

Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I der  
Technischen Universität München

## **Verwertung von Prozessbieren in der Brauerei**

Mark Schneeberger

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 (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Sommer

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Werner Back
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Roland Meyer-Pittroff
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Wackerbauer (em.), Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 07.06.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 02.08.2006 angenommen.

„Ob ein Nebenprodukt „Abfall“ ist, ist eine Frage der Verwertbarkeit.“  
H. Zucker, 1976

## VORWORT

Die vorliegende Arbeit wurde im Zeitraum von Juli 2002 bis März 2006 am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I und Getränketechnologie der Technischen Universität München in Weihenstephan angefertigt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Werner Back ganz herzlich für die großzügige Unterstützung dieser Arbeit bedanken. Seine allzeitige wissenschaftliche Unterstützung und seine äußerst angenehme Art, mit Menschen umzugehen, waren für mich immer ausgesprochen hilfreich und wichtig.

Herrn Prof. Dr. Meyer-Pittroff und Herrn Prof. Dr. Wackerbauer danke ich für die Übernahme des Koreferates, Herrn Prof. Dr. Sommer für die Übernahme des Vorsitzes.

Herrn Prof. em. Dr. Ludwig Narziss danke ich ebenfalls sehr für die wertvollen Berichte zur Verwertung von Prozessbieren aus seiner langjährigen Berufserfahrung. Auch für Fragestellungen aus anderen brauereitechnologischen Bereichen hatte Herr Prof. Narziss stets ein offenes Ohr.

Meinem Betreuer, Herrn Dr.-Ing. Martin Krottenthaler, sei ein großes Dankeschön ausgesprochen. Die wichtigen wissenschaftlichen Ratschläge und vor allem sein beharrliches „Beknien“ zum Schreiben von Veröffentlichungen waren sehr hilfreich bei der Erstellung dieser Arbeit.

Für die Unterstützung bei verschiedensten administrativen Aufgaben danke ich besonders Frau Daniela Schulte und Frau Claudia Gün.

Ein besonderer Dank gilt auch meinen Kolleginnen und Kollegen am Institut. Vor allem deren große Bereitschaft, die teilweise nicht uneingeschränkt trinkbaren Biere zu verkosten, wusste ich sehr zu schätzen. Namentlich sei hierfür gedankt: Frau Dr.-Ing. Christina Schönberger, Frau Dipl.-Ing. Martina Schütz, sowie den Herren Dipl.-Ing. Sascha Wunderlich, Dipl.-Ing. Michael Wurzbacher, Dipl.-Ing. Stefan Hanke, Dipl.-Ing. Dipl.-Chem. Florian Kühbeck, Dipl.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Frithjof Thiele, Dr.-Ing. Martin Krottenthaler, Dipl. Brmst. Gernot Berngruber, Dr. rer. nat. Markus Herrmann, Dr.-Ing. Oliver Franz, Dipl.-Ing. Elmar Spieleder, Dipl. Brmst. Felix Burberg, Dr. rer. nat. Ralf Mezger, Dipl.-Ing. Matthias Kessler, Dipl.-Ing. (FH) Martin Zarnkow, Dipl.-Ing. Klaus Hartmann, Dr.-Ing. Stefan Kreis, Dr.-Ing. Torsten Dickel und Dr.-Ing. Achim Zürcher. Den Mitgliedern des Verkosterteams „Hefebiere“ (Ollie, Markus, Michael und Frithjof) sei ein besonderer Dank ausgesprochen.

Bei den Mitarbeiterinnen des GC-Labors, Frau Michaela Marschmann und Frau Doreen Besthorn möchte ich mich ganz herzlich für die angenehme Arbeitsatmosphäre im GC-Labor und für die Unterstützung bei der Einarbeitung in die Probenvorbereitungen für die Aromastoffbestimmungen bedanken. Herrn Dr.-Ing. Oliver Franz danke ich für die intensive Einarbeitung in die Funktionsweise des ESR-Gerätes. Herrn Dr. rer. nat. Markus Herrmann sei ein besonderer Dank für die sehr gute Betreuung und Unterstützung bei den Aromaextraktverdünnungsanalysen ausgesprochen. Danke den Mitarbeiterinnen der Bierlabors, Frau Monika Braasch und Frau Johanna Biechele, für die Übernahme und Durchführung von Routineanalysen sowie deren Geduld bei der Einweisung in verschiedenste

Analysenmethoden. Danke auch den Mitarbeiterinnen des Malzlabors, Frau Saskia Marks und Frau Daria Kraus, für deren Unterstützung bei den zahlreichen Messungen am „Anton“. Herrn Dipl.-Ing. Frithjof Thiele danke ich sehr herzlich für die Unterstützung bei der Einarbeitung in die Bestimmungsmethoden des physiologischen Zustandes von Hefezellen. Den Herren Dipl. Brmst. Gernot Berngruber und Anton Pichlmeier sei ebenfalls ein besonderer Dank für die Einweisung in die verschiedenen Sudwerke und sonstigen brautechnischen Einrichtungen des Instituts ausgesprochen.

Meinen Diplomanden und Semesterarbeitern, Herrn Dipl. Brmst. Roland Lange, Herrn Dipl. Brmst. Daniel Haag, Herrn Dipl.-Ing. Axel Hartwig, Herrn Dipl.-Ing. Patrick Bahns und Herrn cand.-Ing. Matthias Meyer, danke ich sehr für die gewissenhafte und fleißige Durchführung ihrer Arbeiten.

Der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V. sei für die großzügige finanzielle Unterstützung und dem wissenschaftlichen Gremium, Bereich Aromastoffe, für die wertvollen Diskussionsbeiträge innerhalb der turnusmäßigen Sitzungen sehr herzlich gedankt.

Die vorliegende Arbeit wurde tatkräftig durch internationale Brauereien bzw. Maschinenbauunternehmen unterstützt. So konnten die vielen Versuche zur Rückgewinnung von Hefebieren aus Überschusshefen oder auch die Dosageversuche von Prozessbieren im großtechnischen Maßstab überhaupt erst ermöglicht werden. Dafür sei folgenden Unternehmen ein ausdrücklicher Dank ausgesprochen: Fa. Filtrox, Fa. Flottweg, Alpirsbacher Klosterbräu, Bavaria Lieshout, Binding Brauerei, Brauerei Beck&Co., Dinkelacker-Schwabenbräu, Eichbaum Brauerei, Flensburger Brauerei, Fürstlich Fürstenbergische Brauerei, Brauerei Kitzmann, Spaten-Franziskaner Bräu, Staatsbrauerei Weihenstephan und Zipfer Brauerei.

Für die Durchsicht der Arbeit danke ich sehr herzlich Christof Schmitz und Markus Herrmann. Meiner Familie danke ich für die immerwährende menschliche und finanzielle Unterstützung. Nicht zuletzt gilt mein Dank meiner Frau Regina, die mich in großartiger Weise unterstützt und damit sehr zum Zustandekommen dieser Arbeit beigetragen hat.

Euer

Mark Schneeberger

## VERÖFFENTLICHUNGEN

Mark Schneeberger, Werner Back und Martin Krottenthaler: Aspects of internal recycling of recoverable yeast beer. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft*, 59 (9/10), 2006, S. 148–162

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Der Einfluss der Aufbewahrungsbedingungen der Hefesuspension auf die Qualität des darin enthaltenen, wiedergewinnbaren Hefebieres. In: *Brauwelt*, 144 (38), 2004, S. 1148–1151

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Effect of the Storage of Surplus Yeast on the Quality of Recoverable Yeast Beer. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly*, Vol. 42, No. 3, 2005, S. 219–222

Mark Schneeberger: Prozessbiere. In: Back, W. (Hrsg.): *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*, 2005, S. 275–287, Fachverlag Hans Carl, Nürnberg

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Hefebier aus Überschusshefe. In: *Brauwelt*, 145 (45), 2005, S. 1479–1483

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Anlagentechnische Aspekte zur Hefebierrückgewinnung. In: *Der Weihenstephaner*, 73 (4), 2005, S. 140–143

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Recuperación de Cerveca de Levadura a Descartar. In: *Brauwelt en Español*, 10 (2), 2006, S. 66–69

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Anlagentechnische Aspekte zur Hefebierrückgewinnung. In: *Brauwelt China*, 2, 2006, S. 46–49

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Anlagentechnische Aspekte zur Hefebierrückgewinnung. In: *Brauwelt Russland*, 2, 2006, S. 13–18

Mark Schneeberger, Martin Krottenthaler und Werner Back: Recuperación de cerveza de restos en las salas de cocimiento. In: *Cerveza y Malta*, XLIII (1), 169, 2006, S. 23–26

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>GRUNDLAGEN</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1</b>	<b>Prozessbierbehandlung in der Brauerei</b> .....	<b>8</b>
2.1.1	Stand der Technik der Prozessbierbehandlung in der Brauerei .....	8
2.1.2	Behandlung der Ernte- und Gelägerhefe .....	9
2.1.3	Behandlung von Hefebier .....	12
2.1.4	Behandlung von Vor-, Zwischen- und Nachläufen aus der Filtration .....	14
2.1.5	Behandlung von Rückbieren und Prozessbieren aus dem Abfüllbereich .....	15
2.1.6	Behandlung von trübem oder verdorbenen (sauerm) Prozessbier .....	16
<b>2.2</b>	<b>Verfahren zur Gewinnung von Hefebier aus Überschusshefe</b> .....	<b>17</b>
2.2.1	Wirkungsgrad und Ausbeute der Trennverfahren .....	17
2.2.2	Verfahren auf Basis der Schwerkraft bzw. der Zentrifugalkraft.....	18
2.2.2.1	natürliche Sedimentation .....	20
2.2.2.2	Dekantier-Zentrifuge .....	21
2.2.2.3	Teller-Zentrifuge .....	22
2.2.3	Verfahren auf Basis der Filtration .....	23
2.2.3.1	Kammerfilterpresse .....	23
2.2.3.2	Cross-Flow-Mikrofiltration .....	24
2.2.3.3	Vibrations-Mikrofiltration .....	27
2.2.3.4	Rotierender Scheibenfilter .....	27
<b>3</b>	<b>PROBLEMSTELLUNG</b> .....	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAL UND METHODEN</b> .....	<b>30</b>
<b>4.1</b>	<b>Würze- und Bierbereitung</b> .....	<b>30</b>
<b>4.2</b>	<b>Chemisch-technische Analysen</b> .....	<b>30</b>
4.2.1	Malzanalytik.....	30
4.2.2	Würze- und Bieranalytik.....	31
<b>4.3</b>	<b>Elektronenspinresonanz-Spektrometrie</b> .....	<b>32</b>
4.3.1	Bestimmung der endogenen, antioxidativen Aktivität von Bier .....	32
4.3.2	Bestimmung des antiradikalischen Verhaltens von Bier .....	32
4.3.3	Bestimmung des antiradikalischen Potentials von Bier.....	33
4.3.4	Bestimmung des Stabilitäts-Index.....	33
<b>4.4</b>	<b>Chromatographische Analysen</b> .....	<b>33</b>
4.4.1	Hochdruckflüssigkeitschromatographie .....	33
4.4.1.1	Bestimmung der Aminosäuren .....	33
4.4.1.2	Bestimmung der $\alpha$ - und iso- $\alpha$ -Säuren.....	34
4.4.1.3	Bestimmung der Purine .....	34
4.4.2	Kapillargaschromatographie .....	36

4.4.2.1	Bestimmung der Würzearomastoffe .....	36
4.4.2.2	Bestimmung der Bieraromastoffe .....	36
4.4.2.3	Bestimmung der höheren Alkohole und leichtflüchtigen Ester.....	37
4.4.2.4	Bestimmung der Alterungsindikatoren .....	37
4.4.2.5	Bestimmung von kurzkettigen Fettsäuren .....	37
<b>4.5</b>	<b>Methodik zu Identifizierung von Schlüsselaromastoffen in Hefebier.....</b>	<b>40</b>
4.5.1	Extraktion der Aromastoffe .....	40
4.5.2	Verwendete Materialien .....	41
4.5.3	Durchführung der Extraktion .....	41
4.5.4	Destillation der flüchtigen Verbindungen im Hochvakuum .....	41
4.5.5	Trennung in neutral-basische und saure Komponenten .....	42
4.5.6	Kapillargaschromatographie und Olfaktometrie .....	42
4.5.7	Entwicklung eines spezifischen Verkostungsschemas für Hefebiere.....	43
<b>4.6</b>	<b>Bestimmung der Aktivität von Schlüsselenzymen in Hefebier.....</b>	<b>43</b>
4.6.1	Aktivität der Proteinase A .....	43
4.6.1.1	Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach STAMM .....	43
4.6.1.2	Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach KONDO.....	43
4.6.2	Aktivität der Esterase .....	45
4.6.2.1	Verwendete Materialien .....	45
4.6.2.2	Durchführung der Analyse .....	45
<b>4.7</b>	<b>Bestimmung des physiologischen Zustandes von Hefezellen .....</b>	<b>46</b>
4.7.1	Bestimmung der Hefeviabilität .....	46
4.7.2	Bestimmung der Hefevitalität.....	47
<b>4.8</b>	<b>sensorische Analytik .....</b>	<b>47</b>
4.8.1	Unterschiedsprüfung .....	47
4.8.1.1	Paarweise Vergleichsprüfung .....	47
4.8.1.2	Dreiecksprüfung .....	48
4.8.1.3	Bestimmung von Schwellenwerten.....	48
4.8.2	Beschreibende Prüfung .....	48
4.8.2.1	Einfach beschreibende Prüfung.....	48
4.8.2.2	Profilprüfung .....	49
4.8.3	Bewertende Prüfung .....	49
4.8.3.1	Verkostung nach DLG .....	49
4.8.3.2	Alterungsverkostung nach Eichhorn .....	49
<b>4.9</b>	<b>Statistische Methoden .....</b>	<b>50</b>
4.9.1	Reproduzierbarkeit .....	50
4.9.2	t-Test zum Vergleich von Mittelwerten .....	50
4.9.3	Regressionsanalyse .....	50
4.9.4	Faktorenanalyse .....	50
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE UND DISKUSSION .....</b>	<b>52</b>
<b>5.1</b>	<b>Untersuchungen zum Einfluss der Aufbewahrungsbedingungen von Überschusshefe auf die Qualität des darin enthaltenen, wiedergewinnbaren Hefebieres .....</b>	<b>52</b>
5.1.1	Analytische Versuche .....	52

5.1.1.1	GC-Sniffing-Analyse von unterschiedlich gelagerten Überschusshefen.....	52
5.1.2	Hefephysiologie .....	58
5.1.3	Verhalten von Bierinhaltsstoffen bei der Hefealterung.....	62
5.1.4	Sensorische Analysen .....	67
5.1.5	Statistische Auswertung der Ergebnisse der Hefealterung.....	69
5.1.6	Schlussfolgerungen .....	71
<b>5.2</b>	<b>Einfluss der Dosage unterschiedlicher Hefebiere auf die Qualität der resultierenden fertigen Biere.....</b>	<b>72</b>
5.2.1	Qualität der Hefebiere.....	72
5.2.2	Gärverlauf.....	73
5.2.3	Analytische Untersuchungen .....	73
5.2.3.1	Chemisch-technische Untersuchungen .....	74
5.2.3.2	Chromatographische Untersuchungen .....	75
5.2.3.3	Sensorische Untersuchungen.....	77
5.2.3.4	Diskussion der Ergebnisse .....	79
<b>5.3</b>	<b>Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Trenn-techniken auf Hefeschaffenheit und Hefebierqualität.....</b>	<b>80</b>
5.3.1	Natürliche Sedimentation.....	80
5.3.1.1	Hefephysiologie .....	80
5.3.1.2	Verhalten von Inhaltsstoffen im Hefebier.....	82
5.3.1.3	Sensorische Untersuchungen.....	83
5.3.1.4	Wirtschaftliche Betrachtungen.....	84
5.3.1.5	Ergänzende Untersuchungen im Bereich natürliche Sedimentation	84
5.3.2	Dekantier-Zentrifuge .....	88
5.3.2.1	Hefephysiologie .....	89
5.3.2.2	Verhalten von Inhaltsstoffen im Hefebier.....	90
5.3.2.3	Sensorische Untersuchungen.....	93
5.3.2.4	Wirtschaftliche Betrachtungen .....	94
5.3.2.5	Ergänzende Untersuchungen im Bereich Dekantier-Zentrifuge.....	96
5.3.3	Teller-Zentrifuge .....	98
5.3.3.1	Hefephysiologie .....	98
5.3.3.2	Verhalten der Indikatorsubstanzen im Hefebier .....	99
5.3.3.3	Wirtschaftliche Betrachtungen .....	101
5.3.3.4	Ergänzende Betrachtungen im Bereich Teller-Zentrifuge .....	102
5.3.3.5	Durchführung von Versuchen zur Diafiltration mit Teller-Zentrifugen ..	105
5.3.4	Cross-Flow-Mikrofiltration .....	106
5.3.4.1	Hefephysiologie .....	107
5.3.4.2	Verhalten der Indikatorsubstanzen im Hefebier .....	108
5.3.4.3	Sensorische Untersuchungen.....	109
5.3.4.3	Wirtschaftliche Betrachtungen .....	110
5.3.4.4	Ergänzende Untersuchungen im Bereich CMF .....	110
5.3.5	Rotierender Scheibenfilter (RSF).....	112
5.3.5.1	Hefephysiologie .....	112
5.3.5.2	Verhalten der Bierinhaltsstoffe im Hefebier .....	115
5.3.5.3	Sensorische Untersuchungen.....	117
5.3.5.4	Wirtschaftliche Betrachtungen .....	117

<b>5.4</b>	<b>Untersuchungen zum Einfluss der Dosage von Prozessbieren im Sudhausbereich.....</b>	<b>118</b>
5.4.1	Dosage von Vor-, Zwischen- und Nachlauf (VZNL) zum Einmaischen.....	118
5.4.1.1	Verhalten des pH-Wertes während des Maischprozesses .....	118
5.4.1.2	Gärverlauf.....	120
5.4.1.3	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	121
5.4.1.4	Chromatographische Untersuchungen der fertigen Biere.....	122
5.4.1.5	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	123
5.4.2	Dosage von Prozessbieren in die Würzepfanne bzw. als Vorlage in den Whirlpool.....	124
5.4.2.1	Temperaturverlauf nach der Zugabe .....	125
5.4.2.2	pH-Wert .....	127
5.4.2.3	Veränderung der Würzearomastoffe .....	128
5.4.2.4	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	129
5.4.2.5	Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere.....	132
5.4.2.6	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	134
5.4.2.7	Ergänzende großtechnische Untersuchungen zur Dosage von Prozessbieren im Heissbereich .....	136
5.4.3	Dosage von Prozessbieren in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler .....	139
5.4.3.1	Gärverlauf.....	141
5.4.3.2	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	141
5.4.3.3	Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere.....	142
5.4.3.4	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	143
5.4.3.5	Statistische Auswertung der untersuchten Biere .....	144
5.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Dosageversuche im Heissbereich .....	147
<b>5.5</b>	<b>Dosage von Hefebieren im Kaltbereich .....</b>	<b>151</b>
5.5.1	Dosage von Hefebieren zur Anstellwürze.....	152
5.5.1.1	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	152
5.5.1.2	Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere.....	154
5.5.1.3	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	156
5.5.2	Dosage von Hefebieren zum Jungbier.....	157
5.5.2.1	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	157
5.5.2.2	Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere.....	160
5.5.2.3	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	163
5.5.3	Diskussion der Ergebnisse der Dosageversuche im Kaltbereich.....	164
5.5.4	Ergänzende großtechnische Untersuchungen zur Dosage von Hefebieren im Kaltbereich.....	170
<b>5.6</b>	<b>Kombinierte Dosage von Prozessbieren .....</b>	<b>173</b>
5.6.1	Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere.....	173
5.6.2	Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere .....	174
5.6.3	Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere .....	176
<b>5.7</b>	<b>Wirtschaftliche Aspekte zur Verwertung der Prozessbiere .....</b>	<b>177</b>
5.7.1	Wirtschaftliche Bewertung der Rückgewinnung von Hefebieren .....	177
5.7.2	Wirtschaftliche Bewertung der Rückgewinnung von VZNL.....	181
5.7.3	Kostenaufstellung für die Dosage von Prozessbier in die Heisswürzeleitung.....	183

5.7.4	Beispielrechnung für die Extrakteinsparung durch Prozessbierverwertung	183
<b>6</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNG</b>	<b>186</b>
<b>7</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>190</b>
<b>ANHANG</b>		<b>204</b>

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Prozessbieranteile am Bierausstoß in deutschen Brauereien (links); durchschnittliche prozentuale Verteilung anfallender Prozessbiere in deutschen Brauereien (rechts).....	3
Abbildung 2: Prozessbieraufbereitung nach LITZENBURGER [19] (Legende: KG = Kieselgur; EK = Entkeimung, PDI = Differenzdruckmessung; QR <sub>Tr</sub> = Trübungsmessung).....	9
Abbildung 3: schematische Darstellung einer Dekantier-Zentrifuge [116].	21
Abbildung 4: schematische Darstellung einer Tellerzentrifuge [120]	22
Abbildung 5: schematische Darstellung der Verfahrensweise einer Kammerfilterpresse	24
Abbildung 6: Fließschema einer CMF-Anlage [124]. (Legende: S =Suspension, F =Filtrat, K =Konzentrat; PI =Druckaufnehmer; FI =Durchflussmessgerät; TI =Temperaturaufnehmer)	25
Abbildung 7: Prinzip der Vibrations-Mikrofiltration [136, 140]	27
Abbildung 8: Prinzip eines rotierenden Scheibenfilters [124, 144] (Legende: SF : Scheibenfilter, VF = Filtratvolumenstrom)	28
Abbildung 9: untersuchte Purin-Derivate mit ihren bestimmten Konfidenzintervallen ( $\alpha=0.05$ )	35
Abbildung 10: GC-FID-Chromatogramm für kurzkettige Fettsäuren	39
Abbildung 11: untersuchte kurzkettige Fettsäuren mit ihren bestimmten Konfidenzintervallen ( $\alpha=0.05$ ).....	39
Abbildung 12: Apparatur für den Hochvakuumtransfer [168].	42
Abbildung 13: Gaschromatogramm der neutral-basischen Fraktion eines frisch gewonnenen Hefebieres.....	53
Abbildung 14: Flavour Dilution (FD) – Chromatogramm der wichtigsten Aromastoffe der neutral-basischen Fraktion.....	54
Abbildung 15: Flavour Dilution (FD)–Chromatogramm der wichtigsten Aromastoffe der aciden Fraktion.....	56
Abbildung 16: Verhalten der Hefeviabilität und der Hefevitalität bei unterschiedlichen Aufbewahrungsbedingungen	59
Abbildung 17: Glykogen-Katabolismus bei <i>S. cerevisiae</i> [204]	60
Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Hefezellen nach Anfärbung mit Lugol'scher Lösung (40-fache Vergrößerung).....	60
Abbildung 19: Abnahme des Trockensubstanzgehaltes während der Aufbewahrung einer Hefesuspension.....	62
Abbildung 20: Verhalten der N-Heterocyclen in unterschiedlichen Hefebieren	64
Abbildung 21: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole durch unterschiedliche Behandlung von Überschusshefe	65
Abbildung 22: Autolyse-Index für Hefebiere über der Hefevitalität.....	66
Abbildung 23: Produktkennlinie für Hefebiere, die aus unterschiedlich behandelten Hefen gewonnen wurden.....	68
Abbildung 24: Verhalten einiger ausgewählter Purin-Derivate in verschiedenen Hefebieren (1, 2, 3, 4) im Vergleich zu einem hellen, untergärigen Vollbier	69
Abbildung 25: Hauptkomponentenanalyse der Aromastoffe und der sensorischen Eindrücke	70
Abbildung 26: <i>Component Plot</i> der Faktoren 1 und 2	71
Abbildung 27: Gärdiagramme der Biere A–D	73
Abbildung 28: Schaumwerte der Biere A–D (KI auf $p=0.95$ )	74
Abbildung 29: Stabilitäts-Index der Biere A–D	75

Abbildung 30:	Verhalten ausgewählter Ester in den Bieren A–D .....	76
Abbildung 31:	Verhalten ausgewählter Fettsäuren in den Bieren A–D .....	76
Abbildung 32:	Verhalten der Alterungskomponenten im forciert gealterten Zustand (Bier A–D) .....	77
Abbildung 33:	sensorische Beurteilung der frischen Biere A–D (KI auf $p=0.95$ ) ...	78
Abbildung 34:	sensorische Beurteilung der forciert gealterten Biere A–D nach Eichhorn (KI auf $p=0.95$ ) .....	79
Abbildung 35:	Verhalten des physiologischen Zustand der Hefepopulation während der Sedimentationsphase .....	81
Abbildung 36:	Verhalten ausgewählter Bieraromastoffe während der Sedimentationsphase .....	82
Abbildung 37:	Profilprüfung für das Hefebier zum Zeitpunkt „Ende Sedimentation“ . .....	84
Abbildung 38:	gelelektrophoretische Auftrennung der Versuchsbiere der Versuchsreihe 1 .....	87
Abbildung 39:	gelelektrophoretische Auftrennung der Versuchsbiere der Versuchsreihe 2 .....	88
Abbildung 40:	Hefebierrückgewinnung mittels Dekanter nach KUNST et al. [227] .	89
Abbildung 41:	Verhalten der Hefeviabilität bei Dekanter-Einlauf und –Austrag.....	89
Abbildung 42:	gemessene Gehalte an Acetaldehyd und Ethylacetat bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden .....	91
Abbildung 43:	gemessene Gehalte an Capron-, Capryl- und Caprinsäure bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden..	92
Abbildung 44:	gemessene Gehalte an i-Buttersäure, n-Buttersäure und Isovaleriansäure bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden .....	93
Abbildung 45:	Aromaeindrücke der verkosteten Hefebiere .....	94
Abbildung 46:	Verhalten der Trockensubstanzgehalte bei Dekanter-Einlauf und Dekanter-Austrag .....	95
Abbildung 47:	gemessene Temperaturen am Dekanter-Einlauf und -Auslauf.....	97
Abbildung 48:	Verhalten der Hefevitalität bei Zentrifuge-Einlauf und –Austrag.....	99
Abbildung 49:	Konzentrationen von Isovaleriansäure und Decansäure bei den untersuchten Hefebieren .....	100
Abbildung 50:	Verhalten der Trockensubstanzgehalte am Zentrifugen-Einlauf und - Austrag .....	101
Abbildung 51:	gemessene Temperaturen am Zentrifugen-Einlauf und -Auslauf..	102
Abbildung 52:	Verlauf des Sauerstoffgehaltes der Hefebiere während der Separationen .....	103
Abbildung 53:	Rückstände nach der Reinigung an der Unterseite der Teller (links), Rückstände nach der Reinigung im Bereich der Düsen (rechts) .....	105
Abbildung 54:	apparative Einrichtungen zur Durchführung der Diafiltration [229]	105
Abbildung 55:	eingesetzte Hefe- bzw. Wassermengen (links) und die resultierenden Hefebierolumina (rechts).....	106
Abbildung 56:	Verhalten der Hefevitalität (links) und der Hefeviabilität (rechts) zu Beginn und am Ende des Trennvorgangs .....	107
Abbildung 57:	Verlauf der proteolytischen Aktivitäten über die Filtrationsdauer...	108
Abbildung 58:	Verhalten der Indikatorsubstanzen über die Filtrationsdauer .....	109
Abbildung 59:	Profilprüfung für das untersuchte Hefebier.....	110
Abbildung 60:	Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren während der Filtrationsdauer.....	111
Abbildung 61:	Verhalten der Aminosäuren während der Filtrationsdauer .....	112

Abbildung 62:	Verhalten der Hefeviabilität bei RSF-Zulauf und -Austrag.....	113
Abbildung 63:	Verhalten der Hefevitalität bei RSF-Zulauf und -Austrag .....	113
Abbildung 64:	Temperaturverlauf über die Gesamtfiltrationsdauer .....	114
Abbildung 65:	Veränderung der Aktivität der Proteinase A durch die Aufbereitung mittels RSF .....	115
Abbildung 66:	Verhalten der Indikatorsubstanzen „Heptanol-1“ und „Decansäure“ während der Aufbereitung .....	116
Abbildung 67:	Verhalten der Aromaeindrücke zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Probenahme.....	117
Abbildung 68:	Verlauf des pH-Wertes während des Maischens .....	119
Abbildung 69:	Gärdiagramm der Biere A–C.....	120
Abbildung 70:	freier Aminostickstoff und Schaumhaltbarkeit der Versuchsreihen A– C .....	122
Abbildung 71:	Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole (links) und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren (rechts) im fertigen Bier .....	122
Abbildung 72:	Verhalten der Acetat-Ester (links) und FS-Ester (rechts) im fertigen Bier .....	123
Abbildung 73:	Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im frischen (links) und forciert gealterten Zustand (rechts).....	124
Abbildung 74:	Temperaturverlauf nach der Zugabe zur Kochung.....	126
Abbildung 75:	Temperaturverlauf nach der Vorlage im Whirlpool.....	126
Abbildung 76:	Trubkegel im Whirlpool.....	127
Abbildung 77:	pH-Abfall durch die Prozessbierzugabe .....	127
Abbildung 78:	gemittelte Stammwürzegehalte der drei Sudreihen.....	130
Abbildung 79:	Verhalten der Gesamtpolyphenole (links) und der Anthocyanogene (rechts) in den 3 Sudreihen .....	130
Abbildung 80:	Verhalten der gemittelten Bitterstoffgehalte in den 3 Sudreihen ...	131
Abbildung 81:	Verhalten der gemittelten kolloidalen Stabilität (links) und der gemittelten Schaumstabilität (rechts) der 3 Sudreihen .....	132
Abbildung 82:	Verhalten der gemittelten Ethylacetatkonzentration (links) und der gemittelten Konzentration an kurzkettigen Fettsäuren (rechts) der 3 Sudreihen ... .....	133
Abbildung 83:	Verhalten der gemittelten Alterungskomponenten der 1. Sudreihe (links oben), der 2. Sudreihe (rechts oben) und der 3. Sudreihe (Mitte unten).	133
Abbildung 84:	Verhalten der thermischen Würzeindikatoren in den Versuchsreihen A und B .....	137
Abbildung 85:	Verhalten der Alterungskomponenten der Versuchsreihen A und B .. .....	138
Abbildung 86:	Ergebnisse der DLG-Verkostung im frischen Zustand (links) und der Alterungsverkostung im forciert gealterten Zustand (rechts) .....	138
Abbildung 87:	Verhalten der Alterungskomponenten bei den Versuchssuden C und D (links) und der Verkostungsergebnisse im forciert gealterten Zustand (rechts) . .....	139
Abbildung 88:	Gärverläufe der Versuchsreihe „Dosage von Prozessbier zwischen Whirlpool und Würzekühler“ .....	141
Abbildung 89:	Ergebnisse der Schaummessung (links) und der antioxidativen Messungen (rechts).....	142
Abbildung 90:	Mittelwerte ausgewählter Bieraromastoffe der Biere A–D .....	142
Abbildung 91:	Mittelwerte ausgewählter Alterungsindikatoren der Biere A–D.....	143
Abbildung 92:	Verkostungsergebnisse der frischen (links) und der forciert gealterten Bierproben (rechts).....	144

Abbildung 93: *Component Plot* der Faktoren 1 und 2 für die Biere A–D ..... 145

Abbildung 94: Hauptkomponentenanalyse für die Biere A–D ..... 146

Abbildung 95: RI-Schema zur Dosierung von Prozessbieren in die Leitung  
zwischen Whirlpool und Würzekühler ..... 149

Abbildung 96: Pasteur-Einheiten in Abhängigkeit der Temperatur-  
einwirkungsdauer ..... 150

Abbildung 97: Verhalten des pH-Wertes durch Zumischung von Hefebier mit guter  
Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 152

Abbildung 98: Verhalten der Bittereinheiten durch Zumischung von Hefebier mit  
guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 153

Abbildung 99: Verhalten des Stabilitäts-Index durch Zumischen von Hefebier .... 153

Abbildung 100: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und  
mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen  
Hefebieres ..... 154

Abbildung 101: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und  
mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ schlechten  
Hefebieres ..... 155

Abbildung 102: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung  
eines qualitativ hochwertigen Hefebieres ..... 155

Abbildung 103: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung  
eines qualitativ schlechten Hefebieres ..... 155

Abbildung 104: Verhalten von 2-Furfural durch Zumischung von Hefebier mit guter  
Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 156

Abbildung 105: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung  
(forciert gealtert) der Biere A–C ..... 156

Abbildung 106: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung  
(forciert gealtert) der Biere H–J ..... 157

Abbildung 107: Verhalten des pH-Wertes durch Zumischung von Hefebier mit guter  
Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 158

Abbildung 108: Verhalten der Bittereinheiten durch Zumischung von Hefebier mit  
guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 158

Abbildung 109: Verhalten des Stabilitäts-Index durch Zumischen von Hefebier .. 159

Abbildung 110: Verhalten der Schaumstabilität durch die Zumischung von qualitativ  
hochwertigem Hefebier (links) und schlechtem Hefebier (rechts) ..... 160

Abbildung 111: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und  
mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen  
Hefebieres ..... 160

Abbildung 112: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und  
mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ schlechten  
Hefebieres ..... 161

Abbildung 113: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung  
eines qualitativ hochwertigen Hefebieres ..... 161

Abbildung 114: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung  
eines qualitativ schlechten Hefebieres ..... 162

Abbildung 115: Verhalten von 2-Furfural durch Zumischung von Hefebier mit guter  
Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts) ..... 162

Abbildung 116: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung  
(forciert gealtert) der Biere D–F ..... 163

Abbildung 117: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung  
(forciert gealtert) der Biere K–M ..... 164

Abbildung 118: Einfluss der Pasteurisation auf die Esterase-Aktivität ..... 165

Abbildung 119:	Esterase-Aktivität in den Untersuchungsbieren H–M .....	166
Abbildung 120:	Verhalten von 2-Furfural während verschiedener thermischer Belastungen .....	167
Abbildung 121:	vorgeschlagener Bildungsmechnismus von 2-Furfuryl-Ethyl-Ether bei der Bieralterung [238] .....	168
Abbildung 122:	Hauptkomponentenanalyse für die Biere A–N .....	169
Abbildung 123:	<i>Component plot</i> für die untersuchten Aromastoffe .....	170
Abbildung 124:	Faktorenanalyse für die Biere A–H .....	171
Abbildung 125:	<i>Component plot</i> für die Untersuchungsparameter.....	172
Abbildung 126:	Ergebnisse der Schaummessung (links) und der antioxidativen Messungen (rechts).....	174
Abbildung 127:	Mittelwerte ausgewählter Bieraromastoffe der Biere A–D .....	175
Abbildung 128:	Mittelwerte ausgewählter Alterungsindikatoren der Biere A–D....	176
Abbildung 129:	Verkostungsergebnisse der frischen (links) und der forciert gealterten Bierproben (rechts).....	176
Abbildung 130:	Zusammenhang zwischen Ausbeute und anfänglichem Trockensubstanzgehalt der Hefesuspension (links) und Effekt der Diafiltration (rechts) (in Anlehnung an SCHNEIDER <i>et al.</i> [136]) .....	178
Abbildung 131:	Zusammenhang zwischen Verkaufserlös und Trockensubstanzgehalt .....	179
Abbildung 132:	Zusammenhang zwischen Gesamtergebnis, Amortisationsdauer und Trockensubstanzgehalt .....	180
Abbildung 133:	Verlauf der Stammwürze bei der Abtrennung des Vorlaufes über der Zeit .....	181
Abbildung 134:	Vergleich der mittleren Extraktverluste mit und ohne PB-Verwertung .....	185
Abbildung 135:	Verfahrensweise zur Behandlung von VZNLs im Filterkeller.....	188
Abbildung 136:	Kalibrierung Isobuttersäure .....	205
Abbildung 137:	Kalibrierung Buttersäure.....	205
Abbildung 138:	Kalibrierung Isovaleriansäure.....	205
Abbildung 139:	Kalibrierung der Aktivität der Proteinase A.....	208
Abbildung 140:	Bestimmung des molaren Extinktionskoeffizienten von p-Nitrophenol. ....	208
Abbildung 141:	Profilprüfung für Hefebier. ....	209

**TABELLENVERZEICHNIS**

*Tabelle 1: Rohstoff- und Reststoffströme in der Brauerei ..... 2*

*Tabelle 2: Überschlagsmäßige Betrachtung der Einsparungen an Hopfen und Malz durch vollständige produktionsinterne Verwertung von Prozessbieren ..... 4*

*Tabelle 3: Berechnung des Extraktschwandes ab heißer Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung [15] ..... 5*

*Tabelle 4: Prioritätenskala zur Senkung der Abwassermengen und Schmutzfrachten aus Brauereien ..... 6*

*Tabelle 5: Abwassergebühren für verschiedene Varianten der Hefeverwertung ... 8*

*Tabelle 6: anfallende Prozessbiere in einer Brauerei ..... 8*

*Tabelle 7: ausgewählte Inhaltsstoffe der Hefezelle und ihre Verwendung für technologische und medizinische Aspekte ..... 11*

*Tabelle 8: Maßnahmen zur Verminderung des relativen Extraktschwandes [54] 11*

*Tabelle 9: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der endogenen, antioxidativen Aktivität von Bier (LT = Lag-Time) ..... 32*

*Tabelle 10: Reproduzierbarkeit der Bestimmung des antiradikalischen Verhaltens von Bier ..... 32*

*Tabelle 11: Reproduzierbarkeit der Bestimmung des antiradikalischen Potentials von Bier ..... 33*

*Tabelle 12: Variationskoeffizienten der untersuchten Purin-Derivate ..... 36*

*Tabelle 13: Variationskoeffizienten der bestimmten, kurzkettigen Fettsäuren.... 40*

*Tabelle 14: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der proteolytischen Aktivität nach Stamm ..... 43*

*Tabelle 15: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Aktivität der Proteinase A 45*

*Tabelle 16: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Aktivität der Esterase ..... 46*

*Tabelle 17: Aromastoffe der neutral-basischen Fraktion in frisch gewonnenem Hefebier ..... 55*

*Tabelle 18: Aromastoffe der aciden Fraktion in frisch gewonnenem Hefebier ... 57*

*Tabelle 19: Aromastoffe, die durch die unterschiedliche Aufbewahrung am stärksten beeinflusst wurden ..... 58*

*Tabelle 20: Verwendete Probenbezeichnung..... 58*

*Tabelle 21: Ethanol- bzw. Stammwürzegehalt in Abhängigkeit des physiologischen Zustandes der Hefepopulation ..... 61*

*Tabelle 22: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Hefebiere ..... 64*

*Tabelle 23: Zuordnung der Attribute zu den Aroma- bzw. Geschmackstoffen. .. 67*

*Tabelle 24: Verwendete Probenbezeichnung Kapitel 5.2..... 72*

*Tabelle 25: Beurteilung der Alterungsakzeptanz nach Eichhorn ..... 78*

*Tabelle 26: Probenbezeichnung für die Sedimentationsversuche ..... 80*

*Tabelle 27: Verhalten der proteolytischen Aktivität während der Sedimentationsphase ..... 81*

*Tabelle 28: Verhalten ausgewählter chemisch-technischer Untersuchungsparameter ..... 82*

*Tabelle 29: Bestimmung der Ausbeute der Hefebirrückgewinnung durch natürliche Sedimentation ..... 84*

*Tabelle 30: Probenbezeichnungen für Versuchsreihe 1 ..... 85*

*Tabelle 31: Probenbezeichnungen für Versuchsreihe 2 ..... 87*

*Tabelle 32: Differenzen der Hefeviabilität zwischen Dekanter-Einlauf und - Austrag ..... 90*

*Tabelle 33: Hefevitalität der untersuchten Hefe- bzw. Hefebierproben ..... 90*

<i>Tabelle 34:</i>	<i>Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch Dekantierzentrifugen</i> .....	96
<i>Tabelle 35:</i>	<i>gemessene Sauerstoffgehalte am Dekanter-Auslauf</i> .....	97
<i>Tabelle 36:</i>	<i>Parameter der verwendeten Hefesuspensionen</i> .....	98
<i>Tabelle 37:</i>	<i>Chemisch-technische Analysendaten der untersuchten Hefebiere</i> 100	
<i>Tabelle 38:</i>	<i>Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch Teller-Zentrifugen</i> .....	102
<i>Tabelle 39:</i>	<i>gemessene Sauerstoffgehalte am Zentrifugen-Auslauf</i> .....	103
<i>Tabelle 40:</i>	<i>durchschnittliche Analysendaten für Hefe bzw. Hefebier</i> .....	106
<i>Tabelle 41:</i>	<i>Verhalten der proteinischen Fraktionen über die Filtrationsdauer</i> ..	108
<i>Tabelle 42:</i>	<i>Bestimmung der Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch CMF</i> ...	110
<i>Tabelle 43:</i>	<i>Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch Dekantierzentrifugen</i> .....	118
<i>Tabelle 44:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnung</i> .....	118
<i>Tabelle 45:</i>	<i>pH-Werte des Einmaischwassers und nach 10 Minuten Maischen</i> 119	
<i>Tabelle 46:</i>	<i>Verhalten der höheren Alkohole während der Würzekochung</i> .....	120
<i>Tabelle 47:</i>	<i>Chemisch-technische Untersuchungsergebnisse der fertigen Biere der Versuchsreihen A–C</i> .....	121
<i>Tabelle 48:</i>	<i>Verhalten ausgewählter Alterungskomponenten in den fertigen Bieren der Versuchsreihe A–C</i> .....	123
<i>Tabelle 49:</i>	<i>Sudschema</i> .....	124
<i>Tabelle 50:</i>	<i>Veränderung einiger ausgewählter Würzearomastoffe</i> .....	128
<i>Tabelle 51:</i>	<i>Temperaturen bei der Whirlpool-Rast</i> .....	129
<i>Tabelle 52:</i>	<i>Bitterstoffausbeute</i> .....	131
<i>Tabelle 53:</i>	<i>Signifikanztest für die gewichtete Note bei der DLG-Verkostung der 3 Sudreihen</i> .....	134
<i>Tabelle 54:</i>	<i>Signifikanztest für die gewichtete Note und der Akzeptanz bei der Alterungsverkostung der 3 Sudreihen</i> .....	135
<i>Tabelle 55:</i>	<i>Rangordnungsprüfung der Sudreihen 2 und 3</i> .....	135
<i>Tabelle 56:</i>	<i>Einfacher Probenvergleich bei den Sudreihen 2 und 3</i> .....	136
<i>Tabelle 57:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnung</i> .....	136
<i>Tabelle 58:</i>	<i>Verhalten der phenolischen Substanzen in den Versuchsreihen A und B</i> .....	137
<i>Tabelle 59:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnung</i> .....	140
<i>Tabelle 60:</i>	<i>gemessene und theoretisch berechnete Konzentrationen ausgewählter höherer Alkohole in der Würze</i> .....	140
<i>Tabelle 61:</i>	<i>Korrelationskoeffizienten für die Hauptkomponenten 1 und 2</i> .....	147
<i>Tabelle 62:</i>	<i>Varianzanalytische Betrachtung der verkosteten Biere nach einer Aufbewahrung von 3 Monaten bei 20 °C</i> .....	148
<i>Tabelle 63:</i>	<i>Ethanolverlust bei Dosage von Prozessbier im Whirlpool</i> .....	148
<i>Tabelle 64:</i>	<i>Länge der Rohrleitung zwischen WP und Würzekühler in Abhängigkeit der PE</i> .....	150
<i>Tabelle 65:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnungen</i> .....	151
<i>Tabelle 66:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnung</i> .....	171
<i>Tabelle 67:</i>	<i>verwendete Probenbezeichnung</i> .....	173
<i>Tabelle 68:</i>	<i>Präferenzen für die Untersuchungsbiere nach paarweiser Vergleichsprüfung</i> .....	177
<i>Tabelle 69:</i>	<i>Eckwerte der Kalkulation für die Amortisation einer Hefebierrückgewinnungsanlage</i> .....	178

Tabelle 70:	<i>Einfluss der anfänglichen Trockensubstanz auf die Amortisationsdauer einer Hefebirrückgewinnungsanlage</i> .....	180
Tabelle 71:	<i>Brauereidaten mit Prozessbierverwertung</i> .....	183
Tabelle 72:	<i>Berechnung des Extraktschwandes ab Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung mit Prozessbierverwertung</i> .....	184
Tabelle 73:	<i>Brauereidaten ohne Prozessbierverwertung</i> .....	184
Tabelle 74:	<i>Berechnung des Extraktschwandes ab Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung ohne Prozessbierverwertung</i> .....	184
Tabelle 75:	<i>empfohlene Dosagezeitpunkte von Prozessbieren im Brauprozess</i> ....	188
Tabelle 76:	<i>Allgemeine Daten der Brauerei und Rechengang</i> .....	204
Tabelle 77:	<i>Reproduzierbarkeit der Methode Bieraromastoffe</i> .....	206
Tabelle 78:	<i>Reproduzierbarkeit der Methode höhere Alkohole und leichtflüchtige Ester</i> .....	207
Tabelle 79:	<i>Zusammenfassung der FD-Faktoren der neutral-basischen Fraktion der unterschiedlich behandelten Hefebiere</i> .....	210
Tabelle 80:	<i>Zusammenfassung der FD-Faktoren der aciden Fraktion der unterschiedlich behandelten Hefebiere</i> .....	210
Tabelle 81:	<i>Rotated Component Matrix</i> .....	211
Tabelle 82:	<i>Konzentrationen der N-Heterocyclen in Hefebier</i> .....	212
Tabelle 83:	<i>Bestimmung des Schwellenwertes für Heptanol-1</i> .....	212
Tabelle 84:	<i>Verhalten der Hefebieraromastoffe</i> .....	213
Tabelle 85:	<i>Bestimmung des Schwellenwertes für 3-Methylbuttersäure</i> .....	214
Tabelle 86:	<i>Messdaten für die Berechnung des Autolyse-Index</i> .....	214
Tabelle 87:	<i>Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–D</i> .....	214
Tabelle 88:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bieraromastoffe der Biere A–D</i> .....	215
Tabelle 89:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Alterungsindikatoren im frischen Zustand (Biere A–D)</i> .....	216
Tabelle 90:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Alterungsindikatoren im forciert gealterten Zustand (Biere A–D)</i> .....	216
Tabelle 91:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand</i> .....	217
Tabelle 92:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand</i> .....	217
Tabelle 93:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Sedimentationsphase (Bieraromastoffe)</i> .....	218
Tabelle 94:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Sedimentationsphase (leichtflüchtige Ester und höhere Alkohole)</i> .....	218
Tabelle 95:	<i>statistische Auswertung der Bestimmung der Hefeviabilität</i> .....	219
Tabelle 96:	<i>Rohdaten für die Bestimmung der Ausbeute</i> .....	220
Tabelle 97:	<i>statistische Auswertung der Bestimmung der Ausbeute</i> .....	221
Tabelle 98:	<i>Verhalten von Hefeviabilität und –vitalität während der Aufbereitung mittels Teller-Zentrifuge</i> .....	221
Tabelle 99:	<i>Verhalten der Hefetrockensubstanz bei Zentrifuge-Einlauf und -Austrag</i> .....	222
Tabelle 100:	<i>Verhalten der Temperatur am Zentrifugen-Einlauf und im Hefebier</i> ....	223
Tabelle 101:	<i>Ergebnisse der Bieraromastoffuntersuchungen für die Zeitpunkte „Beginn“ und „Ende“ Filtration</i> .....	224

Tabelle 102:	<i>Ergebnisse der Aminosäurenuntersuchungen für die Zeitpunkte „Beginn“ und „Ende“ Filtration</i>	224
Tabelle 103:	<i>Rohdaten für die Parameter „Hefeviabilität“ und „Hefevitalität“ beim RSF</i>	225
Tabelle 104:	<i>Verhalten der Bieraromastoffe bei verschiedenen Probenahmezeitpunkten</i>	225
Tabelle 105:	<i>Rohdaten der Verkostungen der Hefebiere</i>	225
Tabelle 106:	<i>Verhalten der Ausbeute und der Hefetrockensubstanz bei RSF-Zualuf und –Austrag</i>	226
Tabelle 107:	<i>Aromastoffe des verwendeten VZNLs</i>	227
Tabelle 108:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Biere A–C</i>	228
Tabelle 109:	<i>Varianzanalytische Auswertung der Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im frischen Zustand</i>	229
Tabelle 110:	<i>Varianzanalytische Auswertung der Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im forciert gealterten Zustand</i>	229
Tabelle 111:	<i>Würzearomastoffe der Sudreihen 1–3</i>	230
Tabelle 112:	<i>Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Sudreihen 1–3</i>	231
Tabelle 113:	<i>Bieraromastoffe der Sudreihen 1–3</i>	232
Tabelle 114:	<i>Ergebnisse der DLG-Verkostung der Sudreihen 1–3</i>	233
Tabelle 115:	<i>Ergebnisse der Alterungsverkostung der Sudreihen 1–3</i>	234
Tabelle 116:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–D</i>	235
Tabelle 117:	<i>Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–D</i>	236
Tabelle 118:	<i>Ergebnisse des Triangeltests der Versuchsreihe A und B (links) und der paarweisen Vergleichsprüfung der Versuchsreihe C und D (rechts)</i>	236
Tabelle 119:	<i>gaschromatographische Analysendaten des zudosierten Prozessbieres</i>	237
Tabelle 120:	<i>gaschromatographische Ergebnisse der Biere A–D</i>	238
Tabelle 121:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand</i>	239
Tabelle 122:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand</i>	239
Tabelle 123:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)</i>	239
Tabelle 124:	<i>Rotated Component Matrix</i>	240
Tabelle 125:	<i>Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–C und H–J</i>	241
Tabelle 126:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier A–C</i>	241
Tabelle 127:	<i>Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier H–J</i>	242
Tabelle 128:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im frischen Zustand</i>	242
Tabelle 129:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im forciert gealterten Zustand</i>	243
Tabelle 130:	<i>Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)</i>	243

Tabelle 131: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im frischen Zustand* .....243

Tabelle 132: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im forciert gealterten Zustand* .....244

Tabelle 133: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)*.....244

Tabelle 134: *Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere D–F und K–M* .....244

Tabelle 135: *Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier D–F* .....245

Tabelle 136: *Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier K–M* .....246

Tabelle 137: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im frischen Zustand* .....246

Tabelle 138: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im forciert gealterten Zustand* .....247

Tabelle 139: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)*.....247

Tabelle 140: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im frischen Zustand* .....247

Tabelle 141: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im forciert gealterten Zustand* .....248

Tabelle 142: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)*.....248

Tabelle 143: *Ergebnisse der gaschromatographischen, flüssigkeitschromatographischen und sensorischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–H* .....249

Tabelle 144: *Varimax Faktorladungen der Versuchsreihen A–G* .....250

Tabelle 145: *Rotated component matrix der Versuchsreihe „Dosage von Hefebieren im Kaltbereich“* .....251

Tabelle 146: *gaschromatographische Analysendaten der verwendeten Prozess- bzw. Hefebiere* .....252

Tabelle 147: *Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–D* .....253

Tabelle 148: *gaschromatographische Ergebnisse der Biere A–D* .....254

Tabelle 149: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand* .....255

Tabelle 150: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand* .....255

Tabelle 151: *Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)*.....256

Tabelle 152: *Zusammenstellung der Kosten und Erlöse für unterschiedliche Trockensubstanzgehalte in Überschusshefe*.....256

Tabelle 153: *Auswertung der paarweisen Vergleichsprüfung für die Biere A–D* .256

Tabelle 154: *Zeiten und Stammwürzegehalte bei der Abtrennung des Vor- und Nachlaufs* .....257

**ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS**

<i>AbwAG</i>	Abwasserabgabengesetz
<i>AEVA</i>	Aromaextraktverdünnungsanalyse
<i>AI</i>	Autolyse-Index
<i>AOX</i>	adsorbierbare, organisch gebundene Halogene
<i>ARP</i>	antiradikalisches Potential
<i>ARV</i>	antiradikalisches Verhalten
<i>ASBC</i>	American Society of Brewing Chemists
<i>AW</i>	Ausschlagwürze
<i>BET</i>	best estimated treshold
<i>BierStG</i>	Biersteuergesetz
<i>BSB</i>	biochemischer Sauerstoffbedarf
<i>cf.</i>	Confer
<i>CMF</i>	Crossflow-Mikrofiltration
<i>CSB</i>	chemischer Sauerstoffbedarf
<i>d</i>	Tag(e)
<i>dest.</i>	Destilliert
<i>DiFS</i>	Trockensubstanz Dickstoff
<i>DLG</i>	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
<i>DNA</i>	Desoxyribonucleinsäure
<i>EBC</i>	European Brewery Convention bzw. Einheiten der Vereinigung
<i>EGW</i>	Einwohnergleichwert bzw. entgastes Wasser
<i>EK</i>	Entkeimung
<i>ELG</i>	Eiweißlösungsgrad
<i>E<sub>w</sub></i>	Extrakt wirklich
<i>FAN</i>	freier Aminostickstoff
<i>FD</i>	Flavour Dilution
<i>FEE</i>	2-Furfuryl-Ethyl-Ether
<i>FS</i>	Fettsäure
<i>g</i>	Erdbeschleunigung
<i>GC/O</i>	Gaschromatographie/Olfaktometrie
<i>HB</i>	Hefebier
<i>ICP</i>	intracellulärer pH-Wert
<i>ISTD</i>	interner Standard
<i>K</i>	Kelvin
<i>kDa</i>	kilo Dalton
<i>KG</i>	Kieselgur
<i>KZE</i>	Kurzzeiterhitzung
<i>LTP-1</i>	Lipid-Transfer-Protein-1
<i>mas.-%</i>	Massen-(Gewichts-)prozent
<i>MB</i>	Methylenblau
<i>MEBAK</i>	Mitteleuropäische Brautechnische Analysenkommission
<i>MP</i>	Mannoprotein
<i>M<sub>r</sub></i>	relatives Molekulargewicht
<i>NIBEM</i>	Nederlands Instituut voor Brouwerst, Mout en Bier
<i>NIR</i>	Nah-Infrarot
<i>OIML</i>	Organisation Internationale de Métrologie Légale
<i>p.a.</i>	pro analysi
<i>PAGE</i>	Polyacrylamidgelelektrophorese

<i>PB</i>	Prozessbier
<i>PDI</i>	Differenzdruck
<i>PE</i>	Pasteur-Einheit
<i>PF</i>	Pfanne
<i>PrA</i>	Proteinase A
<i>PTFE</i>	Polytetrafluorethylen
$Q_{Tr}$	Trübungsmessung
$\rho$	Dichte
<i>RB</i>	Rückbier
<i>RSF</i>	rotierender Scheibenfilter
<i>RT</i>	Retentionszeit
<i>SA</i>	Sudhausausbeute
<i>SCABA</i>	Servo Chem Automatic Beer Analyzer
<i>SE</i>	Schadeinheit
<i>SI</i>	Stabilitäts-Index
<i>Summe A</i>	Summe der Alterungsindikatoren
<i>Summe S</i>	Summe der Sauerstoffindikatoren
<i>Summe W</i>	Summe der Wärmeindikatoren
<i>StAbw</i>	Standardabweichung
<i>SVZ</i>	Starkverschmutzerzuschlag
<i>T</i>	Temperatur
<i>TS</i>	Trockensubstanz
<i>U</i>	Unit
<i>VK</i>	Variationskoeffizient
<i>Vol.-%</i>	Volumenprozent
<i>VZNL</i>	Vor-, Zwischen- und Nachlauf
<i>WHG</i>	Wasserhaushaltsgesetz
<i>WP</i>	Whirlpool
<i>ZeFS</i>	Trockensubstanz Zentrat
<i>ZuFS</i>	Trockensubstanz Zulauf

# 1 Einleitung

*„Die Natur kennt keinen Abfall. Der Output der einen Produktionsstufe wird zum Input einer anderen.“*[1]

Durch die immer schärfer werdenden Umweltauflagen [2, 3, 4] wurde und wird der Fokus in den Brauereien auf die auftretenden Abwasserbelastungen gerichtet. Das Wassermanagement wurde zu einem bedeutenden Kostenfaktor in der Brauerei [5, 6], und damit sind die Zeiten, in denen die Abwasserproblematik ignoriert wurde, vorbei [7, 8, 9]. Die in der Werbung gerne präsentierte Naturverbundenheit der Brauereien (Bier als Naturprodukt) führte dazu, dass die Brauereien auch Möglichkeiten des produktionsintegrierten Umweltschutzes in Betracht ziehen mussten, um nicht das nach außen dargestellte Umweltbewusstsein *ad absurdum* zu führen. Dementsprechend hatten Brauereien allerdings schon früh die Zeichen der Zeit erkannt und besaßen eine Vorreiterrolle in Bezug auf umweltverträgliche Produktionsprozesse. In diesem Zusammenhang war die Identifizierung aussagekräftiger Metriken zur Evaluierung des Brauprozesses von essentieller Bedeutung. Die Metriken bilden nicht nur die Grundlage für die betriebsinterne Produktionsüberwachung, sondern können, gerade in Zeiten einer zunehmenden Konzentration des Brauereimarktes, als Benchmarkkriterien herangezogen werden [10].

Weltweit kann eine Zunahme der quantitativen Darstellung vor allem der Umweltmaßnahmen in den Unternehmen unter Zuhilfenahme von Input-Output-Analysen beobachtet werden. Der klassische ökonomische Ansatz wird dabei um einen Ressourcenvektor erweitert, so dass technische Parameter in das Modell integriert werden können. Die Input-Output-Analyse ist ein Instrument, mit dem sich z.B. die Wechselbeziehungen zwischen Produktionsbereichen erfassen lassen [11] (vgl. Tabelle 1). Anhand dieser Stoffstromanalyse soll geklärt werden, wie aufwendig die zu treffenden Maßnahmen sein dürfen, damit sich durch die Reintegration der Prozessbiere im Produktionsbetrieb noch ein wirtschaftlicher Vorteil ergibt.

Tabelle 1: Rohstoff- und Reststoffströme in der Brauerei

INPUT	PROZESSCHRITT BIER	OUTPUT
Hefe Sterilluft Wasser Energie Kältemittel Reinigungsmittel Desinfektionsmittel	↓ <b>Gärung</b>	Überschusshefe (Hefe+Hefebier) <b>Ausschübe</b> CO <sub>2</sub> Abwasser
Wasser Energie Kältemittel Reinigungsmittel Desinfektionsmittel	↓ <b>Lagerung</b>	Überschusshefe (Hefe+Hefebier) <b>Ausschübe</b> Abwasser CO <sub>2</sub>
Wasser Energie CO <sub>2</sub> Reinigungsmittel Desinfektionsmittel Hilfsstoffe (Kieselgur, Filtermittel, PVPP)	↓ <b>Filtration</b>	Abwasser <b>Vor-, Zwischen- und Nachlauf</b> Filterrückstand (Kieselgur) Hilfsstoffe
Wasser Energie Kältemittel Reinigungsmittel Desinfektionsmittel CO <sub>2</sub>	↓ <b>Drucktank</b>	<b>Ausschübe</b> , Abwasser CO <sub>2</sub>
Wasser Energie CO <sub>2</sub> Verpackungsmaterial	↓ <b>Abfüllung</b> ↓	Altglas Verpackungsmaterialreste <b>Restebier</b> Spülwasser + Rückstände Abwasser

Im Rahmen der Forschungsarbeit wurde ein Fragebogen an deutsche Brauereien verschickt, um einen Überblick über die Verfahrensweisen zur Behandlung der Prozessbiere zu erhalten. Abbildung 1 zeigt die anfallenden Prozessbiermengen in deutschen Brauereien sowie deren durchschnittliche prozentuale Verteilung<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> 16 der 28 antwortenden Brauereien gaben an, Prozessbiere in ihren Betrieben wieder zu verwenden

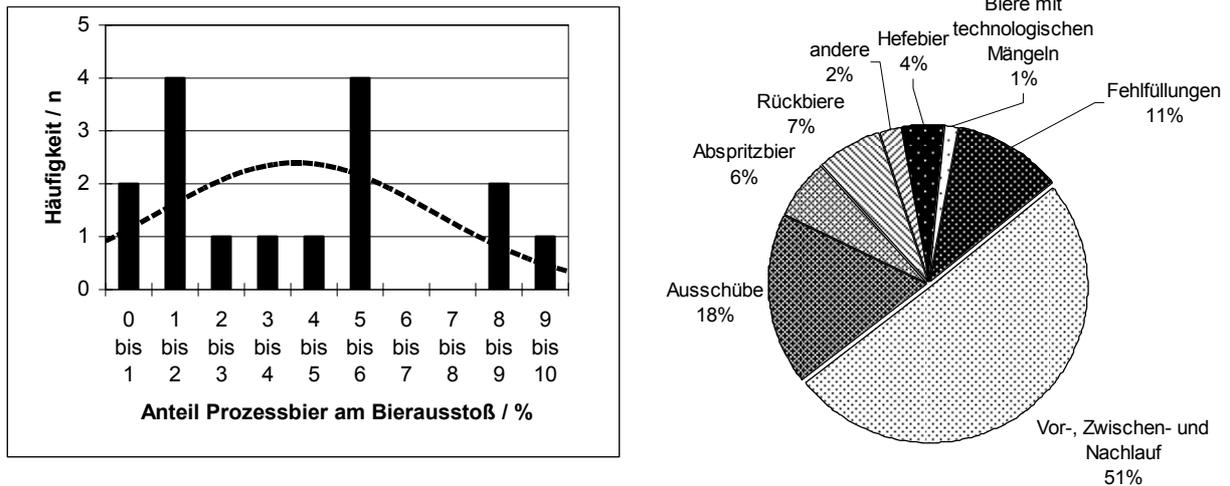


Abbildung 1: Häufigkeitsverteilung der Prozessbieranteile am Bierausstoß in deutschen Brauereien (links); durchschnittliche prozentuale Verteilung anfallender Prozessbiere in deutschen Brauereien (rechts)

Bei einem ungefähren Bierausstoß in 2004 von 106 Mio. hl [12] und dem sich aus der Befragung ergebenden Prozessbieranteil von durchschnittlich 3,7 % würde sich theoretisch eine Biermenge von rd. 4 Mio. hl errechnen. Die sich ergebenden Einsparungen im Bereich der Rohstoffe durch eine vollständige produktionsinterne Verwertung sind von dieser Stelle aus allerdings nur grob abzuschätzen, da der wirkliche Extraktgehalt in diesem Biervolumen nicht bekannt ist (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: *Überschlagsmäßige Betrachtung der Einsparungen an Hopfen und Malz durch vollständige produktionsinterne Verwertung von Prozessbieren*

Beschreibung	Operand	Rechenoperation	Einheit
Gesamtvolumen	A	4.000.000	hl/a
Anteil Bier mit niedriger Stammwürze	B <sub>1</sub>	2/3	
Stammwürze niedrig	B <sub>2</sub>	4	mas.-%
Anteil Bier mit normaler Stammwürze	C <sub>1</sub>	1/3	
Stammwürze normal	C <sub>2</sub>	12	mas.-%
Stammwürze in der Mischung	D	$D = \frac{A \cdot B_1 \cdot B_2 + A \cdot C_1 \cdot C_2}{A} = 6,67$	mas.-%
Malzeinsatz für Bier mit 12 % Stammwürze	E	17,5	kg/hl
Malzeinsatz für Bier mit 6,67 % Stammwürze	F	$F = \frac{D \cdot E}{C_2} = 9,70$	kg/hl
<b>Einsparungen Malz</b>	<b>G</b>	$G = \frac{A \cdot F}{1.000 \frac{kg}{t}} \approx 39.000$	<b>t/a</b>
durchschnittlicher α-Säure-Gehalt [13]	H <sub>2</sub>	5,5	g α-Sre./hl
<b>Einsparungen Hopfen</b>	<b>H</b>	$H = \frac{A \cdot H_2}{1.000 \frac{g}{kg}} \approx 22.000$	<b>kg α-Sre./a</b>

Die vorliegende Arbeit wurde vor dem Hintergrund konzipiert, die technologischen Möglichkeiten zur brauereiiernen Integration von angefallenen Prozessbieren zu untersuchen und damit den Brauereien Instrumente in die Hand geben zu können, diese Prozessströme sicher entsorgen können. Eine sinnvolle Verwertung der Nebenprodukte kann zudem dazu führen, dass insgesamt die Effektivität des Brauprozesses und damit die Ausnutzung der eingesetzten Rohstoffe auf ein Höchstmaß gesteigert wird.

## 2 Grundlagen

Um einen Überblick über die auftretenden Würze- und Bierverluste zu bekommen, werden die Volumenverluste von der heißen Ausschlagwürze bis zum fertig abgefüllten Bier erfasst. Wichtig ist diese Kennzahl nicht nur für die Kontrolle der Wirtschaftlichkeit des Brauverfahrens, vielmehr stellt sie auch die Grundlage für das zu versteuernde Biervolumen dar. Nach § 10 Abs. 2 BierStG i. d. F. v. 01.01.1993 [14] gilt: „Wird Bier entgegen der in der Erlaubnis vorgesehenen Zweckbestimmung verwendet oder kann es dieser nicht mehr zugeführt werden, entsteht die Steuer, es sei denn, es ist nachweislich untergegangen. Schwund steht dem Untergang gleich. ...“ Aus der reinen Bestimmung des Volumenverlustes kann allerdings der wirkliche Extraktverlust nicht berechnet werden. Zu dessen Berechnung werden die Extraktgehalte der heißen Ausschlagwürze und des fertig abgefüllten Bieres miteinander verglichen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Formeln zur Berechnung des Bierschwandes. Der Bierschwand wird, getrennt nach Biersorten, üblicherweise am Ende eines Monats ermittelt.

**Tabelle 3: Berechnung des Extraktschwandes ab heißer Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung [15]**

$E_I = V_{\text{Würze, heiß}} \cdot 0,96 \cdot \rho(GV - \%)$	Gleichung 2.1: Extrakt der Ausschlagmenge
$E_{II} = V_{\text{Bier, gesamt}} \cdot \rho(GV - \%)$	Gleichung 2.2: Extrakt der Gesamtbiermenge
$E_{III} = \text{Schüttung}_{\text{gesamt}} \cdot SA(\%)$	Gleichung 2.3: Gesamtmalzextrakt
$\text{Schwand}_{\text{ab Ausschlagwürze}} = \frac{E_I - E_{II}}{E_I} \cdot 100\%$	Gleichung 2.4: Extraktschwand ab Ausschlagwürze
$\text{Schwand}_{\text{ab Malzschüttung}} = \frac{E_{III} - E_{II}}{E_{III}} \cdot 100\%$	Gleichung 2.5: Extraktschwand ab Malzschüttung

Die Wiederverwertung von Prozessbieren führt demnach nicht nur zu einer Verringerung von Produktionsverlusten und damit zu einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit, sondern kann darüber hinaus auch zu einer Senkung der Abwassergebühren beitragen. Die Höhe der Abwassergebühren richtet sich nach der Form der Einleitung. Grundsätzlich wird dabei zwischen Direkt- und Indirekteinleiter unterschieden. *Direkteinleiter* sind dabei Industrie- und Gewerbebetriebe, die ihr Abwasser nicht in die öffentliche Kanalisation, sondern direkt in einen Vorfluter leiten.

Sie benötigen nach dem Wasserhaushaltsgesetz eine wasserrechtliche Genehmigung. Die anfallenden Abwassergebühren werden über das Abwasserabgabengesetz geregelt und richten sich nach der Schädlichkeit des Abwassers [4]. Die Schädlichkeit wird durch eine Schadeinheit (SE) ausgedrückt. Für die Bestimmung der Schädlichkeit werden die

- oxidierbaren Stoffe (als chemischer Sauerstoffbedarf (CSB)),
- die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff,
- die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Nickel, Chrom, Blei, Kupfer,
- organischen Halogenverbindungen (AOX) und
- die Fischgiftigkeit des Abwassers

zugrunde gelegt. Derzeit liegt die Gebühr bei 35,79 € je Schadeinheit. Die Abwasserabgabe soll Anreize zur Vermeidung von Abwasser bzw. zur Verbesserung der Reinigungsleistungen bieten. Die erste Anreizwirkung besteht in der Verminderung der Schadeinheiten bei höherer Reinigungsleistung der Abwasserbehandlungsanlagen. Einen zweiten Anreiz bietet die Abgabensatzreduzierung, die der Einleiter in Anspruch nehmen kann, der seine Abwasserreinigung nach den jeweils in Betracht kommenden Regeln der Technik betreibt. Der dritte Anreiz ist dadurch gegeben, dass Investitionen zur Verbesserung der Reinigungsleistung bei Erfüllung der gesetzlichen Voraussetzungen mit der Abgabe verrechnet werden können. Die Abgaben verringern sich, wenn den Mindestanforderungen nach § 7a WHG oder den in der wasserrechtlichen Erlaubnis der Einleitung gesetzten strengeren Anforderungen entsprochen wird [3]. Die Abgaben ermäßigen sich nach § 9 Abs. 5 AbwAG damit je SE um 75%; ab Veranlagungsjahr 1999 um 50%. Von SCHUMANN [16] wurde die in Tabelle 4 dargestellte Prioritätenliste gemäß den bedeutendsten Verschmutzungsquellen in Brauereien erarbeitet. Obwohl heutzutage ein Großteil der Reststoffe zurückgehalten und somit nicht ins Abwasser gelangt, stellen die Produktverluste einen erheblichen Anteil an den Belastungen des Abwassers dar.

*Tabelle 4: Prioritätenskala zur Senkung der Abwassermengen und Schmutzfrachten aus Brauereien*

		SE/hl	EGW <sub>40</sub> /hl	EGW <sub>1,8</sub> /hl	EGW <sub>0,2</sub> /hl
6% Bierschwand	etwa	4,8	11,60	6,50	0,030
Hefe und Geläger	etwa	2,3	3,20	2,00	0,010
Vor-, Zwischen- und Nachlauf	etwa	1,2	1,78	1,48	0,013
Hefebier	etwa	0,9	2,04	1,13	0,039

SE:= Schadeinheit gemäß Abwasserabgabengesetz; EGW<sub>40</sub>:= Einwohnergleichwert oxidierbarer Inhaltsstoffe des sedimentierten Abwassers; EGW<sub>1,8</sub>:= Einwohnergleichwert der Schlammfracht; EGW<sub>0,2</sub>:= Einwohnergleichwert nach Abwassermenge;

*Indirekteinleiter* sind Gewerbebetriebe oder Privathaushalte, die ihre Abwässer in die öffentliche Kanalisation einleiten. Die Indirekteinleitung in die kommunale Kanalisation bzw. die kommunale Kläranlage wird über die Abwassersatzung bzw. die Gebührensatzung (Grundlage dafür ist das Kommunalabgabengesetz) geregelt. Die Gebühr wird aufgeteilt nach Grundgebühr und Starkverschmutzerzuschlägen (SVZ). Für die Ermittlung der SVZ werden dabei in den einzelnen Bundesländern unterschiedliche Berechnungsmodelle (leistungsorientiert, kostenorientiert oder kombiniert leistungs- und kostenorientiert) angewendet. Eine Möglichkeit zur kostenorientierten Berechnung der Abwassergebühr ist in Gleichung 1.1 dargestellt.

$$G_{ges} = g \cdot \left( 1 + \left( \frac{x - y}{a} \right) \cdot \frac{F}{100} \right) \quad \text{Gleichung 2.6}$$

$G_{ges}$ := Gesamtgebühr in €/m<sup>3</sup>;  $g$ := Grundgebühr in €/m<sup>3</sup> ohne Zuschlag;  $x$ := mittlere BSB<sub>5</sub>-Konzentration des Abwassers des Starkverschmutzers in mg/l;  $y$ := Grenzkonzentration, bei der der Mehraufwand der Kläranlage 30% erreicht in mg/l;  $a$ := mittlere BSB<sub>5</sub>-Konzentration von häuslichem Abwasser in mg/l;  $F$ := Jahreskostenanteil in % der biologischen Abbaustufe der Kläranlage;

Wünschenswert wäre für die Brauwirtschaft, wenn beim Vergleich mit häuslichem Abwasser neben dem biochemischen Sauerstoffbedarf (BSB<sub>5</sub>) auch der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) berücksichtigt würde, da Brauereiabwasser wesentlich leichter abzubauen ist als häusliches Abwasser. Das Verhältnis von CSB/BSB<sub>5</sub> im häuslichen Abwasser beträgt ungefähr 2:1, wohingegen das CSB/BSB<sub>5</sub>-Verhältnis für Brauereiabwasser bis auf 1,3:1 sinken kann [17]. Folgende Übersicht soll den Einfluss der Reststofffrachten auf die Abwassergebühren verdeutlichen. Dem Beispiel liegt eine Kläranlage mit Vorklärung, Biologie mit Belebtschlammverfahren und Faulung zugrunde. Folgende Annahmen werden getroffen:

- Brauereigröße 500.000 hl
- anfallende Abwassermenge pro Tag 800 m<sup>3</sup>/d
- durchschnittlicher BSB-Gehalt häusliches Abwasser  $c_{BSB5}$ =300 mg/l
- Grenzwert  $c_{BSB5,GW}$ =390 mg/l (30% über dem Durchschnitt)
- stark verschmutztes Brauereiabwasser mit  $c_{BSB5,Brauerei}$ =3.000 mg/l
- Abwassergrundgebühr  $g$ =2,00 €/m<sup>3</sup>

In Tabelle 5 sind die zu entrichtenden Abwassergebühren für drei unterschiedliche Fälle zusammengestellt. Im Fall 1 werden keine Maßnahmen bezüglich Rückhaltung von Hefe bzw. Hefebier herangezogen. In Variante 2 gelangt keine Überschusshefe ins Abwasser, wohingegen in Fall 3 das Hefebier mittels eines geeigneten Rückgewinnungssystems (Bierrückgewinnungsrate = 70%) aus der Hefesuspension

entfernt wurde. Die zurückbleibende Hefe gelangt ins Abwasser, wobei der Hefebieranteil durch Wasser ersetzt wurde, um die Hefe wieder pumpfähig zu machen. Der Rechengang ist im Anhang in Tabelle 76 vollständig dargestellt.

*Tabelle 5: Abwassergebühren für verschiedene Varianten der Hefeverwertung*

	Fall 1	Fall 2	Fall 3
anfallende Abwassermenge pro Tag [m <sup>3</sup> /d]	800	796	800
anfallende BSB <sub>5</sub> -Fracht [mg/l]	2.400	1.840	2.149
Abwassergebühr [€/m <sup>3</sup> ]	3,61	2,92	3,30
Abwassergebühr [€/hl VB]	1,44	1,16	1,32
Gesamtgebühren für Abwasser [€/a]	720.000	580.000	660.000

## 2.1 Prozessbierbehandlung in der Brauerei

Wie in Punkt 2 dargestellt, muss in erster Linie aufgrund wirtschaftlicher Überlegungen die Rückführung von Prozessbieren in den Produktionsprozess angedacht werden. 1939 bereits wurde ein Patent zur „Überführung von Abfallbier in trinkbares, lagerbeständiges Bier“ beim damaligen deutschen Reichspatentamt eingereicht [18], um einer wirtschaftlichen Belastung durch das „ungenutzte Fortlaufen“ der Prozessbiere entgegenzuwirken. Prozessbiere werden entsprechend ihrer Herkunft in Unfiltrat- und Filtrat-Prozessbiere eingeteilt und sind in Tabelle 6 dargestellt.

*Tabelle 6: anfallende Prozessbiere in einer Brauerei*

<b>Unfiltrat</b>	<b>Filtrat</b>
Hefebiere	Fehlfüllungen
Biere mit technologischen Mängeln	Vor-, Zwischen- und Nachlauf am Filter
	Ausschübe zwischen Produktionsabteilungen
	Abspritzbiere in der Füllerei
	Biere mit technologischen Mängeln
	reinfizierte Biere nach der Abfüllung
	Rückbiere

### 2.1.1 Stand der Technik der Prozessbierbehandlung in der Brauerei

Bei der bisherigen Behandlung von Prozessbieren in Brauereien werden die unterschiedlichsten Prozessbiertypen in einem Sammel-tank zwischengelagert, ehe sie einmal wöchentlich als letzte Charge eines Produktionstages durch den Kieselgurfilter filtriert werden. Nach einer Sterilisierung über einen Kurzzeiterhitzer

und einer EK-Filtration kann das Bier in einer separaten Prozessbierabteilung im Gär- und Lagerkeller gesammelt werden (cf. Abbildung 2). Durch dieses Verfahren werden möglicherweise enthaltene Mikroorganismen während der Kurzzeiterhitzung abgetötet und anschließend im EK-Filter aus dem Bier entfernt. Dadurch sollten bei einer mikrobiologischen Betriebsüberwachung keine Schwierigkeiten beim Mikroskopieren entstehen [19].

Soll das Bier am Filter zum Verschnitt kommen, muss zuvor ein Aufkräusen mit rund 20 % Kräusen ( $V_s=40\%$ ) und anschließender Reifungsphase erfolgen, um den Sauerstoffgehalt zu minimieren und bereits gebildete Carbonyle zu reduzieren. Nach der Lagerung (1–3 Wochen) werden die Biere mit einem Anteil von 5–10 % dem Mutterbier beigedrückt [20].

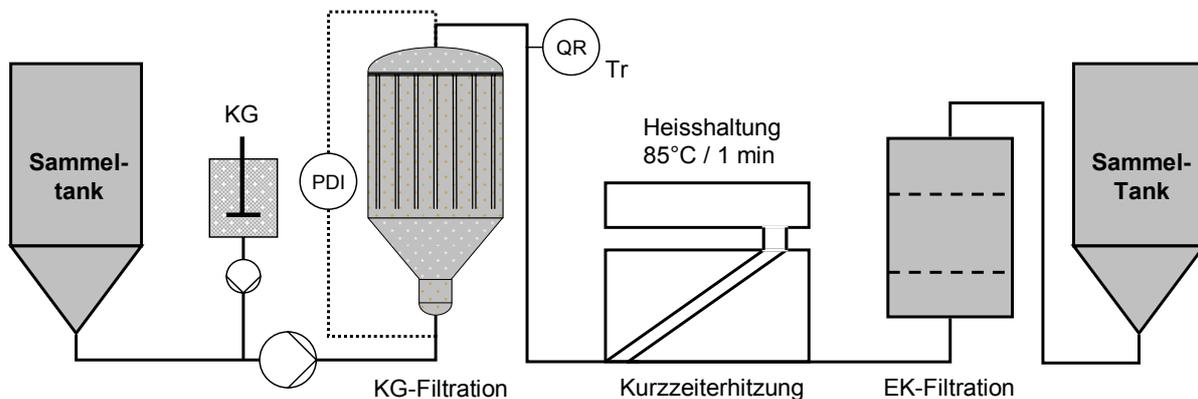


Abbildung 2: Prozessbieraufbereitung nach LITZENBURGER [19] (Legende: KG = Kieselgur; EK = Entkeimung, PDI = Differenzdruckmessung;  $QR_{Tr}$  = Trübungsmessung)

Ein Nachteil dieser Behandlungsmethode ist aus technologischer wie auch mikrobiologischer Sicht die Zwischenlagerung des Prozessbieres im Sammel-tank. Für größere Brauereien mag dieses Verfahren durchaus praktikabel sein, für kleinere und mittelständische Betriebe ist sie es jedoch nicht. Vor allem die langen Zeiträume, bis der Sammel-tank gefüllt ist, sprechen gegen eine solche Behandlungsmethode.

### 2.1.2 Behandlung der Ernte- und Gelägerhefe

Während der Gärung nimmt die Hefebiomasse, abhängig von den jeweiligen Gärungsparametern, um das 3–6-fache zu. Nach Beendigung der Haupt- bzw. Nachgärung wird die Hefe geerntet und entweder weitergeführt oder fällt als Überschusshefe an. Die Überschusshefe weist dabei einen Trockensubstanzgehalt

von 10–14 % auf, wobei der in der Hefe enthaltende Bieranteil ca. 1–3 % des gesamten Jahresausstoßes einer Brauerei ausmacht [21, 22]. Vor allem kleinere Brauereien lassen die gesamte Hefefracht in das Abwasser, wodurch zwangsläufig die zu entrichtenden Abwassergebühren stark erhöht werden (cf. Kapitel 2). In der Literatur werden zwei prinzipielle Verwertungsmöglichkeiten für Überschusshefe beschrieben [23, 24]:

- externe Verwertung
- interne Verwertung

Bei der *externen Verwertung* wird die Hefe an weiterverarbeitende Betriebe bzw. direkt an die Landwirtschaft abgegeben. Es wurde vom Einsatz von flüssiger Hefe in der praktischen Fütterung bei Rindern und bei Schweinen berichtet [24, 25, 26, 27]. Aufgrund des bitteren Geschmacks sollte eine anteilmäßige Dosierung von 10–15 % allerdings nicht überschritten werden [28]. Aktuell wird den Nebenprodukten der industriellen Lebensmittelproduktion wieder eine größere Bedeutung im Bereich der Tierernährung zugemessen, da es sich dabei zum Einen um „erneuerbare Ressourcen“ handelt [29], und zum Anderen diese Nebenprodukte häufig sehr attraktiv in Bezug auf ihre wertvollen Inhaltstoffe sind [30, 31]. Über eine günstige Wirkung auf die Pansenbedingungen sowie über eine erhöhte zellulolytische Aktivität wird berichtet [32]. Die für die Tierleistung und Gesundheit relevanten Effekte gehen zurück auf milieuprägende und bakterienstimulierende Eigenschaften der noch lebenden Hefen.

Der Verkauf von Überschusshefe an die Industrie ist eine weitere Möglichkeit für die externe Verwertung. Lebensmittelfirmen und Pharmaindustrie sind hierbei die Hauptabnehmer. Die Hefezelle kann dabei nach unterschiedlichen Gesichtspunkten aufgeschlossen werden [33]:

- Extraktion hoch aufgereinigter Produkte (z.B. Enzyme)
- Extraktion von sog. multifunktionalen Zellbestandteilen (z.B. „yeast extracts“)
- Gleichzeitige Extraktion vieler Hefeprodukte („Totalfraktionierung“)

Tabelle 7 zeigt einige ausgewählte Inhaltstoffe der Hefezelle, die für technologische und medizinische Aspekte bedeutsam sind.

*Tabelle 7: ausgewählte Inhaltsstoffe der Hefezelle und ihre Verwendung für technologische und medizinische Aspekte*

<b>Inhaltstoff</b>	<b>Verwendung</b>	<b>Quelle</b>
β-Glucan	Immunabwehr, Nährstoff	[34, 35]
yeast food	Stickstoffquelle bei HGB, Bäckerei	[36, 37, 38, 39]
RNA	Aromabildung / Gewürze	[40, 41, 42]
Ergosterol	Vitamin-D <sub>2</sub> -Precursor / Regelung des Ca- und P-Pegels im Blut	[33]
Invertase	Trübungstabilisierung in Wein	[43]
Glutathion	Antioxidans	[44]
Hefe	Abwasserreinigung	[45]
yeast wrap <sup>®</sup>	Tablettenüberzug	[46, 47, 48]
Hefeextrakt	Ernährung	[49, 50]

Eine Möglichkeit der internen Verwertung von Überschusshefe wurde in der Zugabe zum Maischen gesehen. Der durch die Zugabe von Hefe erzielte höhere FAN-Gehalt in der Ausschlagwürze führte vor allem bei Rohfruchtbieren zu einer beschleunigten Gärung und im fertigen Bier zu stabileren Schäumen. Ein negativer Einfluss auf die Bierqualität wurde nicht festgestellt [51, 52]. Auch die direkte Zugabe zu den Trebern wurde diskutiert. Da jedoch weder eine Verbesserung der Fütterungsqualität noch eine mengenmäßig wesentliche Steigerung der Trebermenge erzielt werden konnte, wurde die direkte Zugabe nur als Notlösung angesehen [53].

ZÜRCHER [54] verglich verschiedene Hefeverwertungsarten hinsichtlich ihrer Eignung, den relativen Extraktswand zu minimieren. Danach wird eine weitestgehende Kompensation des relativen Extraktswandes nur in einer Kombination aus Rückgewinnung des Abpressbieres und Verkauf der Presshefe gesehen (cf. Tabelle 8).

*Tabelle 8: Maßnahmen zur Verminderung des relativen Extraktswandes [54]*

<b>Maßnahme</b>	<b>rel. Extraktswand</b>
keine Abfallhefeverwendung	100 %
Abpressen der gesamten Abfallhefe- und Gelägermenge und Verwertung des gewonnenen Abpressbieres als Restbier	30 %
Verkauf der Abfallhefe ohne Abpressbiergewinnung	84 %
Hefepressbierverwertung und Presshefeverkauf	15 %
Mitvermaischen der Abfallhefe	60 %

Das enthaltene Hefebier kann über geeignete Rückgewinnungssysteme aus der Überschusshefe gewonnen werden. Dazu zählen vor allem Zentrifugentechniken und Membrantrenntechniken (*cf.* Kapitel 2.2).

Die Prozessfähigkeit des gewinnbaren Hefebieres wird nicht nur durch die Wahl des Rückgewinnungsverfahrens beeinflusst. Ebenso wichtig sind die Aufbewahrungsbedingungen der Überschusshefe vor der Verarbeitung [22, 23]. Die Qualität der Hefesuspension kann vor allem durch die physikalischen Faktoren *Zeit* und *Temperatur* negativ beeinflusst werden. Bedingt durch diese physikalischen Stressfaktoren führen auch chemische Faktoren zu einer Verschlechterung des physiologischen Zustandes der Hefezellen. Dies sind neben Ethanol auch andere toxisch wirkende Metabolite (z. B. Acetaldehyd, Essigsäure) [55] und mittelkettige Fettsäuren [56]. Durch das Absterben der Hefezellen kommt es zur Autolyse und damit zur Exkretion von Zellinhaltsstoffen (z. B. Polysaccharide, Nucleinsäuren und Lipide) an das Medium [57]. Ein weiterer wichtiger Aspekt, den es zu beachten gilt, ist die Aktivität der schaumnegativen Proteinase A (PrA) [58, 59]. Als Hauptsubstrat der PrA wurden das im Bier enthaltene Lipid-Transfer-Protein 1 (LTP-1) identifiziert [60]. PrA ist normalerweise in den Vakuolen der Zelle lokalisiert und wird stressbedingt in einer inaktiven Vorform aus der Zelle ausgeschleust. Diese inaktive Vorform wird autokatalytisch in die aktive Form umgewandelt und führt somit zu einer Degradation der schaumpositiven Proteine [61].

### 2.1.3 Behandlung von Hefebier

Die folgenden Arbeiten setzten sich mit der betriebsinternen Behandlung von Hefebieren auseinander, wobei teilweise gegenläufige Ergebnisse dargestellt wurden.

SCHWILL-MIEDANER [23] berichtet über die Dosierung von Gelägerbier entlang des Würzeweges. Die dabei erzielten Ergebnisse zeigten, dass sich eine Dosage zur Würzekochung nicht negativ auf die Schaumstabilität und den Geschmack des fertigen Bieres auswirkten, wohingegen Dosagen zu späteren Zeitpunkten sich deutlich ungünstiger in Bezug auf diese beiden Parameter verhielten.

MÜLLER *et al.* [62] untersuchten die Zugabe von Hefebier im Whirlpool. Durch die Zugabe konnten keine Produktionsschwierigkeiten beobachtet werden. Auch in den Untersuchungen von POLSTER [63] wurden keinerlei Schwierigkeiten durch die Zugabe von Hefebier im Heißbereich festgestellt.

HANSEN [64] wiederum führte Dosageversuche mit bis zu 10 % Hefebieranteil in der Heißwürze durch und konnte im fertigen Bier sowohl analytisch als auch sensorisch keine gravierenden Unterschiede zwischen den Verschnitt- und den Vergleichsbieren feststellen.

Problematisch ist bei der Dosage von Prozessbieren im Heißbereich immer der Verlust an Ethanol durch die Verdampfung. GEIGER [65] schreibt jedoch, dass der Verlust an Alkohol durch diese Verfahrensweise nicht so groß ist, wie oft vermutet wird. BOECK-NIELSEN [66] beziffert den Verlust von Ethanol auf 4 % (Verdampfung und Trub). Um diesen Verlusten entgegen zu wirken, wurde von HUYMANN [67] vorgeschlagen, die Prozessbiere in die Würzeleitung zwischen Whirlpool und Würzekühler zu dosieren. Wegen des herrschenden Druckes kann dabei kein Alkohol entweichen.

NARZISS *et al.* [68] führten an, dass schon kleine Mengen von 1–3 % an Geläger- und Hefepressbier zu dunkleren Würze- und Bierfarben, höheren Gehalten an Polyphenol- und Gummistoffen und sehr hohen Gehalten an Isobuttersäure und Isovaleriansäure führten. Gerade die letzten beiden Aromastoffe sorgten für ein käsiges und damit unakzeptables Aroma der fertigen Biere. NARZISS [69] empfiehlt daher ebenfalls eine Filtration des gewonnenen Hefebieres mit anschließender Entkeimung (EK-Filtration oder besser KZE), ehe es zu Beginn der Gärung zudosiert wird. Die unerwünschten Inhaltstoffe des Hefebieres werden dabei von der Hefe aufgenommen, so dass das resultierende Verschnittbier bei Hefebieranteilen von 1–5 % nicht beeinträchtigt wird.

DONHAUSER *et al.* [70] untersuchten die Auswirkungen der Hefebierdosage zur Gärung. Danach wirkten sich Hefebieranteile von 2–5 % geschmacklich nicht negativ aus, wohingegen ab einem Hefebieranteil von 10 % eindeutige Einbußen bei der Bierqualität verzeichnet wurden.

Von HOGGAN *et al.* [71] wurde berichtet, dass sich eine Dosage von Hefebieren vor der Filtration nicht negativ auf die Qualität des Verschnittbieres auswirkte. In diesem Zusammenhang zeigte OECHSLE [72], dass durch die Membranfiltration über 90 % des hochmolekularen  $\beta$ -Glucans abgetrennt werden. Der Autor erwartet dadurch keine Filtrationsschwierigkeiten durch einen Verschnitt mit den Hefebieren. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen GIRR *et al.* [73], die ebenfalls deutliche Abnahmen im Bereich der  $\beta$ -Glucane durch die Membranfiltration feststellten.

BILGE [74] beschreibt eine Möglichkeit zur Rückgewinnung von wertvollen Inhaltstoffen aus Hefebieren mittels Ultrafiltration. Vor allem die dabei erhaltenen proteinischen Fraktionen sollen durch Zugabe in den Produktionsprozess zu einer verbesserten Schaumstabilität führen.

#### 2.1.4 Behandlung von Vor-, Zwischen- und Nachläufen aus der Filtration

Vor-, Zwischen- und Nachläufe (VZNL) aus der Filtration stellen eine weitere Quelle von Extraktverlust dar. Die anfallenden Mengen hängen in erster Linie vom verwendeten Filtersystem ab [75] und werden folglich in der Literatur unterschiedlich angegeben. SCHLECHT [76] beziffert den Bierverlust bei der Klärung über Filter zwischen 0,4 und 0,8 %, UNKEL [77] und MEIER [78] setzen ihn bei etwa 4-6 % der Stundenleistung der Filtration an. NARZISS [79] führt folgende Bierverluste, abhängig vom Filtersystem, an:

- Kieselgurrahmenfilter: 0,20 Vol.-%
- Kerzenfilter: 0,25–0,30 Vol.-%
- Horizontalfilter: 0 Vol.-%

Für die kieselgurfreie Filtration auf Basis der Crossflow-Mikrofiltration werden ca. 0,7 Vol.-% Bierverlust angegeben [80]. Der relative Anfall von VZNLs kann durch eine Verlängerung der Standzeit verringert werden. Entscheidend in diesem Zusammenhang ist die Filtrierbarkeit des Bieres [81]. Diese VZNLs sollten möglichst rasch weiterverarbeitet werden, da sie aufgrund ihres Verdünnungsgrades (Stammwürze ~ 4 mas.-%) und den damit fehlenden Selektivbestandteilen (Hopfenbitterstoffe, Ethanol, etc.) stark kontaminationsanfällig sind [75]. Damit können sich nicht nur obligate sondern auch potentielle Bierschädlinge innerhalb der Brauerei auf andere Produktionsbereiche ausbreiten [82]. Verschiedene Autoren führen an, dass diese Biere unbedingt eine thermische Behandlung vor der Rückführung in den Produktionsprozess erfahren sollten [19, 83]. NARZISS *et al.* [68, 84] beschrieben die Dosage von Weglaufbier zum Einmaischen. Die dabei erhaltenen Biere zeichneten sich durch eine leicht dunklere Bierfarbe, eine geringfügig schlechtere kolloidale Stabilität, jedoch durch eine etwas bessere Schaumstabilität aus. PUTZ [85] beschrieb die vor- und nachlaufreie Filtration anhand der Dosage der VZNLs zur Lagerung. Im Verschnitt mit einem grünen Schlauchbier wurde durch eine kräftige Nachgärung der vorhandene Sauerstoff

rasch verbraucht. Bei der anschließenden kalten Nachgärung wurden auch jene Gerbstoff-Eiweiß-Verbindungen ausgeschieden, die unter dem Einfluss des Luftsauerstoffs bereits Kondensationsprodukte gebildet hatten. NARZISS [69] wiederum führt die Anschwemmung mit bereits filtriertem Bier an, die dadurch ebenfalls vor- und nachlaufrei gestaltet werden kann. Nach KIEFER [86] wird dabei die Stammwürze im Verschnitt um 0,05 mas.-% gesenkt, der Sauerstoffgehalt um 0,005 mg/l und das Gesamtvolumen um ca. 0,5 % erhöht. Die moderne Kieselgurfiltration beinhaltet dagegen im Wesentlichen die Verwendung von entgastem, karbonisiertem Wasser als Anschwemmmedium [87], die Dosage von VZNL zur laufenden Filtration und die Verdrängung des Unfiltrates am Ende der Filtration mit entgastem, karbonisiertem Wasser [78, 88]. Diese Verfahrensweise bedingt ein etwas höheres Einbrauen im Sudhaus, um die Rückverdünnung während der Filtration zu kompensieren. MEIER [78] gibt die Einsparungen durch die Dosage von VZNLs zur laufenden Filtration bei einer 500.000 hl Brauerei mit 16 Suden/a an.

### **2.1.5 Behandlung von Rückbieren und Prozessbieren aus dem Abfüllbereich**

Die Bierverluste bei der Fassabfüllung werden bei SCHLECHT [76] mit 0,5–0,6 % , die Verluste während der Flaschenabfüllung werden mit 0,75–0,80 % angegeben. KOLLER gibt die Überschäum- und Abspritzbierverluste mit 0,5 % der Gesamtabfüllmenge an. Modernere Flaschenkeller weisen heute einen Schwund von 0,2–0,40 % auf [89], wobei die Verluste im Wesentlichen auf das Überschäumen der Flaschen durch die Hochdruckeinspritzung zurückzuführen sind [90]. Die Hochdruckeinspritzung wurde eingeführt, um „die unter Lufteinschluss auftretenden Veränderungen wie Geschmacksverschlechterung, schlechte Schaumeigenschaften, schlechtes Kohlensäurehaltevermögen, der Verlust des Bieraromas, Instabilität und Wildwerden“ zu vermeiden [91]. NARZISS [68] beziffert die anfallenden Mengen an Abspritz-, Rück- und Restbier, abhängig von der Funktion der Füller bzw. der gesamten Füllerei und dem Rückbieranfall, auf 1–3 %. SCHUMANN [92] schreibt, dass in der Flaschenabfüllung 0,26 ml Bier/Flasche als Überschäumverluste und u.U. 1,4 ml Bier/Flasche als Abspritzverluste anfallen können. In einer Studie des BAYERISCHEN STAATSMINISTERIUMS FÜR LANDESENTWICKLUNG UND UMWELTFRAGEN wurden die Bierverluste in der Flaschenabfüllung mit 1,46 ml/Flasche angegeben

[93]. Von HÄRING *et al.* [94] wird der Bierverlust bei der Fassabfüllung mit 60 ml/KEG angegeben. UNKEL [77] wies bereits 1977 darauf hin, Rückbiere und andere Fehlchargen nicht mehr in die Kanalisation abzulassen, sondern der Würzpfanne etwa 30 min vor dem Ausschlagen zuzusetzen. NARZISS [69] berichtet über verschiedene Methoden, diese Biere wieder in den Produktionsprozess zu integrieren. Danach können sie nach einer Sterilfiltration mit 25–30 % Kräusen versetzt und einer nochmaligen Nachgärung unterzogen werden. Es wird auch die von HUYMANN [67] vorgeschlagene Möglichkeit der Dosage dieser Biere in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler diskutiert, wobei diese Verfahrensweise in verschiedenen Versuchsreihen stets zu qualitativen Beeinträchtigungen der Verschnittbiere führte. BOECK-NIELSON [66] führte dagegen an, dass die Zugabe von Restbieren im Heißbereich keine Beeinträchtigung der Qualität der Verschnittbiere mit sich brachte. Für ihn sprechen zudem die mikrobiologische Sicherheit des Verfahrens und die sehr einfache Handhabung für die Dosage des Restbieres in den Whirlpool. LITZENBURGER *et al.* [19] sehen die Erhitzung der Abspitzbiere in einem Tank mittels Heizschlägen als einfachste Möglichkeit der Aufbereitung an. Anschließend wird ein Aufkräusen empfohlen. Eine weitere Variante der Aufbereitung sehen die Autoren in der von NARZISS [69] beschriebenen Verfahrensweise.

### **2.1.6 Behandlung von trübem oder verdorbenen (saurem) Prozessbier**

Trübes Rückbier sollte aufgrund mikrobiologischer Gefahren am sichersten außerhalb des Produktions- oder Abfüllbereiches in die Kanalisation geleitet werden. Um die Abwasserbelastung zu minimieren, wurde von COOPER [95] und SIDOR *et al.* [96] dazu die Extraktion von Ethylalkohol aus Brauereiabfällen vorgeschlagen. Dies hätte nicht nur den Vorteil, die erwähnte Abwasserbelastung durch eine Reduzierung der BSB<sub>5</sub>-Konzentration zu minimieren, sondern mit der Gewinnung des Ethylalkohols auch ein wertvolles Produkt zu erhalten. BORTHERTON [97] schlägt dazu die Rückgewinnung des Alkohols durch Anwendung eines Fallstromverdampfers vor. Aufgrund relativ hoher Investitionskosten für solche Rektifikationsanlagen wurde in den USA begonnen, Prozessbiere aus verschiedenen Brauereien zu sammeln und zentral aufzubereiten [98]. In der dort beschriebenen Anlage sollen ca. 20 % der jährlich anfallenden Prozessbiere verarbeitet werden. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwertung mittels anaerober Technologien zur Energiegewinnung dar. LI *et al.* [99] untersuchten anhand dieser Technologie die Eigenschaften von Prozessbieren

hinsichtlich ihres Methanbildungsvermögens. Eine brauereiinterne Verwertungsmöglichkeit wird ebenfalls in der Literatur diskutiert [75]. Danach kann mit *Lactobacillus brevis* infiziertes „Sauerbier“ im Sudhaus zur Maische- bzw. Würzesäuerung eingesetzt werden, wenn nicht mehr als 1 % dosiert wird.

## 2.2 Verfahren zur Gewinnung von Hefebier aus Überschusshefe

Neben den klassischen Anwendungen der Jungbierseparation, der Heisswürzeseparation/-filtration und der Hauptfiltration werden im Brauereibereich verschiedene Trenntechniken zur Rückgewinnung von Bier aus Überschusshefe eingesetzt. Hefezellen können relativ leicht von der umgebenden Flüssigkeit durch einfaches Absetzen, Zentrifugation und mechanische Filtration getrennt werden [100, 101]. Zentrifugentechniken zur Jungbierklärung wurden schon Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt, wobei sich natürlich die heute eingesetzten Maschinen infolge der technischen Weiterentwicklung durch eine deutlich höhere Effizienz auszeichnen [102]. Im Bereich der Zentrifugation werden Dekantier- und Teller-Zentrifugen eingesetzt. Das klassische Absetzverfahren ist vor allem aus qualitativen Gesichtspunkten heraus nicht zu empfehlen, da die Temperatur in der Hefesuspension häufig nicht den geforderten Werten von  $T < 4 \text{ °C}$  entspricht. Im Bereich der mechanischen Filtration wurden in der Vergangenheit Hochdruck-Kammerfilterpressen eingesetzt [65, 70, 103]. Diese Pressen erreichten zwar sehr hohe Ausbeuten (TS-Gehalte  $> 35 \text{ mas.-%}$ ), jedoch sprachen wiederum qualitative Aspekte gegen einen weiteren Einsatz zur Hefebierrückgewinnung [21], so dass heutzutage nur Verfahren auf Basis der dynamischen Mikrofiltration für diese Applikation eingesetzt werden.

### 2.2.1 Wirkungsgrad und Ausbeute der Trennverfahren

Die Wirksamkeit des Absetzvorgangs bei Zentrifugen wird mit dem Grad der Abscheidung beurteilt [104]. Der Abscheidegrad  $\eta_A$  errechnet sich aus den Feststoffkonzentrationen im Zulauf, Zentrat und Dickstoff ( $\eta_A = f(\text{ZuFS}, \text{ZeFS}, \text{DiFS})$ ) zu [105]:

$$\eta_A = \frac{(\text{ZuFS} - \text{ZeFS}) \cdot \text{DiFS}}{(\text{DiFS} - \text{ZeFS}) \cdot \text{ZuFS}} \cdot 100$$

Gleichung 2.7: Berechnung des Abscheidegrades

Die Feststoffbestimmungen von Zulauf und Zentrat werden dabei gravimetrisch nach vorheriger Filtration durchgeführt, um die gelösten Stoffe (=Restextrakt) abzutrennen. Die Bestimmung der Feststoffgehaltes vom Dickstoff erfolgt gravimetrisch ohne vorherige Filtration, da der Anteil an gelösten Stoffen vernachlässigbar klein ist und zu dem ein Abfiltrieren nicht möglich ist.

