

**Technische Universität München**  
**Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I und Getränketechnologie**

**Technologische Einflussnahme auf den Lipidabbau im Sinne  
einer Verbesserung der Geschmacksstabilität des Bieres**

Martina Ingeborg Gastl

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. rer. nat. Horst-Christian Langowski

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing., Dr.-Ing. habil. Werner Back
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl Wackerbauer, em.,  
Technische Universität Berlin
3. Univ.-Prof. Dr. rer. nat., Dr. agr. habil.,  
Dr. h. c. (Zonguldak Univ./Türkei) Harun Parlar

Die Dissertation wurde am 10. 10. 2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 30. 10. 2006 angenommen.

***Für Georg***

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit wurde unter Betreuung meines Doktorvaters Prof. Werner Back am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I in Freising/Weihenstephan erstellt. Meinem Doktorvater Prof. Werner Back möchte ich für die Überlassung des Themas und für die große Unterstützung bei der Durchführung und Gestaltung der Arbeit sowie das Vertrauen, dass er mir jederzeit entgegengebracht hat, ganz besonders danken.

Ich danke Prof. Horst-Christan Langowski für die zügige Durchführung meines Promotionsverfahrens. Ebenso danke ich Prof. Harun Parlar sowie Prof. Karl Wackerbauer, dass sie sich als Gutachter zur Verfügung gestellt haben.

Für die finanzielle Förderung der Arbeit bedanke ich mich bei der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft (Forschungsprojekt B 73).

Ebenso danke ich Prof. Ludwig Narziß für sein großes Interesse an meiner Arbeit und die fachlichen Gespräche sowie die Unterstützung durch sein wertvolles Fachwissen.

Des Weiteren danke ich meinem Betreuer Martin Zarnkow für seine Unterstützung und sein Interesse, an meinem Themengebiet.

Ganz besonders danke ich den Angestellten des GC/HPLC-Labors, die ich während meiner Zeit am Lehrstuhl kennen lernen durfte und die mich jederzeit nach Kräften unterstützt haben und somit maßgeblich am Gelingen dieser Arbeit beteiligt waren. Mein Dank gilt Doreen Beestehorn, Thomas Hadwiger, Markus Jakob, Michaela Marschmann und Thomas Schneider für die Sorgfalt bei den von Ihnen durchgeführten Analysen und das große Engagement.

Ich danke Steffi Gruner, Elisabeth Kiel, Daria Kraus und Saskia Marks für die Durchführung zahlreicher Malzanalysen sowie Monika Braasch und Johanna Trostl für die Durchführung zahlloser Versuche und für die immerwährend freundliche, aufmerksame und kompetente Betreuung meiner Studien- und Diplomarbeiten. Herzlich bedanke möchte ich mich auch bei Anton Pichlmeier und Gernot Berngruber für die Betreuung meiner Studien- und Diplomarbeiten sowie die oft tatkräftige Unterstützung und gute Zusammenarbeit bei meinen doch zahlreich durchgeführten Brauversuchen. Generell gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Institutes, die zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben, v. a. den Institutsmitarbeitern, die sich an den zahlreichen Verkostungen beteiligt haben. Ich danke allen Institutsmitgliedern und Mitdoktoranden, von denen mich die meisten auch schon während meiner Studienzeit begleitet haben, für die große Hilfsbereitschaft und Kollegialität sowie die zahlreichen Fachgespräche.

Ebenfalls ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei Dr. Ralf Mezger und Elmar Spieleder für die vielen gemeinsam durchgeführten Forschungsprojekte und die schöne wie erfolgreiche Zusammenarbeit in zahlreichen Gebieten. Besonders herzlichen Dank auch Dr. Torsten Dickel, Dr. Klaus Hartmann und Dr. Matthias

Keßler, mit denen ich eine sehr spannende und erfolgreiche Zeit am Lehrstuhl verbringen durfte. Die Zusammenarbeit mit Euch hat mir immer große Freude gemacht und euer hohes Engagement, die fachlichen Gespräche und nicht zu vergessen der persönliche Beistand haben mir eine schöne und mit Sicherheit unvergessliche Zeit beschert. Dafür möchte ich Euch ganz herzlich danken!

Ebenfalls ein großes Dankeschön an Felix Burberg, Stefan Hanke, Dr. Christina Schönberger und Dr. Frithjof Thiele für ihre Unterstützung in meiner Arbeit, die vielen fachlichen Diskussionen sowie für die schöne Zeit auch außerhalb der Forschungsarbeit. Grundsätzlich danke ich allen Laborleitern, insbesondere meinem Kollegen Dr. Markus Herrmann und Dr. Stefan Kreis, sowie den ehemaligen Laborleitern für Ihre Unterstützung, weiterhin Dr. Martin Krottenthaler sowie Dr. Achim Zürcher für ihre fachlichen Ratschläge und die kollegiale Zusammenarbeit.

Ebenso gilt mein Dank auch meinen Studien- und Diplomarbeitern/innen Berthlinde Boltner, Sandra Geiger, Anke Kießlich, Heiko Grimm, Martin Gaßner, Hideaki Matsuo, Roman Ott, Stefan Sauter, Florian Schüll, Huna Song und Thomas Reiter für die interessante Zeit, in denen ich sie betreut habe und die Mühe, die sie sich bei der Erstellung ihrer Arbeiten gegeben haben.

Auch möchte ich mich noch bei der Staatsbrauerei Weihenstephan, dem Hofbrauhaus Freising, der Firma Hopsteiner und bei allen beteiligten Brauereien und Mälzereien für Ihr Interesse an meiner Arbeit, das Vertrauen und die Unterstützung bedanken. Auch bei der Brauerei Suntory, insbesondere bei Herrn Hiroshi Ikeda und Akira Kogin, möchte ich mich für Ihr Vertrauen und die interessante Zusammenarbeit bedanken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Mann Georg Gastl, dass er mich auf meinem eingeschlagenen zeitintensiven Weg immer unterstützt und mit Interesse begleitet hat und mir mit Geduld sowie großem Verständnis zur Seite stand.

