ein Beitrag zur Geschmacksstabilität des Bieres. *Brauwelt*, 2001. 27/28 (2001): p. 1042-1047.
106. Taschan, H., Lenz, B., Muskat, E.: Schwefeldioxid in Bieren. *Brauwelt*, 1991. 40/1999: p. 1744-1759.
107. Gyllang, H., Winge, M., Korch, C.: Regulation of SO₂ Formation During Fermentation. in *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1989.
108. Narziß, L., Miedaner, H., Lustig, S.: Das Verhalten flüchtiger Aromastoffe bei der Alterung des Bieres. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1999. 52(9/10): p. 164–175.
109. Forster, C., Back, W.: Untersuchungen über den Einfluß der Anstell- und Belüftungstechnik zylindrokonischer Gärtanks auf die antioxidative Aktivität von Bier. *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention*. 1999.
110. Tenge, C., Geiger, E.: Effects of different aeration techniques in pitching technology. *Brauwelt International*, 2007. 25(2): p. 86–89.
111. Narziß, L.: *Abriss der Bierbrauerei*. 7., aktualisierte und erweiterte Auflage ed. 2004, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH.
112. Bushnell, S.E., Guinard, J.X., Bamforth, C.W.: Effects of sulfur dioxide and polyvinylpyrrolidone on the flavor stability of beer as measured by sensory and chemical analysis. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2003. 61(3): p. 133–141.
113. Forster, C., Schwieger, J., Narziß, L., Back, W., Uchida, M., Ono, M., Yanagi, K.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität von Bier mittels Elektronenspinresonanz-Spektroskopie freier Radikale. *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 1999. 52(5/6): p. 86–93.
114. Foster, R.T., Samp, E.J., Patino, H., Barr, D.P.: Electron paramagnetic resonance (EPR) profiling for potential flavor stability improvements in beer. *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas*, 2001. 38(4): p. 247–250.
115. Wurzbacher, M., Back, W.: ESR-Analytik zur Brauereiprozesskontrolle hinsichtlich der Geschmacksstabilität. *Brauwelt*, 2007. 147(22): p. 594–599.
116. Ilett, D.R.: Aspects of the analysis, role, and fate of sulfur dioxide in beer - a review. *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas*, 1995. 32(4): p. 213–221.
117. Andersen, M.L., Outtrup, H., Skibsted, L.H.: Potential antioxidants in beer assessed by ESR spin trapping. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000. 48(8): p. 3106–3111.

118. Uchida, M., Ono, M.: Determination of hydrogen peroxide in beer and its role in beer oxidation. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1999. 57(4): p. 145–150.
119. Kaneda, H., Osawa, H., Kawakishi, S.: Contribution of carbonylbisulfit adducts to beer stability. *J. Agric. Food Chem.*, 1994. 42: p. 2428.
120. Barker, R.L., Gracey, D.E.F., Irwin, A.J., Pipasts, P., Leiska, E.: Liberation of Staling Aldehydes during Storage of Beer. *Journal of the Institute of Brewing*, 1983. 89(6): p. 411–415.
121. Kaneda, H., Osawa, T., Kawakishi, S., Munekata, M., Koshino, S.: Contribution of Carbonyl-Bisulfite Adducts to Beer Stability. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1994. 42(11): p. 2428–2432.
122. Dufour, J.P., Leus, M., Baxter, A.J., Hayman, A.R.: Characterization of the reaction of bisulfite with unsaturated aldehydes in a beer model system using nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1999. 57(4): p. 138–144.
123. Miedaner, H.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band II. Vol. 4. Auflage, neubearbeitet und ergänzt. 2002, Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK.*
124. Pfenninger, H.B.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band III. Vol. 2. Auflage, vollständig neubearbeitet. 1996, Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK.*
125. Thum, B., Back, W.: Schonende Analysenmethoden zur Quantifizierung von Schlüsselaromastoffen in Bier. *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention. 1999.*
126. Kaltner, D.: Untersuchungen zur Ausbildung des Hopfenaromas und technologische Maßnahmen zur Erzeugung hopfenaromatischer Biere, in Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. Dissertation, 2000, Technische Universität München: Freising.
127. Pfenninger, H.B.: *Brautechnische Analysemethoden, Band II. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 2002.*
128. Imai, T., Nakajima, I., Ohno, T.: Development of a new method for evaluation of yeast vitality by measuring intracellular pH. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1994. 52(1): p. 5–8.
129. Thiele, F., Back, W.: Measurement of yeast vitality using a modified version of the intracellular pH measurement (ICP). *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 2005. 58(1/2): p. 2–5.
130. Schneeberger, M.: *Verwertung von Prozeßbieren in der Brauerei. Dissertation TUM, 2006.*
131. Herrmann, M.: Entstehung und Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe bei der Herstellung von Weißbier, in Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. Dissertation, 2005, Technische Universität München: Freising-Weihenstephan.
132. Schuch, C.: Temperaturverteilung in zylindrokonischen Tanks. *Brauwelt*, 1996. 13 (1996): p. 594-597.