Im Brauereibereich hat sich die Angabe der Ausbeute zur Ermittlung der Wirtschaftlichkeit eines Rückgewinnungssystems bewährt. Die Ausbeute A errechnet sich aus den Feststoffkonzentrationen im Zulauf und im Dickstoff. Zusätzlich geht in die Berechnungsformel der wirkliche Extrakt des rückgewonnenen Bieres mit ein. In früheren Veröffentlichungen wird die Einbeziehung des wirklichen Extraktes teilweise nicht berücksichtigt [106, 107]. Die Hinzunahme des wirklichen Extraktes ist insofern von Bedeutung, als die gravimetrische Bestimmung des Feststoffgehaltes in der Hefesuspension ohne die Angabe des wirklichen Extraktes verfälscht wird. Die so errechneten Ausbeuten erscheinen dadurch zu niedrig. Die Ausbeute errechnet sich folglich zu:

$$A = \frac{(DiFS - ZuFS)}{(DiFS - E_w)} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 2.8: Berechnung der Ausbeute}$$

### 2.2.2 Verfahren auf Basis der Schwerkraft bzw. der Zentrifugalkraft

Um eine Trennung mittels Zentrifugen zu erreichen, muss der Feststoff (T) in der Suspension eine höhere spezifische Dichte aufweisen als die Flüssigkeit (Fl). Für den Absetzvorgang kleiner Partikel gilt auch im Zentrifugalfeld das Stoke'sche Gesetz, so dass sich die Sinkgeschwindigkeit nach folgender Gleichung darstellen lässt [108]:

$$v_{St,z} = \frac{(\rho_T - \rho_{Fl}) \cdot d^2 \cdot g}{18 \cdot \eta} \cdot z \quad \text{Gleichung 2.9: Berechnung der Sinkgeschwindigkeit}$$

$\rho$  = Dichte;  $\eta$  = Viskosität;  $z$  = Schleuderziffer;  $g$  = Erdbeschleunigung;  $d$  = Partikeldurchmesser

Die Sinkgeschwindigkeit wächst also linear mit der Schleuderziffer  $z$  und quadratisch mit dem Teilchendurchmesser  $d$ . Bei einem Radius von  $r = 0,12\text{m}$  und einer Drehzahl von  $n = 6000 \text{ min}^{-1}$  ergibt sich eine Schleuderziffer von ungefähr 4800, d.h. die Sinkgeschwindigkeit eines Teilchens im Zentrifugalfeld ist im Vergleich zur

Sinkgeschwindigkeit im Schwerfeld um den Faktor 4800 erhöht. Die Leistung einer Zentrifuge wird allerdings nicht nur von der Schleudertziffer bestimmt. Die Verweilzeit eines Teilchens im Zentrifugalfeld ist ebenso wichtig, so dass ein größeres Trommelvolumen ebenfalls eine Steigerung der Flussrate ermöglicht [109]. Die Leistungsfähigkeit einer Zentrifuge sinkt, wenn nicht eine gleichmäßige Feststofffracht eingespeist wird [110].

Die Beschleunigung auf die Partikel ist nicht gänzlich unproblematisch. In Bereichen der Lebensmittel- und Biotechnologie gibt es viele Beispiele von Medien, die anfällig gegenüber dem Trennprozess mit Zentrifugen sind [111]. Nicht nur hermetische und sterile Betriebsweisen sind dabei erforderlich, sondern auch, dass der abgetrennte Feststoff mechanisch nicht belastet wird. Dies betrifft insbesondere die Abtrennung lebender Mikroorganismen, wie z.B. Hefezellen. Folgende Bedingungen führen am häufigsten zu Problemen bei der Trennung [112]:

- Scherung
- Eintrag von Luft (Sauerstoff)
- Temperaturerhöhung

Die Scherbeanspruchung ist im Moment des Abschießens am größten, da dort Drücke von bis zu 250 bar auf die Partikel wirken. Das Problem wurde durch eine Verlagerung des Austragspunktes nach innen in die Nähe der Drehachse minimiert [113]. Die Scherbeanspruchung ist ebenfalls am Zentrifugeneinlauf hoch, wo das Medium auf Separationsgeschwindigkeit beschleunigt wird. Um die Scherbeanspruchung während der Produktaufgabe abzuschwächen, wurden hydrohermetische Einläufe konstruiert. Die Zuführung erfolgt dabei unterhalb des Flüssigkeitsspiegels. Das System ermöglicht einen Flüssigkeitsspiegelstand bis zur Rotorachse, unter dem der Produktstrom schonend in die gefüllte Trommel eingespeist und beschleunigt wird.

Der Eintrag von Luft kann ebenfalls zu Schwierigkeiten führen, da eine eventuell auftretende Kavitation zu einer Veränderung von sensiblen Molekülen, z.B. Proteinen, führen kann. Durch den hydrohermetischen Einlauf wird nicht nur eine Vermeidung einer Sauerstoffaufnahme verhindert, sondern darüber hinaus wird gewährleistet, dass die Partikel in ihrer Beschaffenheit nicht verändert werden.

Kritisch ist auch die Erwärmung der Flüssigkeit bzw. des Dickstoffes. Beim Verlassen der Zentrifuge wird die Geschwindigkeit von Flüssigkeit und Dickstoff schlagartig verlangsamt, wobei eine Umwandlung der kinetischen Energie in thermische Energie

erfolgt. Nicht selten werden dabei Temperaturunterschiede von Zulauf zum Auslauf von bis zu 10 K gemessen. Die Temperaturzunahme kann näherungsweise mit folgender Formel berechnet werden:

$$\Delta T = \frac{(\omega \cdot r)^2}{2 \cdot c_p}$$

Gleichung 2.10: Berechnung des Temperaturanstiegs

$\Delta T$  = Temperaturerhöhung in K;  $\omega$  = Winkelgeschwindigkeit in  $s^{-1}$ ;  $r$  = Radius in m;  $c_p$  = spezifische Wärmekapazität der Flüssigkeit

### 2.2.2.1 natürliche Sedimentation

Die natürliche Sedimentation aufgrund der Gravitationskraft ist die einfachste Form der Fest-Flüssig-Trennung und bedarf damit auch keiner intensiven Schulung der Bediener [101]. Die Einsatzgebiete sind mannigfaltig. So wird die natürliche Sedimentation beispielsweise für die Produktion von therapeutischen Proteinen, für die Abwasserklärung und für die Gewinnung von Mineralien angewandt [114, 115]. Im Brauereibereich wird sie vor allem zur Trennung des Hefe-/Bier-Gemisches im Gär- bzw. Lagertank eingesetzt. Das Verfahren zeichnet sich durch geringen technischen und damit auch finanziellen Aufwand aus. Ferner ist die Sedimentation eine „weiche“ Technik, d.h. ihr Einsatz, vor allem in biotechnologischen Prozessen, bei denen die Funktionalität der abzutrennenden Zellen nicht durch den Sedimentationsprozess beeinträchtigt werden dürfen, ist hier zu favorisieren. Bei zu langen Prozesszeiten (Klärzeiten) können unerwünschte Stoffwechselprodukte in die abzutrennende Flüssigkeit gelangen, bzw. die Funktionalität der Zellen beeinträchtigt werden. In diesen Fällen muss auf eine beschleunigte Sedimentation verwiesen werden, die unter Ausnutzung der Zentrifugalkraft die Klärzeiten drastisch verkürzt. Gerade für die Trennung des Hefe-/Hefebier-Gemisches ist die Trenntechnik der natürlichen Sedimentation aufgrund der erwähnten Problematik nicht zu empfehlen. Zum einen sind die Prozesszeiten relativ lang (ca. 3–5 Tage) und zum anderen können die notwendigen Temperaturen im Kernbereich des Sedimentationstanks von 0–3 °C oftmals nicht eingehalten werden [70].

### 2.2.2.2 Dekantier-Zentrifuge

In den 1960er Jahren wurden Dekantier-Zentrifugen für die Aufbereitung großer Feststoffmengen entwickelt. Abbildung 3 zeigt schematisch eine Dekantier-Zentrifuge.

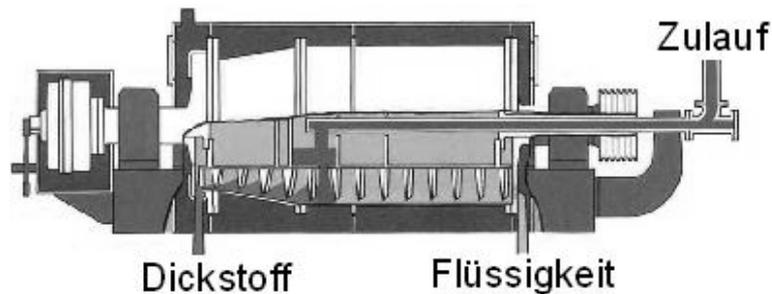


Abbildung 3: schematische Darstellung einer Dekantier-Zentrifuge [116].

Bei den hier zu betrachtenden Dekantierzentrifugen handelt es sich um vollkontinuierlich arbeitende Maschinen, die zum Entwässern, Eindicken, Klären und Klassieren von Feststoff-Flüssigkeits-Gemischen eingesetzt werden. Die Trennung der Suspension in ihre beiden Phasen erfolgt aufgrund der Sedimentation im Zentrifugalfeld, wobei vorausgesetzt werden muss, dass die Dichte des Feststoffes größer ist als die der Flüssigkeit. Dekantierzentrifugen sind mit einer Schnecke ausgestattet, die eine leicht höhere (positive Differenzdrehzahl) oder niedrigere Drehzahl (negative Differenzdrehzahl) aufweist, als die Drehzahl der Trommel. Die Einstellung der Differenzdrehzahl wirkt sich unmittelbar auf die Leistung der Dekantierzentrifuge, die Klarheit des Zentrates und den Feuchtegehalt des Dickstoffes aus. Die feststoffhaltige Suspension wird über ein Rohr in der Trommelachse durch Öffnungen in der Trommel in den Ringraum geleitet. Die Suspension verteilt sich in der rotierenden Trommel. Der Feststoff dekantiert im Zentrifugalfeld und die Flüssigkeit stellt sich auf ein Niveau gemäß der eingestellten Wehrhöhe ein. Die Schnecke transportiert den abgetrennten Feststoff über den Konus zum Austrag [117]. Aufgrund ihres Designs sind keine höheren Schleuderziffern als  $5000\times g$  möglich. Höhere Schleuderziffern erfordern spezielle Designs [118].

### 2.2.2.3 Teller-Zentrifuge

Ähnlich wie bei Dekantier-Zentrifugen werden die Feststoffe bei den Teller-Zentrifugen durch eine beschleunigte Sedimentation von der Flüssigkeit getrennt. Dabei werden Beschleunigungen von 1000–20000×g erreicht [119]. Abbildung 4 zeigt schematisch ein Beispiel für eine Teller-Zentrifuge mit kontinuierlichem Feststoffaustrag.

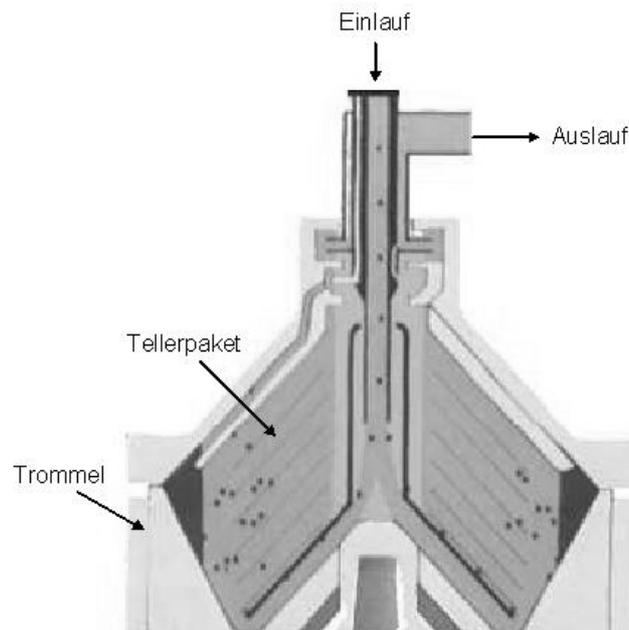


Abbildung 4: schematische Darstellung einer Tellerzentrifuge [120]

Das Herzstück einer Tellerzentrifuge ist die rotierende Tellertrommel. Die Tellertrommel enthält die Teller, die zu einem Paket zusammengesetzt sind. Das Paket besteht aus bis zu 200 konischen Tellereinsätzen mit einem Neigungswinkel von 50–60°. Die Teller sind durch Distanzstreifen voneinander in sog. Einzelseparationsräume getrennt und enthalten in der Mitte Öffnungen. Diese Öffnungen bilden zusammengesetzt die Steigkanäle für die Flüssigkeit [121]. Die zu trennende Suspension wird an der Oberseite der Trommel axial in die Zentrifuge eingeleitet. Die Suspension fließt am Trommelboden nach außen und wird durch die Öffnungen durch das Tellerpaket geleitet. Durch die Rotation werden die Feststoffteilchen nach außen geschleudert und wandern dann an der Unterseite eines Tellers bis in den Trubraum. Die leichtere Flüssigkeit dagegen läuft an der Oberseite der Teller in Richtung Drehachse und kann im Kopfraum über eine Schälscheibe entnommen werden. An der Schälscheibe wird die kinetische Energie

in potentielle Energie umgewandelt. Theoretisch kann dabei folgender Druck erreicht werden [108]:

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot w_u^2 = \frac{\rho}{2} \cdot (2\pi Rn)^2$$

Gleichung 2.11: Druck am Zentrifugenauslauf

$\rho$  = Flüssigkeitsdichte;  $w$  = Umfangsgeschwindigkeit;  $R$  = Schälenscheibenradius;  $n$  = Drehzahl

### 2.2.3 Verfahren auf Basis der Filtration

Neben den Verfahren der Zentrifugation werden auch Verfahren der Filtration zur Rückgewinnung von Hefebier aus Überschusshefe eingesetzt. Während bei der Zentrifugation die Trennung einer Suspension aufgrund unterschiedlicher Größe und Dichte erfolgt, wird die Trennung bei den Filtrationsverfahren aufgrund unterschiedlicher Größe oder Ladung erreicht.

#### 2.2.3.1 Kammerfilterpresse

Kammerfilterpressen wurden bereits im Jahre 1911 für einen Einsatz im Brauereibereich erwähnt [122]. Der Einsatz für die Rückgewinnung von Hefebier aus Überschusshefe wurde in der Literatur beschrieben [65, 103]. Untersuchungen zu qualitätsbestimmenden Eigenschaften resultierender Biere wurden von DONHAUSER *et al.* [70] durchgeführt. Nach dem Füllen des mit CO<sub>2</sub> vorgespannten Filters mit Hefesuspension beginnt die Filtrationsphase (1. Phase). Während der Filtration wird das Bier-Hefe-Gemisch mit einer Pumpe nach einer bestimmten Druck-Zeit-Kurve ständig in das Filterpaket eingepumpt und das Bier abfiltriert. Anschließend wird das restliche noch rückgewinnbare Bier im Filterpaket durch Nachpressen der Filterkuchen (2. Phase = Druckphase) ausfiltriert. Eine schematische Übersicht über die Verfahrensweise zeigt Abbildung 5.

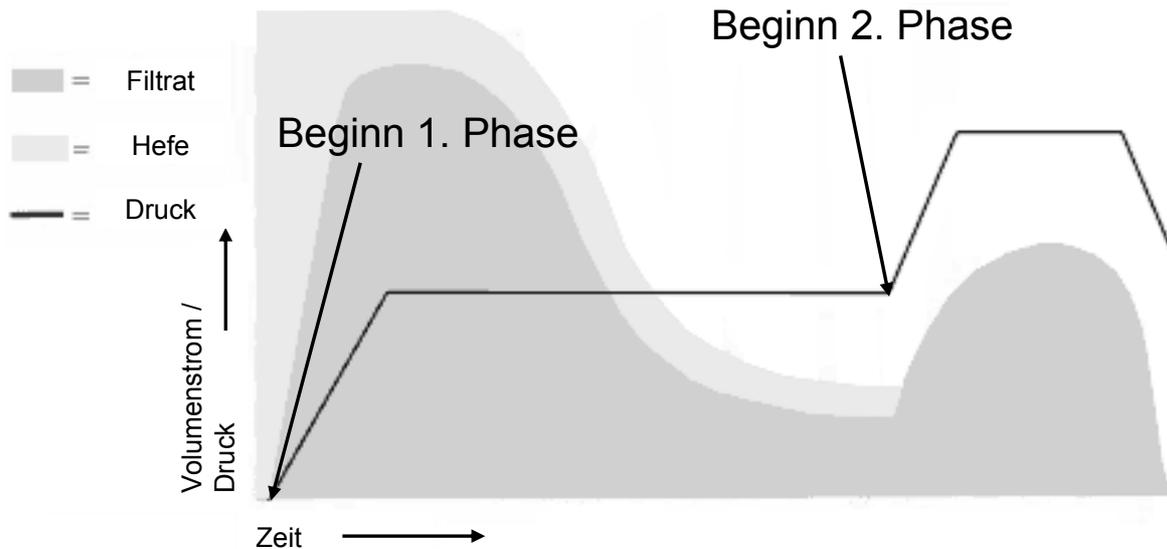


Abbildung 5: schematische Darstellung der Verfahrensweise einer Kammerfilterpresse

Durch diese Verfahrensweise können sehr hohe Trockensubstanzgehalte im Hefekuchen und damit auch sehr hohe Ausbeuten erreicht werden [21]. Aufgrund mikrobiologischer Probleme und verbesserter Trenntechniken im Bereich der Zentrifugen bzw. der Mikrofiltration werden Kammerfilterpressen nicht mehr eingesetzt und werden daher auch nicht weiter behandelt.

### 2.2.3.2 Cross-Flow-Mikrofiltration

Die statische Mikrofiltration (Dead-End-Filtration) kommt aufgrund der Deckschichtbildung und dem damit verbundenen hydraulischen Widerstand für diese Applikation nicht in Frage, so dass im Folgenden die dynamische Mikrofiltration (Cross-Flow-Filtration) im Vordergrund der Betrachtung stehen soll.

Bei der Bierrückgewinnung stellt die Cross-Flow-Mikrofiltration (CMF) eine Alternative zur Kammerfilterpresse dar, bei der Drücke bis zu 20 bar erreicht werden. So ist ein Platzen der Hefezellen und die daraus resultierenden negativen Einflüsse auf die Bierqualität durch Hefeinhaltsstoffe auszuschließen [123]. Die prinzipielle Verfahrensweise der dynamischen Mikrofiltration ist von RIPPERGER [124] dargestellt. Abbildung 6 zeigt ein Fließschema einer typischen Anlage.

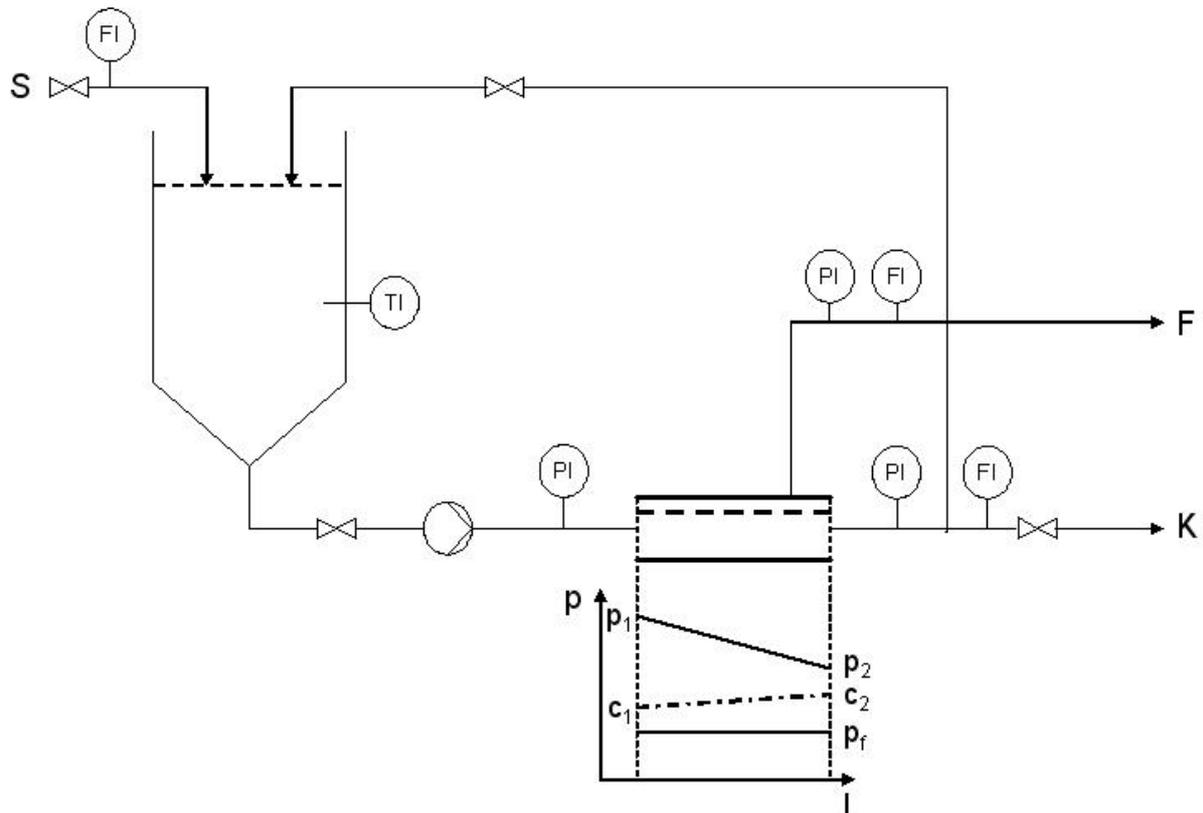


Abbildung 6: Fließschema einer CMF-Anlage [124]. (Legende: S =Suspension, F =Filtrat, K =Konzentrat; PI =Druckaufnehmer; FI =Durchflussmessgerät; TI =Temperaturaufnehmer)

Die dynamische Filtration unterscheidet sich dahingehend, dass der Filterkuchen ständig durch eine parallel zu ihm verlaufende Strömung abgetragen wird. Das Zurückhalten der Partikeln wird durch eine Membran bewirkt. Im Idealfall stellt sich nach einer kurzen Anlaufphase ein Gleichgewichtszustand ein, in dem der Filtrationswiderstand und damit der Filtratstrom konstant bleibt. Die Bildung einer Deckschicht bewirkt in der Praxis aber eine Erhöhung des Filtrationswiderstandes. Damit steigt der Transmembrandruck und der Filtratfluss sinkt. Bei der Überströmung der Membran fällt der Unfiltratdruck vom Einlauf zum Auslauf des Membranmoduls linear ab. Die treibende Druckdifferenz zur Filtration wird als transmembrane Druckdifferenz bezeichnet.

$$\Delta p_{tM} = \frac{p_1 + p_2}{2} - p_F \quad \text{Gleichung 2.12: Berechnung des transmembranen Drucks}$$

$p_{tM}$  = transmembraner Druck;  $p_1$  = Einlaufdruck;  $p_2$  = Auslaufdruck;  $p_F$  = Druck auf der Filtratseite

Auch durch adsorptive Reaktionen auf der Membran wird ein Absinken der Filtrationsleistung hervorgerufen. Diese Verringerung des Filtratstroms durch Ablagerungen wird als Fouling bezeichnet. Bei der Rückspülung während der

laufenden Filtration kann man sich die Druckdifferenz von Ein- und Auslauf zunutze machen. Erhöht man den Filtratdruck, ergibt sich auf der in Strömungsrichtung gesehenen hinteren Membranhälfte ein höherer Filtrat- als Retentatdruck. Daraus folgt, dass das Filtrat hier zurück in den Unfiltratraum fließt und die Deckschicht abgespült wird. Die Druckdifferenz über die Membran ist unter anderem von der Überströmgeschwindigkeit des Retentats abhängig, so dass man durch Verringern der Geschwindigkeit den gleichen Effekt wie durch das Erhöhen des Filtratdrucks erreicht

In der Brauerei war die Rückgewinnung von Hefebier das erste Einsatzgebiet von Cross-Flow-Systemen [21, 62, 64, 72, 73, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135]. In den meisten Anlagen kommen Keramik-Membranen zum Einsatz, da diese sehr gute thermische, mechanische und chemische Festigkeiten sowie Haltbarkeiten von mehr als zehn Jahren haben. Durch eine mittlere Porenweite von 0,2–0,4  $\mu\text{m}$  ist ein biologisch sicheres Filtrat gewährleistet. Laktobazillen und Pediokokken werden ebenso wie die Hefe sicher zurückgehalten [73, 123].

Kontinuierliches Verfahren: Es besteht im Wesentlichen aus einem Puffertank und der Membraneinheit. Die Überschusshefe wird in den Puffertank gepumpt. Mittels einer Speisepumpe wird die Membraneinheit gefüllt. Durch das Umpumpen wird das Bier gewonnen und die Konzentration der Hefe erreicht in kurzer Zeit das Maximum. In regelmäßigen Abständen wird Retentat abgeführt. Als Parameter hierfür wird der Druckverlust über die Membran verwendet. Die Konzentration der Hefe im Retentat wird sehr schnell erhöht, damit dieses so schnell wie möglich ausgeschleust werden kann. Die Überschusshefe aus dem Puffertank wird kontinuierlich zugegeben, so dass das Volumen in der Membraneinheit konstant bleibt. Der Vorteil dieses Verfahrens besteht darin, dass die Filtrationszeit nur durch das Verblocken der Membran limitiert ist. Unter optimalen Bedingungen sind Standzeiten von mehreren Tagen möglich. Dieses Verfahren ist sinnvoll, wenn ständig Überschusshefe anfällt. [125].

Diskontinuierliches (Batch) Verfahren: Der Stapeltank ist ein Teil der Membraneinheit. Das Retentat fließt wieder in den Stapeltank zurück. Die Filtration ist beendet, wenn der gewünschte Feststoffgehalt im Stapeltank erreicht ist. Vorteil dieser Anlage ist die kompakte Bauweise [124].

### 2.2.3.3 Vibrations-Mikrofiltration

In neuerer Zeit wurde eine Variante der klassischen Crossflow-Mikrofiltration eingeführt, die sog. Vibrations-Mikrofiltration [21, 136, 137, 138, 139]. Bei der Vibrations-Mikrofiltration sollen die Nachteile der bisher beschriebenen Verfahren (hohe Temperaturen, hohe Drücke, große Scherbeanspruchung) vermieden werden, so dass die Hefesuspension sehr schonend in ihre beiden Bestandteile getrennt werden kann. Abbildung 7 verdeutlicht das Verfahren.

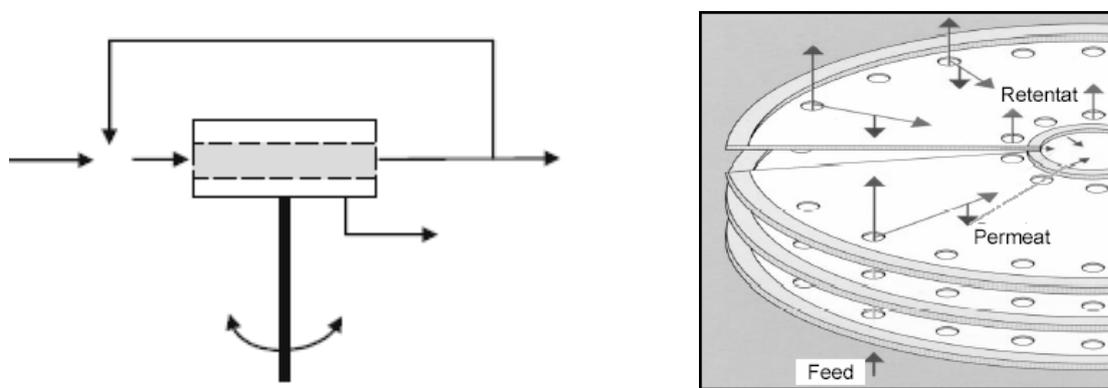


Abbildung 7: Prinzip der Vibrations-Mikrofiltration [136, 140]

Das Filtermodul besteht aus einer vertikal gestapelten Anordnung von horizontalen, kreisrunden Filterscheiben. Die Edelstahlscheiben sind beidseitig mit PTFE-Membranen und darunter liegenden, dünnen Drainagegeweben bestückt. Der Trubraum wird durch schmale Ringe am äußeren und inneren Radius zwischen jeder Scheibe gebildet. Die Suspension fließt über flexible Schläuche an zwei Zulaufstutzen am äußeren Radius von unten in das Gehäuse und verteilt sich über konzentrisch angeordnete Bohrungen der Scheiben in die Spalten. Die Membranen werden radial überströmt und das Retentat über die am inneren Radius befindliche Bohrungen nach oben aus dem Gehäuse abgeführt. Das Hefebier permeiert durch die Membran in das Drainagesystem und wird im Innern des Gehäuses gesammelt und über einen zentralen Stutzen abgeführt [140].

### 2.2.3.4 Rotierender Scheibenfilter

Einen anderen Ansatz zur Vermeidung einer Deckschicht verfolgt die Verfahrensweise mit rotierenden Scheibenfiltern. Rotierende Scheibenfilter werden sehr effektiv im Bereich der Mikrofiltration von biologischen Suspensionen, vor allem

zur Rückgewinnung von Makromolekülen (z.B. Polysaccharide), eingesetzt [141, 142, 143]. Der Deckschichtbildung wird dabei nicht nur durch Scherkräfte an der Membranoberfläche, sondern auch durch die auftretenden Zentrifugalkräfte entgegengewirkt [124]. Verstärkt werden kann dieser Effekt noch durch die Überlappung der Membranen, wodurch die Scherbeanspruchung des entstehenden Filterkuchens noch wesentlich erhöht wird. Die Scherrate erreicht dabei Werte von  $1-2 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  [144], die Umfangsgeschwindigkeit der Scheiben am äußeren Radius liegt dabei im Bereich von  $15-20 \text{ m} \times \text{s}^{-1}$  [141]. Eine schematische Darstellung eines rotierenden Scheibenfilters ist in Abbildung 8 gegeben.

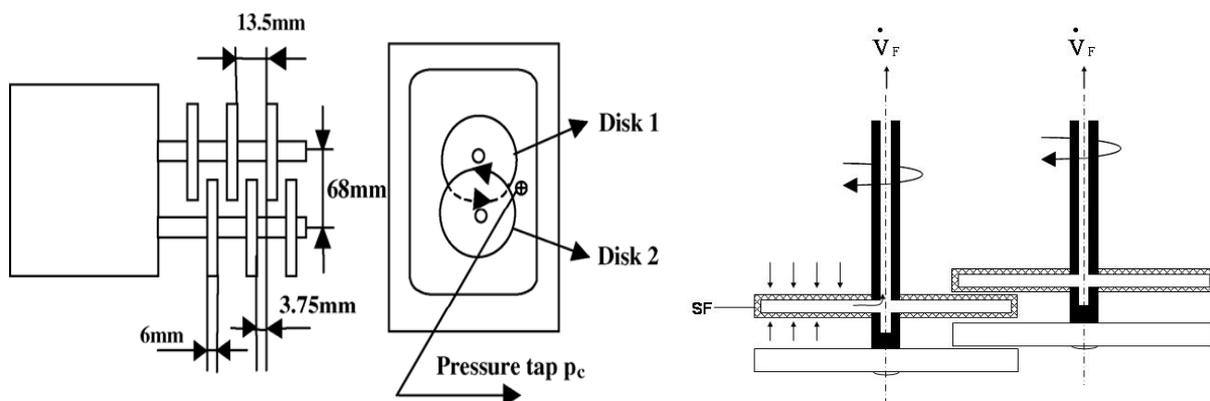


Abbildung 8: Prinzip eines rotierenden Scheibenfilters [124, 144] (Legende: SF : Scheibenfilter,  $\dot{V}_F$  = Filtratvolumenstrom)

Der Hauptnachteil rotierender Scheibenfilter wird in deren Komplexität und damit auch in den resultierenden hohen Konstruktionskosten gesehen. Ferner ist der Austausch der Membranen eine heikle und komplexe Aufgabe [145].

### **3 Problemstellung**

Eine kontroverse Diskussion um die Verwertbarkeit der Prozessbiere war Ausgangspunkt für die Anfertigung dieser Arbeit. Auch die Einführung neuer Verfahrenstechniken im Bereich der Hefebierrückgewinnung und der Bierrückgewinnung aus abgefüllten Flaschen und Dosen führte im Bereich der Prozessbiere zu einer qualitativen Steigerung, wodurch sich die Frage stellte, ob die bis dato durchgeführten, teilweise sehr aufwendigen Aufbereitungsschritte noch notwendig sind. Durch die parallel dazu entwickelten verfeinerten Analysenmethoden, vor allem im Bereich Alterungsstabilität, kamen neue Kriterien zur Beurteilung und Kontrolle von Würze und Bier hinzu, die auch dazu geeignet sind, geringste qualitative Veränderungen durch die Zugabe von Prozessbieren zu dokumentieren. Das in diesem Zusammenhang eingeleitete Forschungsprojekt „Verwertung von Prozessbieren in der Brauerei“ der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V. (B77) wurde im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag auf der brauereiiinternen Wiederverwertung der Prozessbiere im Produktionsprozess.

## 4 Material und Methoden

### 4.1 Würze- und Bierbereitung

Die Würze- und Bierbereitung erfolgte am Pilotsudwerk bzw. im Gärkeller des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I. Die Anlage wurde ausführlich von DICKEL [146] beschrieben. Biere, die nicht nach diesen Prozessbedingungen hergestellt wurden, sind in den jeweiligen Kapiteln beschrieben.

- Schüttung: 1:4, 10 kg Schrot mit 40 l Brauwasser
- Maischverfahren: Infusionsverfahren (Hochkurzmaisverfahren):  
Einmischtemperatur: 60 °C, 35 min; 2 °C/min=>65 °C, 30 min;  
2 °C/min=>72 °C, 30 min; 2 °C/min=>76 °C, 2 min;
- Abläuterung über Läuterbottich; 1. Nachguß: 20 l, 2. Nachguß: 15 l
- Würzekochung: 70 min atmosphärisch
- Hopfengabe: 2 Teilgaben, 1. Gabe: 28 g Hallertauer Taurus zu Kochbeginn, 2. Gabe: 41 g Tettnanger Tettnang 15 min vor Kochende (mit der 2. Gabe erfolgte bei den Zumischversuchen auch die Dosage des Prozessbieres)
- Whirlpoolrast: 25 min
- Würzekühlung mit Plattenwärmeüberträger auf 10 °C
- Hefestamm: W 34/70; Anstellzellzahl:  $15 \times 10^6$  Zellen/ml (Hefe wurde am Vortag propagiert, Hefevitalität (ICP) > 6,0); Belüftung: 8 mg O<sub>2</sub>/l
- Gärtemperatur: 10 °C isotherm; Temperaturregelung über Simatic S7-300
- Schläuchen bei E<sub>s</sub>=3,5 %
- forcierte Reifung bei T=16 °C für 4 Tage (Diacetylrast!)
- Kaltreifung bei T=0 °C für 2 Wochen; Spundung auf 1 bar Ü
- Filtration über Tiefenfilterschichten (Seitz-KS 150, Fa. Seitz-Schenk)
- Abfüllung isobarometrisch nach dreifacher Vorevakuierung und Spülens mit CO<sub>2</sub> in 0,5l NRW-Flaschen

### 4.2 Chemisch-technische Analysen

#### 4.2.1 Malzanalytik

Die Malzanalysen wurden nach den Vorschriften der MEBAK [147, 148] durchgeführt.

Analytik	Methode	Dimension	Analysenfehler (r/R)	Analysen- ergebnis
Wassergehalt	MEBAK, Band I, 4.1.4.1	%	0,13/0,60	4,0
Extrakt (lfr.)	MEBAK, Band I, 4.1.4.2.2	%	0,58/11,8-0,137×m	79,2
Extrakt (wfr.)	MEBAK, Band I, 4.1.4.2.2	%	0,58/11,8-0,137×m	82,6
Würzefarbe (photometrisch)	MEBAK, Band I, 4.1.4.2.8.2	EBC	0,18×m-0,28/ 0,13×m+0,46	3,0
pH-Wert	MEBAK, Band I, 4.1.4.2.7	-	0,08/0,20	5,89
VZ 45°C	MEBAK, Band I, 4.1.4.1.1	%	± 2,5 (P=99%)	38,2
Verzuckerungszeit	MEBAK, Band I, 4.1.4.2.4	min		10-15
Eiweißgehalt	MEBAK, Band I, 2.5.2.3	%		10,6
Löslicher Stickstoff	MEBAK, Band I, 4.1.4.5.2	mg/l	0,031/0,094	698
ELG	MEBAK, Band I, 4.1.4.5.3	%	1,5/6,3	41
Friabilimeterwert	MEBAK, Band I, 4.1.3.6.1	%	12-0,11×m / 21,7-0,192×m	84,3
Viskosität (8,6%)	MEBAK, Band I, 4.1.4.4.2	mPa×s	0,04/0,14	1,49
DMS-P	MEBAK, Band III, 1.3.3	mg/kg	VK=0,019	7,6

Legende: m:= Mittelwert

### 4.2.2 Würze- und Bieranalytik

Die Würze- und Bieranalysen wurden, soweit nicht anders angegeben, nach den Vorschriften der MEBAK [148, 149] durchgeführt. Die Bestimmung des FAN und teilweise des Gesamt-SO<sub>2</sub>-Gehaltes erfolgte über Fließinjektionsanalyse an einem Skalar San Plus Segmented/Continuous Flow Analyser SA 4000 mit Fluorimeter FL6300-D der Firma Skalar Analytical, De Breda (NL).

Analytik	Methode	Dimension	Analysenfehler (r/R)
Extrakt scheinbar	NIR; OIML	GG-%	0,01/-
Extrakt wirklich	NIR; OIML	GG-%	0,01/-
Alkoholgehalt	NIR; OIML	Vol.-%	0,01/-
Stammwürze	MEBAK, Band II, 2.10.6.3	GG-%	0,03/-
Vergärungsgrad scheinbar	NIR; OIML	%	
Vergärungsgrad wirklich	NIR; OIML	%	
Farbe (photometrisch)	MEBAK, Band II, 2.13.2	EBC	0,022×m/0,085×m
pH-Wert	MEBAK, Band II, 2.14	-	0,08/0,20
Gesamtstickstoff	MEBAK, Band II, 2.8.1.1	mg/100ml	15/41
koagulierbarer Stickstoff	MEBAK, Band II, 2.8.2	mg/100ml	8/-
MgSO <sub>4</sub> -fällbarer Stickstoff	MEBAK, Band II, 2.8.3.1	mg/100ml	23/-
FAN (SKALAR)	MEBAK, Band II, 2.8.4.1.1	mg/100ml	
Gesamtpolyphenole	MEBAK, Band II, 2.17.1	mg/l	4,1/18+0,13×m
Anthocyanogene	MEBAK, Band II, 2.17.2	mg/l	9/-
Schaumzahl Ross und Clark	MEBAK, Band II, 2.19.1	Sigma-Wert	3/15
Schaumzahl NIBEM	MEBAK, Band II, 2.19.2	s	9/42
SO <sub>2</sub> (destillativ)	MEBAK, Band II, 2.25.2	mg/l	VK=0,1
SO <sub>2</sub> (SKALAR)	MEBAK, Band II, 2.25.2	mg/l	
Reduktionsvermögen	MEBAK, Band II, 2.16.1	%	VK=0,01
Bittereinheiten	MEBAK, Band II, 2.18.1	EBC	0,44+0,014×m/ -0,7+0,18×m
Forciertest	MEBAK, Band II, 2.15.2.1	d	

Legende: m:=Mittelwert

### 4.3 Elektronenspinresonanz-Spektrometrie

#### 4.3.1 Bestimmung der endogenen, antioxidativen Aktivität von Bier

Die Bestimmung der endogenen, antioxidativen Aktivität (Lag-Time) von Bier wurde an einem Elektronenspin-Resonanz-Spektrometer anhand der Spin-Trap-Technik durchgeführt. Die Bestimmung erfolgt in Anlehnung an die Methode nach UCHIDA *et al.* [150] und ist ausführlich bei FRANZ *et al.* [151] beschrieben. Die Reproduzierbarkeit der Analyse wurde anhand einer 4-fachen Aufbereitung einer Probe ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 9 zusammengestellt.

Tabelle 9: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der endogenen, antioxidativen Aktivität von Bier (LT = Lag-Time)

LT1 / min	LT2 / min	LT3 / min	LT4 / min	Mittelwert	StAbW	VK	KI ( $\alpha=0.05$ )
48	48	49	48	48,25	0,50	0,01	0,80

#### 4.3.2 Bestimmung des antiradikalischen Verhaltens von Bier

Um der Radialgenerierung pro Zeiteinheit Rechnung zu tragen, wurde die Auswertung der endogenen, antioxidativen Aktivität um die Bestimmung des antiradikalischen Verhaltens (ARV) erweitert. Dabei wurde die Fläche unterhalb des Funktionsgraphen integriert und zu einer empirisch gewonnenen Fläche ins Verhältnis gesetzt:

$$ARV = \frac{\text{empirisch ermittelte Fläche nach Franz [152]}}{\int_{0 \text{ min}}^{120 \text{ min}} f(x) dx}$$

Gleichung 4.1: Berechnung des ARV

Die Bestimmung des ARV erfolgte in Anlehnung an die lehrstuhleigene Methode und ist bei FRANZ [152] beschrieben. Die Reproduzierbarkeit der Analyse wurde anhand einer 4-fachen Aufbereitung einer Probe ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10: Reproduzierbarkeit der Bestimmung des antiradikalischen Verhaltens von Bier

ARV1 / %	ARV2 / %	ARV3 / %	ARV4 / %	Mittelwert	StAbW	VK	KI ( $\alpha=0.05$ )
85	84	84	82	83,75	1,26	0,02	2,00

### 4.3.3 Bestimmung des antiradikalischen Potentials von Bier

Um speziell den Einfluss phenolischer Substanzen auf antiradikalische Aktivitäten von Bier zu ermitteln, wurde das antiradikalische Potential von Bier bestimmt. Die Bestimmung erfolgte in Anlehnung an die Methode nach KANEDA [153]. Im Gegensatz zur Originalmethode wurde am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I die Auswertung nicht spektralphotometrisch, sondern anhand eines Elektronenspin-Resonanz-Spektrometers durchgeführt. Die lehrstuhleigene Methode ist bei FRANZ [152] beschrieben. Die Reproduzierbarkeit der Analyse wurde anhand einer 5-fachen Aufbereitung einer Probe ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengestellt.

*Tabelle 11: Reproduzierbarkeit der Bestimmung des antiradikalischen Potentials von Bier*

ARP1 / %	ARP2 / %	ARP3 / %	ARP4 / %	ARP5 / %	Mittelwert	StAbW	VK	KI [α=0.05]
59	58	59	58	57	58,20	0,84	0,01	1,04

### 4.3.4 Bestimmung des Stabilitäts-Index

Um das komplexe Themengebiet der antiradikalischen Aktivität von Bier aus mehreren Blickwinkeln zu betrachten, wurde der Stabilitäts-Index (SI) eingeführt [154]. Der SI stellt eine rechnerische Größe dar. In dessen Berechnung gehen die endogene, antioxidative Aktivität (lag-time), das antiradikalische Verhalten, das antiradikalische Potential und das Reduktionsvermögen (RV) ein.

$$SI = \frac{\text{lag-time}[\%] + ARV[\%] + ARP[\%] + RV[\%]}{400} \cdot 100 \quad \text{Gleichung 4.2 Berechnung des SI}$$

## 4.4 Chromatographische Analysen

### 4.4.1 Hochdruckflüssigkeitschromatographie

#### 4.4.1.1 Bestimmung der Aminosäuren

Die Bestimmung der Aminosäuren erfolgte nach der lehrstuhleigenen Methode mittels HPLC-Analytik und ist bei MEZGER [155] ausführlich beschrieben. Daten für die Reproduzierbarkeit liegen nicht vor.

#### 4.4.1.2 Bestimmung der $\alpha$ - und iso- $\alpha$ -Säuren

Die Bestimmung der  $\alpha$ - und iso- $\alpha$ -Säuren erfolgte nach der lehrstuhleigenen Methode mittels HPLC-Analytik. Die Methode wurde von ONO *et al.* [156] entwickelt und erlaubt eine gleichzeitige quantitative Bestimmung von co-, n- und ad-Homologen der  $\alpha$ -, iso- $\alpha$ - und  $\beta$ -Säuren. Daten für die Reproduzierbarkeit liegen nicht vor.

#### 4.4.1.3 Bestimmung der Purine

Purine sind als Nucleobasen und Nucleoside die Grundbausteine der Nucleinsäuren. Neben ihrer ernährungsphysiologischen Bedeutung (Hyperurikämie) kommt den Purinen auch eine sensorische zu. So wird ihnen ein synergistischer Effekt auf die Hopfenbittere und die Säure des Bieres zugesprochen [157, 158, 159]. Die Bestimmung der Purine erfolgt in Anlehnung an die Methode von HIERL [160]. Die Trennung von Adenin und Guanin erwies sich als sehr schwierig, so dass bei diesen beiden Purin-Derivaten nur die Summe der relativen Flächen angegeben wird.

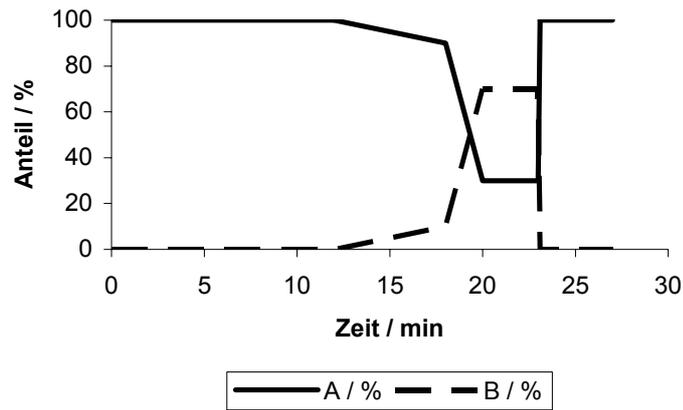
##### 4.4.1.3.1 Verwendete Materialien

- Adenin, minimum 99%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Guanin, Sigma grade, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Hypoxanthin, minimum 99%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Xanthin, 99-100%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Adenosin, minimum 99%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Guanosin, minimum 98%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Inosin, minimum 99%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Acetonitril, HPLC gradient grade, J. T. Baker, Deventer, Niederlande
- Membranfilter, 0,45  $\mu$ m, Chromafil PET -45/25, Macherey-Nagel, Düren
- Kalium-*di*-hydrogenphosphat, p.a., Riedel-de-Häen Laborchemikalien, Seelze
- *di*-Natriumhydrogenphosphat, p.a., Merck, Darmstadt
- ortho-Phosphorsäure, > 85%, p.a., Fluka Chemie, Buchs

##### 4.4.1.3.2 Chromatographische Bedingungen

Die zu untersuchenden Proben wurden im Ultraschallbad entkohlensäuert und über einen 0,45  $\mu$ m Membranfilter filtriert.

- Hochleistungsflüssigkeitschromatograph Hewlett-Packard Series II, HP 1090 mit Dioden-Array-Detektor
- Säulentemperatur: 37 °C; Flussrate: 0,75 ml/min
- Dektorgase: Luft (250-300 ml/min), Wasserstoff (30-35 ml/min), Stickstoff (30-35 ml/min); Reinheit der Gase: 5.0
- Säule: YMC Hydrosphere C18,S-5 $\mu$ m, 12nm, Dinslaken
- Eluent A: 0,02 M Phosphatpuffer, pH 3,5
- Eluent B: 100% Acetonitril
- Gradientenprogramm:



- Injektionsvolumen: 10 µl
- Signalaufnahme: 260 nm

Die Quantifizierung erfolgte anhand einer additiven 5-Punkt-Kalibrierung mit Referenzsubstanzen. Ausgewertet wurden die relativen Peakflächen.

Um die Reproduzierbarkeit der Analyse zu untersuchen, wurde ein Bier 6-fach aufbereitet und analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 9 dargestellt.

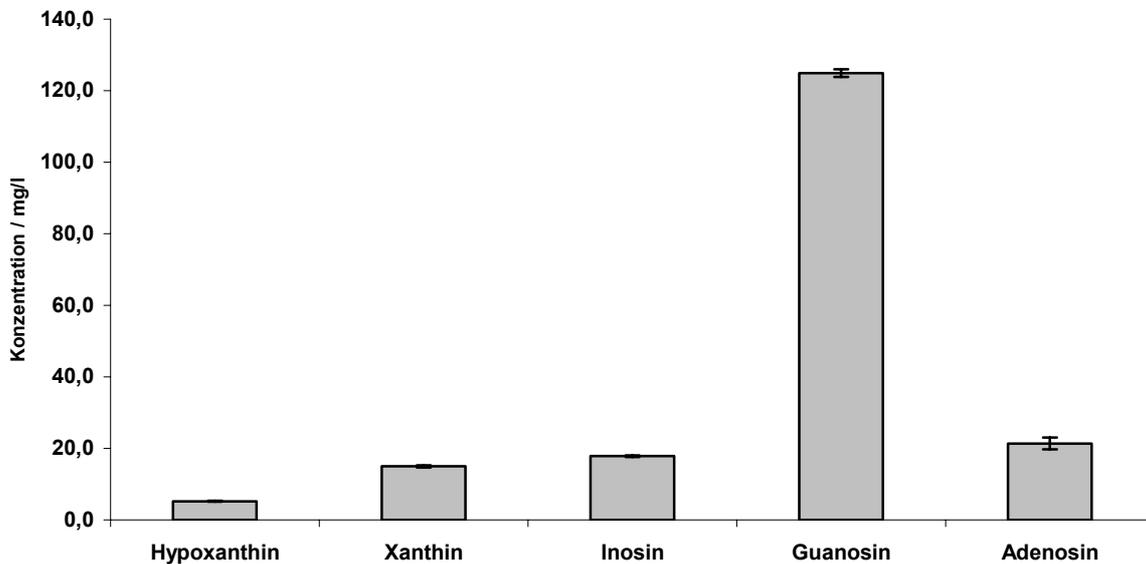


Abbildung 9: untersuchte Purin-Derivate mit ihren bestimmten Konfidenzintervallen ( $\alpha=0.05$ )

Die zugehörigen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 12 zusammengestellt.

Tabelle 12: Variationskoeffizienten der untersuchten Purin-Derivate

Purin-Derivate	Variationskoeffizient / dimensionslos
Hypoxanthin	0,029
Xanthin	0,017
Inosin	0,013
Guanosin	0,008
Adenosin	0,073

## 4.4.2 Kapillargaschromatographie

### 4.4.2.1 Bestimmung der Würzearomastoffe

Die Würzearomastoffe sind eine ausgewählte Gruppe an flüchtigen Aromastoffen, die während der Würzebereitung maßgebliche Veränderungen erfahren (Bildung bzw. Ausdampfung). Anhand der Bestimmung der Würzearomastoffe kann die Zudosage von Prozessbieren im Heissbereich sehr gut verfolgt werden, da die üblichen Konzentrationen an 2- und 3-Methylbutanol und 2-Phenylethanol deutlich überschritten werden. Die Bestimmung der Würzearomastoffe erfolgte gaschromatographisch nach der lehrstuhlinterne Methode und ist in anderen Arbeiten ausführlich beschrieben [161].

### 4.4.2.2 Bestimmung der Bieraromastoffe

Die Bieraromastoffe umfassen ausgewählte höhere Alkohole, Acetat-Ester, längerkettige Fettsäure-Ester, Hopfenöle und als Einzelaromastoff gamma-Nonalacton. Die Analytik ist mit der Bestimmung der Würzearomastoffe zu vergleichen und erfolgte gaschromatographisch nach der lehrstuhleigenen Methode. Die Durchführung kann prinzipiell nach LUSTIG [161] erfolgen. Folgende Änderungen werden in Bezug auf die Bestimmung der Würzearomastoffe durchgeführt:

- bei der Aufbereitung wird  $K_2S_2O_5$  zugegeben, um eine Abtrennung von Aldehyden zu erreichen, da diese aufgrund einer Koelution die Auswertung wichtiger Substanzen verhindern würden,
- es erfolgt bei der Bestimmung der Bieraromastoffe keine Zugabe einer 25%-Ammoniaklösung, da damit die wichtige Gruppe der kurzen und mittleren Fettsäuren abgetrennt würden,
- das Probenvolumen beträgt 100 ml
- die Salzeinwaage beträgt 22 g NaCl

- die Flüssig-Flüssig-Extraktion erfolgt mit 500 µl CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, es findet nach der Zentrifugation keine weitere Aufkonzentrierung mittels Stickstoffstrom statt

Die erfassten Aromastoffe mit zugehörigen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 77 dargestellt.

#### **4.4.2.3 Bestimmung der höheren Alkohole und leichtflüchtigen Ester**

Die Bestimmung der höheren Alkohole und leichtflüchtigen Ester erfolgte gaschromatographisch nach der lehrstuhlinternen Methode. Die Aromastoffanreicherung erfolgte dabei anhand der statischen Headspace-Technik. Die Methode wurde von THUM [162] modifiziert und ist ausführlich bei KALTNER [163] beschrieben. Die erfassten Aromastoffe mit zugehörigen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 78 dargestellt.

#### **4.4.2.4 Bestimmung der Alterungsindikatoren**

Die Alterungsindikatoren umfassen eine Gruppe flüchtiger Verbindungen, die durch den Einfluß der Lagertemperatur und dem Sauerstoffgehalt des abgefüllten Bieres eine signifikante Zunahme erfahren [164]. Die Analyse der Alterungsindikatoren in Verbindung mit einer parallel dazu durchzuführenden sensorischen Prüfung der Biere lässt einen Rückschluss auf die Alterungsstabilität des Bieres zu. Die Bestimmung der Alterungsindikatoren erfolgte gaschromatographisch nach der lehrstuhleigenen Methode und ist ausführlich bei KALTNER [163] beschrieben.

#### **4.4.2.5 Bestimmung von kurzkettigen Fettsäuren**

Die Ergebnisse der Aromaextraktverdünnungsanalyse zeigten, dass die bestehende Analytik für die Bestimmung der Bieraromastoffe um einige kurzkettige Fettsäuren erweitert werden musste. Die Bestimmung der kurzkettigen Fettsäuren erfolgte in Anlehnung an die Methode nach THUM *et al.* [162] und HERRMANN [165]. Allerdings wurde die Extraktion der Aromastoffe nicht über eine Festphasenextraktion, sondern über eine Wasserdampfdestillation mit anschließender Flüssig-Flüssigextraktion mittels Dichlormethan durchgeführt. Folgende kurzkettigen Fettsäuren wurden ergänzt: Isobuttersäure, Buttersäure, Isovaleriansäure (3-Methylbuttersäure).

#### 4.4.2.5.1 *Verwendete Materialien*

- Isovaleriansäure, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Buttersäure, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Isobuttersäure, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, p.a., zur Reinigung über Füllkörperkolonne destilliert, J. T. Baker, Deventer, Niederlande
- Ethanol absolute, puriss, p.a., Sigma-Aldrich Laborchemikalien, Seelze
- NaCl, J. T. Baker, Deventer, Niederlande
- Kaliumpyrosulfit 98%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Wasserdampfdestillationsapparatur, Büchi, Flawil, Schweiz
- Turbula Schüttler, Bachofen, Basel, Schweiz
- Heraeus-Zentrifuge, Varifuge RF,
- ISTD-Lösung: ca. 1500mg / l Phenylmethanol in Ethanol p.a.
- Antischaum Monostearin

#### 4.4.2.5.2 *Extraktion der kurzkettigen Fettsäuren*

- 100 ml eisgekühltes Bier wird, abhängig vom Alkoholgehalt des Bieres, mit 5 ml Ethanol p.a. und 1 ml ISTD versetzt (bei ca. 5 Vol.-% Alkohol werden 4 ml EtOH zudosiert)
- an der Destillationsapparatur wird entsprechend 4.4.2.1 in eine eisgekühlte Wasservorlage destilliert
- 80 ml Destillat werden mit 22 g NaCl und 1 g K<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>5</sub> versetzt
- 0,5 ml dest. CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub> werden zupipettiert
- 30 min schütteln und anschließend 15 min bei 2500 U×min<sup>-1</sup> zentrifugieren
- die organische Phase wird in ein Vial überführt und mit dest. Wasser überschichtet

#### 4.4.2.5.3 *Kapillargaschromatographie*

- Gaschromatograph Hewlett-Packard HP 5890 mit split-/splitless-Aufgabesystem mit einer Kapillarsäule und einem Flammenionisationsdetektor
- Injektionstemperatur: 250 °C; Detektortemperatur: 250 °C
- Detektorgase: Luft (250–300 ml/min), Wasserstoff (30–35 ml/min), Stickstoff (30–35 ml/min); Reinheit der Gase: 5.0
- Säule: Nukol Fused Silica Kapillarsäule (60 m×0,25 mm×0,25 µm Filmdicke, Supleco, Bellefonte, USA); Säulenvordruck: 65 kPa; Säulenfluß: 2,28 ml/min; Septum-Purge: 1,5 ml/min Temperaturprogramm: 40 °C, 2 min; 5 °C/min=>230 °C; 230 °C, 40 min
- Injektionsvolumen: 4 µl

Die Quantifizierung erfolgte anhand einer additiven Kalibrierung von Referenzsubstanzen in fünf unterschiedlichen Konzentrationen. Ausgewertet wurden die relativen Peakflächen. Die Kalibrationsgeraden sind im Anhang dargestellt (Abbildung 136, Abbildung 137, Abbildung 138). Ein Beispielchromatogramm zeigt Abbildung 10.

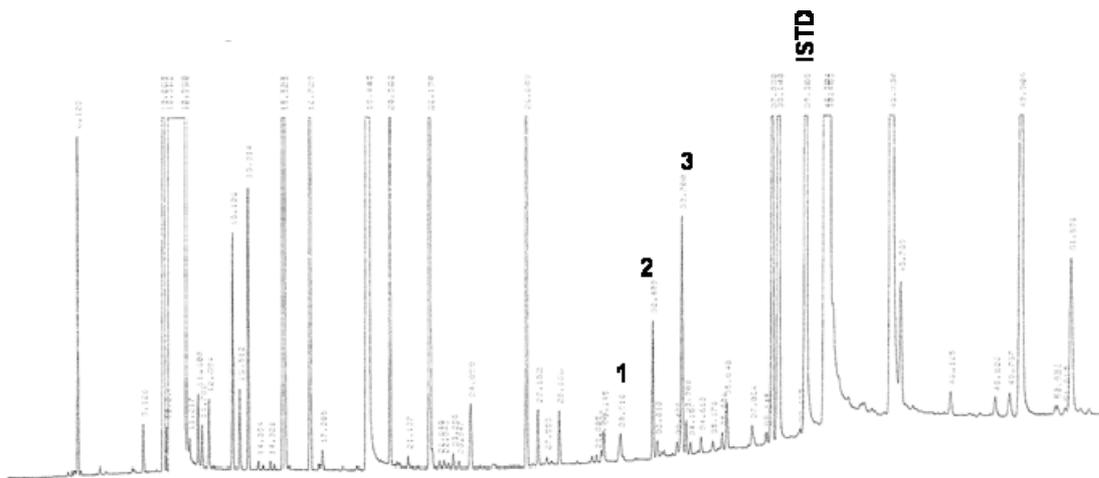


Abbildung 10: GC-FID-Chromatogramm für kurzkettige Fettsäuren

Folgende Aromastoffe wurden zugeordnet:

- Peak Nr. 1 Isobuttersäure
- Peak Nr. 2 Buttersäure
- Peak Nr. 3 Isovaleriansäure

Um die Reproduzierbarkeit der Analyse zu überprüfen, wurde ein Bier 5-fach aufbereitet und analysiert. Die Ergebnisse sind in Abbildung 11 dargestellt.

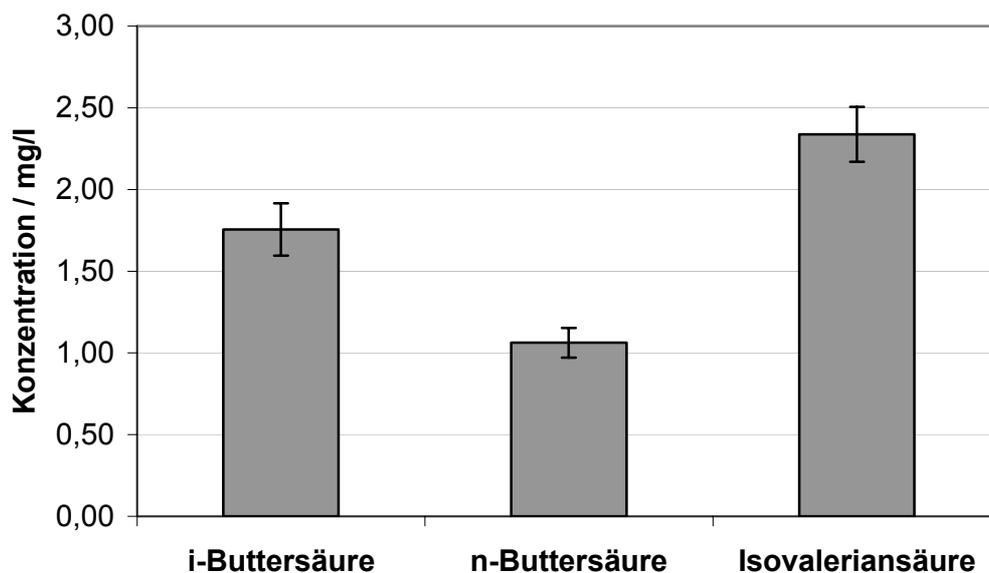


Abbildung 11: untersuchte kurzkettige Fettsäuren mit ihren bestimmten Konfidenzintervallen ( $\alpha=0.05$ )

Die zugehörigen Variationskoeffizienten sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

*Tabelle 13: Variationskoeffizienten der bestimmten, kurzkettigen Fettsäuren*

Aromastoff	Variationskoeffizient / dimensionslos
Isobuttersäure	0,073
Buttersäure	0,069
Isovaleriansäure	0,058

## **4.5 Methodik zu Identifizierung von Schlüsselaromastoffen in Hefebier**

### **4.5.1 Extraktion der Aromastoffe**

Um einen Überblick über die Veränderungen im Aromaspektrum der Hefebiere durch die Lagerung zu erhalten, wurden die Aromastoffe rein qualitativ durch eine Aromaextraktverdünnungsanalyse (AEVA) bestimmt. Das Prinzip der Aromaextraktverdünnungsanalyse in Bier wurde erstmals von SCHIEBERLE [166] beschrieben. Ziel dieser Analyse ist es, diejenigen Aromastoffe zu identifizieren, die am stärksten zum Aroma eines Produktes beitragen. MURAKAMI *et al.* [167] berichten ebenfalls über den Einsatz der GC-Olfaktometrie. Dabei wurde die Technik zur Identifizierung des Würzearomas, von Fehleraromen und des Alterungsaromas angewandt. Die Analytik wurde in Anlehnung an die Vorgehensweise von PREUSS [168] durchgeführt. Die Extraktion der Aromastoffe aus dem Hefebier erfolgte über eine Flüssig-Flüssig-Extraktion in einem Perforator für spezifisch leichtere Extraktionslösungsmittel nach dem Kutscher-Steudel-Prinzip [169]. Die Aromaextrakte wurden mittels Gaschromatographie getrennt und die aufgetrennten Aromastoffe sowohl über einen Detektor als auch einen Sniffing-Port sensorisch erfasst. Als Detektor diente ein Massenspektrometer. Die Identifizierung der Aromastoffe erfolgte über Vergleich der Massenspektren mit Referenzdaten aus einer Datenbank und durch Injektion der Referenzsubstanzen und Vergleich der Retentionszeiten.

#### 4.5.2 Verwendete Materialien

- Natriumsulfat, wasserfrei, p.a., Merck, Darmstadt
- Schwefelsäure, 15%-ig
- Natriumhydrogencarbonat, p.a., Merck, Darmstadt
- Diethylether, p.a., zur Aufreinigung an Füllkörperkolonne destilliert, Sigma-Aldrich Laborchemikalien, Seelze
- Flüssiger Stickstoff, Linde Gas, Unterschleißheim
- Wasserbad Braun mit Lauda Einhängethermostat, Lauda-Königshofen
- 1 Liter-Perforator-Extraktionsapparatur
- temperierbarer Magnetrührapparat Heidolph MR 3001 K, Schwabach
- Vigreux-Kolonne mit Wasserbad Braun
- Hochvakuumpumpe Leybold PD 40L, Köln
- Scheidetrichter, 500 ml
- pH-Meter, inolab pH level 1, WTW, Weilheim

#### 4.5.3 Durchführung der Extraktion

800 ml Hefebier wurden über einen Zeitraum von 6 h mittels Flüssig-Flüssig-Extraktion nach dem Kutscher-Steudel-Prinzip extrahiert. Als Extraktionsmittel diente dabei dest. Diethylether. Um eine schonende Extraktion zu gewährleisten, wurde die Extraktionstemperatur auf 40 °C beschränkt. Der gewonnene Extrakt wurde anschließend auf ein Volumen von 500 ml eingeeengt und über Nacht im Kühlschrank aufbewahrt.

#### 4.5.4 Destillation der flüchtigen Verbindungen im Hochvakuum

Zur Abtrennung nicht-flüchtiger Stoffe wurde das gewonnene Aromaextrakt durch Anlegen eines Hochvakuums ( $p < 10^{-4}$  mbar) an der in Abbildung 12 dargestellten Apparatur aufgereinigt. Die Apparatur wurde temperiert bei  $T = 40$  °C. Im folgenden wurde der Aromaextrakt tröpfchenweise aus einem Tropftrichter in den Probenkolben dosiert. Durch das angelegte Vakuum gelangten die Aromastoffe sofort über eine beheizbare Brücke in die Kühlfallen, wohingegen die nichtflüchtigen Verbindungen sich an der Glaswand niederschlugen. Die Kühlfallen wurden mit flüssigem Stickstoff gekühlt. Nachdem der gesamte Aromaextrakt destilliert wurde, wurde der Tropftrichter 2–3 mal mit einigen Millilitern dest. Diethylether gespült und ebenfalls zugetropft. Sobald sich keine Flüssigkeit mehr im Probengefäß befand, wurde die Destillation beendet.

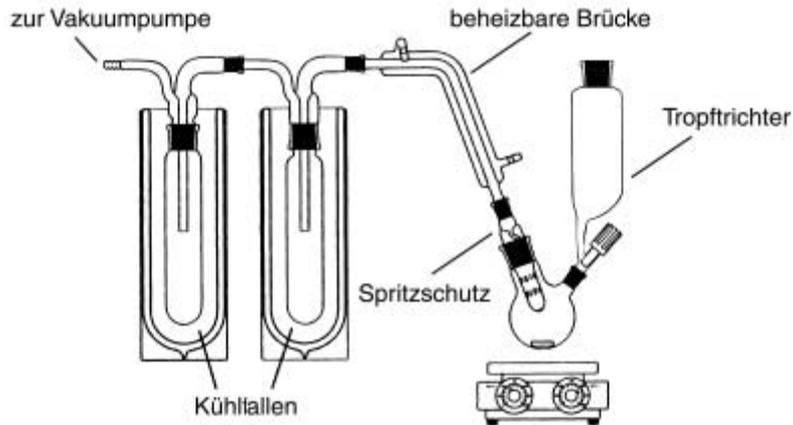


Abbildung 12: Apparatur für den Hochvakuumtransfer [168].

#### 4.5.5 Trennung in neutral-basische und saure Komponenten

Zur Trennung des Aromaextraktes in die neutral-basische und die saure (=acide) Komponenten wurde folgendermaßen vorgegangen:

- das mittels Hochvakuumtransfer gewonnene Destillat wurde aufgetaut und vereinigt
- anschließend zweimal mit je 75 ml 8%-iger  $\text{NaHCO}_3$ -Lösung ausgeschüttelt
- die wässrige Lösung (unten = acide Komponenten) wurde in einem Erlenmeyerkolben aufgefangen
- die im Scheidetrichter verbleibende organische Phase enthielt die neutral-basischen Komponenten
- die wässrige Lösung wurde mit 15%-iger  $\text{H}_2\text{SO}_4$  auf pH 2,0 (ca. 35 ml) eingestellt
- danach 3-maliges Ausschütteln mit dest. Diethylether (100/100/50 ml)
- die drei im Scheidetrichter verbleibenden Phasen wurden am Schluss vereinigt (=saure Komponenten)
- beide Fraktionen wurden über wasserfreiem  $\text{NaSO}_4$  getrocknet, mit dest. Diethylether gewaschen und zunächst an einer Vigreux-Kolonnen (30x2 cm) und anschließend mittels einer Mikrodestillationsapparatur nach der Methode von Bemelmans [170] bei 40 °C auf 1000  $\mu\text{l}$  eingeeengt

#### 4.5.6 Kapillargaschromatographie und Olfaktometrie

Um die Relevanz der Aromastoffe in einem Lebensmittel zu überprüfen, ist es notwendig, den gewonnenen Aromaextrakt schrittweise zu verdünnen, und daran anschließend eine GC/O durchzuführen, bis ein Aromastoff nicht mehr wahrgenommen werden kann [171, 172]. Der Begriff „FD-Faktor“ (flavour dilution) eines Aromastoffes spiegelt den Verdünnungsfaktor des Aromaextraktes wider, in welchem der Aromastoff gerade noch wahrgenommen werden kann [173].

- Gaschromatograph Hewlett-Packard HP 5890 mit on-column-Aufgabesystem

- Massenspektrometer Hewlett-Packard HP 5970 Series mit Direct Capillary Interface; Interface-Temperatur: 220 °C
- Trägergas Helium 6.0
- Säule: HP-5 Kapillarsäule (60 m×0,25 mm×0,25 µm Filmdicke, Agilent Technologies, Palo Alto, USA); Säulenvordruck: 85 kPa; Flowrate 2 ml/min; Temperaturprogramm: 40 °C, 1 min; 4°C/min=>210 °C; 210 °C, 20 min
- Injektionsvolumen: 1 µl; Injektionstemperatur: 40 °C

#### 4.5.7 Entwicklung eines spezifischen Verkostungsschemas für Hefebiere

Ausgehend von den Ergebnissen der AEVA wurde ein spezifisches Verkostungsschema für Hefebiere entwickelt. Das Verkostungsschema basiert auf einer Profilprüfung (vgl. Kap. 4.8.2.2) für flüchtige Aromakomponenten im Hefebier. Durch laufende Verkostungen wurde das Verkostungsschema schließlich noch um ein Attribut aus dem Bereich der nicht-flüchtigen Komponenten ergänzt. Das vollständige Verkostungsschema ist in Abbildung 141 dargestellt.

### 4.6 Bestimmung der Aktivität von Schlüsselenzymen in Hefebier

#### 4.6.1 Aktivität der Proteinase A

##### 4.6.1.1 Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach STAMM

Die Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach STAMM [174] erfolgte anhand einer spektralphotometrischen Messung. Das dabei verwendete resorufin-markierte Casein wird durch eine proteolytische Aktivität gespalten. Die Intensität der resultierenden rot-blauen Färbung kann spektralphotometrisch gemessen werden. Die zugehörige Kalibrationsgerade ist im Anhang dargestellt. Die Reproduzierbarkeit wurde anhand einer 6-fachen Aufbereitung einer Probe ermittelt und ist in Tabelle 14 dargestellt.

*Tabelle 14: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der proteolytischen Aktivität nach Stamm*

Bier 1	Bier 2	Bier 3	Bier 4	Bier 5	Bier 6	Mittelwert	StAbW	VK
0,194	0,196	0,179	0,177	0,177	0,172	0,183	0,010	0,055

##### 4.6.1.2 Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach KONDO

Der Nachteil der Bestimmung der Aktivität der Proteinase A nach STAMM liegt in der langen Inkubationsdauer (22 Stunden) und in den sehr hohen Kosten für das Substrat. Aufgrund seines universellen Substratcharakters, ist der Nachweis zudem

nicht spezifisch für Proteinase A, sondern dient im Allgemeinen zum Nachweis verschiedener proteolytischer Aktivitäten [175]. Aus diesen Gründen wurde die Methode nach KONDO *et al.* [61, 176, 177] für die Bestimmung der Aktivität der Proteinase A etabliert. Die Bestimmung beruht auf einer fluoreszenzphotometrischen Messung. Die im Substrat (MOCAC-Ala-Pro-Ala-Lys-Phe-Phe-Arg-Leu-Lys(Dnp)-NH<sub>2</sub>) enthaltene, hoch fluoreszente Eigenschaft der Acetylgruppe 7-Methoxycoumarin-4-yl (MOCAC) wird durch die Anwesenheit einer 2,4-Dinitrophenylgruppe (Dnp) unterdrückt. Durch die Wirkung der Proteinase A wird die Phe-Phe-Bindung gespalten, und eine relative Fluoreszenz kann gemessen werden.

Die beschriebene Bestimmung der Aktivität der Proteinase A kann für Bier und gärende Würzproben verwendet werden. Kohlensäurehaltiges Bier muss entgast werden.

#### 4.6.1.2.1 **Verwendete Materialien**

- MOCAC-Ala-Pro-Ala-Lys-Phe-Phe-Arg-Leu-Lys(Dnp)-NH<sub>2</sub>, Peptide Institute, Inc., Osaka, Japan
- Brij-35, Fluka, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Zitronensäure, wasserfrei, >99,5%, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- di-Natrium-Hydrogenphosphat, p.a., Merck, Darmstadt
- Proteinase A from bakers yeast, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Dimethylsulfoxid, > 99,5% (GC), Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Fluoreszenzphotometer Kontron SFM 25, Zürich, Schweiz
- temperierbares Wasserbad
- Laborzentrifuge

a) Substratstandardlösung: MOCAC-Ala-Pro-Ala-Lys-Phe-Phe-Arg-Leu-Lys(Dnp)-NH<sub>2</sub> in DMSO lösen (1 mM).

b) Puffer: 0,2 M McIlvaine-Puffer (pH 5,3)

c) Standard Proteinase A-Lösung: Standard Proteinase A wurde mit dest. Wasser auf eine Konzentration von 1 mg/ml eingestellt. 1 ng Proteinase A entspricht dabei einer Aktivität von  $3.0 \times 10^{-5}$  Units. Die Aktivität sollte auf einen Wert von  $3.0 \times 10^{-5}$  Units/ml eingestellt werden. Die Lösung wurde in Aliquote zu 15 µl aufgeteilt und bei -30 °C bis zur Verwendung aufbewahrt.

#### 4.6.1.2.2 **Durchführung der Analyse**

250 µl Puffer, 2 µl Substratstandardlösung und 20 µl Probelösung wurden in ein Eppendorf-Reaktionsgefäß pipettiert und anschließend mit dest. Wasser auf 500 µl aufgefüllt. Die Reaktionsgefäße wurden sanft geschüttelt und zentrifugiert ( $5000 \text{ U} \times \text{min}^{-1}$ , 1 min, 0 °C). Nach der Inkubation der Reaktionsgefäße in einem Wasserbad für 45 min bei 30 °C wurden die Proben für 5 min bei 80 °C temperiert

und danach sofort auf 0 °C abgekühlt und zentrifugiert (5000 U×min<sup>-1</sup>, 1 min, 0 °C). Die Proben wurden 1:10 verdünnt und fluoreszenzphotometrisch gemessen. Die Einstellungen am Fluoreszenzphotometer waren wie folgt:  $\lambda_{\text{Ex}} = 328 \text{ nm}$  und  $\lambda_{\text{Em}} = 393 \text{ nm}$ . Die Konzentration der Proteinase A wurde anhand einer Kalibriergeraden ermittelt. Für die Ermittlung der Kalibriergeraden wurde ein hitzebehandeltes Bier als Probelösung verwendet. Die Dosagemengen an Standard-Proteinase A-Lösung variierten zwischen 0–20 ng/ml. Die Probenvorbereitung entspricht der oben beschriebenen Vorgehensweise. Die Messergebnisse der Kalibrationsproben wurden über eine Regressionsanalyse ausgewertet. Die Kalibriergerade ist in Abbildung 139 dargestellt. Die Reproduzierbarkeit für diese Analytik wurde anhand einer Messung von sechs Bierproben ermittelt (vgl. Tabelle 15).

*Tabelle 15: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Aktivität der Proteinase A*

Probe1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Probe 6	Mittelwert	StAbw	VK
32,676	30,552	31,766	34,800	32,676	31,462	32,322	1,45399	0,045

## 4.6.2 Aktivität der Esterase

Die Bestimmung der extrazellulären Esterase-Aktivität erfolgte nach der Methode nach HORSTED *et al.* [178].

### 4.6.2.1 Verwendete Materialien

- p-Nitrophenyl-dodecanoate,  $\geq 98,0 \%$  (GC), Fluka, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- p-Nitrophenol, spectrophotometric grade, Fluka, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- MES, minimum 99 %, Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Dimethylsulfoxid,  $> 99,5\%$  (GC), Sigma-Aldrich Chemie, Taufkirchen
- Natriumhydrogencarbonat, p.a., Merck, Darmstadt

### 4.6.2.2 Durchführung der Analyse

200  $\mu\text{l}$  Probe wurden zu 600  $\mu\text{l}$  Substratlösung pipettiert. Die Substratlösung besteht aus 1,2 mM p-Nitrophenyl-dodecanoate, 10 % (w/w) DMSO und 60 mM MES-Puffer (pH 5,5). Der Ansatz wurde 30 min bei 40 °C inkubiert. Anschließend wurde die Reaktion durch Zugabe von 600  $\mu\text{l}$  1 M NaHCO<sub>3</sub>-Lösung, pH 9,0, gestoppt. Bei diesem pH-Wert geht das gebildete p-Nitrophenol in sein gelb gefärbtes Chinon über. Dessen Konzentration kann über Messung der Absorption im Photometer bei einer

Wellenlänge von 400 nm anhand seines molaren Extinktionskoeffizienten quantitativ bestimmt werden. Der molare Extinktionskoeffizient  $\epsilon$  wurde auf  $17599 \text{ L} \times \text{mol}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$  bestimmt (vgl. Abbildung 140).

1 mU an Esterase-Aktivität ist als Enzymmenge definiert, die 1 nmol p-Nitrophenol pro Minute unter den gegebenen Reaktionsbedingungen freisetzt. Die Bestimmung der Esterase-Aktivität erfolgte nach folgender Gleichung:

$$\text{Esterase - Aktivität} [mU \times ml^{-1}] = \frac{\Delta E_{400nm} \cdot V_{ges} \cdot F}{t \cdot V_{Probe} \cdot \epsilon \cdot d} \quad \text{Gleichung 4.1}$$

$\Delta E$ : =Extinktion bei 400 nm;  $V_{ges}$ : =Gesamtvolumen [ml];  $F$ : =Umrechnungsfaktor;  $t$ : =Inkubationszeit [min];  $V_{Probe}$ : =Probenvolumen [ml];  $\epsilon$ : =molarer Extinktionskoeffizient [ $\text{L} \times \text{mol}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ ];  $d$ : =Schichtdicke der Küvette [cm]

Der Umrechnungsfaktor ergab sich aus der Transformation der Einheiten von mol zu nmol bzw. l zu ml.

Beispiel:

$\Delta E=0,414$ ;  $V_{ges}=1,4 \text{ ml}$ ;  $F=1.000.000$ ;  $t=30 \text{ min}$ ;  $V_{Probe}=0,2 \text{ ml}$ ;  $\epsilon=17599$ ;  $d=1 \text{ cm}$ ;

$$\text{Esterase - Aktivität} [mU \times ml^{-1}] = \frac{0,414 \cdot 1,4 \cdot 1.000.000}{30 \cdot 0,2 \cdot 17599 \cdot 1} = 5,49 \quad \text{Gleichung 4.2}$$

Die Reproduzierbarkeit der Methode wurde anhand einer Messung von fünf Bierproben ermittelt (vgl. Tabelle 16).

*Tabelle 16: Reproduzierbarkeit der Bestimmung der Aktivität der Esterase*

Probe 1	Probe 2	Probe 3	Probe 4	Probe 5	Mittelwert	StAbW	VK
0,344	0,424	0,437	0,358	0,358	0,384	0,043	0,111

## 4.7 Bestimmung des physiologischen Zustandes von Hefezellen

### 4.7.1 Bestimmung der Hefeviabilität

Die Bestimmung der Hefeviabilität (Lebend-Tot-Nachweis) wurde anhand der Methylenblau-Färbung nach BACK [179] durchgeführt. Abweichend von der Originalmethode wurden 0,1 ml Hefesuspension mit 0,9 ml Methylenblau-Lösung vermischt, für 2 min inkubiert und anschließend im Hellfeld-Mikroskop ausgewertet. Um eine ausreichende statistische Sicherheit zu gewährleisten, wurden mindestens 200 Zellen ausgewertet.

### **4.7.2 Bestimmung der Hefevitalität**

Die Bestimmung der Hefevitalität zur Ermittlung des tatsächlichen physiologischen Zustandes einer Hefepopulation erfolgte anhand der Messung des intrazellulären pH-Wertes nach der Originalmethode nach BACK *et al.* [180].

## **4.8 sensorische Analytik**

Für die sensorischen Prüfungen stand ein eigens dafür eingerichteter, gut belüfteter Raum zur Verfügung, der durch Stellwände getrennte Prüfplätze besitzt. Sensorische Tests wurden nach DIN 10962 [181] bei einer Temperatur von  $20 \pm 1$  °C, bei einer relativen Luftfeuchte von 40 bis 70 % und bei Tageslicht durchgeführt. Die sensorischen Prüfungen wurden meist vormittags zwischen 10.00 und 11.00 Uhr durchgeführt. Alternativ wurde auch nachmittags zwischen 14.00 und 15.00 Uhr verkostet, wobei die Verkoster dazu angehalten wurden, auf besonders geschmacksaktive Speisen während der Mittagspause zu verzichten. Die sensorischen Beurteilungen wurden von einem Sensorik-Panel durchgeführt, bestehend aus 6–15 geschulten Testpersonen. Die Schulungen erfolgten anhand von ausgewählten Aromastoffen, die in unterschiedlichen Konzentrationen oberhalb der Geruchsschwelle angeboten wurden. Die Schulungen wurden in regelmäßigen Abständen wiederholt, um die Leistungsfähigkeit des Panels zu überprüfen.

### **4.8.1 Unterschiedsprüfung**

Nach DIN 10950-1 [182] werden darunter Prüfungen verstanden, bei den Prüfproben verschiedener Prüfmuster verglichen werden. Die Tests sind meist sehr genau, sie sind geeignet, Unterschiede zwischen sehr ähnlichen Produkten festzustellen [183].

#### **4.8.1.1 Paarweise Vergleichsprüfung**

Die paarweise Vergleichsprüfung ist in DIN 10954 beschrieben [184]. Das Verfahren wurde angewandt, um die Richtung der Unterschiede zwischen zwei Prüfproben zu bestimmen (gerichtete Prüfung). Nach [184] müssen für die gerichtete Prüfung mindestens sieben Sachverständige an der Prüfung teilnehmen. Die Auswertung erfolgt anhand eines zweiseitigen Tests, d.h. der Unterschied zwischen den Prüfproben oder die Bevorzugung einer Prüfprobe ist nicht bekannt. Entsprechend

wird die Hypothese  $A \neq B$  formuliert und die Testhypothese  $A = B$  aufgestellt. Diese Testhypothese wird abgelehnt, wenn ein Großteil der Prüfer die Prüfprobe A oder Prüfprobe B für ausgeprägter hält oder bevorzugt. Anhand einer Tabelle erfolgte die Auswertung eines zweiseitigen Tests für paarweise Vergleichsprüfungen [183].

#### **4.8.1.2 Dreiecksprüfung**

Die Dreiecksprüfung wird eingesetzt zur Untersuchung allgemeiner Produktunterschiede, zur Prüferauswahl u.v.m. [185]. Sie ist einfach durchzuführen, liefert aber nicht allzu viele Informationen über das Produkt. Die Prüfung bestätigt, dass sich die Proben signifikant unterscheiden oder gleich sind [183]. Ausgewertet wurden die durchgeführten Dreiecksprüfungen auf Unterschied. Dadurch dass lediglich Einzelurteile vorliegen, sind die Ergebnisse binomial verteilt. Untersucht wird die Wahrscheinlichkeit, ob ein signifikanter Unterschied besteht. Die Anzahl der richtigen Antworten wird mit den Werten in z.B. BUSCH-STOCKFISCH [183] für „binomial verteilte Werte zur Dreiecksprüfung: Prüfung auf Unterschied verglichen“.

#### **4.8.1.3 Bestimmung von Schwellenwerten**

Die Bestimmung des Schwellenwertes von Heptanol-1 wurde nach DIN 10959 in Bier durchgeführt. Den Prüfpersonen wurden vier vertikal angeordnete Dreiecksprüfungen angeboten, wobei sich die Konzentration des zugemischten Heptanol-1 von links nach rechts jeweils verdoppelte. Neben der Bestimmung der abweichenden Probe wurden die Verkoster aufgefordert, den empfundenen Geruchseindruck zu beschreiben. Die Reihenfolge der Verkostung wurde von links nach rechts (aufsteigende Konzentration) festgelegt, wobei ein Rückverkosten erlaubt wurde. Die Bestimmung des Schwellenwertes erfolgte nach der Bestimmung des geometrischen Mittelwertes („best estimated threshold“ (BET)). Die Vorgehensweise ist bei SCHÖNBERGER beschrieben [186].

### **4.8.2 Beschreibende Prüfung**

#### **4.8.2.1 Einfach beschreibende Prüfung**

Die einfach beschreibende Prüfung wird angewandt, um Prüfer zu schulen bzw. Prüfer den Einstieg in eine später folgende Profilprüfung zu erleichtern. Das Verfahren ist in der DIN 10964 beschrieben [187]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die einfach beschreibende Prüfung eingesetzt, um innerhalb des

Verkostergremiums einen Abgleich der vorgeschlagenen Attribute für die Verkostung von Hefebieren zu erzielen. Es wurde darauf geachtet, dass die eingesetzten Prüfer neben ihrer sensorischen Fähigkeiten auch in der Lage waren, die wahrgenommenen Aroma- und Geschmackseindrücke verbal zu beschreiben.

#### **4.8.2.2 Profilprüfung**

Mit Hilfe deskriptiver Verfahren sollen die untersuchten Produkte möglichst genau beschrieben werden. Die dabei erkannten Produkteigenschaften sollen anhand einer Skala zusätzlich quantifiziert werden. Das Verfahren ist in der DIN 10969 beschrieben. Deskriptive Verfahren werden z.B. eingesetzt, um sie mit chemisch-technischen Analysenmerkmalen zu korrelieren. Diese Vorgehensweise wird vor allem in der Produktentwicklung verwendet, um die Auswirkungen von Änderungen in der Rezeptur oder der Verfahrenstechnik zu untersuchen [188]. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgte in Form von sog. spider-plots oder Produktkennlinien.

### **4.8.3 Bewertende Prüfung**

#### **4.8.3.1 Verkostung nach DLG**

Die Bewertung der für Bier wichtigen Kriterien „Geruch“, „Reinheit des Geschmacks“, „Vollmundigkeit“, „Rezenz“ und „Qualität der Bittere“ erfolgte nach den Vorschriften der MEBAK (sog. „DLG-Schema“) [149]. Abweichend von der Originalvorschrift erfolgte die Bewertung in Halbnotenschritten, um ein größeres Spektrum an möglichen Bewertungsnoten zu erhalten und dadurch die Genauigkeit der Methode zu verbessern.

#### **4.8.3.2 Alterungsverkostung nach Eichhorn**

Für die Bewertung des Alterungszustandes wurden die untersuchten Biere auch nach dem Verkostungsschema nach Eichhorn [164] verkostet. Dabei wurden die Kriterien „Geruch“, „Geschmack“, „Bittere“ sowie die sog. „Alterungsakzeptanz“ bewertet. Die Bewertung der ersten drei Kriterien erfolgte in Halbnotenschritten (1=frisch, 4=extrem gealtert), die Bewertung der Alterungsakzeptanz erfolgte durch Angabe einer Prozentzahl (100%=frisch, 50%=Alterung wird auch von Laien erkannt, 0%=extreme Alterung).

## **4.9 Statistische Methoden**

### **4.9.1 Reproduzierbarkeit**

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen, wurden die einzelnen Analysen mit einer identischen Probe mehrmals nacheinander durchgeführt. Daraus wurde der Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient sowie das Konfidenzintervall berechnet.

### **4.9.2 t-Test zum Vergleich von Mittelwerten**

Um zu überprüfen, ob die Unterschiede bei der Verkostung nach DLG beziehungsweise bei der Alterungsverkostung nach EICHHORN allein auf einen Zufallsfehler zurückzuführen sind oder diese als signifikant bezeichnet werden können, wurden die entsprechenden Mittelwerte mit Hilfe eines t-Testes verglichen [189].

### **4.9.3 Regressionsanalyse**

Die Regressionsanalyse befasst sich mit der Untersuchung und Quantifizierung von Abhängigkeiten zwischen metrisch skalierten Variablen [190]. Wesentliche Aufgabe dabei ist, eine Funktion zu finden, die die Abhängigkeit einer Variablen von einer oder mehreren unabhängigen Variablen quantifiziert. Die Durchführung der Regressionsanalyse erfolgte anhand des Statistik-Programms für Windows „WinSTAT“.

### **4.9.4 Faktorenanalyse**

Die Faktorenanalyse zählt innerhalb der multivariaten Analysemethoden zu den struktur-entdeckenden Verfahren [191]. Die Faktorenanalyse wird verstärkt im Lebensmittelbereich eingesetzt, um Verbindungen zwischen sensorischen und chemisch-technischen Analysen zu suchen bzw. die Anzahl der Analysenmerkmale auf entscheidende Haupteinflussfaktoren zu reduzieren [191, 192, 193, 194, 195]. KROTTENTHALER [196] untersuchte mit Hilfe der Faktorenanalyse, inwieweit sich eine Vorhersage aus Malz bzw. Würze in Bezug auf den späteren Biergeschmack darstellen ließe. Mit der Faktorenanalyse wird versucht, für eine gegebene Variablenzahl eine Basis von linearen und unabhängigen Faktoren zu finden, durch

die sich die Variablen beschreiben lassen. Es ist nun das Ziel der Faktorenanalyse, diese Basisfaktoren und ihren Beitrag zur Varianz, die sog. Ladungen zu bestimmen. Bei der Durchführung der Faktorenanalyse wird der erste Faktor so gelegt, dass er möglichst viel der Gesamtvarianz auf sich bindet. Die folgenden Faktoren werden entsprechend so gewählt, dass sie möglichst viel der verbleibenden Varianz auf sich binden. Von Bedeutung bei der Auswahl der Faktoren ist der sog. Eigenwert. Der Eigenwert ist der durch einen Faktor erklärte Teil der Gesamtvarianz. Je größer der Eigenwert, desto mehr Erklärungswert hat der Faktor [190]. Für die Auswertung der Daten wurde das Kaiser-Kriterium zugrunde gelegt, wonach nur Eigenwerte größer 1 berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit zur Auswertung stellt die zweidimensionale Darstellung der Wertepaare im Scatterdiagramm dar, wobei auf der Abszisse der Faktor 1 und auf der Ordinate der Faktor 2 abgebildet wird. Die Beziehungen der Produkte sind durch deren Entfernungen untereinander charakterisiert, d.h. sind Produktpunkte dicht beieinander, sind diese ähnlich beurteilt worden. Weit auseinander liegende Punkte werden dagegen sehr unterschiedlich bewertet. Attribute, die in der Konfiguration weit außen und nahe an einer Hauptkomponente liegen, besitzen einen sehr hohen Informationsgehalt [197]. Anhand einer graphischen Darstellung können Zusammenhänge zwischen den einzelnen Faktoren aufgezeigt werden. Die Durchführung der Analyse erfolgte anhand des Statistik-Programm für Windows „WinSTAT“.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

Die Darstellung der Ergebnisse kann in zwei große Themenblöcke aufgeteilt werden. Im ersten Teil werden die Ergebnisse der Untersuchungen zum Gebiet „hefephysiologische Untersuchungen auf die Qualität von Hefebier und Einfluss unterschiedlicher Trenntechniken auf die Qualität der Hefebiere“ dargestellt, wohingegen im zweiten Teil Auswirkungen von unterschiedlichen Dosagen von Prozessbieren auf die Qualität der resultierenden Verschnittbiere präsentiert werden.

### **5.1 Untersuchungen zum Einfluss der Aufbewahrungsbedingungen von Überschusshefe auf die Qualität des darin enthaltenen, wiedergewinnbaren Hefebieres**

In Voruntersuchungen hatte sich gezeigt, dass vor allem die Qualität der Hefesuspension, genauer der physiologische Zustand der Hefepopulation, mitentscheidend für die Qualität der rückgewinnbaren Hefebiere ist. Dazu wurden Hefebiere, die aus unterschiedlich gelagerten Hefesuspensionen gewonnen wurden, gewonnen, und anhand teilweise sehr aufwendiger Analysetechniken hinsichtlich wichtiger analytischer und sensorischer Untersuchungsparameter aufbereitet.

#### **5.1.1 Analytische Versuche**

##### **5.1.1.1 GC-Sniffing-Analyse von unterschiedlich gelagerten Überschusshefen**

Zunächst wurden die flüchtigen Aromastoffe aus einem frisch gewonnenen Hefebier durch Flüssig-Flüssig-Extraktion mittels Diethylether isoliert und anschliessend mittels einer Hochvakuumdestillation aufgereinigt, um die nicht flüchtigen Komponenten abzutrennen. Für die Aromaextraktverdünnungsanalyse (AEVA) wurde der Aromaextrakt in eine neutral-basische und eine acide Fraktion getrennt. Die neutral-basische Fraktion war durch süße, honigartige und fruchtige Noten gekennzeichnet, wohingegen in der aciden Fraktion schweißige und käsige Aromakomponenten vorherrschten. Beide Fraktionen wurden separat mittels GC/Olfaktometrie untersucht.

## Neutral-basische Fraktion

Abbildung 13 zeigt das Gaschromatogramm der neutral-basischen Aromastoffe des frisch gewonnenen Hefebieres auf einer HP-5 Säule. Durch die AEVA konnten 28 aromaaktive Verbindungen identifiziert werden. In Abbildung 14 sind diejenigen Aromastoffe mit einem Flavour Dilution (FD)- Faktor von  $\geq 2$  dargestellt. Die Aromastoffe **3** (süßlich, malzig), **6** (malzig), **7** (fruchtig), **15** (fruchtig), **16** (fruchtig), **17** (süßlich, honigartig), und **24** (Gewürznelke) wurden mit den höchsten FD-Faktoren beschrieben. Etwas geringere FD-Faktoren wiesen die Aromastoffe **9** (fruchtig, süßlich), **19** (honigartig, rosenartig) und **21** (fruchtig) auf.

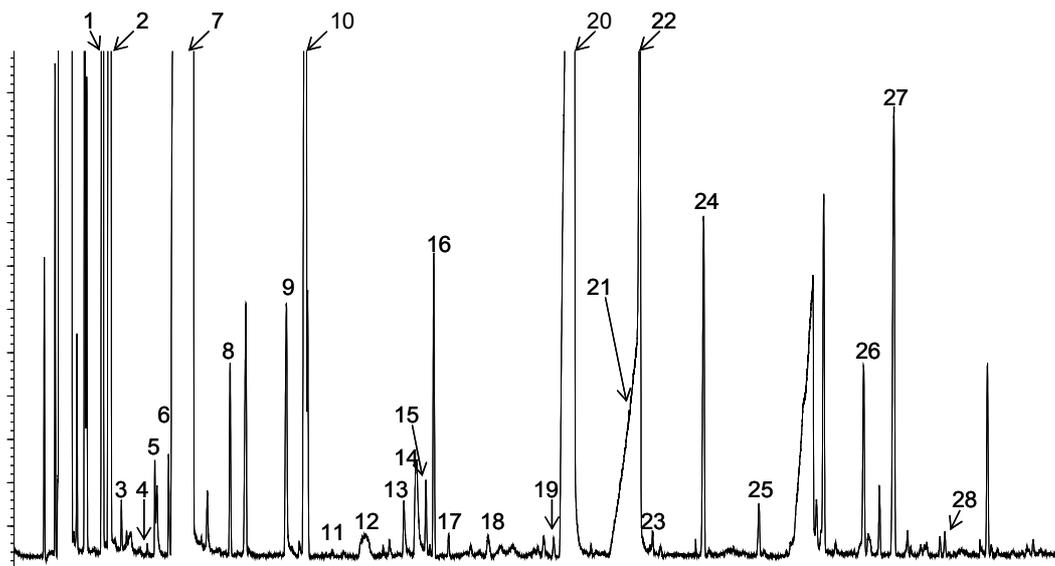


Abbildung 13: Gaschromatogramm der neutral-basischen Fraktion eines frisch gewonnenen Hefebieres

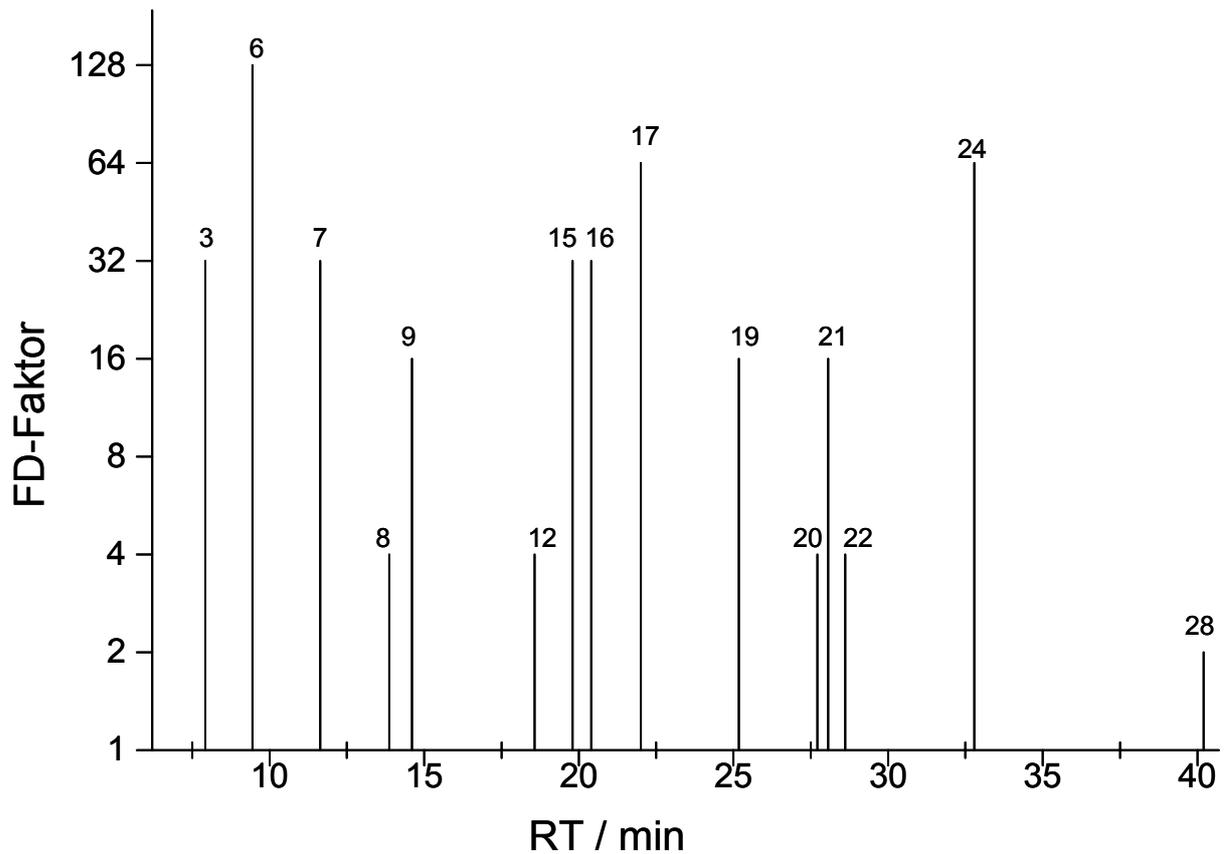


Abbildung 14: Flavour Dilution (FD) – Chromatogramm der wichtigsten Aromastoffe der neutral-basischen Fraktion

Die Ergebnisse der Auswertungen der Massenspektren in Verbindung mit den erhaltenen FD-Faktoren ergaben, dass 3-Methyl-1-butanol, Ethylbutanoat, Ethylhexanoat, Hexylacetat, 2-Phenylethanal und 2-methoxy-4-vinylphenol maßgeblich zum Aroma von frisch gewonnenem Hefebier beitragen (cf. Tabelle 17). Weitere wichtige Aromastoffe sind 3-Methylbutylacetat, 2-Phenylethanol und Ethyloctanoat. Eine unbekannte Verbindung mit einem malzigen Aroma wurde zu Beginn des Laufes detektiert, konnte aber anhand der Massenspektren nicht identifiziert werden. Aufgrund der Retentionszeit und des Aromaeindrucks dürfte es sich allerdings um 3-Methylbutanal handeln, welches auch schon früher von anderen Autoren beschrieben wurde [166, 198].

Tabelle 17: Aromastoffe der neutral-basischen Fraktion in frisch gewonnenem Hefebier

Nr.	Aromastoff	RT (HP-5)	FD-Faktor	Geruch
1	Unbekannt	6.70	<2	malzig
2	Unbekannt	7.13	<2	käsigt
3	Unbekannt	7.92	32	malzig/süßlich
4	Unbekannt	8.62	<2	malzig
5	1,1-Diethoxethan	9.20	<2	fruchtig
6	3-Methyl-1-butanol	9.45	128	malzig
7	Ethylbutanoat	11.64	32	fruchtig
8	2-Furanmethanol	13.87	4	fruchtig/süßlich
9	3-Methylbutylacetat	14.61	16	fruchtig/süßlich
10	Unbekannt	15.90	<2	fruchtig
11	Unbekannt	16.95	<2	fruchtig
12	1-Heptanol	18.57	4	Kartoffel
13	Methionol	19.06	<2	schweißig
14	β-Myrcen	19.50	<2	blumig
15	Ethylhexanoat	19.80	32	Eisbonbon/fruchtig
16	Hexylacetat	20.40	32	fruchtig
17	2-Phenylethanal	22.00	64	süß, honigartig
18	Heptylacetat	24.60	<2	fruchtig
19	2-Phenylethanol	25.17	16	honigartig/rosenartig
20	Octansäure	27.71	4	Bratapfel
21	Ethylactanoat	28.06	16	fruchtig
22	Decylacetat	28.61	4	fruchtig/blumig
23	2-Phenylethylacetat	30.56	<2	süßlich
24	2-Methoxy-4-vinylphenol	32.79	64	Gewürznelke
25	Decansäure	34.72	<2	schweißig/sauer
26	β-Caryophyllen	37.00	<2	fruchtig/blumig
27	α-Caryophyllen	38.15	<2	fruchtig/blumig
28	unbekannt	40.20	2	süßlich/Vanille

Legende: RT:=Retentionszeit; FD:= Flavour Dilution

## Acide Fraktion

In der aciden Fraktion wurden 14 aromaaktive Verbindungen detektiert (cf. Tabelle 18). In Abbildung 15 sind diejenigen Aromastoffe mit einem FD-Faktor  $\geq 2$  dargestellt. Die Aromastoffe **3** (malzig), **4** (säuerlich), **11** (nach Bratapfel) und **12** (maggiartig) wurden mit den höchsten FD-Faktoren beschrieben. Die Ergebnisse der Auswertungen der Massenspektren in Verbindung mit den erhaltenen FD-Faktoren ergaben, dass 3-Methy-1-butanol, Butansäure, Octansäure und eine unbekannte Verbindung (RT=28.52) maßgeblich zum Aroma von frisch gewonnenem Hefebier beitragen. Weitere wichtige Aromastoffe sind 2- und 3-Methylbuttersäure.