# INHALTSVERZEICHNIS

|   |          |
|---|----------|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS   | VI       |
| TABELLENVERZEICHNIS   | IX       |
| ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS   | XII      |
| <b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>   | <b>1</b> |
| <b>2 Grundlagen und Literaturübersicht</b>  | <b>5</b> |
| 2.1 Aspekte der Geschmacksstabilität  | 5        |
| 2.2 Klassifizierung der Lipide und Lipidabbauprodukte   | 8        |
| 2.2.1 Lipide  | 8        |
| 2.2.2 Fettsäuren und Folgeprodukte des Lipidabbaus  | 9        |
| 2.3 Pflanze-Pathogen-Interaktionen  | 11       |
| 2.4 Enzyme des Lipidabbaus  | 12       |
| 2.4.1 Lipase (EC 3.1.1.3)   | 12       |
| 2.4.2 Peroxidasen (EC 1.11.1.7)   | 13       |
| 2.4.3 Lipoxygenasen in Pflanzen   | 13       |
| 2.4.3.1 Lipoxygenase-Reaktion   | 15       |
| 2.4.3.2 Der Lipoxygenase Reaktionsweg   | 17       |
| 2.4.3.3 Physiologische Eigenschaften der Lipoxygenasen und Aufgabe der Oxylipine in der pflanzlichen Pathogenabwehr | 23       |
| 2.5 Einflussfaktoren auf die Geschmacksstabilität während der Malz- und Bierbereitung                               | 24       |
| 2.5.1 Enzymatische Faktoren   | 24       |
| 2.5.1.1 Superoxid Dismutase (EC 1.15.1.1)   | 25       |
| 2.5.1.2 Katalase (EC 1.11.1.6)  | 27       |
| 2.5.1.3 Bedeutung der Lipase und Lipoxygenase im Mälzungs- und Brauprozess  | 27       |
| 2.5.2 Lipide und Lipidoxidationsprodukte während der Malz- und Bierbereitung  | 32       |
| 2.5.3 Entstehung aromaintensiver Lipidabbauprodukte   | 38       |
| 2.5.4 Phenolische Substanzen  | 44       |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 2.5.5    | Proteolytische Abbauvorgänge und die Bildung aromarelevanter<br>Abbauprodukte .....   | 46        |
| 2.5.6    | Einsatz biologischer Säuerung zur Verbesserung der<br>Geschmacksstabilität .....  | 48        |
| <b>3</b> | <b>Material und Methoden .....</b>  | <b>50</b> |
| 3.1      | Statistische Methoden.....  | 50        |
| 3.2      | Analytische Methoden.....   | 52        |
| 3.2.1    | Chemisch-technische Analysen .....  | 52        |
| 3.2.2    | Analyse des Proteingehaltes mittels Färbetechnik .....  | 54        |
| 3.2.3    | Chromatographische Analysen .....   | 55        |
| 3.2.3.1  | Chromatographische Methoden .....   | 55        |
| 3.2.3.2  | Bestimmung der langkettigen Fettsäuren .....  | 59        |
| 3.2.3.3  | Bestimmung der Fettsäurehydroperoxide .....   | 62        |
| 3.3      | Enzymatische Untersuchungen .....   | 64        |
| 3.3.1    | Bestimmung der Lipase-Aktivität .....   | 64        |
| 3.3.2    | Bestimmung der Lipoxygenase-Aktivität.....  | 67        |
| 3.3.3    | Bestimmung der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität.....   | 68        |
| 3.4      | Sensorische Beurteilung .....   | 69        |
| 3.4.1    | Verkostung nach DLG und Alterungsverkostung nach EICHHORN .....   | 69        |
| 3.4.2    | Beschreibende Verkostung .....  | 70        |
| 3.5      | Beschreibung der Mälzungs- und Brauanlagen am Lehrstuhl für<br>Technologie der Brauerei I.....  | 71        |
| 3.5.1    | Mälzungsanlagen und Beschreibung der Malze .....  | 71        |
| 3.5.2    | Labormaßstab .....  | 73        |
| 3.5.3    | Brauversuche im Pilotmaßstab.....   | 74        |
| 3.5.3.1  | Kleinsudwerk.....   | 74        |
| 3.5.3.2  | Pilotsudwerk.....   | 75        |
| 3.5.3.3  | Gär- und Lagerkeller, Filtration und Abfüllung.....   | 76        |
| 3.6      | Mälzungsanlagen und Mälzungsverfahren im Praxismaßstab .....  | 78        |
| <b>4</b> | <b>Versuchsaufbau und Durchführung .....</b>  | <b>80</b> |
| 4.1      | Labormaßstab .....  | 80        |
| 4.1.1    | Charakterisierung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion und<br>Molekulargewichtsbestimmung mittels Elektrophorese .....  | 80        |
| 4.1.2    | Charakterisierung der lipidabbauenden Enzymaktivität über den Verlauf<br>verschiedener isothermer Maischverfahren durch Erfassung der<br>entstandenen Abbauprodukte ..... | 84        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.1.3    | Beurteilung des lipidabbauenden Enzympotentials während des Maischprozesses in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und den gewählten Maischparametern durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte ..... | 85        |
| 4.1.4    | Einfluss von proteolytischer Lösung und Maische-pH auf die Entstehung von Würzearomastoffen zur Beurteilung der technologischen Einflussnahmemöglichkeiten während des Maischprozesses .....                 | 87        |
| 4.1.4.1  | Orientierende Untersuchungen zum Einfluss des ELG und pH-Wertes .....  | 87        |
| 4.1.4.2  | Unterschiede in der Bildung von aromaintensiven Abbauprodukten bei Einsatz von biologischer Milchsäure und technischer Milchsäure .....  | 88        |
| 4.1.4.3  | Orientierende Untersuchungen zur Hexanalbildung während der Würzebereitung .....   | 90        |
| 4.1.5    | Untersuchungen zum Verhalten der proteolytischen Abbauvorgänge während des Maischprozesses in Abhängigkeit von ELG des Malzes und pH-Wert der Maische .....  | 91        |
| 4.2      | Kleinsudwerk .....   | 91        |
| 4.2.1    | Brauersuche zur Untersuchung des Einflusses von Gerstensorte und Maische-pH auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres .....  | 92        |
| 4.2.2    | Brauersuche zur Untersuchung des Einflusses von Maische- und Würzesäuerung sowie Einmischtemperatur auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres .....                    | 94        |
| 4.3      | Brauersuche im Pilotmaßstab zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen vorliegender Braumalzqualität und zu erwartender Geschmacksstabilität .....   | 96        |
| <b>5</b> | <b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>   | <b>98</b> |
| 5.1      | Laborversuche .....  | 98        |
| 5.1.1    | Charakterisierung der aufgereinigten hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion .....  | 98        |
| 5.1.2    | Charakterisierung der lipidabbauenden Enzymaktivität über den Verlauf verschiedener isothermer Maischverfahren durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte .....  | 102       |
| 5.1.3    | Beurteilung des lipidabbauenden Enzympotentials während des Maischprozesses in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und den gewählten Maischparametern durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte ..... | 107       |
| 5.1.3.1  | Einfluss der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität gegenüber LOX-Aktivität auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide .....  | 108       |