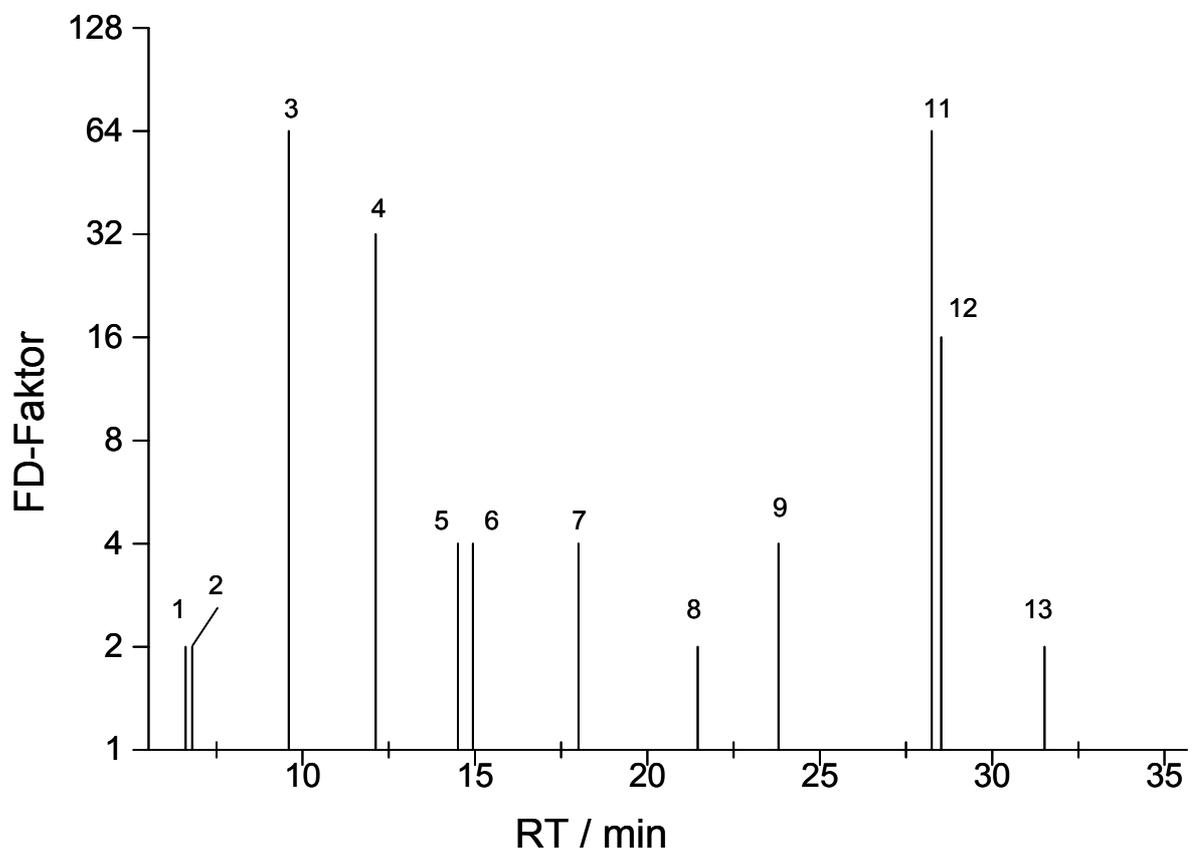


Abbildung 15: Flavour Dilution (FD)-Chromatogramm der wichtigsten Aromastoffe der aciden Fraktion

*Tabelle 18: Aromastoffe der aciden Fraktion in frisch gewonnenem Hefebier*

Nr.	Aromastoff	RT (HP-5)	FD-Faktor	Geruch
1	Ethylacetat	6.61	2	käsige/Lösungsmittel
2	Essigsäure	6.80	2	essigsauer
3	3-Methylbutanol	9.60	64	malzig
4	Butansäure	12.12	32	säuerlich
5	3-Methylbuttersäure	14.51	4	käsige/schweißig
6	2-Methylbuttersäure	14.94	4	käsige/schweißig
7	5,5-Dimethyl-2(5H)-Furanon	18.00	4	käsige/süßlich
8	Hexansäure	21.46	2	käsige/fruchtig
9	unbekannt	23.80	4	Gummibärchen
10	2-Phenylethanol	25.01	<2	rosenartig/honigartig
11	Octansäure	28.25	64	Bratapfel
12	unbekannt	28.52	16	maggiartig
13	unbekannt	31.52	2	fruchtig
14	Decansäure	34.57	<2	wachsartig, seifig

Legende: RT:=Retentionszeit; FD:= Flavour Dilution

### 5.1.1.2 Identifizierung von Aromastoffen bei der Hefealterung

Um die Einflüsse der Lagerung und der Temperatur auf das Aromaprofil von Hefebier zu untersuchen, wurde Hefe sowohl für 10d bei 0 °C als auch für 10d bei 10 °C aufbewahrt. Anschließend wurde jeweils das Hefebier durch Zentrifugation gewonnen und aufbereitet. In Tabelle 19 sind die Aromastoffe dargestellt, welche durch die unterschiedlichen Aufbewahrungsbedingungen die größten Veränderungen erfuhren. Die vollständige Auflistung der untersuchten Aromastoffe ist im Anhang abgedruckt (cf. Tabelle 79, Tabelle 80). Es zeigte sich, dass vor allem die kurz- und mittelkettigen Fettsäuren in ihren FD-Faktoren stark erhöht wurden und somit insgesamt zu dem schweißig, käsigen Aroma von gealterter Hefe bzw. gealtertem Hefebier beitragen. Dies wurde in ähnlicher Form von HERRMANN [165] für Hefeweissbiere beschrieben und bestätigt sich weitgehend, wenn auch in ausgeprägterer Form, für Hefebiere.

Tabelle 19: Aromastoffe, die durch die unterschiedliche Aufbewahrung am stärksten beeinflusst wurden

Aromastoff	FD-Faktor			Geruch
	A	B	C	
Butansäure	32	64	128	säuerlich
3-Methylbuttersäure	4	128	64	käsig/schweißig
2-Methylbuttersäure	4	8	128	käsig/schweißig
5,5-Dimethyl-2(5H)-Furanon	4	8	128	käsig/süßlich
1-Heptanol	4	8	16	Kartoffel
Hexansäure	2	64	32	käsig/fruchtig
Octansäure	64	128	256	Bratapfel
Decansäure	<2	<2	16	wachsartig, seifig
Ethylbutanoat	32	128	128	fruchtig
2-Furanmethanol	4	128	64	fruchtig/süßlich
unbekannt	<2	32	128	fruchtig
Ethylhexanoat	32	4	4	Eisbonbon/fruchtig
Ethyl octanoat	16	128	32	fruchtig

Legende: FD:=Flavour Dilution, A:= frisches Hefebier; B:= Hefe zuvor 10d bei 0 °C aufbewahrt, anschließend Hefebier gewonnen; C:= Hefe zuvor 10d bei 10 °C aufbewahrt, anschließend Hefebier gewonnen

### 5.1.2 Hefephysiologie

Für die nachfolgenden Betrachtungen (Kapitel 5.1.2–5.1.5) wurden die in Tabelle 20 aufgeführten Probenbezeichnungen verwendet.

Tabelle 20: Verwendete Probenbezeichnung

Probe	Beschreibung
1	Hefebier frisch (=Vergleich)
2	Hefe 10d bei 0 °C gelagert, anschließend Hefebiergewinnung
3	Hefe 10d bei 4 °C gelagert, anschließend Hefebiergewinnung
4	Hefe 10d bei 10 °C gelagert, anschließend Hefebiergewinnung

Für die Beurteilung der Hefequalität wurden die Parameter „Hefeviabilität“ und „Hefevitalität“ untersucht. Es zeigte sich, dass vor allem eine lange Aufbewahrungsphase der Überschusshefe in Kombination mit höheren Temperaturen zu einer deutlichen Verschlechterung des physiologischen Zustands der Hefezellen führte (cf. Abbildung 16). In der Literatur gibt es Hinweise, dass vor allem bei höheren Temperaturen der Prozess der sog. „Autofermentation“ während

der Lagerung der Hefesuspension beginnt [199]. Dabei werden intrazelluläre Reservekohlenhydrate, wie Glykogen und Trehalose, zu Ethanol und Kohlendioxid umgewandelt. Der Glykogen-Metabolismus wird durch eine Vielzahl von Stressbedingungen, z.B. Nährstoffmangel, während der Gärung und vor allem während der Aufbewahrung von Hefesuspensionen aktiviert [200]. Durch diese Stressbedingungen wird Glykogen durch Gph1p- und Gdb1p-Enzyme abgebaut. Gph1p setzt Glucose-1-phosphat aus  $\alpha$ -1,4-Bindungen frei, kann jedoch keine  $\alpha$ -1,4-Bindungen in der Nähe von  $\alpha$ -1,6-Verzweigungen spalten [201, 202].

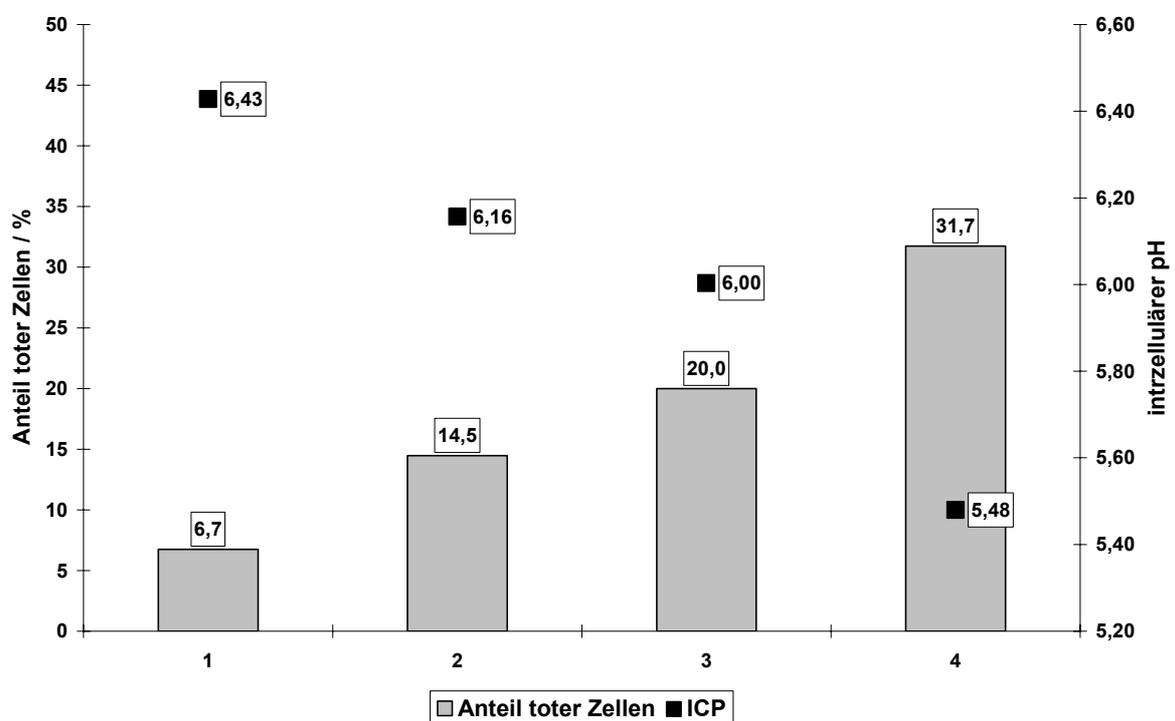


Abbildung 16: Verhalten der Hefeviabilität und der Hefevitalität bei unterschiedlichen Aufbewahrungsbedingungen

Diese  $\alpha$ -1,6-Bindungen werden in einem zweistufigen Prozess durch eine Glucanotransferase-Aktivität und eine sich anschließende  $\alpha$ -1,6-Glucosidase-Aktivität gespalten [203]. Sobald die  $\alpha$ -1-6-Bindung gespalten ist, kann Gph1p den Glykogenabbau fortsetzen [200]. Abbildung 17 zeigt exemplarisch den Glykogen-Katabolismus bei *S. cerevisiae*.

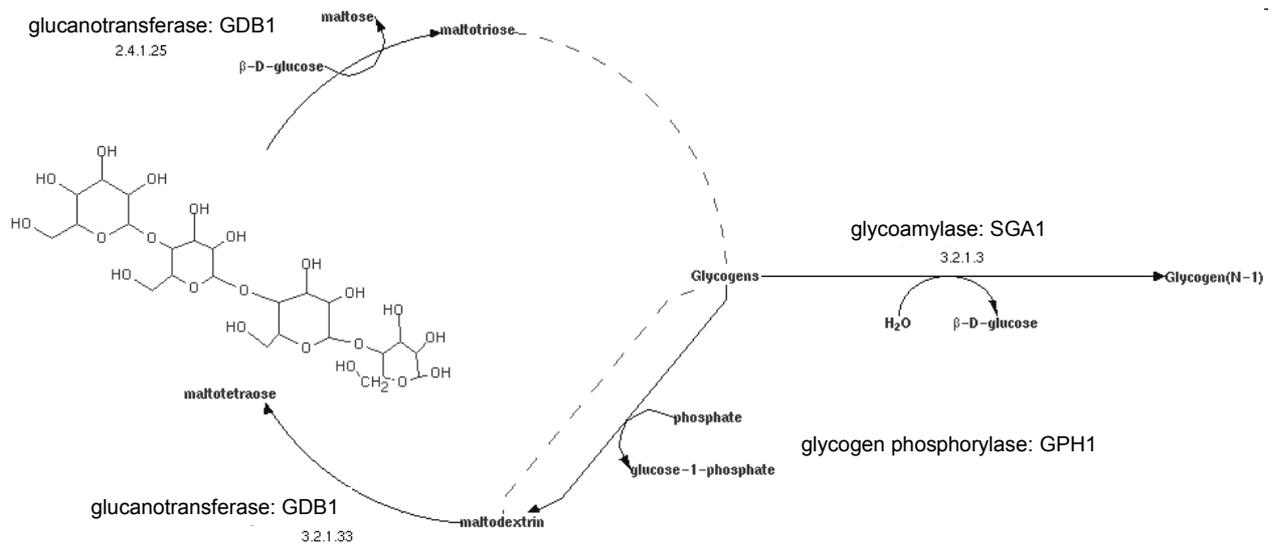
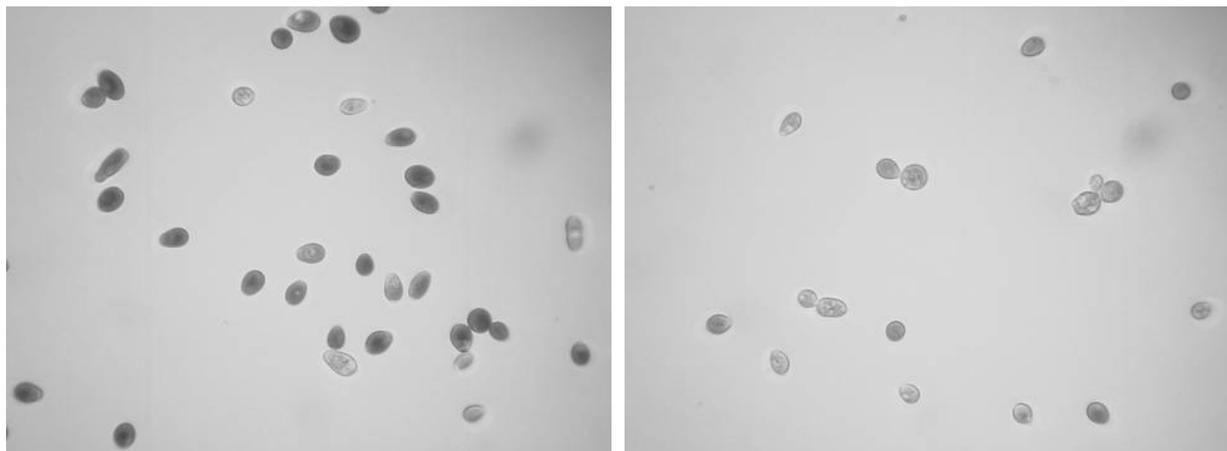


Abbildung 17: Glykogen-Katabolismus bei *S. cerevisiae* [204]

Der Nachweis des Abbaus von Glykogen zu Ethanol wurde im Rahmen dieser Arbeit nur qualitativ erbracht. Dabei wurden die Hefezellen mit 0,5 %-iger Lugol'scher Lösung angefärbt und im Hellfeld mikroskopiert. Zellen, die noch über intrazelluläre Glykogenreserven verfügten, wurden durch die Lugol'sche Lösung tiefbraun angefärbt, wohingegen die Zellen, bei denen der Glykogenvorrat aufgebraucht war, nur schwachbraun bzw. nicht angefärbt wurden. Die in Abbildung 18 dargestellten mikroskopischen Aufnahmen zeigen diese beiden Extreme.



Hefezellen mit intrazellulären Glykogenvorräten

Hefezellen ohne intrazelluläre Glykogenvorräte

Abbildung 18: Lichtmikroskopische Aufnahmen von Hefezellen nach Anfärbung mit Lugol'scher Lösung (40-fache Vergrößerung)

Diese erhöhten Ethanol- und die damit automatisch aufgrund der Umrechnung durch die große Balling-Formel [205] einhergehenden erhöhten Stammwürzegehalte

wurden insbesondere bei der Aufbewahrung von Überschusshefe beobachtet und bestätigen die von McCaig *et al.* [199] veröffentlichten Ergebnisse. Imai *et al.* [206] wiesen eine eindeutig negative Wirkung des Ethanols auf den physiologischen Zustand der Hefepopulation nach. Tabelle 21 zeigt die Ethanol- bzw. Stammwürzegehalte im wiedergewonnenen Hefebier in Abhängigkeit des physiologischen Zustandes der Hefepopulation.

*Tabelle 21: Ethanol- bzw. Stammwürzegehalt in Abhängigkeit des physiologischen Zustandes der Hefepopulation*

Probe	Hefeviabilität <sup>2</sup>	Hefevitalität <sup>3</sup>	Ethanol / Vol.-%	Stammwürze / GG-%
1	7	6,43	5,53	11,76
2	14	6,16	6,78	13,67
3	20	6,00	7,02	14,09
4	32	5,48	7,29	14,63

Der Verstoffwechslung von intrazellulären Speichervorräten kommt zudem eine betriebswirtschaftliche Bedeutung zu. Aus der Praxis wird häufig berichtet, dass eine Differenz zwischen dem Trockensubstanzgehalt der frischen Hefe und dem Trockensubstanzgehalt der letztendlich verkauften Hefe besteht. Um das Ausmaß der Trockensubstanzabnahme zu ermitteln, wurde eine bei einer Jungbierseparation entnommene Hefeprobe mehrere Tage bei einer Temperatur von 15 °C aufbewahrt und regelmäßig der Trockensubstanzgehalt bestimmt. Die Abnahme der Trockensubstanz und der resultierende Anstieg der Alkoholkonzentration ist in Abbildung 19 dargestellt.

<sup>2</sup> gemessen als Methylenblau-Tote

<sup>3</sup> gemessen als intrazellulärer pH-Wert

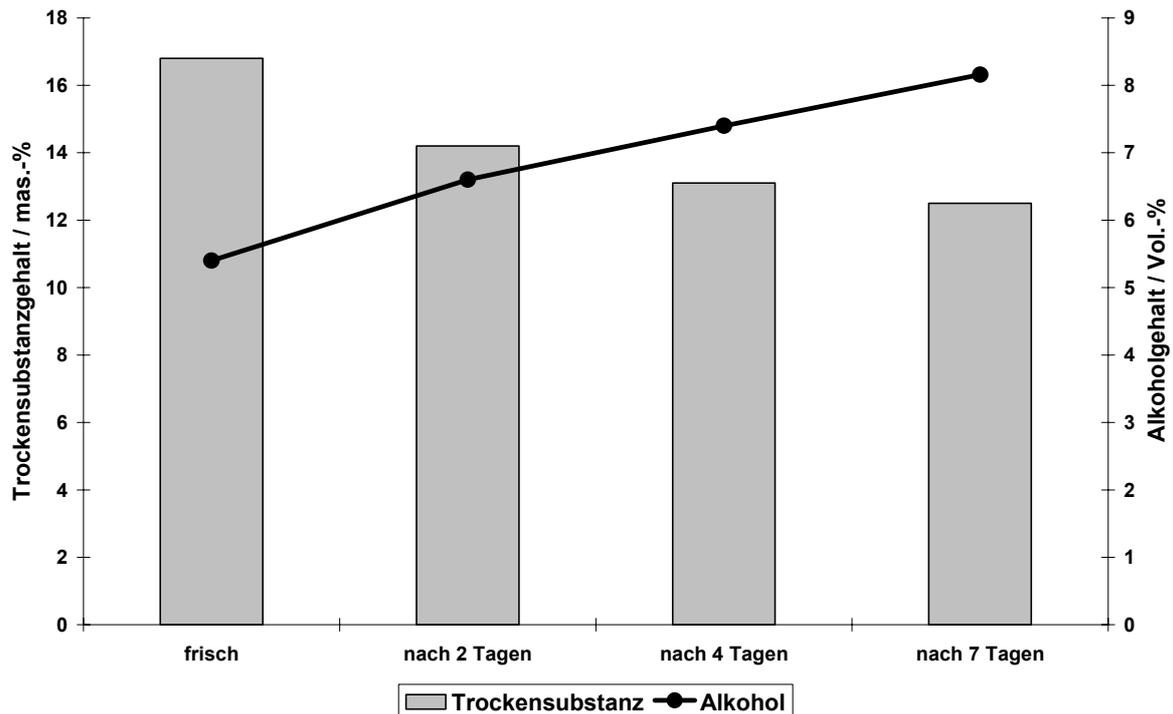


Abbildung 19: Abnahme des Trockensubstanzgehaltes während der Aufbewahrung einer Hefesuspension

Auffällig ist die rasche Abnahme in den ersten beiden Tagen, der Verlust beträgt hier bereits ca. 2 mas.-% absolut oder ca. 15 % relativ. Falls nur der initiale Trockensubstanzgehalt bestimmt wurde und nicht der zum Zeitpunkt des Hefeverkaufs tatsächlich vorliegende Trockensubstanzgehalt, kann es zu Ungereimtheiten bei der Abwicklung des Verkaufs kommen, denn die Hefeverwerter vergüten selbstverständlich nur die Feststofffracht und nicht die umgebende Flüssigkeit.

### 5.1.3 Verhalten von Bierinhaltsstoffen bei der Hefealterung

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden eine Reihe von Bierinhaltsstoffen auf ihr Verhalten durch Variation der Aufbewahrungsparameter von Überschusshefe hin untersucht.

Vor allem bei höheren Temperaturen wurden verstärkt die während der Gärung von den Hefezellen adsorbierten Würzeinhaltsstoffe freigesetzt. Dabei handelt es sich in erster Linie um phenolische Substanzen, die summarisch als Gesamtpolyphenole bzw. als Anthocyanogen gemessen werden konnten. Aber auch der Gehalt an freiem

Aminostickstoff nahm deutlich zu. Dies ist einerseits durch Exkretion von niedermolekularem Stickstoff aus dem Zellinneren zu erklären. Andererseits wurden durch eine proteolytische Aktivität höhermolekulare Peptide zu niedermolekularen abgebaut und wurden damit ebenfalls bei der Bestimmung des FAN erfasst. Die proteolytische Aktivität konnte in diesem Fall nur qualitativ angegeben werden, da der Messbereich für die sehr hohen Aktivitäten teilweise nicht ausreichte. Bei Probe 4 wurde eine niedrigere proteolytische Aktivität als bei Probe 2 und 3 gemessen, obwohl die Stressbedingungen hier deutlich höher lagen. Möglicherweise ist diese Reduktion auf eine „Selbstverdauung“ der Enzyme zurückzuführen. Die Existenz eines solchen Prozesses wird bei KONDO *et al.* [61] beschrieben. Die Zunahme der Farbe wurde von NARZISS [15] durch eine Resorption von an den Hefezellen gebundenen Melanoidinen begründet. Der direkte Nachweis von Melanoidinen als Maillard-Produkte könnte über das kürzlich entdeckte 2,4-dihydroxy-2,5-dimethyl-1-(5-acetamino-5-methoxycarbonyl-pentyl)-3-oxo-2H-pyrrol (kurz: Pronyl-L-Lysin) erfolgen [207]. Im Bier wurden mit Zunahme der Farbintensität auch steigende Gehalte an Pronyl-L-Lysin festgestellt [208]. Hinweise auf eine sehr gute Löslichkeit von Pronyl-L-Lysin in Ethanol wurden bei LINDENMEIER *et al.* [207] beobachtet. In einer separaten Untersuchung wurde ein positiver Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang Hefebierfarbe und Ethanolgehalt von  $r=0,95$  ( $N=7$ ) bestimmt, daher ist zu vermuten, dass die Resorption von gebundenen Inhaltstoffen insbesondere bei hohen Ethanolgehalten erleichtert wird. Da das Pronyl-L-Lysin nicht direkt am Institut gemessen werden konnte, wurde versucht, über den Nachweis von Stickstoffheterocyclen eine Aussage über das Verhalten von Maillard-Produkten während der Hefealterung zu erhalten. Dazu wurden die Hefebiere 1 und 4 auf ihre Gehalte an N-Heterocyclen untersucht. Insgesamt wurde eine deutliche Zunahme, insbesondere von 2-Methylpyrazin, Pyrazol, 3-Acetylpyridin und 2-Acetylpyrrol festgestellt (*cf.* Abbildung 20). Die vollständigen Ergebnisse sind in Tabelle 82 im Anhang dargestellt.

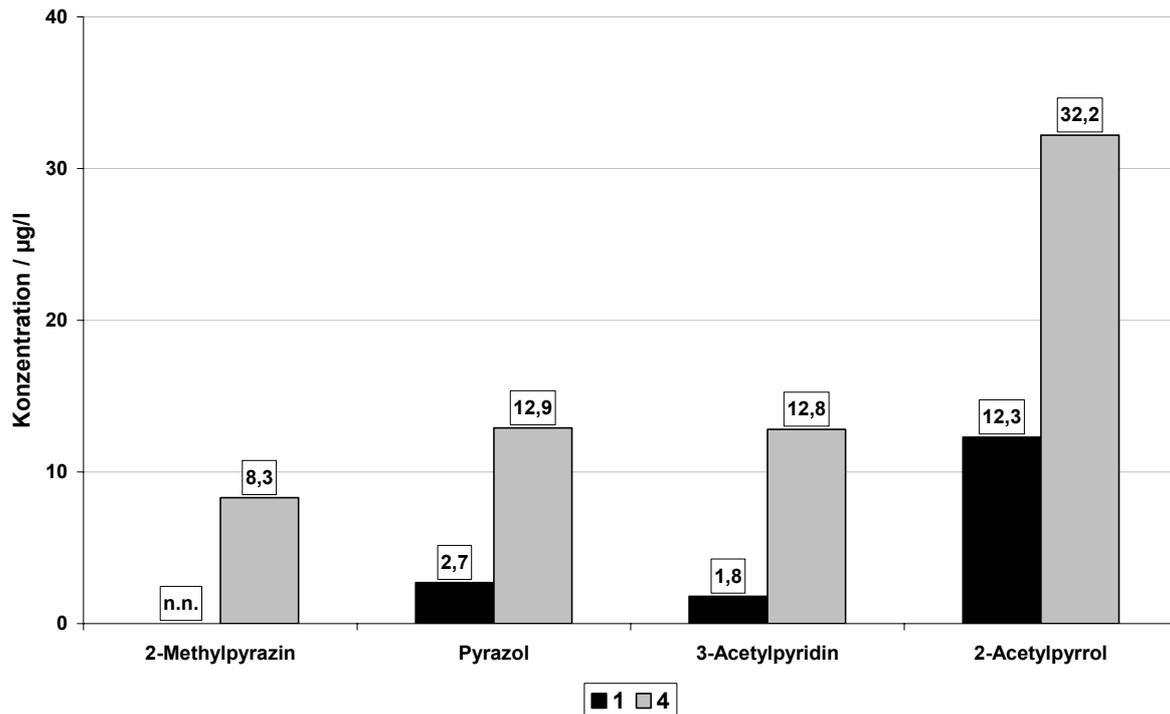


Abbildung 20: Verhalten der N-Heterocyclen in unterschiedlichen Hefebieren<sup>4</sup>

Da eine thermische Nachbildung der N-Heterocyclen für die hohen Gehalte im Hefebier 4 nicht in Frage kommt, ist anzunehmen, dass eine Resorption von aufgenommenen N-Heterocyclen stattfand. Dieser Effekt wurde von BOHAK [209] im Rahmen von Untersuchungen über das Verhalten von N-Heterocyclen während Gärung und Nachgärung beobachtet. Eine weitere Möglichkeit der Zufärbung stellt die Oxidation von phenolischen Verbindungen, vor allem von Flavan-3-ol-Derivaten, dar [210]. Diese Verbindungen wurden während einer verlängerten Aufbewahrungsphase verstärkt resorbiert (cf. Tabelle 22).

Die wichtigsten Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen sind in Tabelle 22 dargestellt.

Tabelle 22: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Hefebiere

Probe	pH-Wert	Farbe / EBC	FAN / mg/100 ml	Gesamtpolyphenole / mg/l	Anthocyanogene / mg/l	proteolytische Aktivität <sup>5</sup>
1	6,1	6,5	13,3	162	77	+
2	5,7	6,0	21,9	175	60	++
3	5,9	6,7	24,9	187	71	+++
4	6,2	9,1	43,7	279	99	++

<sup>4</sup> n.n.: = nicht nachweisbar

<sup>5</sup> qualitative Angabe der proteolytischen Aktivität: + hoch, ++ sehr hoch, +++ extrem hoch

Die gaschromatographischen Analysen bestätigen im Wesentlichen die Ergebnisse der sensorischen Untersuchungen und der Ergebnisse der AEVA. Als Leitsubstanz für die Hefealterung konnte Heptanol-1 identifiziert werden (cf. Abbildung 21).

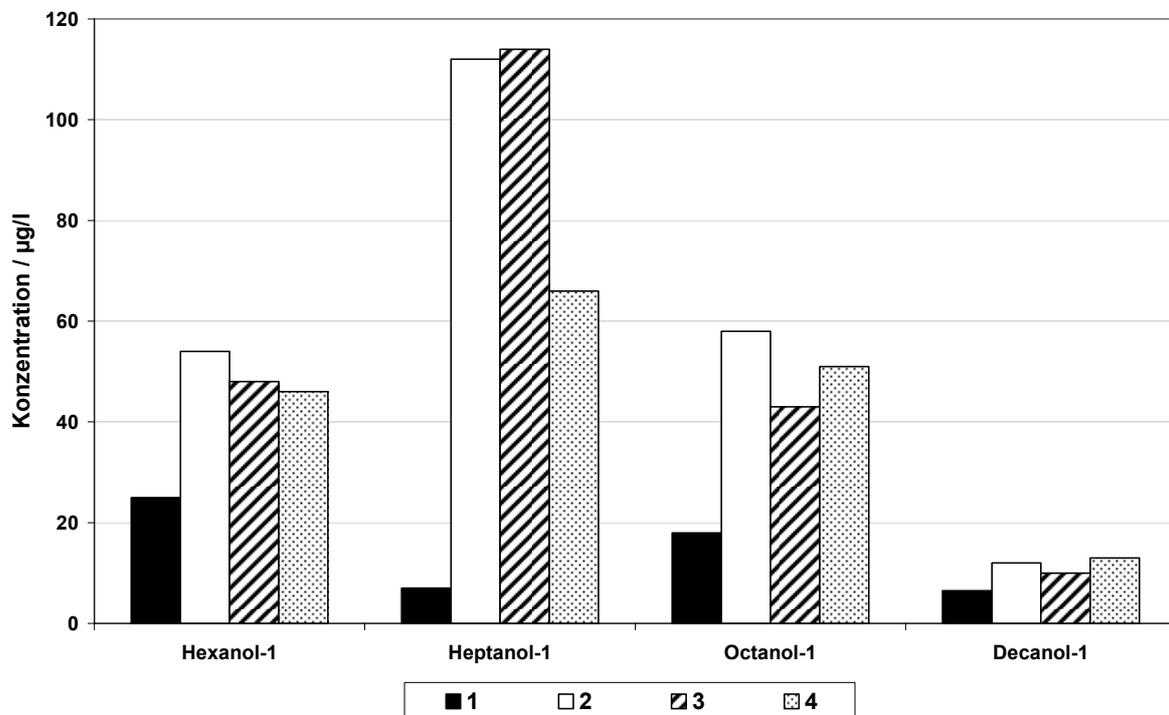


Abbildung 21: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole durch unterschiedliche Behandlung von Überschusshefe

Heptanol-1 verleiht dem Bier in höheren Konzentration einen dumpfen, erdigen, kartoffelartigen Geruch. Der Schwellenwert für Heptanol-1 wird in der Literatur mit 1,0 mg/l angegeben [211], der am Institut ermittelte Schwellenwert lag bei 1,5 mg/l (cf. Tabelle 83). Die leichtflüchtigen Ester nehmen bis auf Essigsäure-Heptylester in ihren Gehalten ab (cf. Tabelle 84). Es wird vermutet, dass das gebildete Heptanol-1 in den korrespondierenden Acetat-Ester umgewandelt wird, da die tendentiellen Änderungen der Konzentrationen dieser beiden Aromastoffe parallel verlaufen. Als weitere Leitsubstanzen für die Hefealterung konnten 3-Methylbuttersäure (Isovaleriansäure) und Decansäure identifiziert werden. Isovaleriansäure verleiht dem Bier in höheren Konzentrationen einen käsigen Geruch, wohingegen Decansäure ein wachsartiges, seifiges und ranziges Aroma verursacht. Die institutsinterne Schwellenwertsbestimmung für Isovaleriansäure lag bei 1,26 mg/l (cf. Tabelle 85) (Literatur: 1,50 mg/l [211]). Für Decansäure wurde keine Schwellenwertbestimmung durchgeführt. Der in der Literatur angegebene Wert liegt bei 10 mg/l [211].

Um eine Aussage über die Qualität der Hefebiere anhand einiger ausgewählter Bierinhaltsstoffe zu machen, wurde der sog. Autolyse-Index eingeführt. Der Autolyse-Index beinhaltet die Aromastoffe Heptanol-1, Essigsäure-Heptylester, Isovaleriansäure und Decansäure. Die Aromastoffe werden zunächst normiert und gewichtet, ähnlich der Gewichtung der Geschmackseindrücke bei der DLG-Verkostung. Die Berechnung des Autolyse-Index erfolgt nach Gleichung 5.1.

$$AI[\%] = \frac{0,05 \cdot \text{Heptanol} + 4 \cdot \text{Isovaleriansäure} + 3 \cdot \text{Decansäure} + 0,125 \cdot \text{Heptylacetat}}{20} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

In Abbildung 22 wurde der Autolyse-Index über die Hefevitalität aufgetragen, wodurch eine Einteilung der Qualität möglich wurde. Der Korrelationskoeffizient dabei lag bei  $r=0,85$  ( $N=22$ ). Danach würde ein Autolyse-Index von 60 % einem ICP-Wert von 5,90 entsprechen. Unterhalb dieses Wertes wird der physiologische Zustand der Hefepopulation als kritisch beurteilt [180].

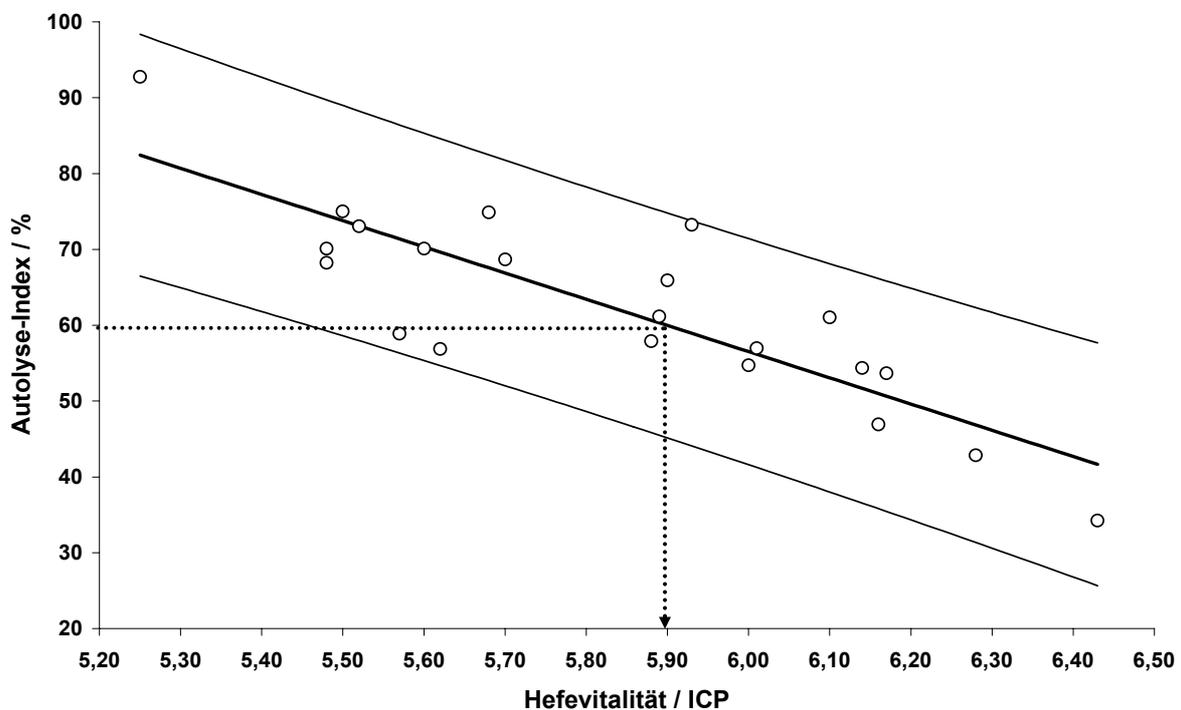


Abbildung 22: Autolyse-Index für Hefebiere über der Hefevitalität

### 5.1.4 Sensorische Analysen

Ausgehend von den Ergebnissen der AEVA wurde ein spezifisches Verkostungsschema für Hefebiere entwickelt (*cf.* Abbildung 141). Tabelle 23 zeigt die Zuordnung der Attribute zu den ausgewählten Aroma- bzw. Geschmackstoffen.

*Tabelle 23: Zuordnung der Attribute zu den Aroma- bzw. Geschmackstoffen.*

<b><u>Aromaattribut</u></b>	<b><u>chemische Verbindung</u></b>
▪ Grüner Apfel / stechend	Acetaldehyd
▪ Käsig / schweissig	2-/3-Methylbuttersäure
▪ Fruchtig / blumig	2-Phenylethanol / Linalool
▪ Süßlich / malzig	3-Methylbutanol
▪ Fruchtig / Eisbonbon	Ethylhexanoat / Isoamylacetat
▪ Säuerlich	Buttersäure
▪ Alkoholisch	Ethanol
▪ Lösungsmittelartig	Ethylacetat
▪ Erdig / kartoffelartig	Heptanol-1
▪ Bitter	Hopfenextrakt / Purine

Die Anwendung der Profilprüfung für Hefebiere zeigte, dass durch eine unsachgemäße Lagerung (lange Aufbewahrung bei hohen Temperaturen) die angenehmen Aromaeindrücke zurückgedrängt wurden, zu Gunsten der unangenehmen, säuerlichen, lösungsmittelartigen und erdigen Aromen. Zudem wird auch die Intensität, nicht aber die Qualität der Bittere, deutlich erhöht (*cf.* Abbildung 23). Diese Bittere wurde als breit, nachhängend beschrieben. Ursächlich dafür könnten Purin-Derivate sein, die in früheren Arbeiten bereits als negative Geschmacksträger im Bier im Bereich der Qualität der Bittere identifiziert wurden [159].

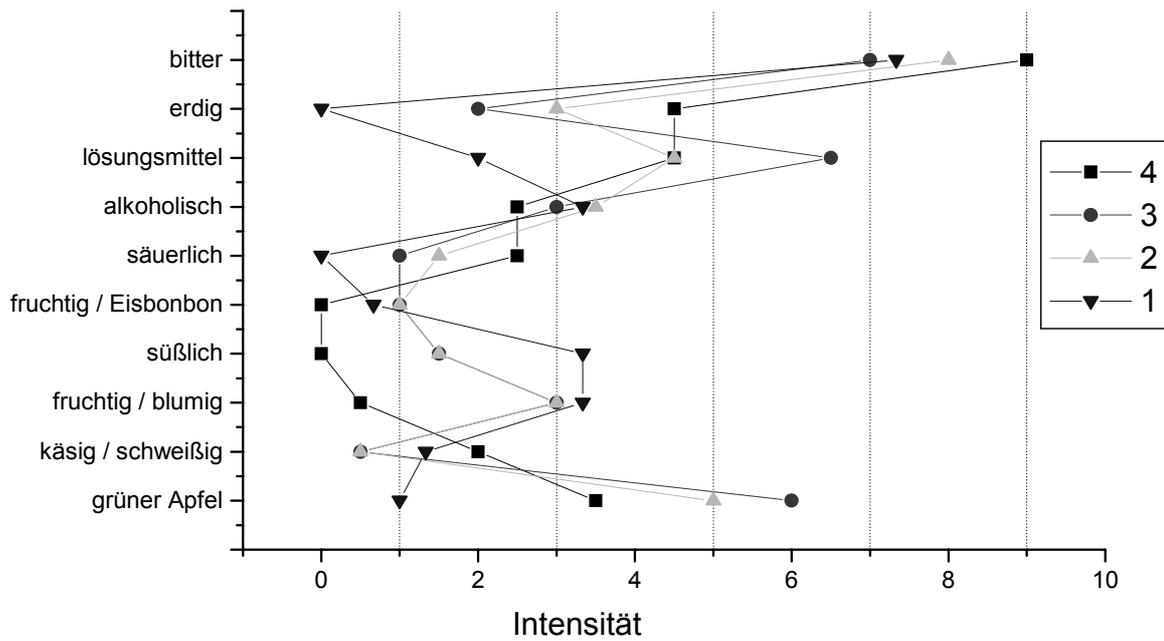


Abbildung 23: Produktkennlinie für Hefebiere, die aus unterschiedlich behandelten Hefen gewonnen wurden

Im Rahmen der Untersuchungen wurden deshalb die Gehalte verschiedener Purin-Derivate bestimmt. Um einen Bezug zu Gehalten in normalen Bieren herzustellen, wurden die Gehalte im Hefebier mit durchschnittlichen Gehalten in einem hellen, untergärigen Vollbier verglichen. Abbildung 24 zeigt die Konzentrationen der einzelnen Purin-Derivate. Deutlich wurden vor allem die Anstiege der Gehalte von Hypoxanthin, Xanthin und etwas abgeschwächt von Adenosin.

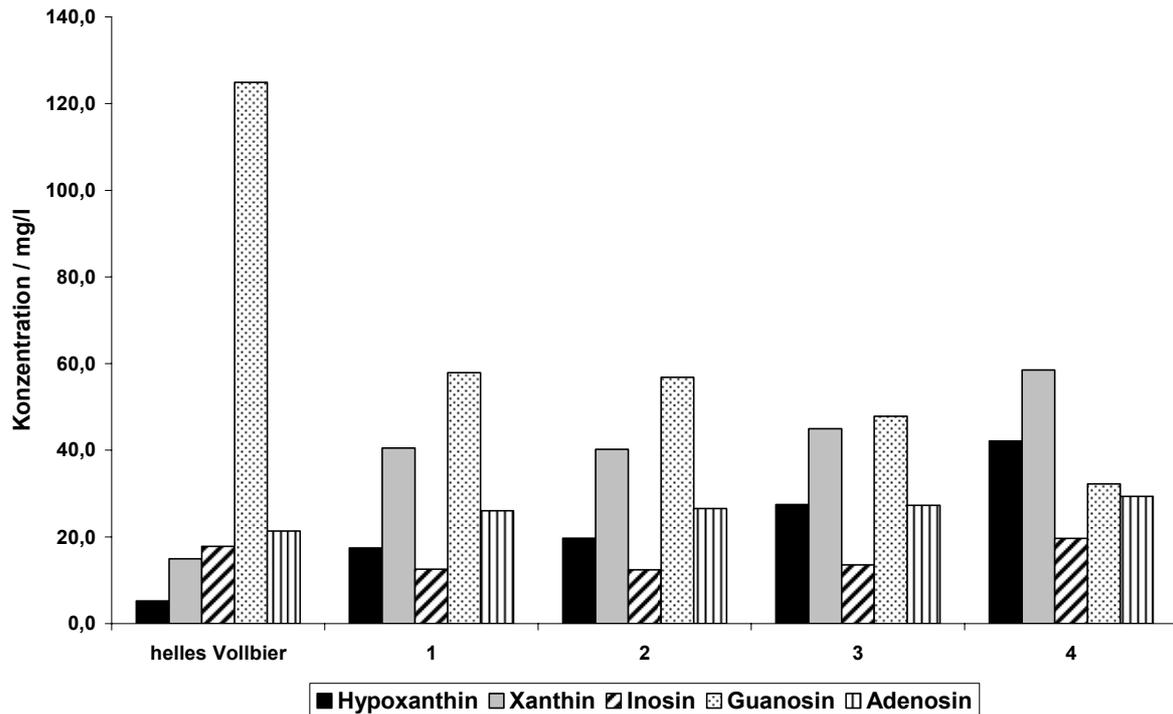


Abbildung 24: Verhalten einiger ausgewählter Purin-Derivate in verschiedenen Hefebieren (1, 2, 3, 4) im Vergleich zu einem hellen, untergärigen Vollbier

### 5.1.5 Statistische Auswertung der Ergebnisse der Hefealterung

Um die Vielzahl der Ergebnisse, die im Rahmen der Untersuchungen zur Hefealterung erhalten wurden, zu veranschaulichen, wurde eine multivariate Auswertung auf Basis der Faktorenanalyse vorgenommen. Betrachtet wurden dabei sowohl Aromastoffe als auch sensorische Eindrücke der verkosteten Biere. Abbildung 25 zeigt graphisch die beiden ersten Hauptkomponenten der durchgeführten Faktorenanalyse. Die ersten beiden Hauptkomponenten erklären ca. 95 % der Gesamtvarianz. Die kompletten Analysendaten sind im Anhang abgedruckt (cf. Tabelle 25).

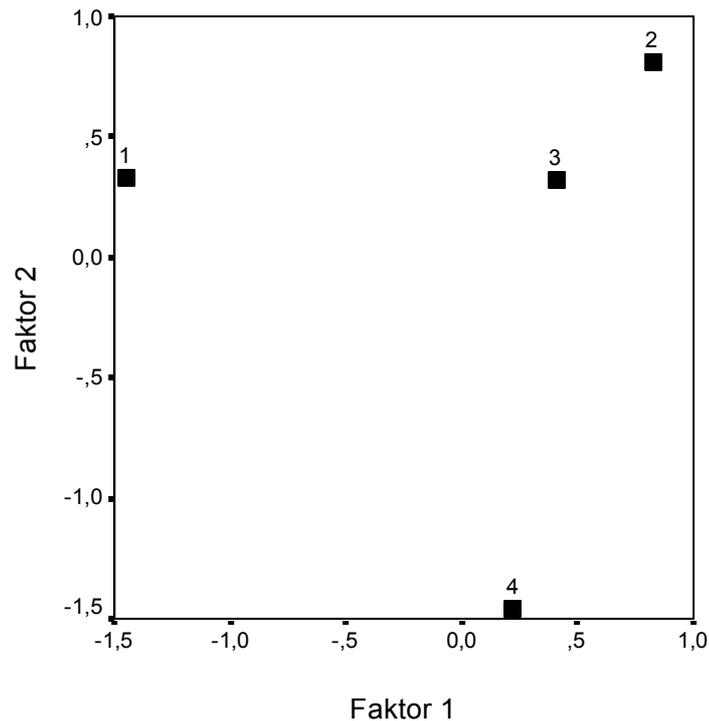


Abbildung 25: Hauptkomponentenanalyse der Aromastoffe und der sensorischen Eindrücke

Wie aus Abbildung 25 zu ersehen ist, unterscheiden sich Bier 2 und 3 im Wesentlichen durch Faktor 1, wobei die Punkte für die Proben 2 und 3 sehr eng zusammenliegen. Dies bedeutet, dass die analytischen Daten dieser beiden Biere sehr ähnlich sind. Bier 4 hingegen unterscheidet sich von Bier 1 zusätzlich durch Faktor 2. Durch die Auftragung der zu den jeweiligen Faktoren gehörenden Korrelationskoeffizienten konnten drei Hauptbereiche für die untersuchten Einflussgrößen festgestellt werden (cf. Abbildung 26). Im Bereich 1 waren vor allem blumige, fruchtige Aromaeindrücke. Ergänzt wurden diese Aromaeindrücke durch die analytisch bestimmten Gehalte an Estern bzw. Hopfenölen. Bereich 2 wurde gekennzeichnet durch erdige, lösungsmittelartige Aromaeindrücke und einer Vielzahl an höheren aliphatischen Alkoholen. Im Bereich 3 hingegen dominierten käsige Aromen und kurz- und mittelkettige Fettsäuren. Durch diese Aufteilung wurde insgesamt deutlich, dass insbesondere die Gehalte an höheren aliphatischen Alkoholen für eine horizontale Trennung der Biere 1,2 und 3 ursächlich waren. Für die vertikale Trennung von Bier 4 war neben erhöhten Gehalten an Isovaleriansäure und Decansäure auch der damit sehr gut korrelierende Aromaeindrücke „käsige“ verantwortlich.

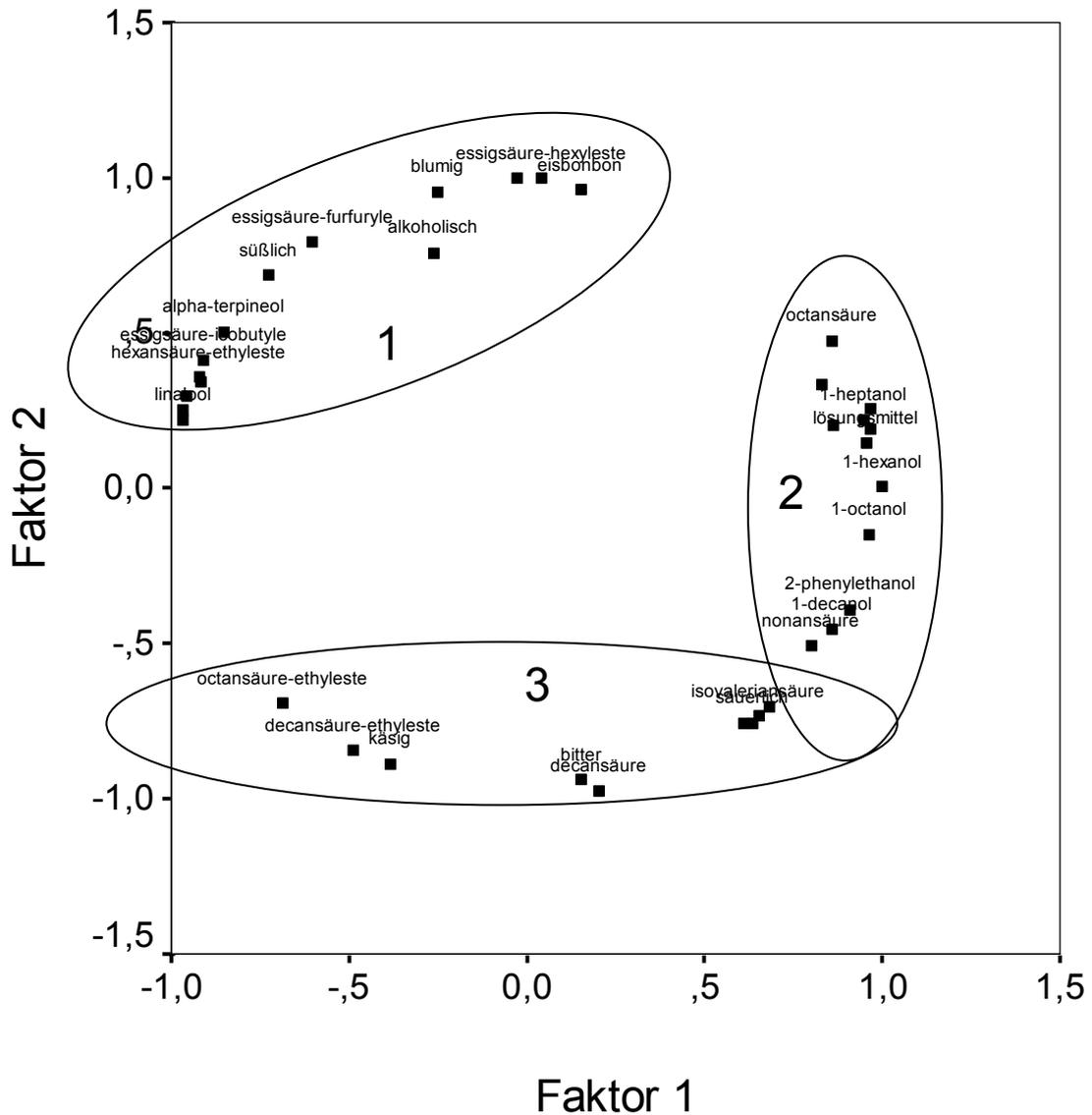


Abbildung 26: *Component Plot* der Faktoren 1 und 2

### 5.1.6 Schlussfolgerungen

Wie aus den Versuchen hervorgeht, wird die Qualität des wiedergewinnbaren Hefebieres durch unsachgemäße Aufbewahrung vor der Verarbeitung entscheidend verschlechtert. Vor allem die höheren aliphatischen Alkohole, die kurz- und mittelkettigen Fettsäuren und die Aktivität der schaumnegativen Proteinase A werden dadurch stark erhöht. Im Gegensatz dazu verschwinden die angenehmen Esteraromen fast gänzlich. Lediglich Ethylacetat (lösungsmittelartiges Aroma) wird vermutlich aus Acetaldehyd gebildet und nimmt in seiner Konzentration sehr stark zu.

Aus diesen Versuchen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen, die für die Aufbereitung der Hefesuspensionen und die anschließende Dosage des gewonnenen Hefebieres zu berücksichtigen sind:

- Möglichst rasche Verarbeitung der Hefesuspensionen
- Aufbewahrung bei Temperaturen < 4 °C
- Kurzzeiterhitzung des Hefebieres vor allem zur Inaktivierung der Proteinase A

## 5.2 Einfluss der Dosage unterschiedlicher Hefebiere auf die Qualität der resultierenden fertigen Biere

Für die nachfolgenden Betrachtungen wurden die in Tabelle 24 aufgeführten Probenbezeichnungen verwendet.

Tabelle 24: Verwendete Probenbezeichnung Kapitel 5.2

Probe	Bezeichnung
A	Vergleich
B	Vergleich + 10 % (v/v) Hefebier (Hefe zuvor 10d bei 0 °C gelagert)
C	Vergleich + 10 % (v/v) Hefebier (Hefe zuvor 10d bei 4 °C gelagert)
D	Vergleich + 10 % (v/v) Hefebier (Hefe zuvor 10d bei 10 °C gelagert)

Die Hefebiere wurden zum Zeitpunkt des Anstellens in den Gärtank vorgelegt und mit der belüfteten Würze vermischt. Die Würze wurde in der Staatsbrauerei Weihenstephan als untergärige Vollbierwürze eingebracht. Die zum Anstellen verwendete Hefe wurde am Tag zuvor mittels Propagationstechnik hergeführt (Hefevitalität nach ICP: 6,43). Die Gär-, Reifungs- und Abfüllbedingungen wurden folgendermaßen eingestellt:

- Hefestamm: W 34/70; Anstellzellzahl:  $15 \times 10^6$  Zellen/ml, Belüftung: 8 mg O<sub>2</sub>/l
- Gärtemperatur: 10 °C isotherm; Temperaturregelung über Simatic S7-300
- Schlauchen bei E<sub>s</sub>=3,5 %
- forcierte Reifung bei T=16 °C für 4 Tage (Diacetylrast!)
- Kaltreifung bei T=0 °C für 2 Wochen; Spundung auf 1 bar Ü
- Filtration über Tiefenfilterschichten (Seitz-KS 150, Fa. Seitz-Schenk)
- Abfüllung isobarometrisch nach dreifacher Vorevakuierung und Spülens mit CO<sub>2</sub>

### 5.2.1 Qualität der Hefebiere

Die Qualität der verwendeten Hefebiere wurde in Kapitel 5.1 beschrieben.

### 5.2.2 Gärverlauf

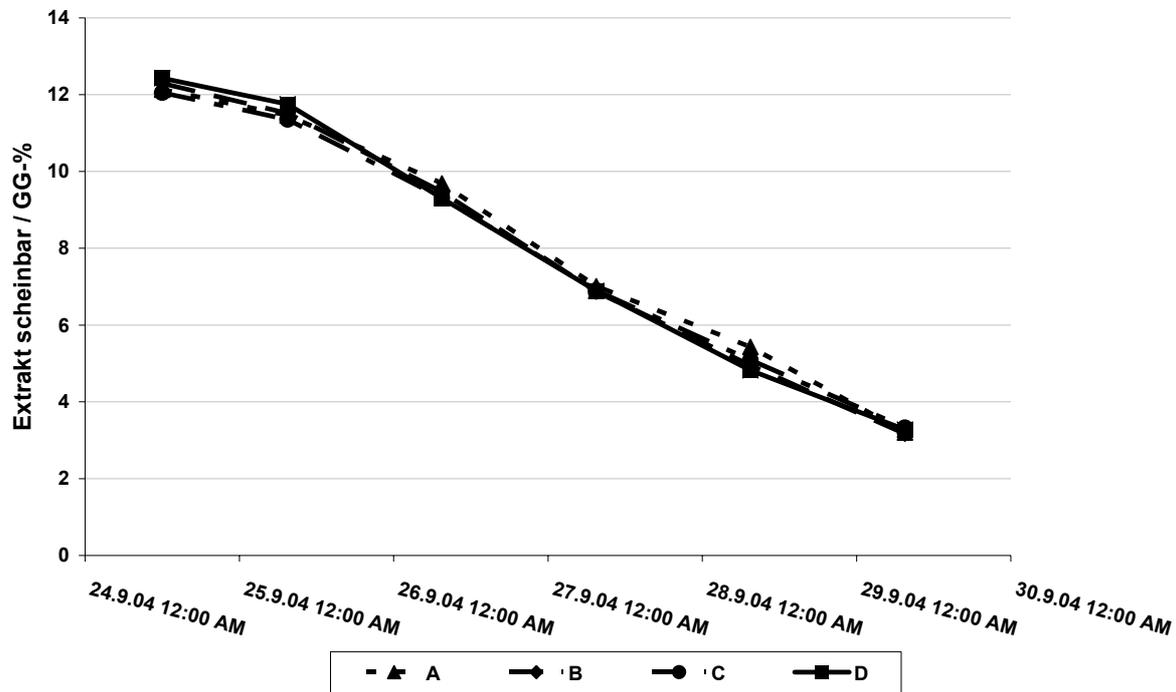


Abbildung 27: Gärdiagramme der Biere A–D

Die Gärverläufe zeigen keinerlei Unterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeit des Extraktabbaus. Aufgrund einer durch das Hefebier D eingebrachten erhöhten Fracht an freiem Aminostickstoff war ein schnellerer Extraktabbau bei Würze D vermutet worden. In der Literatur wird über die schädigende Wirkung erhöhter Konzentrationen an Decansäure auf die Viabilität der Hefezellen berichtet [55], so dass sogar eine Gärzeitverlängerung möglich gewesen wäre. Beides wurde jedoch nicht beobachtet, so dass davon auszugehen ist, dass sich die positiven und negativen Einflussfaktoren gegenseitig kompensieren.

### 5.2.3 Analytische Untersuchungen

Die fertigen Biere wurden einer Reihe von Untersuchungen unterzogen. Für die Bewertung der Alterungsstabilität wurden die Biere einen Tag geschüttelt und anschließend bei 40 °C für vier Tage forciert gealtert.

### 5.2.3.1 Chemisch-technische Untersuchungen

Die fertigen Biere zeigten keinerlei Unterschiede hinsichtlich ihrer Alkohol- und Stammwürzegehalte. Bedingt durch eine erhöhte Aktivität der schaumnegativen Proteinase A wurden allerdings deutliche Differenzen im Bereich der Schaumhaltbarkeit festgestellt. Abbildung 28 zeigt die gemessenen Schaumwerte.

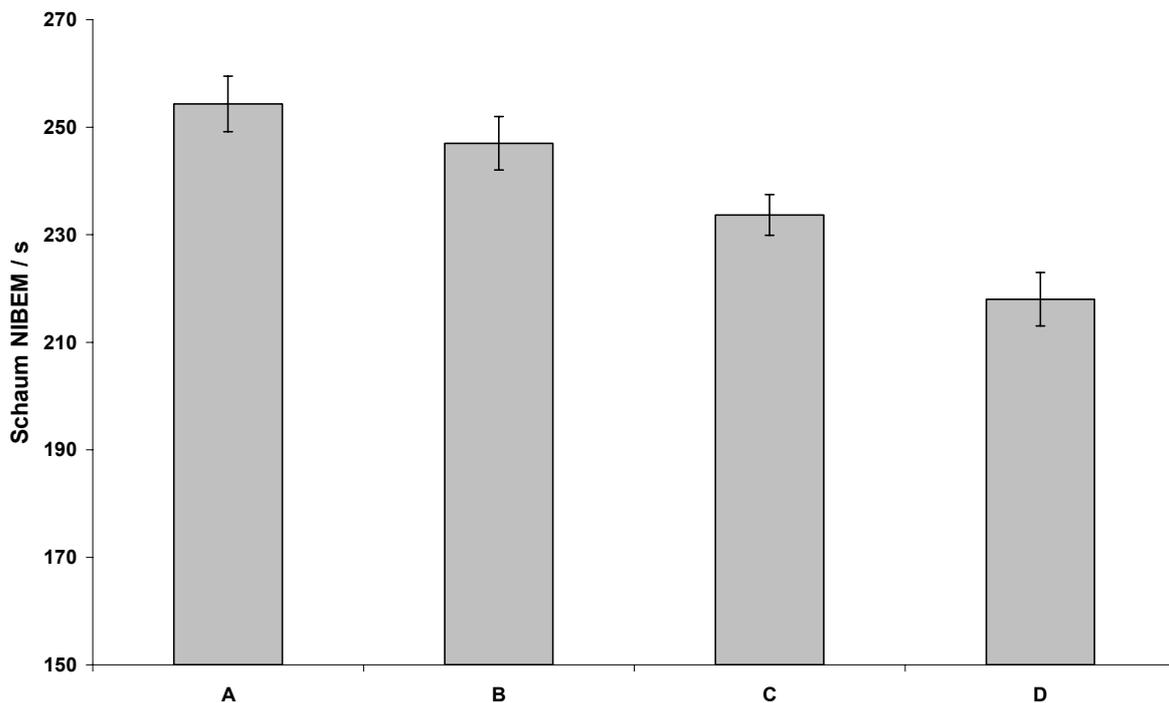


Abbildung 28: Schaumwerte der Biere A–D (KI auf  $p=0.95$ )

Die oben erwähnten erhöhten Frachten an freiem Aminostickstoff wurden von der Hefe nicht vollständig verbraucht, so dass im fertigen Bier ein tendentieller Anstieg an FAN von Bier A nach Bier D festzustellen war.

Im Bereich der antioxidativen Eigenschaften der fertigen Biere wurden wiederum keine nennenswerten Unterschiede erkannt. Abbildung 29 zeigt die ermittelten Werte für die Bestimmung des Stabilitäts-Index.

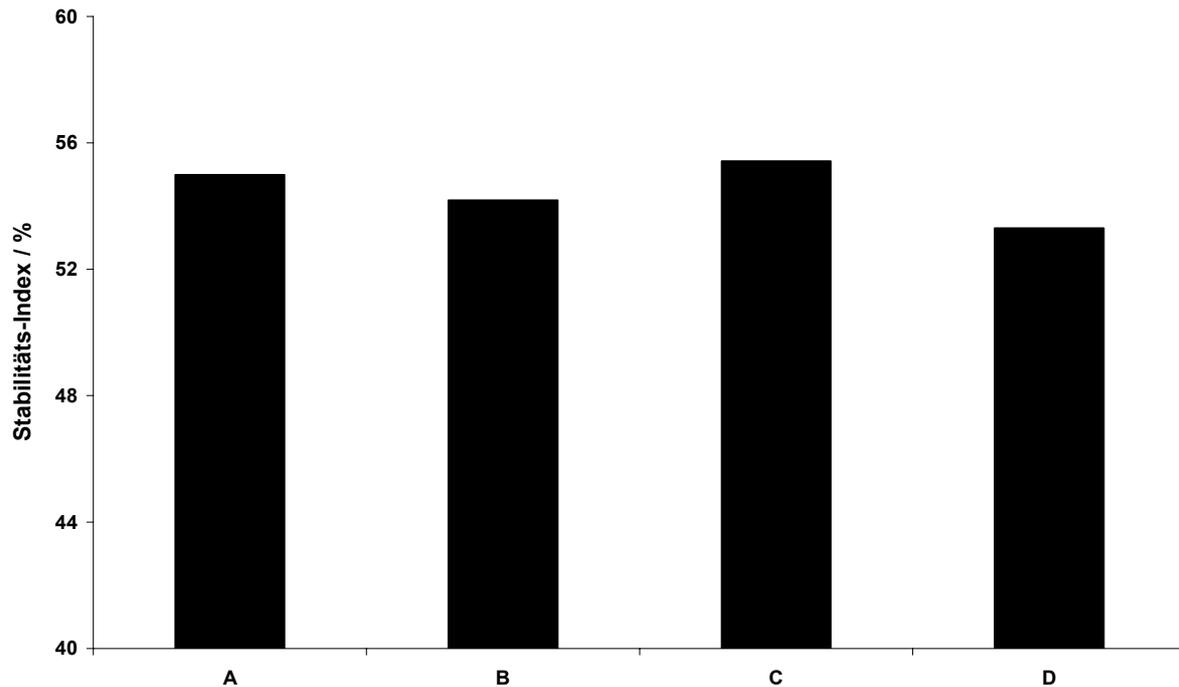


Abbildung 29: Stabilitäts-Index der Biere A–D

Die vollständigen Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen sind im Anhang in Tabelle 87 zu finden.

### 5.2.3.2 Chromatographische Untersuchungen

Die gaschromatographischen Untersuchungen der Bieraromastoffe zeigten, dass einerseits zwar die erhöhten Gehalte an kurz- und mittelkettigen Fettsäuren der eingebrachten Hefebiere durch die Gärung ausgeglichen wurden, andererseits aber vor allem die Gehalte an aromaaktiven Estern in den Verschnittbieren zum Teil deutlich vermindert waren (*cf.* Abbildung 30, Abbildung 31). Die Verringerung der Estergehalte könnte durch eine Aktivität einer extrazellulären Esterase verursacht worden sein, der analytische Nachweis dieses Enzyms war zu dem Zeitpunkt der Versuchsdurchführung jedoch noch nicht möglich. Bei späteren Untersuchungen konnten allerdings eindeutig die Existenz dieser Aktivität und die damit verbundenen niedrigeren Estergehalte nachgewiesen werden (*cf.* Kapitel 5.5). Die vollständigen Ergebnisse der Bieraromastoffe sind im Anhang in Tabelle 88 abgedruckt.

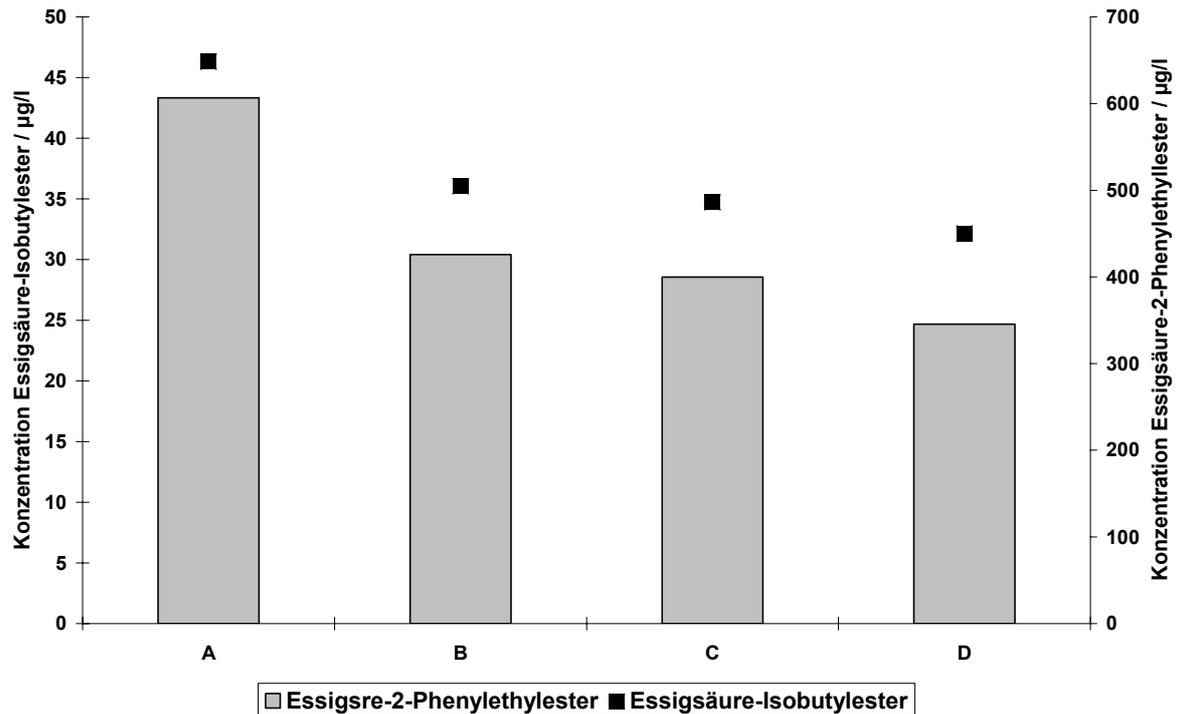


Abbildung 30: Verhalten ausgewählter Ester in den Bieren A–D

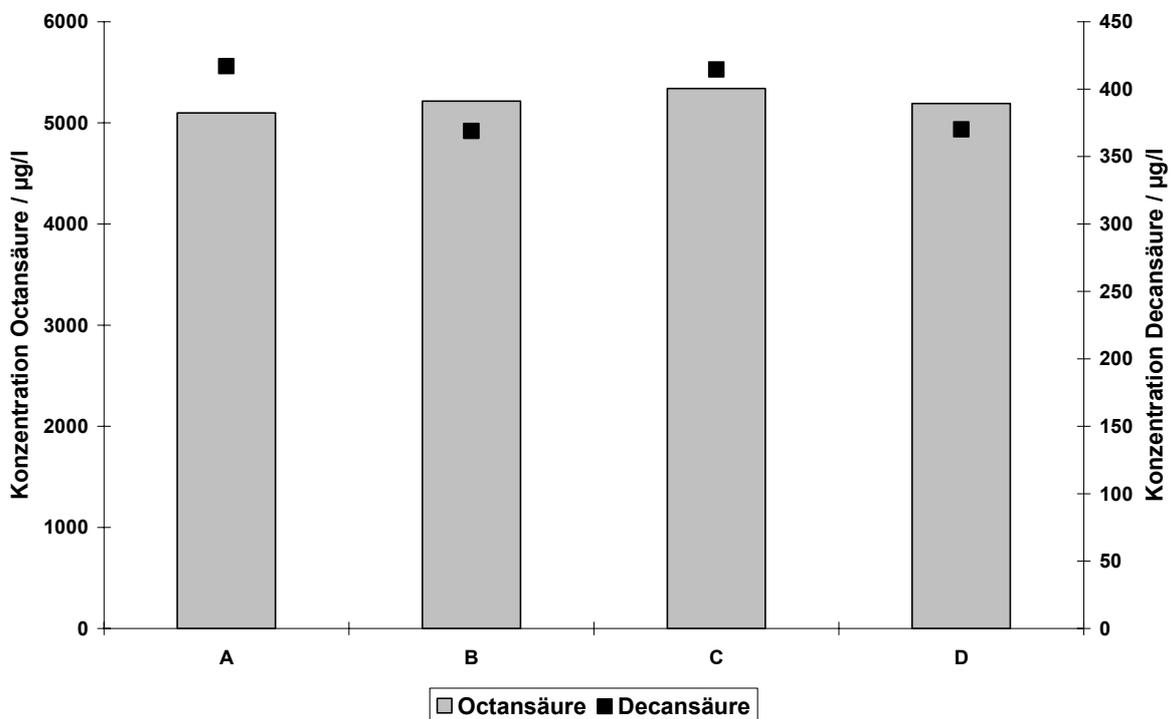


Abbildung 31: Verhalten ausgewählter Fettsäuren in den Bieren A–D

Im Bereich der Alterungsindikatoren waren im frischen Bier keine Unterschiede auszumachen. Deutliche Unterschiede konnten dagegen in den forciert gealterten Bieren festgestellt werden, insbesondere beim thermischen Indikator 2-Furfural. Hier

wurden für die Verschnittbiere (Bier B–C) deutlich geringere Werte als für das Vergleichsbier (Bier A) gemessen, wodurch sich insgesamt wesentlich bessere Werte für die Summe der Alterungskomponenten ergaben (*cf.* Abbildung 32).

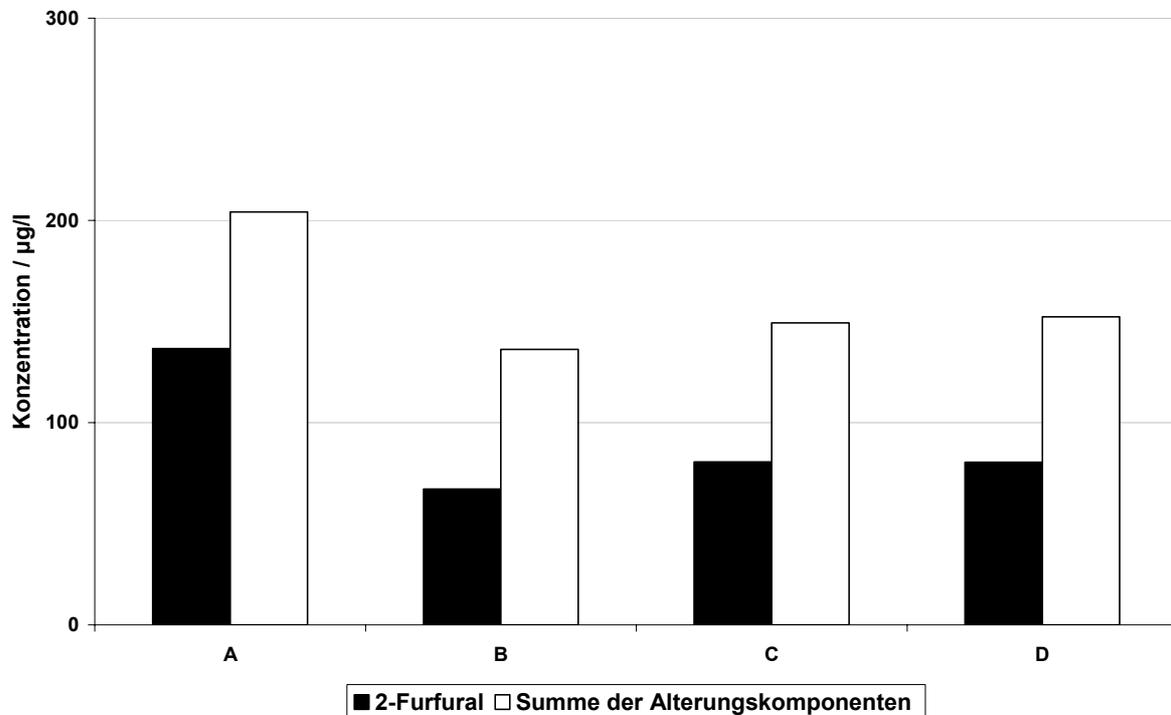


Abbildung 32: Verhalten der Alterungskomponenten im forciert gealterten Zustand (Bier A–D)

Die vollständigen Ergebnisse der Alterungsindikatoren sind im Anhang unter Tabelle 89 und Tabelle 90 zu finden.

### 5.2.3.3 Sensorische Untersuchungen

Im Rahmen der sensorischen Untersuchungen wurde festgestellt, dass Bier D im frischen Zustand deutlich abfiel. Dieses Bier wurde sowohl bei der orthonasalen als auch bei der retronasalen Verkostung mit käsig, lösungsmittelartig beschrieben. Die Biere B und C unterschieden sich dagegen im Aroma und Trunk nicht vom Vergleichsbier, schnitten jedoch bei der Beurteilung der Vollmundigkeit schlechter ab. Durch eine varianzanalytische Betrachtung wurde die Abgrenzung von Bier D von den Bieren A–C bestätigt (*cf.* Anhang Tabelle 91). Die Bittere wurde bei allen

Verschnittbieren, besonders jedoch bei Bier D, als sehr hart und breit empfunden (cf. Abbildung 33).

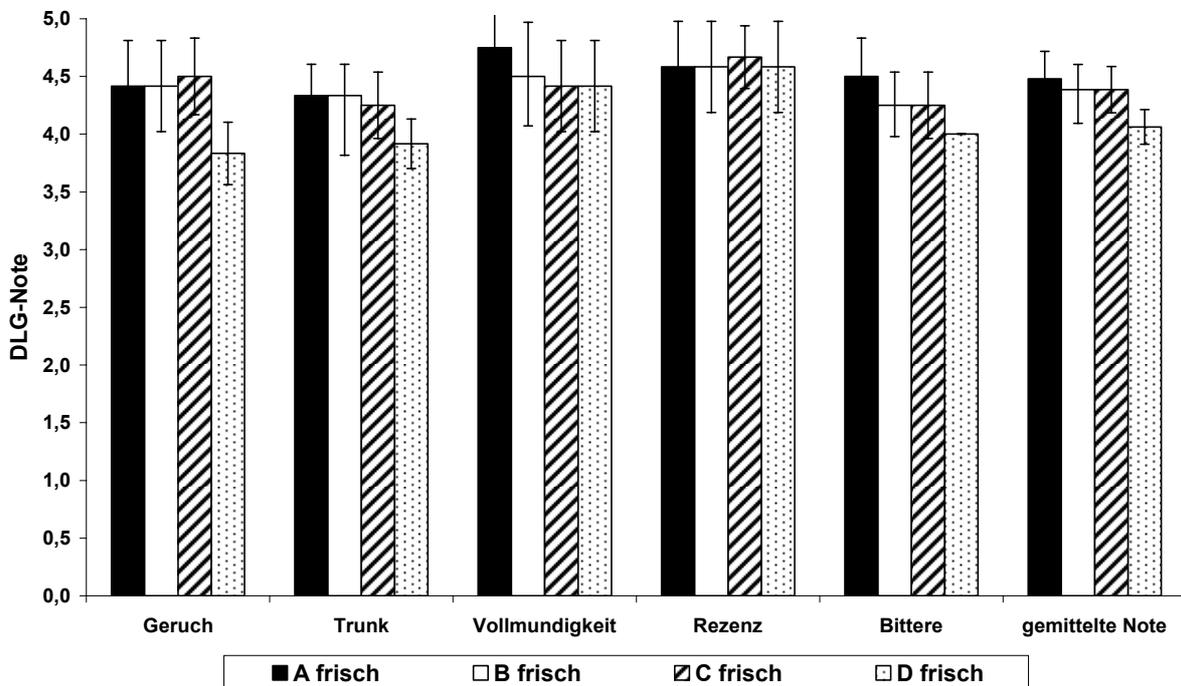


Abbildung 33: sensorische Beurteilung der frischen Biere A–D (KI auf  $p=0.95$ )

Bei der Alterungsverkostung wurden die Biere B–D trotz besserer analytischer Noten deutlich schlechter bewertet, als das entsprechende Vergleichsbier A (cf. Abbildung 34). Dies konnte auch durch eine varianzanalytische Betrachtung der gemittelten Alterungsnote bestätigt werden (cf. Anhang Tabelle 92). Auch die Alterungsakzeptanz fiel dabei auf Werte von unter 50 %, d.h. mindestens jeder zweite Verkoster würde dieses Bier ablehnen.

Tabelle 25: Beurteilung der Alterungsakzeptanz nach Eichhorn

	Bier A	Bier B	Bier C	Bier D
Akzeptanz / %	62	48	42	45

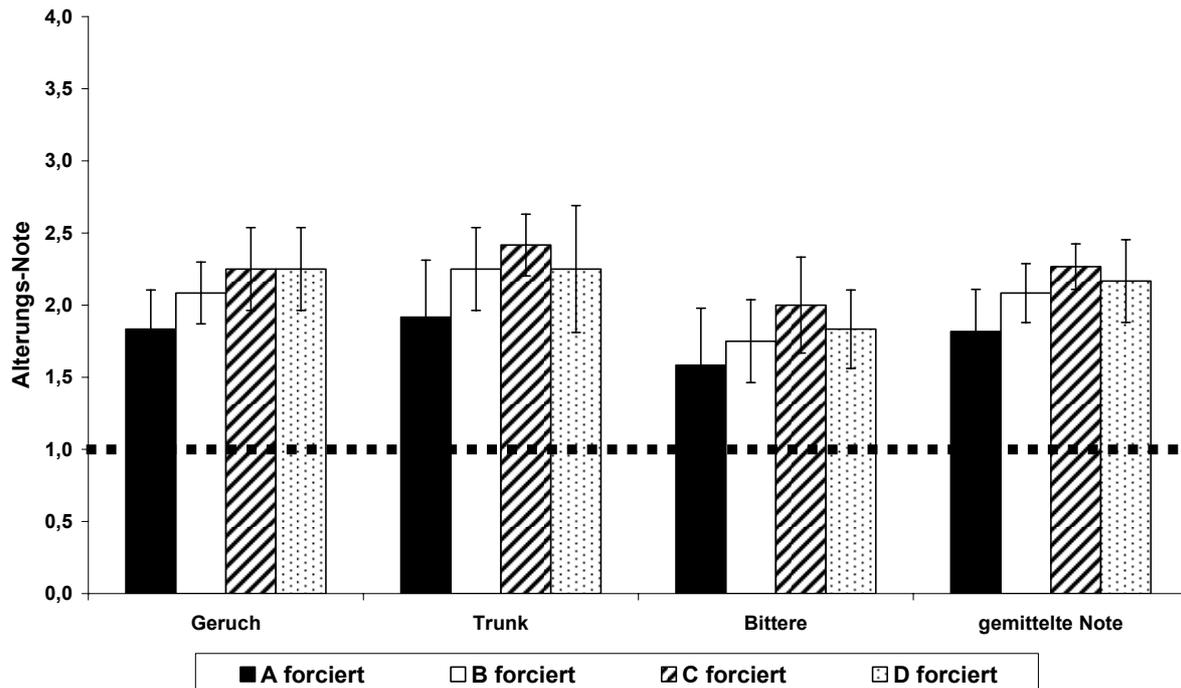


Abbildung 34: sensorische Beurteilung der forciert gealterten Biere A–D nach Eichhorn (KI auf  $p=0.95$ )<sup>6</sup>

#### 5.2.3.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass insgesamt eine deutliche Beeinträchtigung der Biere durch den Verschnitt von qualitativ mangelhaften Hefebieren erfolgen kann. Vor allem im sensorischen Bereich (Schaum und Verkostung) wurden erkennbare Verschlechterungen festgestellt. Beim Einsatz von Hefebier sollte auf jeden Fall eine Aktivität der schaumnegativen Proteinase A durch eine thermische Behandlung ausgeschlossen werden. Interessant war die Beobachtung, dass die Verschnittbiere durch eine forcierte Alterung nur eine mäßige Beeinträchtigung erlitten. Dies spiegelte sich in niedrigeren Konzentrationen der messbaren Alterungsindikatoren wider. Sehr anschaulich zeigte sich dabei, dass teilweise eine starke Diskrepanz zwischen analytisch gemessener und sensorisch wahrgenommener Alterungsstabilität bestehen kann. So waren zwar die antioxidativen Eckwerte sowie die Alterungsindikatoren nicht unterscheidbar bzw. günstiger für die Biere B–D, die sensorische Bevorzugung lag jedoch eindeutig bei Vergleichsbier A. Eine wichtige Bedeutung in diesem Zusammenhang scheint den maskierenden Eigenschaften der

<sup>6</sup> gestrichelte Linie = Beurteilung der frischen Biere nach Eichhorn

aromaaktiven Estern zuzukommen, deren Niveau durch den Verschnitt von Hefebieren deutlich gesenkt wurde. Mit dem Verlust dieser maskierenden Aromakomponenten traten, auch wenn analytisch in geringerer Konzentration, die unerwünschten Alterungsaromen stärker in den Vordergrund, wodurch insgesamt die Attraktivität der Biere verloren ging.

### **5.3 Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Trenntechniken auf Hefebeschaffenheit und Hefebierqualität**

Ein Forschungsschwerpunkt lag auf der Untersuchung der Abhängigkeit zwischen der sich auf dem Markt befindlichen Trenntechniken und der Qualität der damit wiedergewinnbaren Hefebiere. Dazu wurden die gängigsten Techniken im Bereich der Sedimentation (natürliche Sedimentation, Sedimentation im Zentrifugalfeld) und der Filtration (Membranfiltration) untersucht.

#### **5.3.1 Natürliche Sedimentation**

Der Sedimentationstank wurde zu Beginn einer Woche (Zeitpunkt der ersten Hefeernte) angefüllt und bis Ende der Woche aufgefüllt. Nach dem Befüllen begann der eigentliche Sedimentationsvorgang übers Wochenende. Zu Beginn der neuen Woche wurde über einen im Tank installierten Schwimmer der Überstand (=Hefebier) abgezogen. Die Hefesuspension wurde auf eine Temperatur von 5 °C durch eine Konus- und Zargenkühlung gekühlt. Das Hefebier zum Zeitpunkt „Tank voll“ wurde vor Ort durch Filtration der Hefesuspension über einen Faltenfilter gewonnen.

Folgende Probenbezeichnung wurde verwendet:

*Tabelle 26: Probenbezeichnung für die Sedimentationsversuche*

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>
Tank voll	Zeitpunkt der letzten Befüllung des Sedimentationstanks
Ende Sedimentation	Zeitpunkt der Hefebiergewinnung

##### **5.3.1.1 Hefephysiologie**

Während der Sedimentationsphase trat eine geringfügige Verschlechterung des physiologischen Zustands der Hefepopulation ein. So nahmen sowohl die Hefevitalität als auch die Hefeviabilität ab (cf. Abbildung 35).

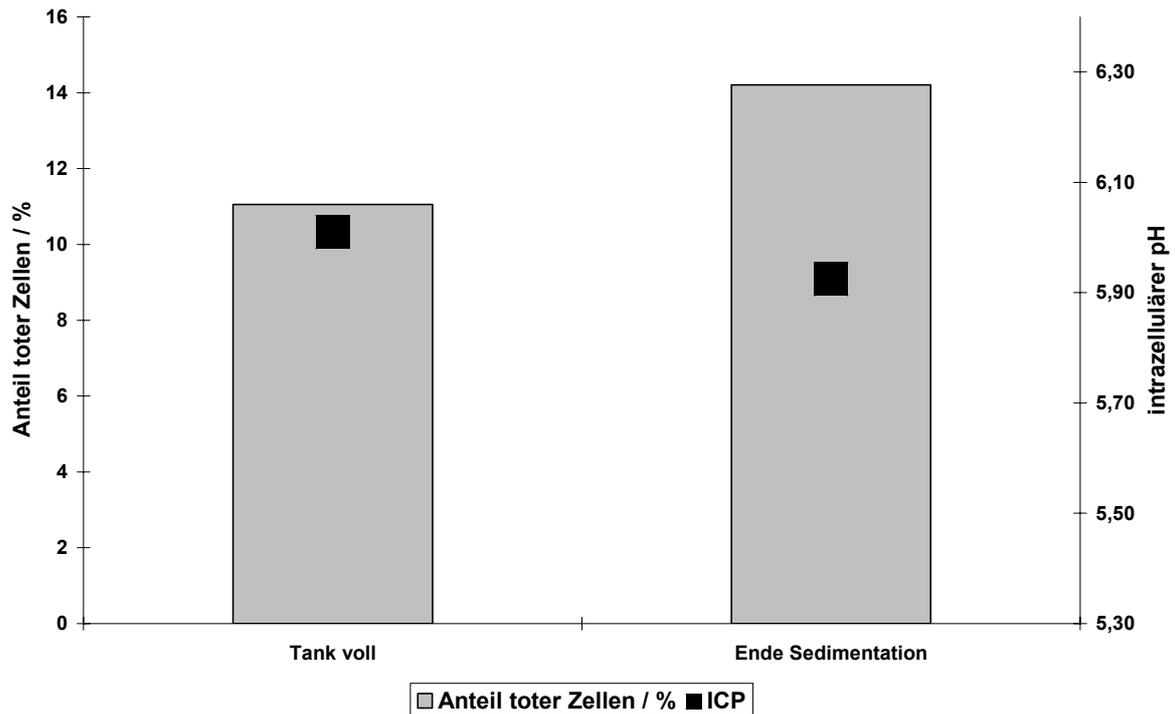


Abbildung 35: Verhalten des physiologischen Zustand der Hefepopulation während der Sedimentationsphase

Ein weiterer wichtiger Parameter war in diesem Zusammenhang die Bestimmung der proteolytischen Aktivität. Hier konnte eine deutliche Beeinträchtigung festgestellt werden, die Aktivität wurde ungefähr um den Faktor 10 erhöht.

Tabelle 27: Verhalten der proteolytischen Aktivität während der Sedimentationsphase

Probe	proteolytische Aktivität / U/ml
Tank voll	0,0043
Ende Sedimentation	0,0470

Dieser Wert ist insofern als kritisch anzusehen, als dass durch die relativ lange Sedimentationsphase in Kombination mit der erhöhten Temperatur schaumpositive Proteine degradiert werden könnten. Die Temperatur wurde zwar auf 5 °C geregelt, dies galt allerdings nur für die Randbereiche, wohingegen im Kernbereich deutlich höhere Temperaturen erreicht werden könnten.

**5.3.1.2 Verhalten von Inhaltsstoffen im Hefebier**

Größere Unterschiede bei den chemisch-technischen Untersuchungen wurden vor allem im Bereich der Alkoholgehalte und des pH-Wertes festgestellt. Tabelle 28 zeigt die wichtigsten chemisch-technischen Ergebnisse.

*Tabelle 28: Verhalten ausgewählter chemisch-technischer Untersuchungsparameter*

Probe	Alkoholgehalt / Vol.-%	pH-Wert	FAN / mg/100ml
Tank voll	5,87	5,00	14,3
Ende Sedimentation	6,57	5,80	15,0

Durch die gaschromatographischen Untersuchungen wurden die erwarteten Tendenzen bestätigt. So nahmen die Gehalte an höheren aliphatischen Alkoholen und kurz- und mittelkettigen Fettsäuren zu, wohingegen die Gehalte der aromaaktiven Ester teilweise deutlich reduziert wurden (cf. Abbildung 36).

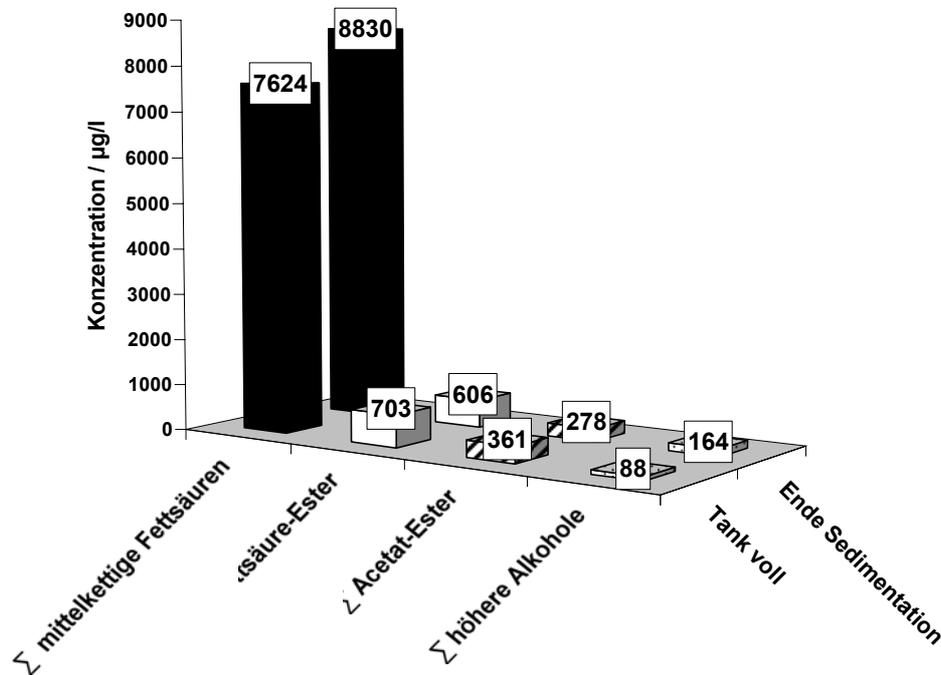


Abbildung 36: Verhalten ausgewählter Bieraromastoffe während der Sedimentationsphase

Der einzige Ester, der vermehrt gebildet wurde, war Ethylacetat. Dies ist mit einer verstärkten Bildung von Ethanol zu erklären, wobei der Ester über Ethanol und Acetyl-CoA gebildet wird. Im Gegenzug dazu wurde das Acetaldehyd über die Sedimentationsphase in seinem Gehalt vermindert. Diese Ergebnisse sind mit den während der normalen Gärung ablaufenden Prozessen vergleichbar. Acetaldehyd wird von der Hefe als Reduktionsäquivalent bei der Oxidation von  $\text{NADH}_2$  zu  $\text{NAD}^+$  verwendet und dabei anschließend durch die Alkohol-Dehydrogensase zu Ethanol reduziert [212]. Die vollständigen Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (*cf.* Anhang Tabelle 93 und Tabelle 94).

### **5.3.1.3 Sensorische Untersuchungen**

Zur Verkostung kam nur das Hefebier zum Zeitpunkt „Ende Sedimentation“, da die gewonnene Probenmenge zum Zeitpunkt „Tank voll“ nicht ausreichend für die sensorische Prüfung war. Da zu diesem Zeitpunkt die Profilprüfung für Hefebiere noch nicht endgültig entwickelt war, wurde im Rahmen dieser Verkostung auf ein vereinfachtes Verkostungsschema zurückgegriffen. So wurde der Begriff „hefig“ nur pauschal betrachtet, und nicht, wie in der eigentlichen Profilprüfung, durch umschreibende Attribute ersetzt. Der Vollständigkeit halber sollen dennoch die Ergebnisse mit berücksichtigt werden.

Das Hefebier zeichnete sich vor allem durch einen intensiven bitteren Geschmack und ein hefiges Aroma aus. Diese Bittere wurde dabei als breit und nachhängend beschrieben.

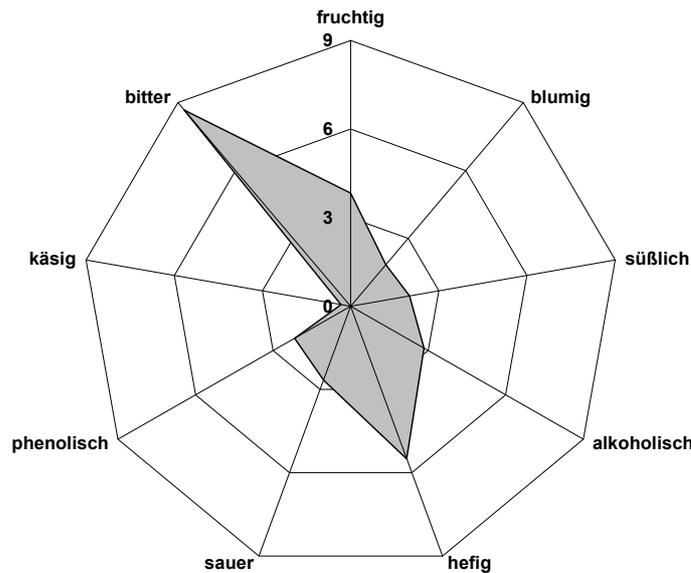


Abbildung 37: Profilprüfung für das Hefebier zum Zeitpunkt „Ende Sedimentation“

**5.3.1.4 Wirtschaftliche Betrachtungen**

Zur wirtschaftlichen Betrachtung wurden die Trockensubstanzen bestimmt und anschließend über Gleichung 2.6 (cf. Kapitel 2.2.1) die Ausbeute berechnet. Tabelle 29 zeigt die ermittelten Werte.

Tabelle 29: Bestimmung der Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch natürliche Sedimentation

DiFS / %	ZuFS / %	E <sub>w</sub> / %	Ausbeute / %
19,2	9,2	4,08	66,1

**5.3.1.5 Ergänzende Untersuchungen im Bereich natürliche Sedimentation**

Aus der Praxis wurde verschiedentlich von Trübungsproblemen bei der Filtration des Kernbieres nach der Dosage von Hefebieren, die über natürliche Sedimentation gewonnen wurden, berichtet. Untersuchungen haben ergeben, dass proteinische Fraktionen ursächlich für die auftretende Biertrübung waren. Aus diesem Grund wurden in einer Brauerei, die ihr Hefebier über natürliche Sedimentation gewinnt, Proben für Untersuchungen im Bereich der Proteine genommen. Die Trennung der Proteine erfolgte dabei mittels nichtdenaturierender Polyacrylamidgelelektrophorese

(native PAGE) (Versuchsreihe 1). Parallel dazu wurden Betriebshefesuspensionen über einen definierten Zeitraum bei unterschiedlichen Temperaturen gelagert, die ebenfalls auf ihre Proteinfractionen untersucht wurden (Versuchsreihe 2).

Tabelle 30: Probenbezeichnungen für Versuchsreihe 1

Probe	Bezeichnung
A	Größenstandard
B	Vergleichsbier untergärig
C	Vergleichswürze untergärig
D	Hefebier unfiltriert (Probe 1)
E	Hefebier nach Kieselgurfiltration (Probe 2)
F	Hefebier nach Kieselgurfiltration und Kurzzeiterhitzung (Probe 3)
G	Größenstandard
H	Probe 1, zentrifugiert, 24h bei 40 °C
I	Probe 1, zentrifugiert, + Pepsin
J	Probe 1, zentrifugiert, Überstand, 24h bei 40 °C
K	Probe 1, zentrifugiert, Bodensatz, 24h bei 40 °C
L	Probe 1, zentrifugiert, Bodensatz mit KOH neutralisiert, 24h bei 40 °C
M	Probe 3, zentrifugiert, Bodensatz mit KOH neutralisiert
N	Größenstandard
O	Probe 1, zentrifugiert
P	Probe 1, zentrifugiert, + Thermolysin
Q	Probe 1, zentrifugiert, + Proteinase K
R	Probe 1, zentrifugiert, + DNAse
S	Weizen 1 hell
T	Weizen 2 frisch
U	Weizen 2 alt
V	Weizen 2 alt Bodensatz mit KOH neutralisiert
W	Vergleichsbier untergärig
X	Vergleichswürze untergärig
Y	Größenstandard

In Abbildung 38 sind die Bandenmuster der verschiedenen Proben aus Versuchsreihe 1 zu sehen.  $M_r$ -Werte unbekannter Proteine konnten anhand von spezifischen Markerproteinen abgeschätzt aber nicht eindeutig bestimmt werden, da bei der nativen PAGE die Wanderungsgeschwindigkeit von der Molekülgröße *und* der Nettoladung abhängt [213]. Als Größenstandards dienten: Myosin: 205 kDa,  $\beta$ -Galactosidase: 116 kDa, Phosphorylase b: 97 kDa, Transferrin: 80 kDa, Albumin: 66 kDa, Glutamate dehydrogenase: 55 kDa, Ovalbumin: 45 kDa, Carbonic anhydrase: 30 kDa, Trypsin inhibitor: 21 kDa, Lysozyme: 14 kDa und Aprotinin: 6,5 kDa. Eindeutig zu erkennen waren die auftretenden Banden bei Molekülgrößen um 30, 50 und 120 kDa bei den Proben D und E. OMURA *et al.* [214] identifizierten Banden bei 57 und 120 kDa als trübungsverursachende Mannoproteine (MP). Bei

den hier detektierten Proteinen (50 und 120 kDa) könnte es sich ebenfalls um die beiden von OMURA bestimmten Proteine MP57 und MP120 handeln. Im Weinbereich wurden dagegen Mannoproteine von Hefezellen mit Molekularmassen von 420 kDa und von 32 kDa (Fragment der Invertase) als sog. „*Haze Protective Mannoproteins*“ (HPM) identifiziert [215, 216, 217, 218]. Das 32 kDa-Mannoprotein wird durch eine kombinierte Wirkung von  $\beta$ -Glucanasen und der Proteinase A freigesetzt [217]. Ob es sich bei der Bande bei ca. 30 kDa um das Invertase-Fragment handelt, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht geklärt werden- Durch die Kurzzeiterhitzung verschwindet die Bande bei ca. 120 kDa, im Gegenzug werden Banden im Molekülgrößenbereich von ca. 80, 90 und 100 kDa sichtbar. Die Veränderung der Proteinzusammensetzung durch die Kurzzeiterhitzung wird insbesondere bei der Herstellung von Hefeweissbieren als vorteilhaft für die Dauertrübung angesehen [219, 220]. Bei der Bande zwischen 45 und 55 kDa könnte es sich um die schaumnegative Proteinase A handeln, deren Molekulargewicht wird in der Literatur mit Werten zwischen 41 und 49 kDa angegeben wird [221, 222, 223, 224, 225, 226]. Interessanterweise konnte keine enzymatische Degradierung der Proteine mit einem Molekulargewicht von 120 kDa erreicht werden. Die Proben S–V wurden als Vergleich ausgewählt, um zu sehen, ob bei der Alterung von abgefüllten Bieren ähnliche Effekte auftraten. Durch die elektrophoretische Trennung konnten allerdings keine Banden in den Bereichen der Hefebiere festgestellt werden.

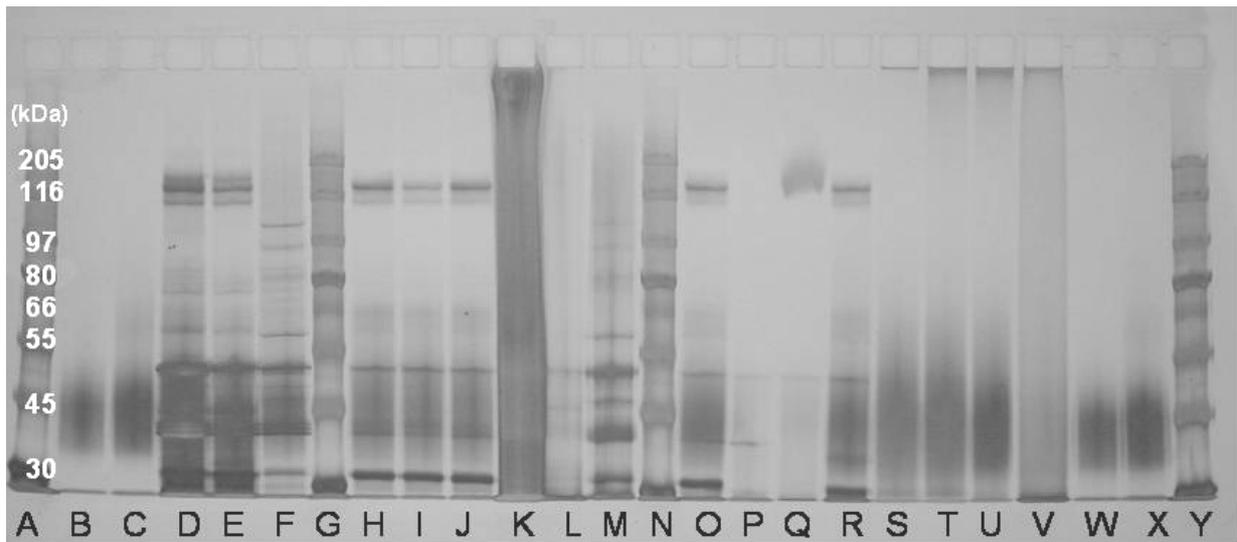


Abbildung 38: gelelektrophoretische Auftrennung der Versuchsbiere der Versuchsreihe 1

Tabelle 31: Probenbezeichnungen für Versuchsreihe 2

Probe	Bezeichnung
A	Größenstandard
B	Vergleichsbier untergärig
C	Vergleichswürze untergärig
D	Hefebier unfiltriert, Hefe wurde zuvor 6d bei 0 °C aufbewahrt (Probe 1)
E	Hefebier unfiltriert, Hefe wurde zuvor 6d bei 12 °C aufbewahrt (Probe 2)
F	Hefebier unfiltriert, Hefe wurde zuvor 6d bei 12 °C aufbewahrt (Probe 2)
G	Probe 1, 24h bei 40 °C
H	Probe 1+ Pepsin
I	Probe 1 + Thermolysin
J	Probe 1 + Proteinase K
K	Größenstandard
L	Probe 2, 24h bei 40 °C
M	Probe 2 + Pepsin
N	Probe 2 + Thermolysin
O	Probe 2 + Proteinase K
P	Größenstandard
Q	Probe 1, 24h bei 40 °C, im Eppendorfgefäß inkubiert
R	Probe 1+ Pepsin, im Eppendorfgefäß inkubiert
S	Probe 1 + Thermolysin, im Eppendorfgefäß inkubiert
T	Probe 1 + Proteinase K, im Eppendorfgefäß inkubiert
U	Probe 2, 24h bei 40 °C, im Eppendorfgefäß inkubiert
V	Probe 2 + Pepsin, im Eppendorfgefäß inkubiert
W	Probe 2 + Thermolysin, im Eppendorfgefäß inkubiert
X	Probe 2 + Proteinase K, im Eppendorfgefäß inkubiert
Y	Größenstandard

Bei den hausinternen Versuchen konnten für die Probe D keine Banden im Bereich von ca. 120 kDa festgestellt werden, wohingegen bei Probe E (und F) eindeutige Banden sichtbar wurden (siehe oben). Durch die höhere Stressbelastung der Hefe für Probe 2 wurde damit eindeutig die Proteinzusammensetzung im Hefebier beeinflusst. Auch hier konnte zunächst keine Degradierung der Proteine durch Enzymzugabe erreicht werden (Proben L–O). Erst durch einen deutlichen Überschuss an Enzymzugabe wurden die Proteine abgebaut (Proben Q–X).

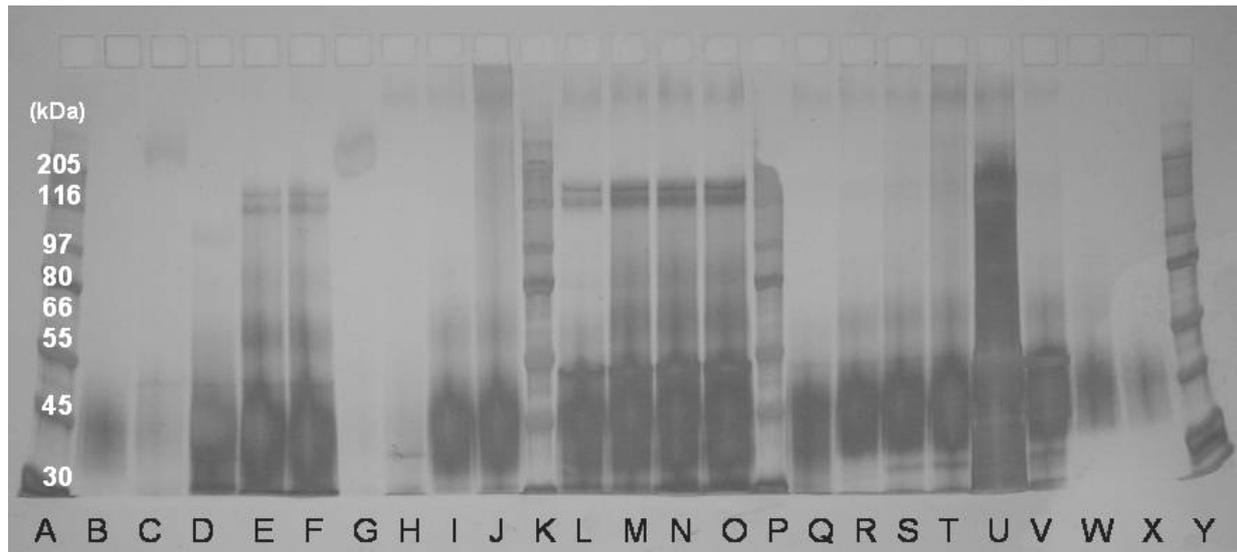


Abbildung 39: gelelektrophoretische Auftrennung der Versuchsbiere der Versuchsreihe 2

Wie oben bereits erwähnt, kann die Proteinmodifizierung zu Problemen im Bereich der kolloidalen Stabilität bei untergärigen Bieren führen. Ursächlich für diese Trübungen könnten die nachgewiesenen Proteine im Bereich von 80–120 kDa sein, die im Rahmen der Hefebiergewinnung durch natürliche Sedimentation entstehen.

### 5.3.2 Dekantier-Zentrifuge

In Abbildung 40 ist eine schematische Übersicht über den grundsätzlichen Aufbau der untersuchten Anlage dargestellt. Detailliert beschrieben ist die Anlage bei KUNST *et al.* [227].

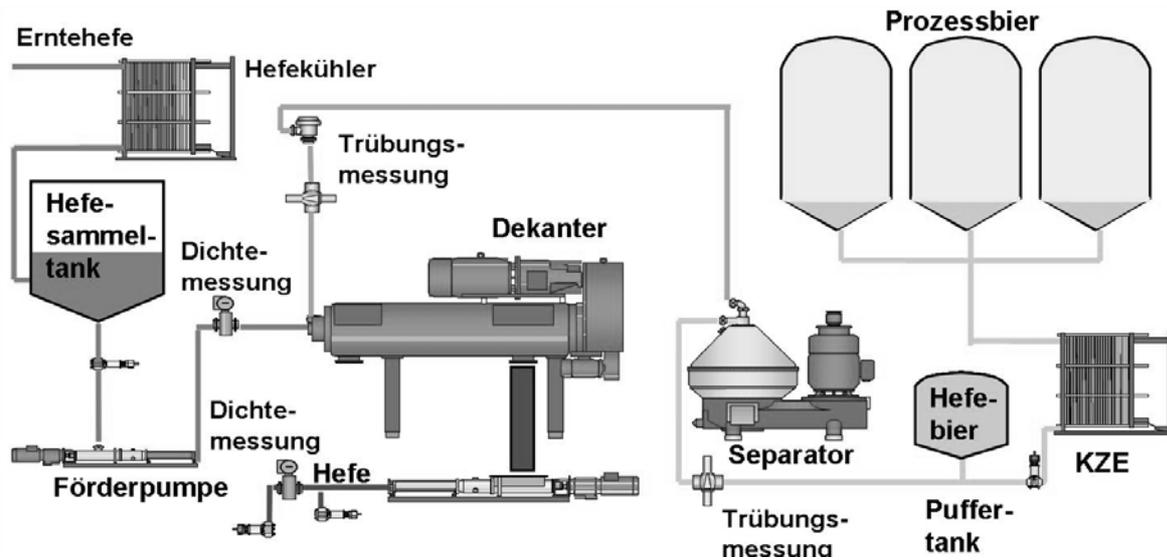


Abbildung 40: Hefebirrückgewinnung mittels Dekanter nach KUNST *et al.* [227]

### 5.3.2.1 Hefephysiologie

Von großem Interesse im Bereich der mechanischen Trennung Hefe-Hefebier ist die Untersuchung hinsichtlich des Einflusses des Dekanters auf die Physiologie der Hefezellen. In Abbildung 41 sind die Verteilungen der Messwerte der Hefeviabilität als Box-Chart dargestellt.

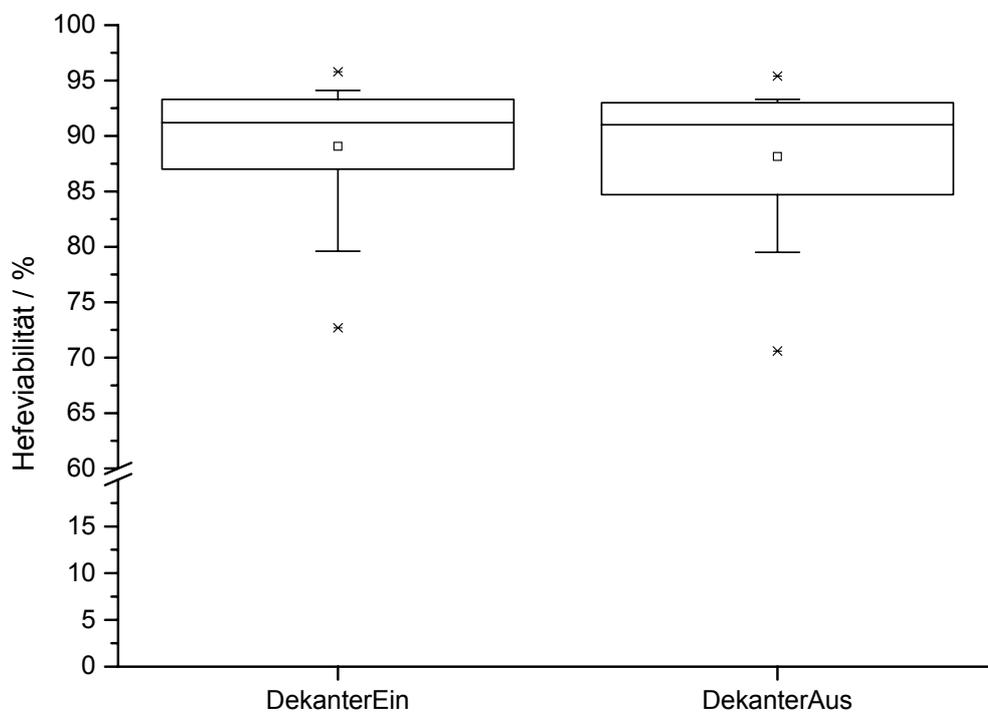


Abbildung 41: Verhalten der Hefeviabilität bei Dekanter-Einlauf und –Austrag

Die Verteilung der Differenzen der Hefeviabilität zwischen Dekanter-Einlauf und – Austrag sind in Tabelle 32 zusammengefasst. Die Zusammenstellung der Messwerte ist im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 95). In der Zusammenstellung sind diejenigen Daten nicht berücksichtigt, bei denen eine negative Differenz (Viabilität am Austrag höher als am Einlauf) festgestellt wurde.

*Tabelle 32: Differenzen der Hefeviabilität zwischen Dekanter-Einlauf und -Austrag*

<b>Bezeichnung</b>	<b>n</b>	<b>Mittelwert</b>	<b>Std.Abweichung</b>	<b>VK</b>
Δ Einlauf-Austrag	32	0,91	0,57	0,006

Eine schädigende Wirkung der hohen Zentrifugalkräfte auf die Hefezellen konnte in diesem Fall zwar nachgewiesen werden, jedoch ist der Einfluss als gering zu betrachten. Tabelle 33 zeigt die Ergebnisse der Hefevitalitätsmessungen.

*Tabelle 33: Hefevitalität der untersuchten Hefe- bzw. Hefebierproben*

<b>Probe</b>	<b>ICP</b>	<b>Proteinase A / U×10<sup>-5</sup>/ml</b>
Dekanter-Einlauf	6,18	16
Dekanter-Austrag	6,27	-
KZE-Auslauf	-	n.n. <sup>7</sup>

Die Hefevitalität ist insgesamt als sehr gut zu betrachten. Sowohl die Bestimmung des ICP als auch die Bestimmung der Aktivität der Proteinase A zeigten keine auffälligen Werte. Die ohnehin geringe Aktivität der Proteinase A wurde durch einen in der Anlage installierten Kurzzeiterhitzer noch gänzlich inaktiviert.

### 5.3.2.2 Verhalten von Inhaltsstoffen im Hefebier

Die Bildung von Acetaldehyd in den ersten Tagen der Hauptgärung ist unter anderem direkt abhängig von der Hefekonzentration. Je höher die Hefekonzentration ist, umso mehr Acetaldehyd wird gebildet und umso rascher ist später auch die Abnahme. Acetaldehyd wird durch die Hefe als Reduktionsäquivalent bei der Oxidation von NADH<sub>2</sub> zu NAD<sup>+</sup> verwendet und dabei zu Ethanol reduziert. Es lässt sich allgemein ein sehr niedriger Gehalt an Acetaldehyd im Hefebier feststellen, zumal dieser in den korrespondierenden Zwickelbieren meist über 10 mg / l liegt. Bei Betrachtung aller Hefebierproben lag der Gehalt an Acetaldehyd durchschnittlich in

<sup>7</sup> n.n.: = nicht nachweisbar

einem Bereich von 6 mg/l. Aufgrund des hohen Geschmacksschwellenwertes von 25 mg/l in Bier [211] ist hier keine sensorische Beeinträchtigung zu erwarten.

Bei den Estern ist nur Ethylacetat in den Mengen vorhanden, das einen Einfluss auf das Produktionsbier haben könnte. Ethylacetat verleiht dem Bier in höheren Konzentrationen einen lösungsmittelartigen, meist unangenehmen Geruch. Die Konzentrationen der übrigen gemessenen Ester waren im normalen Bereich, tendentiell sogar etwas niedriger.

Abbildung 42 zeigt die Gehalte der gemessenen Konzentrationen an Acetaldehyd und Ethylacetat.

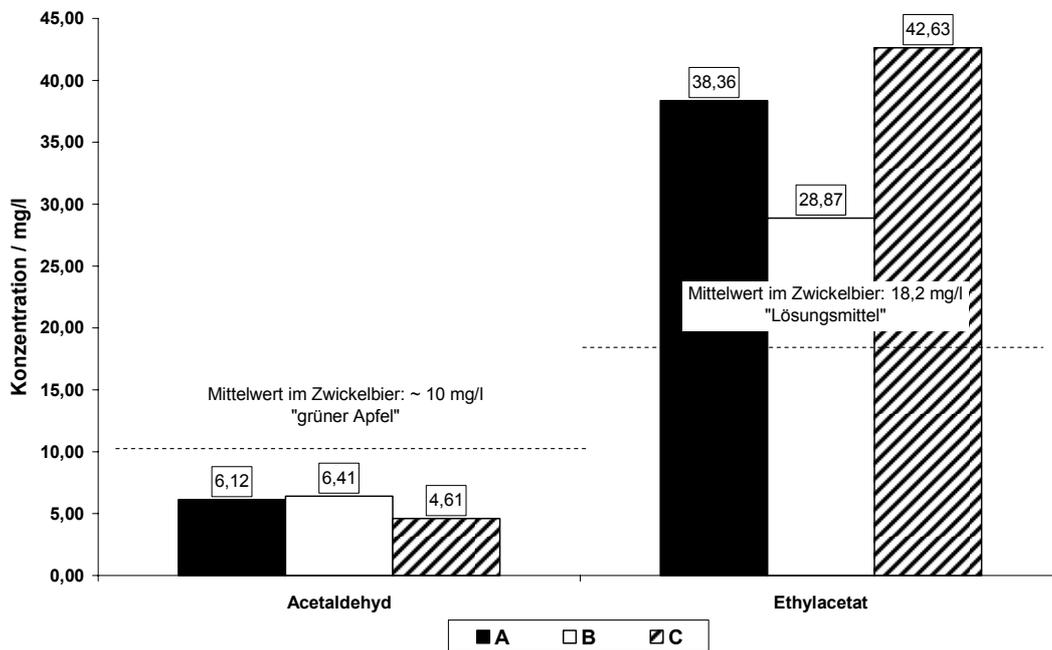


Abbildung 42: gemessene Gehalte an Acetaldehyd und Ethylacetat bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden

Abbildung 43 zeigt die Gehalte an mittelkettigen Fettsäuren. Die deutlich erhöhten Werte sind typisch für die Hefebiere.

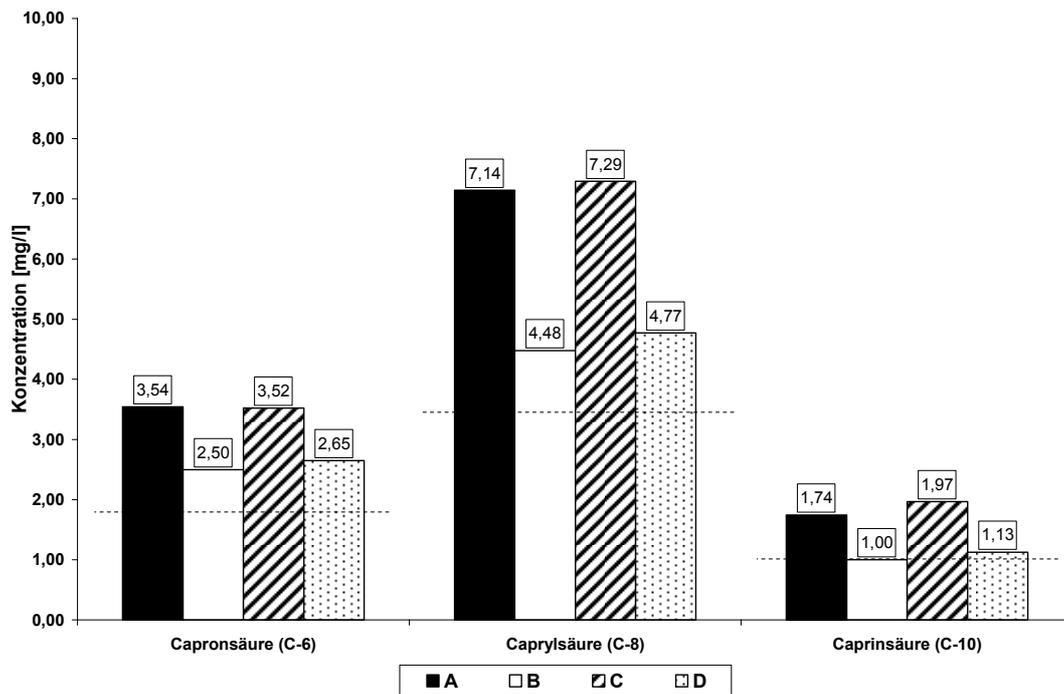


Abbildung 43: gemessene Gehalte an Capron-, Capryl- und Caprinsäure bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden

Bei einer Verschlechterung des physiologischen Zustandes können die Fettsäuren in das umgebende Bier gelangen [15]. Capryl- und Caprinsäure sind Indikatoren für den langen Kontakt zwischen Hefe und Bier [228]. Besonders der Gehalt an Caprylsäure ist deutlich höher als bei Zwickelbier. Ein ähnliches Verhalten wie die mittelkettigen zeigen auch die kurzkettigen Fettsäuren im Hefebier. Ihre Gehalte liegen deutlich über denen des Zwickelbieres. Die Konzentration der N-Buttersäure ist allerdings noch deutlich vom Geschmacksschwellenwert (1,2–2,2 mg/l) entfernt. Die Konzentration von Isovaleriansäure ist gegenüber der im Zwickelbier ebenfalls erhöht. Abbildung 44 zeigt einen Überblick über die kurzkettigen Fettsäuren.

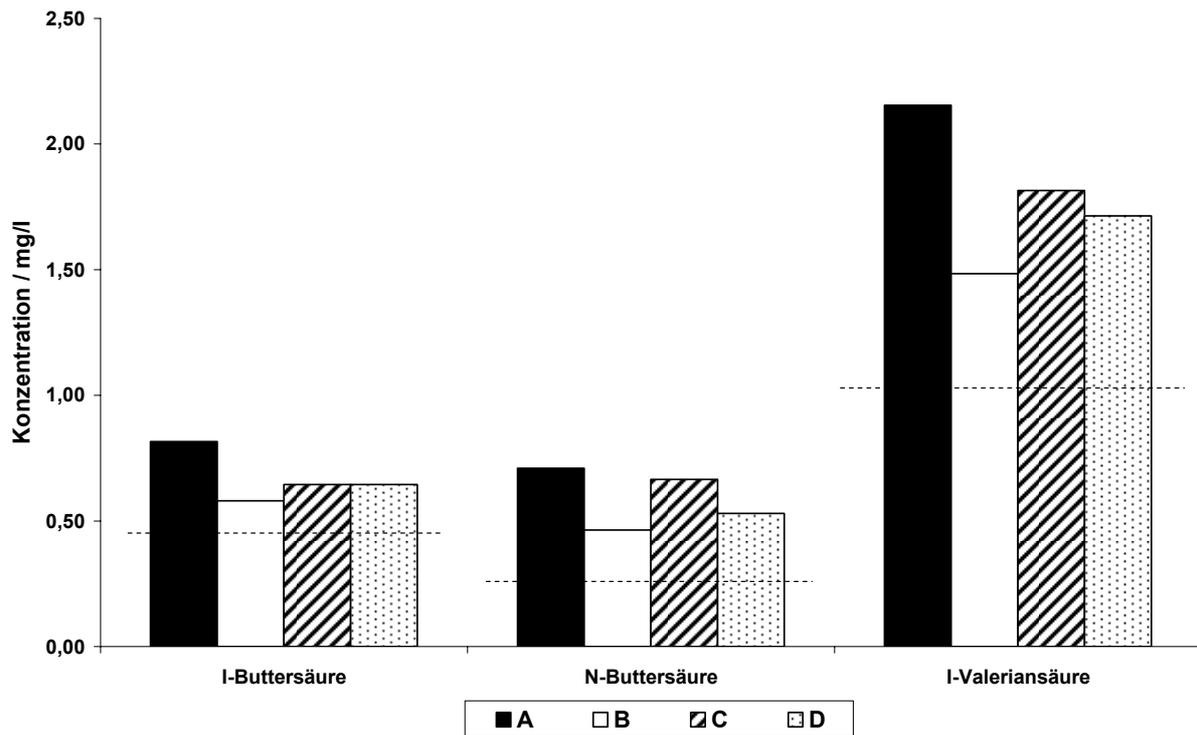


Abbildung 44: gemessene Gehalte an i-Buttersäure, n-Buttersäure und Isovaleriansäure bei Hefebieren, die aus unterschiedlichen Hefesuspensionen gewonnen wurden

### 5.3.2.3 Sensorische Untersuchungen

Die Hefebiere wurden teilweise stark schwankend beurteilt. Dies hatte allerdings in erster Linie mit der Herkunft der Hefebiere aus verschiedenen Gärkellerabteilungen innerhalb der Brauerei zu tun. Die Bittere wurde bei allen Bieren sehr einheitlich bewertet, dies war aufgrund der hohen Bitterwerte und der damit verbundenen hohen Intensität der Bittere auch zu erwarten. Ebenso fiel der hohe Alkoholgehalt auf. Bei einigen Bieren wurde der stechende, nach grünem Apfel erinnernde Aromaeindruck des Acetaldehyds wahrgenommen. In Abbildung 45 sind die Aromaeindrücke der untersuchten Hefebiere dargestellt.

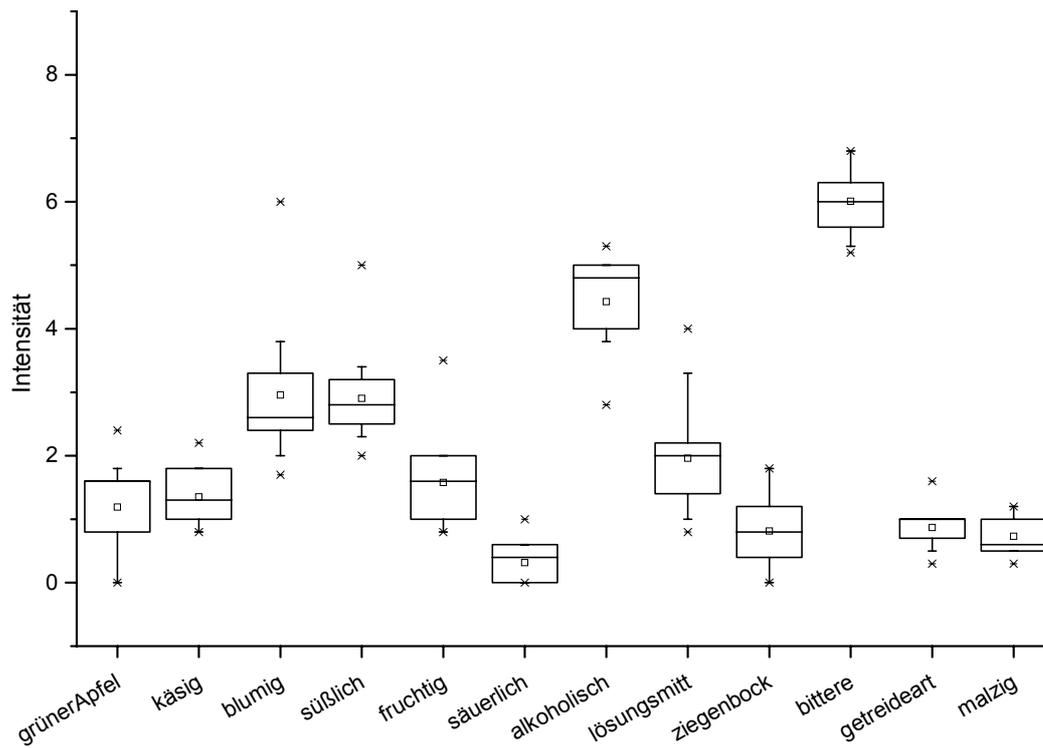


Abbildung 45: Aromaeindrücke der verkosteten Hefebiere

### 5.3.2.4 Wirtschaftliche Betrachtungen

Der Trockensubstanzgehalt am Dekanter-Einlauf schwankte bei normaler Erntehefe zwischen 12 und 18 %. Im Verlauf der Verarbeitung eines Hefesammeltanks sank der Gehalt bis auf Werte von etwa 5 % ab. Grund hierfür war das Absetzen der Hefe im Sammelntank, wodurch sich Hefebier über der Hefe sammelte. Die Probenahme von Hefen aus dem Feststoffschicht des Dekanters erwies sich als schwierig. Grund hierfür war, dass die Spül- und Verdünnungswasserleitungen des Dekanters geschlossen werden mussten. Diese Spül- und Verdünnungswässer wurden im Feststoffschicht des Dekanters versprüht. Somit wurde der Hefetrockensubstanzgehalt reduziert.

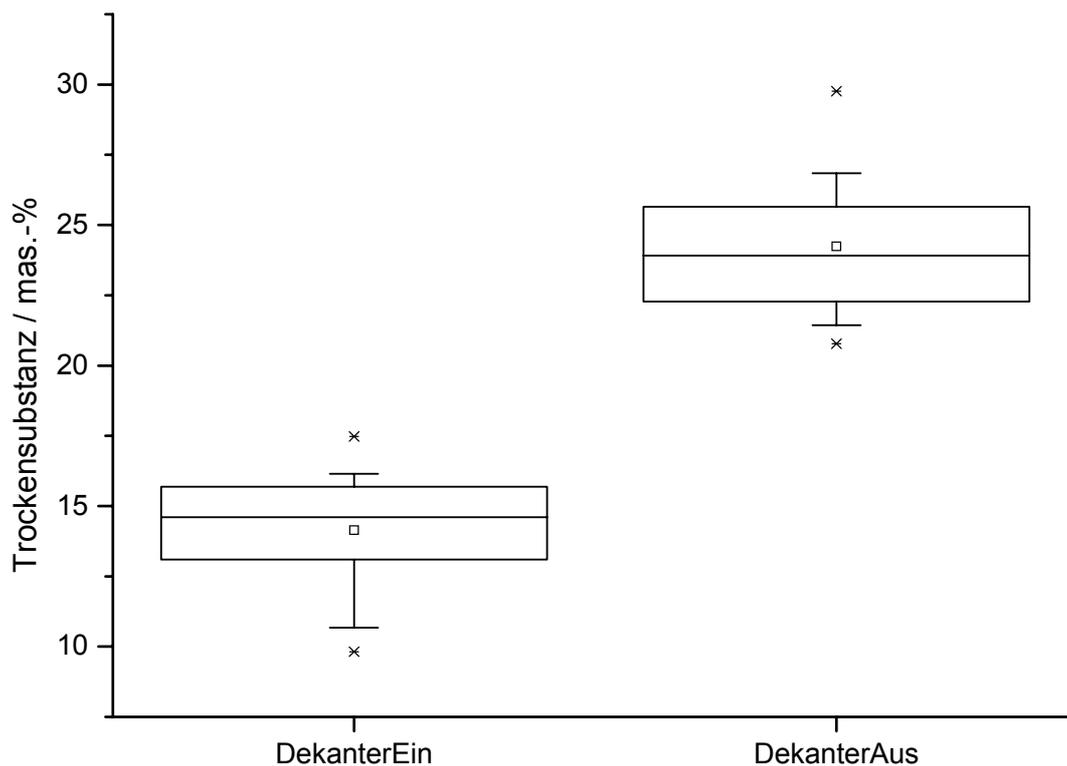


Abbildung 46: Verhalten der Trockensubstanzgehalte bei Dekanter-Einlauf und Dekanter-Austrag

Eine genaue Bestimmung der Trockensubstanz der Hefe, die aus der Dekantiertrommel ausgetragen wurde, war somit nicht möglich. Besonders das Schließen der Sondenspülungen am Feststoffschacht erzeugte teilweise große Probleme. Die Vollmeldesonde verklebte durch Hefe und meldete somit einen überfüllten Feststoffschacht. Dies führte zu einer Produktionsunterbrechung. Aus diesem Grund wurde die Sondenspülung nur für einen kurzen Zeitraum geschlossen. Die Hefeprobe wurde dann entnommen. Es ist durchaus möglich, dass die Trockensubstanz daher nicht dem wirklichen Wert des Trommelaustrages entsprach. Die Trockensubstanz des Dekanter-Austrags lag bei allen Messungen bei mindestens 20 mas.-%. Im Durchschnitt wurden 24,24 mas.-% erreicht.

Die Daten zur Berechnung der durchschnittlichen Ausbeute sind in Tabelle 34 zusammengestellt. Die Daten entsprechen den ermittelten Mittelwerten aus 45 Untersuchungen. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 96, Tabelle 97)

*Tabelle 34: Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch Dekantierzentrifugen*

<b>ZuFS / mas.-%</b>	<b>DiFS / mas.-%</b>	<b>Ew / mas.-%</b>	<b>Ausbeute / %</b>
14,14	24,24	3,78	48,55

### 5.3.2.5 Ergänzende Untersuchungen im Bereich Dekantier-Zentrifuge

Als Messungen an der Hefebierrückgewinnungsanlage wurden sowohl die Temperatur der Hefesuspension als auch die des Hefebieres durchgeführt. Weiter wurde der Sauerstoffgehalt am Dekanter-Auslauf bestimmt. Diese beiden Parameter sind insbesondere bei der Verarbeitung von Hefesuspensionen unbedingt zu beachten (cf. Kapitel 2.2.2). Eine Verarbeitung von einer empfohlenen Temperatur zwischen 0–3 °C lässt sich nur erreichen, wenn die Hefe sofort nach der Ernte über einen Hefekühler gekühlt der Anlage zugeführt wird. Bei fehlender Kühlmöglichkeit im Hefesammeltank käme es ansonsten aufgrund der Hefeaktivität zu einer Temperaturerhöhung. Durchschnittlich lag die Temperatur am Dekanter-Einlauf bei 4,9 °C. Durch den Energieeintrag des Dekanters stieg die Temperatur am Dekanter-Auslauf auf durchschnittlich 12,7 °C an. Dies entspricht einer mittleren Erwärmung um ca. 8,0 °C. AXELSSON [112] schreibt, dass Temperaturerhöhungen von bis zu 10 K bei Zentrifugen auftreten können. Abbildung 47 zeigt die gemessenen Temperaturen am Dekanter-Einlauf und –Auslauf als Box-Chart.

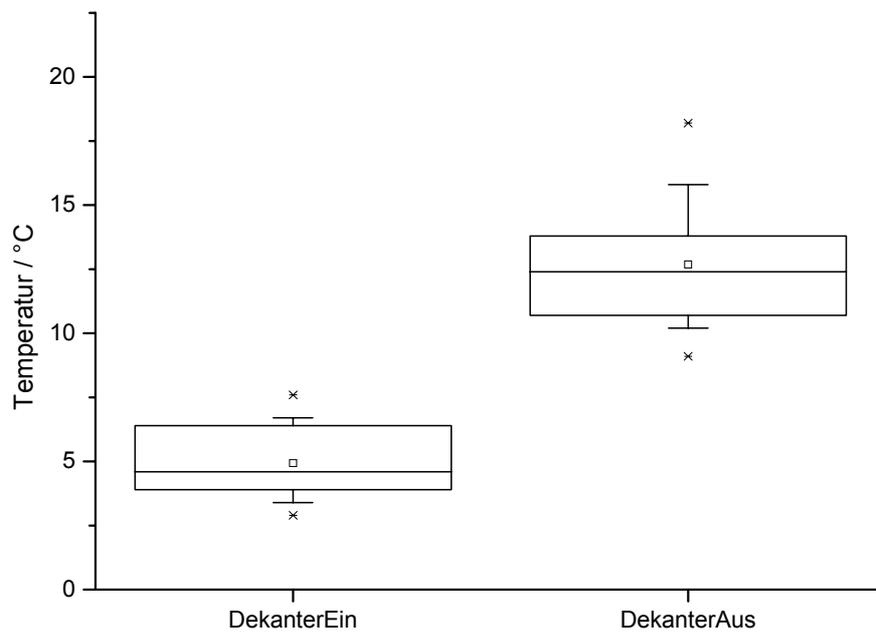


Abbildung 47: gemessene Temperaturen am Dekanter-Einlauf und -Auslauf

Die Bestimmung des Sauerstoffgehaltes im Hefebier gestaltete sich als sehr schwierig. Der Grund hierfür lag in den Druckschwankungen an den Ausläufen des Dekanters. Diese geringen Schwankungen werden durch die Steuerung des Durchflusses erzeugt. Die Messung des Sauerstoffgehaltes am Dekanter-Einlauf war aufgrund der hohen Feststoffkonzentration nicht möglich. Daher ließ sich die direkte Sauerstoffaufnahme im Dekanter nicht messen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass ein Sauerstoffgehalt in der Hefesuspension nahezu ausgeschlossen werden kann. Tabelle 35 gibt einen Überblick über die gemessenen Sauerstoffgehalte am Dekanter-Auslauf.

Tabelle 35: gemessene Sauerstoffgehalte am Dekanter-Auslauf

N	Maximum	Minimum	Mittelwert	Std.Abw.	Varianz
8	1,000	0,060	0,467	0,372	0,139

Die Schwierigkeiten bei der Messung des Sauerstoffgehaltes machen die Ergebnisse nur sehr eingeschränkt aussagefähig, denn es konnte mit Sicherheit davon ausgegangen werden, dass der Dekanter keine derart hohen Sauerstoffmengen ins Bier eintrug. Sauerstoffmessungen am Dekanter bei geringerer Feststofffracht der

Hefesuspension bzw. „konstanter“ Feststofffracht könnten ggfs. Aufschluss darüber geben.

### 5.3.3 Teller-Zentrifuge

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss von Tellerzentrifugen wurden in einer Brauerei insgesamt fünf Separationsversuche durchgeführt. Variiert wurde dabei der physiologische Zustand der Hefepopulation, um den Einfluss der Zentrifugation auf die Hefephysiologie zu untersuchen. Tabelle 36 gibt einen Überblick über die verwendeten Hefesuspensionen. Da die erste und zweite Separation direkt nacheinander erfolgte und beide Biere in den gleichen Sammel-tank geleitet wurden, war hier keine einzelne Analyse der gewonnen Biere möglich. In der Folge wurden die Hefebiere aus Versuchsreihe 1 und 2 als Hefebier 1 bezeichnet. Die Hefebiere der übrigen Versuchsreihen wurden entsprechend mit Hefebier 2–4 bezeichnet.

*Tabelle 36: Parameter der verwendeten Hefesuspensionen*

	Versuchsreihe 1	Versuchsreihe 2	Versuchsreihe 3	Versuchsreihe 4	Versuchsreihe 5
	Hefebier 1		Hefebier 2	Hefebier 3	Hefebier 4
Lagerdauer der Hefe	ca. 20h	ca. 20h	ca. 10h	6d	<1h
Lagertemperatur	4 °C	4 °C	4 °C	Ø ~ 10°C	4 °C

#### 5.3.3.1 Hefephysiologie

Die Hefevitalität der untersuchten Hefeproben schwankte sehr stark. So wurden Werte für den intrazellulären pH-Wert zwischen 5,50 und 6,28 gemessen. Die Ergebnisse der beiden Extremfälle „sehr schlecht“ und „sehr gut“ zeigt Abbildung 48.

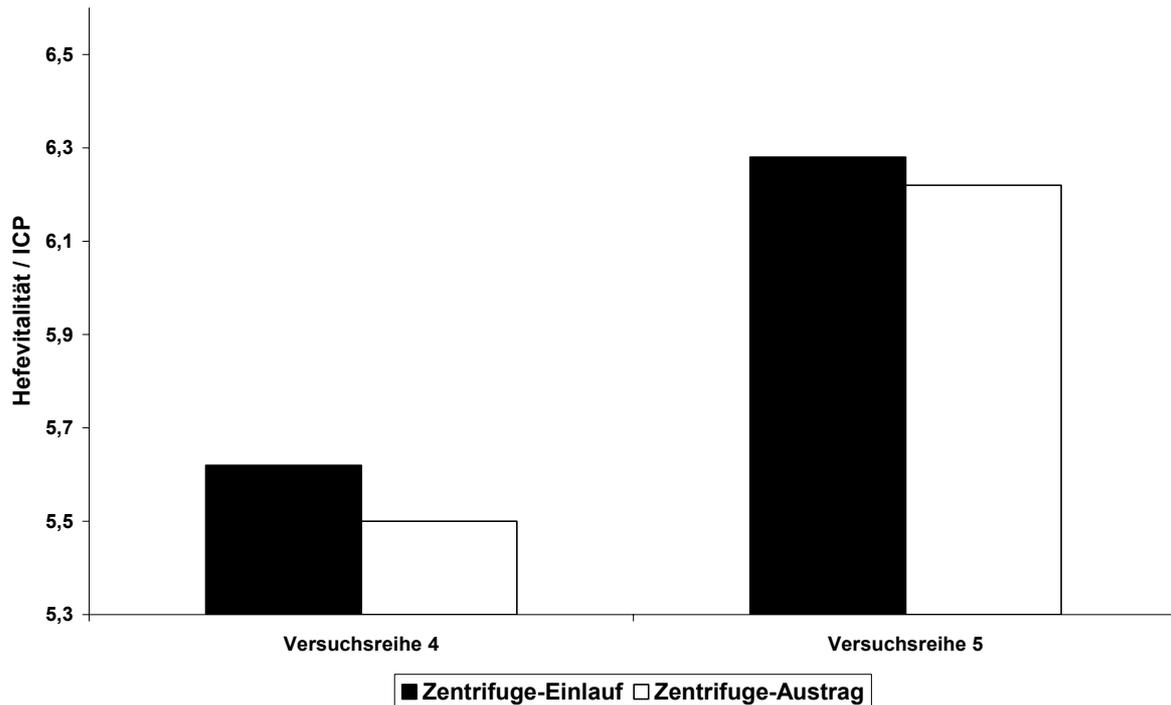


Abbildung 48: Verhalten der Hefevitalität bei Zentrifuge-Einlauf und –Austrag

Aus den Untersuchungen wird deutlich, dass der schädigende Einfluss der Zentrifugation tendenziell umso größer wurde, je schlechter der ursprüngliche physiologische Zustand der Hefepopulation war. Bei den zugehörigen Hefeviabilitäten konnten diese Tendenzen allerdings nicht nachvollzogen werden. Die vollständigen Ergebnisse der hefephysiologischen Untersuchungen sind im Anhang abgedruckt (*cf.* Anhang Tabelle 98).

### 5.3.3.2 Verhalten der Indikatorsubstanzen im Hefebier

Ähnlich wie in den vorangegangenen Versuchsreihen wurde auch hier ein deutlicher Zusammenhang zwischen Konzentration an kurz- bzw. mittelkettigen Fettsäuren und der Aufbewahrungsphase festgestellt (*cf.* Abbildung 49).

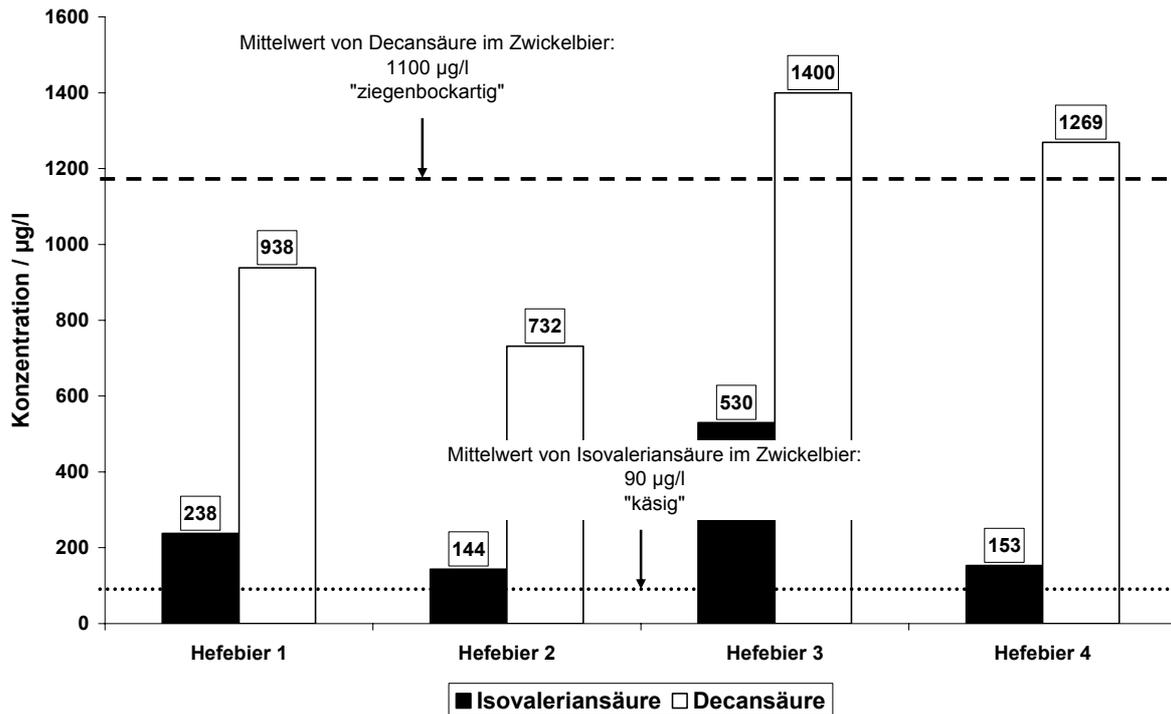


Abbildung 49: Konzentrationen von Isovaleriansäure und Decansäure bei den untersuchten Hefebieren

Sehr deutlich wird der negative Einfluss bei der Isovaleriansäure, die bei Hefebier 3 ungefähr den 6-fachen Wert des normalen Durchschnitts erreichte. Ähnliche Tendenzen wurden auch für die höheren aliphatischen Alkohole ermittelt, wobei wiederum Hefebier 3 die ungünstigsten Werte aufwies. In Tabelle 37 sind die zugehörigen chemisch-technischen Analysendaten aufgeführt. Auch hier konnten die bereits erwähnten Effekte der Farb- und Alkoholzunahme bei verlängerter Aufbewahrungsphase gemessen werden.

Tabelle 37: Chemisch-technische Analysendaten der untersuchten Hefebiere

	Vergleich	Hefebier 1	Hefebier 2	Hefebier 3	Hefebier 4
Stammwürze / mas.-%	11,8	10,82	12,59	12,97	11,66
Alkohol / vol.-%	5	5,01	5,58	5,74	5,49
V <sub>s</sub> / %	80	88,2	87,9	83,4	89,3
pH-Wert	4,3	5,47	5,79	5,9	5,21
FAN / mg/l	100	116	127	200	130
Gesamtpolyphenole / mg/l	200	150	146	260	174
BE / EBC	40	73	80	85	53
Farbe / EBC	4,5	7,8	5,6	12,9	15,7

Insgesamt lies sich jedoch keine negative systembedingte Beeinflussung weder bei den chemisch-technischen noch gaschromatographischen Analysendaten feststellen.

### 5.3.3.3 Wirtschaftliche Betrachtungen

Die Trockenmassekonzentrationen im Zentrifugen-Einlauf waren während den Separationen relativ konstant. Es war also der geforderte homogene Zufluss vorhanden. Die im Hefekonzentrat erzielten Trockensubstanzen lagen zwischen 22 und 23 mas.-%. Diese Werte sind als gut anzusehen, eine weitere Steigerung ist kaum möglich, da bei Konzentrationen über 23 mas.-% keine einwandfreie Entleerung der Zentrifuge mehr erfolgen kann. Für die 4. Separation wurde eine Hefe verwendet, welche zuvor 6 Tage lang unter nicht optimalen Bedingungen gelagert worden war. Lediglich die Trockensubstanzkonzentration im Hefekonzentrat fiel hier mit 18 mas.-% gering aus. Dies ist vermutlich durch die Veränderung der Hefekonsistenz aufgrund der langen Lagerzeit bedingt. Abbildung 50 zeigt die Veränderungen der Trockensubstanzgehalt durch die Zentrifugation. Im Durchschnitt wurde im Zentrifugen-Austrag ein Trockensubstanzgehalt von 20,67 mas.-% erreicht.

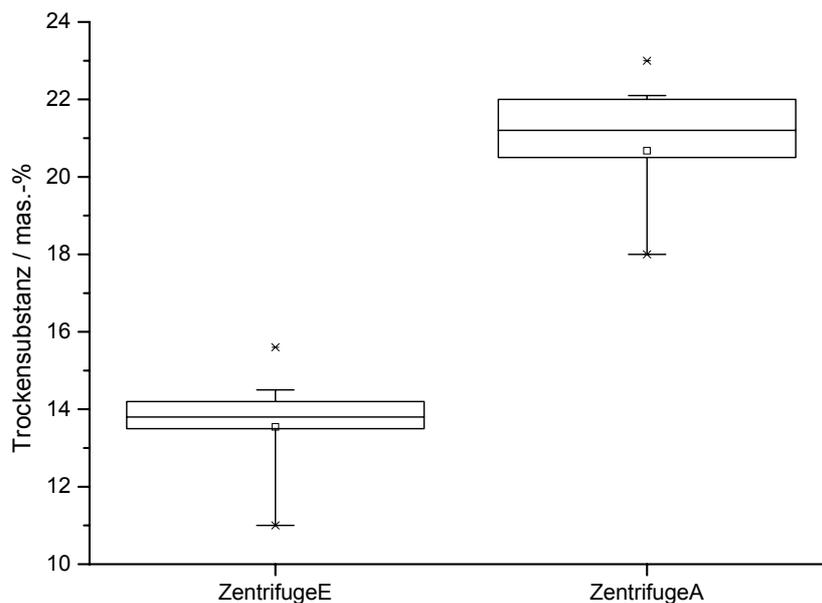


Abbildung 50: Verhalten der Trockensubstanzgehalte am Zentrifugen-Einlauf und -Austrag

Die Daten zur Bestimmung der Ausbeute sind in Tabelle 38 zusammengestellt. Die vollständigen Daten sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 99).

Tabelle 38: Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch Teller-Zentrifugen

ZuFS / mas.-%	DiFS / mas.-%	Ew / mas.-%	Ausbeute / %
13,55	20,67	3,55	41,60

### 5.3.3.4 Ergänzende Betrachtungen im Bereich Teller-Zentrifuge

Es wurden die Parameter „Sauerstoffgehalt“ und „Temperaturerhöhung“ in der Hefesuspension bzw. im Hefebier bestimmt. Durchschnittlich lag die Temperatur am Zentrifugen-Einlauf bei 7,45 °C. Durch den Energieeintrag der Zentrifuge stieg die Temperatur im gewonnenen Hefebier auf einen mittleren Gehalt von 11,85 °C. Dies entspricht einer durchschnittlichen Temperaturerhöhung von 4,4 °C. Abbildung 51 zeigt die gemessenen Temperaturen am Zentrifugen-Einlauf und –Auslauf. Die Rohdaten der Temperaturmessungen sind im Anhang zusammengestellt (cf. Anhang Tabelle 100)

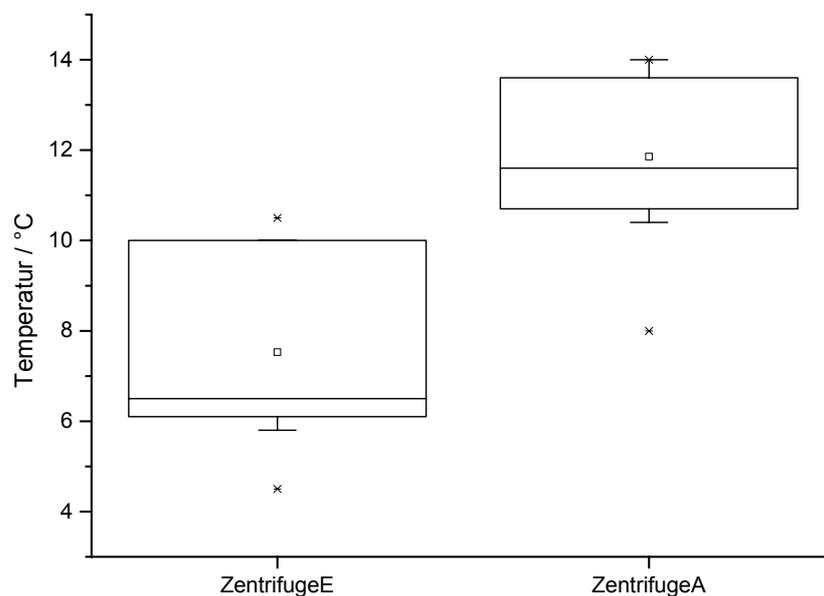


Abbildung 51: gemessene Temperaturen am Zentrifugen-Einlauf und -Auslauf

Der Sauerstoffgehalt wurde nur im anfallenden Hefebier gemessen. Eine Messung im Hefezulauf war nicht möglich, da die Hefesuspension die Kapillaren des Messgerätes verstopft hätte (cf. Kapitel 5.3.2.5).

Da der Hefesammeltank vor dem Befüllen mit CO<sub>2</sub> gespült wurde, war davon auszugehen, dass die Hefesuspension im Zentrifugen-Einlauf nahezu sauerstofffrei war und der im Hefebier gemessene Sauerstoffgehalt aus einer Aufnahme während der Separation resultierte.

Zu Separationsbeginn lag der Sauerstoffgehalt im gewonnenen Hefebier mit Werten zwischen 0,3 und 1,0 mg/l sehr hoch und damit außerhalb der vorgegebenen Spezifikationen. Im weiteren Verlauf der Separationen sank er dann langsam bis auf ein gemessenes Minimum von 0,07 mg/l ab. Abbildung 52 zeigt die Verläufe der Sauerstoffgehalte während drei Separationsversuchen.

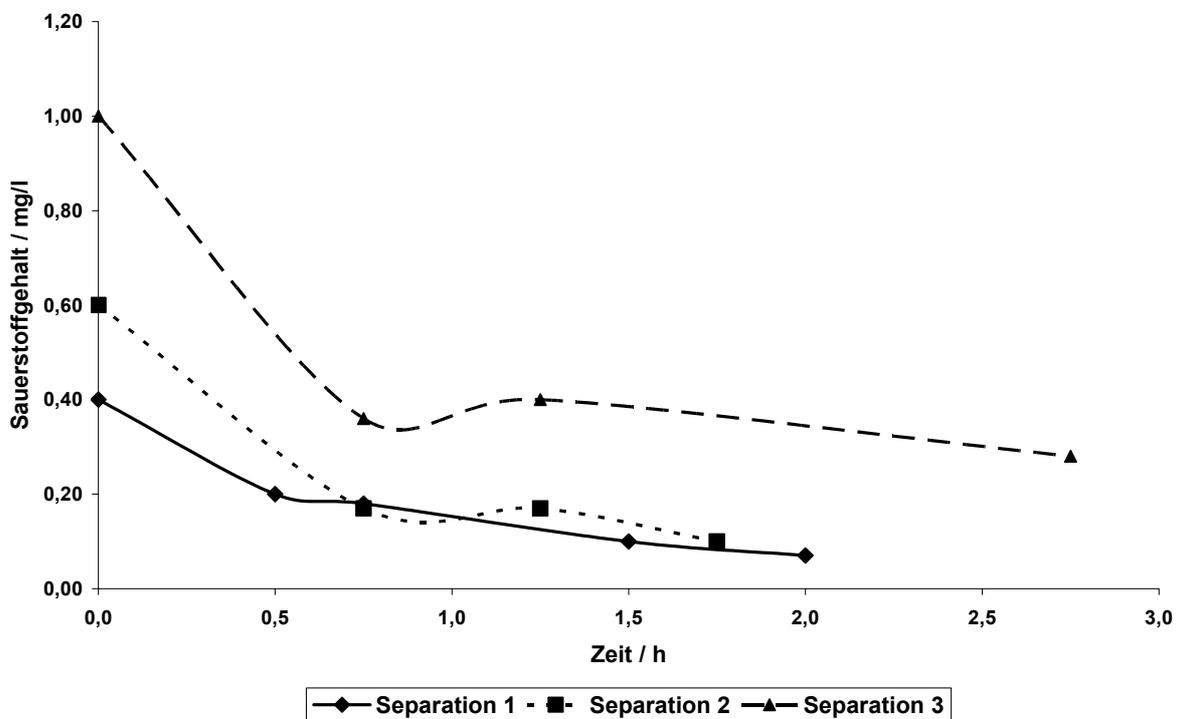


Abbildung 52: Verlauf des Sauerstoffgehaltes der Hefebiere während der Separationen

Einen Überblick über die gemessenen Sauerstoffgehalte aller durchgeführten Separation gibt Tabelle 39.

Tabelle 39: gemessene Sauerstoffgehalte am Zentrifugen-Auslauf

N	Maximum	Minimum	Mittelwert	Std.Abw.	Varianz
20	1,000	0,070	0,343	0,272	0,074

Da die Vermutung bestand, dass die hohen Sauerstoffgehalte aus Sauerstoffresten resultierten, welche nach der Reinigung in der Zentrifuge verblieben, wurde diese vor der zweiten Separation 30 Minuten lang intensiv mit entgastem Wasser gespült. Diese Maßnahme erzielte allerdings nicht den geringsten Erfolg. Die Sauerstoffwerte im Hefebier lagen hier zu Beginn sogar höher als bei der ersten Separation. Vor der dritten Separation wurde eine größere Schälscheibe zur Verbesserung der Reinigungssituation eingebaut. Zeitgleich wurde durch eine Verstellung der CO<sub>2</sub>-Begasung im Trommeltellergehäuse versucht, die Sauerstoffaufnahme niedriger zu halten. Diese Maßnahme war allerdings ebenfalls erfolglos, der Sauerstoffgehalt lag hier noch deutlich höher als bei den vorangegangenen Separationen. Insgesamt konnten durch diese verschiedenen Maßnahmen keine zufrieden stellenden Verhältnisse bezüglich des Sauerstoffgehaltes realisiert werden.

Problematisch gestaltete sich die Reinigung der Teller-Zentrifuge. Die Reinigung der Zentrifuge sollte bei einer Durchsatzleistung von 250 hl/h nach folgendem Schema erfolgen:

1. 20 min Spülung mit Kaltwasser
2. 60 min Spülung mit Heißlauge 2 %-ig, 85 °C
3. 8 min Spülung mit Kaltwasser
4. 16 min Spülung mit Säure, 0,5 – 1 %-ig, kalt
5. Ausschub mit Kaltwasser

Ein gewünschter Reinigungsmitteldurchsatz von 250 hl/h wurde aufgrund technischer Probleme nicht realisiert. Zunächst begann der Separator bereits ab einem Durchfluss von 70 hl/h zu vibrieren. Daraufhin wurde eine größere Schälscheibe eingebaut, womit die Vibrationsproblematik ausgeschaltet wurde. Durch diese größere Schälscheibe erfolgte ein erhöhter Sauerstoffeintrag in das zu gewinnende Hefebier (siehe oben). Nach dem Einbau der neuen Schälscheibe war ein größerer Reinigungsmitteldurchsatz möglich. Ab einem Volumenstrom von 100 hl/h stieg allerdings der Einlaufdruck am Separator an. Bei einem Durchfluss von etwas über 200 hl/h war dieser so groß, dass Ventile im CIP-Weg aufgedrückt wurden. Daher erfolgte die Reinigung letztendlich mit einem Durchfluss von 200 hl/h. Die Reinigungen erzielten nicht den gewünschten Erfolg. Nach ihrer Durchführung waren auf der Unterseite der Teller und in den Hefesammelbereichen um die Düsen noch Reste von Hefe vorzufinden (*cf.* Abbildung 53). Diese Rückstände wurden bei der

Reinigung nicht entfernt, da sie sich an Stellen befanden, an denen nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten herrschten.

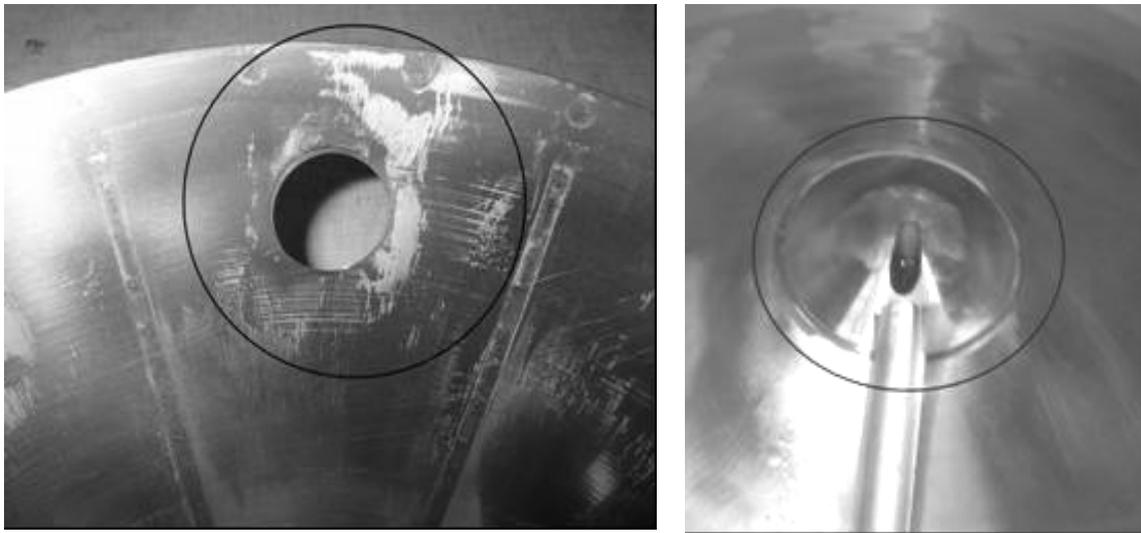


Abbildung 53: Rückstände nach der Reinigung an der Unterseite der Teller (links), Rückstände nach der Reinigung im Bereich der Düsen (rechts)

### 5.3.3.5 Durchführung von Versuchen zur Diafiltration mit Teller-Zentrifugen

Die Möglichkeit der Verdünnung der Hefesuspension mit entgastem Wasser zur Steigerung der Ausbeute wurde von POTGIETER *et al.* [229] bzw. von WACKERBAUER *et al.* [230] für Zentrifugen beschrieben. Abbildung 54 zeigt übersichtsmäßig die Anordnung der apparativen Einrichtungen zur Durchführung der Diafiltration.

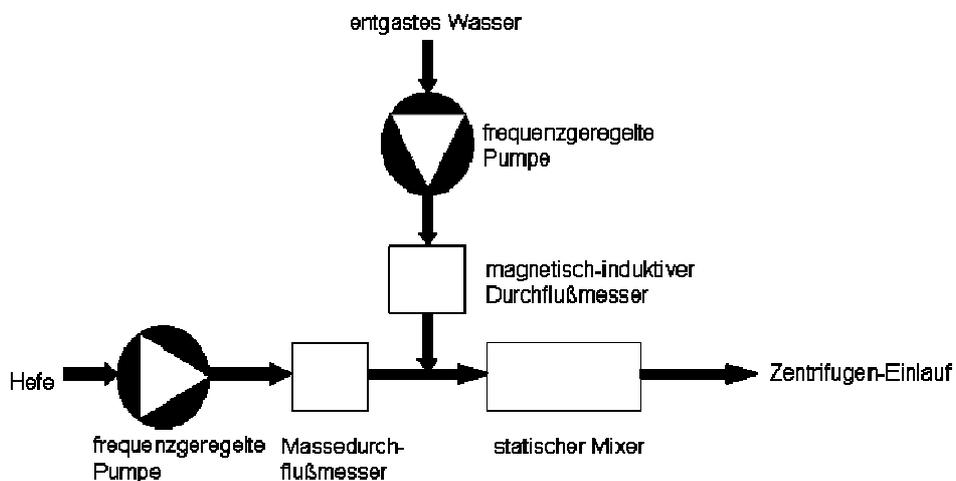


Abbildung 54: apparative Einrichtungen zur Durchführung der Diafiltration [229]

Wichtig dabei ist, dass für diese Applikation nur entgastes Wasser verwendet wird, um eine Erhöhung des Sauerstoffgehaltes auf diesem Wege auszuschließen. Der große Vorteil dieser Verfahrensweise liegt in der Möglichkeit, nahezu konstante Feststofffrachten am Zentrifugen-Einlauf zu realisieren. Dies wirkt sich positiv auf das Trennergebnis aus. Die Versuche wurden in einer Brauerei mit obergäriger Erntehefe durchgeführt. In Abbildung 55 sind die gemittelten Werte für vier Monate an ermittelten Wasser-, Hefe- und Hefebiervolumen dargestellt.

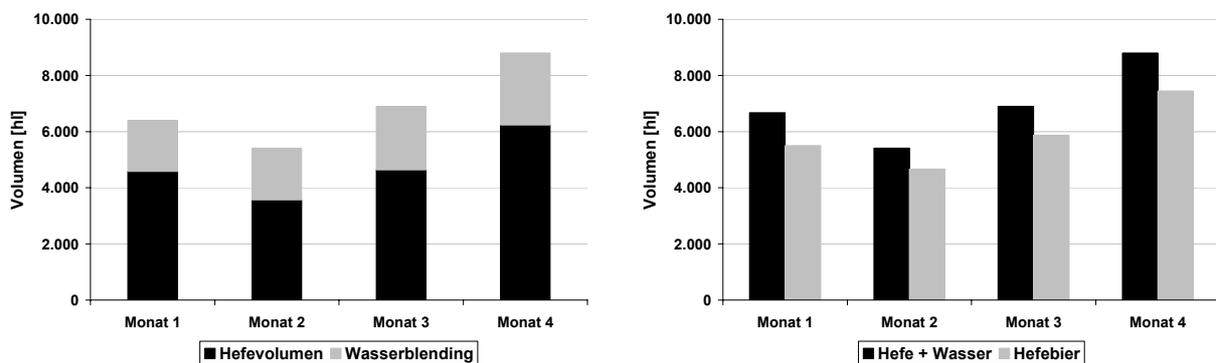


Abbildung 55: eingesetzte Hefe- bzw. Wassermengen (links) und die resultierenden Hefebiervolumina (rechts)

Die daraus errechnete mittlere Ausbeute an Hefebier liegt bei ca. 85 %. In Tabelle 40 sind die durchschnittlichen Analysendaten für die eingesetzte Hefe bzw. das gewonnene Hefebier dargestellt.

Tabelle 40: durchschnittliche Analysendaten für Hefe bzw. Hefebier

Parameter	Hefe	Hefebier	Verkaufshefe
Trockensubstanz / mas.-%	7,9	-	17
Stammwürze / mas.-%	-	8,3	-
pH	-	4,85–4,95	-
Temperatur / °C	3,5–4,3	3,2–4,4	3,5–3,9
Hefezellzahl / ×10 <sup>6</sup> Zellen/ml	-	0,17	-

### 5.3.4 Cross-Flow-Mikrofiltration

Bei der untersuchten Anlage handelte es sich um eine Cross-Flow-Mikrofiltrationsanlage mit Membranen aus α-Aluminiumoxid mit einer mittleren Porenweite von 0,3 µm. Die installierte Membranfläche betrug 26,8 m<sup>2</sup>. Die

Filtratleistung wurde auf 5,3 hl/h bei einer Filtrationstemperatur von 10 °C reguliert. Der Transmembrandruck variierte dabei bei Filtrationsbeginn zwischen 0,8 und 2,8 bar und bei Filtrationsende zwischen 0,8 und 4,0 bar.

#### 5.3.4.1 Hefephysiologie

Die Untersuchungen sollten den Einfluss des Trennsystems auf den physiologischen Zustand der Hefepopulation beschreiben. In Abbildung 56 sind die Ergebnisse für die Hefevitalität und die Hefeviabilität dargestellt.

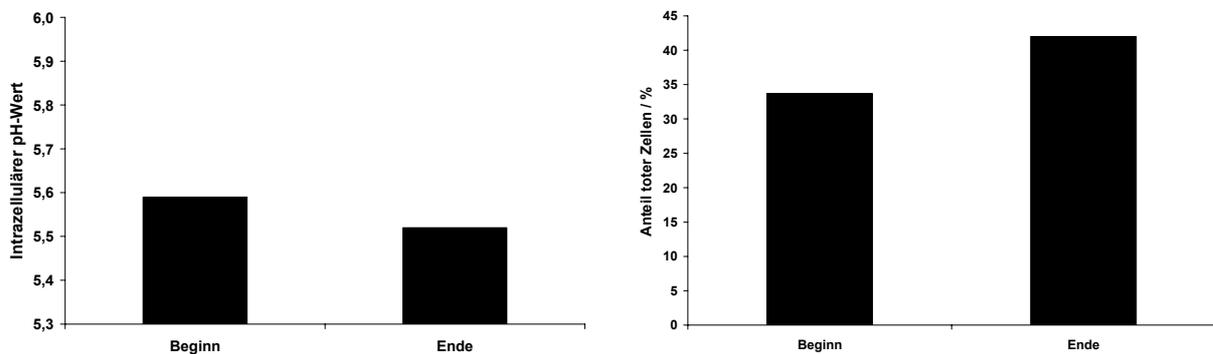


Abbildung 56: Verhalten der Hefevitalität (links) und der Hefeviabilität (rechts) zu Beginn und am Ende des Trennvorgangs

Daraus wird ersichtlich, dass eine gewisse Beeinträchtigung durch das verwendete Trennverfahren auftritt. Einschränkend diesbezüglich muss erwähnt werden, dass sich der physiologische Zustand der Ausgangshefe in einem kritischen Zustand befand, wodurch eine Beeinträchtigung „leichter“ als bei Hefepopulationen mit sehr gutem physiologischen Zustand erfolgt. Im Bereich der proteolytischen Aktivität konnte eine Abnahme über die Filtrationsdauer beobachtet werden. Aufgrund der geringen Porenweite der Membranen und den Fouling-Prozessen auf der Membranoberfläche scheint es sich hierbei um Abreicherungsprozesse der proteolytisch wirksamen Proteine zu handeln (cf. Kapitel 5.3.1.5). Abbildung 57 zeigt die Verläufe der gemessenen proteolytischen Aktivitäten.

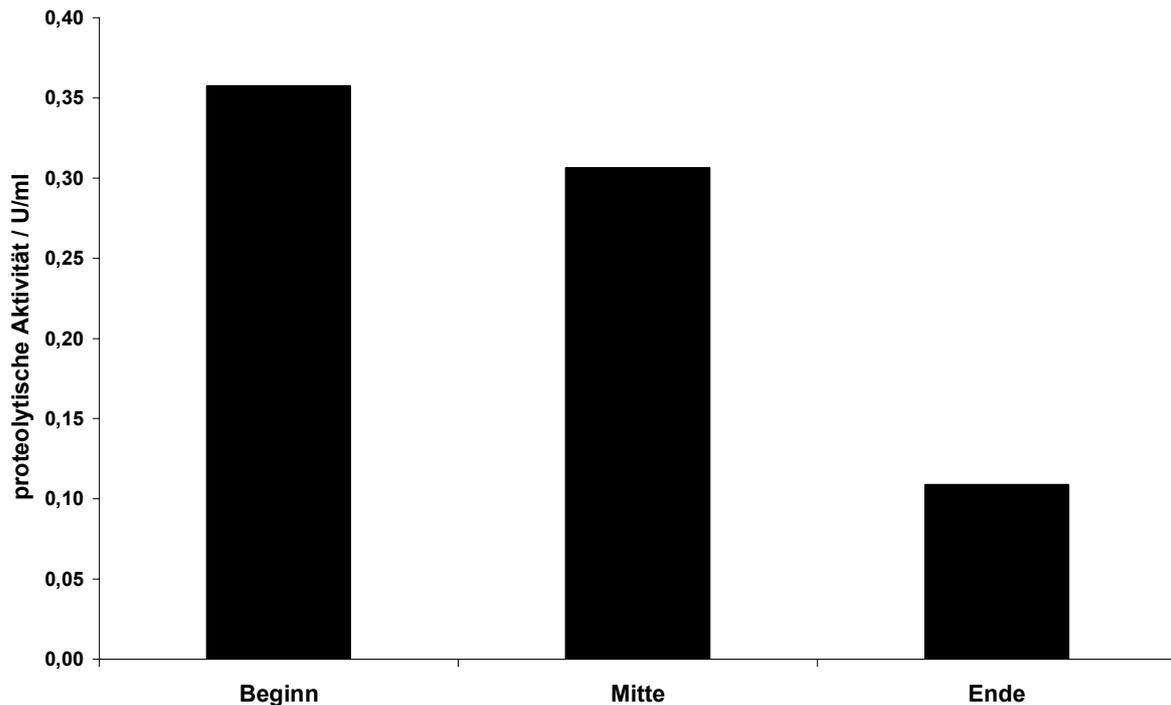


Abbildung 57: Verlauf der proteolytischen Aktivitäten über die Filtrationsdauer

**5.3.4.2 Verhalten der Indikatorsubstanzen im Hefebier**

Die beobachtete Abreicherung an Bierinhaltsstoffen über die Filtrationsdauer konnte auch im Bereich der klassischen proteinischen Fraktionen nachvollzogen werden. So nahm der Gehalt der Gesamt-N-Fraktion ebenso ab wie die MgSO<sub>4</sub>-fällbare Fraktion. Interessanterweise konnte die Abreicherung auch für den freien Aminostickstoff beobachtet werden (cf. Tabelle 41). Auch die hochmolekulare Fraktion des β-Glucans erfuhr eine deutliche Abreicherung (Daten nicht dargestellt, cf. Kapitel 5.3.5.2).

Tabelle 41: Verhalten der proteinischen Fraktionen über die Filtrationsdauer

Zeitpunkt	Gesamt-N / mg/100 ml	MgSO <sub>4</sub> -fällbar / mg/100ml	FAN / mg/100ml
Beginn	220,9	12,0	87,6
Mitte	197,3	10,1	79,6
Ende	156,8	9,8	53,9

Im Bereich der Bieraromastoffe konnten keine besonderen Auffälligkeiten über die Filtrationsdauer gemessen werden. Die Indikatorverbindungen Heptanol-1 und Decansäure waren aufgrund der kritischen Hefephysiologie allerdings insgesamt deutlich erhöht (cf. Abbildung 58).

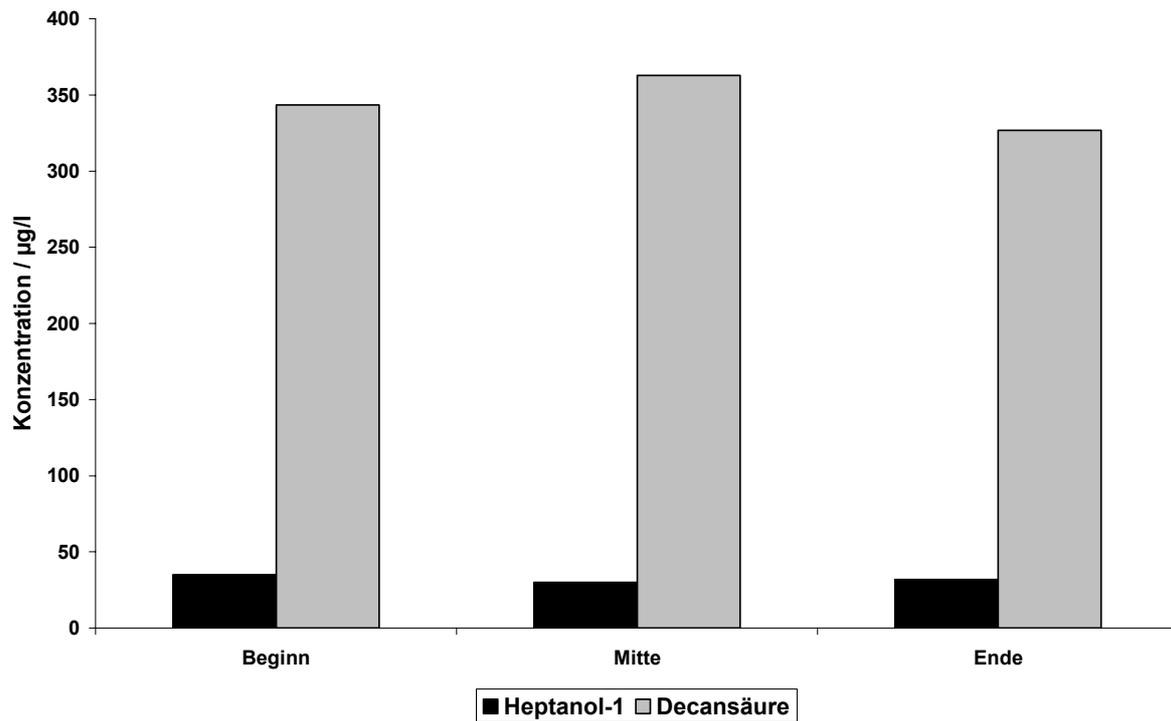


Abbildung 58: Verhalten der Indikatorsubstanzen über die Filtrationsdauer

### 5.3.4.3 Sensorische Untersuchungen

Für die sensorischen Untersuchungen wurde ein vereinfachtes Verkostungsschema gewählt, da das endgültige Verkostungsschema für Hefebiere noch nicht vollständig entwickelt war. Deutlich zu erkennen war die hefige Note, wohingegen die angenehmen fruchtigen, blumigen Aromen fast vollständig unterdrückt waren (*cf.* Abbildung 59).

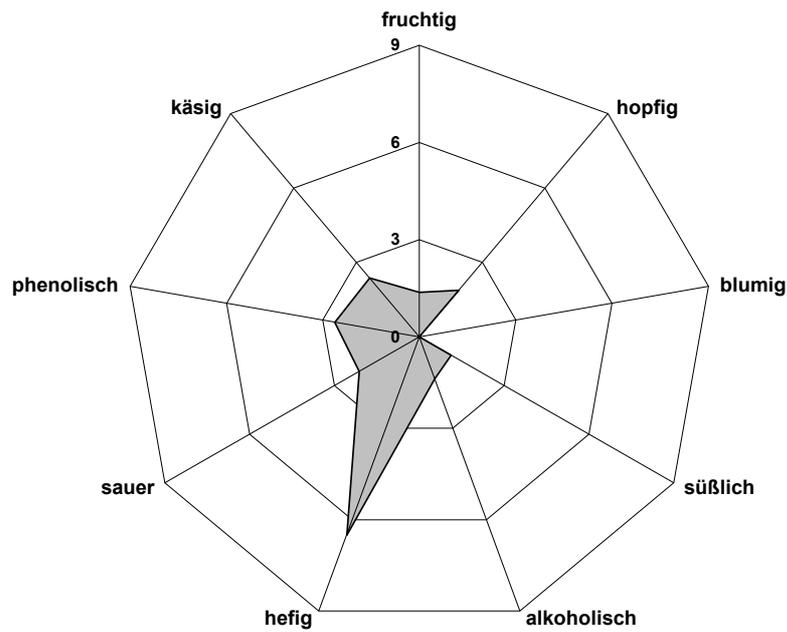


Abbildung 59: Profilprüfung für das untersuchte Hefebier

### 5.3.4.3 Wirtschaftliche Betrachtungen

Zur wirtschaftlichen Betrachtung wurden die Trockensubstanzen bestimmt und anschließend über Gleichung 2.2 (cf. Kapitel 2.2.1) die Ausbeute berechnet. Tabelle 42 zeigt die ermittelten Werte.

Tabelle 42: Bestimmung der Ausbeute der Hefebierrückgewinnung durch CMF

DiFS / %	ZuFS / %	E <sub>w</sub> / %	Ausbeute / %
20	11,6	2,28	47,4

### 5.3.4.4 Ergänzende Untersuchungen im Bereich CMF

In einer anderen Brauerei wurde ebenfalls das Verhalten der Bierinhaltsstoffe während der Filtrationsdauer untersucht. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 101 und Tabelle 102). Dabei konnte im Gegensatz zur vorhergehenden Untersuchung eine erkennbare Beeinträchtigung des Bieres durch die Membranfiltration beobachtet werden. In Abbildung 60 sind die Ergebnisse für die Indikatorsubstanzen für Hefebiere dargestellt.

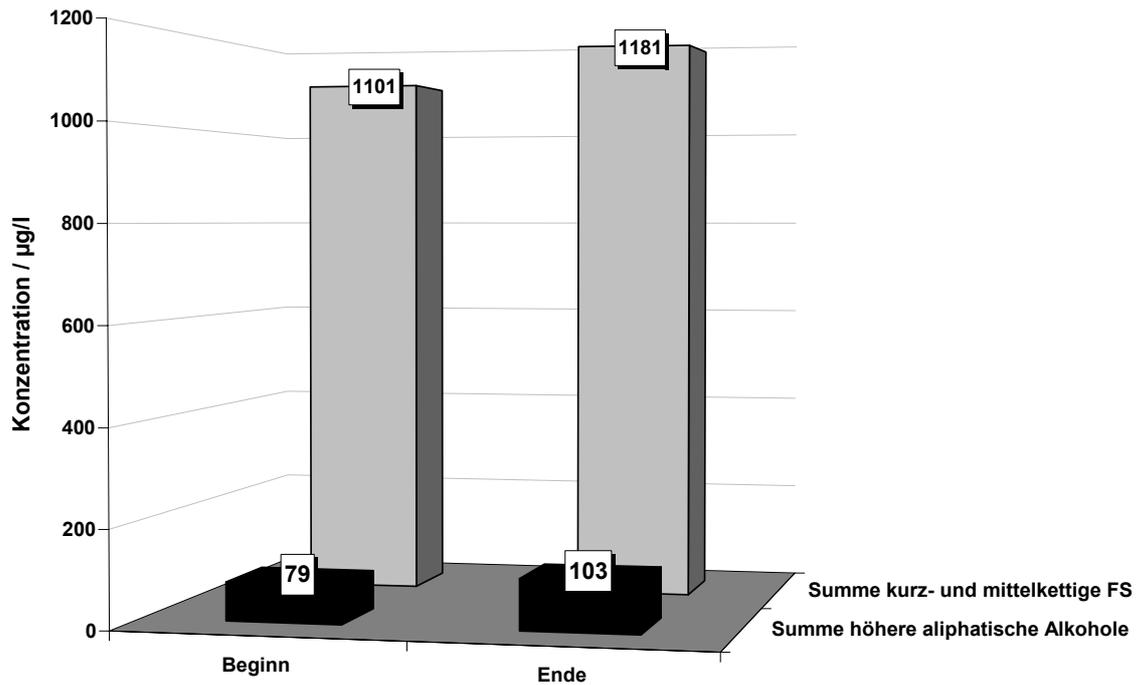


Abbildung 60: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren während der Filtrationsdauer

Die dabei ebenfalls untersuchten Aminosäuren zeigten die gleiche Tendenz wie die Indikatorsubstanzen. Deutlich im Gehalt nahm vor allem die gamma-Aminobuttersäure zu, die im Bier/Hefebier für einen adstringierenden Geschmack verantwortlich ist (cf. Abbildung 61).

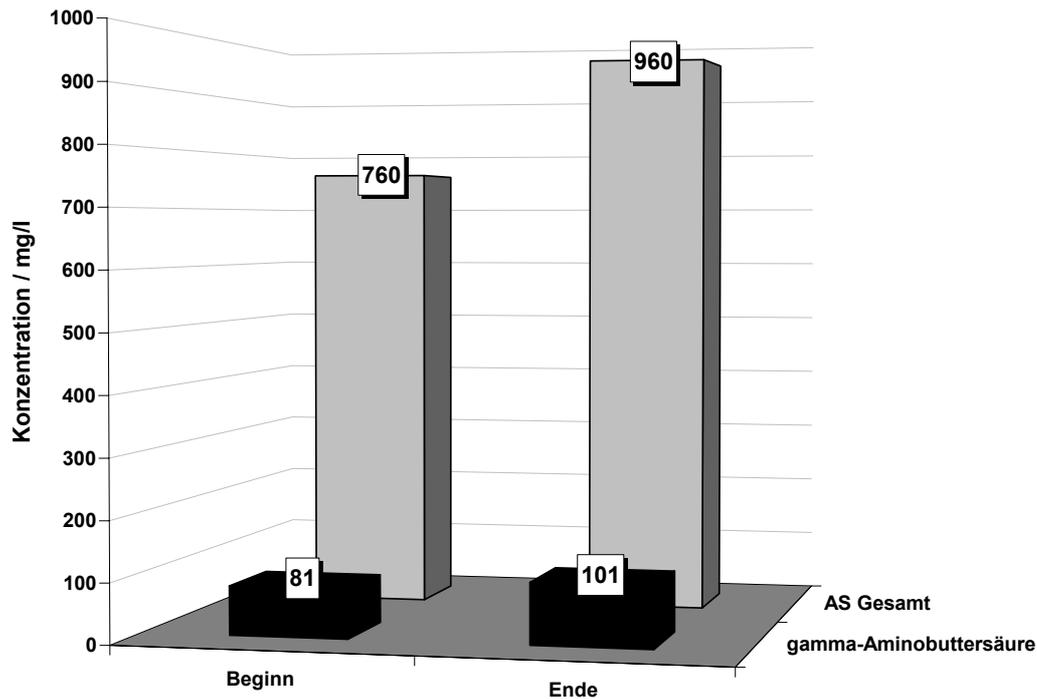


Abbildung 61: Verhalten der Aminosäuren während der Filtrationsdauer

### 5.3.5 Rotierender Scheibenfilter (RSF)

Im Rahmen der Untersuchungen mit einem rotierenden Scheibenfilter konnten insgesamt nur vier Versuchsreihen durchgeführt werden. Die verwendeten Probenbezeichnungen sind demzufolge 1–4. Die Anlage wurde geregelt auf eine transmembrane Druckdifferenz von 1,0 bar. Die Schergeschwindigkeit der Membranen betrug durchschnittlich 5,3 m/s. Der Permeatfluss wurde auf 100 l/h eingeregelt. Bei Versuchsreihe 4 wurden die installierten 0,35 µm-Membranen durch 0,20 µm-Membranen ersetzt. Da es sich bei diesem System um ein Batch-Verfahren handelt, wurden für die Bestimmung der Bierinhaltsstoffe Proben zu Beginn der Filtration und nach 11 Stunden Filtrationsdauer genommen, um den Einfluss der dauerhaften Scherbeanspruchung der Hefezellen zu untersuchen.

#### 5.3.5.1 Hefephysiologie

Besonderes Interesse galt dem Verhalten der Hefephysiologie während des Trennvorgangs. Es wurde erwartet, dass sich die relativ starke Beanspruchung der Hefezellen durch das gegenseitige „Verreiben“ negativ auf die Untersuchungsparameter „Hefeviabilität“ und „Hefevitalität“ auswirkt. In Abbildung 62

und Abbildung 63 sind die Daten für die vier durchgeführten Versuchsreihen dargestellt (cf. Anhang Tabelle 103).

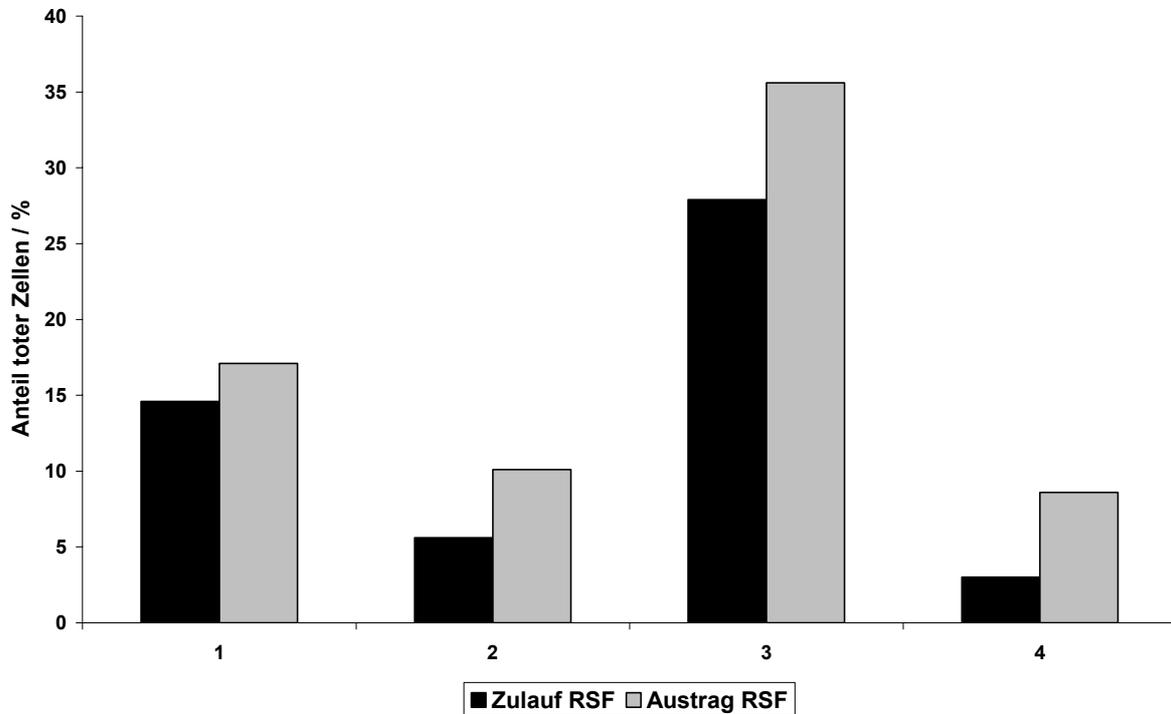


Abbildung 62: Verhalten der Hefeviabilität bei RSF-Zulauf und -Austrag

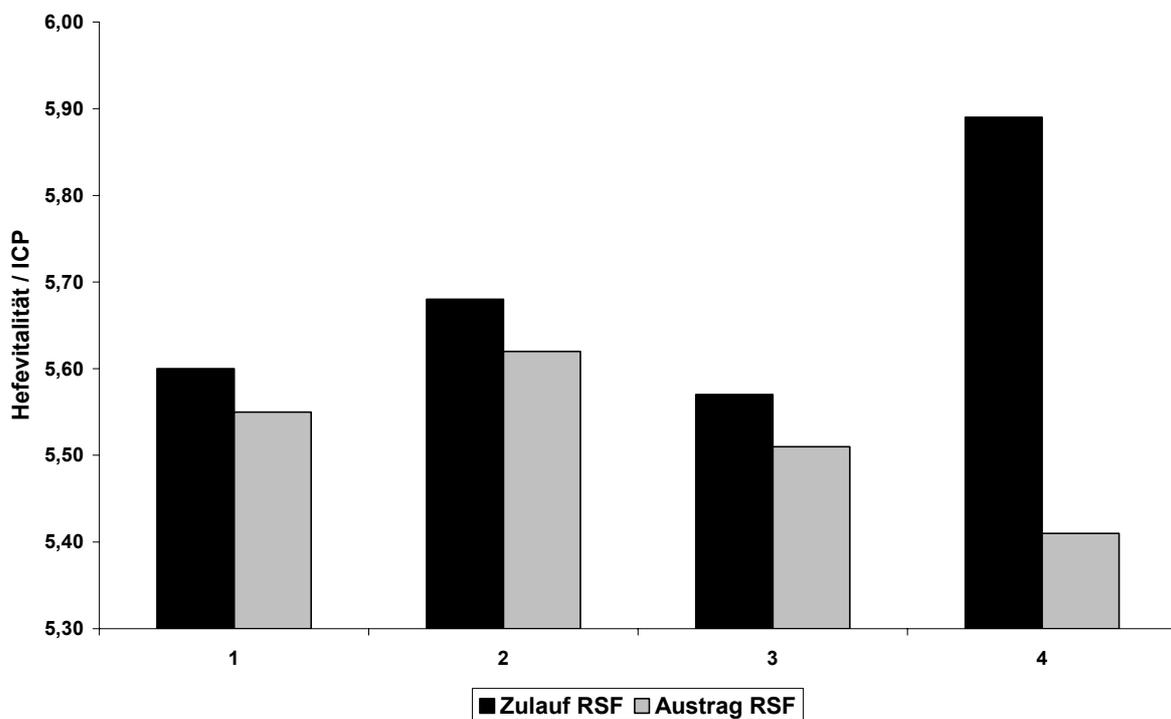


Abbildung 63: Verhalten der Hefevitalität bei RSF-Zulauf und -Austrag

Vor allem bei Versuchsreihe 4 wurde der schädigende Einfluss des Systems hinsichtlich der Hefephysiologie deutlich. Scheinbar werden durch die 0,20 µm-Membranen die Hefezellen überproportional geschädigt. Die beim rotierenden Scheibenfilter auftretenden Schergeschwindigkeiten sind ungefähr um den Faktor 2 höher als bei der konventionellen Crossflow-Mikrofiltration und ungefähr um den Faktor 50 höher als bei der Vibrations-Mikrofiltration [21]. Insgesamt betrachtet muss allerdings angemerkt werden, dass die hier zur Aufbereitung gelangten Hefesuspensionen in einem mittelmäßigen bis schlechten physiologischen Zustand waren, wodurch möglicherweise eine Beeinträchtigung „leichter“ möglich war, als bei Hefezellen mit einem sehr guten physiologischen Zustand. Zusätzlich zur Scherbeanspruchung wurden im Reaktorraum sehr hohe Temperaturen erreicht, wodurch eine zusätzliche Beeinträchtigung der Hefesuspension auftrat. Abbildung 64 zeigt einen typischen Verlauf der Temperatur über die Gesamtfiltrationsdauer. Die Filtrationsdauer lag dabei bei ca. 24 h.

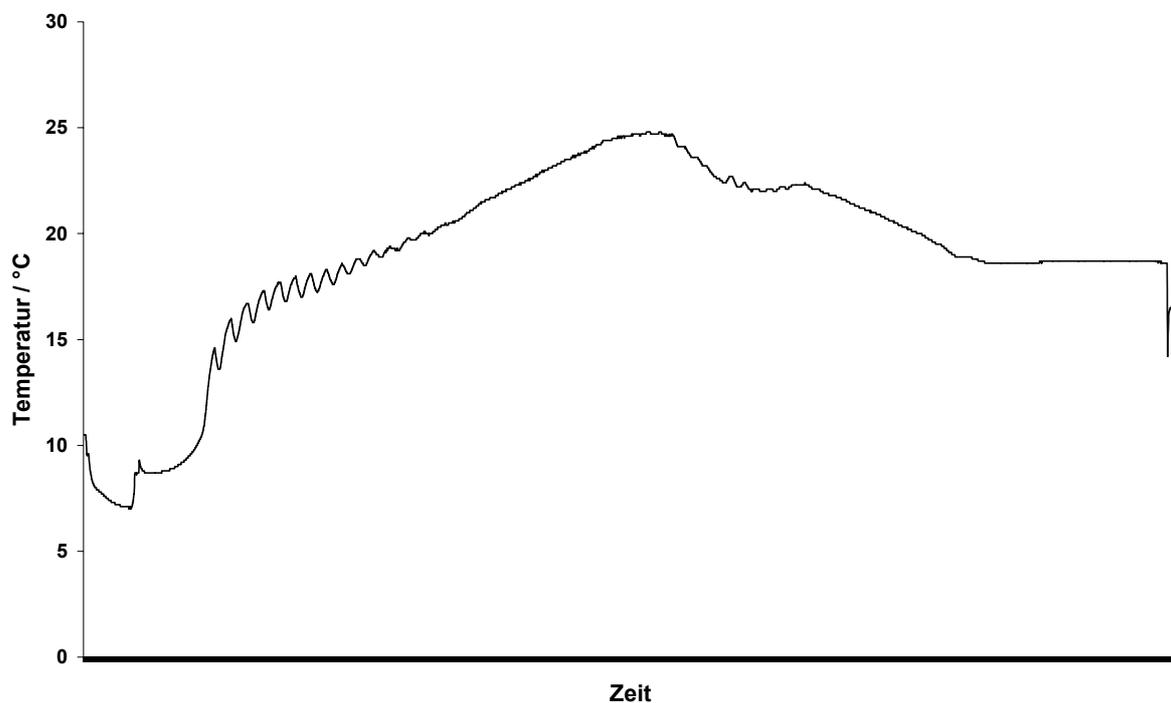


Abbildung 64: Temperaturverlauf über die Gesamtfiltrationsdauer

Wie aus der Abbildung zu ersehen ist, wurden Temperaturen von annähernd 25 °C erreicht. Dies war auf eine nicht ausreichende Kühlmöglichkeit des Retentats zurückzuführen.

Im Rahmen der Untersuchung der Hefevitalität wurde auch die Aktivität der Proteinase A bestimmt (cf. Abbildung 65). Interessanterweise konnte hier eine Abnahme über die Filtrationsdauer festgestellt werden. Die Molekülgröße der Proteinase A liegt im Bereich von 45–50 kDa (cf. Kapitel 5.3.1.5) und damit liegt die Vermutung nahe, dass hier eine Abreicherung aufgrund der Molekülgröße stattfand. Aufgrund der geringeren Porenweite bei Versuchsreihe 4 fand dementsprechend die größte Abreicherung statt.

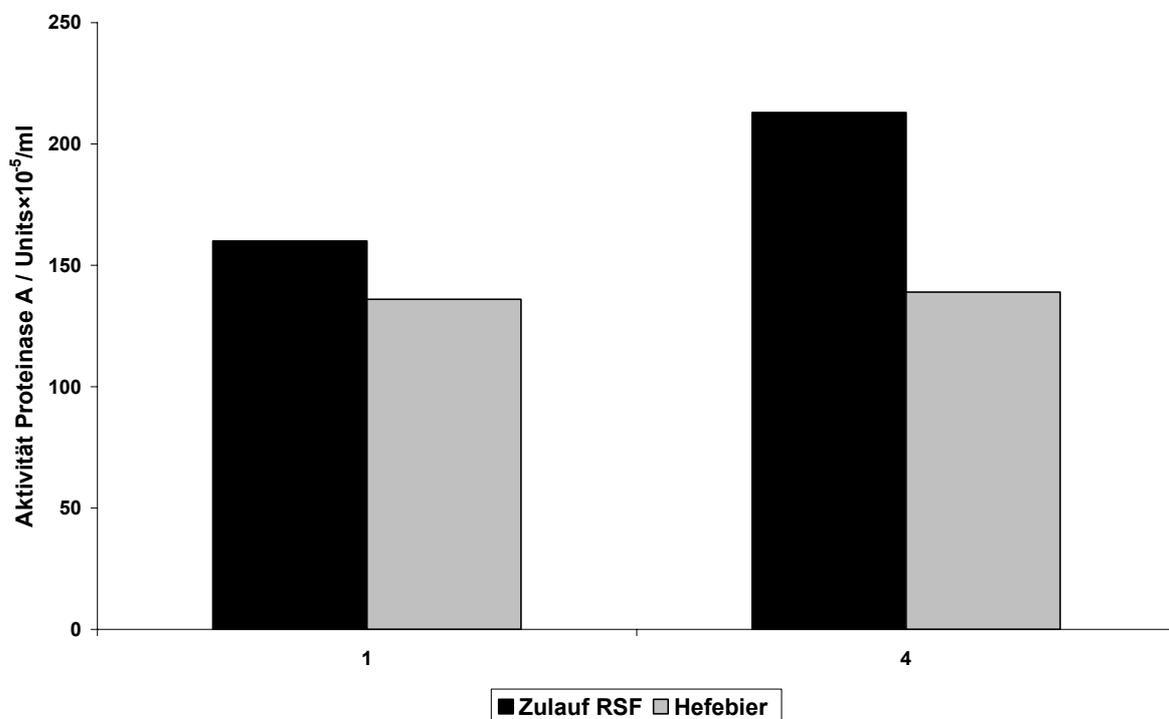


Abbildung 65: Veränderung der Aktivität der Proteinase A durch die Aufbereitung mittels RSF

### 5.3.5.2 Verhalten der Bierinhaltsstoffe im Hefebier

Aufgrund der schädigenden Einflüsse auf die Hefephysiologie war zu vermuten, dass auch im Bereich der Bierinhaltsstoffe negative Effekte auftraten. In Abbildung 66 sind die Hauptindikatoren für Hefealterung für die einzelnen Versuchsreihen dargestellt.

Versuchsreihe 3 wurde nicht mit aufgenommen, da hier nur die Werte zu Beginn der Filtration aufgenommen werden konnten.

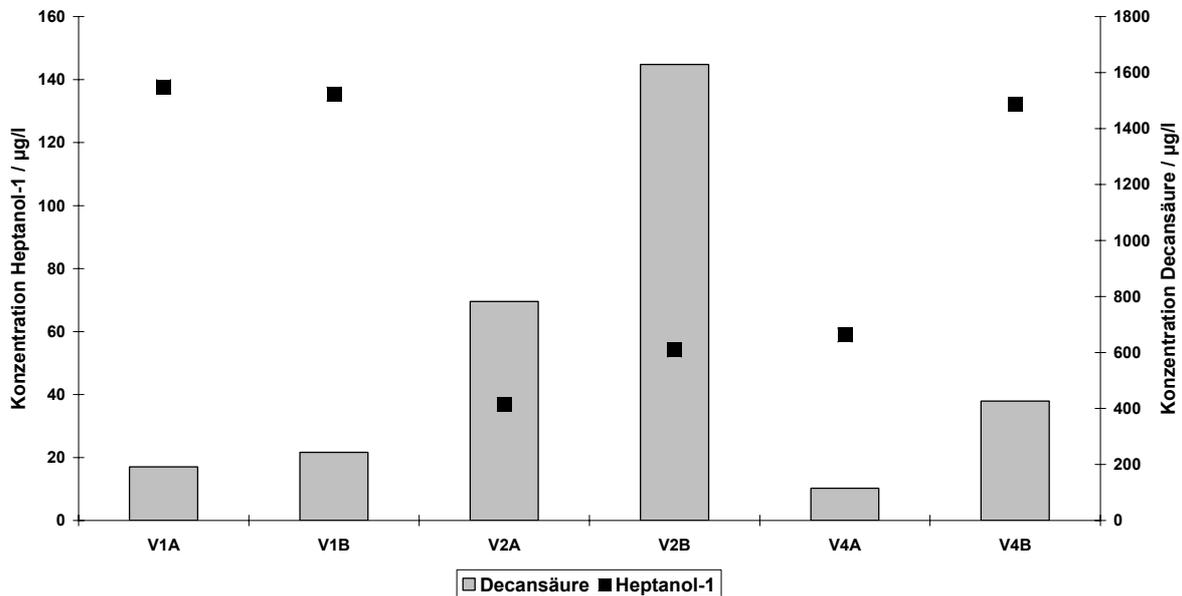


Abbildung 66: Verhalten der Indikatorsubstanzen „Heptanol-1“ und „Decansäure“ während der Aufbereitung

Insgesamt wurde eine teilweise deutlich Zunahme der beiden Indikatorsubstanzen gemessen. Vor allem bei Versuchsreihe 4 war diese Zunahme besonders deutlich ausgeprägt. Dies dürfte wiederum auf die geringere Porenweite der eingesetzten Membranen zurückzuführen sein. Die gesamten Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 104). Der oben angedeutete Cut-Off von höhermolekularen Bierinhaltsstoffen konnte auch für  $\beta$ -Glucan nachgewiesen werden. So wurden nach 11 Stunden Filtrationsdauer nur noch ca. 40 % der ursprünglich vorhandenen Menge an  $\beta$ -Glucan wieder gefunden. Verschiedene Autoren konnten Abreicherungen von  $\beta$ -Glucan von bis zu 90 % durch die Membranfiltration feststellen [62, 72, 73].

### 5.3.5.3 Sensorische Untersuchungen

Verkostet wurden jeweils Hefebierproben, die zu Beginn der Filtration und kurz vor Ende der Filtration genommen wurden. Die in Abbildung 67 dargestellten Verkostungsergebnisse zeigen die jeweiligen Mittelwerte der beiden Probenreihen. Auffällig in diesem Rahmen sind die Unterschiede im Bereich der Aromaeindrücke „grüner Apfel/stechend“ und „lösungsmittel“. Hier wurden geringere Intensitäten für die Hefebierproben, die gegen Ende der Filtration genommen wurden, wahrgenommen. Die übrigen Aromaeindrücke verhalten sich weitgehend ähnlich. Die zugehörigen Rohdaten sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 105).