|           |   |     |
|-----------|---|-----|
| 5.1.3.2   | Einfluss der Rohstoffauswahl in Abhängigkeit vom Maischverfahren auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide .....   | 109 |
| 5.1.3.3   | Einfluss der Rohstoffauswahl in Abhängigkeit vom Maischverfahren und Maische-pH auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide .....  | 111 |
| 5.1.4     | Einfluss von proteolytischer Lösung und Maische-pH auf die Entstehung von Würzearomastoffen zur Beurteilung der technologischen Einflussnahmemöglichkeiten während des Maischprozesses..... | 114 |
| 5.1.4.1   | Orientierende Untersuchungen zum Einfluss des ELG und des pH-Wertes .....   | 114 |
| 5.1.4.2   | Darstellung und Bewertung der erhaltenen Modelle der statistischen Versuchsplanung.....   | 118 |
| 5.1.4.2.1 | Beurteilung des Einflusses von Maische-pH und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung).....  | 120 |
| 5.1.4.2.2 | Beurteilung des Einflusses des Eiweißlösungsgrades und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung).....   | 121 |
| 5.1.4.2.3 | Beurteilung des Einflusses der Einmischtemperatur und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung).....  | 123 |
| 5.1.4.2.4 | Beurteilung des Einflusses von Eiweißlösungsgrad und Einmischtemperatur in Abhängigkeit vom Maische-pH auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung).....                 | 125 |
| 5.1.4.3   | Orientierende Untersuchungen zur Hexanalbildung während der Würzebereitung .....  | 128 |
| 5.1.5     | Untersuchungen zum Verhalten der proteolytischen Abbauvorgänge während des Maischprozesses in Abhängigkeit vom ELG des Malzes und pH-Wert der Maische .....                                 | 130 |
| 5.2       | Brauversuche zur Beeinflussung des enzymatischen Lipidabbaus zur Verbesserung der Geschmacksstabilität des Bieres.....  | 131 |
| 5.2.1     | Untersuchung des Einflusses von Gerstensorte und Maische-pH auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres .....   | 131 |
| 5.2.1.1   | Erfassung der freien langkettigen Fettsäuren in Würze über den Verlauf der Würzebereitung .....   | 131 |
| 5.2.1.2   | Erfassung der Fettsäurehydroperoxide in Würze über den Verlauf der Würzebereitung.....  | 134 |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 5.2.1.3  | Beurteilung der Aromastoffe des Fettabbaus über den Verlauf Würzebereitung .....  | 136        |
| 5.2.1.4  | Auswirkungen der LOX-Aktivität auf die Bildung von Aromastoffen ..<br>.....   | 139        |
| 5.2.1.5  | Beurteilung der Aussagekraft ausgewählter Kennzahlen und der verschiedenen Einflussfaktoren unter dem Aspekt der Geschmacksstabilität .....   | 142        |
| 5.2.1.6  | Beurteilung der Schaumstabilität des Bieres .....   | 149        |
| 5.2.2    | Brauversuche zur Untersuchung des Einflusses von Maische- und Würzesäuerung sowie Einmaischtemperatur auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres ..... | 151        |
| 5.2.2.1  | Erfassung der Fettsäurehydroperoxide in Würze über den Verlauf der Würzebereitung .....   | 151        |
| 5.2.2.2  | Aromastoffe der Pfannevoll-Würze und ihre Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität .....   | 154        |
| 5.2.2.3  | Sensorische Beurteilung der Biere .....   | 156        |
| 5.3      | Einfluss der Mälzungstechnologie auf die Lipide und Lipidabbauprodukte in Malz und Würze sowie Beurteilung der Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität des Bieres .....                   | 159        |
| 5.3.1    | Analytische und sensorische Kriterien zur Beurteilung der Geschmacksstabilität .....  | 159        |
| 5.3.2    | Beurteilung der Mälzungsverfahren hinsichtlich der Geschmacksstabilität .....   | 161        |
| 5.4      | Schlussfolgerungen .....  | 164        |
| <b>6</b> | <b>Zusammenfassung.....</b>   | <b>168</b> |
| <b>7</b> | <b>Literatur.....</b>   | <b>170</b> |
| <b>8</b> | <b>Anhang.....</b>  | <b>185</b> |

## ABBILDUNGSVERZEICHNIS

|  |    |
|--|----|
| Abb. 1: Wege des Lipidabbaus.....  | 1  |
| Abb. 2: Reaktionsmechanismen der Bieralterung [1, 3, 12, 30] .....   | 6  |
| Abb. 3: $\alpha$ -Linolensäure ( $\omega$ 3) .....   | 10 |
| Abb. 4: Linolsäure ( $\omega$ 6).....  | 10 |
| Abb. 5: Folgeprodukte des Lipidabbaus [30] .....   | 10 |
| Abb. 6: Reaktion der Typ-I-Lipoxygenase [30, 72] .....   | 16 |
| Abb. 7: Lipoxygenase-Katalyse [42, 77, 84, 85] .....   | 17 |
| Abb. 8: Der Lipoxygenase-Reaktionsweg [69, 83].....  | 18 |
| Abb. 9: Enzyme des Lipidabbaus .....   | 19 |
| Abb. 10: Die Jasmonat-Kaskade als ein möglicher Stoffwechselweg des AOS-<br>Reaktionsweges [77] .....  | 20 |
| Abb. 11: Der Metabolismus von Aldehyden in Pflanzen (HPL-Reaktionsweg) [77]  | 21 |
| Abb. 12: Modell des Abbaus von PUFAs in Pflanzen (Reduktase-Reaktionsweg). 23  |    |
| Abb. 13: Mechanismus im katalytischen Zentrum [104] .....  | 26 |
| Abb. 14: Graphische Darstellung der tendenziellen Entwicklung der LOX-Aktivität<br>während der Malzbereitung (zusammengestellt aus durchschnittlichen<br>Angaben der angegebenen Literaturstellen) ..... | 28 |
| Abb. 15: Teilreaktionen bei der Autoxidation von Lipiden [42].....   | 39 |
| Abb. 16: Carbonylverbindungen aus der Autoxidation ungesättigter Fettsäuren....  | 40 |
| Abb. 17: Antioxidativ wirksame Gruppen bei phenolischen Substanzen [1, 27, 183]<br>.....   | 45 |
| Abb. 18: Übersichtsschema der Maillard-Reaktion [189].....   | 47 |
| Abb. 19: Mini Diazald® Apparatur .....   | 61 |
| Abb. 20: Versuchsaufbau der Methylierungsapparatur .....   | 61 |
| Abb. 21: Kalibriergerade der Summe der freien Fettsäuren (C18:1, C18:2, C18:3)   | 66 |
| Abb. 22: Beispielhaftes Schema für eine Verkostung nach DLG und<br>Alterungsverkostung nach EICHHORN [23, 202].....  | 70 |
| Abb. 23: Schema des Kleinsudwerks .....  | 74 |
| Abb. 24: Aufbau des Pilotsudwerks .....  | 75 |
| Abb. 25: Aktivität der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion in Abhängigkeit<br>vom pH-Wert .....   | 99 |
| Abb. 26: Untersuchungen zur Temperaturstabilität der hydroperoxidabbauenden<br>Enzymfraktion .....   | 99 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 27: SDS-Page der Enzyme hydroperoxidabbauende Enzymfraktion und Lipoxygenase .....  | 101 |
| Abb. 28: SDS-Page der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion aufgereinigt aus verschiedenen Malzsorten bzw. Standorten .....   | 101 |
| Abb. 29: Lipase-Aktivität ermittelt über die vorliegende Konzentration der Summe an freien ungesättigten Fettsäuren (C18:1, C18:2, C18:3).....                                     | 103 |
| Abb. 30: Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration in gesäuerten isotherm (40–80 °C) geführten Maischen.....   | 105 |
| Abb. 31: Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration in ungesäuerten isotherm (40–80 °C) geführten Maischen.....   | 105 |
| Abb. 32: Mittelwerte der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration über den Verlauf der Maischdauer (100 Minuten) in gesäuerten und ungesäuerten isotherm geführten Maischen ..... | 106 |
| Abb. 33: Auswirkungen des unterschiedlichen Enzympotentials (Hochkurzmaisverfahren) .....  | 109 |
| Abb. 34: Hydroperoxid-Bildung in Abhängigkeit von der Sortenauswahl und Maischverfahren (Kongressmaisverfahren).....   | 110 |
| Abb. 35: Hydroperoxid-Bildung in Abhängigkeit von der Sortenauswahl und Maischverfahren (Hochkurzmaisverfahren).....   | 111 |
| Abb. 36: Variation der Maischparameter I (Vergleich Kongressmaisverfahren-Hochkurz-maischverfahren/Pasadena Fronhofen).....  | 112 |
| Abb. 37: Variation der Maischparameter II (Vergleich Kongressmaisverfahren-Hochkurz-maischverfahren/Ursa Garching) .....   | 113 |
| Abb. 38: Zusammenhang ELG des Malzes/Summe der Streckeraldehyde.....   | 116 |
| Abb. 39: Zusammenhang ELG des Malzes/Summe der Fettabbauprodukte .....   | 117 |
| Abb. 40: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Maische-pH auf den Hexanalgehalt .....   | 120 |
| Abb. 41: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Maische-pH auf die Summe der Fettabbauprodukte.....  | 121 |
| Abb. 42: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Eiweißlösungsgrad auf die Summe der Fettabbauprodukte.....   | 122 |
| Abb. 43: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Eiweißlösungsgrad auf die Summe der Streckeraldehyde.....  | 123 |
| Abb. 44: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Einmischtemperatur auf die Summe der Fettabbauprodukte .....   | 124 |
| Abb. 45: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Einmischtemperatur auf die Summe der Streckeraldehyde .....  | 124 |
| Abb. 46: Einfluss des Eiweißlösungsgrades auf die Hexanalkonzentration in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe).....   | 125 |