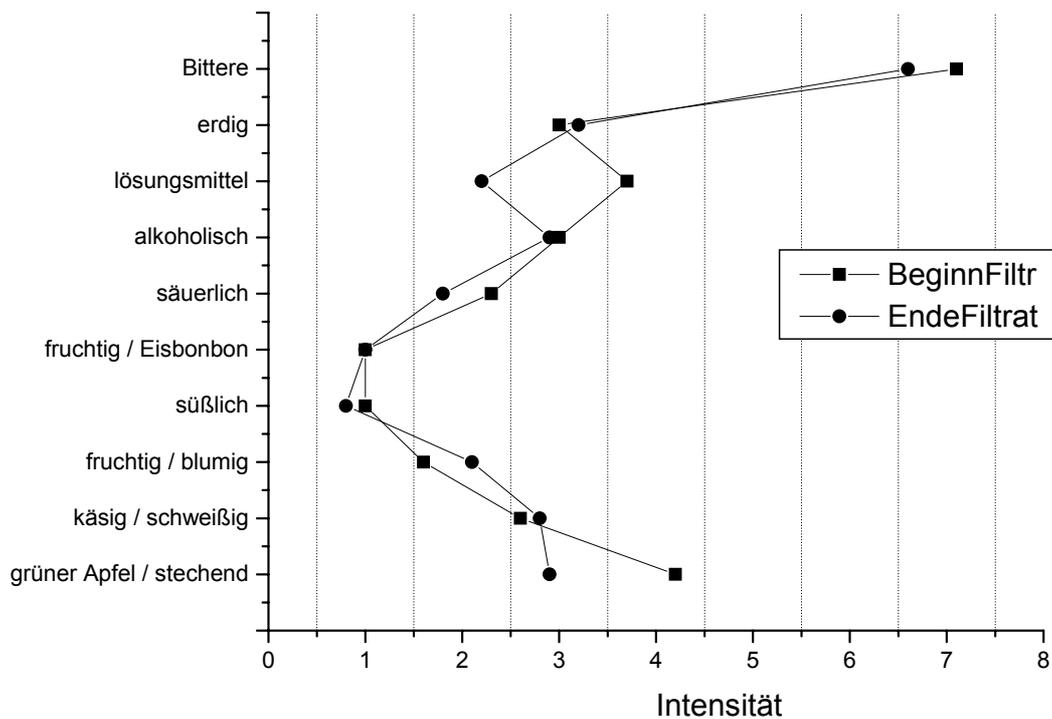


Abbildung 67: Verhalten der Aromaeindrücke zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Probenahme

### 5.3.5.4 Wirtschaftliche Betrachtungen

Die Trockensubstanzgehalte beim RSF-Zulauf lagen zwischen 6,3 und 11 mas.-%. Die resultierenden TS-Gehalte im RSF-Austrag erreichten Werte bis 16,6 mas.-%.

Die erreichbaren Trockensubstanzgehalte im RSF-Austrag liegen im Bereich der in der Literatur angegebenen Gehalte für Membranfilteranlagen [118]. Aufgrund der sehr geringen Trockensubstanzgehalte im Zulauf konnten sehr gute Ausbeuteergebnisse erzielt werden. Die Ausbeute lag durchschnittlich bei einem Wert von 56,28 %.

Die Daten zur Berechnung der durchschnittlichen Ausbeute sind in Tabelle 43 zusammengestellt. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 106).

*Tabelle 43: Bestimmung der durchschnittlichen Ausbeute der Hefebierückgewinnung durch Dekantierzentrifugen*

ZuFS / mas.-%	DiFS / mas.-%	Ew / mas.-%	Ausbeute / %
8,38	14,68	3,51	56,28

## 5.4 Untersuchungen zum Einfluss der Dosage von Prozessbieren im Sudhausbereich

### 5.4.1 Dosage von Vor-, Zwischen- und Nachlauf (VZNL) zum Einmaischen

Für diese Versuchsreihe wurde VZNL aus einer Brauerei in verschiedenen Volumenanteilen zum Einmaischen dosiert. In Tabelle 44 sind die verwendeten Probenbezeichnungen dargestellt. Die Analysendaten des verwendeten Malzes und die Produktionsbedingungen sind in Kapitel 4.1 beschrieben. Die Analysendaten des VZNLs sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 107).

*Tabelle 44: verwendete Probenbezeichnung*

Probe	Bezeichnung
A	Vergleich
B	10 Vol.-% des Hauptgusses wurden durch VZNL ersetzt
C	30 Vol.-% des Hauptgusses wurden durch VZNL ersetzt

#### 5.4.1.1 Verhalten des pH-Wertes während des Maischprozesses

Aufgrund des sauren Charakters der VZNLs wird durch deren Zugabe zum Hauptguss der pH-Wert gesenkt. Der zudosierte VZNL wies einen pH-Wert von 4,49 auf. Der Verlauf des pH-Wertes über die Maischdauer ist in Abbildung 68 dargestellt.

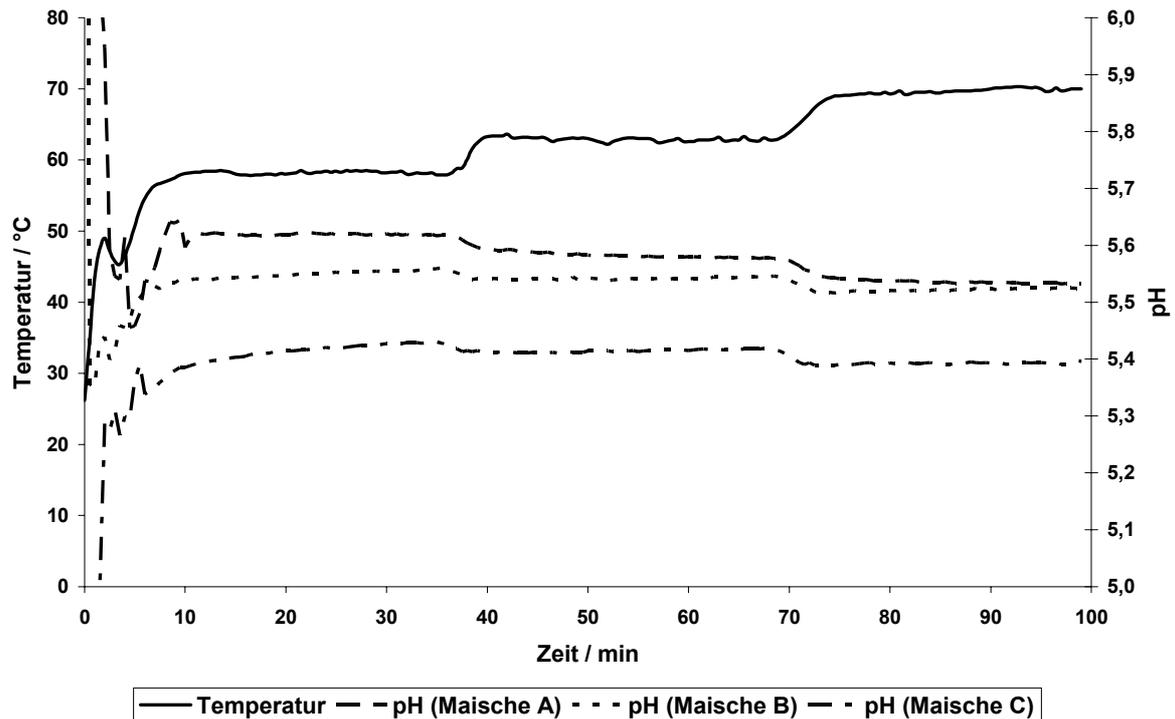


Abbildung 68: Verlauf des pH-Wertes während des Maischens

Die pH-Werte zu Beginn des Einmaischens und nach 10 Minuten Maischdauer zeigt Tabelle 45. Innerhalb von 10 Minuten stellte sich der pH-Wert auf einen stabilen Wert ein, der sich über die Maischdauer praktisch nicht mehr veränderte. Die Schwankungen in den Messkurven waren auf die Temperaturkompensation des pH-Meters zurückzuführen.

Tabelle 45: pH-Werte des Einmaischwassers und nach 10 Minuten Maischen

Probe	pH-Wert Einmaischwasser	pH-Wert nach 10 Minuten
Maische A	8,463	5,596
Maische B	7,578	5,537
Maische C	4,757	5,385

Durch die Zugabe von VZNL konnte der Maische-pH im Extremfall um ca. 0,2 pH-Einheiten gesenkt werden. Durch die Säuerung wurden verschiedene enzymatische Reaktionen beeinflusst. So wird durch die pH-Wert-Senkung vor allem die Aktivität der  $\alpha$ -Amylase gesenkt, deren pH-Optimum bei 5,6–5,8 liegt. Durch diese Verringerung der Aktivität der  $\alpha$ -Amylase wird auch die  $\beta$ -Amylase in ihrer Wirkung beeinträchtigt.

Im Bereich der Würzearomastoffe konnten die dosierten VZNLs anhand der höheren Alkohole nachgewiesen werden. Durch den Kochprozess wurden allerdings die

meisten der flüchtigen Bieraromastoffe, einschließlich des Ethanols, ausgedampft. Eine Ausnahme stellte 2-Phenylethanol dar, welches aufgrund seines hohen Siedepunktes (T=220 °C) nur eine Abnahme um ca. 30–40 % erfuhr.

Tabelle 46: Verhalten der höheren Alkohole während der Würzekochung

Aromastoffe / mg/l	gemessener Istwert		berechneter Sollwert		rel. Abnahme / %	
	B	C	B	C	B	C
3-Methyl-Butanol-1	0,27	0,48	2,55	7,65	89,1	93,8
2-Methyl-Butanol-1	0,08	0,13	0,81	2,43	90,4	94,7
2-Phenylethanol	0,69	1,82	1,00	3,00	31,4	39,2

### 5.4.1.2 Gärverlauf

Eindeutig scheint sich die Säuerung infolge der Zugabe von VZNLs auf die Gärgeschwindigkeit auszuwirken. Aufgrund der geringeren amylolytischen Enzymaktivitäten ist vermutlich das Angebot an vergärbaren Zuckern ungünstiger, wodurch sich die Gärzeiten der Verschnittwürzen gegenüber der Vergleichswürze um ca. 20-30 Stunden verlängerten.

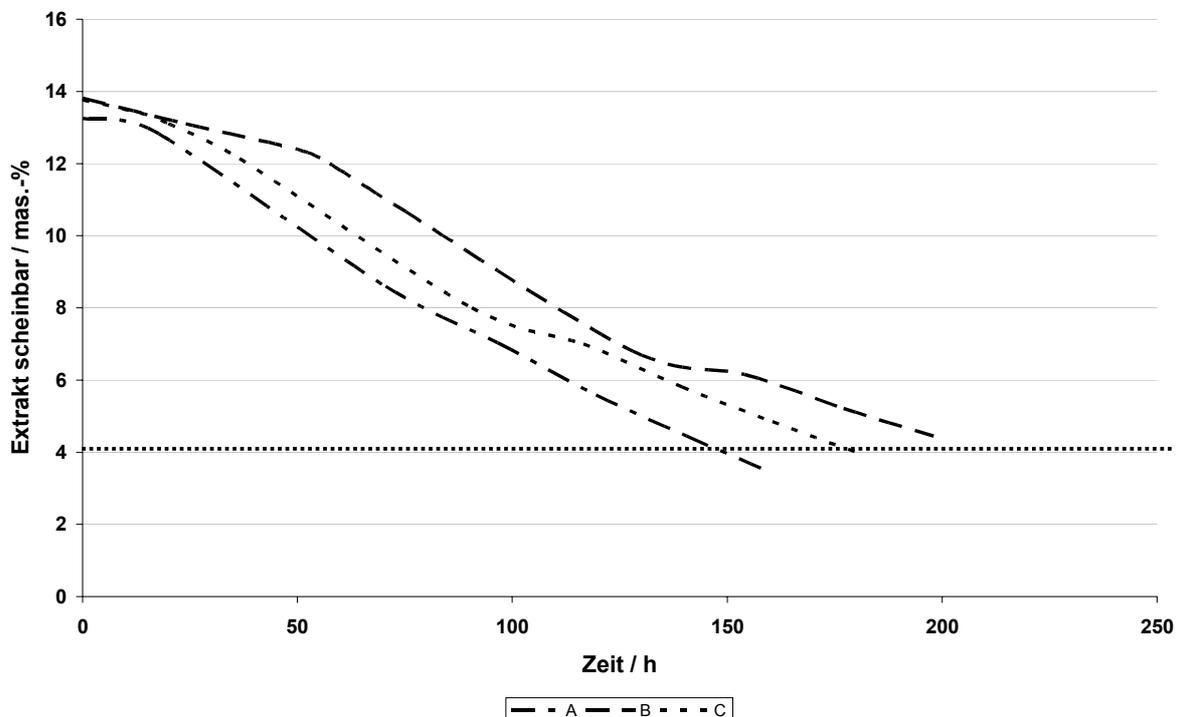


Abbildung 69: Gärdiagramm der Biere A–C

### 5.4.1.3 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere

Bei den chemisch-technischen Untersuchungen fielen vor allem der geringere Vergärungsgrad, die Farbzunahme und die höheren Polyphenolgehalte in den Verschnittbieren auf (cf. Tabelle 47). Diese Ergebnisse bestätigen weitestgehend die Untersuchungen von KÜMPEL [231]. Zu erwarten wäre zudem eine aufgrund des niedrigeren pH-Wertes in der Würze geringere Isomerisierung der  $\alpha$ -Säuren und damit verbunden ein niedrigerer Gehalt an Bitterstoffen im fertigen Bier.

Tabelle 47: Chemisch-technische Untersuchungsergebnisse der fertigen Biere der Versuchsreihen A–C

Probe	pH	Farbe	Polyphenole	Bitterstoffe	Schaum
A	4,70	6,0	172	28	233
B	4,77	6,1	195	21	244
C	4,75	6,6	214	28	213

Dies konnte lediglich für die Versuchsreihe B nachgewiesen werden, bei Versuchsreihe C konnte kein Unterschied zu Versuchsreihe A festgestellt werden. Theoretisch könnten durch die Dosage von VZNLs die Bittereinheiten um 4,5 EBC-Einheiten erhöht werden, so dass möglicherweise die durch das VZNL eingebrachten Bitterstoffe die geringeren Ausbeuten kompensierten<sup>8</sup>. Bedingt durch die höheren Gehalte an Polyphenolen ist auch die Farbzunahme der Versuchreihen B und C im Vergleich zu Versuchsreihe A zu erklären. Die pH-Wert-Absenkung in der Maische führte zu einer Annäherung der pH-Optima der Endo- ( $\text{pH}_{\text{Opt}}=3,9\text{--}5,5$ ) und Carboxypeptidasen ( $\text{pH}_{\text{Opt}}=4,8\text{--}5,6$ ), wodurch trotz der hohen Einmischtemperatur von 60 °C ein verstärkter Proteinabbau erfolgte. Dies führte insgesamt zu höheren Gehalten an freiem Aminostickstoff in den Versuchsreihen B und C. Bei Versuchsreihe C wurde darüber hinaus eine deutlich schlechtere Schaumstabilität festgestellt (cf. Abbildung 70).

<sup>8</sup> EBC-BE des Mutterbieres des dosierten VZNLs: 30

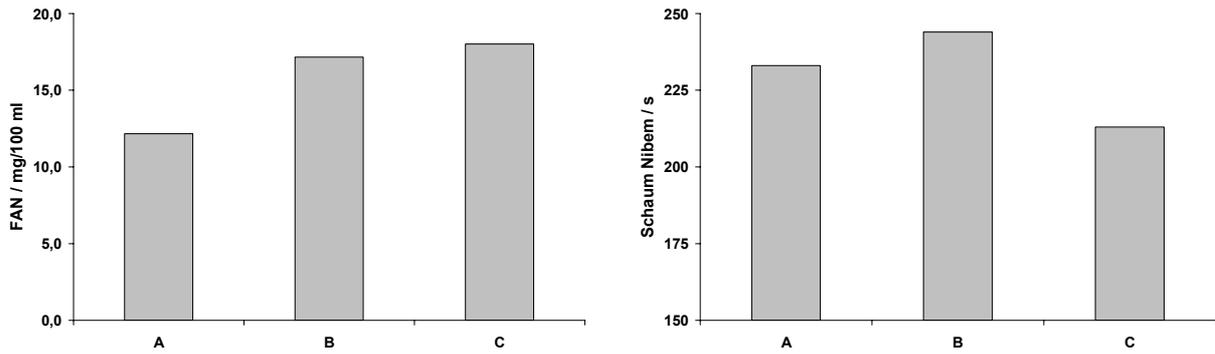


Abbildung 70: freier Aminostickstoff und Schaumhaltbarkeit der Versuchsreihen A–C

#### 5.4.1.4 Chromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Die durch die Dosage von VZNL verursachte Verzögerung in der Gärgeschwindigkeit führte zu insgesamt niedrigeren Gehalten an aromaaktiven Bierinhaltsstoffen (cf. Abbildung 71 und Abbildung 72). Die vollständigen Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 108).

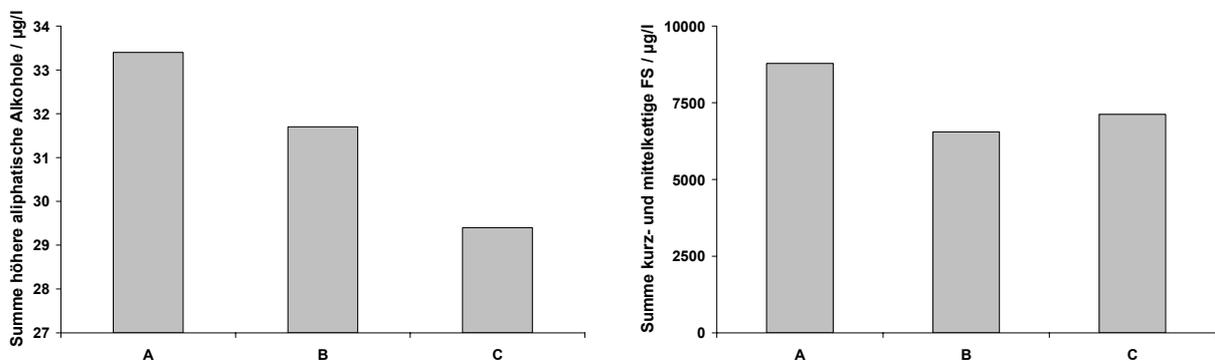


Abbildung 71: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole (links) und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren (rechts) im fertigen Bier

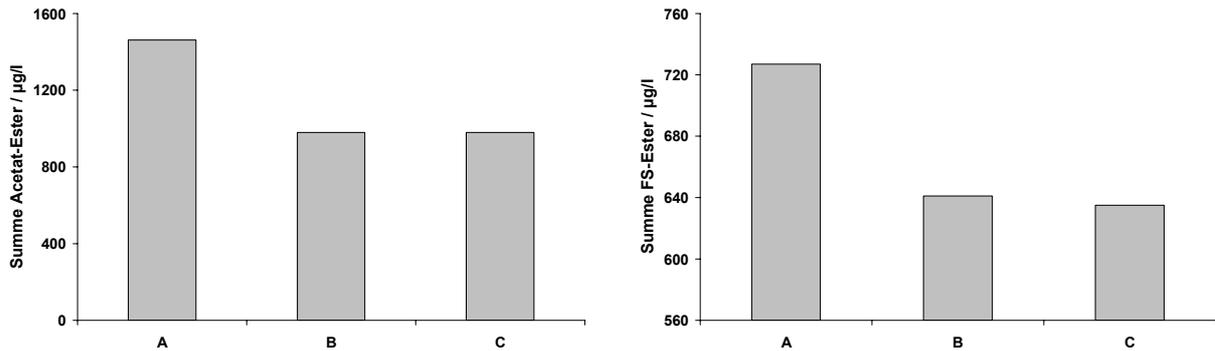


Abbildung 72: Verhalten der Acetat-Ester (links) und FS-Ester (rechts) im fertigen Bier

Im Bereich der Alterungskomponenten konnten für die Biere der Versuchsreihe B und C stetig fallende Gehalte an 2-Furfural gemessen werden. Vermutlich aufgrund der höheren Gehalte an freiem Aminostickstoff konnten insgesamt höhere Werte für die Strecker-Aldehyde gemessen werden. Tabelle 48 gibt einen Überblick über einige ausgewählte Alterungskomponenten.

Tabelle 48: Verhalten ausgewählter Alterungskomponenten in den fertigen Bieren der Versuchsreihe A–C

Aromastoff / µg/l	A	B	C
2-Furfural	40	36	33
3-Methylbutanal	12	14	14
Benzaldehyd	0,7	0,7	0,8
2-Phenylethanal	7,3	8,4	8,8

Insgesamt betrachtet jedoch sind die Unterschiede bei den Alterungskomponenten als nicht signifikant zu bezeichnen.

#### 5.4.1.5 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere

In Abbildung 73 sind die Ergebnisse der sensorischen Untersuchungen dargestellt. Sowohl im frischen als auch im forciert gealterten Zustand konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, obwohl die Ergebnisse der Aromastoffuntersuchungen eine bessere Alterungsstabilität der Versuchsreihe A aufgrund einer besseren Schutzausstattung mit aromaaktiven Verbindungen vermuten ließ. Durch varianzanalytische Betrachtungen wurden die nicht signifikanten Unterschiede bestätigt (cf. Anhang Tabelle 109 und Tabelle 110).

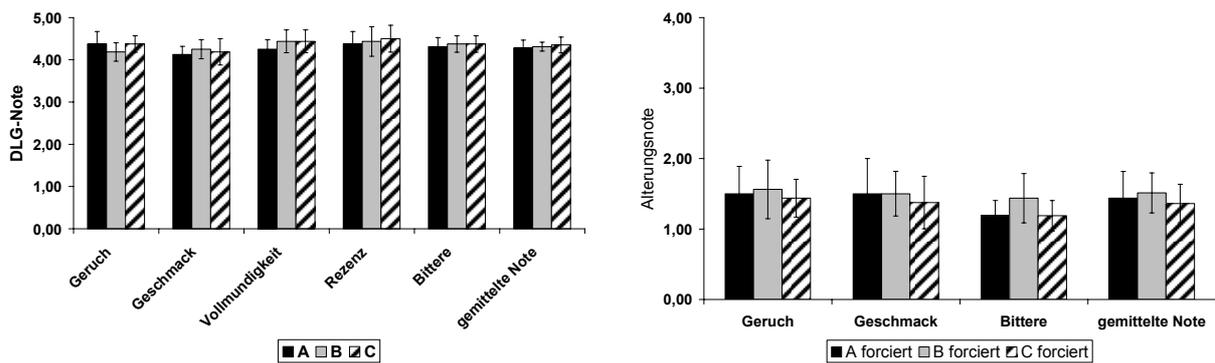


Abbildung 73: Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im frischen (links) und forciert gealterten Zustand (rechts)

### 5.4.2 Dosage von Prozessbieren in die Würzepfanne bzw. als Vorlage in den Whirlpool

Um den Effekt der Zugabe von Rück- beziehungsweise Hefebier im Sudhaus und die Differenzierung zwischen den beiden Zugabezeitpunkten herauszuarbeiten, wurden drei Sudreihen à 5 Sude nach identischem Sudprogramm durchgeführt. Bei allen Sudreihen wurden 10 % Rück- beziehungsweise Hefebier bezogen auf das Ausschlagsvolumen zugesetzt. Eine Ausnahme bildeten hierbei die Sude 3 und 4. Hier konnte nur eine Dosage von 8% Rückbier 1 verwirklicht werden. Der Vergleichssud wurde ohne jegliche Zugabe von Prozessbieren hergestellt. Die Ergebnisse wurden nach folgendem Schema hinsichtlich des Zugabezeitpunktes gemittelt.

Tabelle 49: Sudschema

	15' vor Kochende		Vorlage im WP		Vergleichssud
<b>1. Sudreihe:</b>	RB1/PF		RB1/WP		RB1/V.
<b>Rückbier 1</b>	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5
<b>2. Sudreihe:</b>	RB2/PF		RB2/WP		RB2/V.
<b>Rückbier 2</b>	Sud 6	Sud 7	Sud 8	Sud 9	Sud 10
<b>3. Sudreihe:</b>	HB/PF		HB/WP		HB/V.
<b>Hefebier</b>	Sud 11	Sud 12	Sud 13	Sud 14	Sud 15

Das eingesetzte Rückbier 1 stammt aus einer Charge exportierten Bieres, welches aufgrund der Überschreitung des Mindesthaltbarkeitsdatums von der Brauerei zurückgenommen wurde. Durch die langen Transportwege und dadurch ungünstigen Bedingungen war das Rückbier 1 einer starken Wärmebelastung ausgesetzt. Dies zeigte sich vor allem im hohen Gehalt an  $\gamma$ -Nonalacton (88  $\mu\text{g/l}$ ). Auch der Gesamtpolyphenolgehalt lag überdurchschnittlich hoch. In diesem Zusammenhang ist auch die Farbe mit 9,8 EBC zu nennen. Die höheren aliphatischen Alkohole und leichtflüchtigen Ester bewegten sich im üblichen Konzentrationsbereich für untergärige Biere. Bei Rückbier 2 handelte es sich um ein helles Vollbier, das zuvor eine Woche lang bei 40 °C forciert gealtert wurde, um eine thermische Belastung zu simulieren. Hinsichtlich der chemisch-technischen Analysendaten, der höheren Alkohole und leichtflüchtigen Ester wies dieses Bier keine Besonderheiten auf. Betrachtet man die Alterungsindikatoren, fallen die Wärmeindikatoren  $\gamma$ -Nonalacton und 2-Furfural mit einer Gesamtkonzentration von 99  $\mu\text{g/l}$  auf, was auf die oben beschriebene Forcierung zurückgeführt werden kann. Das verwendete Hefebier wurde mittels einer CMF-Anlage aus Überschusshefe gewonnen und bei 0°C im Lagerkeller gelagert. Der pH-Wert war mit 5,20 erhöht. Auch der FAN-Gehalt des Bieres lag mit 15,6 mg/100 ml über dem Normbereich. Das Hefebier zeigte eine geringere Belastung an Alterungsindikatoren als die beiden Rückbiere. Bei den Bieraromastoffen stachen besonders die hohen Gehalte an Heptanol mit 120  $\mu\text{g/l}$  und 2-Phenylethanol mit 32,14 mg/l heraus.

#### **5.4.2.1 Temperaturverlauf nach der Zugabe**

Durch den Prozessbierzusatz zur Kochung sank die Temperatur in der Pfanne. Die Aufheizzeit bis zur erneuten Kochung variierte zwischen 11 und 14 Minuten. Der Temperaturverlauf in der Würzepfanne nach der Zugabe ist in Abbildung 74 dargestellt.

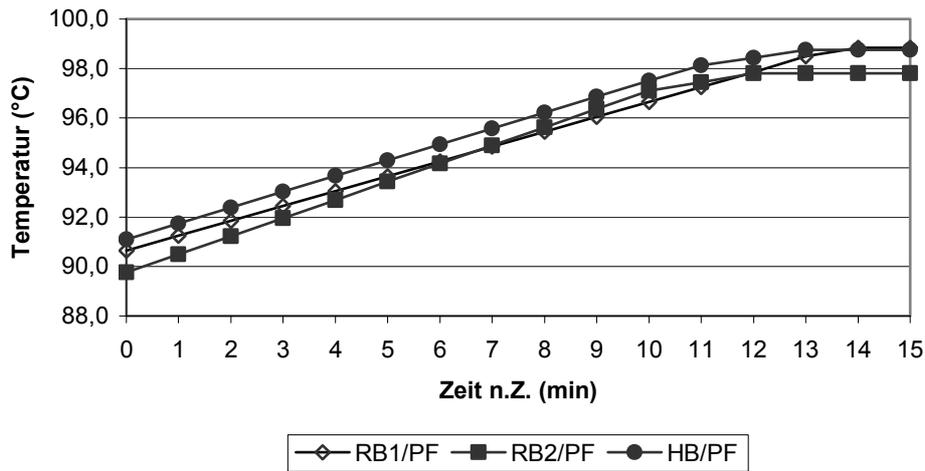


Abbildung 74: Temperaturverlauf nach der Zugabe zur Kochung

Bei den Suden, bei denen der Prozessbiereinsatz im Whirlpool erfolgte, zeigte sich der in Abbildung 75 dargestellte Temperaturverlauf.

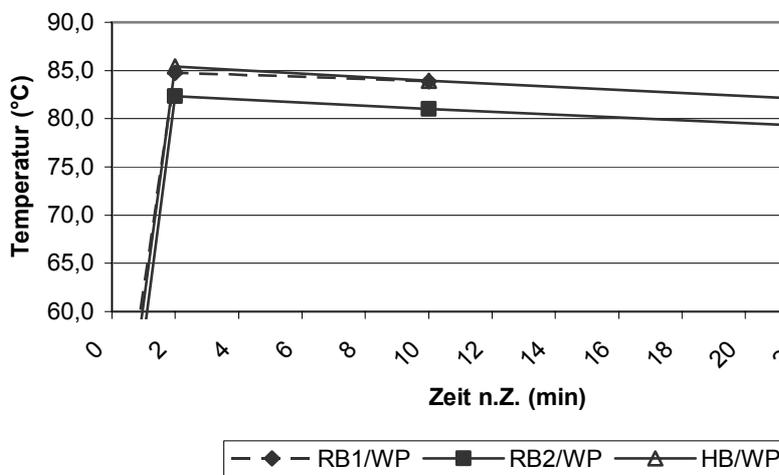


Abbildung 75: Temperaturverlauf nach der Vorlage im Whirlpool

Durch die Temperatursenkung im Whirlpool auf ca. 85 °C war vermutet worden, dass es zu einem „Zerfließen“ des Trubkegels kam. Dies wurde von COORS *et al.* beschrieben [232]. Der Trubkegel bildete sich allerdings bei allen Suden mit Prozessbierzugabe im Whirlpool sehr kompakt aus (cf. Abbildung 76).



Abbildung 76: Trubkegel im Whirlpool

### 5.4.2.2 pH-Wert

Der Zusatz der Prozessbiere resultierte in einem pH-Abfall. Erwartungsgemäß fiel dieser bei den Suden der 1. Sudreihe am stärksten aus, da das Rückbier 1 mit 4,10 den niedrigsten pH-Wert aufwies. Die geringste Veränderung wurde bei den Würzen der 3. Sudreihe festgestellt. Der pH-Wert des verwendeten Hefebieres betrug 5,20 (cf. Abbildung 77).

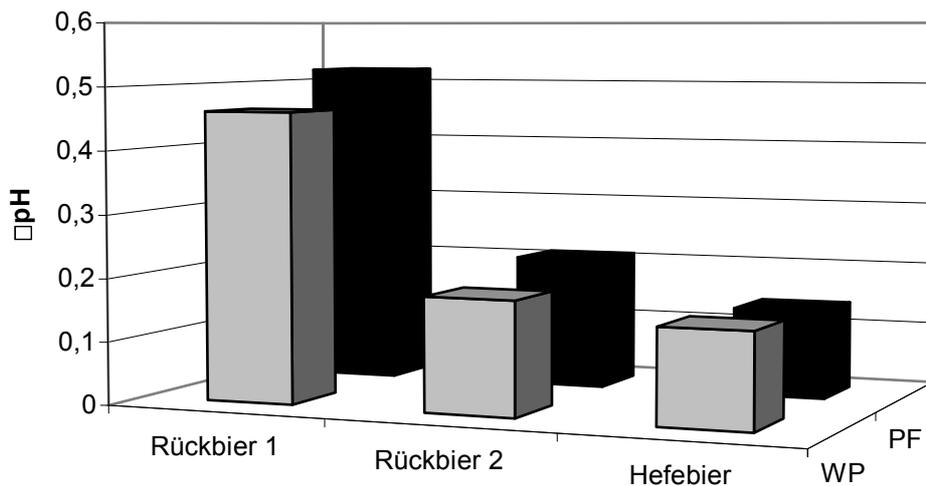


Abbildung 77: pH-Abfall durch die Prozessbierzugabe

**5.4.2.3 Veränderung der Würzearomastoffe**

Durch die Zugabe des Prozessbieres im Sudhaus tritt ein Verlust an Aromasubstanzen durch Verdampfung und Austragung mit dem Heißtrub auf. Am Beispiel von 2-Methylbutanol, 3-Methylbutanol sowie bei der 3. Sudreihe zusätzlich beim 2-Phenylethanol wurde dieser Effekt in Tabelle 50 nachvollzogen. Die theoretischen Werte errechneten sich aus der Zugabemenge und der Konzentration der jeweiligen Substanzen des entsprechende Rück- beziehungsweise Hefebieres. Dieser sollte sich also in der Würze wiederfinden lassen, falls kein Verlust durch beispielsweise Verdampfung eintreten sollte.

*Tabelle 50: Veränderung einiger ausgewählter Würzearomastoffe*

Aromastoff		Rückbier 1		Rückbier 2		Hefebier	
		Pf	WP	Pf	WP	Pf	WP
2-Methylbutanol	theoretisch / mg/l	1,05	0,84	1,16	1,16	1,54	1,54
	Istwert / mg/l	0,79	0,66	0,72	1,23	1,10	1,44
	$\Delta$ / %	25,2	21,5	37,5	-6,1	28,6	6,5
3-Methylbutanol	theoretisch / mg/l	3,89	3,11	4,19	4,19	4,24	4,24
	Istwert / mg/l	3,15	2,59	2,84	4,48	3,09	3,98
	$\Delta$ / %	19,1	16,7	32,3	-6,8	27,1	6,1
2-Phenylethanol	theoretisch / mg/l	-	-	-	-	3,21	3,21
	Istwert / mg/l	-	-	-	-	2,91	3,23
	$\Delta$ / %	-	-	-	-	9,3	-0,6

Bei der 1. Sudreihe zeigte sich wie erwartet eine stärkerer Verlust durch Zugabe zur Kochung im Vergleich mit den Suden, bei denen die Dosage des Rückbier 1 im Whirlpool erfolgte. Die prozentuale Abnahme fiel beim 2- Methylbutanol höher aus als beim 3- Methylbutanol, was auf den etwas niedrigeren Siedepunkt ersterer Substanz zurückzuführen ist. Betrachtet man die 2. Sudreihe, so ist zu erkennen, dass eine stärkere prozentuale Abnahme bei der Zugabe des Rückbier 2 in der Pfanne sowohl beim 2-Methylbutanol als auch bei 3-Methylbutanol auftritt. Bei dieser Sudreihe wurde die Whirlpoolrast um 15 Minuten verlängert. Durch die zusätzliche thermische Belastung der Sude 6 und 7 muss eine intensivere Ausdampfung stattgefunden haben. Gleiches gilt bei den mit HB/PF bezeichneten Suden der 3. Sudreihe. Auf den ersten Blick verwundert die angebliche Zunahme an

Würzearomastoffen bei der Vorlage des Rückbier 2 im Whirlpool. Hierfür sind mehrere Faktoren verantwortlich:

- Bei der 2. Sudreihe wurde die Whirlpool-Heizung vor dem Befüllen ausgeschaltet, so dass sich während der Whirlpool-Rast tiefere Temperaturen einstellten als bei der 1. Sudreihe und damit eine geringere Ausdampfung erfolgte.

*Tabelle 51: Temperaturen bei der Whirlpool-Rast*

Sud		Höchsttemperatur (°C)	Temperatur Ende (°C)
RB1/WP	Sud 3	85,0	84,1
	Sud 4	84,5	83,7
RB2/WP	Sud 8	82,1	78,1
	Sud 9	82,6	79,5

- Die Konzentration der betrachteten Aromastoffe lag im Rückbier 2 höher als im Rückbier 1, wodurch auch ein höherer Eintrag in die Würze stattfand.
- Hierbei muss auch die Analysegenauigkeit beachtet werden. Die auftretende Ungenauigkeit bei der Bestimmung der beiden Substanzen fällt besonders ins Gewicht, da es sich hier nur um geringe Unterschiede handelt.

Die Sude der 3. Sudreihe wiesen dieselben Tendenzen auf wie diejenigen der 2. Sudreihe. Die prozentuale Abnahme des 2-Phenylethanol's fiel wie erwartet aufgrund des wesentlich höheren Siedepunktes geringer aus.

#### **5.4.2.4 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere**

Durch die Restbierzugabe wurden die einzelnen Sude verdünnt. Da zusätzlich noch ein Extraktverlust auftrat, unterschieden sich die Biere hinsichtlich ihrer Stammwürze. Die Alkoholgehalte wiesen daher die gleiche Tendenz auf wie die Stammwürzgehalte (cf. Abbildung 78).

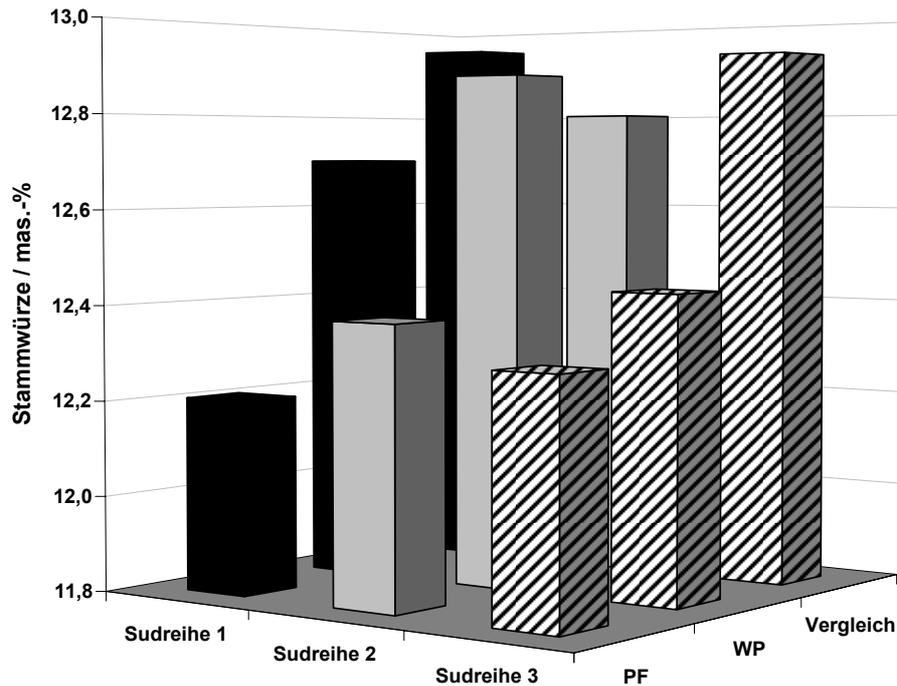


Abbildung 78: gemittelte Stammwürzegehalte der drei Sudreihen

Bei den pH-Werten und der Farbintensität zeigten sich keine Unterschiede zwischen den Vergleichssuden und den jeweiligen Suden, bei denen ein Prozessbierzusatz erfolgte. Wie oben beschrieben, bewirkte die Dosage von Prozessbieren eine Absenkung des pH-Wertes der Würzen. Da die Löslichkeit der Polyphenole mit sinkendem pH-Wert abnimmt, resultierte dies in einer Verringerung des Gehaltes an Gesamtpolyphenolen und Anthocyanogenen. Aufgrund des tiefen pH-Wertes von Rückbier 1 fiel die Reduzierung des Polyphenolgehaltes der Biere der 1. Sudreihe daher am stärksten aus.

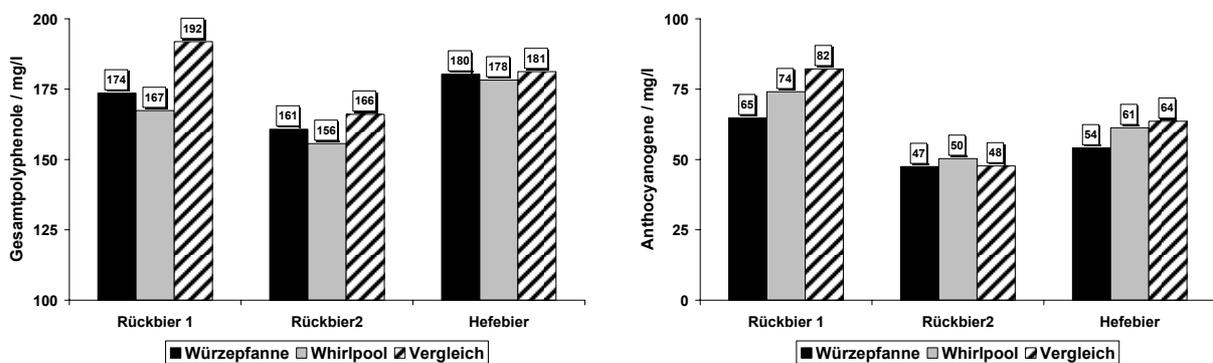


Abbildung 79: Verhalten der Gesamtpolyphenole (links) und der Anthocyanogene (rechts) in den 3 Sudreihen

Die Abnahme der Polyphenole und der Anthocyanogene fiel in der 3. Sudreihe am geringsten aus. Zum einen war dort die pH-Wert-Absenkung durch die Dosage des Hefebieres (pH=5,20) am geringsten und zum anderen sind erfahrungsgemäß die Gehalte dieser Substanzen im Hefebier durch Resorption deutlich erhöht, so dass hier eine Kompensation erfolgte.

Die Bitterstoffausbeute wurde aus den Vergleichssuden ermittelt.

**Tabelle 52: Bitterstoffausbeute**

Sud	Würzevolumen (l)	α-Säure-Gabe (mg)		Bitterstoffgehalt (mg/l)		Ausbeute
		HTU	TTE	theoretisch	gemessen	
Sud 5	56	4200	1394	99,9	26	26%
Sud 10	56	4200	1394	99,9	26	26%
Sud 15	56	4200	1394	99,9	26	26%

Legt man nun diese Bitterstoffausbeute zugrunde, so lässt sich die Abnahme der Bittereinheiten durch Zugabe von Prozessbier bei der 2. und 3. Sudreihe erklären. Die Würzevolumina der einzelnen Sude waren höher als bei den Vergleichssuden. Es trat also ein Verdünnungseffekt durch die Prozessbiergabe auf. Zusätzlich sollte auch der geringere pH-Wert die Bitterstoffausnutzung vermindert haben (cf. Abbildung 80).

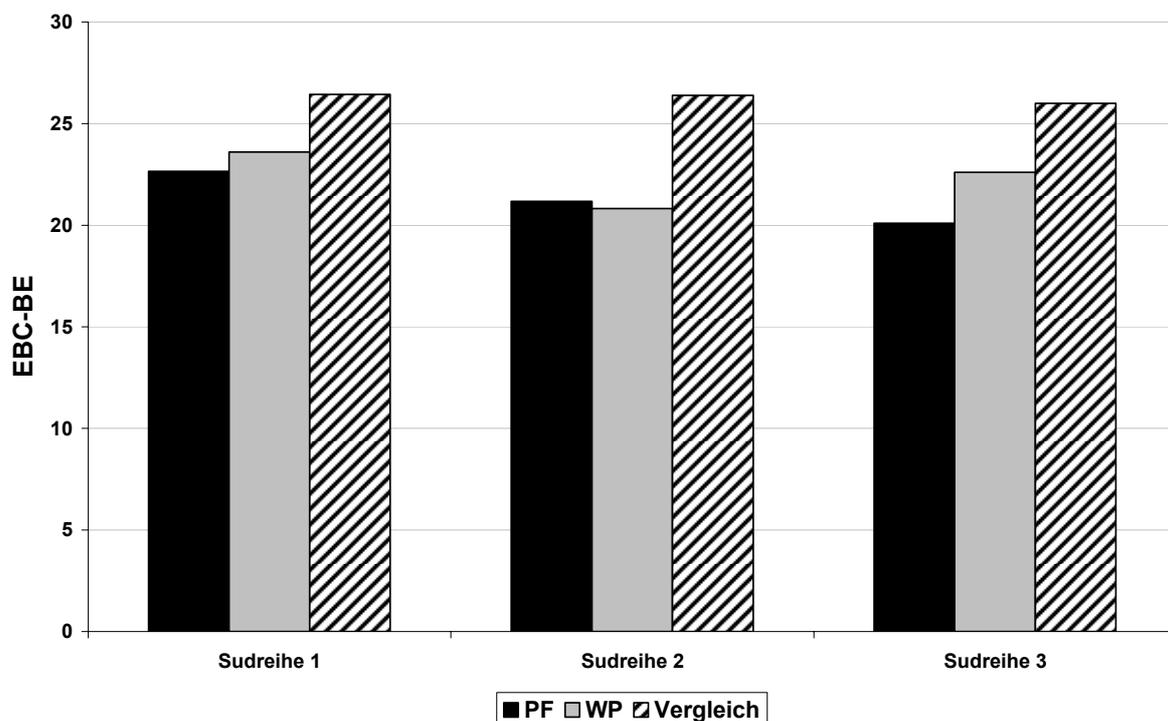


Abbildung 80: Verhalten der gemittelten Bitterstoffgehalte in den 3 Sudreihen

Die definierte Kalt-/Wärmebehandlung der Biere resultierte in einer geringeren Trübungsstabilität der Vergleichsbiere. Diese wiesen einen höheren Gehalt an trübungsaktiven Polyphenolen auf. Der Prozessbierzusatz verlängerte die chemisch-physikalische Haltbarkeit des Bieres. Eine Ausnahme bildeten die Biere der zweiten Sudreihe. Bei diesen Bieren wurde die laborinterne Messgrenze von 15 Wärmtagen überschritten, so dass hier keine Aussage möglich war. Die Vergleichssude hatten eine eindeutig bessere Schaumhaltbarkeit, wobei zwischen den verschiedenen Zugabezeitpunkten kein Unterschied diesbezüglich festgestellt werden konnte (cf. Abbildung 81).

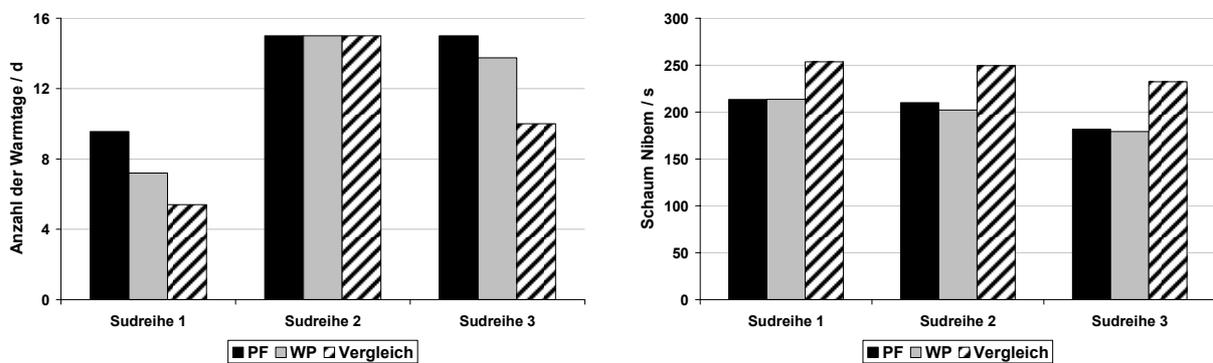


Abbildung 81: Verhalten der gemittelten kolloidalen Stabilität (links) und der gemittelten Schaumstabilität (rechts) der 3 Sudreihen

### 5.4.2.5 Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Die höheren Alkohole und leichtflüchtige Ester lagen bei allen Suden in der für helle Biere normalen Konzentration vor. Eine Beeinflussung durch den Zeitpunkt der Prozessbieregabe konnte nur beim Ethylacetat beobachtet werden. Eine frühere Zugabe resultierte in niedrigerer Ethylacetatkonzentration. Die kurzkettigen Fettsäuren Isovaleriansäure und Hexansäure erfuhren eine Verminderung. Die restlichen Bieraromastoffe zeigten keine signifikanten Unterschiede.

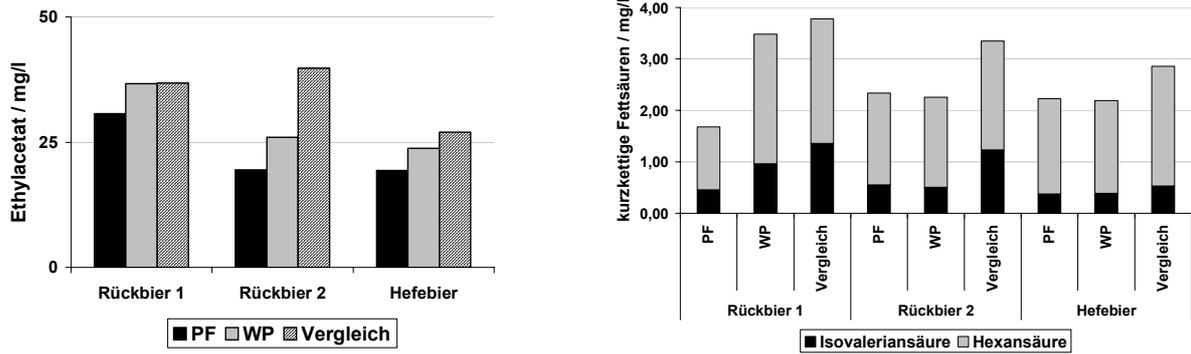


Abbildung 82: Verhalten der gemittelten Ethylacetatkonzentration (links) und der gemittelten Konzentration an kurzkettigen Fettsäuren (rechts) der 3 Sudreihen

Innerhalb der frischen und der forciert gealterten Biere der ersten beiden Sudreihen waren bei den Alterungsindikatoren keine Tendenzen in Abhängigkeit des Prozessbierzusatzes zu erkennen. Bei Sudreihe 3 wurden geringere Gehalte im forciert gealterten Zustand vor allem an 2-Furfural und damit auch in der Summe der Alterungskomponenten gemessen.

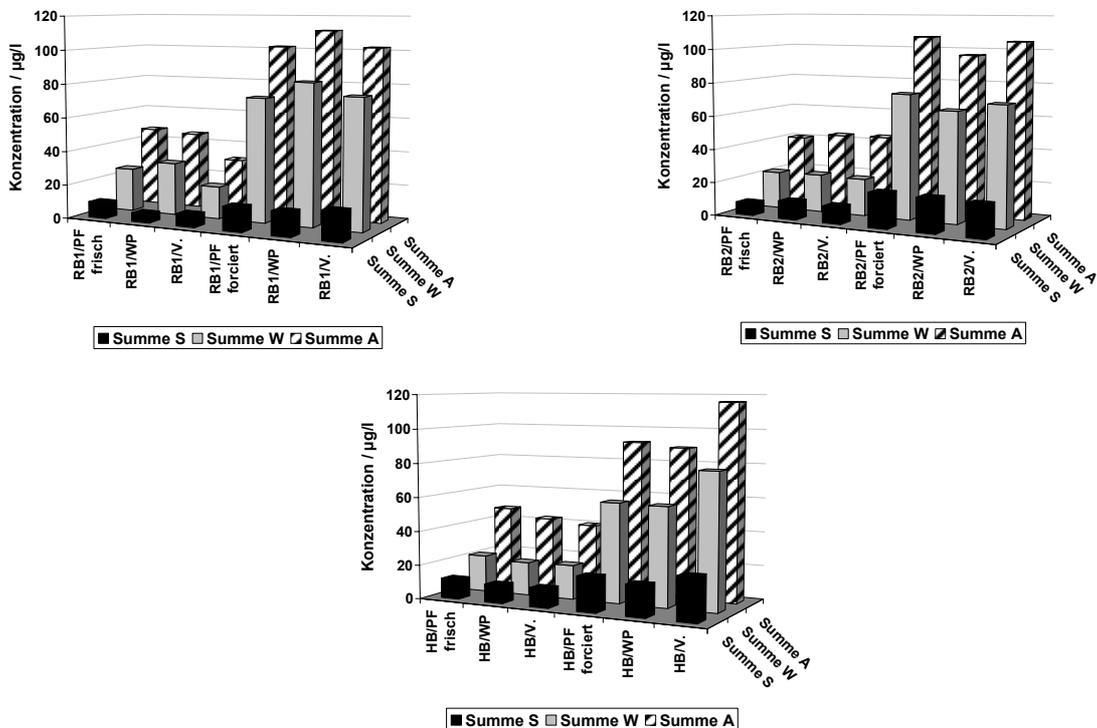


Abbildung 83: Verhalten der gemittelten Alterungskomponenten der 1. Sudreihe (links oben), der 2. Sudreihe (rechts oben) und der 3. Sudreihe (Mitte unten)<sup>9</sup>

<sup>9</sup> S = Sauerstoffindikatoren, W = Wärmeindikatoren, A = Alterungsindikatoren gesamt

**5.4.2.6 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere**

Die Verkostung nach dem Schema der DLG führte bei der ersten Sudreihe bei den forcierten Bieren zu einer signifikant schlechteren Beurteilung der Biere, bei denen die Rückbierzugabe im Whirlpool erfolgte. Bei den frischen Bieren dieser Sudreihe und bei den Bieren der zweiten Sudreihen konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Tendenziell schnitten die Biere mit Prozessbieranteil im Whirlpool schlechter ab. Die Zugabe von Hefebier allerdings resultierte in einer signifikant schlechteren Beurteilung der gealterten Biere. Auch hier zeigte sich obige Tendenz (cf. Tabelle 53).

*Tabelle 53: Signifikanztest für die gewichtete Note bei der DLG-Verkostung der 3 Sudreihen*

<b>1. Sudreihe</b>	<b>gewichtete Note</b>	
	frisch	forciert
PF – VERGLEICH	nicht signifikant	nicht signifikant
WP - VERGLEICH	nicht signifikant	<b>signifikant</b>
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant
<b>2. Sudreihe</b>	<b>gewichtete Note</b>	
	frisch	forciert
PF - VERGLEICH	nicht signifikant	nicht signifikant
WP - VERGLEICH	nicht signifikant	nicht signifikant
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant
<b>3. Sudreihe</b>	<b>gewichtete Note</b>	
	frisch	forciert
PF - VERGLEICH	nicht signifikant	<b>signifikant</b>
WP - VERGLEICH	nicht signifikant	<b>signifikant</b>
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant

Die frischen Biere der 1. Sudreihe und der 3. Sudreihe, die unter Prozessbierzusatz hergestellt wurden, wurden durch zwei Verkoster bezüglich der Alterung leicht beanstandet. Die Biere mit Prozessbierzusatz im Whirlpool schnitten im forcierten Zustand wie bei der DLG- Verkostung schlechter ab. Bei der 3. Sudreihe ergab sich bei den forciert gealterten Bieren ein signifikanter Unterschied hinsichtlich der gewichteten Note und der Akzeptanz zwischen den Bieren mit Hefebieranteil und dem Vergleichssud (cf. Tabelle 54).

Tabelle 54: Signifikanztest für die gewichtete Note und der Akzeptanz bei der Alterungsverkostung der 3 Sudreihen

1. Sudreihe	<i>frisch</i>		<i>forciert</i>	
	gewichtete Note	Akzept.	gewichtete Note	Akzept.
PF – V.	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
WP - V.	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	<b>signifikant</b>
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
2. Sudreihe	<i>frisch</i>		<i>forciert</i>	
	gewichtete Note	Akzept.	gewichtete Note	Akzept.
PF – V.	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
WP - V.	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant
3. Sudreihe	<i>frisch</i>		<i>forciert</i>	
	gewichtete Note	Akzept.	gewichtete Note	Akzept.
PF – V.	nicht signifikant	nicht signifikant	<b>signifikant</b>	<b>signifikant</b>
WP - V.	nicht signifikant	nicht signifikant	<b>signifikant</b>	<b>signifikant</b>
PF - WP	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant	nicht signifikant

Bei den letzten beiden Sudreihen wurde eine Rangordnungsprüfung im frischen Zustand durchgeführt um die Biere hinsichtlich ihres Gesamteindruckes in einer Rangfolge zu ordnen. Die Biere mit Prozessbieranteil wurden bevorzugt, wobei die Biere, bei denen die Zugabe in der Würzepfanne erfolgte den höchsten Rangplatz einnahmen. Es muss erwähnt werden, dass dieses Ergebnis nicht signifikant ist. Ebenso ergab sich kein signifikanter Unterschied durch einfachen Probenvergleich der Biere (cf. Tabelle 55 und Tabelle 56).

Tabelle 55: Rangordnungsprüfung der Sudreihen 2 und 3

	Rangplatz			Signifikanz
	1	2	3	
2. Sudreihe	Sud 6	Sud 8	Sud 10	nicht signifikant
3. Sudreihe	Sud 12	Sud 14	Sud 15	nicht signifikant

Tabelle 56: Einfacher Probenvergleich bei den Sudreihen 2 und 3

	Probenvergleich	Differenz der Rangsumme	Signifikanz
2. Sudreihe	Sud 6 – Sud 8	1	nicht signifikant
	Sud 6 – Sud 10	2	nicht signifikant
	Sud 8 – Sud 10	1	nicht signifikant
3. Sudreihe	Sud 12 – Sud 14	2	nicht signifikant
	Sud 12 – Sud 15	4	nicht signifikant
	Sud 14 – Sud 15	2	nicht signifikant

#### 5.4.2.7 Ergänzende großtechnische Untersuchungen zur Dosage von Prozessbieren im Heissbereich

In einer Brauerei wurden die anfallenden Rückbiere als Vorlage in den Whirlpool gegeben. Das Dosagevolumen betrug ca. 5 Vol.-% bezogen auf das Würzevolumen. Die verwendete Probenbezeichnung ist in Tabelle 57 aufgeführt. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 116, Tabelle 117 und Tabelle 118).

Tabelle 57: verwendete Probenbezeichnung

Probe	Bezeichnung
A	Vergleich
B	Vergleich + 5 Vol.-% Rückbier als Vorlage im Whirlpool
C	Vergleich 2
D	Vergleich 2 + 5 Vol.-% Rückbier als Vorlage im Whirlpool

Durch die Dosage dieses Prozessbieres kam es zu einer Abkühlung der Würze im Whirlpool, wodurch die thermische Belastung gesenkt werden konnte. Dies äußerte sich in geringeren Gehalten der beiden thermischen Würzeindikatoren 2-Furfural und 2-Acetyl-Furan (cf. Abbildung 84). Dieser Effekt konnte in den Pilotsuden nicht beobachtet werden. Dies lag vermutlich an den äußerst geringen Konzentrationen dieser beiden Indikatoren, so dass die auftretenden Unterschiede nicht gemessen werden konnten.

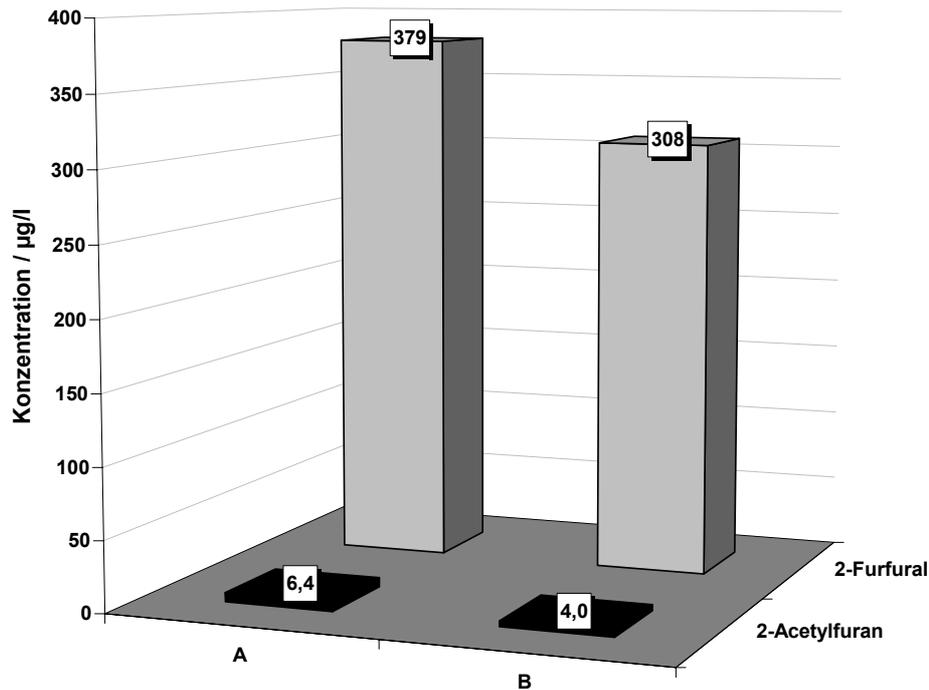


Abbildung 84: Verhalten der thermischen Würzeindikatoren in den Versuchsreihen A und B

Bei den chemisch-technischen Untersuchungen der fertigen Biere fielen vor allem die unterschiedlichen Gehalte an phenolischen Verbindungen auf. So wurden analog zu den Untersuchungen im Pilotmaßstab auch hier deutlich geringere Werte für die Gesamtpolyphenole als auch für die Anthocyanogene bei den Verschnittbieren gefunden. Tabelle 58 zeigt die Gehalte dieser Fraktionen.

Tabelle 58: Verhalten der phenolischen Substanzen in den Versuchsreihen A und B

Probe	Gesamtpolyphenole / mg/l	Anthocyanogene / mg/l
A	197	61
B	158	48

In diesem Zusammenhang ist möglicherweise auch die verbesserte kolloidale Stabilität des Verschnittbieres, für welches 6,6 Warmtage gegenüber 2,9 Warmtagen für das Vergleichsbier gemessen wurden.

Bei den Bieraromastoffe wurden keine größeren Auffälligkeiten festgestellt. Die Tendenz der geringeren thermischen Belastung konnte allerdings auch in den fertigen Bieren nachvollzogen werden. So zeigten die forciert gealterten Biere signifikant bessere Werte für 2-Furfural und damit auch für die Summe der Alterungskomponenten (cf. Abbildung 85).

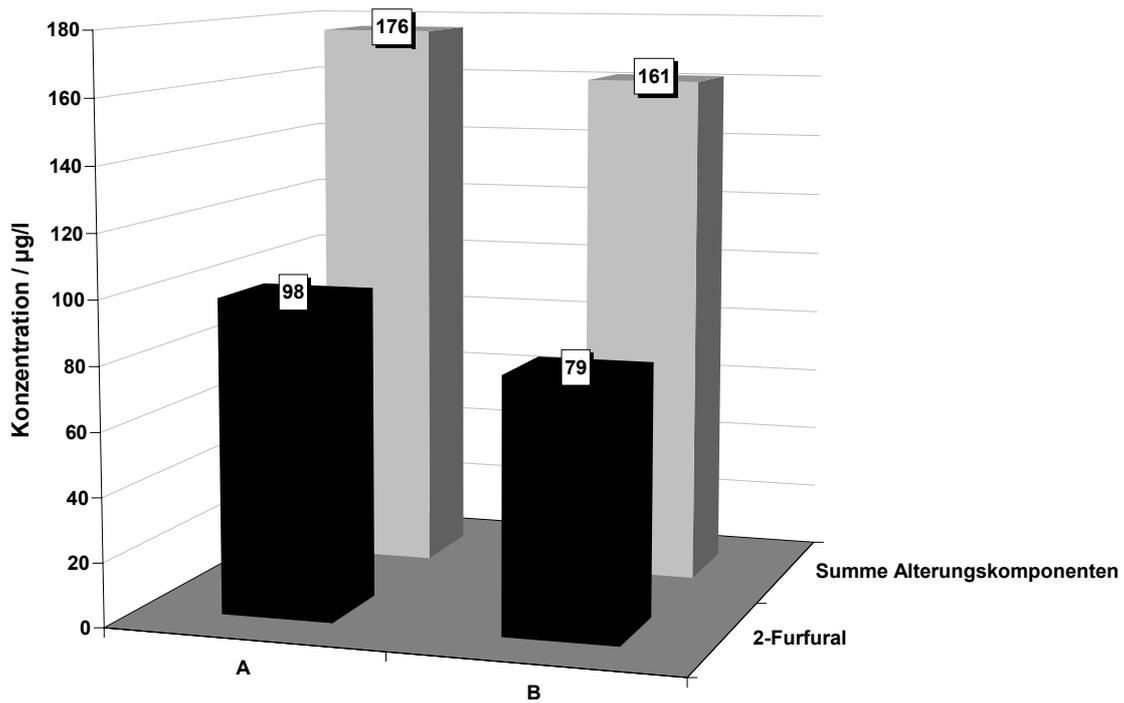


Abbildung 85: Verhalten der Alterungskomponenten der Versuchsreihen A und B

Für die Verkostungen konnten nur geringe Unterschiede festgestellt werden, allerdings mit einer Tendenz zur besseren Bewertung für das Versuchsbeer B (cf. Abbildung 86).

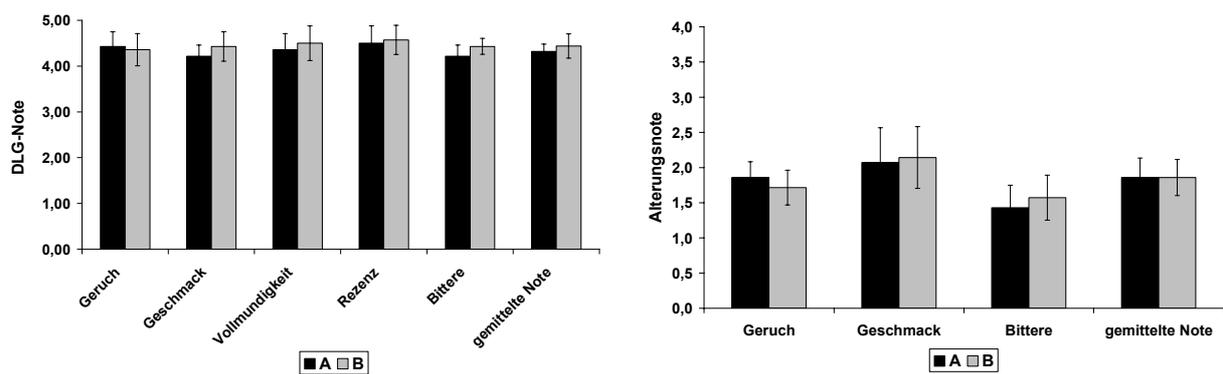


Abbildung 86: Ergebnisse der DLG-Verkostung im frischen Zustand (links) und der Alterungsverkostung im forciert gealterten Zustand (rechts)

Im Rahmen eines Triangeltests wurde versucht zu klären, ob die bei der DLG-Prüfung beobachteten Unterschiede signifikant sind. Dies konnte jedoch durch diesen Test nicht bestätigt werden.

Diese Versuchsreihe wurde zur Bestätigung der Ergebnisse noch einmal wiederholt, allerdings aus betriebstechnischen Gründen konnte dies nicht mit derselben Biersorte erfolgen. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Grundtendenzen die gleichen wie bei der ersten Versuchsreihe waren. Auch hier konnten deutlich geringere Werte für die thermische Belastung und geringere Gesamtgehalte an phenolischen Substanzen festgestellt werden. Im Bereich der Sensorik wurden ebenfalls tendentiell bessere Ergebnisse für das Verschnittbier erzielt. Bei dieser Verkostungsreihe wurde eine paarweise Vergleichsprüfung zur Ermittlung der Präferenzen durchgeführt. Es zeigte sich hier eine eindeutige Bevorzugung des Verschnittbieres.

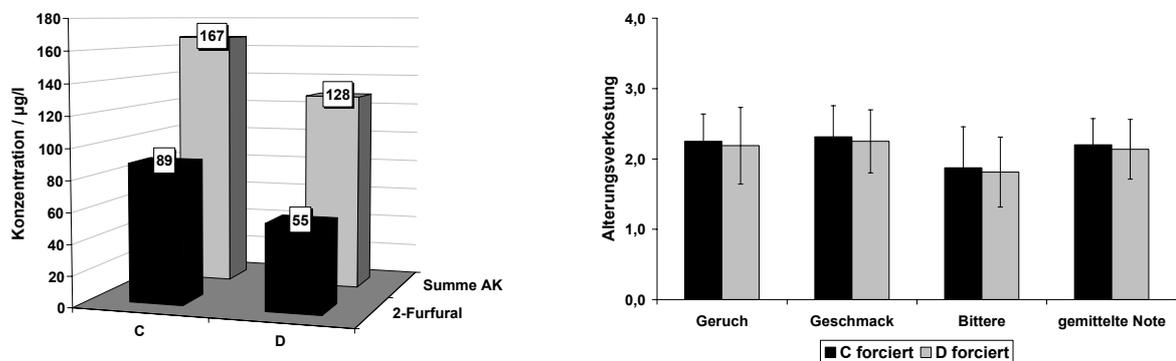


Abbildung 87: Verhalten der Alterungskomponenten bei den Versuchssuden C und D (links) und der Verkostungsergebnisse im forciert gealterten Zustand (rechts)

### 5.4.3 Dosage von Prozessbieren in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler

Um die Verdampfung von Ethanol zu vermeiden, wurde Prozessbier zwischen Whirlpool und Würzekühler dosiert. Das zudosierte Bier stammte aus einer unverkauften Festbiercharge (=Rückbier) einer Brauerei. Der Dosageanteil betrug 5,0 Vol.-%. Als Vergleich wurde aus derselben Würze ein Bier hergestellt. Alle Versuche wurden als Doppelansatz ausgeführt. Die verwendete Hefe wurde am Vortag propagiert (ICP: 6,28). Die weiteren Prozessparameter entsprachen den in Kapitel 4.1 beschriebenen. In Tabelle 59 sind die verwendeten Probenbezeichnungen dargestellt.

*Tabelle 59: verwendete Probenbezeichnung*

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>
A	Vergleich 1
B	Vergleich 2
C	Mischung 1
D	Mischung 2
A+B	Mittelwert aus Vergleich 1 und Vergleich 2
C+D	Mittelwert aus Mischung 1 und Mischung 2

Die Analysendaten des Prozessbieres sind im Anhang zusammengestellt (cf. Anhang Tabelle 119).

Die Ergebnisse der Würzearomastoffe ergaben das erwartete Bild im Bereich der höheren Alkohole. Es konnten keine Verluste durch Verdampfung festgestellt werden. Die höheren Wiederfindungsraten sind möglicherweise auf geringfügig höhere Dosagen als die ursprünglich vorgesehenen zurückzuführen. In Tabelle 60 sind die gemessenen Werte in den Mischungsproben mit den theoretisch berechneten Werten zusammengestellt.

*Tabelle 60: gemessene und theoretisch berechnete Konzentrationen ausgewählter höherer Alkohole in der Würze*

<b>Aromastoffe / µg/l</b>	<b>C+D</b>	<b>berechneter Sollwert</b>	<b>Wiederfindung / %</b>
3-Methyl-Butanol-1	2790	2510	111
2-Methyl-Butanol-1	1118	910	123
2-Phenylethanol	1400	1386	101

### 5.4.3.1 Gärverlauf

In Abbildung 88 sind die Gärverläufe zusammengestellt.

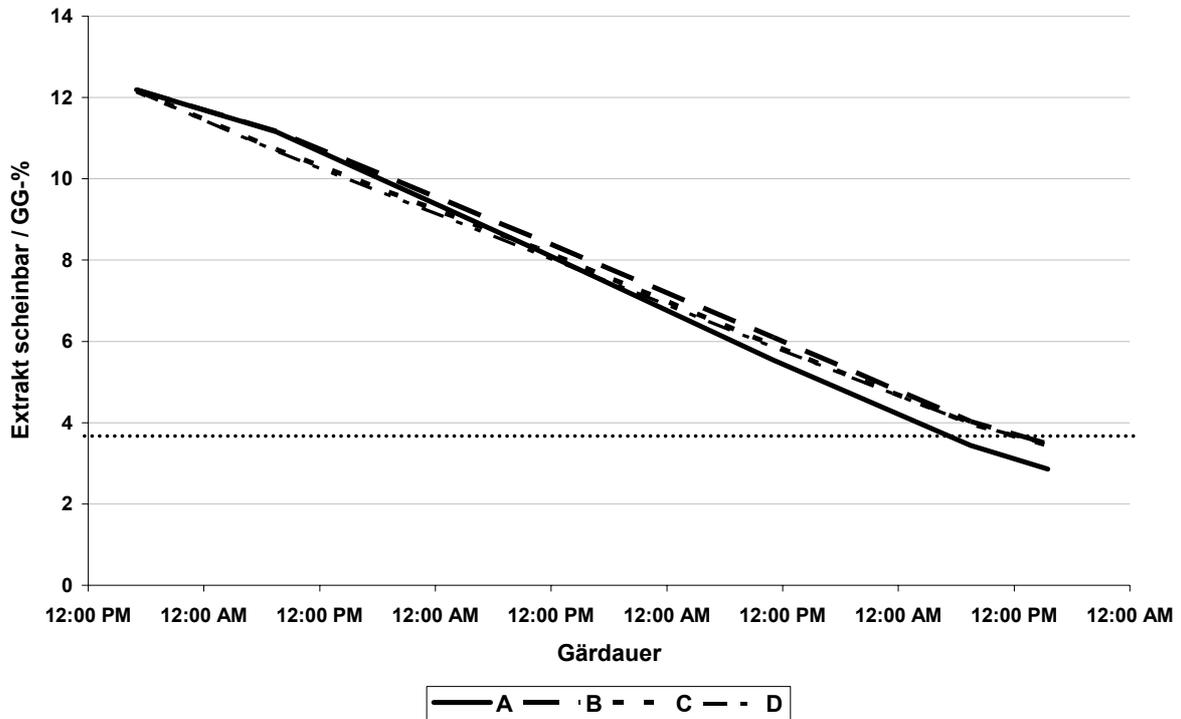


Abbildung 88: Gärverläufe der Versuchsreihe „Dosage von Prozessbier zwischen Whirlpool und Würzekühler“

Es wurden keine Auffälligkeiten bei den Gärverläufen beobachtet, der Extraktabbau verlief bei allen Untersuchungsbieren nahezu identisch.

### 5.4.3.2 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere

Im Rahmen der chemisch-technischen Untersuchungen wurden keine Unterschiede im Bereich der Stammwürze und des Alkoholgehaltes der fertigen Biere gemessen. In Abbildung 89 sind die Ergebnisse der Schaummessungen und die antioxidativen Eigenschaften der fertigen Biere dargestellt.

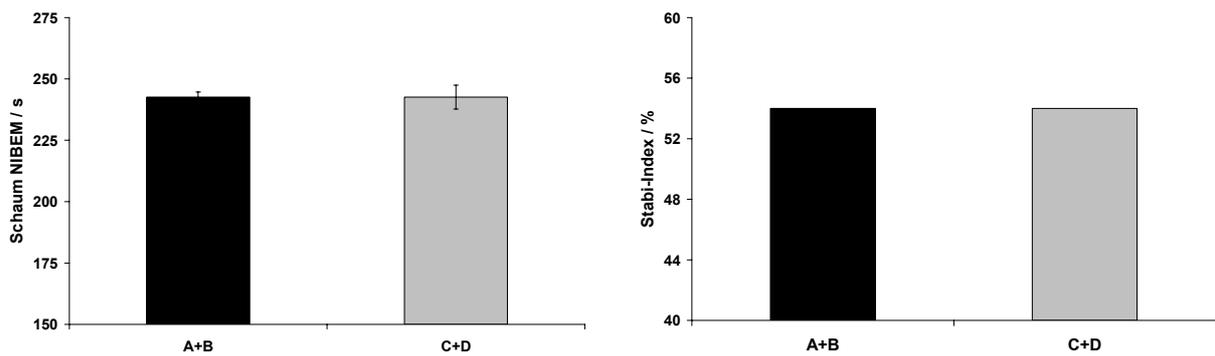


Abbildung 89: Ergebnisse der Schaummessung (links) und der antioxidativen Messungen (rechts)

Auch bei diesen beiden Parametern wurden im Mittel absolut identische Werte ermittelt, so dass eine Zugabe von Prozessbieren hier keine Veränderungen zu bewirken scheint.

### 5.4.3.3 Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Sowohl bei den Bieraromastoffen als auch bei den höheren Alkoholen und leichtflüchtigen Estern konnten wiederum keine größeren Unterschiede festgestellt werden (cf. Abbildung 90).

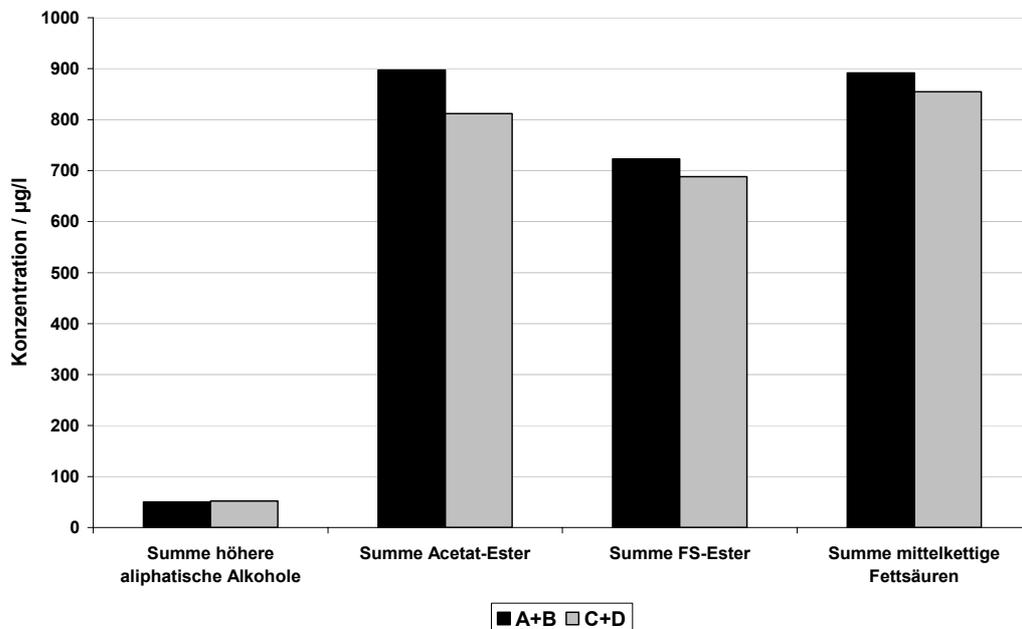


Abbildung 90: Mittelwerte ausgewählter Bieraromastoffe der Biere A–D<sup>10</sup>

<sup>10</sup> FS:=Fettsäure; Konzentration der Summe der mittelkettigen Fettsäuren muss mit dem Faktor 10 multipliziert werden

Bei den Alterungsindikatoren konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden, wie aus Abbildung 91 ersichtlich wird.

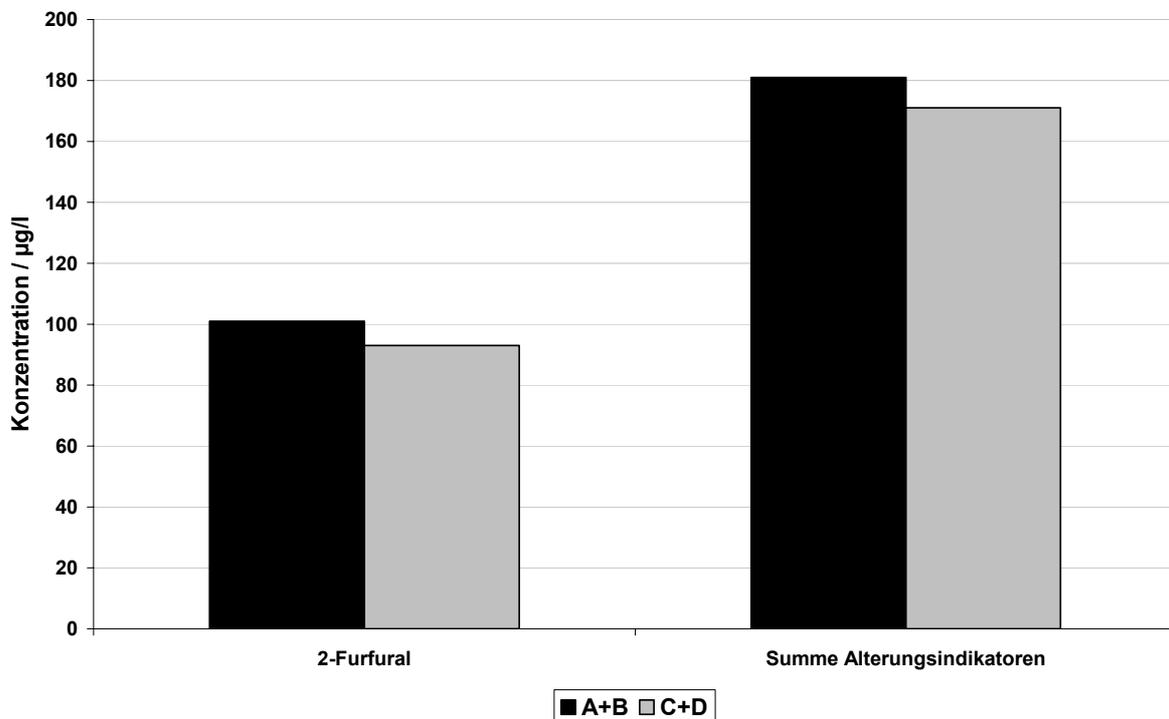


Abbildung 91: Mittelwerte ausgewählter Alterungsindikatoren der Biere A–D

In Tabelle 120 im Anhang sind die gesamten Aromastoffe dargestellt.

#### 5.4.3.4 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere

In Abbildung 92 sind die Verkostungsergebnisse der untersuchten Biere dargestellt. Sowohl die frischen als auch die forciert gealterten Biere ließen keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen vier Bieren erkennen. Varianzanalytische Betrachtungen bestätigten dies (cf. Anhang Tabelle 121, Tabelle 122 und Tabelle 123).

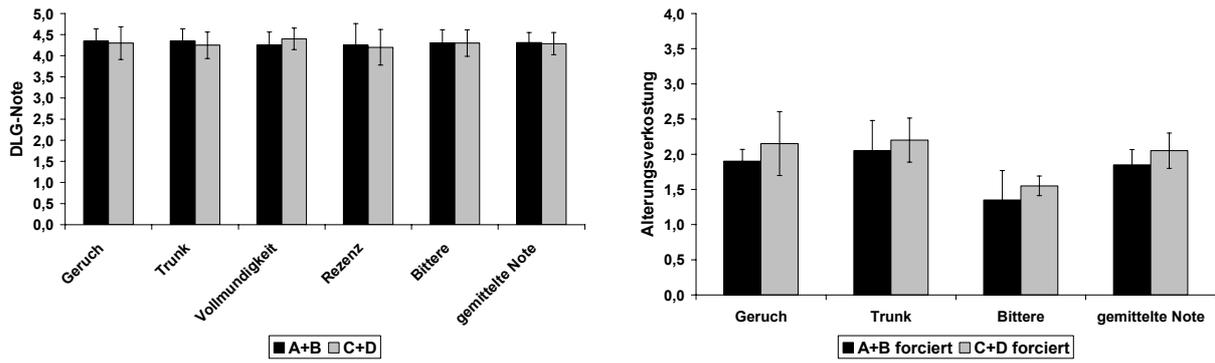


Abbildung 92: Verkostungsergebnisse der frischen (links) und der forciert gealterten Bierproben (rechts)

### 5.4.3.5 Statistische Auswertung der untersuchten Biere

Da die meisten Analysenparameter keine Unterschiede zwischen diesen Bieren erkennen ließen, wurde anhand von multivariaten Auswertemethoden untersucht, ob dennoch Abweichungen zu erkennen sind, und, welche Parameter hierfür verantwortlich zeichnen. Diese Betrachtung soll beispielhaft für die genauere analytische und statistische Betrachtung der untersuchten Biere herangezogen werden.

Zur Auswertung wurden sämtliche analytische und sensorische Ergebnisse herangezogen. In Abbildung 93 ist der *Component Plot* der Faktoren 1 und 2 für die Biere A–D dargestellt. Diese beiden Faktoren erklären über 80 % der Gesamtvarianz.

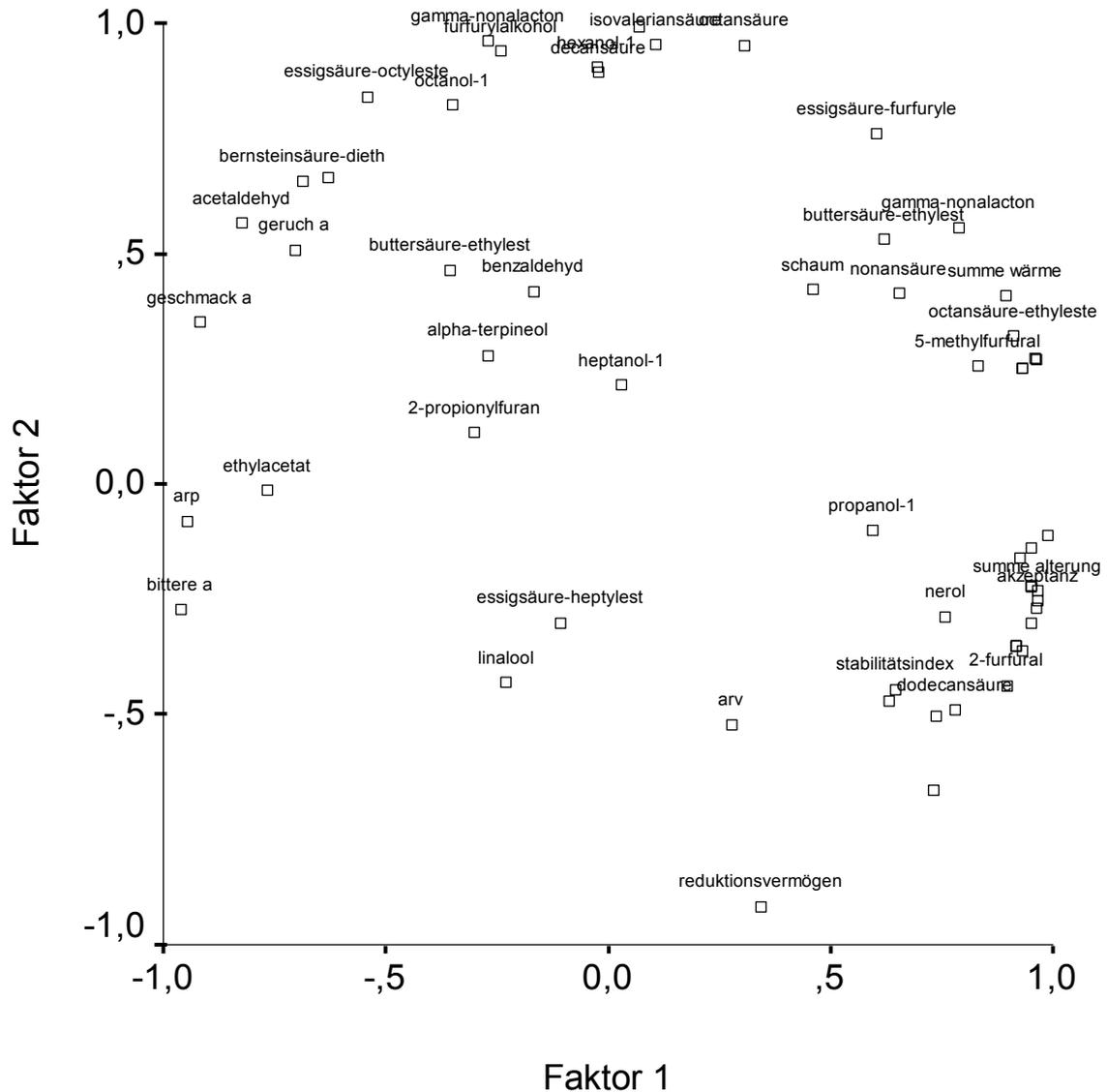


Abbildung 93: *Component Plot* der Faktoren 1 und 2 für die Biere A–D

Wichtig für die nachfolgenden Betrachtungen sind diejenigen Ergebnisse, die entlang der Hauptkomponenten mit einer hohen Faktorladung ( $0,7 < x < 1,0$ ) im *Component Plot* dargestellt sind. Zum Beispiel wird der Faktor 1 u.a. sehr stark durch Ethylacetat und Faktor 2 u.a. durch Isovaleriansäure beeinflusst. Die Auswirkungen dieser Faktorladungen und damit der Grad der Beeinflussung wird in Abbildung 94 für die Hauptkomponentenanalyse der Biere A–D deutlich.

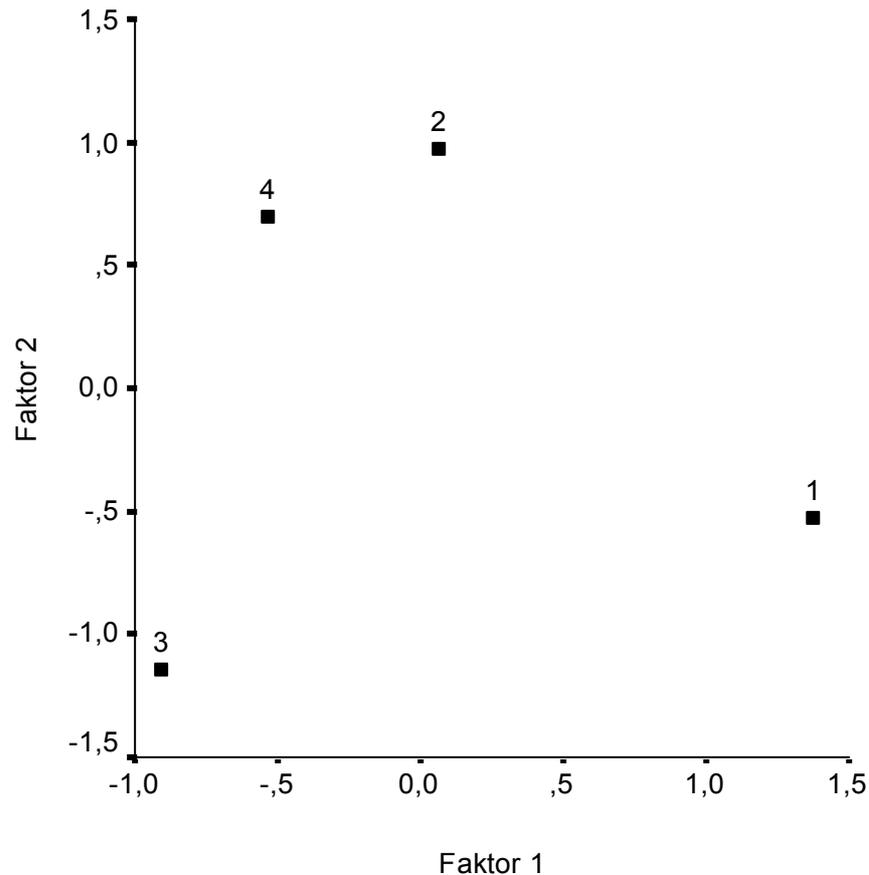


Abbildung 94: Hauptkomponentenanalyse für die Biere A–D

Auffällig ist die geringe Distanz der Punkte 2 und 4, d.h. die Biere B und D scheinen sich tatsächlich sehr ähnlich zu sein, genauso wie es die bisherige Betrachtung der Analysenergebnisse auch zeigte. Allerdings grenzen sich diese beiden Biere erkennbar von den Bierern 1 und 3 (A und C) ab. Diese Differenzierung ist wesentlich durch die Merkmalseigenschaften des Faktors 2 bestimmt. Zusätzlich gibt es noch eine durch Merkmalseigenschaften des Faktors 1 ausgelöste Unterscheidung der Biere A und C. Tabelle 61 listet die wichtigsten Einflussgrößen hinsichtlich der beiden Hauptkomponenten mit ihren jeweiligen Korrelationskoeffizienten auf. Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 124).

Tabelle 61: Korrelationskoeffizienten für die Hauptkomponenten 1 und 2

<b>Einflussgröße</b>	<b>Faktor 1</b>	<b>Faktor 2</b>
2-Phenylethanol	0,925	
Essigsäure-Isobutylester	0,989	
Essigsäure-Hexylester	0,963	
Essigsäure-2-Phenylethylester	0,951	
Hexansäure-Ethylester	0,961	
Octansäure-Ethylester	0,912	
Decansäure-Ethylester	0,917	
2-Methylpropanol	0,963	
3-Methylbutanol	0,931	
2-Methylbutanol	0,953	
2-Methylpropylacetat	0,917	
Isoamylacetat	0,951	
2-Phenylethanal	0,931	
Summe Sauerstoff	0,931	
ARP	-0,945	
Geschmack Alterung	-0,917	
Bittere Alterung	-0,917	
Akzeptanz	0,965	
Hexanol-1		0,904
Furfurylalkohol		0,940
Octansäure		0,951
gamma-Nonalacton		0,962
Reduktionsvermögen		-0,917

Aus der Tabelle wird deutlich, dass sich im Wesentlichen Veränderungen im Gehalt der Acetat-Ester und der Fettsäure-Ester auf die Unterscheidung der Biere A und C ausgewirkt haben (Faktor 1). Die Unterschiede, die durch Faktor 2 beeinflusst wurden, waren auf unterschiedliche Gehalte an höheren Alkoholen und z.B. auch dem Reduktionsvermögen zurückzuführen.

Anhand der Methode der multivariaten Datenauswertung konnte eine feinere Differenzierung der untersuchten Biere vorgenommen werden. Zusammenfassend kann allerdings festgestellt werden, dass sich die statistisch nachgewiesenen Unterschiede nicht auf die Qualität der Biere auswirkten und vor allem im sensorischen Bereich keine signifikanten Unterschiede erkennen ließen.

#### **5.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Dosageversuche im Heissbereich**

Aufgrund der Ausdampfung der meisten leicht flüchtigen Verbindungen, vor allem Ethanol, ist die Dosage von Prozessbieren in die Würzepfanne nicht zu empfehlen,

obwohl die Ergebnisse der Untersuchungsreihen Vorteile gegenüber der Dosage in den Whirlpool erkennen ließen. Einschränkend muss hier hinzugefügt werden, dass das dosierte Volumen an Prozessbieren mit 10 % deutlich über dem in der Praxis üblichen Dosagevolumen lag, so dass die hier aufgezeigten Unterschiede in der Realität vermutlich zu vernachlässigen sind. Nicht zu vernachlässigen ist jedoch die Verschlechterung der Alterungsstabilität der Verschnittbiere nach Dosage von Hefebieren im Heissbereich. Dies konnte im Rahmen von großtechnischen Untersuchungen bei einem Dosagevolumen von 5 vol.-% Hefebier in die Würzpfanne herausgefunden werden. Tabelle 62 zeigt die Ergebnisse varianzanalytischer Betrachtungen der verkosteten Biere nach einer Aufbewahrung von 3 Monaten bei 20 °C.

*Tabelle 62: Varianzanalytische Betrachtung der verkosteten Biere nach einer Aufbewahrung von 3 Monaten bei 20 °C<sup>11</sup>*

<b>Probenvergleich (3 Monate 20°C)</b>	<b>Signifikanz</b>
Vergleichsbier – Bier mit 5% Prozessbieranteil	nicht signifikant
Vergleichsbier – Bier mit 5% Hefebieranteil	<b>hoch signifikant</b>
Bier mit 5% Prozessbieranteil – Bier mit 5% Hefebieranteil	nicht signifikant

Der Verlust an Ethanol bei einer Whirlpoldosage konnte im Rahmen von weiteren großtechnischen Versuchen in einer anderen Brauerei auf ca. 30 % beziffert werden (cf. Tabelle 63).

*Tabelle 63: Ethanolverlust bei Dosage von Prozessbier im Whirlpool*

Anzahl	Mittelwert	StAbW	KI
6	31,8	5,696	5,976

Optimalerweise könnte das Prozessbier direkt in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler dosiert werden. Abbildung 95 zeigt ein RI-Schema der wichtigsten Komponenten einer solchen Anlage.

<sup>11</sup> verglichen wurden ein Vergleichsbier ohne Prozessbierzusatz, ein Bier, welches eine Mischung aus verschiedenen Prozessbieren enthielt, und ein Bier, welches reines Hefebier als Prozessbier enthielt

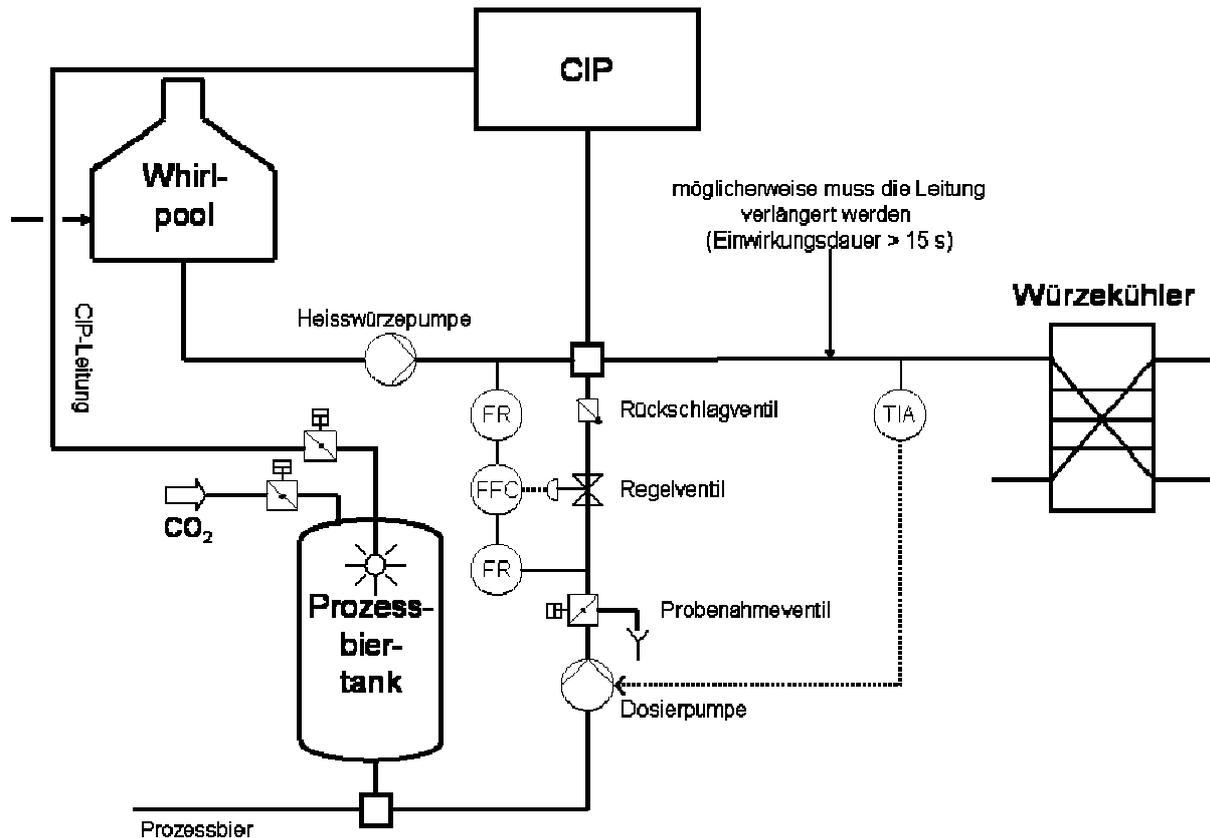


Abbildung 95: RI-Schema zur Dosierung von Prozessbieren in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler

Bei Unterschreiten einer vorgegebenen Temperatur wird die Dosierpumpe automatisch abgeschaltet. Allerdings sollte bei einer mengenproportionalen Dosage von 1–2 % keine Unterschreitung der geforderten Mindesttemperatur von z.B. 85 °C erfolgen. Um eine ausreichende thermische Beaufschlagung der Würze/Biermischung zu bewerkstelligen und damit eine garantierte mikrobiologische Sicherheit zu gewährleisten, muss die Mischstrecke eine bestimmte Mindestlänge aufweisen. In Abbildung 96 ist der Zusammenhang Pasteur-Einheiten und Temperatureinwirkungsdauer dargestellt.

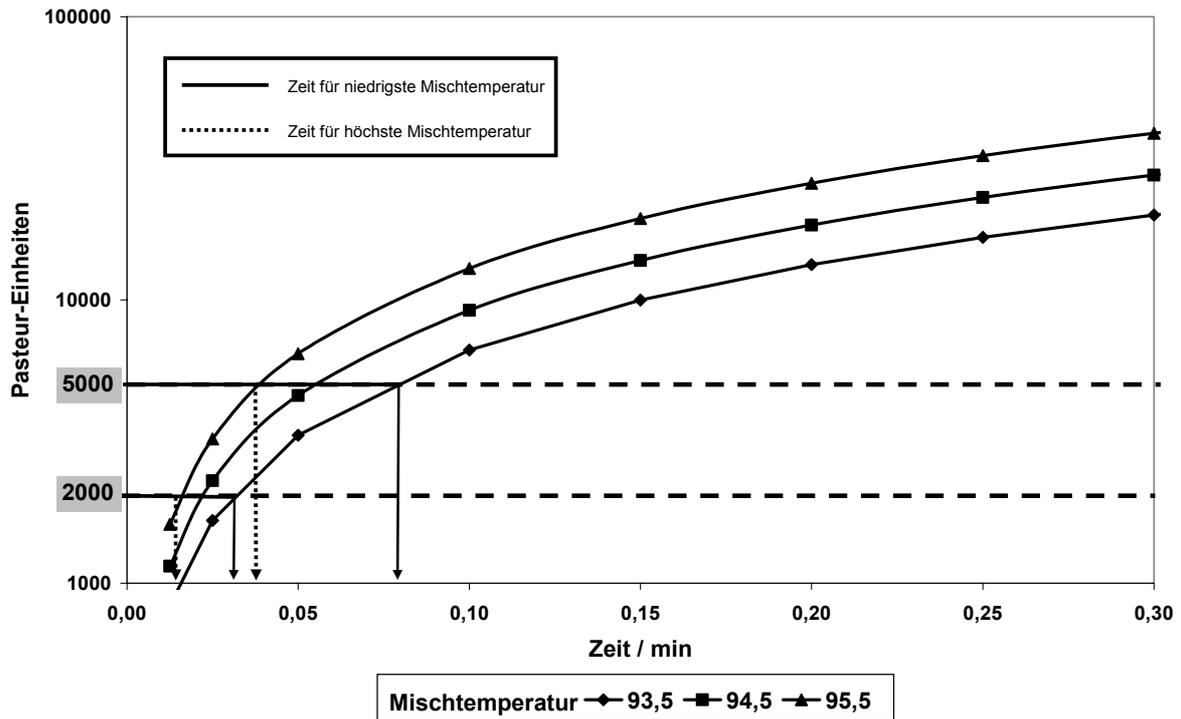


Abbildung 96: Pasteur-Einheiten in Abhängigkeit der Temperatureinwirkungsdauer

Für die Berechnung der Pasteur-Einheiten wurde der z-Wert mit 6,95 °C angenommen. Der resultierende Faktor der PE-Formel ( $PE=t \times 10^{1/z(T-60)}$ ) ist daher 1,393. In früheren Veröffentlichungen wurde der z-Wert mit 8 °C angenommen, wodurch sich ein resultierender Faktor für die PE-Formel von 1,33 ergab. Diese Änderung wurde aufgrund von Annahmen über die Thermotoleranz von heterofermentativen Milchsäurebakterien vorgenommen [233, 234]. Die Forschung der letzten Jahre zeigte jedoch, dass die heterofermentativen Milchsäurebakterien doch nicht eine so gute Thermotoleranz besitzen [179]. In Tabelle 64 ist die minimale und die maximale Rohrleitungslänge zwischen Whirlpool und Würzekühler dargestellt. Der Würzevolumenstrom wurde mit 500 hl/h und der Innendurchmesser der Rohrleitung mit 100 mm angenommen.

Tabelle 64: Länge der Rohrleitung zwischen WP und Würzekühler in Abhängigkeit der PE

Mischtemperatur / °C	Länge <sub>2000 PE</sub> / m	Länge <sub>5000 PE</sub> / m
93,5	3,27	8,19
94,5	2,37	5,93
95,5	1,69	4,22

### 5.5 Dosage von Hefebieren im Kaltbereich

Um den Einfluss der Dosage von Hefebieren im Kaltbereich zu untersuchen, wurden Hefebiere unterschiedlicher Qualität zur Anstellwürze bzw. zum Jungbier dosiert. In Tabelle 65 sind die verwendeten Probenbezeichnungen aufgeführt.

Tabelle 65: verwendete Probenbezeichnungen

Probe	Dosagevolumen / vol.-%	Hefebierqualität	Dosagezeitpunkt
A	0	gut	Anstellwürze
B	5	gut	Anstellwürze
C	10	gut	Anstellwürze
D	0	gut	Jungbier
E	5	gut	Jungbier
F	10	gut	Jungbier
G	100	gut	-
H	0	schlecht	Anstellwürze
I	5	schlecht	Anstellwürze
J	10	schlecht	Anstellwürze
K	0	schlecht	Jungbier
L	5	schlecht	Jungbier
M	10	schlecht	Jungbier
N	100	schlecht	-

Die Hefebiere wurden über eine Tellerzentrifuge gewonnen. Jeder Ansatz wurde doppelt ausgeführt. Das Bier ohne Hefebierzusatz stellt die Nullprobe dar. Die Versuche wurden in sterilisierten und mit CO<sub>2</sub> gespülten Kegs durchgeführt, um eine Veränderung der Bierqualität durch Sauerstoffeinflüsse auszuschließen. Die entsprechenden Mengen an Hefebier wurden in die Kegs vorgelegt. Für die Gärversuche wurden die Kegs anschließend mit belüfteter und angestellter Würze aus der Anstellregelung aufgefüllt. Die Vergärung erfolgte bei einer Temperatur von 12 °C. Ab dem 5. Gärtag wurde regelmäßig der Restextrakt- und Diacetylgehalt bestimmt. Sobald der Diacetylgehalt kleiner als 0,1 mg/l war, wurde das Jungbier in ein neues Keg zur Lagerung geschlaucht und so von der abgesetzten Hefe getrennt. Daraufhin erfolgte eine 2-wöchige Lagerung bei 0 °C. Durch Spundung wurde ein CO<sub>2</sub>-Gehalt von 6 g/l eingestellt. Nach der Lagerung wurde das Bier über einen Miniaturkieselgurrahmen filtriert und anschließend mittels eines isobarometrischen Laborfüllers abgefüllt, wobei durch intensives Vorspülen der zu befüllenden Flaschen mit CO<sub>2</sub> die Sauerstoffnahme des Bieres wiederum möglichst niedrig gehalten wurde. Bei den Jungbierversuchen wurden die entsprechenden Hefebiermengen ebenfalls in

Kegs vorgelegt. Diese wurden dann mit soeben geschlauchtem Jungbier aufgefüllt. Zusätzlich wurde auch das reine Hefebier gelagert.

## 5.5.1 Dosage von Hefebieren zur Anstellwürze

### 5.5.1.1 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere

Die höheren Alkohol- und damit auch Stammwürzegehalte im Hefebier bewirkten in den Verschnittbieren mit steigenden Dosagevolumen einen stetigen Anstieg dieser beiden Parameter. Ähnlich verhielt es sich mit dem pH-Wert, wobei die schlechtere Hefebierqualität insgesamt eine höhere pH-Wert-Zunahme zur Folge hatte (cf. Abbildung 97).

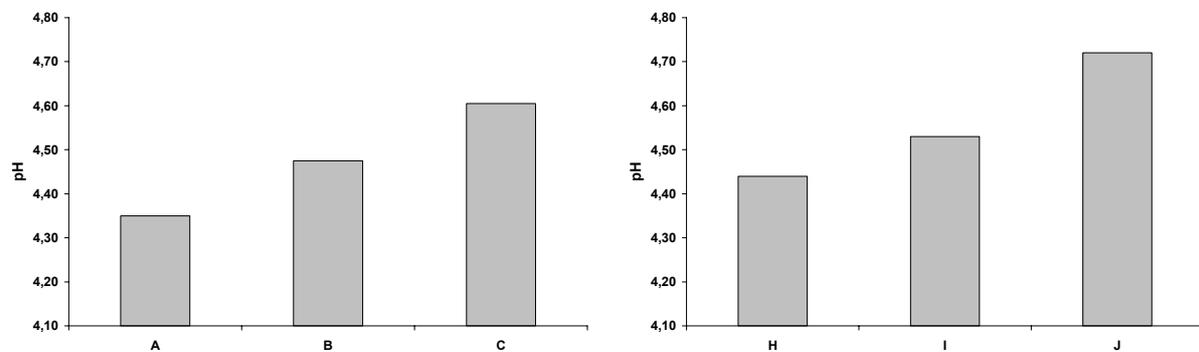


Abbildung 97: Verhalten des pH-Wertes durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Aufgrund der Resorption der Bitterstoffe von den Hefezelloberflächen sind im Hefebier deutlich mehr Bitterstoffe enthalten, wobei eine verlängerte Aufbewahrungsphase der Hefesuspension zu insgesamt deutlich höheren Gehalten im Hefebier führte. Durch diese erhöhten Gehalte an Bitterstoffen wurden die Gehalte an Bittereinheiten deutlich beeinflusst, wobei die Biere I und J überproportional hohe Gehalte aufwiesen (cf. Abbildung 98). Ähnlich verhielten sich die Gehalte an freiem Aminostickstoff.

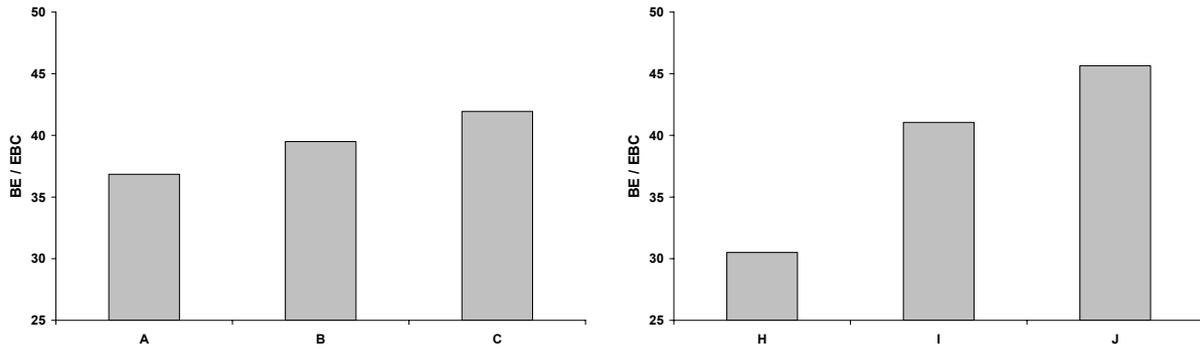


Abbildung 98: Verhalten der Bittereinheiten durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Durch die Zugabe der Hefebier konnte eine Zunahme der antioxidativen Eigenschaften der Verschnittbiere festgestellt werden (cf. Abbildung 99). Die in die Bestimmung des Stabilitäts-Index einfließenden Parameter „Reduktionsvermögen“ und „antiradikalisches Potential“ wurden durch die Zugabe positiv beeinflusst, wodurch sich insgesamt eine Verbesserung, ausgedrückt durch die summarische Größe „Stabilitäts-Index“, ergab. Der negative Einfluss des höheren pH-Wertes bzgl. einer gesteigerten Radikalgenerierung wurde im Rahmen dieser Untersuchungen nicht festgestellt.

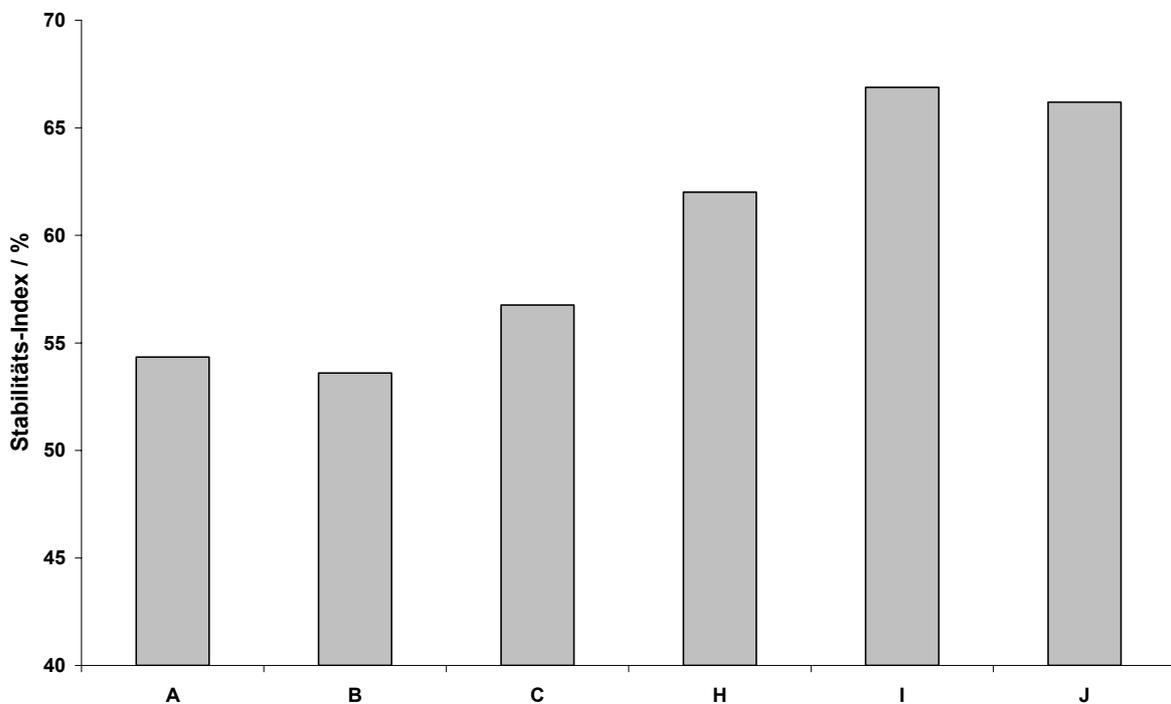


Abbildung 99: Verhalten des Stabilitäts-Index durch Zumischen von Hefebier

Die Ergebnisse bzgl. des Bierschaums ließen keine einheitliche Tendenz erkennen. Die Hypothese, dass vor allem durch die Zugabe des qualitativ schlechteren Hefebieres eine Beeinträchtigung der Schaumstabilität durch eine erhöhte Aktivität der Proteinase A erfolgte, konnte durch diese Versuchsreihe nicht belegt werden. Die vollständigen Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 125).

### 5.5.1.2 Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Im Rahmen der gaschromatographischen Untersuchungen wurde zunächst das Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren untersucht. Durch die Zugabe von qualitativ hochwertigem Hefebier konnte keine Beeinträchtigung in dieser Richtung beobachtet werden, wohingegen die Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres zu deutlich erhöhten Gehalten vor allem im Bereich der Fettsäuren führten (cf. Abbildung 100 und Abbildung 101).

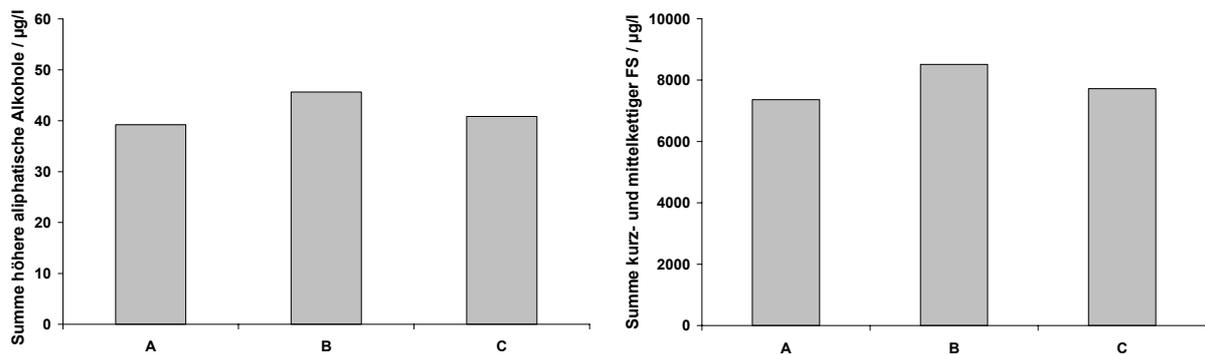


Abbildung 100: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen Hefebieres

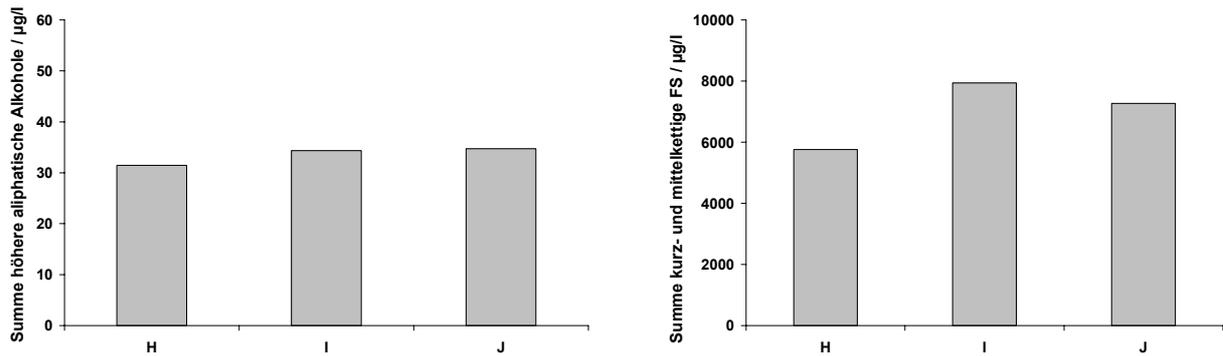


Abbildung 101: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres

Eine moderate Zumischung des Hefebieres hatte leicht erhöhte Gehalte an Acetat- und Fettsäure-Ester zur Folge. Erst höhere Gehalte an zudosiertem Hefebier führten wieder zu niedrigeren Gehalten an Estern (*cf.* Abbildung 102 und Abbildung 103).

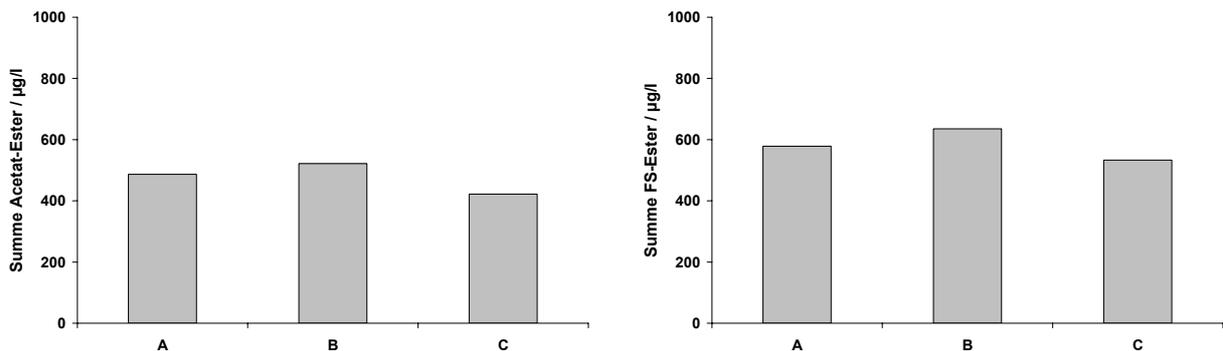


Abbildung 102: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen Hefebieres

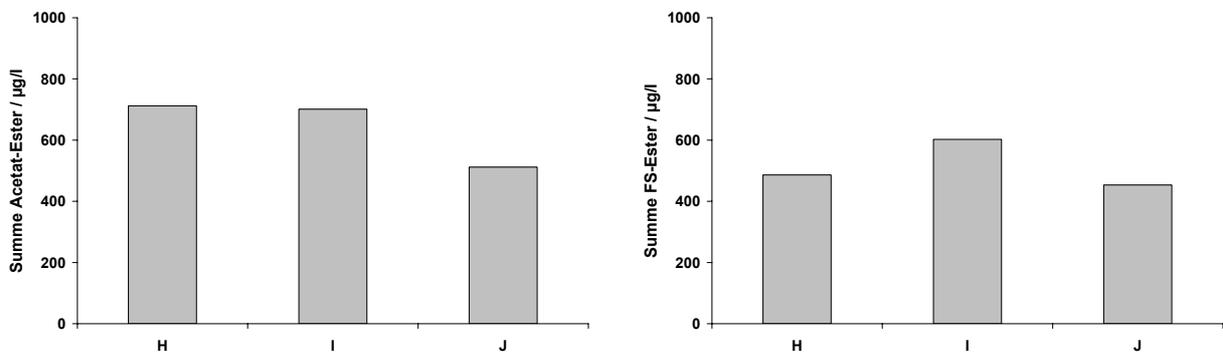


Abbildung 103: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres

Mit steigenden Dosageanteilen an Hefebier wurden niedrigere Konzentrationen an 2-Furfural und damit auch bei der Summe der Alterungskomponenten gemessen (cf. Abbildung 104). Dabei spielt die Qualität des Hefebieres scheinbar keine Rolle. Dieser Effekt wurde auch schon bei vorhergehenden Untersuchungen festgestellt (cf. Kapitel 5.2.3.2)

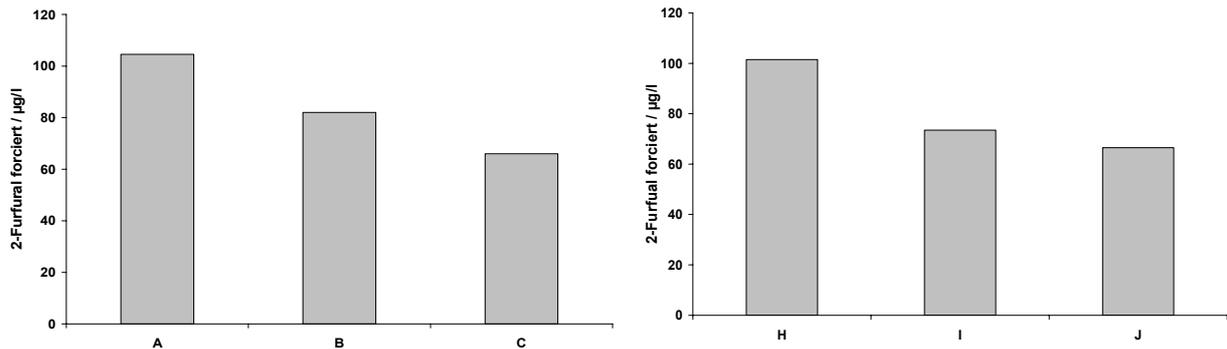


Abbildung 104: Verhalten von 2-Furfural durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 126 und Tabelle 127).

### 5.5.1.3 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere

Die fertigen Biere wurden nach DLG-Kriterien und anhand des Alterungsverkostungsschemas im frischen und im forciert gealterten Zustand verkostet. Abbildung 105 zeigt die Ergebnisse der sensorischen Prüfungen.

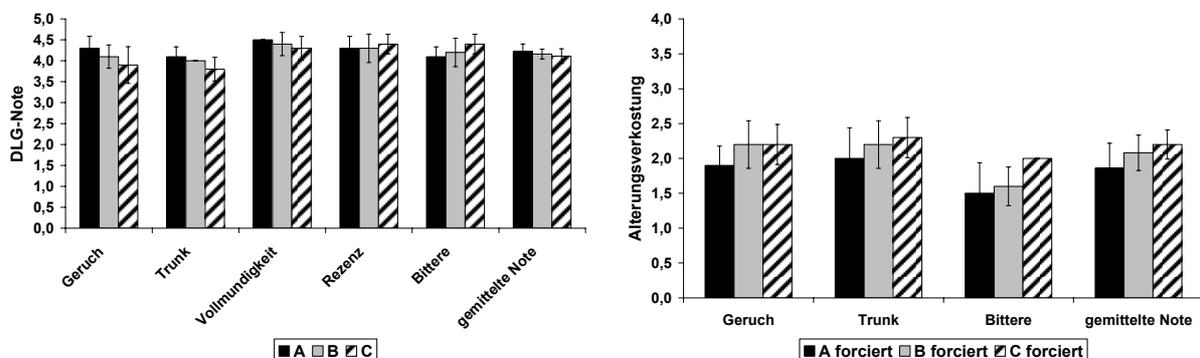


Abbildung 105: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung (forciert gealtert) der Biere A–C

Tendenziell schnitten die Biere mit Hefebieranteilen etwas schlechter ab, wobei diese Unterschiede nicht signifikant waren (cf. Anhang Tabelle 128, Tabelle 129 und Tabelle 130). Auffällig auch hier die Tatsache, dass trotz wesentlich günstigerer Werte für die Alterungsindikatoren die Biere B und C schlechter abschnitten als das entsprechende Vergleichsbier. Insgesamt lässt sich jedoch feststellen, dass die Dosageanteile von 10 Vol.-% bei einem qualitativ hochwertigem Hefebier durchaus praktikabel zu sein scheinen. In Abbildung 106 sind nun die Ergebnisse für die Biere H-J dargestellt.

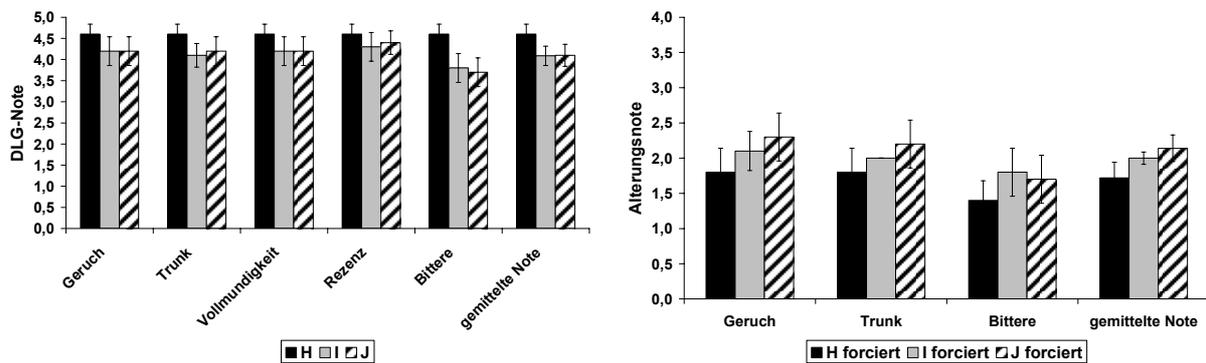


Abbildung 106: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung (forciert gealtert) der Biere H–J

Dabei fielen bereits im frischen Zustand die Biere mit Hefebieranteilen deutlich ab. Die Biere wurden mit käsig, aufdringlich im Geruch und mit breit im Trunk beschrieben. Der Unterschied war in diesem Fall signifikant (cf. Anhang Tabelle 131). Im Bereich der Alterungsverkostung unterschied sich Bier J signifikant von Bier H (cf. Anhang Tabelle 132 und Tabelle 133). Die Ergebnisse machen deutlich, dass nur die Qualität der rückgewonnenen Hefebiere über deren möglichen produktionsinternen Einsatz entscheidet. Das Dosagevolumen scheint hierbei, innerhalb sinnvoller Grenzen, nicht so sehr entscheidend zu sein.

## 5.5.2 Dosage von Hefebieren zum Jungbier

### 5.5.2.1 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere

Die höheren Alkohol- und damit auch Stammwürzegehalte im Hefebier bewirkten in den Verschnittbieren mit steigenden Dosagevolumen nur einen Anstieg beim Verschnitt qualitativ schlechten Hefebieres. Qualitativ hochwertiges Hefebier wirkte sich nicht auf den Alkohol- und Stammwürzegehalt aus. Ähnlich wie bei

vorangegangener Versuchsreihe stieg durch den Verschnitt der pH-Wert, wobei die schlechtere Hefebierqualität insgesamt eine höhere pH-Wert-Zunahme zur Folge hatte (cf. Abbildung 107).

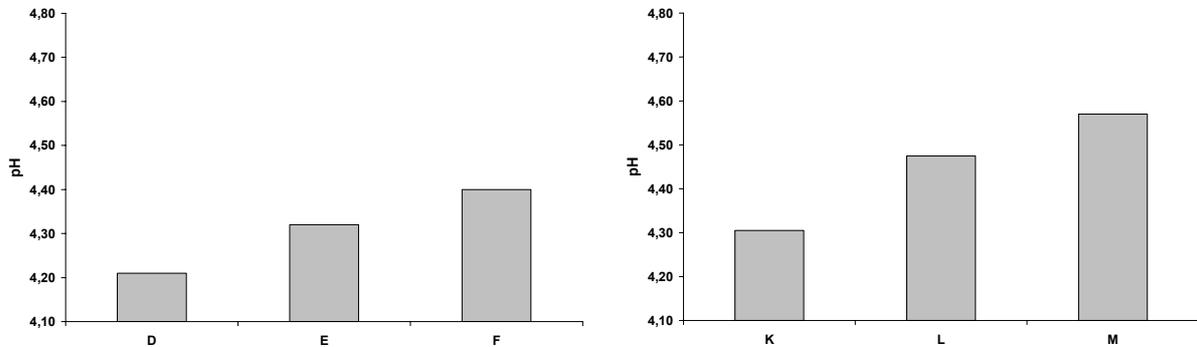


Abbildung 107: Verhalten des pH-Wertes durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Die höheren Gehalte an Bittereinheiten wurden auch bei den Bieren E und F bzw. L und M festgestellt, wobei wiederum die qualitativ schlechteren Hefebiere aufgrund ihres höheren Bitterstoffgehaltes zu den höchsten Werten in den fertigen Verschnittbieren führten (cf. Abbildung 108).

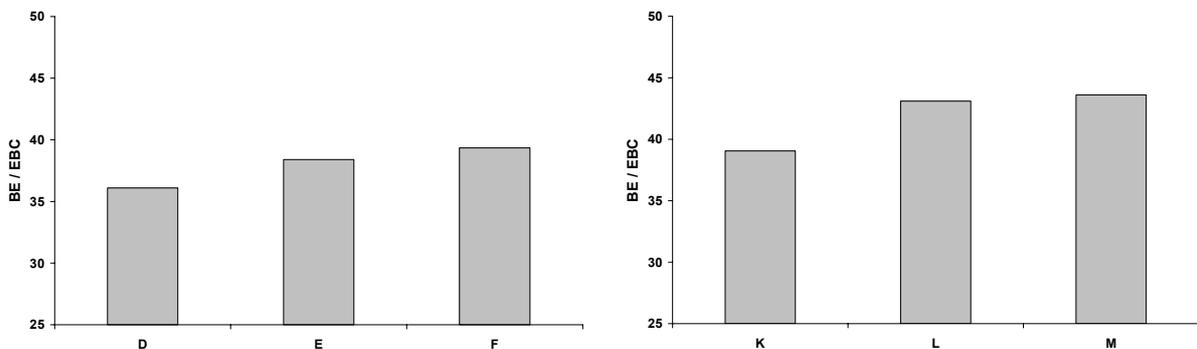


Abbildung 108: Verhalten der Bittereinheiten durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Durch die Zugabe der Hefebiere konnte keine Zunahme der antioxidativen Eigenschaften der Verschnittbiere festgestellt werden (cf. Abbildung 109). Die in die Bestimmung des Stabilitäts-Index einfließenden Parameter „Reduktionsvermögen“ und „antiradikalisches Potential“ wurden durch die Zugabe nicht beeinflusst. Der negative Einfluss des höheren pH-Wertes bzgl. einer gesteigerten

Radikalgenerierung wurde im Rahmen dieser Untersuchungen ebenfalls nicht festgestellt.

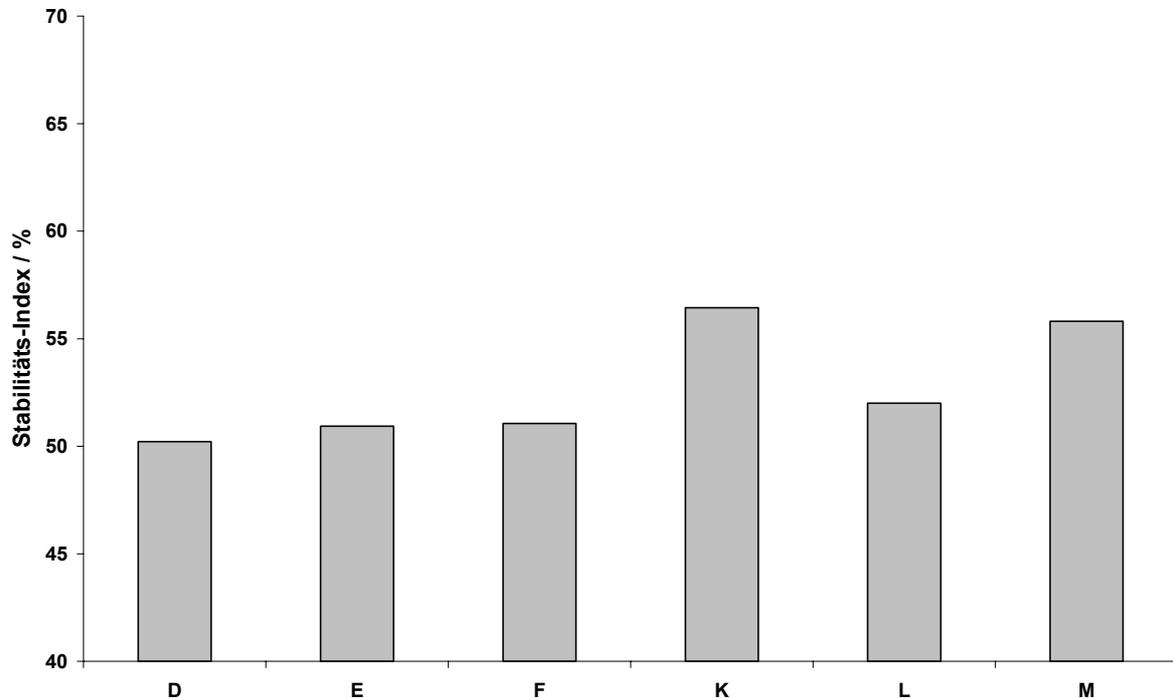


Abbildung 109: Verhalten des Stabilitäts-Index durch Zumischen von Hefebier

Die Ergebnisse bzgl. des Bierschaums ließ eine einheitliche Tendenz erkennen. Wie zu vermuten war, wurde vor allem durch die Zugabe des qualitativ schlechteren Hefebieres eine Beeinträchtigung der Schaumstabilität durch eine erhöhte Aktivität der Proteinase A erzielt. Die vollständigen Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (*cf.* Anhang Tabelle 147).

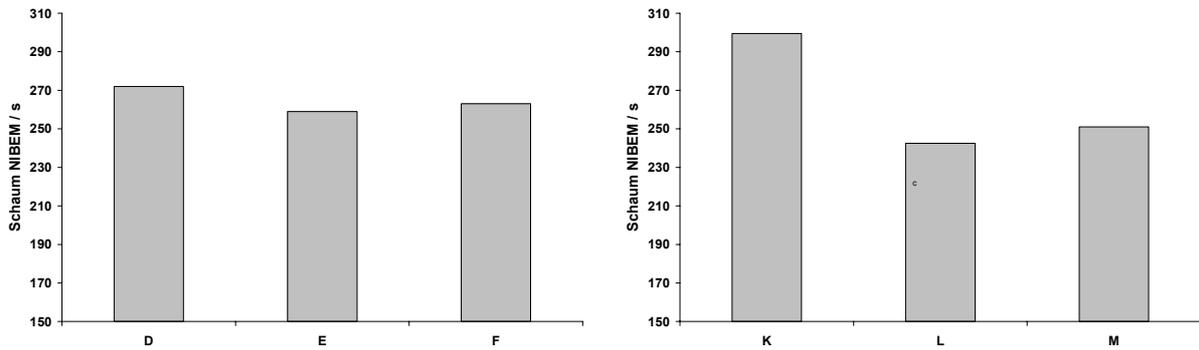


Abbildung 110: Verhalten der Schaumstabilität durch die Zumischung von qualitativ hochwertigem Hefebier (links) und schlechtem Hefebier (rechts)

### 5.5.2.2 Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Im Bereich der gaschromatographischen Untersuchungen wurde wiederum zunächst das Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren untersucht. Durch die Zugabe von qualitativ hochwertigem Hefebier konnte eine geringe Beeinträchtigung in dieser Richtung beobachtet werden, wohingegen die Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres zu deutlich erhöhten Gehalten führten (cf. Abbildung 111 und Abbildung 112).

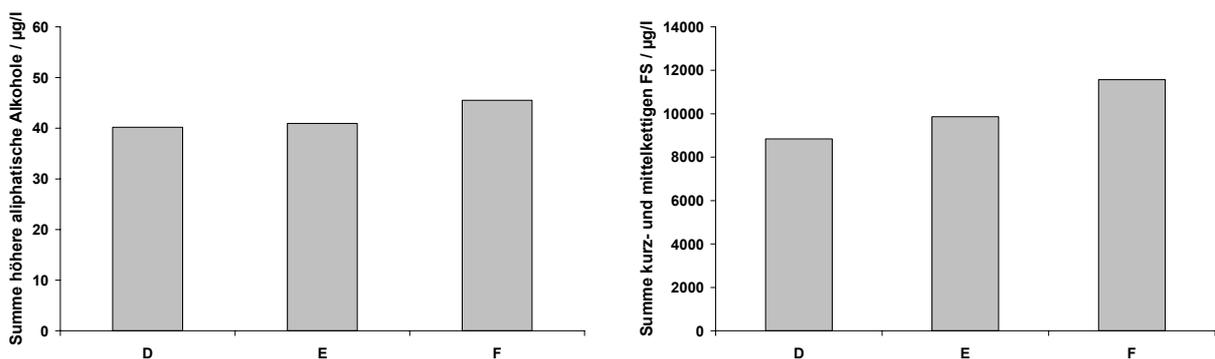


Abbildung 111: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen Hefebieres

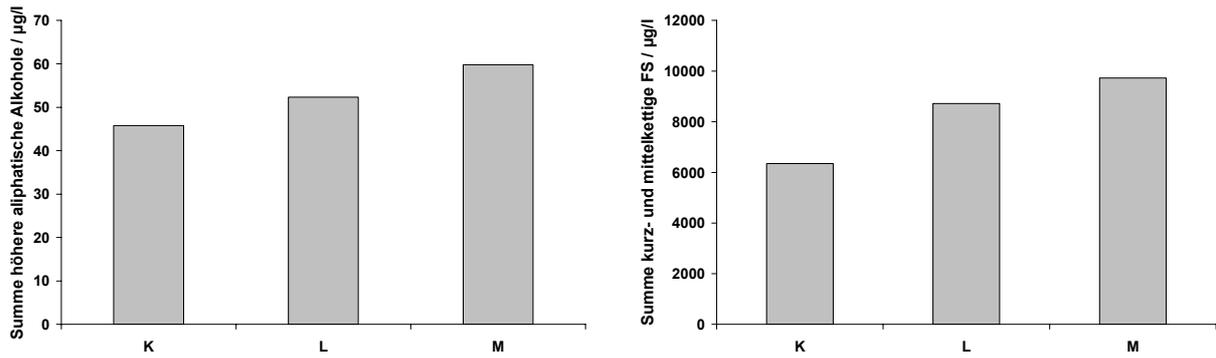


Abbildung 112: Verhalten der höheren aliphatischen Alkohole und der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren nach der Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres

Im Bereich der Estergehalte fiel auf, dass durch die Zumischung von qualitativ hochwertigem Hefebier keine Veränderung, teilweise sogar etwas höhere Gehalte an Fettsäure-Ester festgestellt werden konnte. Die Dosage von schlechtem Hefebier führte dagegen zu eindeutig niedrigeren Werten im Vergleich zum Nullbier. (cf. Abbildung 113 und Abbildung 114).

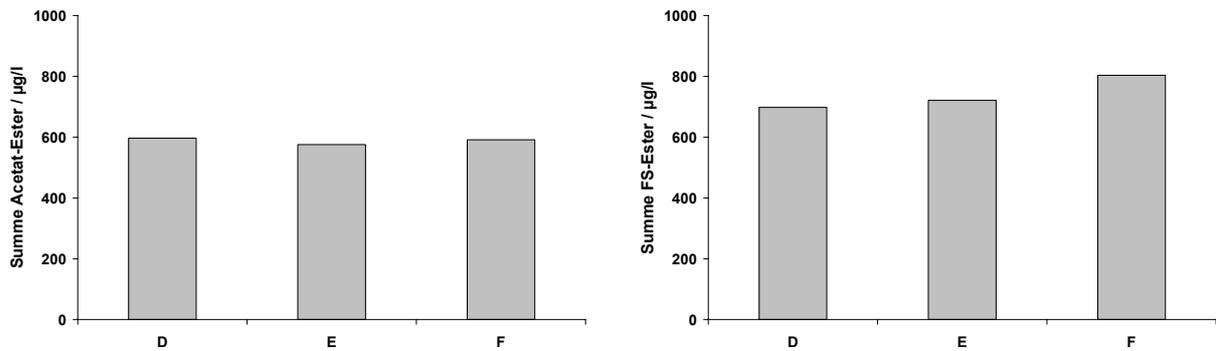


Abbildung 113: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung eines qualitativ hochwertigen Hefebieres

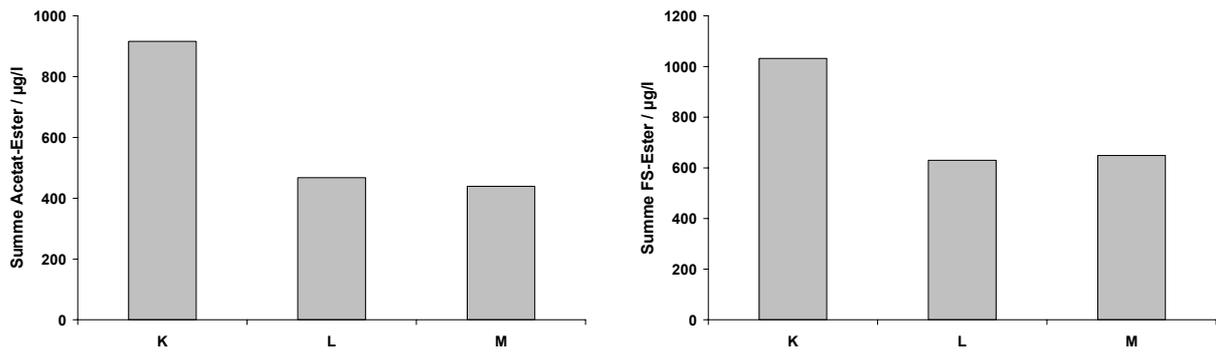


Abbildung 114: Verhalten der Acetat und Fettsäure-Ester nach der Zumischung eines qualitativ schlechten Hefebieres

Im Bereich der Alterungskomponenten wurden mit steigenden Dosageanteilen an Hefebier ähnlich wie in der vorhergehenden Versuchsreihe im Bereich des 2-Furfural und damit auch in der Summe der Alterungskomponenten günstigere Werte gemessen (cf. Abbildung 115).

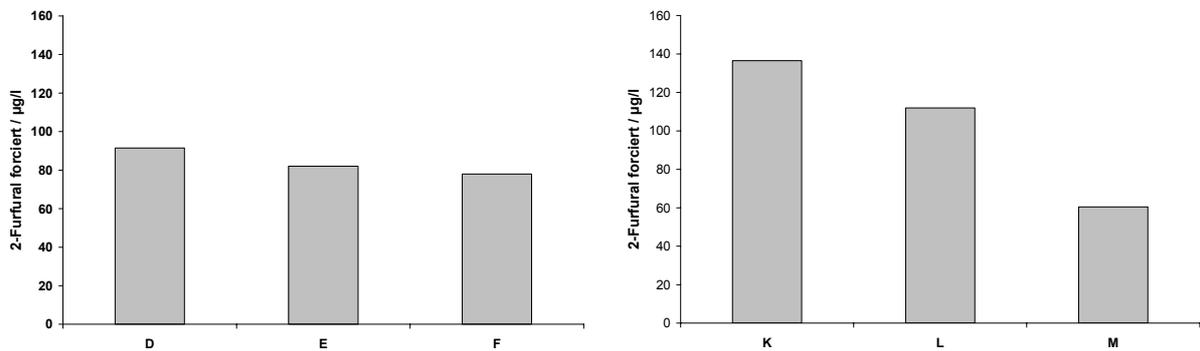


Abbildung 115: Verhalten von 2-Furfural durch Zumischung von Hefebier mit guter Qualität (links) und schlechter Qualität (rechts)

Die vollständigen Ergebnisse sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 135 und Tabelle 136).

### 5.5.2.3 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere

Die fertigen Biere wurden nach DLG-Kriterien und anhand des Alterungsverkostungsschemas im frischen und im forciert gealterten Zustand verkostet. Abbildung 116 zeigt die Ergebnisse der sensorischen Prüfungen für die Biere D–F.

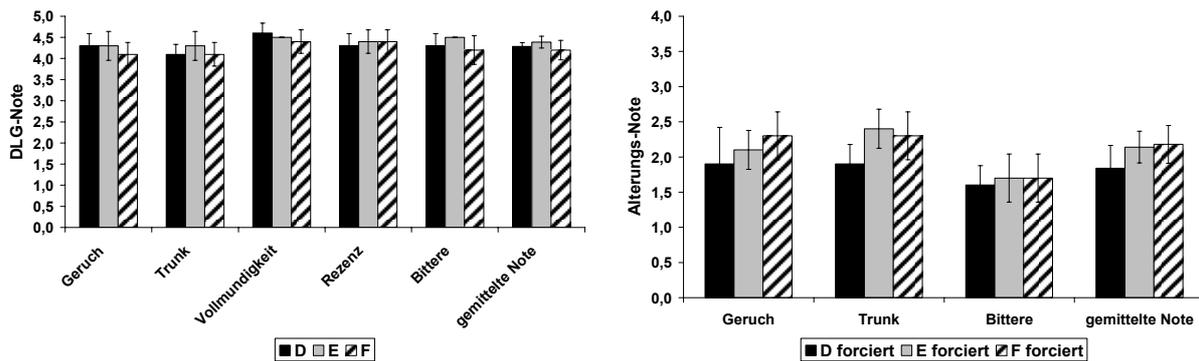


Abbildung 116: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung (forciert gealtert) der Biere D–F

Im frischen Zustand sind nur geringfügige Unterschiede auszumachen, selbst hohe Dosageanteile scheinen sich nicht negativ auf die sensorischen Eigenschaften der Biere auszuwirken. Im forciert gealterten Zustand allerdings fallen wiederum die Verschnittbiere deutlich gegenüber dem Vergleichsbier ab. Die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant (cf. Anhang Tabelle 137, Tabelle 138 und Tabelle 139). Ähnlich verhielten sich die Biere der Versuchsreihe K–M (cf. Abbildung 117). Hier fielen die Verschnittbiere vor allem aufgrund der unangenehmen breiten Bittere ab. Bezüglich der Alterung wurden die gleichen Tendenzen wie bei den vorangegangenen Versuchsreihen beobachtet. Auch hier konnten keine signifikanten Unterschiede ausgemacht werden (cf. Anhang Tabelle 140, Tabelle 141 und Tabelle 142).

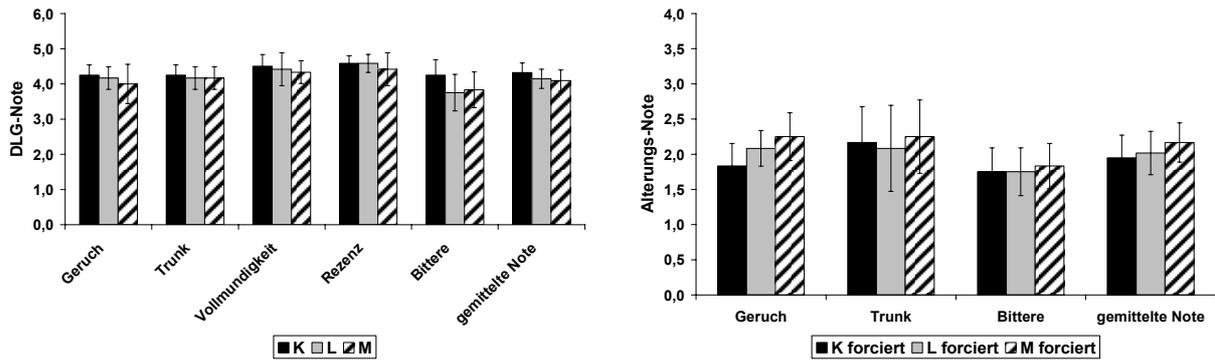


Abbildung 117: Ergebnisse der DLG-Verkostung (frisch) und Alterungsverkostung (forciert gealtert) der Biere K–M

### 5.5.3 Diskussion der Ergebnisse der Dosageversuche im Kaltbereich

Der Einfluss der Zudosage von Hefebieren unterschiedlicher Qualität konnte sehr gut nachvollzogen werden. Negativ machte sich insbesondere der Einfluss eines qualitativ schlechten Hefebieres auf die Bittere, auf das Aromaprofil und die Alterungsstabilität bemerkbar. Interessant in diesem Zusammenhang ist die unter Kapitel 5.2.3.4 schon erwähnte Diskrepanz zwischen analytisch messbarer und sensorisch wahrgenommener Alterungsstabilität. Auch in dieser Versuchsreihe wurde deutlich, dass besonders durch die Dosage von qualitativ schlechtem Hefebier vor allem die Gehalte an aromaaktiven Estern (Ausnahme Ethylacetat) stark abnahm. In der Literatur wird auf die Existenz einer extrazellulären Esterase hingewiesen, welche in der Lage ist, aromaaktive Ester zu spalten und damit deren Einfluss auf die sensorischen Eigenschaften des Bieres herabzusetzen [178, 235, 236]. Vor allem im Bereich der Alterungsstabilität ist dieser Abbau von Estern kritisch, da diese aufgrund ihrer Aromaaktivität die Alterungsaromen über einen längeren Zeitraum kaschieren können [237]. Die Esterasen wurden als sehr thermostabil beschrieben, wodurch nach einer Kurzzeiterhitzung noch Restaktivitäten nachzuweisen waren. In eigenen Versuchen konnte dies bestätigt werden, wobei mindestens 220 PE aufgebracht werden mussten, um dieses Enzym zu inaktivieren (cf. Abbildung 118).

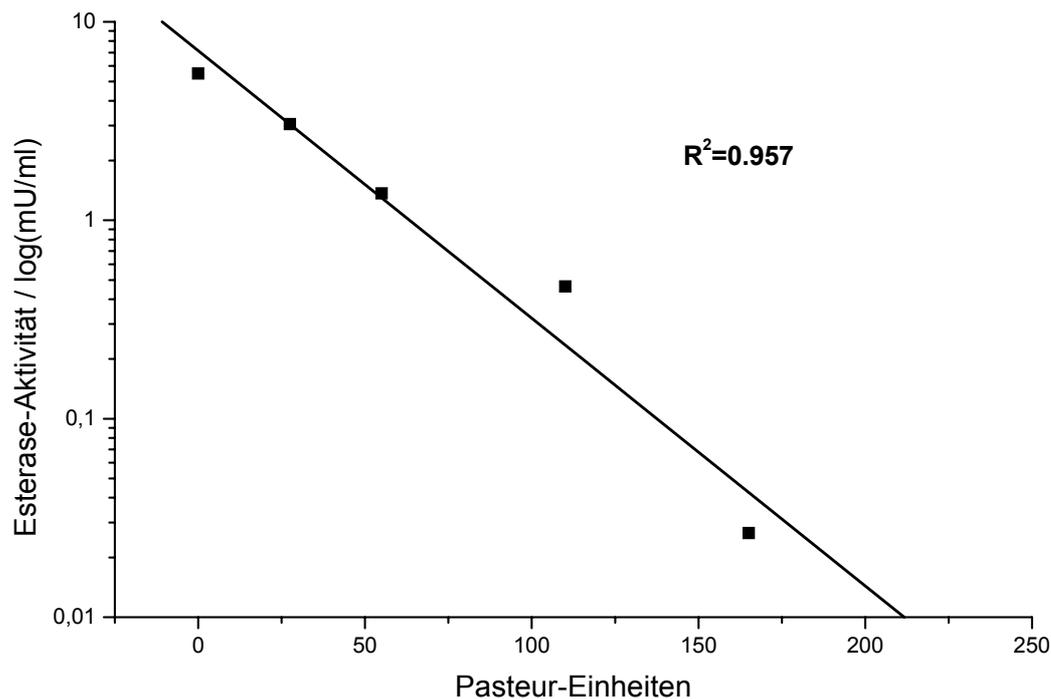


Abbildung 118: Einfluss der Pasteurisation auf die Esterase-Aktivität

Die Existenz dieser Esterase-Aktivität konnte im Rahmen der Untersuchungsreihe H–M nachgewiesen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 119 dargestellt. Es wurde deutlich, dass mit steigendem Hefebieranteil auch die Aktivität der Esterase zunimmt. Um die Biere vor diesem schädigenden Einfluss zu schützen, ist es demnach zwingend erforderlich, die Hefebiere einer Kurzzeiterhitzung zu unterziehen. Durch diese Maßnahme wird nicht nur die mikrobiologische Sicherheit gewährleistet, zudem kann auch der schädigende Einfluss verschiedener Hefeenzyme (Esterase, Proteinase A) ausgeschaltet werden.

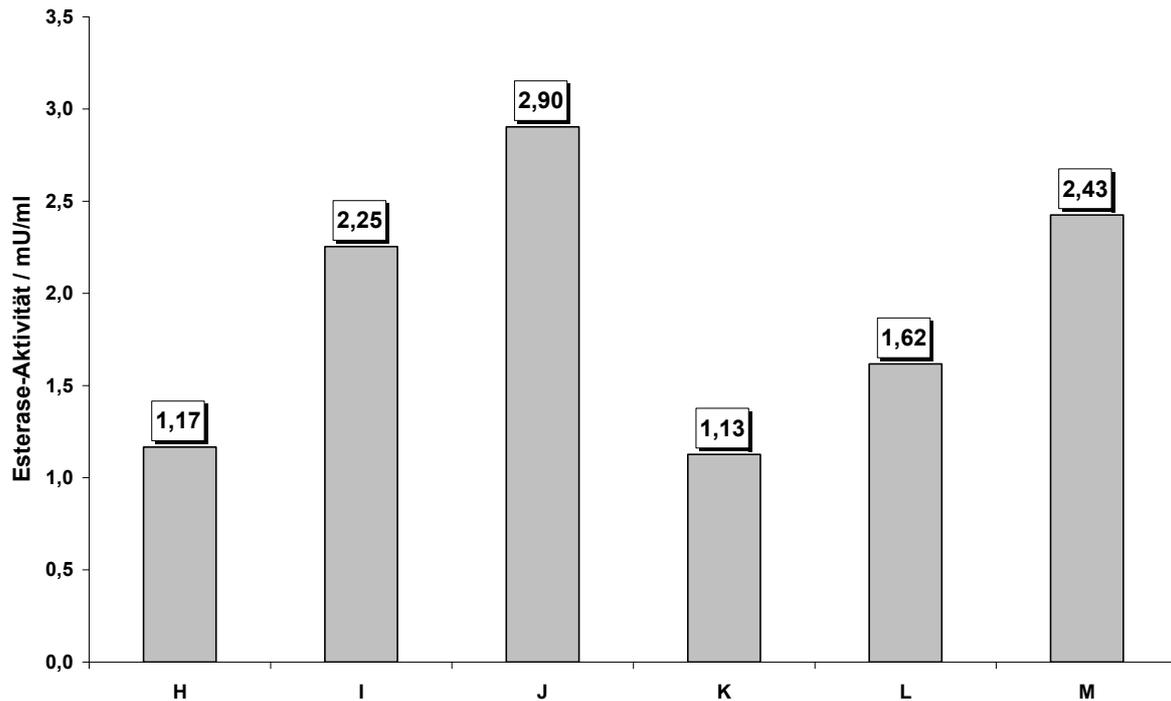


Abbildung 119: Esterase-Aktivität in den Untersuchungsbiere H–M

Auf der anderen Seite wurden ebenfalls mit steigenden Dosageanteilen an Hefebieren deutlich niedrigere Werte für 2-Furfural und damit auch für die Summe der Alterungsindikatoren gemessen. Diese Tatsache ist mit der Eigenschaft der Hefebiere verbunden, keine oder nur geringste Mengen an 2-Furfural zu bilden, wodurch der Verdacht nahe liegt, dass hier ein anderer Bildungsmechanismus vorliegt (cf. Abbildung 120).

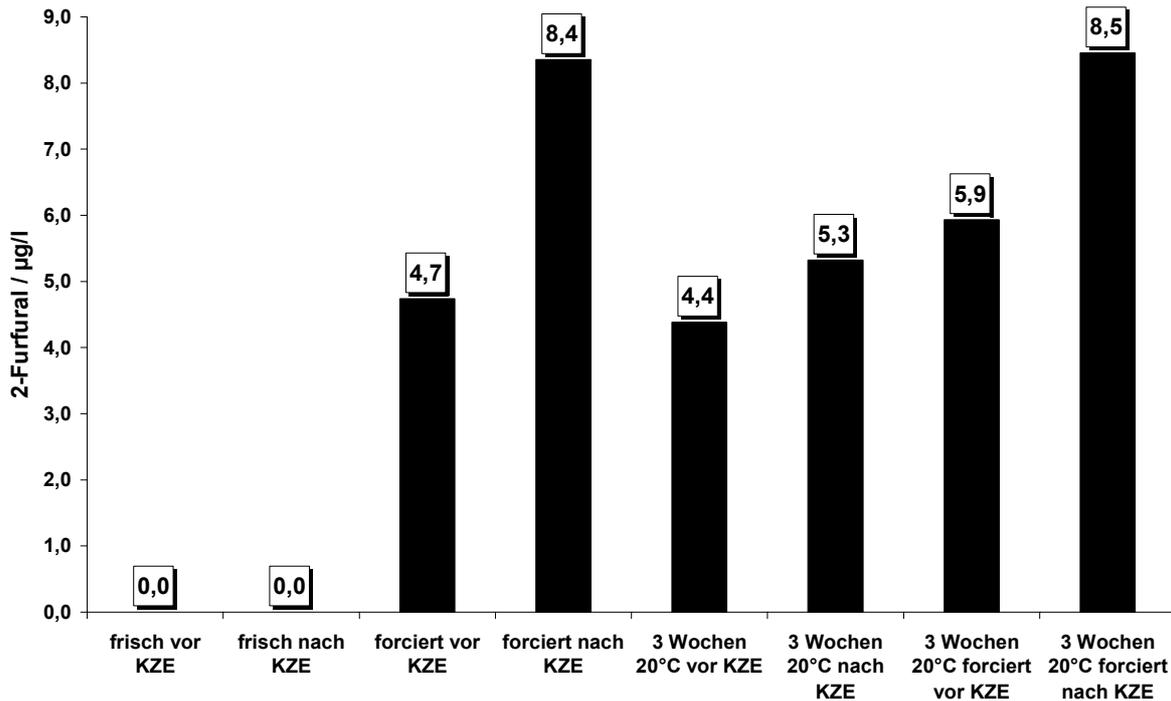


Abbildung 120: Verhalten von 2-Furfural während verschiedener thermischer Belastungen

Von VANDERHAEGEN *et al.* [238, 239] wird die Bildung von 2-Furfuryl-Ethyl-Ether (FEE) aus 2-Furfurylalkohol und Essigsäure-Furfuryl-Ester beschrieben (cf. Abbildung 121). FEE wurde bereits von EICHHORN [164] als wichtige Aromakomponente bei der Bieralterung identifiziert. Der Geruchsschwellenwert für FEE wird für Bier mit 6 µg/l angegeben, wobei ein stechendes, lösungsmittelartiges Aroma entsteht [240]. Dieses Aroma wurde bisher dem ebenfalls im Hefebier in höheren Konzentrationen vorliegenden Ethylacetat zugeschrieben, wobei möglicherweise hier synergistische Effekte zum Tragen kommen. Die Bildung von FEE wird durch höhere Alkoholgehalte und dunklere Bierfarben begünstigt. Beide Parameter sind auch in Hefebieren im Vergleich zu einem „normalen“ Bier erhöht. Von denselben Autoren wird eine verstärkte Bildung von FEE durch Hefelysat bei flaschenvergorenen Bieren beschrieben.

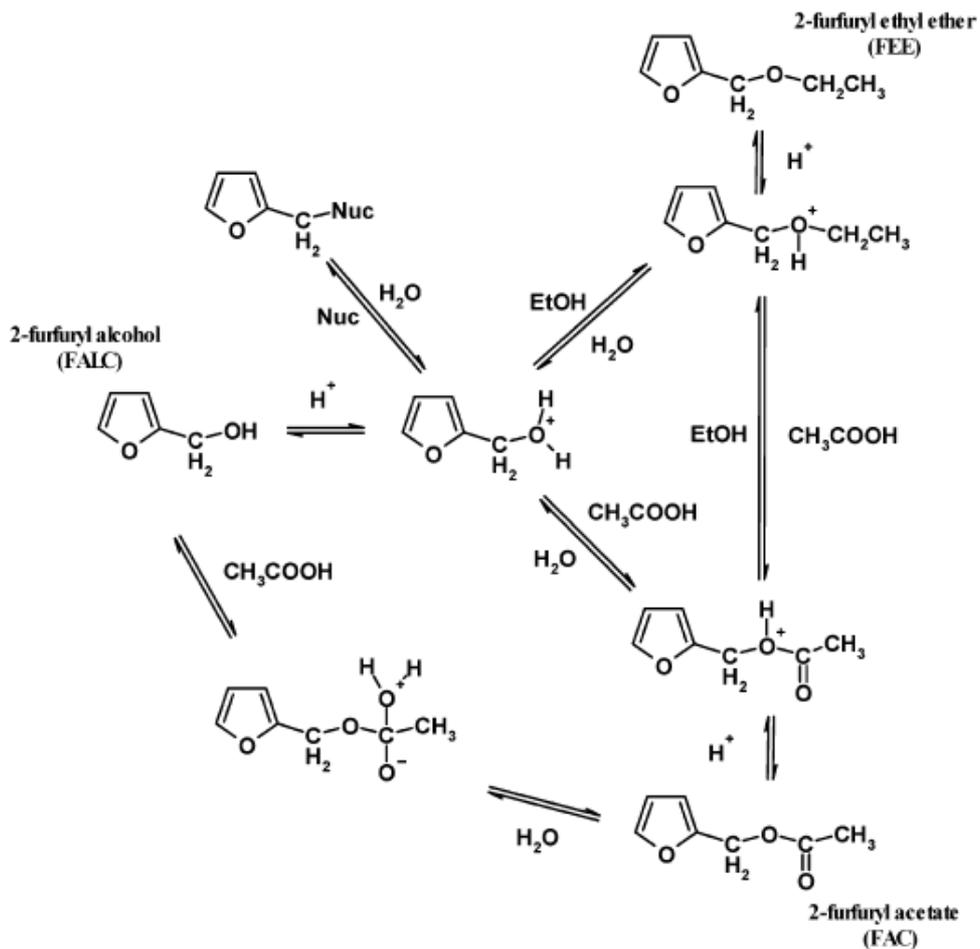


Abbildung 121: vorgeschlagener Bildungsmechnismus von 2-Furfuryl-Ethyl-Ether bei der Bieralterung [238]

Abschließend für diese Versuchsreihe wurde eine statistische Auswertung auf Basis der Faktorenanalyse durchgeführt, um die wichtigsten Einflussgrößen im Bereich der Aromastoffe herauszufiltern. Insgesamt wurden dazu 1350 Einzelaromastoffe verarbeitet. Abbildung 122 bzw. Abbildung 123 zeigen die Hauptkomponentenanalyse bzw. die rotierte Komponentenmatrix. Auffällig ist die klare Abgrenzung der Biere G1, G2, N1 und N2. Ursächlich für die Trennung der reinen Hefebiere von den Null- bzw. Verschnittbieren sind Aromastoffe, die sehr hohe Faktorladungen für den Faktor 1 aufweisen. Dies sind in positiver Richtung u.a. Ethylacetat, Isovaleriansäure, höhere aliphatische Alkohole und in negativer Richtung u.a. 2-Furfural. Dies sind alles Indikatorsubstanzen für Hefebiere. Die Null- und Verschnittbiere grenzen sich im Wesentlichen durch Aromastoffe ab, die hohe Faktorladungen für Faktor 2 aufweisen.

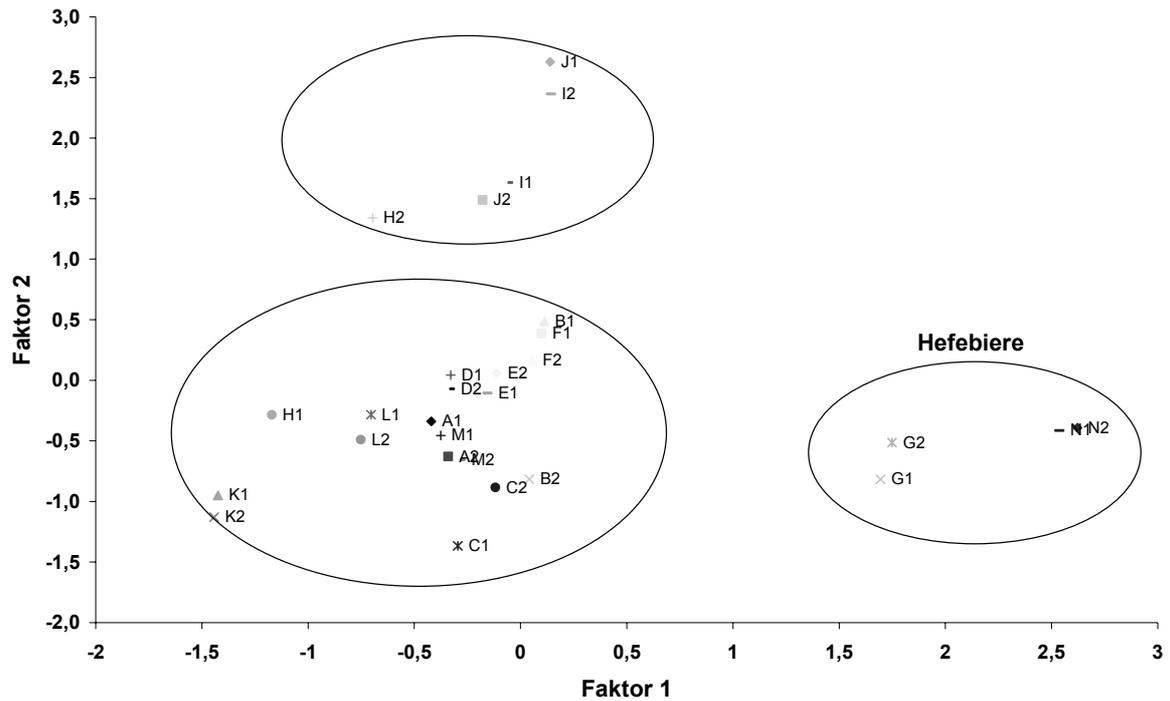


Abbildung 122: Hauptkomponentenanalyse für die Biere A–N

Insgesamt betrachtet bilden alle Null- und Verschnittbiere eine sehr homogene Gruppe, d.h. dass die Einflüsse der Zudosage im Bereich der Aromastoffe nicht sehr ausgeprägt zu sein scheint. Lediglich die Biere der Zudosage von qualitativ schlechtem Hefebier zur Anstellwürze (Biere H–J) unterscheiden sich deutlicher. Diese Biere zeichneten sich vor allem durch höhere Gehalte an Acetat-Estern aus.

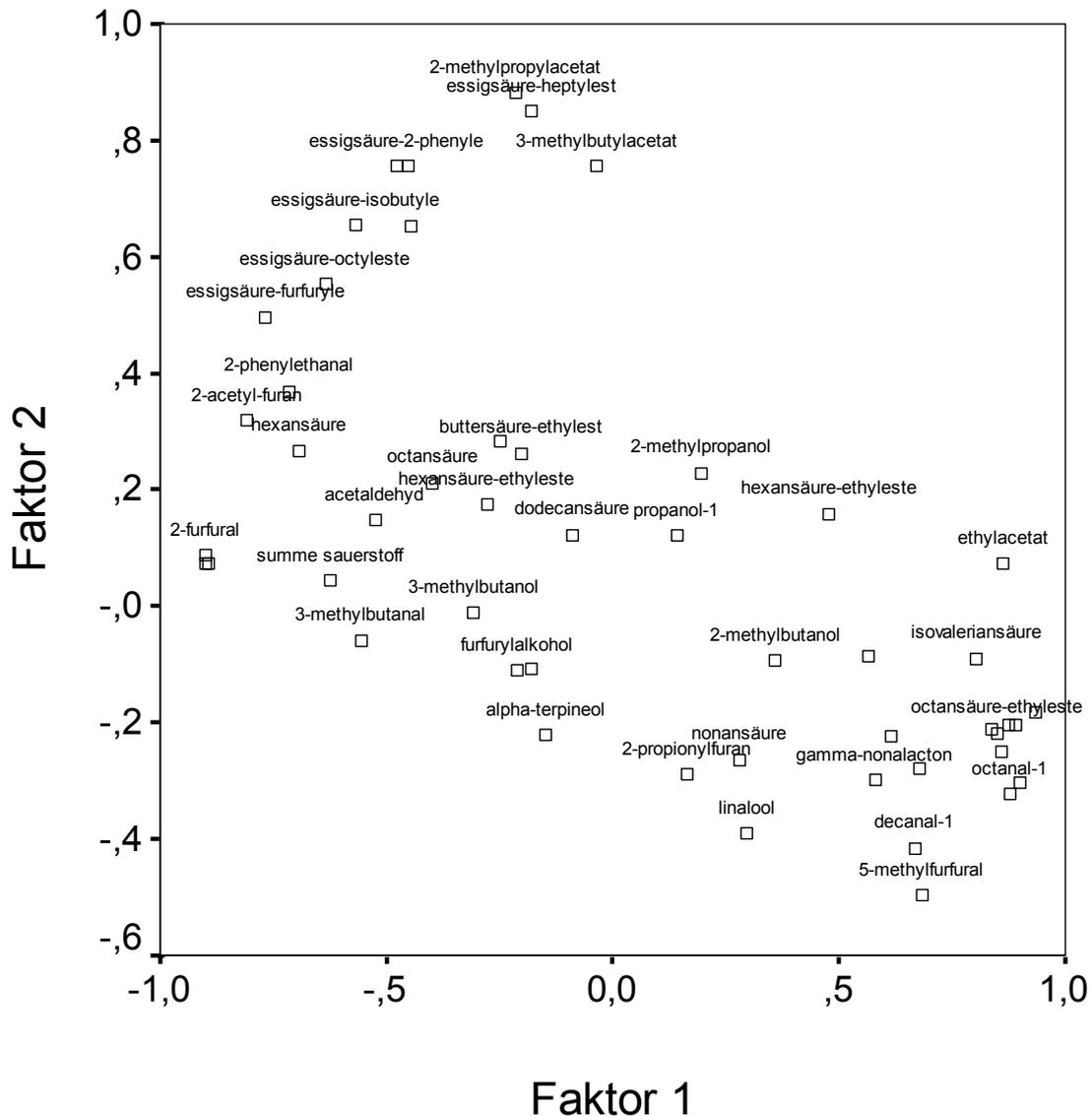


Abbildung 123: *Component plot* für die untersuchten Aromastoffe

### 5.5.4 Ergänzende großtechnische Untersuchungen zur Dosage von Hefebieren im Kaltbereich

Die aus der Untersuchungsreihe 5.3.4.4 gewonnenen Hefebiere, ergänzt um zwei weitere Hefebiere, wurden im Großmaßstab zum Jungbier mit einem Dosageanteil von 10 % Vol.-% dosiert und die fertigen Biere anschließend analysiert. Es handelte sich dabei immer um Bier der gleichen Sorte. Insgesamt wurden 4 Versuchsreihen durchgeführt. Tabelle 66 zeigt die verwendete Probenbezeichnung.

Tabelle 66: verwendete Probenbezeichnung

Probe	Bezeichnung
A	Vergleich 1
B	Vergleich 1 + 10 Vol.-% Hefebier
C	Vergleich 2
D	Vergleich 2 + 10 Vol.-% Hefebier
E	Vergleich 3
F	Vergleich 3 + 10 Vol.-% Hefebier
G	Vergleich 4
H	Vergleich 4 + 10 Vol.-% Hefebier

Im Anhang sind die vollständigen Ergebnisse dargestellt (cf. Tabelle 143 und Tabelle 144). Es soll hier lediglich die statistische Auswertung auf Basis der Faktorenanalyse dargestellt werden. Wie aus Abbildung 124 zu ersehen, liegen die Biere A–G relativ dicht zusammen, wohingegen Bier H sich im Faktor 1 deutlich von den restlichen Bieren unterscheidet.

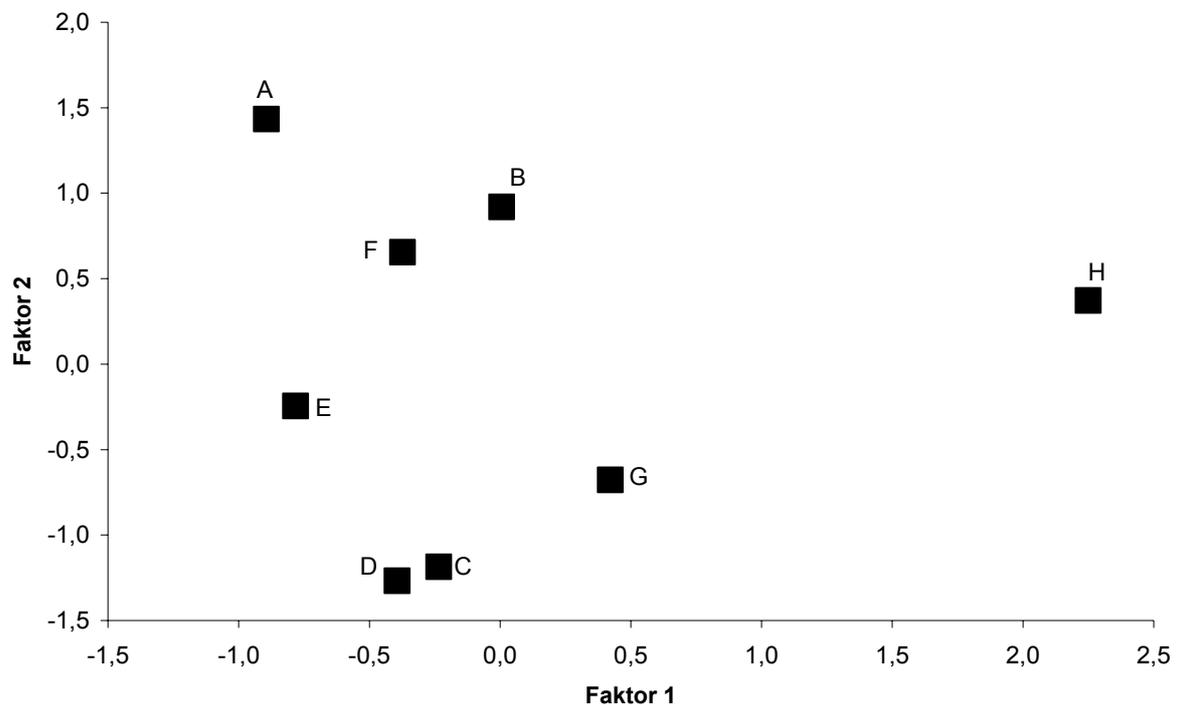


Abbildung 124: Faktorenanalyse für die Biere A–H

Gut zu sehen ist auch die geringe Distanz der Biere innerhalb einer Versuchsreihe, was auf nur geringe Unterschiede hinsichtlich der Untersuchungsparameter trotz des relativ hohen Dosagevolumens hindeutet. Abbildung 125 zeigt graphisch die

Faktorladungen der Faktoren 1 und 2, wobei Faktor 1 überwiegend durch die Aminosäuren bestimmt wird. Der Unterschied von Bier H zu den übrigen ist daher vor allem aus der Abweichung beim Gehalt der Aminosäuren begründet. Der Grund für die deutlich erhöhten Aminosäuregehalte konnte nicht bestimmt werden.

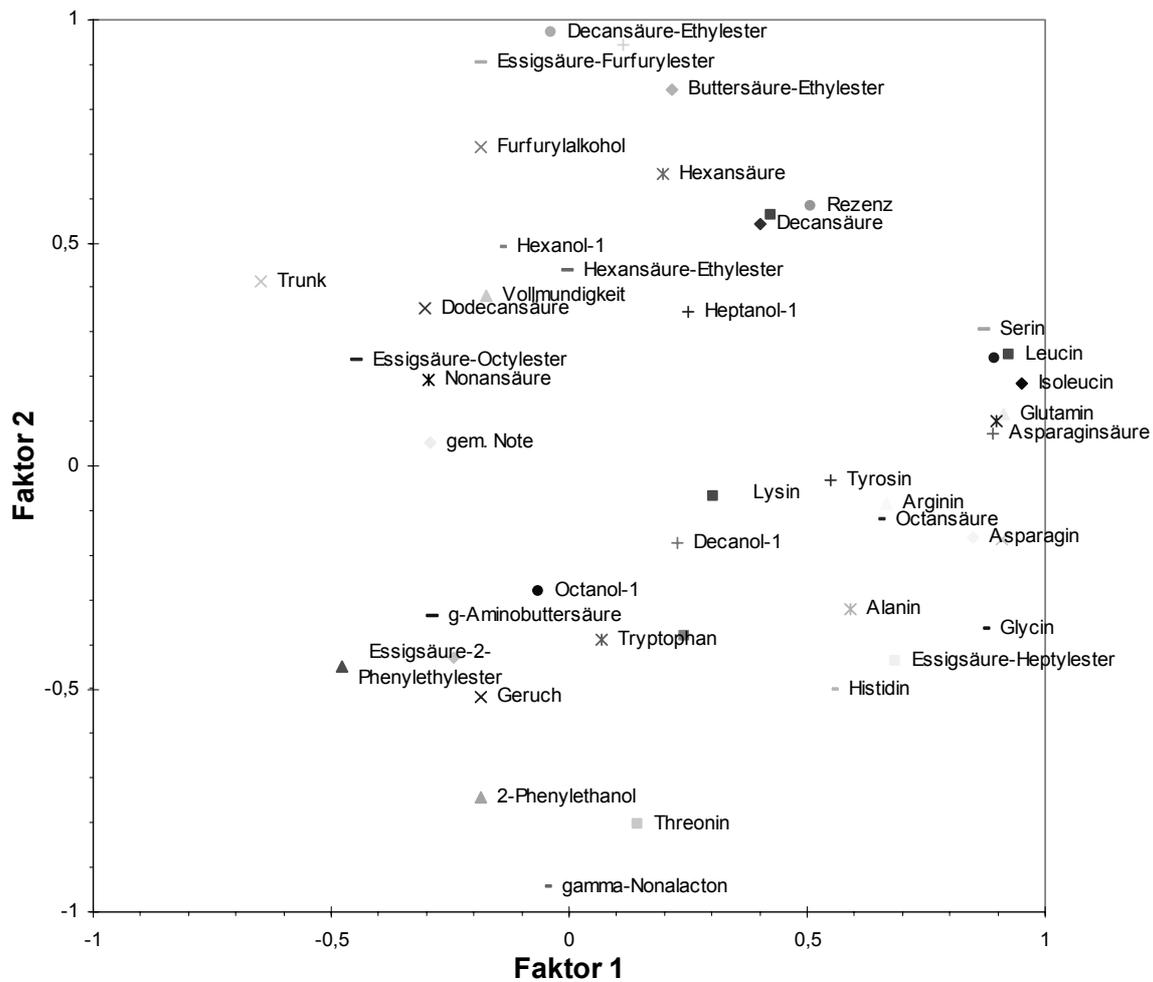


Abbildung 125: *Component plot* für die Untersuchungsparameter

## 5.6 Kombinierte Dosage von Prozessbieren

Die kombinierte Dosage umfasste die Zugabe von Prozessbieren in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler und die Dosage von Hefebier zur kalten Anstellwürze. Die Dosagevolumina setzten sich zusammen aus

- 2,5 Vol.-% Prozessbier aus einer unverkauften Festbiercharge (=Rückbier)
- 3,0 Vol.-% rückgewonnenes, kurzzeiterhitztes Hefebier aus einer Erntehefe.

Als Vergleich diente ein Bier, welches ohne die Zugabe von Prozessbieren bzw. Hefebieren aus derselben Würze hergestellt wurde. Alle Versuche wurden als Doppelansatz ausgeführt. Die verwendete Hefe wurde am Vortag propagiert (ICP: 6,42). Die weiteren Prozessparameter entsprachen den in Kapitel 4.1 beschriebenen. In Tabelle 67 sind die verwendeten Probenbezeichnungen dargestellt.

*Tabelle 67: verwendete Probenbezeichnung*

<b>Probe</b>	<b>Bezeichnung</b>
A	Vergleich 1
B	Vergleich 2
C	Mischung 1
D	Mischung 2
A+B	Mittelwert aus Vergleich 1 und Vergleich 2
C+D	Mittelwert aus Mischung 1 und Mischung 2

Die Analysendaten der verwendeten Prozessbiere sind im Anhang abgedruckt (cf. Anhang Tabelle 146).

### 5.6.1 Chemisch-technische Untersuchungen der fertigen Biere

Der Extraktabbau bei den Gärungen verlief nahezu identisch. Im Bereich der chemisch-technischen Untersuchungen wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. In Abbildung 126 sind die Ergebnisse für die Schaummessungen und die Messungen für die antioxidativen Eigenschaften der untersuchten Biere dargestellt.

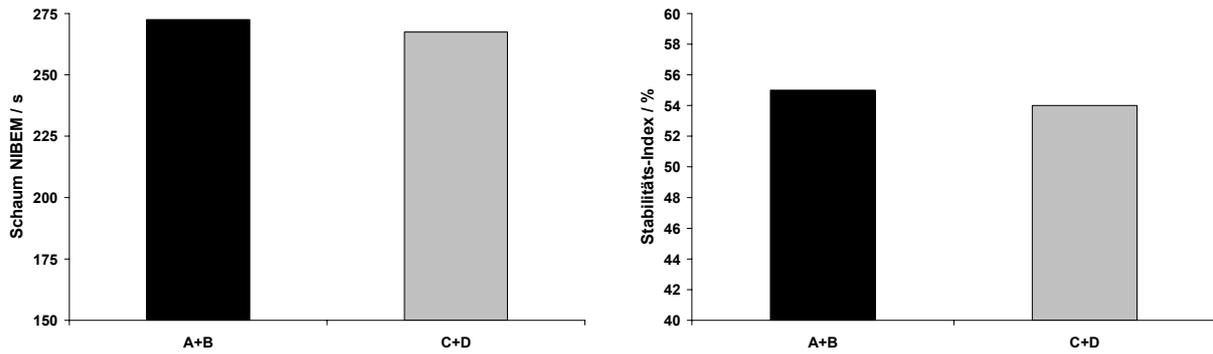


Abbildung 126: Ergebnisse der Schaummessung (links) und der antioxidativen Messungen (rechts)

Die Untersuchungen im Bereich der kolloidalen Stabilität ergaben im Mittel 8 WT für die Biere A+B und 9 WT für die Biere C+D. Dieser Unterschied ist allerdings statistisch nicht signifikant. Sämtliche Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (*cf.* Anhang Tabelle 147).

### 5.6.2 Gaschromatographische Untersuchungen der fertigen Biere

Bei den gaschromatographischen Untersuchungen wurden geringere Konzentrationen an leichtflüchtigen Estern, vor allem an Acetat-Estern, und mittelkettigen Fettsäuren gemessen. Insbesondere für die mittelkettigen Fettsäuren ist dies überraschend, wurde doch eine erhöhte Fracht dieser Verbindungen durch das zudosierte Hefebier mit eingebracht.

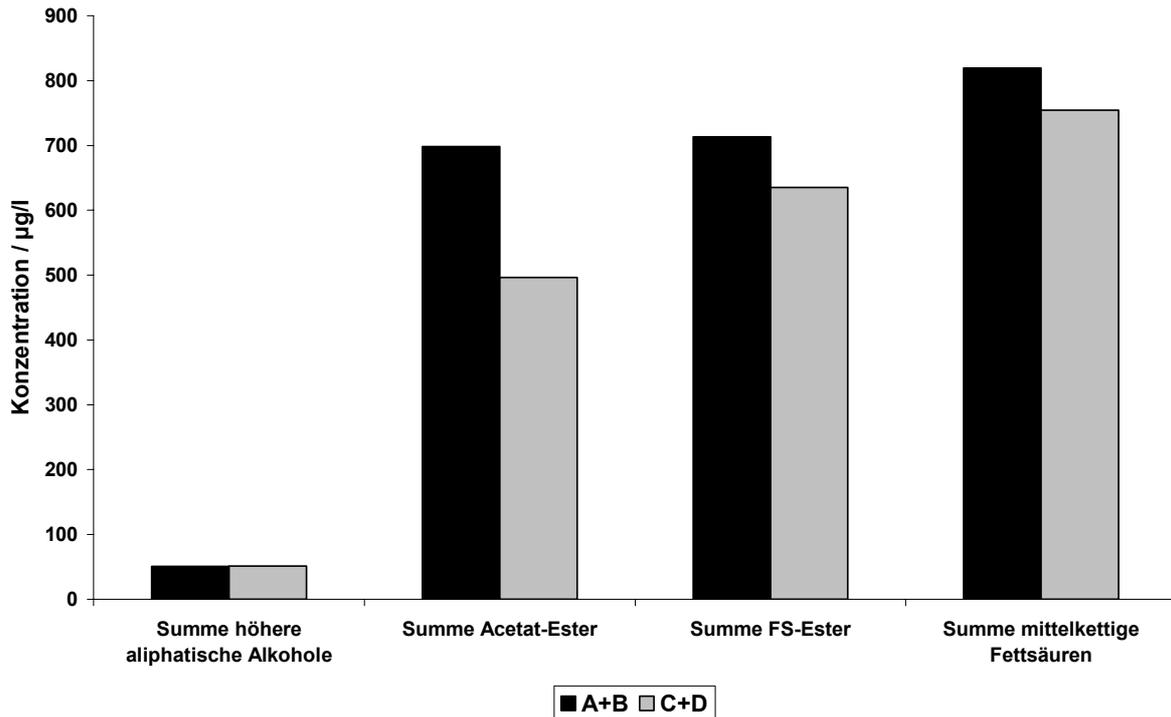


Abbildung 127: Mittelwerte ausgewählter Bieraromastoffe der Biere A–D<sup>12</sup>

Im Bereich der Alterungsindikatoren ergaben sich leichte Verbesserungen durch die Dosage der Prozessbiere (cf. Abbildung 128). Die Verringerung der thermischen Indikatoren ist auf die Dosage der Hefebiere zurückzuführen (cf. Kapitel 5.5.3). Die Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 148).

<sup>12</sup> FS:=Fettsäure; Konzentration der Summe der mittelkettigen Fettsäuren muss mit dem Faktor 10 multipliziert werden

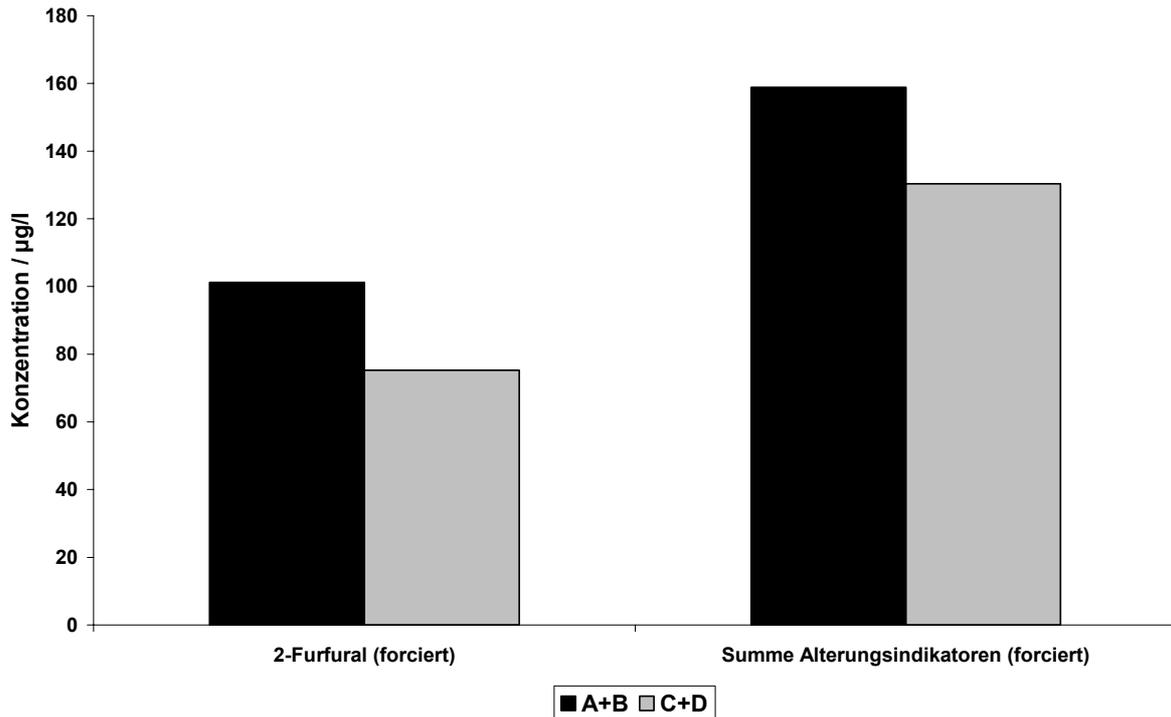


Abbildung 128: Mittelwerte ausgewählter Alterungsindikatoren der Biere A–D

### 5.6.3 Sensorische Untersuchungen der fertigen Biere

Die sensorischen Ergebnisse sind in Abbildung 129 gezeigt. Wiederum konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Varianzanalytische Untersuchungen bestätigten dies (cf. Anhang Tabelle 149, Tabelle 150 und Tabelle 151).

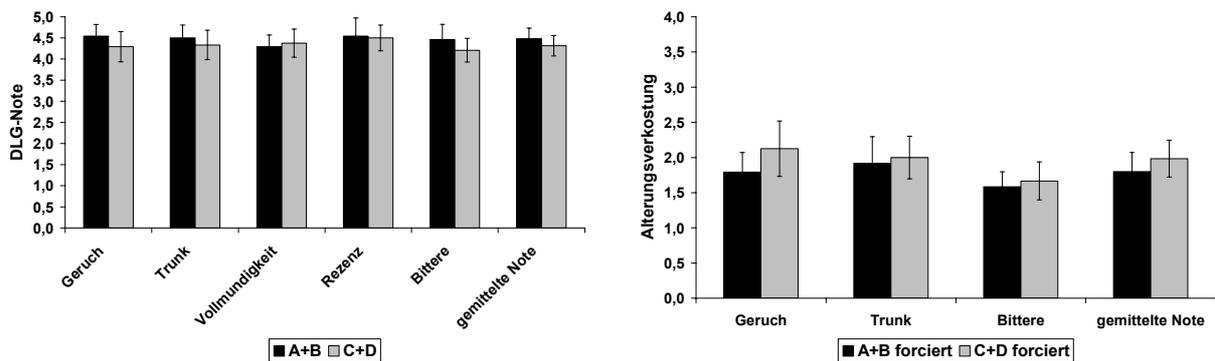


Abbildung 129: Verkostungsergebnisse der frischen (links) und der forciert gealterten Bierproben (rechts)

Obwohl anhand der analytischen Ergebnisse im Bereich der Alterungsindikatoren leichte Vorteile für die Verschnittbiere gemessen wurden, konnte tendenziell eine

etwas schlechtere Alterungsstabilität nachgewiesen werden. Einschränkend muss hinzugefügt werden, dass das Qualitätsniveau der Biere sehr hoch lag, so dass die hier festgestellten Unterschiede sich nicht in einer Beeinträchtigung der Biere äußeren sollten. Im Rahmen der Untersuchungen wurde auch versucht, anhand einer paarweisen Vergleichsprüfung Präferenzen für die Biere herauszufinden. In Tabelle 68 sind die Ergebnisse dieser Verkostungsreihe zusammengefasst.

*Tabelle 68: Präferenzen für die Untersuchungsbiere nach paarweiser Vergleichsprüfung*

	<b>Bevorzugung A+B</b>	<b>Bevorzugung C+D</b>	<b>kein Unterschied</b>
Anzahl der Verkoster	5	8	3

Die Ergebnisse der Verkostungen wurden nach drei verschiedenen Kriterien ausgewertet [241]:

- Annahme, dass Prüfer für jede Antwort die gleiche Chance hat (Fall 1)
- Vergleich Präferenz Biere X und Y gegen keine Präferenz (Fall 2)
- Vergleich Präferenz Bier X oder Bier Y (Fall 3)

Die Auswertung für Fall 1 und Fall 3 ergaben keine signifikanten Unterschiede. Der Test gegen keine Präferenz (Fall 2) ergab allerdings einen signifikanten Unterschied auf einem Signifikanzniveau von  $p=0.95$ , d.h. die Verkoster erkannten einen Unterschied zwischen diesen Bieren, wobei sie entweder die Biere A+B oder die Biere C+D bevorzugten. Es trat also innerhalb der Verkoster eine Polarisierung auf. Die Ergebnisse der Auswertung sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 153).

## **5.7 Wirtschaftliche Aspekte zur Verwertung der Prozessbiere**

Ein Gesamtkonzept für die produktionsinterne Verwertung von Prozessbieren sieht nicht nur sichere technologische Verfahren, sondern auch die Wirtschaftlichkeit der angestrebten Verfahrensweisen vor. Nur wenn beide Teilaspekte positiv bewertet werden können, ist die Prozessbierverwertung als sinnvoll anzusehen. Im Folgenden sollen einige Teilbereich näher betrachtet werden.

### **5.7.1 Wirtschaftliche Bewertung der Rückgewinnung von Hefebieren**

Im Folgenden wird eine exemplarische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Rückgewinnung von Bier aus Überschusshefe durchgespielt. Die dabei zugrunde gelegten Daten, die nicht explizit im Text erscheinen, sind im Anhang hinterlegt.

Als Berechnungsgrundlage soll eine Brauerei mit einem Gesamtjahresausstoß von 500.000 hl dienen. Tabelle 69 zeigt einige Eckwerte für die Berechnung der Wirtschaftlichkeit auf.

*Tabelle 69: Eckwerte der Kalkulation für die Amortisation einer Hefebierrückgewinnungsanlage*

Parameter	Messgröße	Einheit
Gesamtjahresausstoß	500.000	hl/a
spezifischer Abwasseranfall	0,4	m <sup>3</sup> /hl VB
durchschnittlicher CSB-Gehalt	1.500	mg O <sub>2</sub> /l
Extremwert	4.500	mg O <sub>2</sub> /l
anfallende Hefemenge	15.000	hl/a
Trockensubstanz Auslauf	25	mas.-%
Investitionskosten	250.000	€
kalkulatorische Kosten	35.000	€
Laufzeit der Anlage	10	Jahre
kalkulatorischer Zinssatz	8	%

Wichtig für die Wirtschaftlichkeit ist der anfängliche Trockensubstanzgehalt der Hefesuspension. Dieser ist, neben dem Trennsystem, der wichtigste Parameter zur Steuerung der Ausbeute. Abbildung 130 zeigt den Zusammenhang zwischen anfänglicher Trockensubstanz und erreichbarer Ausbeute.

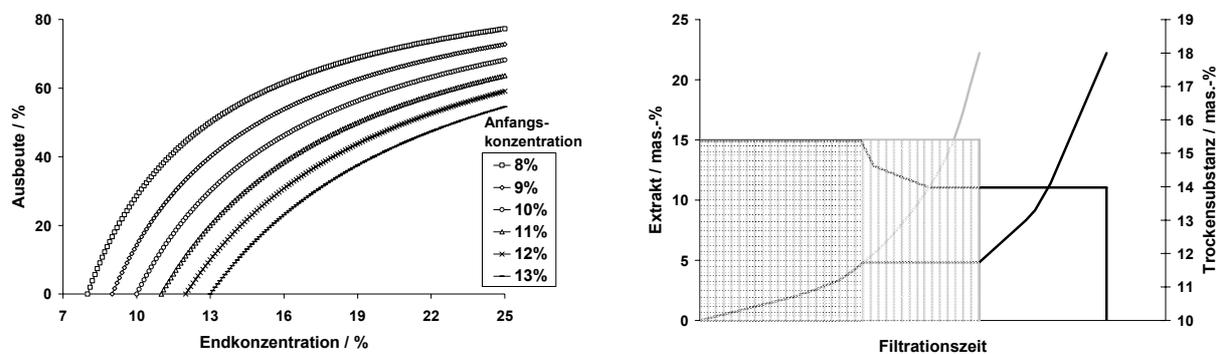


Abbildung 130: Zusammenhang zwischen Ausbeute und anfänglichem Trockensubstanzgehalt der Hefesuspension (links) und Effekt der Diafiltration (rechts) (in Anlehnung an SCHNEIDER *et al.* [136])

Daraus wird ersichtlich, dass bei gleichem Endtrockensubstanzgehalt durch eine verringerte Anfangstrockensubstanz die Ausbeute wesentlich erhöht werden kann. Diesen Effekt macht man sich z.B. durch die Anwendung der Diafiltration zunutze. Wie aus Abbildung 130 (rechts) ersichtlich wird, kann die Fläche unterhalb der Kurve

(horizontale Schraffierung) und damit die Ausbeute durch die Diafiltration deutlich gegenüber der Fläche der konventionellen Arbeitsweise (vertikale Schraffierung) erhöht werden. Aber nicht nur der Anfangstrockensubstanzgehalt spielt eine wichtige Rolle, sondern auch der Endtrockensubstanzgehalt. Denn dieser ist neben einigen anderen Faktoren (z.B. Hefeviabilität) wichtig für die Vergütung der Hefesuspension durch einen Hefeverwerter. So werden mit zunehmenden Trockensubstanzgehalten auch steigende Erlöse erzielt (cf. Abbildung 131). Aus der Abbildung wird zudem ersichtlich, dass ein zu niedriger Trockensubstanzgehalt im ungünstigsten Fall zu einem negativen Verkaufserlös führen würde, d.h. unterhalb einer Trockensubstanz von ca. 7 mas-% müsste die Brauerei für die Abgabe von Hefe an einen Hefeverwerter noch bezahlen.

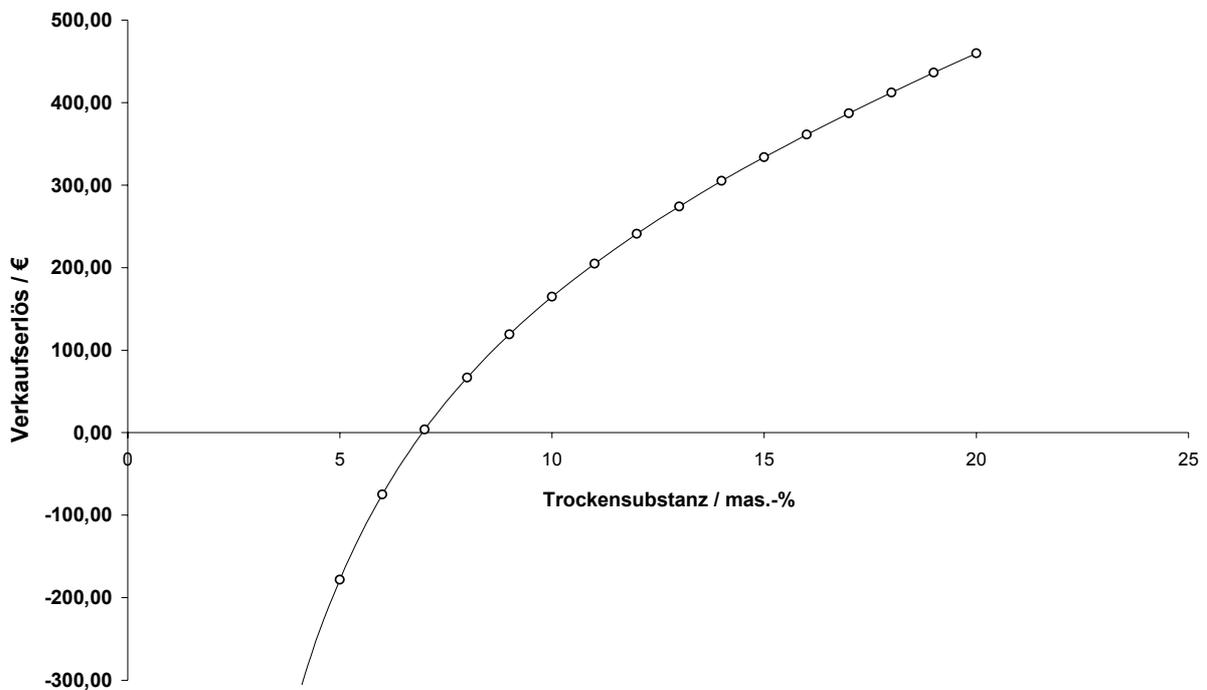


Abbildung 131: Zusammenhang zwischen Verkaufserlös und Trockensubstanzgehalt

Im Folgenden sind einige Varianten durchgerechnet, die den Einfluss der Trockensubstanz auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens deutlich machen sollen. Die Berechnung der Amortisationsdauer erfolgte dabei nach dem dynamischen Ansatz entsprechend Gleichung 5.1.

$$\text{Amortisationsdauer / a} = \frac{-\ln\left(1 - \frac{\text{Investition} \times \text{Zinssatz}}{\text{jährliche Überschüsse}}\right)}{\ln(1 + \text{Zinssatz})} \quad \text{Gleichung 5.1}$$

Tabelle 70: Einfluss der anfänglichen Trockensubstanz auf die Amortisationsdauer einer Hefebierrückgewinnungsanlage<sup>13</sup>

	8%	9%	10%	11%	12%
Investitionskosten	250000	250000	250000	250000	250000
kalkulatorische Kosten	35000	35000	35000	35000	35000
Gesamtkosten	285000	285000	285000	285000	285000
Kosten entgastes Wasser	1000	667	500	182	-
jährliche Überschüsse	132466	125697	125210	115851	112159
dynamische Amortisation / a	2,13	2,25	2,26	2,46	2,55

In Abbildung 132 ist dieser Zusammenhang nochmals anschaulich dargestellt.

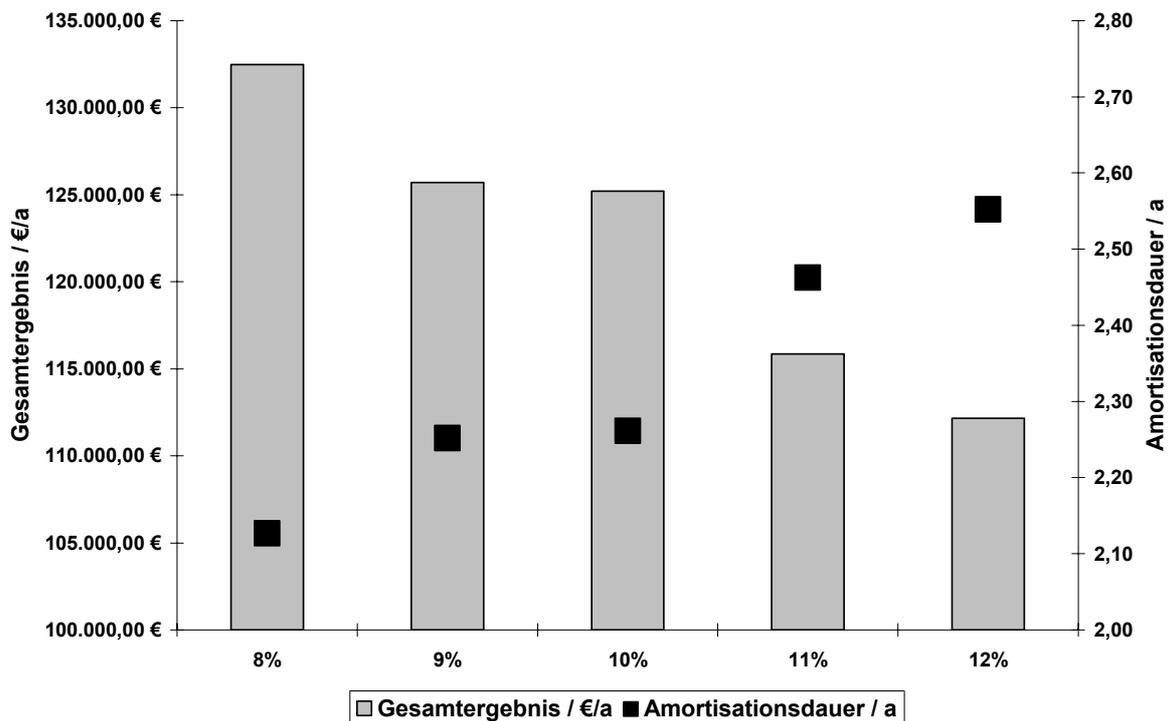


Abbildung 132: Zusammenhang zwischen Gesamtergebnis, Amortisationsdauer und Trockensubstanzgehalt

<sup>13</sup> die Einzelwerte sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Tabelle 147)

### 5.7.2 Wirtschaftliche Bewertung der Rückgewinnung von VZNL

Neben kurzen Filterrüstzeiten und der Reduktion von Abwasseranfall gehört die Minimierung des Extraktverlustes zu den wichtigsten Maßnahmen im Filterkeller. In einer Brauerei wurden in vier Versuchsreihen die Zeiten und die Stammwürzegehalte für die Abtrennung der Vor- und Nachläufe aufgenommen (cf. Anhang Tabelle 154). Abbildung 133 zeigt exemplarisch den Verlauf der Stammwürze bei der Abtrennung des Vorlaufes. Der Volumenstrom betrug dabei 60 hl/h.