|  |     |
|--|-----|
| Abb. 47: Einfluss des Eiweißlösungsgrades auf die Summe der Fettabbauprodukte in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe) ..... | 126 |
| Abb. 48: Einfluss der Einmischtemperatur auf die Hexanalkonzentration in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe).....          | 127 |
| Abb. 49: Einfluss der Einmischtemperatur auf die Summe der Fettabbauprodukte in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe) .....  | 127 |
| Abb. 50: Hexanalkonzentration in µg/l.....   | 129 |
| Abb. 51: Beurteilung der Proteolyse (FAN) in Abhängigkeit vom Maische-pH .....   | 130 |
| Abb. 52: Summe der C18:2-Hydroperoxide der Sorte Marnie/Standort Weissensee über den Verlauf eines Hochkurzmaisverfahrens.....                 | 135 |
| Abb. 53: Hexanal-Konzentration in µg/l in der Vorderwürze (eingestellt auf 9,7 GG-%).....  | 137 |
| Abb. 54: Hexanal-Konzentration in µg/l in der Pfannevoll-Würze (ca. 9,7 GG-%) .....  | 137 |
| Abb. 55: Summe der Fettabbauprodukte in Pfannevoll-Würze in µg/l.....  | 138 |
| Abb. 56: Zusammenhang Summe der Streckeraldehyde in Malz in µg/kg, Pfannevoll-Würze in µg/l und ELG des Malzes in % .....                      | 139 |
| Abb. 57: Zusammenhang LOX-Aktivität des Malzes und Aromastoffe der Pfannevoll-Würze.....   | 140 |
| Abb. 58: Auswirkungen einer bereits im Malz erhöhten LOX-Aktivität auf die Aromastoffkonzentration in der Pfannevoll-Würze .....               | 142 |
| Abb. 59: Zusammenhang Summe der Streckeraldehyde in Malz und Pfannevoll-Würze.....   | 144 |
| Abb. 60: Aussagekraft der Summe der Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze) hinsichtlich der Geschmacksstabilität des Bieres.....                 | 146 |
| Abb. 61: Auswirkungen der pH-Senkung auf die Bildung von Aromastoffen (Pfannevoll-Würze) und die Geschmacksstabilität des Bieres .....         | 146 |
| Abb. 62: $\Sigma$ C18:2-Hydroperoxide im Labormaßstab ungesäuert .....   | 153 |
| Abb. 63: $\Sigma$ C18:2-Hydroperoxide im Labormaßstab mit Maischesäuerung .....  | 153 |
| Abb. 64: $\Sigma$ C18:2-Hydroperoxide im Kleinsudmaßstab ungesäuert.....   | 153 |
| Abb. 65: $\Sigma$ C18:2-Hydroperoxide im Kleinsudmaßstab mit Maischesäuerung.....  | 153 |
| Abb. 66: Summe der Fettabbauprodukte der Pfannevoll-Würzen .....   | 156 |
| Abb. 67: Profilprüfung nach 10-Punkte-Bewertungsskala ohne Maischesäuerung .....   | 157 |
| Abb. 68: Profilprüfung nach 10-Punkte-Bewertungsskala mit Maischesäuerung .  | 158 |
| Abb. 69: Vergleich Aromastoffe in Pfannevoll-Würze und resultierende Akzeptanz des forciert gealterten Bieres .....                            | 161 |

## TABELLENVERZEICHNIS

|  |     |
|--|-----|
| Tab. 1: Charakterisierung der LOX-Isoenzyme in keimender Gerste .....  | 30  |
| Tab. 2: Brauwasseranalysen [201] .....   | 52  |
| Tab. 3: Malzanalysen [201, 202] .....  | 54  |
| Tab. 4: Würzeanalysen [201, 202].....  | 54  |
| Tab. 5: Bieranalysen [201, 202].....   | 54  |
| Tab. 6: Variationskoeffizienten der Malz- und Würzearomastoffe .....   | 57  |
| Tab. 7: Variationskoeffizienten der Bieraromastoffe.....   | 57  |
| Tab. 8: Variationskoeffizienten der Alterungsindikatoren .....   | 58  |
| Tab. 9: Variationskoeffizienten der vicinalen Diketone sowie der höheren<br>Alkohole und Ester.....                | 58  |
| Tab. 10: Einteilung der Enzymaktivitäten der untersuchten Malze .....  | 107 |
| Tab. 11: Einfluss des Eiweißlösungsgrades und Maische-pHs auf die Bildung von<br>Aromastoffen.....                 | 114 |
| Tab. 12: Statistische Kennzahlen und F-Werte zur Beurteilung der erhaltenen<br>Modelle .....                       | 118 |
| Tab. 13: Gesamtgehalt an freien langkettigen Fettsäuren in mg/l $\pm$ VK in mg/l ....                              | 133 |
| Tab. 14: Gesamtgehalt an freien langkettigen Fettsäuren in mg/l $\pm$ VK in mg/l<br>bezogen auf 12 GG-% .....      | 133 |
| Tab. 15: Linolsäurekonzentration in mg/l $\pm$ VK in mg/l.....   | 134 |
| Tab. 16: Lipidoxidationsprodukte der Berliner Programm Malze in Verhältnis zur<br>LOX-Aktivität .....              | 141 |
| Tab. 17: Sensorische Beurteilung und Kennzahlen.....   | 143 |
| Tab. 18: Vergleich Summe der C18:2-Hydroperoxide gemessen im Kleinsud- bzw.<br>Labormaßstab .....                  | 152 |
| Tab. 19: Aromastoffniveau in der Pfannevoll-Würze zur Beurteilung der<br>Geschmacksstabilität .....                | 154 |
| Tab. 20: Mälzungsverfahren der Handelsmalze .....  | 159 |
| Tab. 21: Analytische und sensorische Beurteilungskriterien der Handelsmalze ..                                     | 160 |
| Tab. 22: Kriterien zur Beurteilung des Fettabbaus und der resultierenden<br>Geschmacksstabilität .....             | 162 |
| Tab. AH 1: pH-Werte der isothermen Maischen zur Bestimmung der Lipase- und<br>Lipoxigenase Aktivitätsmaxima .....  | 185 |
| Tab. AH 2: Konzentration der C18:2-Hydroperoxide in $\mu$ M/l über den<br>Maischprozess (isotherme Maischen) ..... | 186 |