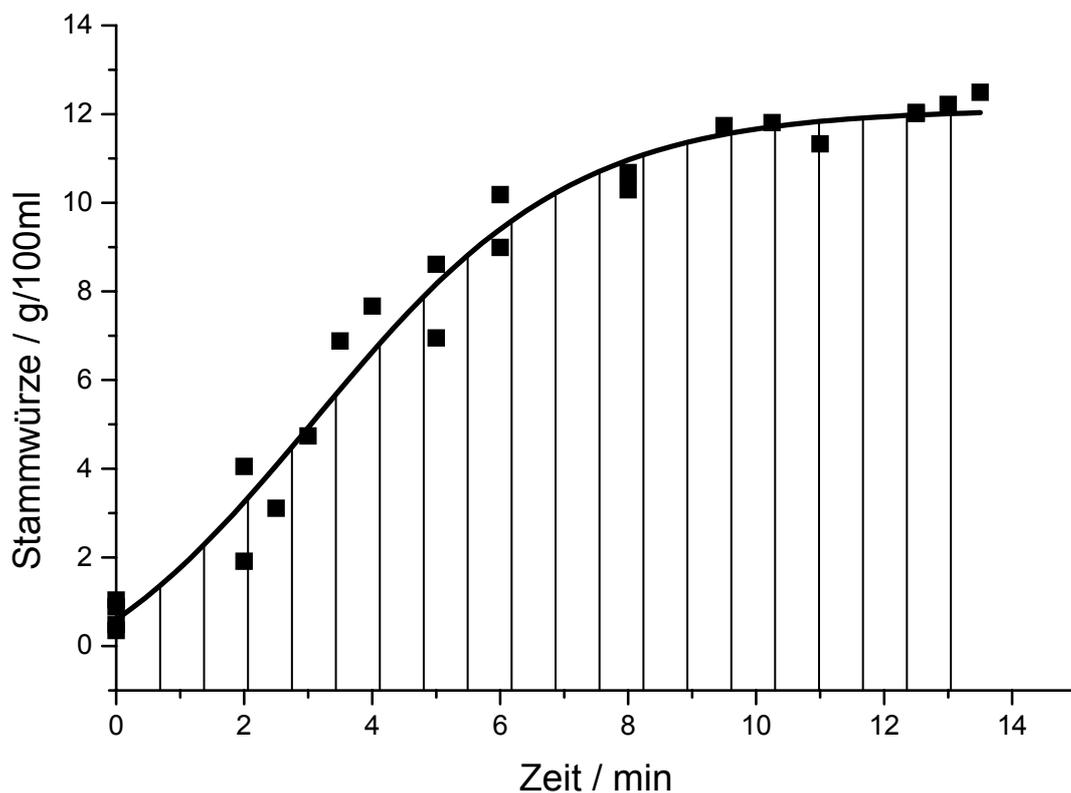


Abbildung 133: Verlauf der Stammwürze bei der Abtrennung des Vorlaufes über der Zeit

Der Verlauf der Vorlaufabtrennung folgt einem sigmoidalem Kurvenverlauf ( $r=0,9886$ ). Durch das Kurvenfitting wurde die Boltzmann-Funktion

$$y = \frac{-1,90185 - 12,11557}{1 + e^{\frac{(x-3,1032)}{2,02973}}} + 12,11557 \quad \text{Gleichung 5.2}$$

erhalten. Die schraffierte Fläche unterhalb der Kurve entspricht dem Extraktverlust. Durch Integration der Funktion und Verrechnung der entsprechenden Einheiten wurde die Fläche und damit der Extraktverlust zu 114,64 kg bestimmt. Der Vorlauf kann in dieser Brauerei technologisch nicht sinnvoll verwertet werden, da nicht mit sauerstofffreiem, entgastem Wasser angeschwemmt wird. Der Nachlauf wurde in dieser Brauerei ebenfalls mit nicht entgastem Wasser abgetrennt. Der Umschaltzeitpunkt von Drucktank auf Kanal erfolgte anhand der optischen Kontrolle im Schauglas. Die Extraktverluste für den Nachlauf konnten nicht exakt ermittelt werden. Zwar wurden laufend Bierproben bis zum Umschaltzeitpunkt von Drucktank auf Kanal genommen. Danach wurde die Filtration, sprich das Nachdrücken des Wassers abgebrochen, wodurch dann keine Proben mehr genommen werden konnten, so dass das im Filter enthaltene Flüssigkeitsvolumen abgeschätzt werden musste. Der Umschaltzeitpunkt von Drucktank auf Kanal erfolgte bei einem Stammwürzegehalt von durchschnittlich 7,25 mas.-%, wobei bedingt durch die subjektive Einschätzung sich die Trenngrenzen zwischen 5,15–10,35 mas.-% bewegten. Es kann davon ausgegangen werden, dass die beanspruchte Zeit für die Abtrennung des Nachlaufs in etwa dieselbe ist wie für die Abtrennung des Vorlaufs. Aus Gleichung 5.2 folgt, dass eine Stammwürze von 7,25 mas.-% einer Zeit von 4,38 min entspricht. Die im Filter enthaltene Flüssigkeit hat eine mittlere Stammwürze von 3,625 mas.-%. Daraus errechnet sich eine Extraktmenge von ungefähr 15,90 kg<sup>14</sup>. Zusammen mit dem Vorlauf ergibt sich so ein Gesamtverlust von ca. 130,50 kg Extrakt pro Filtration.

<sup>14</sup> Volumenstrom war über die gesamte Filtrationsdauer konstant bei 60 hl/h

### 5.7.3 Kostenaufstellung für die Dosage von Prozessbier in die Heisswürzeleitung

Im Folgenden werden die notwendigen Komponenten und die entsprechenden Preise für die in Abbildung 95 dargestellte Verfahrensweise zur Dosage von Prozessbieren in die Heisswürzeleitung aufgeführt. Die Preise beziehen sich auf entsprechende Neugestaltung der Komponenten. Einschränkend muss hinzu gefügt werden, dass in der Regel ein adäquater Prozessbiertank in der Brauerei zur Verfügung steht oder kostengünstig besorgt werden kann, so dass sich die Gesamtsumme auf ca. 20.000 € reduzieren könnte. Die dargestellten Preise entstammen einem Angebot einer Maschinenfabrik und sind somit für die Betrachtung der Kostenseite absolut aussagekräftig. Die darin enthaltenen Einzelposten sind im Anhang dargestellt (cf. Anhang Anlage 1).

Prozessbiertank	€ 15.329,62
Dosageleitung (u.a. Regelventil, Dosagepumpe)	€ 15.294,91
Heisswürzeleitung (u.a. Verlängerung, Einbauten)	€ 4.401,22
Verbrauchsstoffe, Engineering, Transport	€ 0,00
Summe	<u>€ 35.025,75</u>

### 5.7.4 Beispielrechnung für die Extrakteinsparung durch Prozessbierverwertung

In Tabelle 71 sind Daten aus einer Brauerei aufgeführt, anhand derer die nachfolgenden Berechnungen zur Schwandermittlung durchgeführt werden. Das Prozessbier wurde dabei in die vier aufgeführten Sorten als Vorlage in den Whirlpool bzw. als Vorlage in den Gärtank dosiert.

*Tabelle 71: Brauereidaten mit Prozessbierverwertung*

Sorte	Volumen AW <sup>15</sup> / hl	Schüttung / kg	Stammwürze / (GV-%)	Anzahl Sude / n	Gesamtmalzmenge/ kg	SA <sup>15</sup> / %	Volumen Bier / hl
A	15500	4300	11,6	54	232200	77,68	14386,54
B	45933	4300	12,0	166	713800	77,57	42579,83
C	2963	4300	13,4	12	51600	77,53	2746,69
D	3839	4300	11,3	13	55900	77,91	3585,75

<sup>15</sup> AW = Ausschlagwürze, SA = Sudhausausbeute

Nach den Gleichungen 2.1–2.3 ergeben sich daraus für die vier Biersorten folgende Extraktmengen:

**Tabelle 72: Berechnung des Extraktchwandes ab Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung mit Prozessbierverwertung**

Sorte	Extrakt <sub>AW</sub> / kg	Extrakt <sub>Bier</sub> / kg	Extrakt <sub>Malzmenge</sub> / kg	Schwand <sub>ab AW</sub> / %	Schwand <sub>ab Malzschüttung</sub> / %
A	179800	166884	180373	3,32	7,48
B	551196	510958	553695	3,44	7,72
C	39704	36806	40005	3,44	8,00
D	43381	40519	43552	2,70	6,96

Das in der Brauerei wieder verwendete Prozessbiervolumen betrug 575 hl, bei einer durchschnittlichen Stammwürze von 10,6 GV-%. Daraus errechnete sich für das Prozessbier ein Extraktgehalt von 6095 kg. Bei einer mittleren Sudhausausbeute von 77,67 % ergibt sich daraus eine einzusetzende Malzmenge von 7847 kg. Somit ergibt sich bei einer Schüttung von 4300 kg pro Sud eine Einsparung von annähernd zwei Suden pro Jahr. Sämtliche weiteren Rohstoff- und Energiekosten für die Bereitung dieser beiden Sude sowie anfallende Kosten während deren Verarbeitung im weiteren Produktionsprozess können damit eingespart werden. Vor der Verwertung von Prozessbieren ergab sich folgende Situation:

**Tabelle 73: Brauereidaten ohne Prozessbierverwertung**

Sorte	Volumen AW <sup>16</sup> / hl	Schüttung / kg	Stammwürze / (GV-%)	Anzahl Sude / n	Gesamtmalzmenge/ kg	SA <sup>16</sup> / %	Volumen Bier / hl
A	17031	4300	11,6	60	258000	76,55	15787,67
B	51317	4300	12,2	192	825600	76,20	47570,00
C	4071	4300	13,3	17	73100	74,44	3713,79
D	3770	4300	11,3	13	55900	76,40	3494,77

**Tabelle 74: Berechnung des Extraktchwandes ab Ausschlagwürze bzw. ab Malzschüttung ohne Prozessbierverwertung**

Sorte	Extrakt <sub>AW</sub> / kg	Extrakt <sub>Bier</sub> / kg	Extrakt <sub>Malzmenge</sub> / kg	Schwand <sub>ab AW</sub> / %	Schwand <sub>ab Malzschüttung</sub> / %
A	189657	183137	197499	3,44	7,27
B	601025	580354	629107	3,44	7,75
C	51979	49393	54416	4,97	9,23
D	40897	394901	427078	3,44	7,53

Die Gegenüberstellung zeigt, dass durch die Verwertung von Prozessbieren der Extraktchwand effektiv reduziert werden konnte. In Abbildung 134 ist dies anschaulich anhand des Vergleichs der mittleren Extraktverluste dargestellt.

<sup>16</sup> AW = Ausschlagwürze, SA = Sudhausausbeute

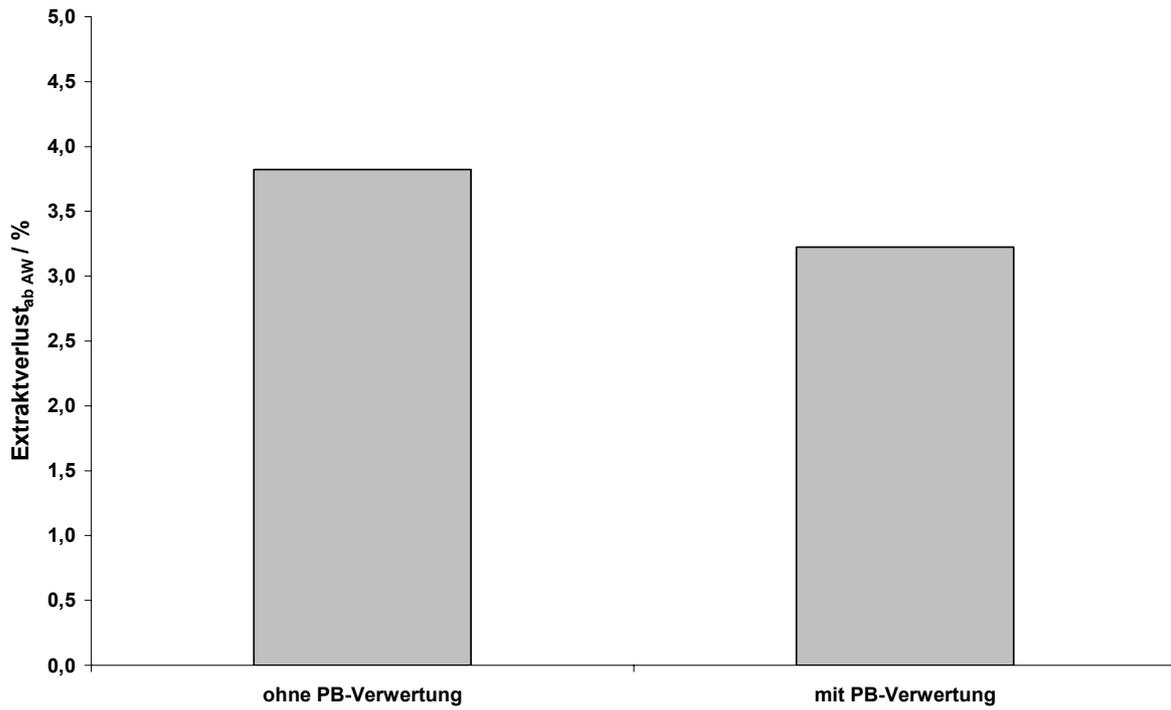


Abbildung 134: Vergleich der mittleren Extraktverluste mit und ohne PB-Verwertung

## 6 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden technische und technologische Aspekte der Prozessbierverwertung untersucht und diskutiert. In den letzten Jahren wurden verstärkt neuere Techniken zur Hefebierrückgewinnung eingesetzt, was eine systematische Untersuchung dieser Trenntechniken als notwendig erschienen ließ. Die Ergebnisse zeigen, dass bis auf den rotierenden Scheibenfilter alle untersuchten Trennsysteme keinen oder nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Hefephysiologie hatten. Bei den Membrantrennsysteme konnte eine Abreicherung bestimmter mittel- bzw. hochmolekularer Substanzgruppen beobachtet werden.

Ein weiterer wichtiger Untersuchungsgegenstand war das Verhalten der Bierinhaltsstoffe, hervorgerufen durch ungünstige Aufbewahrungsbedingungen. Durch analytische Verfahren konnten hier einige Schlüsselaromastoffe (Heptanol-1, Decansäure, Essigsäure-Heptylester, Isovaleriansäure) und extrazelluläre Schlüsselenzyme der Hefe (Proteinase A, Esterase) identifiziert werden. Aufbauend auf den Schlüsselaromastoffen wurde der Autolyse-Index eingeführt, um die Qualität der Hefe anhand dieser neuen Parameter zu erfassen. Die beiden Hefeenzyme haben sich als äußerst wertvolle Indikatoren für die Bereiche Schaumstabilität und Alterungsstabilität erwiesen. Als Ergebnis dieser Untersuchungen können folgende allgemein gültigen Empfehlungen für die Aufbewahrung von Überschusshefe vor deren Aufbereitung gegeben werden:

- Möglichst rasche Verarbeitung der Hefesuspensionen
- Aufbewahrung bei Temperaturen  $< 4^{\circ}\text{C}$
- Kurzzeiterhitzung des Hefebieres vor allem zur Inaktivierung der Proteinase A
- Dosage des gewonnenen Hefebieres zu einer Anstellwürze

Der letzte Punkt wurde aus den Untersuchungsreihen zur Dosage von Hefebieren zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Brauprozesses gewonnen. Als ungünstigste Variante hatte sich in diesem Zusammenhang die Dosage im Heißbereich erwiesen, da hier die Alterungsstabilität am stärksten beeinflusst wurde. Bei allen anderen untersuchten Zugabezeitpunkten konnten im Rahmen der *normalen* Dosagemengen ( $\sim 5$  Vol.-%) keine signifikanten Verschlechterungen vor allem bzgl. der Alterungsstabilität festgestellt werden. Interessant war dabei die Tatsache, dass Hefebiere durch eine thermische Belastung nicht beeinträchtigt werden. So zeigten

Hefebiere trotz intensiver Hitzbehandlung erstaunlicherweise keine nennenswerten Anstiege der 2-Furfural-Konzentrationen. Damit verbunden ist die ebenfalls nur geringfügige Zunahme der Summenparameter für die Beurteilung der Alterung. Auf der anderen Seite fiel die Alterungsverkostung ungünstiger aus, da die Biere die maskierenden Schutzverbindungen (aromaaktive Ester) teilweise durch erhöhte Esterase-Aktivität verloren hatten. Dieser Aspekt zeigte sehr anschaulich, dass nur das Zusammenspiel von Analytik und Sensorik zur Beurteilung der tatsächlichen Verhältnisse im Bier führen kann.

Für die Verwertung von anderweitig anfallenden Prozessbieren wurden verschiedene Zugabezeitpunkte im Heißbereich untersucht. Insbesondere kleinere und mittlere Brauereien können sich ein aufwendiges Aufbereitungsverfahren nicht erlauben. Als günstigstes Verfahren hat sich hier die Dosage der Prozessbiere in den Whirlpool erwiesen. Dies haben vor allem die Erfahrungen aus den Praxisversuchen gezeigt. Diese Variante ist zwar mit einem Ethanolverlust von ca. 30 % verbunden, dafür kann auf teure Einbauten bzw. Komponenten verzichtet werden. Für größere Betriebe dürfte sich allerdings die Dosage der Prozessbiere in die Leitung zwischen Whirlpool und Würzekühler anbieten, da aufgrund der zu verarbeitenden Mengen eine kurzfristige Amortisation trotz relativ hoher Investitionskosten zu erreichen sein sollte. Die Rückführung von Vor-, Zwischen- und Nachlauf (VZNL) aus der Filtration ist vor allem dann problematisch, wenn nicht mit sauerstofffreiem, entgastem Wasser angeschwemmt bzw. nachgedrückt wird. Normalerweise sollten diese VZNLs aus Qualitätsgründen verworfen werden, wodurch das Abwasser zusätzlich belastet wird. Teilweise wird jedoch aus der Praxis berichtet, dass die sauerstoffbelasteten VZNLs zur Anstellwürze zudosiert werden. Dies ist allerdings mit sehr hohen Risiken verbunden, da einerseits die mikrobiologische Anfälligkeit dieser Biere aufgrund verminderter Selektivbestandteile erhöht ist und zudem der erhöhte Sauerstoffgehalt zu einer Beeinträchtigung der Alterungsstabilität führen könnte. Zusammenfassend hat sich die in Abbildung 135 dargestellte Verfahrensweise zur Behandlung der VZNLs bei Verwendung von entgastem Wasser für die Vor- und Nachbereitungen im Filterkeller als günstig erwiesen.

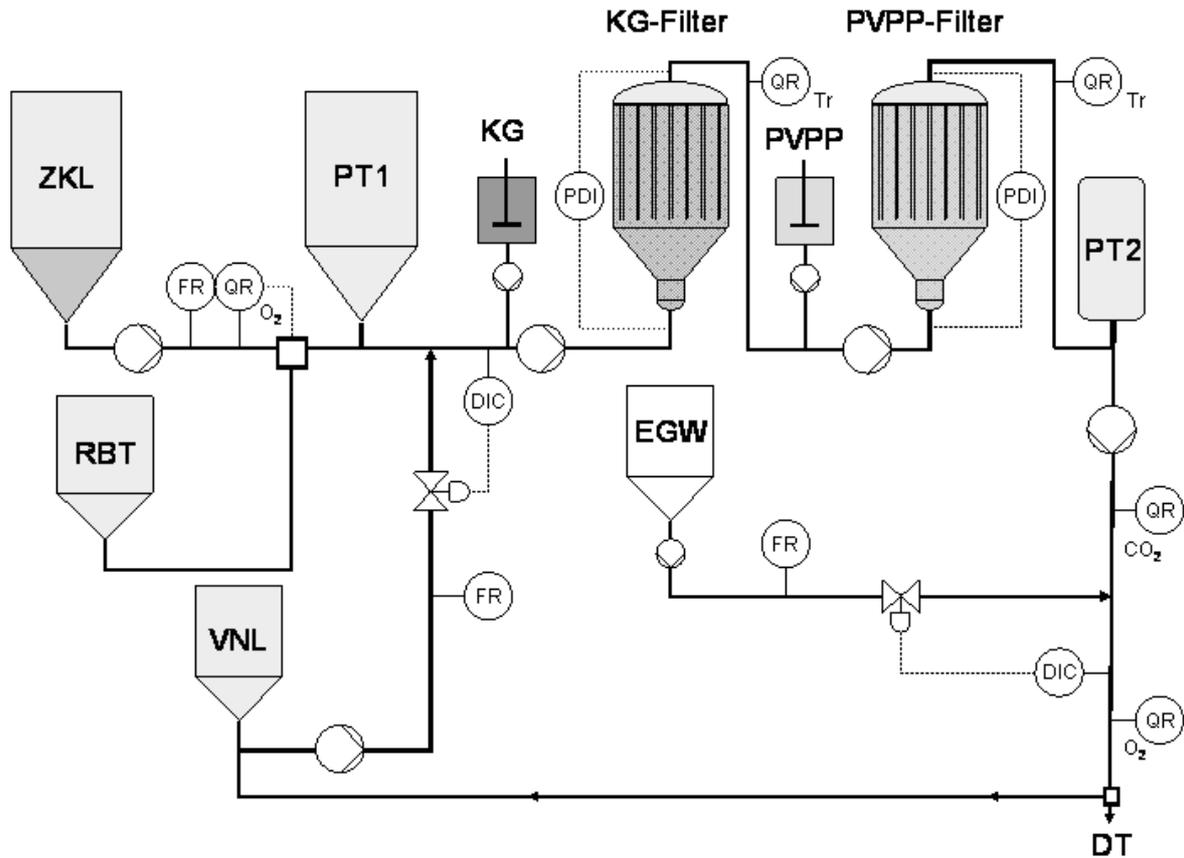


Abbildung 135: Verfahrensweise zur Behandlung von VZNLs im Filterkeller

Für die Verarbeitung der Prozessbiere insgesamt können die in Tabelle 75 dargestellten Empfehlungen gegeben werden.

Tabelle 75: empfohlene Dosagezeitpunkte von Prozessbieren im Brauprozess

Prozessbier	Empfohlener Zugabezeitpunkt	Begründung
Hefebier	Anstellwürze	Reduktion der MKFS
Vor-, Zwischen- und Nachlauf	laufende Filtration	Mikrobiologie, Verfahrenstechnik
Rückbier	Whirlpool (alternativ: Ausschlagleitung)	Mikrobiologie
Sonstige Prozessbiere	Whirlpool (alternativ: Ausschlagleitung)	Mikrobiologie
Verdorbenes Rückbier	Entsorgung <b>außerhalb</b> der Produktionsabteilungen	Mikrobiologie

Um den Extraktverlust während des Brauprozesses so gering wie möglich zu halten, sollten von Zeit zu Zeit die Prozesse kritisch evaluiert werden, um mögliche Schwachstellen aufzudecken. Hier konnte die moderne Messtechnik einen wichtigen Beitrag liefern, um die subjektiven Entscheidungen der Brauer z.B. Umschaltzeitpunkte, zu objektivieren und zu optimieren.

Zu einer sinnvollen Verwertung von Prozessbieren sollte immer auch deren Wirtschaftlichkeit geprüft werden.

Abschließend muss erwähnt werden, dass die zur internen Verwertung kommenden Prozessbiere der gleichen, ja teilweise sogar einer noch höheren Sorgfalt bedürfen, wie die eigentlich produzierten Kernbiere. Nur wenn die drei Teilaspekte „Qualität“, „Mikrobiologie“ und „Wirtschaftlichkeit“ positiv bewertet bzw. beherzigt werden, sollte die Verwertung von Prozessbieren durchgeführt werden.

## 7 LITERATUR

- 1 Pauli, G.: Abschlussbericht des 1. Seminars des ZERI Deutschland e.V., 2001
- 2 Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der  
umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen i. d. F. vom 27.09.1994. BGBl I  
1994, 2705. Online im Internet: [http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/krw-  
abfg/](http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/krw-<br/>abfg/) (21.11.2005)
- 3 Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts i. d. F. vom 19.08.2002. BGBl I  
1957, 1110, 1386. Online im Internet:  
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/whg/> (21.11.2005)
- 4 Gesetz über das Einleiten von Abwasser in Gewässer i. d. F. vom 18.01.2005.  
BGBl I 1976, 2721, 3007. Online im Internet:  
<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/abwag/> (21.11.2005)
- 5 Perry, M.; De Villiers, G.: Modelling the consumption of water and other  
utilities. In: *Brauwelt International* 21 (2003), Nr. 3, S. 286–290
- 6 Unterstein, K.: Energy and water go to make beer. In: *Brauwelt International*  
18 (2000), Nr. 5, S. 368–370
- 7 Ockert, K.: Practical wastewater pretreatment strategies for small breweries.  
In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 39 (2002),  
Nr. 1, S. 39–46
- 8 Van der Bruggen, B.; Braeken, L.: The challenge of zero discharge: from water  
balance to regeneration. In: *Desalination* 188 (2006), Nr. 1-3, S. 177–183
- 9 Fillaudeau, L.; Blanpain-Avet, P.; Daufin, G.: Water, wastewater and waste  
management in brewing industries. In: *Journal of Cleaner Production* 14  
(2006), Nr. 5, S. 463–471
- 10 Jasch, C.: Environmental performance evaluation and indicators. In: *Journal of  
Cleaner Production* 8 (2000), Nr. 1, S. 79–88
- 11 Schaffer, A.: *Ecological Input-Output-Analysis, ECOLIO - A model for  
conventional and ecological key sector analysis in Germany*. In: Karlsruher  
Beiträge zur wirtschaftspolitischen Forschung. Rothengatter, W.; Kowalski, J.  
Band 13. Karlsruhe: 2002
- 12 Die deutsche Brauwirtschaft in Zahlen. Online im Internet: [http://www.brauer-  
bund.de/index1.html](http://www.brauer-<br/>bund.de/index1.html). - [Aktualisierungsdatum: 11.01.2006]
- 13 Joh. Barth & Sohn GmbH & Co. KG (Hrsg.): *Der Barth Bericht 2004 / 2005*.  
Nürnberg, 2005
- 14 Biersteuergesetz i. d. F. vom 21.12.1992. BGBl I 1992, 2150,2158. Online im  
Internet: [http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bierstg\\_1993/index.html](http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bierstg_1993/index.html)  
(21.11.2005)
- 15 Narziss, L.: *Abriss der Bierbrauerei*. In: 7. überarbeitete und erweiterte  
Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 2004
- 16 Schumann, G.: Senkung der Abwasserfracht durch innerbetriebliche  
Maßnahmen in Brauereien und Mälzereien. In: *Tageszeitung für Brauereien*  
(1975), Nr. 137/138
- 17 Krüger, R.; Rejschek, H.; Kuhn-Reichard, J.: Künftige Kostenbelastung der  
Brauereien aus dem neuen Abwasserabgabengesetz und Möglichkeiten der  
Kostensenkung. In: *Der Weihenstephaner* (1980), Nr. 2, S. 85–109
- 18 Müller, R.; Heimann, E.; Meyer, J. F.: Überführung von Abfallbier in trinkbares,  
lagerbeständiges Bier. DE000000679765A, Anmeldetag 26.10.1937,  
veröffentlicht 16.08.1939

- 19 Litzenburger, K.; Voerkelius, G.-A.: Mikrobiologische Problem in der Praxis. In: *Brauwelt* 123 (1983), Nr. 30, S. 1282–1285
- 20 Narziss, L.: Die Verwertung von Nebenprodukten in der Brauerei. In: *Brauwelt* 119 (1979), Nr. 19, S. 637–642
- 21 Hansen, N. L.: From filter presses over centrifuges to cross flow and vibrating membrane filtration. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 38 (2001), Nr. 2, S. 115–121
- 22 Huige, N. J.: Brewery by-products and effluents. In: Hardwick, W. A.: *Handbook of Brewing*. New York: Verlag Marcel Dekker, 1995, S. 501-550
- 23 Schwill-Miedaner, A.: Aufbereitung von Hefebier. In: *Brauwelt* 126 (1986), Nr. 18, S. 739–741
- 24 Krüger, R.; Fischer, H.; Rejschek, H.; Fremerey, M.: Verwertungsmöglichkeiten von Abfällen aus der Brauerei. In: *Der Weihenstephaner* (1982), Nr. 2, S. 90–127
- 25 Burgstaller, G.: Zum Einsatz von Bierhefe in der praktischen Fütterung. In: *Der Brauer und Mälzer* 54 (1969), Nr. 5, S. 8–11
- 26 Witting, R.; Wiesche, H.: Flüssige Bierhefe in der Schweinefütterung. In: *Brauwelt* 116 (1976), Nr. 31, S. 1010-1012, 1095–1097
- 27 Witting, R.; Ellenberger, W.: Flüssige Bierhefe in der Schweinefütterung - neues Behandlungsverfahren. In: *Brauwelt* 118 (1978), Nr. 7, S. 200–210
- 28 Fahlbusch, K.: Verwertung von Nebenprodukten über die Flüssigfütterung bei Schweinen. In: Kamphues, J.; Flachowsky, G.: *Tierernährung – Ressourcen und neue Aufgaben*. Braunschweig: "Landbauforschung Völkenrode" Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 2001, S. 356–364
- 29 Kamphues, J.: Nebenproduktverwertung in der Tierernährung - von ihren Anfängen bis zum Weißbuch zur Lebensmittelsicherheit. In: Kamphues, J.; Flachowsky, G.: *Tierernährung – Ressourcen und neue Aufgaben*. Braunschweig: "Landbauforschung Völkenrode" Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, 2001, S. 5–20
- 30 Spark, M.; Paschertz, H.; Kamphues, J.: Yeast (different sources and levels) as protein source in diets of reared piglets: effects on protein digestibility and N-metabolism. In: *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition* 89 (2005), Nr. 3-6, S. 184–188
- 31 Dong, N. T. K.; Ogle, R. B.: An evaluation of brewery waste as a replacement for concentrates in diets for growing crossbred common ducks. In: *Tropical Animal Health and Production* 36 (2004), Nr. 7, S. 715–729
- 32 Gasteiner, J.: Grundlagen zu den Verdauungsvorgängen beim Rind - Pansenphysiologie, Pansenazidose, 2001
- 33 Kollar, R.; Sturdik, E.; Sajbidor, J.: Complete Fractionation of *Saccharomyces-Cerevisiae* Biomass. In: *Food Biotechnology* 6 (1992), Nr. 3, S. 225–237
- 34 Tsikitis, V. L.; Albina, J. E.; Reichner, J. S.: beta-glucan affects leukocyte navigation in a complex chemotactic gradient. In: *Surgery* 136 (2004), Nr. 2, S. 384–389
- 35 Thanardkit, P.; Khunrae, P.; Suphantharika, M.; Verduyn, C.: Glucan from spent brewer's yeast: preparation, analysis and use as a potential immunostimulant in shrimp feed. In: *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 18 (2002), Nr. 6, S. 527–539
- 36 Ingledew, W. M.; Sosulski, F. W.; Magnus, C. A.: An Assessment of Yeast Foods and Their Utility in Brewing and Enology. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 44 (1986), Nr. 4, S. 166–170

- 37 Casey, G. P.; Magnus, C. A.; Ingledew, W. M.: High-Gravity Brewing - Effects of Nutrition on Yeast Composition, Fermentative Ability, and Alcohol Production. In: *Applied and Environmental Microbiology* 48 (1984), Nr. 3, S. 639–646
- 38 Dodic, S. N.; Popov, S. D.; Mastilovic, J. S.; Dodic, J. M.: Waste yeast from brewery as raw for the baking industry. In: *Acta Periodica Technologica* 32 (2001), Nr. S. 119–124
- 39 Saksinchai, S.; Supphantharika, M.; Verduyn, C.: Application of a simple yeast extract from spent brewer's yeast for growth and sporulation of *Bacillus thuringiensis* subsp. *kurstaki*: A physiological study. In: *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 17 (2001), Nr. 3, S. 307–316
- 40 Andreu, G.; Benaiges, M. D.; López, J.; Solà, C.: A simple method for RNA extraction from yeasts. In: *Biotechnology and Bioengineering* 32 (1988), Nr. 7, S. 927–929
- 41 Komorowska, A.; Sieliwanowicz, B.; Mrowka, E.; Stecka, K.; Halasinska, A.: Studies on yeast extracts enriched in 5'-nucleotides flavour enhancers obtained from spent brewery yeast. In: *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities* 6 (2003), Nr. 1
- 42 Sombutyanuchit, P.; Supphantharika, M.; Verduyn, C.: Preparation of 5'-GMP-rich yeast extracts from spent brewer's yeast. In: *World Journal of Microbiology & Biotechnology* 17 (2001), Nr. 2, S. 163–168
- 43 Virginie Moine-Ledoux, D. D.: An invertase fragment responsible for improving the protein stability of dry white wines. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 79 (1999), Nr. 4, S. 537–543
- 44 Gijs, L.; Perpete, P.; Timmermans, A.; Guyot-Declerck, C.; Delince, P.; Collin, S.: Assessment of added glutathione in yeast propagations, wort fermentations, and beer storage. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 62 (2004), Nr. 3, S. 97–102
- 45 Omar, N. B.; Merroun, M. L.; Gonzalez-Munoz, M. T.; Arias, J. M.: Brewery yeast as a biosorbent for uranium. In: *Journal of Applied Microbiology* 81 (1996), Nr. 3, S. 283–287
- 46 Yuasa, H.; Kaneshige, J.; Ozeki, T.; Kasai, T.; Eguchi, T.; Ishiwaki, N.: Application of acid-treated yeast cell wall (AYC) as a pharmaceutical additive. III. AYC aqueous coating onto granules and film formation mechanism of AYC. In: *International Journal of Pharmaceutics* 237 (2002), Nr. 1–2, S. 15–22
- 47 Yuasa, H.; Kaneshige, J.; Ozeki, T.; Kasai, T.; Eguchi, T.; Ishiwaki, N.: Application of acid-treated yeast cell wall (AYC) as a pharmaceutical additive. II: effects of curing on the medicine release from AYC-coated tablets. In: *International Journal of Pharmaceutics* 209 (2000), Nr. 1–2, S. 69–77
- 48 Kasai, T.; Eguchi, T.; Ishiwaki, N.; Kaneshige, J.; Ozeki, T.; Yuasa, H.: Application of acid-treated yeast cell wall (AYC) as a pharmaceutical additive I. AYC as a novel coating material. In: *International Journal of Pharmaceutics* 204 (2000), Nr. 1–2, S. 53–59
- 49 In, M. J.; Kim, D. C.; Chae, H. J.: Downstream process for the production of yeast extract using brewer's yeast cells. In: *Biotechnology and Bioprocess Engineering* 10 (2005), Nr. 1, S. 85–90
- 50 Chae, H. J.; Joo, H.; In, M. J.: Utilization of brewer's yeast cells for the production of food-grade yeast extract. Part 1. effects of different enzymatic treatments on solid and protein recovery and flavor characteristics. In: *Bioresource Technology* 76 (2001), Nr. 3, S. 253–258

- 51 Kieninger, H.: Abfallhefe-Verwendung im Sudhaus. In: *Brauwelt* 118 (1978), Nr. 24, S. 872
- 52 Kieninger, H.; Narziss, L.: Die Wiederverwendung von extrakthaltigen Nebenprodukten in der Brauerei. In: *17<sup>th</sup> Proceedings of the European Brewery Convention*. 1979, S. 213–236
- 53 Macher, L.: Fütterungstechnische Verwertung eiweißreicher Brauereiabfälle. In: *Brauwelt* 108 (1968), Nr. 23, S. 410
- 54 Zürcher, C.: Hefeüberschüsse und Wirtschaftlichkeit von Verwertungsarten. In: *Brauwelt* 119 (1979), Nr. 18, S. 605–606
- 55 Walker, G. M.: Yeast Growth. In: Walker, G. M.: *Yeast physiology and biotechnology*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 1988, S. 177–178
- 56 Stratford, M.; Anslow, P. A.: Comparison of the inhibitory action on *Saccharomyces cerevisiae* of weak-acid preservatives, uncouplers, and medium-chain fatty acids. In: *Fems Microbiology Letters* 142 (1996), Nr. 1, S. 53–58
- 57 Menzel, H.: *Einfluss von Druck und Temperatur bei der Reifung und Lagerung auf die Exkretion von Hefeinhaltsstoffen*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Diplomarbeit, 1979
- 58 Reicheneder, E.; Narziss, L.: Untersuchungen über die Schaumschädigung des Bieres durch Hefeproteinase. In: *Brauwelt* 127 (1987), Nr. 21, S. 956–962
- 59 Narziss, L.; Reicheneder, E.; Jogasuria, P.; Eichhorn, P.; Mayer, W.; Gommelt, T.: Most recent data on the subject of beer foam. In: *Brauwelt* 128 (1988), Nr. 38, S. 1630–1641
- 60 Leisegang, R.; Stahl, U.: Degradation of a foam-promoting barley protein by a proteinase from brewing yeast. In: *Journal of the Institute of Brewing* 111 (2005), Nr. 2, S. 112–117
- 61 Kondo, H.; Yomo, H.; Furukubo, S.; Kawasaki, S.; Kakatani, K.: Advanced method for measuring Proteinase A in beer. In: *25<sup>th</sup> Proceedings of the Convention of the Institute of Brewing (Asia Pacific Section)*. 1998, S. 119–124
- 62 Müller, W. K.: Tangentialfluss-Filtration von Hefe zur Bierrückgewinnung. Teil 2: Zwei Jahre Tangentialfluss-Filtration von Überschusshefe zur Bierrückgewinnung in der Praxis. In: *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 29, S. 1260–1263
- 63 Polster, K. G.: Rückgewinnung von Bier aus Überschusshefe. In: *Brauwelt* 125 (1985), Nr. 13, S. 548–550
- 64 Hansen, N. L.: Recovery of beer from surplus yeast by membrane filtration. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 26 (1989), Nr. 1, S. 8–13
- 65 [Anon]: Pressfilterautomat - Von der Entwicklung bis zur Praxis. In: *Brauwelt* 126 (1986), Nr. 46, S. 2325–2326
- 66 Boeck-Nielson, J.: Addition of rest beer into the whirlpool. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 36 (1999), Nr. 4, S. 423–425
- 67 [Anon]: Restbierzumischung auf dem Würzeweg. In: *Brauwelt* 117 (1977), Nr. 43, S. 1869
- 68 Narziss, L.; Reicheneder, E.; Miedaner, H.; Kümpel, G.: Zugabe von Restbieren im Sudhaus. In: *Brauwelt* 122 (1982), Nr. 45, S. 2066–2082
- 69 Narziss, L.: Recycling unter Berücksichtigung der Bierqualität. In: *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 5, S. 140–154
- 70 Donhauser, S.; Glas, K.: Yeast press beer and its preparation. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 39 (1986), Nr. 8, S. 284–292

- 71 Hoggan, J.; Ricketts, R. N.; Spillane, M. H.: Beer recovery - its justification. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 22 (1985), Nr. 3, S. 83–86
- 72 Oechsle, D.: Bierrückgewinnung aus Überschusshefe mit Tangentialflussfiltration. In: Hess, W. F.: *Apparate*. Essen: Vulkan Verlag, 1990, S. 254–261
- 73 Girr, M.; Bartels, H.: Ein Jahr Cross-Flow-Hefefiltration. Bierrückgewinnung aus Gärkeller- und Gelägerhefe mit einer großtechnischen Cross-Flow-Mikrofiltrationsanlage. In: *Brauwelt* 130 (1990), Nr. 7, S. 222–227
- 74 Bilge, D.: *Die Gewinnung und Wiederverwendung von Schaumproteinen und anderen Wertbestandteilen mittels Cross-Flow-Ultrafiltration aus Prozessbieren und weiteren Brauereiabfallprodukten*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 2005
- 75 [Anon]: Restbier- (Restwürze)-Verwertung. In: *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 9, S. 375–377
- 76 Schlecht, E.: Bierschwandprobleme unter technologischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. In: *Brauwelt* 116 (1976), Nr. 1/2, S. 3–7
- 77 Unkel, M.: Technologische und wirtschaftliche Aspekte bei der Wiederverwendung von Produktionsabfällen. In: *Brauwelt* 117 (1977), Nr. 1/2, S. 7–11
- 78 Meier, E.: Vorteile der Vor- und Nachlaufverwertung. In: *Brauindustrie* (1994), Nr. 9, S. 744–745
- 79 Narziss, L.: Filtration and stabilization of beer. In: *European Brewery Convention Monograph, Waste Reduction in Brewery Operations* (1992), Nr. XIX, S. 101–115
- 80 Schwarz, C.; Schneeberger, M.; Kreis, S.; Schneller, T.: Verbrauchsanalyse des Crossflow-Membranfilters BMF -200. In: *Brauwelt* 145 (2005), Nr. 34–35, S. 1107–1110
- 81 Kreis, S.: *Der Einfluss von Polysacchariden aus Malz, Hefe und Bakterien auf die Filtrierbarkeit von Würze und Bier*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2003
- 82 Back, W.: *Farbatlas und Handbuch der Getränkebiologie, Teil I*. In: Nürnberg: Fachverlag Hans Carl, 1994
- 83 Englmann, J.: Ursachen biologischer Probleme in der Praxis. In: *Brauwelt* 125 (1985), Nr. 39, S. 1976–1979
- 84 Narziss, L.; Reicheneder, E.; Ngo-Da, P.: Qualitative Aspekte der Verwendung von Extraktresten. In: *Brauwelt* 122 (1982), Nr. 41, S. 1810–1832
- 85 Putz, M.: Recycling des extraktschwächeren Filtrationsvor- und nachlaufs. In: *Mitteilung der Versuchsstation für das Gärungsgewerbe* 31 (1977), Nr. 7–8, S. 79–84
- 86 Kiefer, J.: Kieselgurfiltration - Minimierung von Bierverlusten. In: *Brauwelt* 130 (1990), Nr. 19, S. 2060–2064
- 87 [Anon]: Wasserentgasung und Einsatz entgasten Prozesswassers. In: *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 32, S. 1357–1359
- 88 [Anon]: Filtration des Bieres. In: *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 35, S. 1511–1516
- 89 Koroneos, C.; Roumbas, G.; Gabari, Z.; Papagiannidou, E.; Moussiopoulos, N.: Life cycle assessment of beer production in Greece. In: *Journal of Cleaner Production* 13 (2005), Nr. 4, S. 433–439
- 90 Esslinger, H. M.: Der Schwund. In: *Brauwelt* 135 (1995), Nr. 5, S. 208
- 91 Schnegg, H.: Vorrichtung und Verfahren zum Erzeugen von Schaum im Kopfraum und Behältern. In: *Monatsschrift für Brauerei* (1977), Nr. S. 325–336

- 92 Schumann, G.: Abwasserteilfrachten aus Reinigungsverfahren und ihre Umweltprobleme. In: *Monatsschrift für Brauerei* (1977), Nr. S. 319–324
- 93 Beer, R.; Hiller, N.: *Die umweltbewußte Brauerei*. In: Ein Leitfaden für das Brauereigewerbe. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen, 1994
- 94 Häring, P.; König, W.: Hofmark Brauerei setzt Maßstäbe bei Umweltentlastung in Kegabfüllanlagen. In: *Brauwelt* 132 (1992), Nr. 5, S. 177–181
- 95 Cooper, A.: The recovery of ethyl alcohol from brewery effluent. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 16 (1979), Nr. 1, S. 47–50
- 96 Sidor, L. L.; Knight, P. D.: Converting brewery waste to ethanol. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 23 (1986), Nr. S. 111–114
- 97 Brotherton, F.: Alcohol recovery in falling film evaporators. In: *Applied Thermal Engineering* 22 (2002), Nr. 7, S. 855–860
- 98 [Anon]: New plant will recycle outdated beer - Genahol Inc. to run Solid Waste Authority of Central Ohio ethanol plant. In: *Modern Brewery Age* (2002), Nr. 4
- 99 Li, P. J.; Mulligan, C. N.: Anaerobic treatment of waste beer. In: *Environmental Progress* 24 (2005), Nr. 1, S. 88–95
- 100 Boonaert, C. J.-P.; Dupont-Gillain, C. C.; Dengis, P. B.; Dufrene, Y. F.; Rouxhet, P. G.: Cell separation, flocculation. In: Flickinger, M.; Drew, C.: *Encyclopedia of bioprocess technology - fermentation, biocatalysis and bioseparation*. Verlag John Wiley and Sons, 1999, S. 531–548
- 101 Sharma, B. P.: Cell separation, sedimentation. In: Flickinger, M.; Drew, C.: *Encyclopedia of bioprocess technology - fermentation, biocatalysis and bioseparation*. Verlag John Wiley and Sons, 1999, S. 548–553
- 102 [Anon]: Separation solutions for the global brewing industry. In: *Filtration & Separation* 40 (2003), Nr. 5, S. 20–22
- 103 Müller, G.: Preparation and processing of brewery yeast sludge using high pressure chamber filter presses. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 19 (1982), Nr. 2, S. 57–62
- 104 Denkert, R.: *Einflüsse auf die Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer prozessgesteuerten Dekantier-Zentrifuge zur Überschussschlammindickung*. Bochum, Ruhr-Universität, Dissertation, 1988
- 105 Woon-Fong Leung, W.: *Industrial centrifugation technology*. In: New York, USA: Verlag McGraw-Hill, 1998
- 106 [Anon]: Restbier. In: *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 35, S. 1515–1516
- 107 Volk, G.; Schlenker, R.: Tangential flow filtration: four years' experience. In: *Proceedings of the Convention of the Institute of Brewing (Central & South African Section)*. 1993, S. 125–130
- 108 Kessler, H. G.: *Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik*. In: 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Verlag A. Kessler, 1996
- 109 Axelsson, H.: Cell separation, centrifugation. In: Flickinger, M.; Drew, C.: *Encyclopedia of bioprocess technology - fermentation, biocatalysis and bioseparation*. Verlag John Wiley and Sons, 1999, S. 513–531
- 110 Platt, D. W.: Development of a novel control system for solids removal by centrifuge. In: *24<sup>th</sup> Proceedings of the European Brewery Convention*. 1993, S. 569–576
- 111 Lightfoot, E. N.; Moscariello, J. S.: Bioseparations. In: *Biotechnology and Bioengineering* 87 (2004), Nr. 3, S. 259–273

- 112 Axelsson, H.: Recent trends in disc bowl centrifuge development. In: *Filtration & Separation* 37 (2000), Nr. 4, S. 20–23
- 113 Anlauf, H.: Zentrifugen. In: *Chemie-Ingenieur-Technik* 75 (2003), Nr. 10, S. 1545–1551
- 114 Maia, A. B. R. A.; Nelson, D. L.: Application of Gravitational Sedimentation to Efficient Cellular Recycling in Continuous Alcoholic Fermentation. In: *Biotechnology and Bioengineering* 41 (1993), Nr. 3, S. 361–369
- 115 Mette, K.; Lassen, K.; Emborg, C.: Perfusion systems for hybridoma cells based on sedimentation in chambers and erlenmeyer flasks. In: *FEMS Microbiology Reviews* 14 (1994), Nr. 1, S. 89–91
- 116 Day, N.: Centrifuge focus: evaluation, testing and optimisation. In: *Filtration & Separation* 42 (2005), Nr. 6, S. 22–24
- 117 Wong-Fong Leung, W.: *Industrial centrifugation technology*. In: New York, USA: Verlag McGraw-Hill, 1998
- 118 Colesan, F.; Paterson, S.: Bierrückgewinnung aus Überschusshefe mit dem Flottweg-Sedicanter. In: *Brauwelt* 139 (1999), Nr. 8, S. 300–302
- 119 Sutherland, K.: Centrifuge focus: solids removal - the options. In: *Filtration & Separation* 42 (2005), Nr. 6, S. 16–20
- 120 Bahns, P.: *Bewertung und Optimierung einer Hefebierrückgewinnungsanlage*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2004
- 121 Hartwig, A.: *Untersuchungen zur Hefebierrückgewinnung mittels einer Tellerzentrifuge*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2005
- 122 Prandtl, C.: Filterpresse mit Kammerplatten und zwischen diese geschalteten Hohlrahmen. AT00000070356B, Anmeldetag 12.06.1911, veröffentlicht 15.04.1915
- 123 Walla, G. E.: *Die Crossflow-Mikrofiltration im Brauereibereich*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 1991
- 124 Ripperger, S.: *Mikrofiltration mit Membranen*. In: 1. Auflage Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft, 1992
- 125 Bock, M.; Rögener, F.: Beer recovery from spent yeast. In: *Brewing and beverage industry international* (2002), Nr. 3, S. 8–10
- 126 Bugan, S. G.; Domyeny, Z.; Smogrovicova, D.; Svitel, J.; Schlosser, S.; Stopka, J.: Ceramic membrane cross-flow microfiltration for beer recovery from tank bottoms. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 53 (2000), Nr. 11-12, S. 229–233
- 127 Hug, H.; Pfenninger, H. B.; Meier, J.; Girr, M.; Treptau, B.: Erste praktische Ergebnisse zur Bierrückgewinnung mit einer grosstechnischen Cross-Flow-Mikrofiltrationsanlage. In: *22<sup>nd</sup> Proceedings of the European Brewery Convention*. Zürich, 1989, S. 453–460
- 128 Jansen, S.: Beer recovery by ceramic cross flow filtration. In: *Proceedings of the Convention - Institute of Brewing (Central & South African Section)* (1993), Nr. 4, S. 135–150
- 129 Laackmann, H.-P.: Hefebiergewinnung. In: *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 14/15, S. 620–623
- 130 Leeder, G.; Girr, M.: Crossflow Microfiltration for processing brewery tank bottoms. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 31 (1994), Nr. 2, S. 58–63

- 131 Müller, W. K.: Tangentialfluss-Filtration von Hefe zur Bierrückgewinnung. Teil 1: Grundlagen und Entwicklung eines praxistauglichen Filtersystems. In: *Brauwelt* 131 (1991), Nr. 16, S. 618–624
- 132 Mylius, U.; Reiter, A.: Waste beer recovery and yeast concentration by crossflow-microfiltration. In: *Brauwelt International* (1988), Nr. 1, S. 68–71
- 133 Reed, R.: Current and future role of membranes in brewing. In: *Membrane Technology* (1998), Nr. 101, S. 5–8
- 134 Schlenker, R.: Beer recovery from spent yeast by the Schenk TFF system. In: *Brewing and Distilling International* 25 (1994), Nr. 7, S. 26–29
- 135 Schlenker, R.: Tangentialflussfiltration zur Bierrückgewinnung aus Überschusshefe. In: *Der Doemensianer* (1994), Nr. 4, S. 233–236
- 136 Schneider, J.; Weisser, H.: New technology for beer recovery from spent yeast. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 37 (2000), Nr. 4, S. 477–481
- 137 Sellick, I.; Pratt, J.: Advances in the recovery of beer from tank bottoms. In: *Brewing and Distilling International* 29 (1998), Nr. 2, S. 26–27
- 138 Snyder, J.; Haughney, H.: Use of a vibrating membrane filter for the recovery of beer from surplus yeast. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 36 (1999), Nr. 2, S. 191–193
- 139 Methner, F. J.; Peters, U.; Stettner, G.; Lotz, M.; Ziehl, J.: Untersuchungen zur Bierrückgewinnung aus Überschusshefe. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 17, S. 470–474
- 140 Schneider, J.: *Dynamische Mikrofiltration von Feinstschrotmais mit oszillierenden Membranen*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2001
- 141 Brou, A.; Ding, L.; Boulnois, P.; Jaffrin, M. Y.: Dynamic microfiltration of yeast suspensions using rotating disks equipped with vanes. In: *Journal of Membrane Science* 197 (2002), Nr. 1-2, S. 269–282
- 142 Frenander, U.; Jonsson, A. S.: Cell harvesting by cross-flow microfiltration using a shear-enhanced module. In: *Biotechnology and Bioengineering* 52 (1996), Nr. 3, S. 397–403
- 143 Pessoa, J. A.; Vitolo, M.: Evaluation of cross-flow microfiltration membranes using a rotary disc-filter. In: *Process Biochemistry* 33 (1998), Nr. 1, S. 39–45
- 144 Ding, L. H.; Jaffrin, M. Y.; Mellal, M.; He, G.: Investigation of performances of a multishaft disk (MSD) system with overlapping ceramic membranes in microfiltration of mineral suspensions. In: *Journal of Membrane Science*, 2006, In Press, Corrected Proof
- 145 Jaffrin, M. Y.; Ding, L.-H.; Akoum, O.; Brou, A.: A hydrodynamic comparison between rotating disk and vibratory dynamic filtration systems. In: *Journal of Membrane Science* 242 (2004), Nr. 1-2, S. 155–167
- 146 Dickel, T.: *Untersuchungen zu enzymatischen Abbauprodukten beim Maischen im Hinblick auf die Entwicklung eines Prozessführungssystems*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2003
- 147 Pfenniger, H. B.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band I*. In: 3. Auflage, neubearbeitet und ergänzt. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 1997
- 148 Pfenniger, H. B.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band III*. In: 2. Auflage, vollständig neubearbeitet. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 1996

- 149 Miedaner, H.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band II*. In: 4. Auflage, neubearbeitet und ergänzt. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 2002
- 150 Uchida, M.; Suga, S.; Ono, M.: Improvement for oxidative flavor stability of beer - Rapid prediction method for beer flavor stability by electron spin resonance spectroscopy. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 54 (1996), Nr. 4, S. 205–211
- 151 Franz, O.; Back, W.: Experiences in measuring free radicals using electro spin resonance spectrometry in the brewery. In: *Monatsschrift Fur Brauwissenschaft* 55 (2002), Nr. 7–8, S. 156–162
- 152 Franz, O.: *Systematische Untersuchungen zur endogenen, antioxidativen Aktivität von hellen, untergärigen Bier unter besonderer Berücksichtigung technologischer Maßnahmen beim Brauprozess*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2004
- 153 Kaneda, H.; Kobayashi, N.; Furusho, S.; Sahara, H.; Koshino, S.: Reducing activity and flavour stability of beer. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 32 (1995), Nr. 2, S. 90–94
- 154 Franz, O.; Back, W.: Stability index - a new approach to measure the flavour stability of beer. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 40 (2003), Nr. 1, S. 20–24
- 155 Mezger, R.: *Betrachtung moderner Würzekochsysteme bezüglich ihres Einflusses auf technologisch und physiologisch bedeutende Würzeinhaltsstoffe*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2006
- 156 Ono, M.; Kakudo, Y.; Yamamoto, Y.; Nagami, K.; Kumada, J.: Simultaneous analysis of hop bittering components by high-performance liquid chromatography and its application to the practical brewing. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 43 (1985), Nr. 3, S. 136–144
- 157 Charalambous, G.; Bruckner, K. J.; Hardwick, W. A.; Linnebach, A.: Separation, identification and determination of beer flavour compounds by high pressure liquid chromatography - part ii. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 11 (1974), Nr. 2, S. 150–154
- 158 Kieninger, H.; Hums, N.; Tavera, M.: Separation and quantitative determination of purines and pyrimidines in wort and beer. Part I. In: *Brauwissenschaft* 29 (1976), Nr. 3, S. 71–75
- 159 Wagner, D.: Zum Verhalten von Nucleobasen und Nucleosiden bei der Gärung. In: *17<sup>th</sup> Proceedings of the European Brewing Convention*. 1979, S. 737–753
- 160 Hierl, B.: *Die Eignung von alkoholfreien Bieren als Sportlergetränk*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2004
- 161 Lustig, S.: *Das Verhalten flüchtiger Aromastoffe bei der Lagerung von Flaschenbier und deren technologische Beeinflussung beim Brauprozess*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 1994
- 162 Thum, B.; Back, W.: Schonende Analysenmethoden zur Quantifizierung von Schlüsselaromastoffen in Bier. In: *27<sup>th</sup> Proceedings of the European Brewing Convention*. 1999, S. 45–52
- 163 Kaltner, D.: *Untersuchungen zur Ausbildung des Hopfenaromas und technologische Maßnahmen zur Erzeugung hopfenaromatischer Biere*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2000
- 164 Eichhorn, P.: *Untersuchungen zur Geschmacksstabilität*. München-Weihenstephan, Technische Universität, Dissertation, 1991

- 165 Herrmann, M.: *Entstehung und Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe bei der Herstellung von Weißbier*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2005
- 166 Schieberle, P.: Primary Odorants of Pale Lager Beer - Differences to Other Beers and Changes during Storage. In: *Zeitschrift Für Lebensmittel-Untersuchung Und-Forschung* 193 (1991), Nr. 6, S. 558–565
- 167 Murakami, A. A.; Goldstein, H.; Navarro, A.; Seabrooks, J. R.; Ryder, D. S.: Investigation of beer flavor by gas chromatography-olfactometry. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 61 (2003), Nr. 1, S. 23–32
- 168 Preuss, T.: *Technologische Massnahmen zur Erzielung malzaromatischer dunkler Biere hoher Geschmackstabilität nach Charakterisierung der Schlüsselaromastoffe in ausgewählten dunklen Bieren*. München-Weihenstephan, Technische Universität, Dissertation, 2001
- 169 Falbe, J.; Regitz, M.: *Römpps Chemie Lexikon*. In: 10., vollst. überarb. Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag, 1996
- 170 Bemelmans, J. M. H.: Review of isolation and concentration techniques. In: Land, D. G.; Nursten, H. E.: *Progress in Flavour Research*. London: Applied Science, 1979, S. 47–51
- 171 Schmid, W.; Grosch, W.: Identification of Highly Aromatic Volatile Flavor Compounds from Cherries (*Prunus-Cerasus* L.). In: *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 182 (1986), Nr. 5, S. 407–412
- 172 Ullrich, F.; Grosch, W.: Identification of the Most Intense Volatile Flavor Compounds Formed during Autoxidation of Linoleic-Acid. In: *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 184 (1987), Nr. 4, S. 277–282
- 173 Schieberle, P.; Grosch, W.: Quantitative-Analysis of Aroma Compounds in Wheat and Rye Bread Crusts Using a Stable Isotope-Dilution Assay. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 35 (1987), Nr. 2, S. 252–257
- 174 Stamm, M.: *Enzymchemische und technologische Untersuchungen über den Einfluss von Hefeenzymen - speziell Hefeproteinasen auf den Bierschaum*. München-Weihenstephan, Technische Universität, Dissertation, 2001
- 175 [Anon]: Universal Protease Substrate. In: *Produktbeschreibung Roche Molecular Biochemicals* (2004), Nr. 1, S. 1–2
- 176 Kondo, H.; Yomo, H.; Furukubo, S.; Fukui, N.; Nakatani, K.; Kawasaki, Y.: Advanced method for measuring proteinase A in beer and application to brewing. In: *Journal of the Institute of Brewing* 105 (1999), Nr. 5, S. 293–300
- 177 Kondo, H.; Shibano, Y.; Amachi, T.; Cronin, N.; Oda, K.; Dunn, B. M.: Substrate specificities and kinetic properties of proteinase A from the yeast *Saccharomyces cerevisiae* and the development of a novel substrate. In: *Journal of Biochemistry* 124 (1998), Nr. 1, S. 141–147
- 178 Horsted, M. W.; Dey, E. S.; Holmberg, S.; Kielland-Brandt, M. C.: A novel esterase from *Saccharomyces carlsbergensis*, a possible function for the yeast TIP1 gene. In: *Yeast* 14 (1998), Nr. 9, S. 793–803
- 179 Back, W.: *Farbatlas und Handbuch der Getränkebiologie, Teil II*. In: Nürnberg: Fachverlag Hans Carl, 2000
- 180 Back, W.; Imai, T.; Forster, C.; Narziss, L.: Yeast vitality and beer quality. In: *Monatsschrift Für Brauwissenschaft* 51 (1998), Nr. 11–12, S. 189–195
- 181 Norm DIN 10962 Okt. 1997. Prüfbereiche für sensorische Prüfungen - Anforderungen an Prüfräume
- 182 Norm DIN 10950 Teil 1 April 1999. Sensorische Prüfung - Begriffe

- 183 Busch-Stockfisch, M.: *Sensorik in der Produktentwicklung und Qualitätssicherung*. In: 10. Aktualisierungslieferung. Hamburg: B. Behr's Verlag GmbH & Co. KG, 2005
- 184 Norm DIN 10954 Okt. 1997. Sensorische Prüfverfahren - paarweise Vergleichsprüfung
- 185 Norm DIN 10950 Teil 2 Okt. 2000. Sensorische Prüfung - Allgemeine Grundlagen
- 186 Schönberger, C.: *Bedeutung nicht-flüchtiger Geschmackstoffe in Bier*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 2004
- 187 Norm DIN 10964 Juni 1985. Sensorische Prüfverfahren - Einfach beschreibende Prüfung
- 188 Benz, K. H.: The product is the hero - Warum Sensorikforschung für Nahrungs- und Genussmittel Flops vermeiden hilft. In: *Planung & Analyse* (1995), Nr. 4, S. 22–29
- 189 Doerffel, K.: *Statistik in der analytischen Chemie*. In: 5. erweiterte und überarbeitete Auflage. Weinheim: Wiley-VCH, 1990
- 190 Janssen, J.; Laatz, W.: *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows*. In: 4., neubearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2003
- 191 Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R.: *Multivariate Analysemethoden*. In: 9. Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2003
- 192 Daems, V.; Delvaux, F.: Multivariate analysis of descriptive sensory data on 40 commercial beers. In: *Food Quality and Preference* 8 (1997), Nr. 5–6, S. 373–380
- 193 Foster, R. T.; Samp, E. J.; Patino, H.: Multivariate modeling of sensory and chemical data to understand staling in light beer. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 59 (2001), Nr. 4, S. 201–210
- 194 Alcazar, A.; Pablos, F.; Martin, M.; Gonzales, A.: Multivariate characterization of beers according to their mineral content. In: *Talanta* 57 (2002), Nr. S. 45–52
- 195 Forina, M.; Armanino, C.; Castino, M.; Ubigli, M.: Multivariate Data-Analysis as a Discriminating Method of the Origin of Wines. In: *Vitis* 25 (1986), Nr. 3, S. 189–201
- 196 Krottenthaler, M.: *Entwicklung einer Selektionsmethode mit Serieneignung zur Anhebung der Bierqualität und der den Biergeschmack beeinflussenden Qualitätsparameter der Gerste*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 1992
- 197 Busch-Stockfisch, M.; Gochmann, S.; Motschnigg, C.: Free Choice Profiling. In: Busch-Stockfisch, M.: *Sensorik in der Produktentwicklung und Qualitätssicherung*. Hamburg: B. Behr's Verlag GmbH&Co. KG, 2005, S. 1–19
- 198 Komarek, D.: *Key odorants in beer - influence of storage on flavour stability*. München, Technische Universität, Dissertation, 2001
- 199 McCaig, R.; Bendiak, D. S.: Yeast handling studies. II. Temperature of storage of pitching yeast. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 43 (1985), Nr. 2, S. 119–122
- 200 Francois, J.; Parrou, J. L.: Reserve carbohydrates metabolism in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. In: *Fems Microbiology Reviews* 25 (2001), Nr. 1, S. 125–145
- 201 Hwang, P. K.; Tugendreich, S.; Fletterick, R. J.: Molecular Analysis of Gph1, the Gene Encoding Glycogen-Phosphorylase in *Saccharomyces-Cerevisiae*. In: *Molecular and Cellular Biology* 9 (1989), Nr. 4, S. 1659–1666
- 202 Lerch, K.; Fischer, E. H.: Amino-Acid Sequence of 2 Functional Sites in Yeast Glycogen-Phosphorylase. In: *Biochemistry* 14 (1975), Nr. 9, S. 2009–2014

- 203 Teste, M. A.; Enjalbert, B.; Parrou, J. L.; Francois, J. M.: The Saccharomyces cerevisiae YPR184w gene encodes the glycogen debranching enzyme. In: *Fems Microbiology Letters* 193 (2000), Nr. 1, S. 105–110
- 204 Balakrishnan, R., Christie, K. R., Costanzo, M. C., Dolinski, K., Dwight, S. S., Engel, S. R., Fisk, D. G., Hirschman, J. E., Hong, E. L., Nash, R., Oughtred, R., Skrzypek, M., Theesfeld, C. L., Binkley, G., Lane, C., Schroeder, M., Sethuraman, A., Dong, S., Weng, S., Miyasato, S., Andrada, R., Botstein, D., and Cherry, J. M.: Saccharomyces Genome Database. <http://pathway.yeastgenome.org:8555/YEAST/new-image?type=PATHWAY&object=GLYCOCAT-YEAST-PWY> [02.01.2006]
- 205 Schild, E.: *Die brautechnischen Untersuchungsmethoden*. In: 8. Auflage. Nürnberg: Verlag Hans Carl, 1961
- 206 Imai, T.; Ohno, T.: The Relationship between Viability and Intracellular Ph in the Yeast Saccharomyces-Cerevisiae. In: *Applied and Environmental Microbiology* 61 (1995), Nr. 10, S. 3604–3608
- 207 Lindenmeier, M.; Hofmann, T.: Influence of baking conditions and precursor supplementation on the amounts of the antioxidant pronyl-L-lysine in bakery products. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (2004), Nr. 2, S. 350–354
- 208 Somoza, V.; Wenzel, E.; Lindenmeier, M.; Grothe, D.; Erbersdobler, H. F.; Hofmann, T.: Influence of feeding malt, bread crust, and a pronylated protein on the activity of chemopreventive enzymes and antioxidative defense parameters in vivo. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (2005), Nr. 21, S. 8176–8182
- 209 Bohak, I.: *Würzearomastoffe bei Gärung und Lagerung des Bieres*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Diplomarbeit, 1988
- 210 Razmkhab, S.; Lopez-Toledano, A.; Ortega, J. M.; Mayen, M.; Merida, J.; Medina, M.: Adsorption of phenolic compounds and browning products in white wines by yeasts and their cell walls. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (2002), Nr. 25, S. 7432–7437
- 211 Meilgaard, M. C.: Flavour chemistry of beer: Part II: Flavour and threshold of 239 aroma volatiles. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 12 (1975), Nr. 3, S. 151–168
- 212 Karlson, P.; Doenecke, D.; Koolman, J.: *Kurzes Lehrbuch der Biochemie für Mediziner und Naturwissenschaftler*. In: 14., neubearbeitete Auflage. Stuttgart: Georg Thieme Verlag, 1994
- 213 Holtzhauer, M.: Elektrophoretische Techniken. In: Holtzhauer, M.: *Methoden in der Proteinanalytik*. Berlin: Springer-Verlag, 1996, S. 356–378
- 214 Omura, F.; Fujita, A.; Maruhashi, T.; Watanabe, R.; Kondo, H.: The influence of yeast cell wall mannoproteins on beer haze stability. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention 30th* (2005), Nr. S. 65/1–65/8
- 215 Dupin, I. V. S.; McKinnon, B. M.; Ryan, C.; Boulay, M.; Markides, A. J.; Jones, G. P.; Williams, P. J.; Waters, E. J.: Saccharomyces cerevisiae mannoproteins that protect wine from protein haze: Their release during fermentation and lees contact and a proposal for their mechanism of action. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48 (2000), Nr. 8, S. 3098–3105
- 216 Dupin, I. V. S.; Stockdale, V. J.; Williams, P. J.; Jones, G. P.; Markides, A. J.; Waters, E. J.: Saccharomyces cerevisiae mannoproteins that protect wine from protein haze: Evaluation of extraction methods and immunolocalization. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48 (2000), Nr. 4, S. 1086–1095

- 217 Moine-Ledoux, V.; Dubourdiou, D.: An invertase fragment responsible for improving the protein stability of dry white wines. In: *Journal of the Science of Food and Agriculture* 79 (1999), Nr. 4, S. 537–543
- 218 Waters, E. J.; Wallace, W.; Tate, M. E.; Williams, P. J.: Isolation and Partial Characterization of a Natural Haze Protective Factor from Wine. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 41 (1993), Nr. 5, S. 724–730
- 219 Back, W.: Weizenbier. In: Back, W.: *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl GmbH, 2005, S. 249
- 220 Englmann, J.: Hefeweizenbier, eine Biersorte der Zukunft, weltweit? In: 36. *Technologisches Seminar*. TU München-Weihenstephan, 2003, S. 26
- 221 Badasso, M. O.; Read, J. A.; Dhanaraj, V.; Cooper, J. B.; Wood, S. P.; Blundell, T. L.; Dreyer, T.; Winther, J.: Purification, co-crystallization and preliminary X-ray analysis of the natural aspartic proteinase inhibitor I(A)3 complexed with saccharopepsin from *Saccharomyces cerevisiae*. In: *Acta Crystallographica Section D-Biological Crystallography* 56 (2000), Nr. S. 915–917
- 222 Cronin, N. B.; Badasso, M. O.; Tickle, I. J.; Dreyer, T.; Hoover, D. J.; Rosati, R. L.; Humblet, C. C.; Lunney, E. A.; Cooper, J. B.: X-ray structures of five renin inhibitors bound to saccharopepsin: Exploration of active-site specificity. In: *Journal of Molecular Biology* 303 (2000), Nr. 5, S. 745–760
- 223 Magni, G.; Natalini, P.; Santarelli, I.; Vita, A.: Bakers-Yeast Protease-a Purification and Enzymatic and Molecular-Properties. In: *Archives of Biochemistry and Biophysics* 213 (1982), Nr. 2, S. 426–433
- 224 Meussdoerffer, F.; Tortora, P.; Holzer, H.: Purification and Properties of Proteinase A from Yeast. In: *Journal of Biological Chemistry* 255 (1980), Nr. 24, S. 2087–2093
- 225 Nowak, J.; Tsai, H.: Purification and Properties of 3 Endopeptidases from Bakers-Yeast. In: *Canadian Journal of Microbiology* 35 (1989), Nr. 2, S. 295–303
- 226 Wang, Z. Y.; He, G. Q.; Liu, Z. S.; Ruan, H.; Chen, Q. H.; Xiong, H. P.: Purification of yeast proteinase A from fresh beer and its specificity on foam proteins. In: *International Journal of Food Science and Technology* 40 (2005), Nr. 8, S. 835–840
- 227 Kunst, T.; Eger, C.; Jünemann, A.; Lustig, S.; Bellmer, H.-G.: Yeast beer recovery with a decanter. In: *29<sup>th</sup> Proceedings of the European Brewery Convention*. Dublin, 2003, S. 415–423
- 228 Heyse, K.-U.: *Handbuch der Brauereipraxis*. In: Nürnberg: Fachverlag Hans Carl, 1995
- 229 Potgieter, D.; Parsotam, R.; Perry, M.: Extract recovery from surplus yeast. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 33 (1996), Nr. 2, S. 110–114
- 230 Wackerbauer, K.; Balzer, U.: Praktische Erfahrungen mit dem High-Gravity Surplus Yeast Recovery-Verfahren. In: *Brauwelt* 129 (1989), Nr. 47/48, S. 2347–2365
- 231 Kümpel, G.: *Verwertung von Extraktresten im Brauereibetrieb*. München-Weihenstephan, Technische Universität, Diplomarbeit, 1981
- 232 Coors, G.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Auswirkungen einer Würzevorkühlung beim Ausschlagen. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 42/43, S. 1696–1699
- 233 Ohkochi, M.; Takahashi, R.: The Measurement of the Heat-Resistance of Beer Spoilage Lactobacilli. In: *Monatsschrift für Brauerei* 35 (1982), Nr. 10, S. 317

- 234 Röcken, W.: Aktuelle Gesichtspunkte zum Thema Pasteurisation. In: *Brauwelt* 124 (1984), Nr. 42, S. 1826–1832
- 235 Fukuda, K.; Yamamoto, N.; Kiyokawa, Y.; Yanagiuchi, T.; Wakai, Y.; Kitamoto, K.; Inoue, Y.; Kimura, A.: Brewing properties of sake yeast whose EST2 gene encoding isoamyl acetate-hydrolyzing esterase was disrupted. In: *Journal of Fermentation and Bioengineering* 85 (1998), Nr. 1, S. 101–106
- 236 Neven, H.; Delvaux, F.; Derdelinckx, G. S.: Flavor evolution of top fermented beers. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 34 (1997), Nr. 2, S. 115–118
- 237 Vanderhaegen, B.; Neven, H.; Verachtert, H.; Derdelinckx, G.: The chemistry of beer aging - a critical review. In: *Food Chemistry* 95 (2006), Nr. 3, S. 357–381
- 238 Vanderhaegen, B.; Neven, H.; Daenen, L.; Verstrepen, K. J.; Verachtert, H.; Derdelinckx, G.: Furfuryl ethyl ether: Important aging flavor and a new marker for the storage conditions of beer. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (2004), Nr. 6, S. 1661–1668
- 239 Vanderhaegen, B.; Neven, H.; Verstrepen, K. J.; Delvaux, F. R.; Verachtert, H.; Derdelinckx, G.: Influence of the brewing process on furfuryl ethyl ether formation during beer aging. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (2004), Nr. 22, S. 6755–6764
- 240 Vanderhaegen, B.; Neven, H.; Coghe, S.; Verstrepen, K. J.; Verachtert, H.; Derdelinckx, G.: Evolution of chemical and sensory properties during aging of top-fermented beer. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51 (2003), Nr. 23, S. 6782–6790
- 241 Smythe, J. E.; Bamforth, C. W.: A study of the effect of perceived beer history on reported preferences by sensory panels with different levels of training. In: *Journal of the Institute of Brewing* 108 (2002), Nr. 1, S. 34–36

## Anhang

Tabelle 76: Allgemeine Daten der Brauerei und Rechengang

		Einheit
Gesamtjahresausstoß	500000	hl / a
spezifischer Abwasseranfall	0,4	m <sup>3</sup> / hl VB
durchschnittlicher BSB <sub>5</sub> -Gehalt	1500	mg/l
Extremwert	2000	mg/l
<b>anfallende Hefemenge (Gärkeller)</b>		
	2	l /hl VB
jährliche Hefemenge	10000	hl / a
TrS Zulauf	10	%
Trs Auslauf	25	%
Restextrakt	3,5	%
Rückgewinnungsrate Hefebier	0,7	
jährliche Hefebiermenge	6977	hl / a
Gebühr für häusliches Abwasser	2	€ / m <sup>3</sup>
Produktionstage	250	d / a
anfallende Abwassermenge pro Tag	800	m <sup>3</sup> / d
anfallende BSB <sub>5</sub> -Fracht pro Tag	1600	kg BSB <sub>5</sub> / d
<b>Hefe gelangt vollständig ins Abwasser (Fall 1)</b>		
Gebühr 1	<b>3,61</b>	<b>€ / m<sup>3</sup></b>
bei	800	m <sup>3</sup> / d
entspricht dies	1,44	€ / hl VB
<b>Rückhalten der gesamten Überschusshefe (Gärkeller) (Fall 2)</b>		
durchschnittlicher BSB <sub>5</sub> -Gehalt	140000	mg BSB <sub>5</sub> /l
tägliche Hefemenge	40	hl / d
täglich anfallender BSB <sub>5</sub> -Bedarf Hefe	560	kg BSB <sub>5</sub> / d
Abwassermenge (ohne Überschusshefe)	796	m <sup>3</sup> / d
BSB <sub>5</sub> -Wert (ohne Überschusshefe)	1040	kg BSB <sub>5</sub> / d
Gebühr 2	<b>2,92</b>	<b>€ / m<sup>3</sup></b>
bei	796	m <sup>3</sup> / d
entspricht dies	1,16	€ / hl VB
<b>nur Hefebier wird zurückgehalten (Fall 3)</b>		
BSB <sub>5</sub> -Gehalt Hefebier	90000	mg / l
Menge	27,90698	hl / d
BSB <sub>5</sub> - Bedarf Hefebier	251,1628	kg BSB <sub>5</sub> / d
tägliche Abwassermenge	800	m <sup>3</sup> / d
BSB <sub>5</sub> -Wert Abwasser	1348,837	kg BSB <sub>5</sub> / d
Gebühr 3	<b>3,30</b>	<b>€ / m<sup>3</sup></b>
bei	800	m <sup>3</sup> / d
entspricht dies	1,32	€ / hl VB

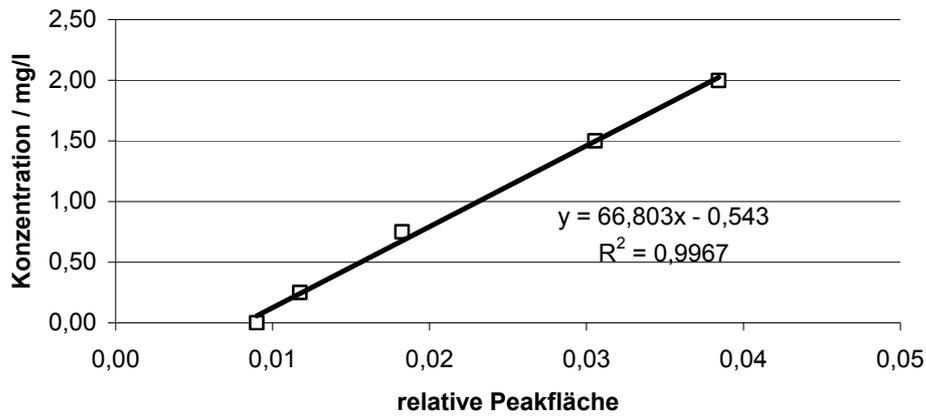


Abbildung 136: Kalibrierung Isobuttersäure

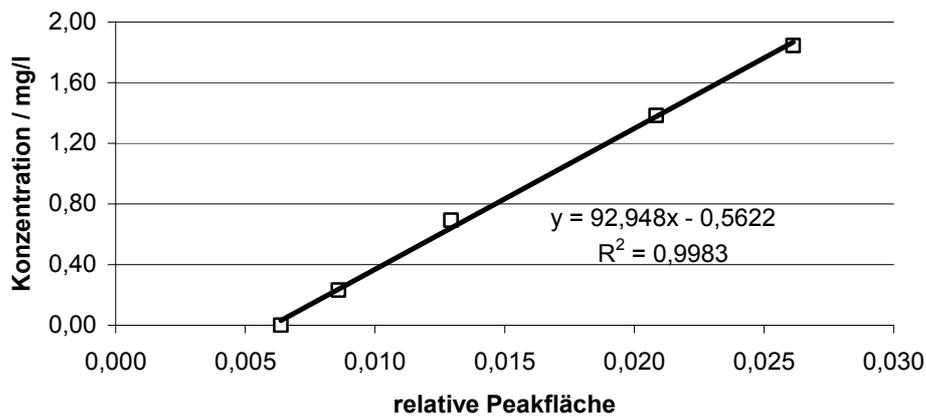


Abbildung 137: Kalibrierung Buttersäure

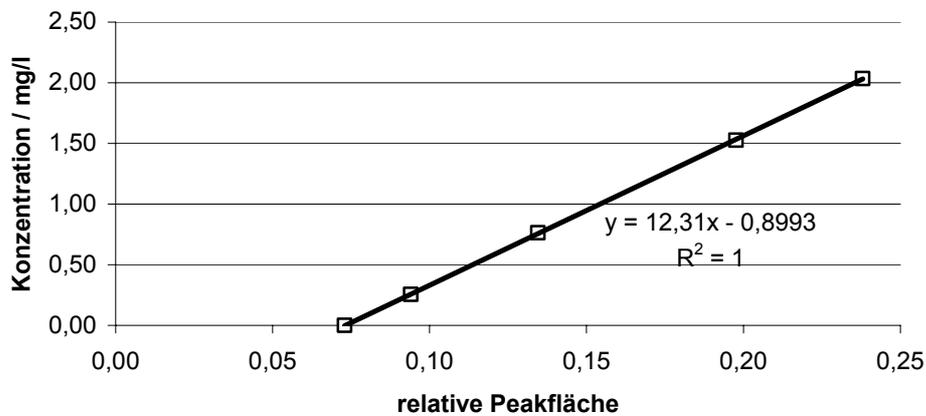


Abbildung 138: Kalibrierung Isovaleriansäure

Tabelle 77: Reproduzierbarkeit der Methode Bieraromastoffe

	Bier 1	Bier 2	Bier 3	Bier 4	Bier 5	Bier 6	Bier 7	Bier 8	Bier 9	Bier 10	Mittelwert	StAbw	VK	KI (p=0,95)
Hexanol-1	14	13	14	12	14	14	13	14	11	15	13	0,968	0,073	0,682
Heptanol-1	3,8	3,8	3,9	3,4	3,7	3,5	3,6	3,5	3,3	3,9	4	0,197	0,054	0,141
Octanol-1	8,8	9,0	9,3	8,9	9,1	9,0	9,0	9,1	9,3	9,3	9	0,161	0,018	0,115
Decanol-1	2,8	2,9	3,0	3,0	3,2	3,0	3,1	3,1	3,2	3,2	3	0,128	0,042	0,091
2-Phenylethanol	18999	19714	19659	19921	19993	18805	20068	18500	20076	20866	19640	670,289	0,034	479,039
Furfurylalkohol	1239	1026	1067	825	978	1177	938	1335	952	842	1038	167,790	0,162	119,915
Essigsäure-Isobutylester	58	59	57	55	57	60	59	57	59	61	58	1,798	0,031	1,285
Essigsäure-Hexylester	6,3	6,4	6,3	6,3	6,3	6,3	6,5	6,3	6,6	6,4	6	0,108	0,017	0,077
Essigsäure-Heptylester	3,1	3,1	3,2	3,1	3,1	3,2	3,1	3,1	3,2	3,0	3	0,064	0,021	0,046
Essigsäure-Octylester	4,4	4,5	4,5	4,7	4,7	4,6	4,5	4,4	4,7	4,6	5	0,119	0,026	0,085
Essigsäure-Furfurylester	12	12	12	11	13	12	11	11	11	12	12	0,605	0,051	0,432
Essigsäure-2-Phenylethylester	760	775	795	775	760	773	786	793	809	788	783	13,861	0,018	9,906
Buttersäure-Ethylester	92	94	94	91	95	93	94	94	91	98	94	2,157	0,023	1,542
Hexansäure-Ethylester	213	215	215	214	215	212	219	212	223	217	215	3,482	0,016	2,488
Octansäure-Ethylester	225	223	225	235	230	226	226	224	230	227	227	3,625	0,016	2,590
Decansäure-Ethylester	27	27	28	29	28	28	28	28	27	28	28	0,550	0,020	0,393
Isovaleriansäure	572	567	589	462	563	618	498	640	488	547	555	57,184	0,103	40,868
Octansäure	4606	4923	5072	4938	4980	4908	4955	5019	5070	5046	4952	135,382	0,027	96,754
Nonansäure	11	10	10	11	15	10	10	11	13	12	11	1,563	0,137	1,117
Decansäure	358	381	397	397	395	382	385	393	403	392	388	12,701	0,033	9,077
Dodecansäure	26	28	29	31	32	27	26	27	30	32	29	2,078	0,072	1,485
α-Terpinol	7,6	8,0	7,6	7,0	7,5	6,6	5,8	6,9	5,6	7,7	7	0,823	0,117	0,588
Linalool	8,9	9,7	9,1	9,6	8,4	8,8	8,4	8,5	8,8	9,4	9	0,489	0,055	0,349
Nerol	1,1	1,2	1,1	0,8	1,1	1,5	1,4	1,5	1,0	1,8	1	0,301	0,240	0,215
g-Nonalacton	36	37	40	37	38	36	37	38	38	38	38	1,309	0,035	0,936

Tabelle 78: Reproduzierbarkeit der Methode höhere Alkohole und leichtflüchtige Ester

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Mittelwert	StAbW	VK	KI
Acetaldehyd	3366,6	2993,3	3234,2	3365,3	3166	3042,5	3492,8	4030,5	3772	3284,1	3377	321,349	0,095	214,417
Propanol-1	10421,8	10768	10668,6	10868,1	10761,4	10476,3	11532	12395,1	13272,7	11192,7	11236	926,330	0,082	618,085
Ethylacetat	20316,9	18502,9	18634,8	19136,2	20368,4	20214,6	19879	20862,5	27404,9	22095,2	20742	2573,704	0,124	1717,280
2-Methylpropanol	6973,4	7177,4	6911,9	7099,6	7134,2	7066,4	7579,6	8013,8	9032,9	7622,5	7461	652,296	0,087	435,239
3-Methylbutanol	40280,7	43033,9	40801,7	41879,5	42380,3	42340,5	45350,5	47039,1	54440,1	45894,3	44344	4181,039	0,094	2789,759
2-Methylbutanol	9673,9	10139,4	9553,8	9812,8	9972,3	9900,6	10667,9	11088,7	12709,4	10709,8	10423	946,249	0,091	631,375
2-Methylpropylacetat	28,7	27,8	29	28,1	30,9	29,9	28,7	31,5	40,4	30,5	31	3,671	0,120	2,449
Buttersäureethylester	104,7	99,9	104,8	105,9	107,5	104,7	107,4	113,5	140,2	113,7	110	11,316	0,103	7,551
3-Methylbutylacetat	1423,4	1351,4	1451	1435,7	1427,2	1377,2	1444	1571	1816,2	1472,1	1477	132,697	0,090	88,541
2-Methylbutylacetat	100,9	95,3	103,1	101,7	100,7	96,9	101,5	111,1	126,4	102,5	104	8,903	0,086	5,940
Hexansäureethylester	158,8	154,3	167,8	165	156,5	152,9	167	185,9	198	164,9	167	14,394	0,086	9,604

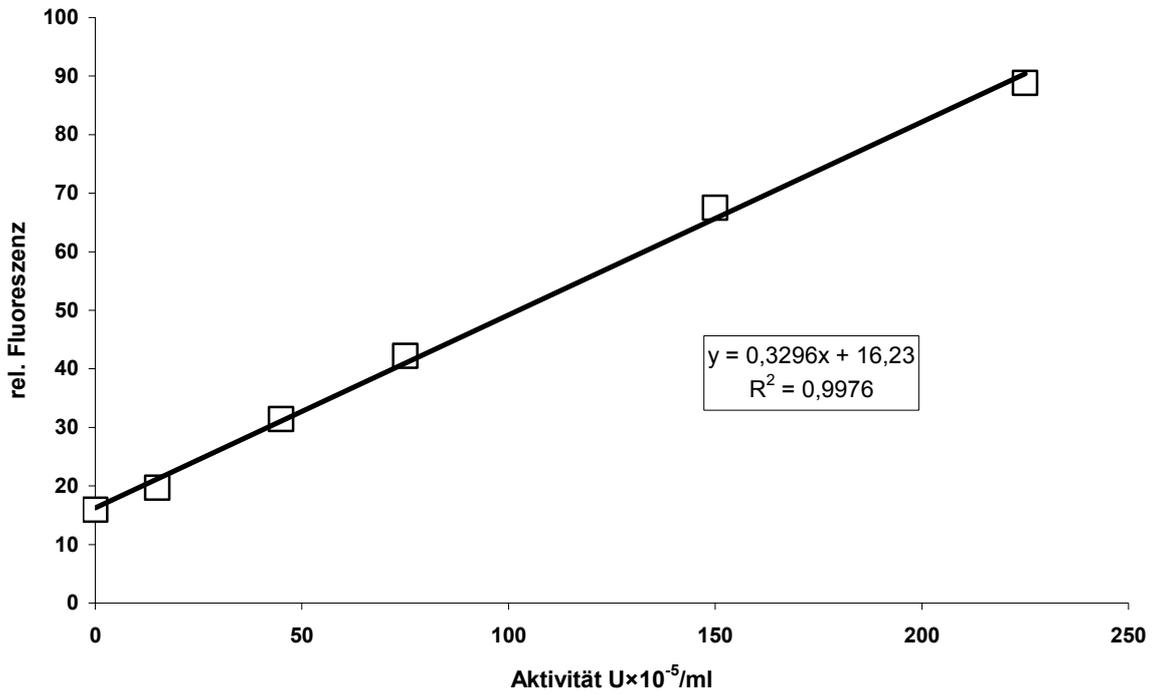


Abbildung 139: Kalibrierung der Aktivität der Proteinase A

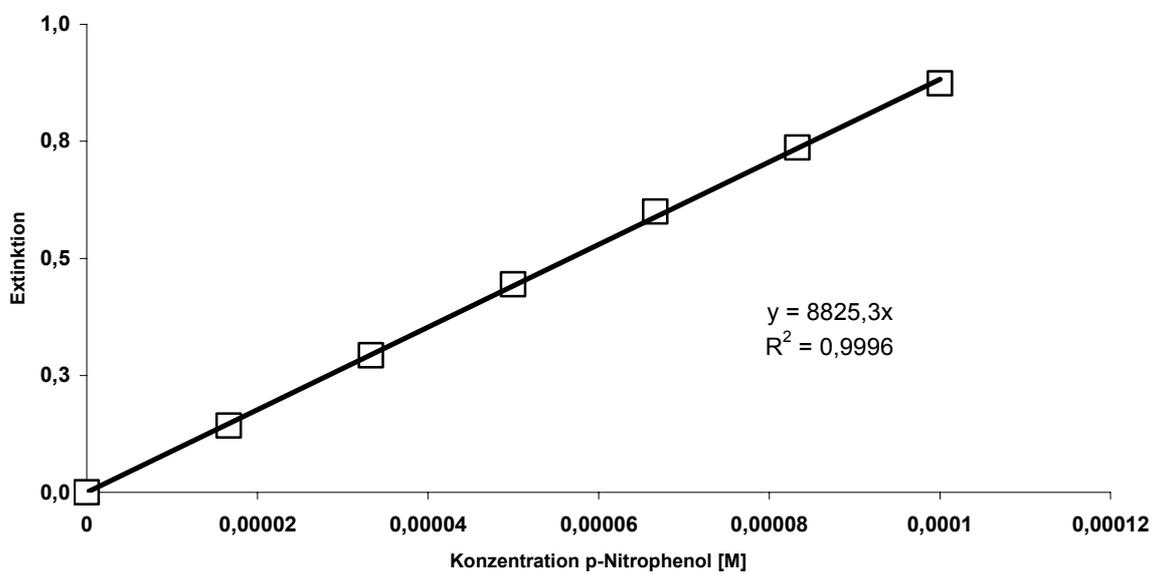


Abbildung 140: Bestimmung des molaren Extinktionskoeffizienten von p-Nitrophenol.



**Profilprüfung**

**Datum** 31.05.2006

**Name:**

**Hefebier**

**Probe:**

**Prüfanleitung:**

Ordnen Sie den unten aufgeführten Aromaattributen zur Charakterisierung des Geruchs und des Geschmacks des Hefebieres einen Wert (0-9) für die wahrgenommene Intensität zu.

<b><u>Aromaeindruck</u></b>	<b><u>Intensität</u></b>										<b><u>Bewertung</u></b>
	nicht erkenn- bar	schwach erkennbar			erkennbar		gut erkennbar		dominant		
1. grüner Apfel / stechend	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
2. käsig / schweissig	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
3. fruchtig / blumig	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
4. süßlich	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
5. fruchtig / Eisbonbon	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
6. säuerlich	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
7. alkoholisch	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
8. Lösungsmittel	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9. phenolisch	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
10. erdig	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
11. Bittere	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	

Abbildung 141: Profilprüfung für Hefebier.