|  |     |
|--|-----|
| Tab. AH 3: Konzentration der C18:3-Hydroperoxide in $\mu\text{M/l}$ über den Maischprozess (isotherme Maischen) .....                          | 186 |
| Tab. AH 4: Analysen der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2002 .....  | 187 |
| Tab. AH 5: Analysen der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003 .....  | 187 |
| Tab. AH 6: Aktivität der Lipoxygenase und des hydroperoxidabbauenden Enzyms der Berliner Programm-Malze Ernte 2002 .....                       | 187 |
| Tab. AH 7: Summe der C18:2-Hydroperoxide in $\mu\text{M/l}$ im Vergleich HK-MV und KG-MV .....   | 188 |
| Tab. AH 8: Summe der C18:3-Hydroperoxide in $\mu\text{M/l}$ im Vergleich HK-MV und KG-MV .....   | 188 |
| Tab. AH 9: Malzanalyse der Sorten Berras, Carafe und Pasadena (Variation des ELG) .....  | 189 |
| Tab. AH 10: Malzaromastoffe in $\mu\text{g/kg}$ der Sorten Berras, Carafe und Pasadena (Variation des ELG) .....                               | 189 |
| Tab. AH 11: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorten Berras, Carafe und Pasadena ohne Maischesäuerung (Variation des ELG) .....          | 190 |
| Tab. AH 12: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorten Berras, Carafe und Pasadena mit Maischesäuerung (Variation des ELG) .....           | 190 |
| Tab. AH 13: Analysendaten der Sorte Scarlett (Auswahl der drei Mälzungsregime mit Hilfe einer Statistikmälzung) .....                          | 191 |
| Tab. AH 14: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, ohne Maischesäuerung) .....                                | 191 |
| Tab. AH 15: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit technischer Milchsäure) Teil I .....   | 192 |
| Tab. AH 16: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit technischer Milchsäure) Teil II .....  | 192 |
| Tab. AH 17: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit biologischer Milchsäure) Teil I .....  | 193 |
| Tab. AH 18: Würzearomastoffe in $\mu\text{g/l}$ der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit biologischer Milchsäure) Teil II ..... | 193 |
| Tab. AH 19: Malzaromastoffe in $\mu\text{g/kg}$ der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003 .....  | 194 |
| Tab. AH 20: Ergebnisliste (Response Surface Methodology) .....   | 195 |
| Tab. AH 21: Kennzahlen der Proteolyse in Abhängigkeit vom Maische-pH (vgl. Abschnitt 5.1.5) .....  | 196 |
| Tab. AH 22: Analysendaten der Brauversuche Teil I .....  | 197 |
| Tab. AH 23: Analysendaten der Brauversuche Teil II .....   | 198 |
| Tab. AH 24: Analysendaten der Brauversuche Teil III .....  | 199 |
| Tab. AH 25: Analysendaten der Brauversuche Teil I .....  | 200 |

|   |     |
|---|-----|
| Tab. AH 26: Analysendaten der Brauversuche Teil II.....   | 201 |
| Tab. AH 27: Analysendaten der Brauversuche Teil III.....  | 202 |
| Tab. AH 28: Analysendaten der Brauversuche Teil I.....    | 203 |
| Tab. AH 29: Analysendaten der Brauversuche Teil II.....   | 204 |
| Tab. AH 30: Analysendaten der Brauversuche Teil III.....  | 205 |
| Tab. AH 31: Analysendaten Pilsner Malz .....              | 206 |
| Tab. AH 32: Wasseranalysen der Brauversuche.....          | 206 |
| Tab. AH 33: Analysendaten der Brauversuche Teil I.....    | 207 |
| Tab. AH 34: Analysendaten der Brauversuche Teil II.....   | 208 |
| Tab. AH 35: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil I .....   | 209 |
| Tab. AH 36: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil II .....  | 210 |
| Tab. AH 37: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil III ..... | 211 |

## ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

|                 |   |
|-----------------|---|
| A               | Anfang (Maischen Anfang)                    |
| Abb.            | Abbildung                                   |
| ADH             | Alkoholdehydrogenase                        |
| Adj             | adjusted                                    |
| Adeq            | adäquate                                    |
| AH              | Anhang                                      |
| ANOVA           | Varianzanalyse                              |
| AOS             | Allenoxid Synthase                          |
| AOC             | Allenoxid Cyclase                           |
| ASBC            | American Society of Brewing Chemists        |
| Asp             | Asparagin                                   |
| AW              | Anstellwürze                                |
| C18:2           | Linolsäure                                  |
| C18:3           | Linolensäure                                |
| CO <sub>2</sub> | Kohlendioxid                                |
| Cu              | Kupfer                                      |
| °d              | Grad deutscher Härte                        |
| D-Enantiomer    | dexter, rechtsdrehend                       |
| Da              | Dalton                                      |
| DES             | Divinylether Synthase                       |
| DHOE            | Dihydroxyoctadecensäure                     |
| DIN             | Deutsche Industrienorm                      |
| DLG             | Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft e. V. |
| DMS-P           | Dimethylsulfid-Precursor                    |
| DMS             | Dimethylsulfid                              |
| α-DOX           | α-Dioxygenase                               |
| <i>E</i>        | entgegen, trans                             |
| E               | Ende (Maischen Ende)                        |
| E <sub>nm</sub> | Extinktion                                  |
| EAS             | Epoxyalkohol Synthase                       |
| EBC             | European Brewing Convention                 |
| ECD             | Electron-Capture-Detector                   |

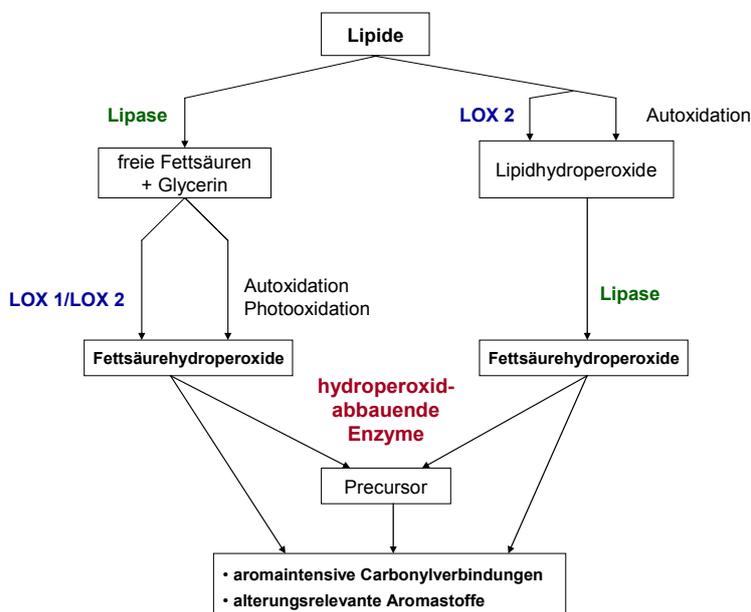
|              |  |
|--------------|--|
| EDTA         | Dinatriumdihydrogenethylendiamintetraacetat                |
| ELG          | Eiweißlösungsgrad  |
| Em           | Emission   |
| Enz          | Enzym  |
| ET           | Einmischtemperatur   |
| Ex           | Extinktion   |
| FAN          | freier Aminostickstoff                                     |
| Fe           | Eisen  |
| FID          | Flammenionisationsdetektor                                 |
| G            | Erdbeschleunigung  |
| Gl.          | Gleichung  |
| GC           | Gaschromatograph(ie)                                       |
| GG-%         | Gewichts-/Gewichts-Prozent                                 |
| GV-%         | Gewichts-/Volumen-Prozent                                  |
| H            | Wasserstoff  |
| His          | Histidin   |
| HK-MV        | Hochkurzmaisverfahren                                      |
| HPL          | Hydroperoxid Lyase   |
| HPLC         | High Pressure Liquid Chromatography                        |
| HOD/HOT      | Hydroxyoctadecadiensäure/Hydroxyoctadecatriensäure         |
| 9-HOD        | 9-Hydroxy-( <i>E, Z</i> )-10,12-octadecadiensäure          |
| 13-HOD       | 13-Hydroxy-( <i>Z, E</i> )-9,11-octadecadiensäure          |
| HPOD/HPOT    | Hydroperoxyoctadecadiensäure/Hydroperoxyoctadecatriensäure |
| i. D.        | innerer Durchmesser  |
| IE           | internationale Einheiten                                   |
| ISTD         | interner Standard  |
| JA           | Jasmonsäure  |
| ImH          | Imidazol-Ring  |
| KA           | Würzekochen Anfang   |
| kDa          | Kilodalton   |
| KE           | Würzekochen Ende   |
| KG-MV        | Kongressmaisverfahren                                      |
| KOD/KOT      | Ketooctadecadiensäure/Ketooctadecatriensäure               |
| L-Enantiomer | levo, linksdrehend   |

|                 |  |
|-----------------|--|
| LA              | Linolsäure   |
| LeA             | Linolensäure   |
| lfr.            | lufttrocken  |
| LOOH            | Hydroperoxid der Linolsäure                                  |
| LOXs            | Lipoxygenase(n)  |
| MEBAK           | Mitteleuropäische Brautechnische Analysenkommission          |
| Mn              | Mangan   |
| MTrs.           | Malztrockensubstanz  |
| mU              | Milliunits   |
| n               | Anzahl   |
| n. a.           | nicht auswertbar   |
| n. n.           | nicht nachweisbar  |
| O               | Sauerstoff   |
| P               | Wahrscheinlichkeitsmaß                                       |
| p. a.           | zur Analyse  |
| Pfv             | Pfannevoll-Würze   |
| POX             | Peroxygenase   |
| ppm             | parts per million  |
| PUFAs           | polyunsaturated fatty acids/mehrfach ungesättigte Fettsäuren |
| PR-Proteine     | pathogenesis related proteins                                |
| Pred            | predicted  |
| R-Konfiguration | rectus, Rechts-Konfiguration des Chiralitätszentrums         |
| r               | Korrelationskoeffizient                                      |
| r <sup>2</sup>  | Bestimmtheitsmaß   |
| RH              | Linolsäure   |
| RO              | reaktive Sauerstoffspezies                                   |
| Σ               | Summe  |
| S-Konfiguration | sinister, Links-Konfiguration des Chiralitätszentrums        |
| SDS-Page        | sodium dodecylsulfate polyacrylamide gel electrophoresis     |
| SO <sub>2</sub> | Schwefeldioxid   |
| SOD             | Superoxid Dismutase  |
| Sp.             | Spuren   |
| Stdnr.          | Standardnummer   |
| Stw             | Stammwürze   |

|      |  |
|------|--|
| Sqrt | Berechnung der Quadratwurzel des übergebenen Arguments |
| Tab. | Tabelle  |
| THOE | Trihydroxyoctadecensäure                               |
| Trs. | Trockensubstanz  |
| U    | Umdrehungen  |
| TBZ  | Thiobarbitursäurezahl                                  |
| vH   | vor der Hopfengabe                                     |
| VK   | Variationskoeffizient                                  |
| VZ   | Verhältniszahl   |
| VW   | Vorderwürze  |
| wfr. | wasserfrei   |
| Z    | zusammen, cis  |
| Zn   | Zink   |

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Die Geschmacksstabilität stellt ein wesentliches Qualitätsmerkmal des Bieres dar. Die Geschmacksstabilität kann durch technologische Maßnahmen oder Zusätze antioxidativer Substanzen erhöht werden, wobei letzteres in Deutschland aufgrund des Reinheitsgebotes nicht möglich ist. Unter den technologischen Maßnahmen spielen die Auswahl der Rohstoffe und der Brauprozess sowie auch die Gärung eine wichtige Rolle. [1, 2] Zahlreiche Reaktionswege führen im Verlauf der Alterung des Bieres zur Bildung aromaintensiver und geschmacksaktiver Substanzen. Auch aus der Lipidoxidation gehen zahlreiche Alterungscarbonyl hervor. Der Lipidabbau erfolgt einerseits durch die Enzyme des Malzes, andererseits werden die freien oder als Ester gebundenen Fettsäuren durch Autoxidation und Photoxidation zu Carbonylen abgebaut. Die beim Abbau der mehrfach ungesättigten Fettsäuren entstehenden Intermediär- und Abbauprodukte gelten als Vorläufer aromaintensiver und alterungsrelevanter Aromastoffe, die maßgeblichen Einfluss auf die Geschmacksstabilität des Bieres ausüben. Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die verschiedenen Abbauewege der Lipide.



**Abb. 1: Wege des Lipidabbaus**

Entscheidend für die Aromaänderung bei der Bieralterung ist, in welchem Maße beim Maischen und Läutern gesättigte und ungesättigte Fettsäuren sowie gebildete

Zwischenprodukte bis ins abgefüllte Bier gelangen bzw. inwieweit Vorläufersubstanzen gebildet wurden, welche die Geschmacksstabilität des Bieres negativ beeinflussen können. [3] Allerdings wurde die Relevanz der Lipidabbauprodukte für die Ausprägung des Alterungsgeschmacks in der Literatur teilweise kontrovers diskutiert. Vor allem das (*E*)-2-Nonenal, das lange Zeit als Leitsubstanz für den „cardboard flavour“ verantwortlich gemacht wurde, war Gegenstand der Diskussion.