*Tabelle 79: Zusammenfassung der FD-Faktoren der neutral-basischen Fraktion der unterschiedlich behandelten Hefebiere*

Nr.	Aromastoff	RT (HP-5)	A	B	C	Geruch
1	unbekannt	6.70	<2	<2	<2	malzig
2	unbekannt	7.13	<2	<2	<2	käsigt
3	unbekannt	7.92	32	16	32	malzig/süßlich
4	unbekannt	8.11	<2	4	<2	malzig
4	unbekannt	8.62	<2	128	16	malzig
5	1,1-Diethoxethan	9.20	128	<2	64	fruchtig
6	3-Methylbutanol	9.45	32	256	256	malzig
7	Ethylbutanoat	11.64	4	128	128	fruchtig
8	2-Furanmethanol	13.87	16	128	64	fruchtig/süßlich
9	3-Methylbutylacetat	14.61	<2	64	32	fruchtig/süßlich
10	unbekannt	15.90	<2	32	128	fruchtig
11	unbekannt	16.95	4	32	8	fruchtig
12	1-Heptanol	18.57	<2	8	16	Kartoffel
13	Methionol	19.06	<2	<2	<2	schweißig
14	β-Myrcen	19.50	32	<2	<2	blumig
15	Ethylhexanoat	19.80	32	4	4	Eisbonbon/fruchtig
16	Hexylacetat	20.40	64	4	4	fruchtig
17	2-Phenylethanal	22.00	<2	16	32	süß, honigartig
18	Heptylacetat	24.60	16	64	32	fruchtig
19	2-Phenylethanol	25.17	4	128	8	honigartig/rosenartig
20	Octansäure	27.71	16	128	128	Bratapfel
21	Ethyloctanoat	28.06	4	128	32	fruchtig
22	Decylacetat	28.61	<2	<2	8	fruchtig/blumig
23	2-Phenylethylacetat	30.56	64	<2	2	süßlich
24	2-Methoxy-4-vinylphenol	32.79	<2	128	128	Gewürznelke
25	Decansäure	34.72	<2	<2	64	wachsartig, seifig
26	β-Caryophyllen	37.00	<2	4	<2	fruchtig/blumig
27	α-Caryophyllen	38.15	2	<2	<2	fruchtig/blumig
28	unbekannt	42.00	4	4	4	süßlich/Vanille

*Tabelle 80: Zusammenfassung der FD-Faktoren der aciden Fraktion der unterschiedlich behandelten Hefebiere*

Nr.	Aromastoff	RT (HP-5)	A	B	C	Geruch
1	Ethylacetat	6.61	2	<2	16	käsigt/Lösungsmittel
2	Essigsäure	6.80	2	32	4	essigsauer
3	3-Methylbutanol	9.60	64	64	256	malzig
4	Butansäure	12.12	32	64	128	säuerlich
5	3-Methylbuttersäure	14.51	4	128	64	käsigt/schweißig
6	2-Methylbuttersäure	14.94	4	8	128	käsigt/schweißig
7	5,5-Dimethyl-2(5H)-Furanon	18.00	4	8	128	käsigt/süßlich
8	Hexansäure	21.46	2	64	32	käsigt/fruchtig
9	unbekannt	23.80	4	4	<2	Gummibärchen
10	2-Phenylethanol	25.01	<2	<2	<2	rosenartig/honigartig
11	Octansäure	28.25	64	128	256	Bratapfel
12	unbekannt	28.52	16	4	16	maggiartig
13	unbekannt	31.52	2	<2	<2	fruchtig
14	Decansäure	34.57	<2	<2	16	wachsartig, seifig

Tabelle 81: Rotated Component Matrix

	Component 1	Component 2	Component 3
1-Hexanol	1,000	5,683E-03	-2,342E-02
1-Heptanol	,948	,220	,230
1-Octanol	,963	-,148	-,225
1-Decanol	,858	-,454	-,238
2-Phenylethanol	,911	-,391	,131
Furfurylalkohol	-,955	,296	-1,480E-02
Essigsäure-Isobutylester	-,909	,414	4,050E-02
Essigsäure-Hexylester	4,062E-02	,998	-4,143E-02
Essigsäure-Heptylester	,861	,205	,465
Essigsäure-Octylester	,968	,190	-,165
Essigsäure-Furfurylester	-,603	,793	-8,767E-02
Essigsäure-2-Phenylethylester	,831	,334	,445
Buttersäure-Ethylester	-,967	,253	-1,472E-02
Hexansäure-Ethylester	-,921	,358	-,152
Octansäure-Ethylester	-,687	-,693	-,219
Decansäure-Ethylester	-,487	-,844	-,226
Isovaleriansäure	,653	-,733	,190
Hexansäure	-2,740E-02	,999	-1,631E-02
Octansäure	,858	,474	,197
Nonansäure	,801	-,508	,318
Decansäure	,204	-,977	-6,985E-02
Dodecansäure	-,916	,344	-,208
alpha-Terpineol	-,852	,503	-,149
Linalool	-,968	,219	-,125
gamma-Nonalacton	,609	-,757	,235
grüner Apfel	,966	,258	2,946E-02
käsigt	-,383	-,888	-,252
blumig	-,251	,956	,154
süßlich	-,726	,687	1,466E-02
Eisbonbon	,152	,962	,227
säuerlich	,636	-,756	,158
alkoholisch	-,262	,758	,598
lösungsmittel	,955	,145	-,261
erdig	,682	-,704	,198
bitter	,154	-,939	,308

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

**Tabelle 82: Konzentrationen der N-Heterocyclen in Hefebier**

Konzentration / µg/l	1	4
Pyrazin	0,1	n.n
2-Methylpyrazin	n.n.	8,3
4-Methylthiazol	3,2	50,9
2,6-Dimethylpyrazin	0,5	1,6
2,5-Dimethylpyrazin	n.n.	n.n
2-Ethylpyrazin	1,0	0,8
2-Methoxypyrazin	n.n.	0,1
2,3-Dimethylpyrazin	1,0	n.n
2,3,5-Trimethylpyrazin	0,1	0,7
Pyrrol	1,2	1,3
2-Acetylpyridin	0,6	0,4
6,7-Dihydro-5H-5-methylcyclopentapyrazin	0,1	n.n
2-Acetylthiazol	0,7	4,6
2-Methylbenzoxazol	0,1	2,2
Pyrazol	2,7	12,9
N-Furfuryl pyrole, 1-Furfurylpyrrol	0,8	1,0
3-Acetylpyridin	1,8	12,8
2-Acetylpyrrol	12,3	32,2
Indol	0	0,1

**Tabelle 83: Bestimmung des Schwellenwertes für Heptanol-1**

Verkoster	0,25	0,5	1	2	BET	log <sub>10</sub> BET
1	0	1	0	0	2,82	0,45024911
2	0	0	1	0	2,82	0,45024911
3	0	1	0	1	2,82	0,45024911
4	0	1	0	1	2,82	0,45024911
5	1	0	0	0	2,82	0,45024911
6	0	0	0	1	2,82	0,45024911
7	0	0	1	0	2,82	0,45024911
8	0	1	1	1	0,35	-0,45593196
9	0	1	1	1	0,35	-0,45593196
10	0	1	1	1	0,35	-0,45593196
Summe der richtig erkannten Proben	1	6	5	6		0,17839479

Tabelle 84: Verhalten der Hefebieraromastoffe

<b>Bieraromastoffe [µg/l]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Hexanol-1	33	54	48	46
Heptanol-1	20	112	114	66
Octanol-1	20	58	43	51
Decanol-1	6,8	12	9,9	13
2-Phenylethanol	23973	33791	34936	37805
Furfurylalkohol	1366	1153	1264	1100
Essigsäure-Isobutylester	52	29	32	25
Essigsäure-Hexylester	13	9,4	8,8	7,1
Essigsäure-Heptylester	5,6	9,6	12	7,1
Essigsäure-Octylester	8,7	9,1	8,0	7,7
Essigsäure-Furfurylester	10	7,1	6,4	4,5
Essigsre-2-Phenylethylester	676	584	614	531
Buttersäure-Ethylester	161	96	111	96
Hexansäure-Ethylester	191	188	183	176
Octansäure-Ethylester	342	337	341	404
Decansäure-Ethylester	116	57	59	106
Isovaleriansäure	237	366	495	703
Hexansäure	1517	1134	1026	662
Octansäure	6265	6651	6536	5311
Nonansäure	21	23	26	27
Decansäure	936	828	872	1220
Dodecansäure	118	58	55	54
α-Terpineol	3,3	2,3	2,1	1,7
Linalool	17	16	16	16
Nerol	1,6	1,2	1,0	Sp.
γ-Nonalacton	26	31	39	49

Tabelle 85: Bestimmung des Schwellenwertes für 3-Methylbuttersäure

Verkoster	0,5	1	2	4	BET	log <sub>10</sub> BET
1	0	1	0	1	2,82	0,45024911
2	0	1	1	1	0,707	-0,15058059
3	1	0	0	1	2,82	0,45024911
4	0	1	0	1	2,82	0,45024911
5	1	1	1	1	0,353	-0,45222529
6	1	0	0	1	2,82	0,45024911
7	1	1	1	1	0,353	-0,45222529
8	1	0	0	1	2,82	0,45024911
9	0	0	0	1	0,35	-0,45593196
10	0	1	1	1	0,707	-0,15058059
11	0	0	1	1	1,414	0,15044941
Summe der richtig erkannten Proben	5	6	5	11		0,06728648

Tabelle 86: Messdaten für die Berechnung des Autolyse-Index

Hefevitalität [ICP]	Heptanol-1	gewichtet	Isovaleriansäure	gewichtet	Decansäure	gewichtet	Heptylacetat	gewichtet	Autolyse-Index [%]
6,43	7	117	229	51	819	152	3,2	160	34
6,16	112	1867	366	81	828	153	9,6	480	47
6	114	1900	495	110	872	161	12	600	55
5,48	66	1100	703	156	1220	226	7,1	355	70
6,1	60	1000	290	64	1560	289	7,4	370	61
5,5	136	2267	260	58	2020	374	5,4	270	75
5,9	296	4933	330	73	1400	259	16	7	66
6,14	14	233	416	92	1242	230	2,5	125	54
5,48	112	1867	498	111	1449	268	3,8	190	68
6,01	9	150	521	116	1175	218	2,6	130	57
5,93	31	517	793	176	1288	239	3,0	150	73
5,52	35	583	530	118	1717	318	1,1	55	73
5,7	160	2667	340	76	1600	296	7,8	390	69
6,17	101	1683	759	169	419	78	13	650	54
5,6	38	633	864	192	1035	192	4,4	220	70
5,88	111	1850	738	164	602	111	12	600	58
5,25	41	683	907	202	1786	331	3,6	180	93
5,62	33	550	239	53	1600	296	1,3	65	57
6,28	7,6	127	153	34	1269	235	1,5	75	43
5,68	70	1167	1226	272	609	113	1,8	90	75
5,57	40	667	864	192	656	121	1,9	95	59
5,89	38	633	400	89	1486	275	1,6	80	61

Tabelle 87: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–D

fertiges Bier	Stammwürze [g/100ml]	Alkohol [vol.-%]	Schaum [NIBEM]	FAN [mg / 100 ml]	SO <sub>2</sub> [mg/l]	Lag-time [min]	ARV [%]	ARP [%]	Reduktionsvermögen [%]	SI [%]	Bewertung SI
A	12,19	5,23	254	9,19	1,9	50	85	67	26	55	Durchschnitt
B	12,39	5,31	247	10,93	1,0	49	85	64	27	54	Durchschnitt
C	12,33	5,25	234	11,32	2,1	55	85	65	26	55	Durchschnitt
D	12,26	5,20	218	12,19	0,7	48	84	64	25	53	Durchschnitt

*Tabelle 88: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bieraromastoffe der Biere A–D*

<b>Bieraromastoffe [µg/l]</b>	A	B	C	D
Hexanol-1	22	23	23	23
Heptanol-1	4,4	10	10	8,9
Octanol-1	16	17	17	16
Decanol-1	5,5	4,9	5,8	4,7
2-Phenylethanol	26021	20619	18808	16924
Furfurylalkohol	1465	1584	1568	1657
Essigsäure-Isobutylester	46	36	35	32
Essigsäure-Hexylester	7,5	6,4	6,2	5,9
Essigsäure-Heptylester	2,8	6,4	6,1	4,7
Essigsäure-Octylester	4,3	5,2	4,8	4,8
Essigsäure-Furfurylester	12	10	9,5	8,6
Essigsre-2-Phenylethylester	607	426	400	345
Buttersäure-Ethylester	91	96	96	90
Hexansäure-Ethylester	242	241	230	224
Octansäure-Ethylester	286	270	267	238
Decansäure-Ethylester	32	33	36	31
Isovaleriansäure	50	117	n.a.	82
Hexansäure	1845	1971	1975	1931
Octansäure	5098	5216	5339	5193
Nonansäure	15	14	15	14
Decansäure	417	369	415	370
Dodecansäure	19	37	40	35
α-Terpineol	1,9	2,0	2,0	2,2
Linalool	8,2	8,9	8,6	8,6
Nerol	3,3	4,6	4,3	4,2
γ-Nonalacton	31	31	31	29

*Tabelle 89: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Alterungsindikatoren im frischen Zustand (Biere A–D)*

Alterungsindikatoren in µg/l		A	B	C	D
2-Methyl-Butanal		23	16	14	19
3-Methyl-Butanal	(S,A)	7,0	14	12	15
2-Furfural	(W,A)	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
5-Methyl-Furfural	(A)	4,0	4,6	4,6	Sp.
Benzaldehyd	(S,A)	Sp.	Sp.	3,5	Sp.
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	4,1	6,8	4,9	7,2
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	1,5	1,4	1,4	1,5
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		5,0	3,9	3,4	n.a.
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,7	0,9	0,9	0,8
2-Acetyl-Furan	(A)	4,1	4,3	4,2	4,0
2-Propionyl-Furan	(A)	2,7	3,0	2,9	3,0
gamma-Nonalacton	(W,A)	24	23	23	22
Summe der Wärmeindikatoren		24	23	23	22
Summe der Sauerstoffindikatoren		11	21	20	22
Summe der Alterungskomponenten		48	59	57	53

*Tabelle 90: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Alterungsindikatoren im forciert gealterten Zustand (Biere A–D)*

Alterungsindikatoren in µg/l		A	B	C	D
2-Methyl-Butanal		26	17	15	17
3-Methyl-Butanal	(S,A)	8,9	15	14	15
2-Furfural	(W,A)	137	67	81	80
5-Methyl-Furfural	(A)	4,6	4,8	4,9	4,9
Benzaldehyd	(S,A)	1,1	0,7	0,7	1,0
2-Phenyl-Ethanal	(S,A)	7,0	9,3	8,8	12
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	(A)	n.a.	1,0	1,1	1,2
Nicotinsäure-Ethyl-Ester		8,8	6,3	7,5	10
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	(A)	0,9	0,9	1,0	1,0
2-Acetyl-Furan	(A)	6,1	5,1	5,1	5,2
2-Propionyl-Furan	(A)	3,5	2,9	3,0	2,7
gamma-Nonalacton	(W,A)	35	29	30	30
Summe der Wärmeindikatoren		172	96	111	110
Summe der Sauerstoffindikatoren		17	25	23	27
Summe der Alterungskomponenten		204	136	149	152

**Tabelle 91: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	D	C	B	A
D	4,0625	----	0,328118685	0,328118685	0,328118685
C	4,385416667	nein	----	0,328118685	0,328118685
B	4,385416667	nein	nein	----	0,328118685
A	4,479166667	ja	nein	nein	----

**Untermenge 1:** D

**Untermenge 2:** C  
B  
A

**Tabelle 92: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	A	B	D	C
A	1,816666667	----	0,389679002	0,389679002	0,389679002
B	2,083333333	nein	----	0,389679002	0,389679002
D	2,166666667	nein	nein	----	0,389679002
C	2,266666667	ja	nein	nein	----

**Untermenge 1:** A

**Untermenge 2:** B  
D  
C

*Tabelle 93: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Sedimentationsphase (Bieraromastoffe)*

Bieraromastoff [ $\mu\text{g/l}$ ]	Tank voll	Ende Sedimentation
Hexanol-1	22	43
Heptanol-1	9	31
Octanol-1	44	71
Decanol-1	13	19
2-Phenylethanol	16421	19989
Furfurylalkohol	1861	2181
Essigsäure-Isobutylester	44	21
Essigsäure-Hexylester	4,1	3,6
Essigsäure-Heptylester	2,6	3,0
Essigsäure-Octylester	5,5	5,1
Essigsäure-Furfurylester	10	1,6
Essigsäure-2-Phenylester	295	244
Buttersäure-Ethylester	89	69
Hexansäure-Ethylester	201	159
Octansäure-Ethylester	340	314
Decansäure-Ethylester	73	64
Isovaleriansäure	521	793
Hexansäure	835	1320
Octansäure	5396	6169
Nonansäure	28	89
Decansäure	1288	1175
Dodecansäure	77	77
$\alpha$ -Terpineol	11	7,6
Linalool	17	11
Nerol	1,1	1,8
$\gamma$ -Nonalacton	45	49

*Tabelle 94: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Sedimentationsphase (leichtflüchtige Ester und höhere Alkohole)*

	Tank voll	Ende Sedimentation
Acetaldehyd	14221	4893
Propanol-1	12483	15530
Ethylacetat	29343	47804
2-Methylpropanol	11202	13636
3-Methylbutanol	49917	51285
2-Methylbutanol	14585	15827
2-Methylpropylacetat	39,8	Sp.
Buttersäureethylester	92	71
3-Methylbutylacetat	1871	1706
2-Methylbutylacetat	122	53
Hexansäureethylester	259	194

Tabelle 95: statistische Auswertung der Bestimmung der Hefeviabilität

	<b>Dekanter- Einlauf</b>	<b>Dekanter- Austrag</b>	<b>Differenz Einlauf- Austrag</b>
gültige Fälle	32	32	32
Mittelwert	89,05625	88,14375	0,9125
Std.Fehler des MW	1,06143863	1,093713133	0,100377312
Varianz	36,0528629	38,27866935	0,322419355
Std.Abweichung	6,004403626	6,186975784	0,567819826
Variationskoeffizient	0,067422597	0,070191883	0,622268303
rel. V.koeffizient(%)	1,191874383	1,240828911	11,00025341
Schiefe	-1,198342419	-1,198761752	0,930387687
Kurtosis	0,525470323	0,655241429	1,061011246
Minimum	72,7	70,6	0,1
Maximum	95,8	95,4	2,6
Spannweite	23,1	24,8	2,5
Summe	2849,8	2820,6	29,2
1. Perzentil	----	----	----
5. Perzentil	75,105	73,85	0,165
10. Perzentil	77,85	76,98	0,2
25. Perzentil	86,1	84,175	0,425
Median	91,1	90,85	0,9
75. Perzentil	93,675	93	1,1
90. Perzentil	94,1	93,44	1,71
95. Perzentil	95,475	94,62	2,275
99. Perzentil	----	----	----
geom. Mittelwert	88,84827717	87,91995624	0,725526918

Tabelle 96: Rohdaten für die Bestimmung der Ausbeute

Probe	Dekanter-Einlauf	Dekanter-Austrag	Extrakt wirklich	Ausbeute
1	15,75	21,16	4,19	31,8797879
2	12,69	21,85	3,74	50,5797902
3	12,16	21,82	3,61	53,0477759
4	13,09	21,44	3,91	47,6326298
6	11,75	23,46	3,97	60,0820934
7	15,83	24,79	3,78	42,6463589
8	13,37	20,78	3,85	43,7684584
9	15,61	23,84	4,03	41,5446744
10	10,67	25,00	3,63	67,0566214
12	10,53	24,71	3,84	67,9444178
13	16,01	26,34	3,69	45,607064
14	13,47	21,78	3,74	46,0643016
15	15,33	26,62	3,58	49,0017361
16	15,24	24,27	3,82	44,1564792
17	14,04	24,46	3,72	50,24108
18	14,60	25,13	3,86	49,506347
19	15,14	23,70	3,85	43,1234257
20	17,11	25,55	3,56	38,3810823
21	15,69	23,26	3,69	38,6816556
22	14,59	22,05	3,69	40,6318083
23	16,31	22,91	3,74	34,428795
24	13,12	26,74	3,61	58,8845655
25	13,96	22,28	3,78	44,972973
26	15,60	25,65	3,89	46,1856618
29	10,19	28,50	3,69	73,8008867
30	13,47	25,39	3,74	55,0577367
31	14,98	22,00	3,8	38,5714286
32	13,87	26,84	3,73	56,1228905
34	15,68	23,78	3,93	40,8060453
35	15,79	23,91	3,73	40,2378593
36	10,08	26,44	3,9	72,5820763
37	17,48	23,67	3,76	31,0899046
38	12,26	20,83	3,89	50,5903188
39	16,06	23,29	4,21	37,8930818
40	9,82	28,44	3,7	75,2627324
41	13,37	25,74	3,95	56,7691602
42	16,15	20,96	3,67	27,8195489
43	13,10	29,76	3,52	63,4908537
44	16,18	26,9	3,73	46,1970614
45	15,6	23,6	3,45	39,7416791

Tabelle 97: statistische Auswertung der Bestimmung der Ausbeute

	Dekanter- Einlauf	Dekanter- Austrag	Extrakt wirklich	Ausbeute
gültige Fälle	40	40	40	40
Mittelwert	14,143	24,23975	3,77925	48,55207118
Std.Fehler des MW	0,32089722	0,357207023	0,025245938	1,860599554
Varianz	4,119001026	5,103874295	0,025494295	138,473228
Std.Abweichung	2,029532218	2,259175579	0,15966933	11,76746481
Variationskoeffizient	0,143500829	0,093201274	0,042248946	0,242367926
rel. V.koeffizient(%)	2,268947322	1,473641531	0,668014493	3,832173394
Schiefe	-0,61069209	0,384945698	0,628572409	0,65115454
Kurtosis	-0,541254508	-0,466605778	0,771819224	-0,176886199
Minimum	9,82	20,78	3,45	27,81954887
Maximum	17,48	29,76	4,21	75,26273242
Spannweite	7,66	8,98	0,76	47,44318354
Summe	565,72	969,59	151,17	1942,082847
1. Perzentil	----	----	----	----
5. Perzentil	10,0855	20,8365	3,522	31,12939874
10. Perzentil	10,544	21,188	3,583	34,77522367
25. Perzentil	13,0925	22,1075	3,69	40,33634652
Median	14,595	23,875	3,74	46,12498166
75. Perzentil	15,735	25,7175	3,8825	55,85660207
90. Perzentil	16,177	26,867	3,968	67,85563819
95. Perzentil	17,07	28,497	4,182	73,73994622
99. Perzentil	----	----	----	----
geom. Mittelwert	13,98946813	24,13870569	3,776009947	47,22588662

Tabelle 98: Verhalten von Hefeviabilität und –vitalität während der Aufbereitung mittels Teller-Zentrifuge

	4. Separation		5. Separation	
	Hefeviabilität	Hefevitalität	Hefeviabilität	Hefevitalität
Zentrifuge-Einlauf	40,6	5,62	3,1	6,28
Zentrifuge-Austrag	44,4	5,50	8,7	6,22

Tabelle 99: Verhalten der Hefetrockensubstanz bei Zentrifuge-Einlauf und -Austrag

	Zentrifuge- Einlauf	Zentrifuge- Austrag
gültige Fälle	11	11
Mittelwert	13,54545455	20,67272727
Std.Fehler des MW	0,418300378	0,552694377
Varianz	1,924727273	3,360181818
Std.Abweichung	1,387345405	1,833079872
Variationskoeffizient	0,102421473	0,08867141
rel. V.koeffizient(%)	3,088123599	2,6735436
Schiefe	-0,894293422	-0,619556571
Kurtosis	0,059170498	-1,119758444
Minimum	11	18
Maximum	15,6	23
Spannweite	4,6	5
Summe	149	227,4
1. Perzentil	----	----
5. Perzentil	----	----
10. Perzentil	11	18
25. Perzentil	13,5	18
Median	13,8	21,2
75. Perzentil	14,2	22
90. Perzentil	15,38	22,82
95. Perzentil	----	----
99. Perzentil	----	----
geom. Mittelwert	13,47622246	20,59587323

Tabelle 100: Verhalten der Temperatur am Zentrifuge-Einlauf und im Hefebier

	Zentrifuge- Einlauf	Hefebier
gültige Fälle	10	11
Mittelwert	7,45	11,85454545
Std.Fehler des MW	0,689000887	0,586416488
Varianz	4,747222222	3,782727273
Std.Abweichung	2,178812113	1,944923462
Variationskoeffizient	0,292458002	0,164065629
rel. V.koeffizient(%)	9,248334053	4,946764854
Schiefe	0,300466449	-0,471717142
Kurtosis	-1,514847393	-0,747719936
Minimum	4,5	8
Maximum	10,5	14
Spannweite	6	6
Summe	74,5	130,4
1. Perzentil	----	----
5. Perzentil	----	----
10. Perzentil	4,65	8,48
25. Perzentil	6	10,6
Median	6,25	11,6
75. Perzentil	10	13,6
90. Perzentil	10,45	14
95. Perzentil	----	----
99. Perzentil	----	----
geom. Mittelwert	7,168301574	11,69841532

*Tabelle 101: Ergebnisse der Bieraromastoffuntersuchungen für die Zeitpunkte „Beginn“ und „Ende“ Filtration*

<b>Aromastoff / µg/l</b>	<b>Beginn CMF</b>	<b>Ende CMF</b>
Hexanol-1	19	29
Heptanol-1	5,9	7,2
Octanol-1	41	51
Decanol-1	13	16
2-Phenylethanol	37174	34501
Furfurylalkohol	n.a.	11501
Essigsäure-Isobutylester	39	38
Essigsäure-Hexylester	1,7	1,7
Essigsäure-Heptylester	0,7	1,1
Essigsäure-Octylester	2,4	2,5
Essigsäure-Furfurylester	7,1	16
Essigsäure-2-Phenylethylester	548	499
Buttersäure-Ethylester	87	85
Hexansäure-Ethylester	161	148
Octansäure-Ethylester	240	244
Decansäure-Ethylester	55	65
Isovaleriansäure	n.a.	n.a.
Hexansäure	2609	3069
Octansäure	7053	7134
Nonansäure	24	26
Decansäure	1232	1502
Dodecansäure	91	75
alpha-Terpineol	Sp.	Sp.
Linalool	11	13
Nerol	4,8	5
gamma-Nonalacton	18	25

*Tabelle 102: Ergebnisse der Aminosäurenuntersuchungen für die Zeitpunkte „Beginn“ und „Ende“ Filtration*

<b>Aminosäure / mg/l</b>	<b>Anfang CMF</b>	<b>Ende CMF</b>
Asparaginsäure	17	22
Glutaminsäure	21	23
Asparagin	20	28
Serin	13	17
Glutamin	36	49
Histidin	16	19
Glycin	97	123
Threonin	24	30
Alanin	33	42
Arginin	206	274
gamma-Aminobuttersäure	81	101
Tyrosin	47	53
Valin	32	39
Methionin	6	8
Tryptophan	36	40
Phenylalanin	33	40
Isoleucin	14	18
Leucin	25	32
Lysin	3	2
AS Gesamt	760	960

Tabelle 103: Rohdaten für die Parameter „Hefeviabilität“ und „Hefevitalität“ beim RSF

Versuch	Hefeviabilität		Hefevitalität / ICP		Hefevitalität / PrA	
	Zulauf RSF	Austrag RSF	Zulauf RSF	Austrag RSF	Zulauf RSF	Hefebier
1	14,6	17,1	5,6	5,55	160	136
2	5,6	10,1	5,68	5,62	-	-
3	27,9	35,6	5,57	5,51	-	-
4	3,0	8,6	5,89	5,41	213	139

Tabelle 104: Verhalten der Bieraromastoffe bei verschiedenen Probenahmezeitpunkten

Bieraromastoffe [µg/l]	V1A	V1B	V2A	V2B	V4A	V4B
Hexanol-1	28	29	30	31	37	38
Heptanol-1	17	22	70	145	10	38
Octanol-1	27	28	11	10	33	36
Decanol-1	13	12	4,0	4,1	15	17
2-Phenylethanol	25924	26073	16678	20908	31780	32627
Furfurylalkohol	1398	n.a.	2312	2019	2493	2004
Essigsäure-Isobutylester	22	24	15	17	38	26
Essigsäure-Hexylester	2,6	2,4	1,2	1,3	3,8	3,0
Essigsäure-Heptylester	1,4	1,4	1,2	1,8	1,6	1,6
Essigsäure-Octylester	2,2	2,0	0,9	0,9	2,7	2,6
Essigsäure-Furfurylester	5,0	4,7	6,2	5,6	4,9	3,9
Essigsre-2-Phenylethylester	198	196	116	125	401	283
Buttersäure-Ethylester	137	152	56	80	240	165
Hexansäure-Ethylester	83	80	95	93	99	104
Octansäure-Ethylester	198	221	145	192	271	281
Decansäure-Ethylester	89	90	24	40	119	137
Isovaleriansäure	304	354	103	274	196	290
Hexansäure	377	410	1303	1677	141	307
Octansäure	2735	2709	2903	3980	984	2178
Nonansäure	17	17	9,1	12	7,1	13
Decansäure	1549	1524	414	609	663	1486
Dodecansäure	59	56	46	56	36	68
a-Terpineol	Sp.	Sp.	2,9	3,1	Sp.	Sp.
Linalool	2,5	2,4	4,0	4,0	3,5	4,0
Nerol	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
g-Nonalacton	28	28	18	21	29	26

Tabelle 105: Rohdaten der Verkostungen der Hefebiere

Aromaeindruck	1A	1B	2A	2B	3	4A	4B	Mittelwert 1	Mittelwert 2
grüner Apfel / stechend	2,7	3,7	6,0	1,5	5,7	2,3	3,7	4,2	2,9
käsigt / schweißig	2,7	2,3	3,0	3,5	1,7	3,0	2,7	2,6	2,8
fruchtig / blumig	2,3	2,0	1,5	2,0	1,3	1,3	2,3	1,6	2,1
süßlich	2,0	0,7	0,5	0,5	0,7	0,7	1,3	1,0	0,8
fruchtig / Eisbonbon	1,3	0,7	0,5	1,0	1,0	1,3	1,3	1,0	1,0
säuerlich	2,0	1,7	1,0	0,5	4,3	1,7	3,3	2,3	1,8
alkoholisch	2,3	2,3	2,5	2,5	4,3	3,0	4,0	3,0	2,9
lösungsmittel	1,7	2,3	4,0	1,5	3,0	6,0	2,7	3,7	2,2
erdig	3,7	2,7	2,5	3,5	3,7	2,0	3,3	3,0	3,2
Bittere	8,0	6,7	6,0	6,0	6,3	8,0	7,0	7,1	6,6

*Tabelle 106: Verhalten der Ausbeute und der Hefetrockensubstanz bei RSF-Zualuf und –Austrag*

	<b>Ausbeute</b>	<b>TrS Zulauf</b>	<b>TrS Austrag</b>
gültige Fälle	4	4	4
Mittelwert	56,275	8,375	14,675
Std.Fehler des MW	11,08485265	1,218862174	0,65748891
Varianz	491,4958333	5,9425	1,729166667
Std.Abweichung	22,16970531	2,437724349	1,31497782
Variationskoeffizient	0,393953004	0,291071564	0,089606666
rel. V.koeffizient(%)	19,6976502	14,5535782	4,480333287
Schiefe	-0,568177284	0,10006658	0,995019629
Kurtosis	-1,282273357	-1,867709687	-0,792854464
Minimum	26,7	6,3	13,7
Maximum	73,5	11	16,6
Spannweite	46,8	4,7	2,9
Summe	225,1	33,5	58,7
1. Perzentil	----	----	----
5. Perzentil	----	----	----
10. Perzentil	----	----	----
25. Perzentil	32,975	6,3	13,775
Median	62,45	8,1	14,2
75. Perzentil	73,4	10,725	16,05
90. Perzentil	----	----	----
95. Perzentil	----	----	----
99. Perzentil	----	----	----
geom. Mittelwert	52,21093062	8,108252127	14,63287948

Tabelle 107: Aromastoffe des verwendeten VZNLs

<b>Aromastoffe in mg/l</b>	<b>VZNL</b>
Acetaldehyd	6,4
Propanol-1	6,1
Ethylacetat	4,8
2-Methylpropanol	8,2
3-Methylbutanol	25,5
2-Methylbutanol	8,1
2-Methylpropylacetat	Sp.
Buttersäureethylester	0,0
3-Methylbutylacetat	0,6
2-Methylbutylacetat	0,1
Hexansäureethylester	0,1
<b>Aromastoffe in µg/l</b>	
Hexanol-1	11
Heptanol-1	4,3
Octanol-1	10
Decanol-1	3,2
2-Phenylethanol	9992
Furfurylalkohol	1094
Essigsäure-Isobutylester	32
Essigsäure-Hexylester	3,0
Essigsäure-Heptylester	3,2
Essigsäure-Octylester	4,4
Essigsäure-Furfurylester	5,4
Essigsre-2-Phenylethylester	222
Buttersäure-Ethylester	55
Hexansäure-Ethylester	122
Octansäure-Ethylester	186
Decansäure-Ethylester	37
Isovaleriansäure	37
Hexansäure	607
Octansäure	1963
Nonansäure	6,2
Decansäure	486
Dodecansäure	47
α-Terpineol	Sp.
Linalool	15
Nerol	1,2
γ-Nonalacton	13

Tabelle 108: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Biere A–C

Aromastoffe in µg/l	A	B	C
Hexanol-1	24	20	19
Heptanol-1	3,8	4,3	3,3
Octanol-1	15	26	n.a.
Decanol-1	5,6	7,4	7,1
2-Phenylethanol	30471	18898	19545
Furfurylalkohol	n.a.	n.a.	n.a.
Essigsäure-Isobutylester	92	63	63
Essigsäure-Hexylester	12	16	12
Essigsäure-Heptylester	2,5	3,9	2,4
Essigsäure-Octylester	3,9	5,0	4,3
Essigsäure-Furfurylester	4,8	7,1	6,7
Essigsäure-2-Phenylethylester	1346	885	892
Buttersäure-Ethylester	128	106	107
Hexansäure-Ethylester	246	233	225
Octansäure-Ethylester	296	258	254
Decansäure-Ethylester	57	44	49
Isovaleriansäure	247	200	206
Hexansäure	2243	1316	1557
Octansäure	5539	4495	4770
Nonansäure	25	21	21
Decansäure	726	518	568
Dodecansäure	n.a.	n.a.	n.a.
α-Terpineol	4,6	n.a.	3,6
Linalool	19	23	17
Nerol	2,3	2,2	1,9
γ-Nonalacton	29	31	36
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	12	14	14
2-Furfural	40	36	33
5-Methyl-Furfural	6,0	6,1	6,5
Benzaldehyd	0,7	0,7	0,8
2-Phenyl-Ethanal	7,3	8,4	8,8
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,0	1,4	1,1
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	16	16	16
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,8	1,5	2,3
2-Acetyl-Furan	n.a.	7,8	8,1
2-Propionyl-Furan	9,0	6,2	9,1
gamma-Nonalacton	39	48	45
Summe der Wärmeindikatoren	79	83	78
Summe der Sauerstoffindikatoren	20	23	24
Summe der Alterungskomponenten	116	130	129
<b>Konzentrationen in mg/l</b>			
Acetaldehyd	8,2	10,9	11,4
Propanol-1	15,7	15,5	15,6
Ethylacetat	25,4	21,3	23,3
2-Methylpropanol	15,1	12,3	12,8
3-Methylbutanol	54,9	51,4	52,9
2-Methylbutanol	16,1	14,0	14,6
2-Methylpropylacetat	0,08	0,05	0,06
Buttersäureethylester	0,11	0,10	0,10
3-Methylbutylacetat	3,8	2,8	2,9
2-Methylbutylacetat	0,27	0,18	0,20
Hexansäureethylester	0,28	0,24	0,25

**Tabelle 109: Varianzanalytische Auswertung der Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	B	A	C
<b>B</b>	4,283854167	----	0,151894206	0,151894206
<b>A</b>	4,286458333	nein	----	0,151894206
<b>C</b>	4,37109375	nein	nein	----

**Untermenge 1:** B  
A  
C

**Tabelle 110: Varianzanalytische Auswertung der Verkostungsergebnisse der Versuchsreihe A–C im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	B	A
<b>C</b>	1,340625	----	0,254109023	0,254109023
<b>B</b>	1,359375	nein	----	0,254109023
<b>A</b>	1,40625	nein	nein	----

**Untermenge 1:** C  
B  
A

Tabelle 111: Würzearomastoffe der Sudreihen 1–3

Würzearomastoffe / µg/l	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Sud 6	Sud 7	Sud 8	Sud 9	Sud 10	Sud 11	Sud 12	Sud 13	Sud 14	Sud 15
3-me-Butanal	62	55	63	61	58	55	54	71	62	60	63	n.a.	66	57	64
2-me-Butanal	20	18	21	21	18	20	19	24	21	22	19	n.a.	22	19	18
Methional	108	103	91	87	99	86	84	37	34	116	85	n.a.	89	80	69
Benzaldehyd	2,6	2,5	2,6	2,3	2,2	2	2	3	3	2	3,6	n.a.	3,5	3	3
2-Phenylethanal	146	143	144	138	141	146	146	179	170	144	142	n.a.	139	136	159
<b>Σ Streckeraldehyde</b>	340	322	322	308	319	310	305	313	289	344	313	n.a.	320	295	313
Pentanal	4,1	3,8	4,2	3,7	3,6	3,9	3,3	4,4	3,8	3,2	4,7	n.a.	4,6	3,8	3,9
2-Pentanon	2,1	2	2,1	2,1	2,2	2,4	2,3	3,4	3,2	1,9	1,2	n.a.	1,6	1,6	0,5
Hexanal	9,3	8	9,4	8,2	6,8	6,0	6,4	8,1	6,7	6,5	9,9	n.a.	9,4	7,3	6,8
Heptanal	2	2	2,1	2,2	1,1	1,0	1,0	1,3	1,1	1,1	1,2	n.a.	1,2	1	1
tr,2-cis,6-Nonadienal	Sp.	Sp.	0,8	0,5	0,7	2,0	2,1	2,3	2,0	2,3	0,5	n.a.	Sp.	Sp.	Sp.
2-Furfural	186	170	146	142	145	143	141	174	155	145	135	n.a.	140	128	147
2-ac-Furan	0,9	0,8	1,1	1,1	1,1	3,4	2,5	5,3	5,3	1,8	1,1	n.a.	3,7	3,3	3,4
γ-Nonalacton	14	15	13	13	4,1	7,3	7,6	5,1	4,8	5,1	6,4	n.a.	5,8	6,5	5,1
3-me-Butanol	3095	3200	2581	5603	16	3132	2538	4889	4461	17	3091	n.a.	4125	3826	7,5
2-me-Butanol	774	796	656	663	5,8	799	645	1286	1169	6	1104	n.a.	1497	1389	2,3
1-Pentanol	9,9	11,5	10	8,7	6,7	n.a.	7,0	8,5	6,8	5,9	n.a.	n.a.	6,1	8,1	7,3
1-Hexanol	10	10	11,7	10	6,1	6,3	6,1	7,9	6,2	4,3	10,9	n.a.	9	7	6,1
1-Octanol	1,9	1,5	1,6	1,5	0,4	0,3	0,0	1,2	1,1	0,7	1,1	n.a.	1	0,9	1
1-Octen-3-ol	0,9	0,8	0,8	0,8	0,5	0,5	0,4	0,7	0,6	0,3	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Phenylethanol	1392	1373	1102	1115	121	1489	1368	1984	1858	126	2914	n.a.	3294	3220	69

Tabelle 112: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Sudreihen 1–3

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Sud 6	Sud 7	Sud 8	Sud 9	Sud 10	Sud 11	Sud 12	Sud 13	Sud 14	Sud 15
Alkohol (%vol)	5,48	5,73	5,88	6,00	6,01	5,77	5,83	6,09	6,05	6,08	5,68	5,85	5,82	5,84	6,04
Stammwürze (%)	12,06	12,35	12,58	12,82	12,95	12,29	12,47	12,89	12,87	12,80	12,03	12,57	12,38	12,49	12,93
Vs (%)	85,6	87,3	87,8	87,8	87,0	88,5	87,9	88,7	88,2	89,2	89,1	87,4	88,5	87,9	87,6
Es (%)	1,74	1,57	1,53	1,56	1,68	1,42	1,51	1,46	1,52	1,38	1,31	1,58	1,43	1,51	1,60
Ew (%)	3,74	3,63	3,65	3,72	3,84	3,5	3,61	3,65	3,70	3,57	3,37	3,69	3,53	3,62	3,78
pH - Wert	4,73	4,72	4,66	4,7	4,67	4,70	4,70	4,75	4,74	4,77	4,78	4,81	4,72	4,74	4,72
Farbe (EBC)	6,0	6,1	6,3	6,5	6,5	5,4	5,5	5,6	5,6	5,5	5,4	5,4	5,4	5,5	5,6
Anthocyanogene (mg/l)	65	67	78	79	89	47	51	52	56	51	50	61	61	66	65
Gesamtpolyphenole (mg/l)	179	174	177	178	207	162	169	164	171	177	178	192	181	189	202
Bitterstoffe (EBC)	23	28	21	26	26	22	20	19	22	26	20	21	22	23	26
FAN (mg/l)	107	102	95	102	132	96	110	108	115	117	89	123	112	123	122
Schaumzahl (NIBEM)	213	213	217	210	254	229	204	186	219	249	237	182	178	180	232
SO <sub>2</sub> (mg/l)	5	4	3	3	5	2	3	3	3	3	2	5	5	5	6
Anzahl der Warmlage	12	7	7	8	5	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15	> 15	14	12	10

Tabelle 113: Bieraromastoffe der Sudreihen 1–3

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Sud 6	Sud 7	Sud 8	Sud 9	Sud 10	Sud 11	Sud 12	Sud 13	Sud 14	Sud 15
<b>Bieraromastoffe / µg/l</b>															
Hexanol-1	8,0	20,0	31,0	34,0	25,0	24,0	23,0	22,0	19,0	23,0	25,0	21,0	19,0	19,0	22,0
Heptanol-1	1,6	4,4	4,5	2,9	3,3	4,4	4,0	4,8	3,9	4,8	7,3	6,6	8,0	7,4	3,5
Octanol-1	1,7	14,0	14,0	18,0	16,0	16,0	16,0	16,0	17,0	19,0	15,0	15,0	13,0	13,0	11,0
Decanol-1	5,6	4,4	3,8	5,3	3,6	6,3	5,1	6,1	7,4	7,9	5,7	7,0	4,1	4,2	3,7
2-Phenylethanol	21466,0	20458,0	24705,0	25867,0	18371,0	23323,0	20802,0	23404,0	23204,0	23167,0	25395,0	20987,0	21998,0	20243,0	18789,0
Furfurylalkohol	n.a.	861,0	980,0	856,0	979,0	1119,0	925,0	925,0	666,0	n.a.	557,0	522,0	537,0	608,0	679,0
Essigsäure-Isobutylester	44,0	78,0	95,0	88,0	77,0	53,0	59,0	64,0	59,0	67,0	77,0	65,0	70,0	74,0	79,0
Essigsäure-Hexylester	12,0	12,0	14,0	12,0	10,0	10,0	12,0	11,0	11,0	13,0	16,0	14,0	14,0	13,0	14,0
Essigsäure-Heptylester	2,5	4,9	3,7	2,4	2,3	3,2	3,1	2,5	2,7	2,5	3,4	3,6	8,2	7,3	2,9
Essigsäure-Octylester	3,4	2,5	3,6	3,0	4,0	3,2	4,6	3,3	4,1	3,3	3,4	3,6	4,5	4,0	3,7
Essigsäure-Furfurylester	3,1	6,9	5,9	6,3	4,8	4,7	5,2	5,0	4,6	4,2	5,0	5,1	5,2	5,2	5,6
Essigsäure-2-Phenylethylester	771,0	820,0	945,0	827,0	794,0	794,0	819,0	874,0	891,0	920,0	1028,0	888,0	972,0	908,0	944,0
Buttersäure-Ethylester	85,0	132,0	148,0	148,0	148,0	105,0	120,0	126,0	106,0	117,0	116,0	108,0	121,0	129,0	148,0
Hexansäure-Ethylester	288,0	313,0	280,0	268,0	295,0	271,0	245,0	239,0	215,0	222,0	255,0	287,0	288,0	285,0	322,0
Octansäure-Ethylester	359,0	293,0	341,0	386,0	297,0	288,0	287,0	339,0	297,0	352,0	344,0	333,0	307,0	321,0	360,0
Decansäure-Ethylester	46,0	37,0	54,0	66,0	51,0	60,0	53,0	67,0	71,0	69,0	53,0	55,0	47,0	52,0	61,0
Isovaleriansäure	238,0	669,0	983,0	940,0	1361,0	563,0	544,0	542,0	472,0	1233,0	373,0	375,0	363,0	413,0	530,0
Hexansäure	694,0	1764,0	2390,0	2651,0	2419,0	1756,0	1813,0	1981,0	1519,0	2120,0	1878,0	1829,0	1713,0	1891,0	2328,0
Octansäure	5599,0	5292,0	5854,0	6974,0	5402,0	5334,0	5089,0	5788,0	5175,0	6898,0	6761,0	6515,0	5639,0	5998,0	6452,0
Nonansäure	16,0	17,0	13,0	19,0	14,0	15,0	13,0	16,0	18,0	23,0	20,0	23,0	18,0	18,0	3,9
Decansäure	838,0	577,0	688,0	920,0	685,0	577,0	457,0	586,0	658,0	931,0	640,0	579,0	502,0	558,0	636,0
Dodecansäure	35,0	47,0	39,0	48,0	48,0	21,0	27,0	31,0	14,0	22,0	30,0	24,0	37,0	34,0	50,0
α-Terpineol	5,7	9,9	10,0	10,0	7,6	3,8	3,9	4,5	3,0	3,4	5,3	4,3	5,2	4,4	4,6
Linalool	12,0	24,0	23,0	24,0	20,0	18,0	18,0	20,0	14,0	17,0	24,0	22,0	22,0	17,0	18,0
Nerol	2,2	0,9	n.a.	n.a.	n.a.	3,0	3,2	3,4	3,1	2,5	2,8	2,6	2,0	2,4	2,3
γ-Nonalacton	35,0	38,0	31,0	39,0	31,0	26,0	28,0	26,0	27,0	28,0	28,0	29,0	25,0	25,0	26,0
2-Methyl-Butanal	6,3	5,1	5,6	6,2	5,3	n.a.									
3-Methyl-Butanal	10	7,4	8,4	8,5	11	10	13	11	10	9,1	11	12	n.a.	11	14
2-Furfural	46	38	41	40	40	43	46	40	32	38	29	31	n.a.	31	45
5-Methyl-Furfural	5,4	5,9	5,8	6,8	4,5	5	6	5	4,6	6,7	4,6	4,9	n.a.	4,5	5,6
Benzaldehyd	Sp.	0,3	Sp.	Sp.	Sp.	0,4	0,5	0,4	0,4	n.a.	0,5	0,5	n.a.	0,4	0,5
2-Phenyl-Ethanal	5,1	4,9	5,5	5,5	5,7	8,1	8,9	9,3	8,7	10	7,9	8,4	n.a.	7,1	10
Bernsteinsäure-Diethylester	2	2,4	2,5	2,4	1,3	1	0,9	1,1	0,9	n.a.	3,1	3,4	n.a.	3,8	1,2
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	9	15	13	14	13	16	17	17	14	19	15	16	n.a.	15	21
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,8	1	0,9	0,9	0,6	1,1	1,1	1,1	0,9	1,3	0,8	0,9	n.a.	0,9	0,9
2-Acetyl-Furan	3,2	3	2,5	5	2,6	3,7	4	3,4	2,9	6,4	3,3	3,2	n.a.	3,1	3,7
2-Propionyl-Furan	2,2	2,2	2,4	Sp.	Sp.	1	1,1	0,5	0,7	Sp.	0,9	0,9	n.a.	1	1,3
gamma-Nonalacton	28	34	41	45	36	30	31	29	30	33	27	28	n.a.	27	35
Σ der Wärmeindikatoren	7,4	7,2	8,2	8,4	7,6	7,3	7,6	6,9	6,3	7,1	5,7	6,0	n.a.	5,8	7,9
Σ der Sauerstoffindikatoren	15	13	14	14	17	19	22	21	19	19	19	21	n.a.	18	25
Σ der Alterungskomponenten	103	100	110	113	102	103	111	101	92	105	89	94	n.a.	89	116
<b>Bieraromastoffe / mg/l</b>															
Acetaldehyd	7,7	3,4	2,8	1,6	6,4	4,8	6,1	5,5	5,5	3,4	3,1	8,1	9,7	7,4	8,3
Propanol-1	16,1	16,5	18,6	18,9	17,5	13,5	14,0	13,9	14,8	14,2	13,0	12,4	13,6	12,7	12,2
Ethylacetat	36,1	31,2	36	37,4	36,8	17,6	21,3	25,6	26,3	29,8	19,4	19,3	23,0	24,6	27,0
2-Methylpropanol	10,3	11,2	12,1	12,9	9,7	10,0	9,0	9,7	8,5	9,5	11,7	9,6	10,0	9,9	9,4
3-Methylbutanol	39,6	43,2	45,7	47,4	44,8	40,9	39,4	40,5	38,9	42,1	41,5	39,4	41,6	40,3	40,3
2-Methylbutanol	12,2	13,2	14	14,3	12,7	11,6	11,0	11,7	11,0	11,9	12,9	11,7	12,0	12,0	11,8
2-Methylpropylacetat	0,07	0,07	0,08	0,08	0,07	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,14	0,15	0,15	0,16	0,15	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	2,8	2,9	3,2	3,2	3	1,9	2,1	2,4	2,4	3,0	2,4	2,3	2,6	2,7	3,2
2-Methylbutylacetat	0,25	0,23	0,27	0,25	0,24	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Hexansäureethylester	0,36	0,34	0,32	0,32	0,31	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3

Tabelle 114: Ergebnisse der DLG-Verkostung der Sudreihen 1–3

Sud 1			Sud 2			Sud 3			Sud 4			Sud 5		
Verkoster	frisch	gem. Note forciert												
1		4,2	1	1	4,4	1	1	4,4	1	1	4,3	1	1	4,4
2		4,5	2	2	4,3	2	2	4,2	2	2	4,2	2	2	4,4
3		4,1	3	3	4,4	3	3	4,6	3	3	4,4	3	3	4,1
4		4,6	4	4	4,3	4	4	3,7	4	4	4,2	4	4	4,7
5		4,0	5	5	4,0	5	5	4,0	5	5	3,8	5	5	4,4
6		4,8	6	6	4,8	6	6	4,8	6	6	4,3	6	6	5,0
7		4,2	7	7	4,2	7	7	4,1	7	7	4,4	7	7	4,1
8		4,0	8	8	4,1	8	8	3,5	8	8	3,6	8	8	3,3
9		4,1	9	9	4,1	9	9	4,0	9	9	3,6	9	9	4,4
10		4,9	10	10	4,5	10	10	4,8	10	10	4,5	10	10	4,0
Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,2	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,4
StaAbw		0,32	StaAbw		0,23	StaAbw		0,43	StaAbw		0,34	StaAbw		0,37
Konf.Int.		0,2	Konf.Int.		0,2	Konf.Int.		0,3	Konf.Int.		0,2	Konf.Int.		0,3

Sud 6			Sud 7			Sud 8			Sud 9			Sud 10		
Verkoster	frisch	gem. Note forciert												
1		4,1	1	1	4,0	1	1	4,0	1	1	4,0	1	1	4,6
2		4,0	2	2	4,0	2	2	4,0	2	2	4,1	2	2	4,1
3		4,5	3	3	4,0	3	3	4,0	3	3	3,9	3	3	4,4
4		4,1	4	4	4,3	4	4	4,3	4	4	4,1	4	4	4,2
5		4,2	5	5	4,0	5	5	4,3	5	5	4,1	5	5	4,4
6		5,0	6	6	4,7	6	6	5,0	6	6	5,0	6	6	5,0
7		5,0	7	7	5,0	7	7	5,0	7	7	5,0	7	7	5,0
Mittelwert		4,4	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,4	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,5
StaAbw		0,42	StaAbw		0,39	StaAbw		0,45	StaAbw		0,54	StaAbw		0,35
Konf.Int.		0,4	Konf.Int.		0,4	Konf.Int.		0,4	Konf.Int.		0,5	Konf.Int.		0,3

Sud 11			Sud 12			Sud 13			Sud 14			Sud 15		
Verkoster	frisch	gem. Note forciert												
1		4,0	1	1	4,0	1	1	4,3	1	1	4,3	1	1	4,4
2		4,6	2	2	4,7	2	2	5,0	2	2	4,4	2	2	4,5
3		4,1	3	3	4,2	3	3	4,1	3	3	4,3	3	3	4,6
4		4,8	4	4	4,7	4	4	4,5	4	4	4,4	4	4	4,4
5		4,3	5	5	4,1	5	5	4,1	5	5	4,2	5	5	4,4
6		4,3	6	6	4,5	6	6	4,4	6	6	4,3	6	6	4,3
7		4,5	7	7	4,1	7	7	4,4	7	7	4,5	7	7	4,5
Mittelwert		4,4	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,4	Mittelwert		4,3	Mittelwert		4,4
StaAbw		0,30	StaAbw		0,29	StaAbw		0,32	StaAbw		0,11	StaAbw		0,12
Konf.Int.		0,3	Konf.Int.		0,3	Konf.Int.		0,3	Konf.Int.		0,1	Konf.Int.		0,1



Tabelle 116: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–D

Konzentration / µg/l	A	B	C	D
Hexanol-1	41	37	26	23
Heptanol-1	7,9	8,1	9	4,4
Octanol-1	19	21	16	17
Decanol-1	10	10	8	7,9
2-Phenylethanol	18494	15683	15669	10321
Furfurylalkohol	1556	1434	1238	1302
Essigsäure-Isobutylester	39	33	30	25
Essigsäure-Hexylester	10	9,5	5	6,9
Essigsäure-Heptylester	2,7	2,8	2	2,5
Essigsäure-Octylester	4,8	4,2	2	3,8
Essigsäure-Furfurylester	8,0	6,4	4	16
Essigsre-2-Phenylethylester	352	315	378	250
Buttersäure-Ethylester	97	102	77	68
Hexansäure-Ethylester	142	138	117	124
Octansäure-Ethylester	217	233	218	171
Decansäure-Ethylester	22	27	19	18
Isovaleriansäure	208	181	742	712
Hexansäure	1681	1408	1338	1162
Octansäure	4757	4359	4738	4295
Nonansäure	16	16	14	12
Decansäure	285	327	240	295
Dodecansäure	n.a.	20	28	30
a-Terpineol	16	14	12	10
Linalool	34	31	25	30
Nerol	2,1	2,0	1	2,8
g-Nonalacton	28	28	42	31
2-Methyl-Butanal	24	18	8,9	15
3-Methyl-Butanal	16	17	21	13
2-Furfural	79	98	89	55
5-Methyl-Furfural	7,7	6,7	6,1	6,5
Benzaldehyd	0,9	0,9	Sp.	Sp.
2-Phenyl-Ethanal	13	14	14	11
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	2,4	1,7	1,5	2,6
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	14	12	11	12
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	1,1	0,8	0,8	0,6
2-Acetyl-Furan	6,7	6,3	6,1	5,6
2-Propionyl-Furan	5,0	4,3	Sp.	3,3
gamma-Nonalacton	29	26	31	31
Summe der Wärmeindikatoren	108	124	120	86
Summe der Sauerstoffindikatoren	30	32	34	23
Summe der Alterungskomponenten	161	176	167	128

Tabelle 117: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–D

Parameter	A	B	C	D
Stammwürze (GG-%)	11,77	11,84	11,55	11,5
Stammwürze (GV-%)	12,31	12,38	12,06	12,01
Alkohol (GV-%)	5,2	5,34	4,97	5,16
scheinbarer Extrakt (GG-%)	1,97	1,76	2,2	1,77
wirklicher Extrakt (GG-%)	3,85	3,7	3,98	3,62
Vergärungsgrad wirklich (%)	68,6	70,1	81,6	85,2
Vergärungsgrad scheinbar (%)	83,9	85,7	66,7	69,6
FAN (mg/100ml)	11,9	12,6	14,1	12,5
FAN (bez. 12 GG-%) (mg/100ml)	12,1	12,8	2,1	1,8
Bittereinheiten (EBC)	26	27	21	19
Gesamtpolyphenole (mg/l)	193	156	204	180
Gesamtpolyphenole (bez. 12 GG-%)	197	158	203	180
Anthocyanogene (mg/l)	61	48	73	66
Anthocyanogen (bez. 12 GG-%) (mg/l)	62	49	72	66
Schwefeldioxid (mg/l)	0,2	0,2	0,4	1,3
Schaum (NIBEM) (Sec.)	274	269	236	229
Warmtage (Forciertest)	2,9	6,6	-	-

Tabelle 118: Ergebnisse des Triangeltests der Versuchsreihe A und B (links) und der paarweisen Vergleichsprüfung der Versuchsreihe C und D (rechts)

Gesamtanzahl der Ergebnisse Anzahl der richtigen Ergebnisse Anzahl der falschen Ergebnisse	<b>frisch</b>	Prüfung auf Bevorzugung		<b>signifikant</b>
	<b>6</b>	Anzahl der Prüfer	10	
	<b>1</b>	Anzahl der Nennungen für Bier D	8	
Berechnung nach $\chi^2$ -Methode	<b>0,1875</b>	Tabellenwert (p = 0,95)	8	
	Signifikanztest	<b>nicht signifikant</b>		

Tabelle 119: gaschromatographische Analysendaten des zudosierten Prozessbieres

Bieraromastoffe [µg/l]	Prozessbier	Alterungsindikatoren in µg/l	Prozessbier	Konzentrationen in mg/l	Prozessbier
Hexanol-1	17	2-Methyl-Butanal	n.a.	Acetaldehyd	6,5
Heptanol-1	5,1	3-Methyl-Butanal	13	Propanol-1	15,5
Octanol-1	31	2-Furfural	14	Ethylacetat	22,5
Decanol-1	12	5-Methyl-Furfural	6,0	2-Methylpropanol	12,8
2-Phenylethanol	27725	Benzaldehyd	1,1	3-Methylbutanol	50,2
Furfurylalkohol	416	2-Phenyl-Ethanal	7,6	2-Methylbutanol	18,2
Essigsäure-Isobutylester	43	Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	2,7	2-Methylpropylacetat	0,0
Essigsäure-Hexylester	3,3	Nicotinsäure-Ethyl-Ester	7,1	Buttersäureethylester	0,1
Essigsäure-Heptylester	1,1	Phenylelessigsäure-Ethyl-Ester	1,7	3-Methylbutylacetat	1,3
Essigsäure-Octylester	3,6	2-Acetyl-Furan	6,5	2-Methylbutylacetat	0,1
Essigsäure-Furfurylester	2,4	2-Propionyl-Furan	18	Hexansäureethylester	0,2
Essigsre-2-Phenylethylester	438	gamma-Nonalacton	22		
Buttersäure-Ethylester	73	Summe der Wärmeindikatoren	37		
Hexansäure-Ethylester	116	Summe der Sauerstoffindikatoren	22		
Octansäure-Ethylester	154	Summe der Alterungskomponenten	93		
Decansäure-Ethylester	34				
Isovaleriansäure	51				
Hexansäure	664				
Octansäure	2969				
Nonansäure	11				
Decansäure	434				
Dodecansäure	9,3				
a-Terpineol	2,6				
Linalool	3,3				
Nerol	n.a.				
g-Nonalacton	28				

Tabelle 120: gaschromatographische Ergebnisse der Biere A–D

Aromastoff / µg/l	A	B	C	D
Hexanol-1	15	16	14	17
Heptanol-1	5,2	4,8	4,9	5,6
Octanol-1	20	21	20	22
Decanol-1	8,5	10	9,3	11
2-Phenylethanol	36136	31751	31095	32436
Furfurylalkohol	447	541	453	510
Essigsäure-Isobutylester	82	67	61	64
Essigsäure-Hexylester	8,3	8,0	7,5	7,8
Essigsäure-Heptylester	3,2	3,4	3,4	3,0
Essigsäure-Octylester	4,8	5,9	5,2	6,0
Essigsäure-Furfurylester	13	13	11	13
Essigsäure-2-Phenylethylester	855	731	703	739
Buttersäure-Ethylester	109	107	104	109
Hexansäure-Ethylester	224	222	218	220
Octansäure-Ethylester	348	342	312	321
Decansäure-Ethylester	47	46	46	46
Isovaleriansäure	440	539	402	481
Hexansäure	1327	1530	1233	1458
Octansäure	6208	6496	5873	6353
Nonansäure	24	24	22	22
Decansäure	600	622	576	647
Dodecansäure	15	11	12	12
a-Terpineol	5,6	6,0	5,8	5,6
Linalool	6,1	6,3	6,4	5,9
Nerol	1,7	1,6	1,5	1,3
g-Nonalacton	28	31	28	31
Acetaldehyd	2,6	3,1	3,0	3,2
Propanol-1	14	13	13	14
Ethylacetat	27	27	29	30
2-Methylpropanol	19	15	14	13
3-Methylbutanol	55	51	51	50
2-Methylbutanol	19	16	16	15
2-Methylpropylacetat	0,1	0,1	0,1	0,1
Buttersäureethylester	0,1	0,1	0,1	0,1
3-Methylbutylacetat	3,1	2,9	2,9	2,9
2-Methylbutylacetat	0,3	0,3	0,3	0,2
Hexansäureethylester	0,3	0,3	0,3	0,3
3-Methyl-Butanal	7,8	7,2	7,4	7,0
2-Furfural	107	95	75	91
5-Methyl-Furfural	5,5	5,5	5,2	5,2
2-Phenyl-Ethanal	12	11	10	11
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester (A)	1,9	2,2	2,1	2,4
2-Acetyl-Furan	8,4	7,0	7,5	7,7
2-Propionyl-Furan	2,9	2,8	2,9	3,1
gamma-Nonalacton	43	42	39	42
Summe der Wärmeindikatoren	149	137	114	134
Summe der Sauerstoffindikatoren	20	19	18	19
Summe der Alterungskomponenten	188	173	150	171

**Tabelle 121: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	B	D	A
C	4,279166667	----	0,124500339	0,124500339	0,124500339
B	4,3	nein	----	0,124500339	0,124500339
D	4,3	nein	nein	----	0,124500339
A	4,304166667	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: C  
B  
D  
A

**Tabelle 122: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	B	D	A
C	3,720833333	----	0,698194706	0,698194706	0,698194706
B	3,741666667	nein	----	0,698194706	0,698194706
D	3,741666667	nein	nein	----	0,698194706
A	3,785416667	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: C  
B  
D  
A

**Tabelle 123: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	A	B	C	D
A	1,685	----	0,687535663	0,687535663	0,687535663
B	1,89	nein	----	0,687535663	0,687535663
C	1,95	nein	nein	----	0,687535663
D	2,025	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: A  
B  
C  
D

Tabelle 124: Rotated Component Matrix

	Component		
	1	2	3
Hexanol-1	-2,521E-02	,904	,427
Heptanol-1	2,997E-02	,215	,976
Octanol-1	-,349	,822	,450
Decanol-1	-,629	,665	,403
2-Phenylethanol	,925	-,160	,345
Furfurylalkohol	-,242	,940	-,241
Essigsäure-Isobutylester	,989	-,112	,101
Essigsäure-Hexylester	,963	,270	2,375E-02
Essigsäure-Heptylester	-,107	-,301	-,948
Essigsäure-Octylester	-,541	,840	3,422E-02
Essigsäure-Furfurylester	,604	,760	,241
Essigsäure-2-Phenylethylester	,951	-,138	,276
Buttersäure-Ethylester	,621	,530	,578
Hexansäure-Ethylester	,961	,273	-5,292E-02
Octansäure-Ethylester	,912	,321	-,254
Decansäure-Ethylester	,917	-,351	,192
Isovaleriansäure	,107	,954	-,281
Hexansäure	7,108E-02	,993	-9,655E-02
Octansäure	,305	,951	-3,895E-02
Nonansäure	,654	,413	-,634
Decansäure	-2,129E-02	,894	,448
Dodecansäure	,781	-,490	,386
alpha-Terpineol	-,270	,279	-,922
Linalool	-,229	-,431	-,873
Nerol	,758	-,288	-,586
gamma-Nonalacton	-,271	,962	4,308E-02
Acetaldehyd	-,824	,566	1,790E-02
Propanol-1	,595	-,101	,798
Ethylacetat	-,766	-1,492E-02	,642
2-Methylpropanol	,963	-,270	-1,884E-02
3-Methylbutanol	,931	-,362	-4,073E-02
2-Methylbutanol	,953	-,303	-2,823E-02
2-Methylpropylacetat	,917	-,351	,192
Buttersäure-Ethylester	-,356	,464	,811
Isoamylacetat	,951	-,223	,215
2-Methylbutylacetat	,739	-,505	-,446
Hexansäure-Ethylester	,917	-,351	,192
3-Methylbutanal	,733	-,666	-,140
2-Furfural	,897	-,438	-6,817E-02
5-Methylfurfural	,831	,256	-,494
Benzaldehyd	-,168	,417	-,893
2-Phenylethanal	,931	,250	,265
Bernsteinsäure-Diethylester	-,686	,658	,310
2-Acetylfuran	,631	-,471	,617
2-Propionylfuran	-,300	,112	,947
gamma-Nonalacton	,787	,557	,264
Summe Wärme	,893	,409	,187
Summe Sauerstoff	,931	,250	,265
Summe Alterung	,966	-,232	,117
lag-time	,951	-,220	,216
ARV	,277	-,522	,806
ARP	-,945	-8,042E-02	,316
Reduktionsvermögen	,343	-,917	,204
Stabilitätsindex	,645	-,446	,620
Schaum	,460	,422	,781
Geruch A	-,704	,508	,497
Geschmack A	-,917	,351	-,192
Bittere A	-,961	-,273	5,292E-02
Akzeptanz	,965	-,254	6,768E-02

Extraction Method: Principal Component Analysis. Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

a Rotation converged in 5 iterations.

Tabelle 125: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–C und H–J

Parameter	A	B	C	H	I	J
Stammwürze / mas.-%	11,66	11,69	11,67	11,80	11,92	11,95
Alkohol / Vol.-%	4,74	4,58	4,45	3,94	4,47	3,87
scheinb. Extrakt / mas.-%	2,76	3,11	3,34	4,44	3,55	4,73
scheinb. Vergärungsgrad / %	77,2	74,3	72,3	63,4	71,1	61,4
pH-Wert	4,35	4,48	4,61	4,4	4,53	4,72
Farbe / EBC	4,5	5,3	5,3	4,7	5,0	5,3
FAN / mg/l	92,8	97,4	102,5	133,6	148,0	166,5
BE / EBC	36,9	39,5	42,0	31,0	41,0	46,0
Schaum NIBEM / s	258	270	282	307	292	304
lag-time / min	47	34	47	86	96	88
ARV / %	91	90	91	96	96	97
ARP / %	63	66	67	54	63	65
Reduktionsvermögen / %	26	30	30	27	29	30
Stabilitäts-Index / %	54	54	57	62	67	66

Tabelle 126: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier A–C

Bieraromastoffe / µg/l	A1	A2	B1	B2	C1	C2
Hexanol-1	18	19	20	20	19	19
Heptanol-1	3	4	4	4	3	4
Octanol-1	12	14	16	17	14	15
Decanol-1	4	5	6	5	4	4
2-Phenylethanol	27493	26013	29341	23679	22415	24990
Furfurylalkohol	615	588	759	547	627	551
Essigsäure-Isobutylester	30	28	35	24	23	25
Essigsäure-Hexylester	5	5	6	5	5	5
Essigsäure-Heptylester	1	1	1	1	1	1
Essigsäure-Octylester	4	6	6	6	5	6
Essigsäure-Furfurylester	4	4	5	5	3	4
Essigsre-2-Phenylethylester	455	429	571	377	360	406
Buttersäure-Ethylester	72	76	81	74	65	70
Hexansäure-Ethylester	228	243	250	246	215	226
Octansäure-Ethylester	205	236	262	239	189	213
Decansäure-Ethylester	43	54	63	56	42	46
Isovaleriansäure	191	208	163	174	99	135
Hexansäure	1874	1843	2060	1905	1960	1943
Octansäure	4407	4714	5296	5203	4709	4832
Nonansäure	10	12	13	13	11	11
Decansäure	523	680	810	823	671	687
Dodecansäure	69	201	277	289	175	205
a-Terpineol	3,6	3,8	3,9	4,3	3,8	3,6
Linalool	12	12	11	11	13	11
Nerol	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
g-Nonalacton	28	31	32	34	28	28
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	25	22	23	25	25	23
2-Furfural	112	97	91	73	63	69
5-Methyl-Furfural	5,6	5,5	5,2	5,2	5,5	5,2
Benzaldehyd	0,8	0,8	1,1	0,7	0,7	0,7
2-Phenyl-Ethanal	9,4	9,3	11	10	10	9,3
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	2,2	1,4	1,8	1,8	1,7	2,0
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	10	10	11	10	9	11
Phenylessigsäure-Ethyl-Ester	0,8	0,8	0,9	0,8	0,9	0,9
2-Acetyl-Furan	5,1	4,9	4,6	4,5	4,3	4,3
2-Propionyl-Furan	2,4	2,3	2,3	2,5	2,4	2,4
gamma-Nonalacton	34	34	32	32	30	30
Summe der Wärmeindikatoren	147	132	123	104	93	99
Summe der Sauerstoffindikatoren	35	32	35	36	35	33
Summe der Alterungskomponenten	198	179	173	155	143	147

Tabelle 127: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier H–J

Bieraromastoffe / µg/l	H1	H2	I1	I2	J1	J2
Hexanol-1	14	12	16	14	14	15
Heptanol-1	2,6	2,3	3,3	3,6	4,0	4,2
Octanol-1	13	12	12	12	12	13
Decanol-1	3,6	3,4	3,7	4,1	3,6	3,6
2-Phenylethanol	15928	20344	20104	20393	18104	14718
Furfurylalkohol	652	446	592	629	580	464
Essigsäure-Isobutylester	28	40	36	41	36	20
Essigsäure-Hexylester	5,4	6,8	6,4	6,9	6,5	4,4
Essigsäure-Heptylester	1,6	2,0	2,8	2,3	3,2	2,3
Essigsäure-Octylester	6,7	8,8	7,6	7,6	7,9	6,7
Essigsäure-Furfurylester	6,2	7,6	5,9	6,4	6,1	7,4
Essigsäure-2-Phenylethylester	461	647	610	669	588	335
Buttersäure-Ethylester	56	75	79	89	76	47
Hexansäure-Ethylester	134	187	217	224	189	135
Octansäure-Ethylester	132	189	240	266	241	139
Decansäure-Ethylester	35	35	48	42	52	28
Isovaleriansäure	35	118	178	300	105	53
Hexansäure	1612	1557	2094	2098	1947	1420
Octansäure	3590	3723	5026	5023	5289	4218
Nonansäure	8,9	8,4	11	11	12	11
Decansäure	422	340	529	381	633	530
Dodecansäure	42	61	127	92	182	140
α-Terpineol	3,2	2,7	2,9	2,6	2,7	3,0
Linalool	10	10	11	10	11	9,4
Nerol	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
γ-Nonalacton	24	24	25	25	26	24
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	20	21	22	22	14	14
2-Furfural	94	109	78	69	66	67
5-Methyl-Furfural	4,7	4,9	5,2	4,9	4,0	4,9
Benzaldehyd	0,9	0,6	0,8	0,6	0,6	0,9
2-Phenyl-Ethanal	11	11	11	10	13	13
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,4	1,6	1,8	2,1	1,3	1,5
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	7,9	9,0	10	8,7	10	10
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,7	0,8	1,0	1,0	0,8	0,9
2-Acetyl-Furan	8,7	7,0	6,6	6,4	5,4	6,4
2-Propionyl-Furan	1,9	2,0	2,1	2,0	1,8	2,0
γ-Nonalacton	25	26	26	25	22	24
Summe der Wärmeindikatoren	119	135	104	94	88	91
Summe der Sauerstoffindikatoren	33	33	34	33	28	28
Summe der Alterungskomponenten	169	184	155	144	129	135

Tabelle 128: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im frischen Zustand

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	B	A
C	4,152083333	----	0,297287128	0,297287128
B	4,19375	nein	----	0,297287128
A	4,254166667	nein	nein	----

Untermenge 1: C  
B  
A

**Tabelle 129: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	B forciert	C forciert	A forciert
<b>B forciert</b>	3,8	----	0,716496346	0,716496346
<b>C forciert</b>	3,81875	nein	----	0,716496346
<b>A forciert</b>	3,845833333	nein	nein	----

**Untermenge 1:** B forciert  
C forciert  
A forciert

**Tabelle 130: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–C im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	A forciert	B forciert	C forciert
<b>A forciert</b>	1,815	----	0,456007728	0,456007728
<b>B forciert</b>	2,02	nein	----	0,456007728
<b>C forciert</b>	2,175	nein	nein	----

**Untermenge 1:** A forciert  
B forciert  
C forciert

**Tabelle 131: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	I	J	H
<b>I</b>	4,114583333	----	0,260929399	0,260929399
<b>J</b>	4,133333333	nein	----	0,260929399
<b>H</b>	4,6	ja	ja	----

**Untermenge 1:** I  
J

**Untermenge 2:** H

**Tabelle 132: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	J forciert	I forciert	H forciert
<b>J forciert</b>	3,616666667	----	0,612202974	0,612202974
<b>I forciert</b>	3,722916667	nein	----	0,612202974
<b>H forciert</b>	3,964583333	nein	nein	----

**Untermenge 1:** J forciert  
I forciert  
H forciert

**Tabelle 133: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere H–J im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	H forciert	I forciert	J forciert
<b>H forciert</b>	1,68	----	0,323017609	0,323017609
<b>I forciert</b>	1,975	nein	----	0,323017609
<b>J forciert</b>	2,085	ja	nein	----

**Untermenge 1:** H forciert

**Untermenge 2:** I forciert  
J forciert

**Tabelle 134: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere D–F und K–M**

Parameter	D	E	F	K	L	M
Stammwürze / mas.-%	11,57	11,56	11,6	11,72	11,83	11,86
Alkohol / Vol.-%	4,88	4,9	4,94	4,91	5,06	5,05
scheinb. Extrakt / mas.-%	2,4	2,34	2,3	2,49	2,31	2,37
scheinb. Vergärungsgrad / %	80	80,5	80,9	79,5	81,2	80,8
pH-Wert	4,21	4,32	4,4	4,31	4,48	4,57
Farbe / EBC	4,9	4,8	5,6	4,8	4,5	4,5
FAN / mg/l	81,8	82,9	86,2	114,6	133,4	134,8
BE / EBC	36,1	38,4	39,4	39,0	43,0	43,0
Schaum NIBEM / s	272	259	263	321	277	288
lag-time / min	31	35	36	61	41	57
ARV / %	89	89	89	93	91	93
ARP / %	60	58	58	58	57	58
Reduktionsvermögen / %	27	28	27	24	26	26
Stabilitäts-Index / %	50	51	51	56	52	56

Tabelle 135: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier D–F

Bieraromastoffe / µg/l	D1	D2	E1	E2	F1	F2
Hexanol-1	21	21	20	21	22	22
Heptanol-1	3,4	3,1	3,3	3,4	3,6	3,8
Octanol-1	11	11	12	13	15	14
Decanol-1	5,0	4,9	4,8	4,4	5,4	5,2
2-Phenylethanol	26512	27363	27461	27846	28960	28843
Furfurylalkohol	857	794	785	702	714	739
Essigsäure-Isobutylester	38	38	37	37	37	37
Essigsäure-Hexylester	6,6	6,4	6,3	6,3	6,5	6,5
Essigsäure-Heptylester	1,7	1,7	1,6	1,6	1,7	1,6
Essigsäure-Octylester	4,9	4,5	4,5	4,3	4,6	4,9
Essigsäure-Furfurylester	5,5	5,1	5,0	5,0	5,8	5,1
Essigsäure-2-Phenylethylester	547	534	525	518	541	532
Buttersäure-Ethylester	88	86	86	87	89	90
Hexansäure-Ethylester	246	242	239	238	243	245
Octansäure-Ethylester	290	283	322	306	370	374
Decansäure-Ethylester	83	79	89	76	98	99
Isovaleriansäure	81	79	92	82	103	103
Hexansäure	2251	2165	2340	2439	2722	2693
Octansäure	5542	5475	6329	6312	7471	7385
Nonansäure	14	14	16	15	19	18
Decansäure	954	906	984	937	1165	1182
Dodecansäure	126	73	76	109	130	153
α-Terpineol	4,2	3,9	3,5	3,8	3,9	3,9
Linalool	13	13	13	12	13	13
Nerol	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
γ-Nonalacton	31	31	30	30	31	30
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	15	12	11	12	15	12
2-Furfural	94	89	83	81	79	77
5-Methyl-Furfural	5,1	5,0	5,9	5,1	5,2	5,2
Benzaldehyd	0,9	1,4	1,0	1,0	1,0	0,8
2-Phenyl-Ethanal	11	10	9	10	10	9,4
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,5	1,4	1,7	1,7	1,8	1,6
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	12	9	10	11	10	12
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,9	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9
2-Acetyl-Furan	4,8	4,5	4,5	4,4	4,3	4,3
2-Propionyl-Furan	1,9	2,0	2,2	1,9	2,2	1,8
gamma-Nonalacton	35	35	34	34	32	32
Summe der Wärmeindikatoren	129	124	117	115	110	109
Summe der Sauerstoffindikatoren	26	24	21	23	25	22
Summe der Alterungskomponenten	169	162	154	152	150	145

Tabelle 136: Ergebnisse der gaschromatographischen Untersuchungen der Bier K–M

Bieraromastoffe / µg/l	K1	K2	L1	L2	M1	M2
Hexanol-1	17	16	18	20	20	20
Heptanol-1	3,3	3,1	5,0	5,3	6,7	6,4
Octanol-1	18	18	21	19	25	23
Decanol-1	8,0	8,2	8,2	8,2	9,7	8,5
2-Phenylethanol	20704	21327	22553	22863	22680	22412
Furfurylalkohol	712	744	637	727	800	732
Essigsäure-Isobutylester	25	25	23	27	23	23
Essigsäure-Hexylester	4,2	4,2	4,1	4,6	4,2	4,0
Essigsäure-Heptylester	1,4	1,4	1,4	1,6	1,5	1,3
Essigsäure-Octylester	5,9	5,9	4,1	5,3	5,8	4,0
Essigsäure-Furfurylester	6,2	5,8	4,7	5,8	5,7	5,2
Essigsäure-2-Phenylethylester	411	420	408	446	413	388
Buttersäure-Ethylester	66	67	64	73	64	63
Hexansäure-Ethylester	169	172	164	185	166	159
Octansäure-Ethylester	232	226	282	335	355	338
Decansäure-Ethylester	52	48	68	89	89	84
Isovaleriansäure	65	58	118	147	171	166
Hexansäure	1666	1706	1861	2305	2226	2159
Octansäure	4024	4063	5240	6018	6515	6096
Nonansäure	14	13	18	20	23	21
Decansäure	522	473	712	932	1064	924
Dodecansäure	47	47	25	39	38	23
α-Terpineol	2,7	2,9	2,7	3,3	3,4	3,6
Linalool	12	12	12	12	12	11
Nerol	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
γ-Nonalacton	26	26	27	27	27	26
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	19	18	17	17	17	15
2-Furfural	137	136	112	112	64	57
5-Methyl-Furfural	5,3	5,6	5,5	5,5	5,3	5,0
Benzaldehyd	0,8	1,1	0,8	0,8	0,9	0,8
2-Phenyl-Ethanal	12	12	11	11	9	10
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,3	1,4	1,7	1,7	1,5	2,1
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	12	12	12	12	11	10
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0
2-Acetyl-Furan	6,3	6,3	6,0	6,0	5,0	5,3
2-Propionyl-Furan	1,9	2,0	1,9	1,9	2,0	1,8
gamma-Nonalacton	25	27	26	26	24	23
Summe der Wärmeindikatoren	162	162	138	138	88	80
Summe der Sauerstoffindikatoren	32	31	29	29	28	26
Summe der Alterungskomponenten	210	210	183	183	130	121

Tabelle 137: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im frischen Zustand

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	F	D	E
F	4,233333333	----	0,20568011	0,20568011
D	4,314583333	nein	----	0,20568011
E	4,397916667	nein	nein	----

Untermenge 1: F  
D  
E

**Tabelle 138: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	E forciert	F forciert	D forciert
<b>E forciert</b>	3,847916667	----	0,62077553	0,62077553
<b>F forciert</b>	3,927083333	nein	----	0,62077553
<b>D forciert</b>	3,947916667	nein	nein	----

**Untermenge 1:** E forciert  
F forciert  
D forciert

**Tabelle 139: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere D–F im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	D forciert	E forciert	F forciert
<b>D forciert</b>	1,81	----	0,515867521	0,515867521
<b>E forciert</b>	2,085	nein	----	0,515867521
<b>F forciert</b>	2,12	nein	nein	----

**Untermenge 1:** D forciert  
E forciert  
F forciert

**Tabelle 140: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	M	L	K
<b>M</b>	4,14	----	0,345163828	0,345163828
<b>L</b>	4,206666667	nein	----	0,345163828
<b>K</b>	4,358333333	nein	nein	----

**Untermenge 1:** M  
L  
K

**Tabelle 141: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	M forciert	L forciert	K forciert
<b>M forciert</b>	3,606666667	----	0,792746276	0,792746276
<b>L forciert</b>	3,74	nein	----	0,792746276
<b>K forciert</b>	3,778333333	nein	nein	----

**Untermenge 1:** M forciert  
L forciert  
K forciert

**Tabelle 142: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere K–M im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	K forciert	L forciert	M forciert
<b>K forciert</b>	1,925	----	0,375572498	0,375572498
<b>L forciert</b>	1,9825	nein	----	0,375572498
<b>M forciert</b>	2,125	nein	nein	----

**Untermenge 1:** K forciert  
L forciert  
M forciert

Tabelle 143: Ergebnisse der gaschromatographischen, flüssigkeitschromatographischen und sensorischen Untersuchungen der Versuchsreihen A–H

Aromastoff / µg/l	A	B	C	D	E	F	G	H
Hexanol-1	13	14	11	12	13	11	12	12
Heptanol-1	3,2	3,6	2,8	3,1	3,3	2,8	3,3	3,3
Octanol-1	13	11	13	17	13	16	12	14
Decanol-1	7,3	6,4	6,1	9,4	5,9	7,1	6,9	7,9
2-Phenylethanol	29556	26095	40581	37271	34653	37061	33318	31669
Furfurylalkohol	5363	5721	2197	2401	2523	2037	2230	2693
Essigsäure-Isobutylester	55	49	67	57	59	56	48	55
Essigsäure-Hexylester	2,3	2,2	2,7	2,5	2,9	2,6	2,4	2,8
Essigsäure-Heptylester	0,9	1	1	1,1	1	1	1,3	1,2
Essigsäure-Octylester	3,8	3,5	4	3,4	3,8	4,5	3,2	3,4
Essigsäure-Furfurylester	14	12	5,7	5,3	6,6	8	6,1	7,7
Essigsäure-2-Phenylethylester	710	603	850	770	713	743	600	633
Buttersäure-Ethylester	98	97	86	86	93	89	87	97
Hexansäure-Ethylester	226	224	207	186	223	183	208	212
Octansäure-Ethylester	206	206	156	158	170	192	182	189
Decansäure-Ethylester	47	45	27	25	34	42	35	37
Isovaleriansäure	365	326	n.a.	n.a.	171	235	107	132
Hexansäure	1899	2162	1478	1729	1889	1653	1655	1957
Octansäure	3370	3457	3274	4029	3593	3716	3566	4248
Nonansäure	17	20	15	16	7,6	8,7	8	9,2
Decansäure	649	720	480	554	642	550	678	692
Dodecansäure	80	98	62	46	66	33	62	43
a-Terpineol	Sp.	Sp.	1,4	1,5	Sp.	Sp.	1,7	Sp.
Linalool	8,3	9,3	5,7	6,4	8,4	6,9	8,9	9,2
Nerol	13	15	13	11	17	15	n.a.	n.a.
g-Nonalacton	15	15	25	25	21	20	21	19
5-Methyl-Furfural	3	2,9	3,6	3,7	4,2	3,7	3,5	4,1
2-Phenyl-Ethanal	3,9	4	4,5	4,7	3,7	3,5	5	4,9
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,7	1,9	3,3	3,34	2,7	1,9	2,1	2,9
2-Acetyl-Furan	8	7,8	11	8,6	7,1	8,2	8	8,3
gamma-Nonalacton	13	13	23	21	19	17	19	18
3-Methyl-Butanal	7	9,4	9,2	9,1	9,2	10	9,5	8,7
2-Furfural	48	57	83	72	88	76	82	53
5-Methyl-Furfural	4	4,9	4,4	3,8	6,7	7,3	4,7	4,9
2-Phenyl-Ethanal	6,9	7,3	5,9	7,2	5,5	6,5	7,1	7
Nicotinsäure-Ethylester (f)	4,2	6	7,9	9,4	8,1	7,1	6,9	6,9
Phenyllessigsäure-Ethylester (f)	0,5	0,8	0,8	0,8	0,9	0,7	0,8	1
2-Acetyl-Furan (f)	11	12	13	11	10	12	9,6	9,2
gamma-Nonalacton (f)	19	19	26	26	26	24	24	21
Asparaginsäure	3	5	5	5	6	8	6	15
Glutaminsäure	5	8	9	9	10	9	10	18
Asparagin	3	3	4	4	5	4	5	8
Serin	4	4	3	2	3	4	6	8
Glutamin	3	5	3	5	4	4	4	12
Histidin	8	11	18	18	20	21	21	24
Glycin	31	39	40	43	39	41	44	52
Threonin	10	13	18	19	16	17	15	16
Alanin	9	15	20	19	18	26	20	26
Arginin	56	80	59	98	94	105	97	126
gamma-Aminobuttersäure	37	41	49	50	55	57	39	43
Thyrosin	29	39	35	37	42	46	40	46
Valin	17	27	18	20	21	23	31	36
Tryptophan	24	30	34	33	33	38	29	32
Phenylalanin	16	26	14	18	17	20	26	34
Isoleucin	4	7	4	4	4	4	7	11
Leucin	7	12	6	7	6	6	10	18
Lysin	3	5	5	6	13	13	10	12
Geruch	4,4	4,1	4,5	4,5	4,2	4,3	4,4	4,3
Trunk	4,4	4,4	4,1	4,3	4,2	4,3	4,3	4
Vollmundigkeit	4,5	4,3	4,2	4,4	4,3	4,3	4,4	4,3
Rezenz	4,4	4,4	4,3	4,3	4,4	4,4	4,5	4,5
Bittere	4,3	4,1	4,2	4,3	4,2	4,3	4,3	4,3
gemittelte Note	4,4	4,2	4,3	4,4	4,2	4,3	4,3	4,3

Tabelle 144: Varimax Faktorladungen der Versuchsreihen A–G

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Kommunalität
Isoleucin	0,950661131	0,185444441	0,221187534	0,032480159	-0,024105841	-0,07983885	-0,072315541	1
Leucin	0,923957954	0,250007647	0,251572579	0,135301744	-0,041276212	0,011859824	-0,027474211	1
Glutamin	0,914553703	0,115803167	0,113597641	-0,03564904	-0,052254922	0,291689692	0,220742223	1
Glutaminsäure	0,907482672	-0,164078706	0,016010819	-0,263527101	-0,122282017	0,111597341	0,229789324	1
Valin	0,896165915	0,100655281	0,209420259	-0,215092594	-0,060149555	-0,065737571	-0,298424305	1
Phenylalanin	0,89446633	0,239733038	0,236932104	-0,088253428	-0,065206768	0,044300493	-0,269444903	1
Asparaginsäure	0,889879724	0,073393558	-0,149380798	-0,308306133	-0,117961339	0,190084229	0,189014241	1
Glycin	0,872186138	-0,363615914	-0,017900117	-0,207761629	-0,126792128	0,206647864	-0,072108007	1
Serin	0,871694984	0,306726152	0,000171009	-0,192961554	0,216194614	-0,233609023	-0,085633937	0,999813727
Asparagin	0,848959991	-0,159843227	0,04803562	-0,387938161	0,07662201	0,039038303	0,307339285	1
Essigsäure-Heptylester	0,686829685	-0,436570031	0,20110871	-0,244456237	0,254371285	-0,065207801	-0,406162308	0,996456601
Arginin	0,667191566	-0,084326129	0,089033575	-0,546751562	-0,108297316	0,459276542	-0,136262313	1
Trunk	-0,647568816	0,415410927	0,104961881	0,17537469	0,08392383	0,217658225	-0,556052466	0,997297546
Alanin	0,590998012	-0,319751085	-0,449791958	-0,454611032	-0,286411042	0,219587456	-0,098628384	1
Decansäure-Ethylester	-0,039108882	0,971655721	0,024558271	-0,038074109	0,003244301	-0,134967328	-0,187287687	1
Octansäure-Ethylester	0,113881106	0,945717644	0,090283983	0,049476936	0,048384225	-0,078073838	-0,272614557	1
gamma-Nonalacton	-0,048880861	-0,944469175	-0,254786325	-0,099423539	-0,00644699	0,13822186	0,109836738	1
Essigsäure-Furfurylester	-0,186146615	0,901802385	0,123290704	0,347374645	0,095728143	-0,087238013	-0,003990858	1
Buttersäure-Ethylester	0,21589558	0,844723238	0,350948729	0,118329109	-0,045478536	-0,038091755	0,314504285	0,999767263
Threonin	0,144004054	-0,804644364	-0,295257951	-0,185018727	-0,299855304	0,346210767	0,033353622	1
2-Phenylethanol	-0,18709082	-0,741987153	-0,572766286	-0,208048934	0,004932058	0,087208881	0,188854582	1
Furfurylalkohol	-0,186787601	0,716229631	0,376713007	0,546649956	-0,030028467	-0,095935624	-0,039262095	1
Hexansäure	0,195394499	0,653703255	0,648645246	0,144726869	-0,252244608	0,162540353	0,058062562	1
Rezenz	0,506814457	0,581465299	0,276021196	-0,395745476	0,19137698	-0,286120949	-0,231836885	1
Heptanol-1	0,249661012	0,343610632	0,875061054	0,111279449	-0,098991827	-0,102516344	-0,149321535	1
Hexanol-1	-0,145607593	0,491363327	0,816369795	0,211240538	-0,152457757	-0,058718753	0,002171496	1
Essigsäure-Octylester	-0,446211385	0,238072232	-0,734827397	-0,250841632	-0,302066625	0,044761289	0,185603804	0,986372407
Decansäure	0,401332305	0,541135992	0,691039505	-0,113799672	0,077550461	-0,139882271	-0,174630232	1
Linalool	0,426057544	0,563183522	0,629838512	-0,183000119	0,034419521	-0,220929476	-0,146673228	1
Essigsäure-2-Phenylethylester	-0,477009793	-0,448192451	-0,571317162	0,160901456	-0,041874675	0,145670451	0,443703077	1
Dodecansäure	-0,303645563	0,355062773	0,547215525	0,477953966	-0,157362126	-0,476062887	-0,057233383	1
Nonansäure	-0,295593427	0,191253726	0,12512996	0,912775871	-0,110973983	0,109260332	-0,05388581	0,999927485
Lysin	0,351622374	-0,058262797	-0,06537981	-0,901362573	-0,215088912	0,102355191	0,013752713	1
Tyrosin	0,548385342	-0,032340399	-0,098657596	-0,637087685	-0,459947191	0,221559438	-0,150557807	1
Histidin	0,552780056	-0,503538297	-0,208333603	-0,612782646	-0,10641721	0,101576655	0,023470217	1
g-Aminobuttersäure	-0,28918794	-0,335484952	-0,345183009	-0,507791939	-0,495321421	0,371309455	0,210239481	1
gem. Note	-0,290375496	0,050386998	-0,137341843	0,169980322	0,860788855	0,22965348	-0,266578288	0,999375027
Bittere	0,301238463	-0,067832851	-0,304863867	-0,120941688	0,778022028	0,360766271	0,21690917	0,985434942
Vollmundigkeit	-0,174681979	0,380176633	0,337018856	-0,10162776	0,771784999	0,250622988	-0,185328565	0,991768622
Geruch	-0,184183256	-0,518219828	-0,313011461	0,387242862	0,666459004	-0,007910071	0,005960311	0,994674171
Tryptophan	0,069275588	-0,391288967	-0,493104776	-0,381201408	-0,593397602	0,319781277	-0,022716676	1
Octanol-1	-0,062606922	-0,27957709	-0,405977464	-0,176773882	0,164881423	0,829324968	0,085230919	1
Decanol-1	0,227362498	-0,17182077	0,014855471	0,208933049	0,453709664	0,803722019	-0,106050365	0,98815801
Octansäure	0,653096039	-0,119474633	0,096030931	-0,223744273	0,087286586	0,698092629	0,080832695	1
Hexansäure-Ethylester	-0,00436333	0,439536131	0,55883214	0,169341046	-0,015102282	-0,584702179	0,349369435	0,998344519
Essigsäure-Isobutylester	-0,243610986	-0,431525011	-0,485756008	0,098654216	-0,156873984	-0,038479108	0,695668121	1
Essigsäure-Hexylester	0,241051089	-0,381403774	-0,176416855	-0,545305515	-0,202079664	0,030144636	0,648214936	0,993982971

Tabelle 145: Rotated component matrix der Versuchsreihe „Dosage von Hefebieren im Kaltbereich“

	Faktor 1	Faktor 2	Faktor 3	Faktor 4	Faktor 5	Faktor 6	Faktor 7	Faktor 8
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	0,923698522	-0,171041137	-0,062176406	-0,215179865	0,13610967	0,000734273	-0,175383915	0,072248249
Heptanol-1	0,908665005	-0,185022087	-0,218898263	-0,021884394	-0,179782452	0,101019786	-0,011064054	-0,21998922
Hexanol-1	0,899520664	-0,310406184	0,120930406	-0,143581665	-0,128734794	0,08673153	0,059883792	-0,146644855
Decansäure-Ethylester	0,895087034	-0,182172956	0,063570248	-0,288000875	-0,177965135	0,108667399	0,123898331	-0,065504196
Octanol-1	0,880967147	-0,346589865	-0,249094207	-0,102927523	-0,060094484	0,071642516	-0,074968108	-0,068634143
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	0,867991544	-0,264604827	-0,060499115	-0,245574864	0,045668888	0,070712762	-0,24846415	-0,012723774
Benzaldehyd (S,A)	0,840493068	-0,21934663	0,033646921	-0,250323729	-0,204636842	0,073180547	-0,186681931	-0,165761479
Octansäure-Ethylester	0,836406339	-0,19789919	-0,490975062	-0,380781535	0,149718486	0,063269386	0,021748022	0,231555328
Summe der Alterungs-kompor	-0,816840926	0,05209684	0,071306304	0,192450867	-0,4275947	0,280575399	-0,061555836	0,018586724
2-Furfural (W,A)	-0,816142357	0,05620554	0,00028223	0,074300179	-0,43295055	0,317533402	-0,052258769	0,012440402
Isovaleriansäure	0,809263315	0,016148156	-0,1552737	0,409494231	-0,16235745	0,219225721	0,096931458	0,004738413
Summe der Wärmeindikatorer	-0,807946538	0,04862283	0,11308814	0,079138675	-0,44053003	0,321046505	-0,047432475	0,011638345
2-Phenyl-Ethanal (S,A)	-0,796654987	0,348802662	-0,207809289	0,073161827	-0,076587466	0,058815948	0,021896178	-0,290037432
2-Acetyl-Furan (A)	-0,729213916	0,290954549	-0,490975062	-0,102731413	-0,228275542	-0,096646338	-0,098042962	0,034839208
Ethylacetat	0,728987502	0,121601942	-0,288213022	-0,071458703	0,523883864	0,096420921	-0,271813207	-0,046610173
Essigsäure-Furfurylester	-0,722295828	0,491950834	-0,299365143	-0,032554368	-0,114459241	-0,0040384	0,148662358	-0,083916244
2-Phenylethanol	0,676358052	-0,248173302	0,56190857	-0,222894803	0,060909249	0,126849194	-0,053892822	0,253857045
Decanol-1	0,655327471	-0,431499501	-0,338461646	-0,16514226	-0,246080442	0,304545934	0,161906968	-0,071750122
5-Methyl-Furfural (A)	0,636255885	-0,527134577	0,123807939	-0,026682237	-0,178090914	0,249833174	-0,172137544	0,13720302
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester (	0,596873186	-0,14631613	0,080746579	0,235688413	0,267322454	0,01007496	-0,066522739	0,427315394
2-Methylpropylacetat	-0,214150374	0,819283705	-0,024660989	0,001062194	0,07835494	0,075617578	-0,045775992	-0,108187544
Essigsäure-2-Phenylethylester	-0,326592651	0,818484675	0,204223938	-0,017916157	-0,132449329	-0,028720533	0,080941138	0,369648122
Essigsäure-Heptylester	-0,189264672	0,803432464	-0,20984992	0,027252424	0,255102431	-0,108327054	-0,02281754	-0,130753102
2-Methylbutylacetat	-0,415633774	0,761291856	-0,079329068	0,107080219	0,370406052	0,159436639	-0,077743362	-0,131504327
Essigsäure-Hexylester	-0,313890231	0,724743136	0,478697974	-0,123164679	0,063370962	-0,202087894	0,007148186	0,297170661
Essigsäure-Isobutylester	-0,432721905	0,72117071	0,396854922	-0,084595866	-0,147935005	-0,020345932	0,141681014	0,286007627
3-Methylbutylacetat	-0,054629142	0,72055011	-0,324355101	-0,053491618	0,559238982	0,123670929	-0,181803545	0,049025486
Essigsäure-Octylester	-0,529532305	0,581178197	-0,279440183	0,338905076	-0,031531403	-0,223796304	-0,087873891	-0,051082611
γ-Nonalacton (W,A)	-0,183791553	-0,04764847	0,923081366	0,053672192	-0,206642322	0,089028503	0,061530495	-0,007682015
Hexansäure-Ethylester	-0,109939538	0,195731854	0,892265197	0,126133259	0,121879618	-0,006509397	0,107461428	0,289553427
g-Nonalacton	0,525178584	-0,24945992	0,717070363	0,017128511	-0,083923793	0,039491412	0,156698038	-0,154166151
a-Terpineol	-0,182397865	-0,222873387	0,716418339	0,134295727	-0,079874814	-0,128639431	0,465660299	-0,169274033
2-Methylpropanol	0,219277466	0,209376826	0,71623856	-0,298329768	0,190897373	0,447331075	0,0636553	0,016920597
Buttersäure-Ethylester	-0,046579347	0,276483046	0,600348591	-0,306126459	0,295660313	-0,056248842	-0,043853906	0,550214045
Linalool	0,205875287	-0,367020596	0,557334301	-0,443812751	-0,041049287	0,21038373	0,135401247	0,176270075
Dodecansäure	-0,061479524	0,129873067	0,537834799	0,453328894	0,309407557	-0,289700767	0,039731718	-0,263111899
3-Methyl-Butanal (S,A)	-0,456303315	-0,04760934	-0,012089297	0,853248936	-0,13778699	-0,065303452	-0,066929098	0,123185776
Summe der Sauerstoffindikato	-0,598679115	0,05980107	-0,120409955	0,745383841	-0,172206252	-0,050000274	-0,051781268	-0,008011422
Acetaldehyd	-0,495558998	0,139870971	-0,07930548	0,74473	0,134538978	-0,209720677	-0,200006886	-0,184563302
2-Propionyl-Furan (A)	0,031058725	-0,235334927	0,410777887	0,58479384	0,01784433	-0,112887626	-0,153322583	0,055396405
Furfurylalkohol	-0,20187625	-0,13233055	0,296914862	-0,45026992	-0,242714546	0,240802975	0,44024071	0,167451863
Buttersäureethylacetat	-0,163396146	0,243713088	0,058159627	-0,123099371	0,87643418	0,109427693	-0,197259926	0,200257278
Hexansäureethylester	0,344088566	0,174981411	0,13662878	0,099988074	0,846349509	0,1608524	-0,082251289	-0,054667962
3-Methylbutanol-1	-0,208383857	-0,053701549	0,040719302	0,012859745	0,012741491	0,90817997	0,234569336	-0,005351361
2-Methylbutanol-1	0,326807957	-0,093594584	0,356640522	-0,198464474	0,26107634	0,775464883	0,162281416	-0,025067604
Propanol-1	0,161138021	0,061648641	-0,158918143	-0,499786613	0,101982654	0,755837305	0,038455286	-0,002476934
Octansäure	-0,304306543	0,186476817	0,282125557	-0,096516398	-0,037459795	0,128114074	0,854530893	0,030146342
Nonansäure	0,230177806	-0,260387427	-0,148502564	-0,274736191	-0,14656738	0,320785278	0,781009444	-0,027629797
Hexansäure	-0,593756241	0,247651786	0,265872892	0,05333765	-0,159720922	0,090016837	0,674464202	0,074849241
Decansäure	0,545012938	-0,201932437	0,296543869	-0,271975288	-0,153023957	0,09723889	0,643484015	-0,202866462

Tabelle 146: gaschromatographische Analysendaten der verwendeten Prozess- bzw. Hefebiere

Bieraromastoffe / µg/l	Prozessbier	Hefebier
Hexanol-1	17	29
Heptanol-1	4,9	6,7
Octanol-1	12	24
Decanol-1	4,5	5,5
2-Phenylethanol	20395	24466
Furfurylalkohol	1926	2716
Essigsäure-Isobutylester	31	24
Essigsäure-Hexylester	3,9	2,9
Essigsäure-Heptylester	1,9	1,3
Essigsäure-Octylester	2,1	2,0
Essigsäure-Furfurylester	4,6	7,2
Essigsäure-2-Phenylethylester	473	317
Buttersäure-Ethylester	100	128
Hexansäure-Ethylester	132	170
Octansäure-Ethylester	294	269
Decansäure-Ethylester	22	70
Isovaleriansäure	61	209
Hexansäure	2000	2166
Octansäure	4590	6485
Nonansäure	10	24
Decansäure	166	1529
Dodecansäure	8,9	46
a-Terpineol	Sp.	Sp.
Linalool	7,2	6,7
Nerol	Sp.	Sp.
g-Nonalacton	33	27
2-Methyl-Butanal	20	n.a.
3-Methyl-Butanal	6,0	7,8
2-Furfural	25	n.n.
5-Methyl-Furfural	4,7	4,5
Benzaldehyd	Sp.	0,6
2-Phenyl-Ethanal	5,5	4,6
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,4	0,9
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	10	4,0
Phenyllessigsäure-Ethyl-Ester	1,0	1,1
2-Acetyl-Furan	4,6	3,2
2-Propionyl-Furan	2,6	2,0
gamma-Nonalacton	23	17
Summe der Wärmeindikatoren	48	17
Summe der Sauerstoffindikatoren	11	13
Summe der Alterungskomponenten	74	41

*Tabelle 147: Ergebnisse der chemisch-technischen Untersuchungen der Biere A–D*

<b>Parameter</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Alkohol / Vol.-%	5,46	5,54	5,55	5,55
Stammwürze / mas.-%	11,88	12,06	12,09	12,09
VG <sub>s</sub> / %	87,2	87,1	87,0	87,0
Schaum NIBEM / s	275	271	276	259
Gesamt-N / mg/100 ml	75,2	74,2	73,5	74,4
koagulierbarer N / mg/100 ml	1,0	1,1	1,1	1,2
FAN / mg/100 ml	9,1	9,7	10,1	10,1
WT (0/40/0)	8,1	7,6	9,5	8,6
SO <sub>2</sub> / mg/l	0,3	0,2	0,1	0,1

**Tabelle 148: gaschromatographische Ergebnisse der Biere A–D**

<b>Bieraromastoffe / µg/l</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
Hexanol-1	25	25	24	25
Heptanol-1	3,7	3,6	4,3	4,6
Octanol-1	15	16	16	16
Decanol-1	5,9	6,8	6,7	6,7
2-Phenylethanol	29413	28400	26077	25980
Furfurylalkohol	3412	2815	2661	2604
Essigsäure-Isobutylester	51	45	31	33
Essigsäure-Hexylester	5,3	4,9	3,8	3,9
Essigsäure-Heptylester	2,4	2,3	2,1	2,2
Essigsäure-Octylester	4,5	4,4	3,6	3,8
Essigsäure-Furfurylester	12	11	8,8	9,2
Essigsre-2-Phenylethylester	673	581	432	459
Buttersäure-Ethylester	85	86	79	82
Hexansäure-Ethylester	257	253	227	235
Octansäure-Ethylester	303	316	262	270
Decansäure-Ethylester	58	68	57	57
Isovaleriansäure	73	94	88	82
Hexansäure	2571	2423	2147	2173
Octansäure	4854	5081	4566	4719
Nonansäure	13	16	16	16
Decansäure	542	680	623	619
Dodecansäure	20	20	17	15
a-Terpineol	2,4	3,0	4,2	3,4
Linalool	10	11	10	10
Nerol	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
g-Nonalacton	22	23	24	24
Acetaldehyd	4,9	5,9	8,6	8,2
Propanol-1	11	11	11	11
Ethylacetat	17	16	16	18
2-Methylpropanol	15	15	12	12
3-Methylbutanol	56	56	53	52
2-Methylbutanol	16	15	14	14
2-Methylpropylacetat	0,06	0,05	0,02	0,04
Buttersäureethylester	0,09	0,09	0,09	0,09
3-Methylbutylacetat	2,21	2,00	1,51	1,61
2-Methylbutylacetat	0,18	0,16	0,12	0,13
Hexansäureethylester	0,35	0,32	0,30	0,30
2-Methyl-Butanal	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
3-Methyl-Butanal	11	12	12	10
2-Furfural	103	100	79	71
5-Methyl-Furfural	4,6	5,0	4,9	5,4
Benzaldehyd	0,7	0,7	0,7	0,6
2-Phenyl-Ethanal	11	10	10	8,7
Bernsteinsäure-Diethyl-Ester	1,0	0,8	Sp.	1,0
Nicotinsäure-Ethyl-Ester	8,6	8,8	7,8	7,4
Phenylelessigsäure-Ethyl-Ester	0,7	0,7	0,7	0,6
2-Acetyl-Furan	5,0	5,5	5,1	4,7
2-Propionyl-Furan	2,7	2,4	2,7	2,1
gamma-Nonalacton	21	21	20	20
Summe der Wärmeindikatoren	123	121	100	91
Summe der Sauerstoffindikatoren	22	23	23	20
Summe der Alterungskomponenten	160	158	136	124

**Tabelle 149: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im frischen Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	D	A	B
C	4,33	----	0,176670588	0,176670588	0,176670588
D	4,343333333	nein	----	0,176670588	0,176670588
A	4,435	nein	nein	----	0,176670588
B	4,501666667	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: C  
D  
A  
B

**Tabelle 150: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	C	D	B	A
C	3,798333333	----	0,666810665	0,666810665	0,666810665
D	3,838333333	nein	----	0,666810665	0,666810665
B	3,896666667	nein	nein	----	0,666810665
A	3,918333333	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: C  
D  
B  
A

**Tabelle 151: Varianzanalyse für die Verkostungsnoten der Biere A–D im forciert gealterten Zustand (Alterungsverkostung)**

Kritische Mittelwert-Differenzen zwischen Gruppenpaaren (rechts oben) und Signifikanzwertung (links unten):

	(Mittelwert)	A	B	D	C
A	1,7325	----	0,394349475	0,394349475	0,394349475
B	1,8125	nein	----	0,394349475	0,394349475
D	1,9325	nein	nein	----	0,394349475
C	1,9575	nein	nein	nein	----

Untermenge 1: A  
B  
D  
C

**Tabelle 152: Zusammenstellung der Kosten und Erlöse für unterschiedliche Trockensubstanzgehalte in Überschusshefe**

	8%	9%	10%	11%	12%	Einheit
Investitionskosten	250.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00	250.000,00	€
kalkulatorische Kosten	35.000,00	35.000,00	35.000,00	35.000,00	35.000,00	€
Gesamtkosten	285.000,00	285.000,00	285.000,00	285.000,00	285.000,00	€
Kosten entgastes Wasser	1.000,00	667,00	500,00	182,00	0,00	€
jährliche Überschüsse	132.465,91	125.696,94	125.210,23	115.851,23	112.159,09	€/a
anfallende Hefemenge pro Jahr	15000	13333	12500	10909	10000	hl/a
anfallende Hefebiermenge pro Jahr	11591	9697	8523	6942	5909	hl/a
Wert Verkaufshefe pro Jahr	63.920,45	68.181,80	74.573,86	74.380,16	76.704,55	€/a
Wert Hefebier pro Jahr	92.727,27	77.575,74	68.181,82	55.537,19	47.272,73	€/a

**Tabelle 153: Auswertung der paarweisen Vergleichsprüfung für die Biere A–D**

Annahme, dass Prüfer für jede Antwort die gleiche Chance hat				Summe	
für die Bier gefundenes Ergebnis = N	8,00	5,00	3,00	16	
theoretisches Ergebnis = M	5,33	5,33	5,33		
d = N-M	2,67	-0,33	-2,33		
d2	7,11	0,11	5,44		
d2/M	1,33	0,02	1,02	2,38	nicht signifikant

Vergleich Präferenz Biere X und Y gegen keine Präferenz		
für die Bier gefundenes Ergebnis = N	13,00	3,00
theoretisches Ergebnis = M	8,00	8,00
d = N-M	5,00	-5,00
d2	25,00	25,00
d2/M	3,13	3,13

Summe	
16	
6,25	signifikant

Vergleich Präferenz Bier X oder Bier Y		
für die Bier gefundenes Ergebnis = N	8,00	5,00
theoretisches Ergebnis = M	6,50	6,50
d = N-M	1,50	-1,50
d2	2,25	2,25
d2/M	0,35	0,35

0,69	nicht signifikant
------	-------------------

*Tabelle 154: Zeiten und Stammwürzegehalte bei der Abtrennung des Vor- und Nachlaufs*

Vorlauf		Umstellen auf Nachlauf
Zeit	mas.-%	mas.-%
0	0,88	10,35
2,5	3,11	6,27
3,5	6,88	5,15
5	8,61	
9,5	11,74	
13	12,22	
0	1,04	
2	4,05	
4	7,67	
6	10,18	
13,5	12,49	
0	0,35	
2	1,91	
5	6,95	
8	10,29	
11	11,33	
12,5	12,01	
0	0,48	
3	4,74	
6	8,99	
8	10,68	
10,25	11,81	
12,5	12,04	

## Anlage 1: Postenaufstellung zur Dosage von Prozessbier in die Heißwürzeleitung

## Prozessbiertank

Der Behälter wird ausgeführt und gefertigt als Druckbehälter gemäß der Druckgeräterichtlinie und den entsprechenden AD-Merkblättern. Der Behälter wird zylindrisch stehend mit Klöpperböden nach DIN 28011 ausgeführt. Im unteren zylindrischen Bereich ist der Mannlochverschluss angebracht. Dieser wird dem Tankradius angeglichen und mit einem massiven Einschweißring versehen. Die Abtragung erfolgt über drei kräftige gekantete Edelstahlfüße in geschlossener Form, welche mit höhenverstellbaren Kugelkalotten versehen sind. Sämtliche Schweißnähte werden im WIG-Verfahren sauber und durchdrungen von innen und außen, Rohrnähte formiert ausgebildet. Die Nähte werden geglättet und produktseitig sauber verschliffen. Die Klöpperböden werden produktseitig fein verschliffen. Der gesamte Behälter ist gebeizt.

Werkstoff: 1.4301

Inhalt: ca. 50 hl

Spez. Gewicht des Lagermediums: 1,1 kg/dm<sup>3</sup>

Zul. Betriebsüberdruck: max. 2 bar

Anschlüsse:

Restablauf: 1 Gewindestutzen DN 25

1 Mannlochverschluss 340/440

Probenahme: 1 Gewindestutzen DN 10

Tauchhülse für Pt100

Spezialmuffe für Min/Max-Sonde

Armaturen: Reinigungs-Luft-Ventilkombination:

1 CIP Kugel DN 25 mit CIP-Rohr DN 32

1 Reinigungs-Luft-Ventil-Kombination DN 25

1 Probenahmeventil DN 10

Kühlmantel:

Im unteren zylindrischen Bereich wird eine Kühlzone angebracht

Anschlüsse für Kühlzone:

1 Zulaufstutzen DN 25

1 Rücklaufstutzen DN 25

2 Niveausonden

1 Temperatursonde

1 Scheibenventil

12 m Rohr DN 25 1.4404

9 Bogen 90 Grad 1.4404

8 Rohrschelle V2A

1 Kegelstutzen DN 32 1.4404

1 Nutmutter DN 32 1.4404

1 Reduzierstück DN 32/25 1.4404

2 Kegelstutzen DN 25 1.4404

2 Nutmuttern DN 25 1.4404

1 Spundventil federbelastet

6 m Vierkantrohr V2A

12 Schlüsselschrauben

12 Dübel Nylon

4 Endkappen V2A  
1 CO<sub>2</sub>-Druckminderer  
1 Verschraubung DN 25 1.4404  
1 T-Stück DN 25 1.4404  
1 Gewindestutzen DN 25 1.4404  
1 EPDM Dichtung für Verschraubung  
1 Manometer 0-2 bar  
3 Scheibenventile V4A hand  
2 Kegelstutzen DN 25 1.4404  
2 Gewindestutzen DN 25 1.4404

## Dosageleitung

1 Dosierpumpe Leistung: Q=3 m<sup>3</sup>/h, H = 3,0 bar  
1 Verschraubung DN 40 1.4404  
2 Reduzierungsstücke DN 40/25 1.4404  
1 Probenehmer pneumatisch 1.4404  
1 induktiver Durchflussmesser DN 25, 0-30 hl/h  
2 Flansche DN 25 1.4404  
2 EPDM Dichtungen für Flansch DN 25  
8 Schrauben  
8 Muttern  
8 U-Scheiben  
1 Druckaufnehmer (analog)  
1 T-Stück DN 25 1.4404  
1 Gewindestutzen DN 25 1.4404  
1 EPDM Dichtung für Verschraubung  
1 Regelventil pneumatisch  
2 Flansche DN 25 1.4404  
2 EPDM Dichtungen  
8 Schrauben  
8 Muttern  
8 U-Scheiben  
1 Tellerrückschlagventil  
1 Doppelsitzventil DN 100  
2 Reduzierungsstücke DN 100/25 1.4404  
1 Paneelplatte DN 100 1.4301  
6 m Rohr DN 65 1.4301  
2 Kalotteneinsatz, 1.4301, als Drehteil 70/65/20 mm  
2 Kalottenplatten rund mit Warze V2A  
1 Gewindestange L=1000 mm  
2 Muttern  
2 Hutmuttern  
3 Scheibenventile V4A hand  
2 Kegelstutzen DN 25 1.4404  
2 Nutmuttern  
60 m Rohr DN 25 1.4404  
20 Bogen 90 Grad DN 25 1.4404  
30 Rohrschellen V2A  
6 m Vierkantrohr V2A

30 m Vierkantrohr V2A  
30 Grundplatten V2A  
60 Schlüsselschrauben  
60 Dübel Nylon  
30 Endkappen V2A  
2 Anschlussnaht 1.4404 DN 100  
1 Scheibenventil V4A L/F DN 25

#### Heißwürzeleitung

1 induktiver Durchflussmesser DN 100  
2 Flansch DN 100 1.4404  
2 EPDM Dichtungen DN 100  
16 Schrauben  
16 Muttern  
16 U-Scheiben  
30 m Rohr DN 100 1.4404  
20 Bogen 90 Grad DN 100 1.4404  
2 Kleinflanschverbindungen DN 100 1.4404  
24 Rohrschellen V2A  
18 m Vierkantrohr V2A  
12 m Vierkantrohr V2A  
6 m Vierkantrohr V2A  
4 Grundplatten V2A  
16 Verbundankerstangen