In den vergangenen Jahren wurden verschiedene technologische Möglichkeiten untersucht, um eine Minimierung der alterungsrelevanten Aromastoffe aus dem Lipidabbau zu erzielen. In diesem Zusammenhang ist der enzymatische Lipidabbau durch das Enzym Lipoxygenase von besonderem Interesse. Dies belegt die derzeit intensiv betriebene Forschung im Bereich der low-LOX bzw. no-LOX Gerstenzüchtungen. [4-6] Ein Verlust dieser enzymatischen Ausstattung stellt jedoch einen schwerwiegenden Eingriff in das Abwehrsystem der Pflanze dar. Eine Schwierigkeit bei der Beurteilung der Relevanz der Lipidoxidation liegt insbesondere darin, dass viele Entstehungswege der Lipidabbauprodukte noch nicht ausreichend aufgeklärt waren oder sind. Dementsprechend ist abzuwägen, welche Bedeutung dem Lipidabbau in Relation zu anderen aromaintensiven Abbauvorgängen (z. B. Streckerabbau) zukommt und inwieweit durch technologische Maßnahmen dieser Problematik begegnet werden kann. Das lipidabbauende enzymatische Potential (im Rohstoff vorhandene Aktivität der Enzyme Lipase, Lipoxygenase und hydroperoxidabbauender Enzyme) ist in der Brauerei durch den Erwerb des Rohstoffes Malz vorgegeben und kann folglich nur noch durch den Maischprozess beeinflusst werden. Somit stellt letztendlich eine geeignete Rohstoffqualität und die enzymatische Ausstattung des Rohstoffes (z. B. niedrige Lipoxygenase-Aktivität) die Basis für eine gute Geschmacksstabilität dar.

Dazu wurden im ersten Teil der Arbeit technologische Parameter, wie pH-Wert, Eiweißlösungsgrad, Einmischtemperatur und erstmals vergleichend die Art der Milchsäuregabe und deren Einfluss auf den Lipidabbau im Labormaßstab untersucht. Der Versuchsaufbau sowie die daraus folgende Bildung von

Abbauprodukten aus dem Lipidabbau und dem Streckerabbau in Abhängigkeit von verschiedenen technologischen Maßnahmen wurden mittels einer statistischen Versuchsplanung ausgearbeitet. Des Weiteren wurden Grundlagen zur Beurteilung des lipidabbauenden Enzympotentials während des Maischprozesses in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und den gewählten Maischparametern durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte ermittelt. Unter diesem Aspekt war auch die Charakterisierung einer gelchromatographisch aufgereinigten hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion Gegenstand dieser Arbeit.

Aufgrund der gewonnenen Grundlagen wurde im zweiten Teil dieser Arbeit die Praxistauglichkeit der Erkenntnisse in Brauversuchen im Kleinbraumaßstab überprüft und verifiziert. Dazu wurden sowohl die rohstoffbedingten Einflüsse (Sorte, Standort und vor allem das vorliegende lipidabbauende Enzympotential) als auch die Einflussmöglichkeiten durch Variation der Maischparameter über die Analyse der entstandenen Intermediär- und Abbauprodukte untersucht. Die jeweiligen Versuchsansätze wurden bis ins fertige Bier verfolgt und die resultierende Geschmacksstabilität der Biere analytisch und sensorisch beurteilt.

Folgende praxisrelevante Möglichkeiten zur technologischen Beeinflussung des Lipidabbaus während des Maischprozesses sind verfügbar und wurden in dieser Forschungsarbeit untersucht:

*Rohstoffauswahl (Enzympotential):*

- Sortenabhängigkeit
- Standortabhängigkeit

*Variation der Maischparameter:*

- Maische-pH, Art der Säuerung
- Temperaturführung  
(Einmaischtemperatur, Zeit)
- Maischverfahren

Die Anwendbarkeit der aus den Laborversuchen und Kleinbrauversuchen gewonnenen Kenntnisse zur frühzeitigen Beurteilung des Malzes wurden abschließend anhand von sieben verschiedenen Handelsmalzen (zwei Sorten), die mit unterschiedlichen Mälzungsverfahren hergestellt wurden, begutachtet. Ziel

dieser Arbeit ist es, dem Praktiker eine anwendungsorientierte Analytik zur Hand zu geben, um einerseits eine möglichst frühzeitige Aussage über die Geschmacksstabilität des Bieres treffen zu können und andererseits nach Beurteilung der Rohstoffqualität gezielt über den Maischprozess reagieren zu können. Zur Beurteilung der Geschmacksstabilität ist ferner eine Einschätzung der Relevanz der verschiedenen Aromakomponenten erforderlich. Im Rahmen der Routineanalytik werden üblicherweise flüchtige Aromastoffe in der Ausschlagwürze erfasst, um die Qualität der Kochung zu beurteilen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde jedoch die ungekochte Würze analysiert, um geeignete Indikator- bzw. Leitsubstanzen zur Überwachung der Würzebereitung festzulegen und, um die Intensität der Precursorbildung zu verfolgen. Aus den Ergebnissen konnte eine so benannte „Precursor-Theorie“ erstellt werden, die auf das Potential zur Bildung von aromaintensiven Alterungskomponenten während der Bieralterung hinweist. Dabei kann sowohl die Analyse des Malzes als auch die Beurteilung der ungekochten Würze einen frühzeitigen Hinweis auf die zu erwartende Geschmacksstabilität geben.

Auch die Hefe spielt hinsichtlich der Geschmacksstabilität eine wichtige Rolle. Die Verwendung einer gärkräftigen, vitalen Hefe ist Voraussetzung für eine hohe Geschmacksstabilität. Die entstehenden Stoffwechselprodukte der Hefe können das Aroma des frischen Bieres maßgeblich prägen und infolgedessen können maskierende Effekte während des Alterungsprozesses auftreten. Bestehende Publikationen haben gezeigt, dass die Hefe auch beim Abbau von Fettsäuren und deren Oxidationsprodukten streng differenziert, bedingt durch die Stereoselektivität der peroxisomalen Enzyme. Dabei konnte v. a. den Mono- und Dihydroxyfettsäuren eine große Bedeutung im Hefestoffwechsel nachgewiesen werden. [7, 8] Insbesondere die enzymatischen Reaktionswege während des Maischprozesses, die zur Bildung dieser Abbauprodukte (v. a. Mono-, Di- und Trihydroxyfettsäuren) führen, deren technologische Beeinflussbarkeit während des Maischprozesses sowie die Rolle dieser Abbauprodukte im Abwehrsystem der Pflanzen, ist noch nicht abschließend geklärt.

## 2 Grundlagen und Literaturübersicht

### 2.1 Aspekte der Geschmacksstabilität

Der Geschmack und das Aroma des Bieres sind nicht stabil. Die Ausbildung des Alterungsgeschmacks wird vor allem durch Oxidationsreaktionen verursacht. Dabei genügen bereits kleinste Mengen an Sauerstoff, wie sie auch bei einer optimalen Abfüllung unvermeidbar sind. Der Alterungseindruck entsteht einerseits durch den Verlust an positiven Geschmacks- und Aromastoffen, andererseits durch entstandene Alterungsaromen. Den Oxidationsreaktionen wirken reduzierende Bierinhaltsstoffe entgegen, die die Ausbildung des Alterungsaromas verzögern können. [1, 3, 9-12] Bei der Bieralterung handelt es sich um einen dynamischen Prozess, der durch Bildung und Abbau von Bierinhaltsstoffen zu einer Veränderung des Aromaprofils führt. Für die Entstehung der beteiligten Substanzen können mehrere Reaktionsmechanismen verantwortlich gemacht werden. [3] Abbildung 2 zeigt die wichtigsten Reaktionen, die zur Entstehung von Alterungsaromen führen können. Antioxidative Substanzen wie z. B. Polyphenole können die Entstehung dieser Alterungskomponenten (z. B. Streckeraldehyde, Fettabbauprodukte) verzögern und Oxidationsreaktionen entgegenwirken. Auch die im Malz enthaltenen Enzyme können in Hinblick auf die Geschmacksstabilität positive oder negative Auswirkungen haben. [1, 3, 9, 12-18]

DALGLIESH veröffentlichte am EBC-Kongress 1977 zum Thema Geschmacksstabilität die wohl treffendste Begriffserklärung: „Bieraroma ist niemals stabil. Jeder von uns beginnt ab dem Zeitpunkt der Geburt zu altern und dasselbe geschieht mit jedem Tropfen Bier, der gebraut wurde. Bieraroma ist immer dynamisch und niemals statisch.“ Der Geruch und das Aroma des Bieres sind nicht stabil. Folgerichtig ist daher auch nicht von einer Stabilität, sondern von einer geschmacklichen Instabilität zu sprechen. [1, 9]

Um die Geschmacksstabilität des Bieres richtig und v. a. frühzeitig im frischen Bier beurteilen zu können, stehen sowohl verschiedene analytische Parameter als auch

die sensorische Beurteilung des forciert gealterten Bieres zur Verfügung. Die analytische Beurteilung zielt meist auf die Aussagekraft verschiedener Indikatorsubstanzen oder die Erfassung pro- bzw. antioxidativer Substanzen ab. Die maßgebende Analyse zur Beurteilung der Geschmacksstabilität ist jedoch die Sensorik. Daher ist eine sensorische Beurteilung des Bieres unerlässlich. [1, 18-21] Zusätzlich sind die Erfassung von Alterungsindikatoren im forciert gealterten Bier [3, 9-11, 20, 22-24] und die Untersuchung des antioxidativen Potential des Bieres [1, 25-29] geeignete Analysemethoden, um die Geschmacksstabilität frühzeitig beurteilen zu können.

|   |   |
|---|---|
| → Maillardreaktion                                | → Furane, Pyranone,<br>heterocyclische Verbindungen     |
| → Strecker-Abbau von Aminosäuren                  | → Streckeraldehyde                                      |
| → oxidativer Abbau von Isohumulonen               | → Aldehyde, Ketone                                      |
| → Fettabbau                                       |   |
| -thermisch-oxidativer Abbau                       | → Aldehyde, Ketone, Lactone, Säuren, Ester              |
| -Fotooxygenierung freier Fettsäuren               | → Hydroperoxide, Aldehyde                               |
| -enzymatischer Abbau                              |   |
| → Beteiligung nicht-flüchtiger Bierbestandteile   |   |
| -metallkatalysierte Reaktionen                    | → radikalischer Mechanismus, $Fe^{2+/3+}$ , $Cu^{+/2+}$ |
| -Melanoidine als $H^+$ -Donatoren bzw. Akzeptoren | → Verschiebung des Redoxpotentials (positive Werte)     |
| -Carbonyl-Sulfit-Komplexe                         | → Aldehyde, Ketone                                      |

**Abb. 2: Reaktionsmechanismen der Bieralterung [1, 3, 12, 30]**

Zu beachten ist, dass analytische Indikatoren nur einen Hinweis auf die zu erwartende Geschmacksstabilität geben. Unter Umständen kann die sensorische Beurteilung des Alterungszustandes von den analytischen Parametern abweichen. Der Grund hierfür ist das Vorliegen von höheren Konzentrationen an maskierenden Substanzen wie Ester oder Hopfenaromastoffe (z. B. Linalool). Auch eine sehr gute Hefevitalität bzw. ein hoher  $SO_2$ -Gehalt des Bieres kann zu sehr geschmacksstabilen Bieren führen. Jedoch müssen technologische Maßnahmen, die die analytischen Faktoren negativ beeinflussen, nicht zwangsläufig zu einer Verringerung der sensorisch wahrgenommenen Geschmacksstabilität führen. Da

es sich bei der Beurteilung der Geschmacksstabilität um ein sehr komplexes Themengebiet handelt, ist es wichtig, alle Faktoren zu berücksichtigen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. [10-12, 20, 31-35]

Als Schlüsselaromastoffe im frischen Bier konnte KOMAREK [36] die Aromastoffe 3-Methylbutanol, 2-Phenylethanol, Butansäureethylester, Hexansäureethylester, Octansäureethylester, 3-Phenylpropansäureethylester, 3-Phenyl-2-propensäureethylester, (*E*)- $\beta$ -Damascenon, 4-Hydroxy-2,5-dimethyl-3(2H)-furanone, 3-Hydroxy-4,5-dimethyl-2(5H)-furanon, Phenyllessigsäure, 2- und 3-Methylbuttersäure, 2-Aminoacetophenon, 4-Vinyl-2-methoxyphenol und Vanillin nachweisen. Einen deutlichen Konzentrationsanstieg im gealterten Bier zeigten die Streckeraldehyde 2-Methylpropanal, 2- und 3-Methylbutanal, Methional und Phenylacetaldehyd. Diese Carbonyle, insbesondere Phenylacetaldehyd und 2-Methylpropanal, tragen im gealterten Bier zu einem süßen, malzigen und honigartigen Fehlaroma bei. Die Bildung der Streckeraldehyde konnte allein auf den Streckerabbau zurückgeführt werden, der durch Sauerstoff, Hitzeeinfluss und durch den Zusatz von Aminosäuren als Precursorsubstanzen gefördert wird. Die Oxidation der entsprechenden Alkohole, die zu Streckeraldehyden führen kann, wurde bei der Bildung von Fehlaromen ausgeschlossen. Der Sauerstoffeinfluss bewirkt Autoxidationsvorgänge in der Primärphase der Maillard-Reaktion und führt somit zu einem Anstieg an  $\alpha$ -Dicarbonylverbindungen. Viele in der Literatur vorgeschlagenen Fehlaromastoffe der Alterung konnten in dieser Arbeit ausgeschlossen werden, u. a. auch das (*E*)-2-Nonenal, da es auch im gealterten Bier weit unter seinem Geruchsschwellenwert (0,2  $\mu\text{g/l}$ ) liegt. Fermentationsversuche belegten, dass das isotopenmarkierte [ $^2\text{H}_2$ ]-(*E*)-2-Nonenal sehr rasch zu [ $^2\text{H}_2$ ]-Nonanol reduziert wird. [36, 37] (*E*)-2-Nonenal wurde ursprünglich als Leitsubstanz für den „cardboard-flavour“ angenommen. [38] Allerdings wurde rasch widerlegt, dass diese Substanz für dieses Fehlaroma alleinverantwortlich war. Um „cardboard-flavour“ zu erzeugen, bedarf es einer Mischung mehrerer Carbonyle. [39, 40] Die Aromakomponenten aus dem Lipidabbau scheinen bei der Aromabildung während des Alterungsprozesses nicht primär verantwortlich zu sein.

Des Weiteren können Carbonyle durch Lichteinfluss und in Anwesenheit von Photosensibilisatoren (z. B. Riboflavin) gebildet werden. Das bekannteste Reaktionsprodukt ist das 3-Methyl-2-buten-1-thiol (Lichtgeschmack). Es entsteht unter Beteiligung der iso- $\alpha$ -Säure bei Wellenlängen zwischen 250 und 500 nm (besonders in Weiß- bzw. Grünlas) und hat in Bier einen äußerst geringen Geruchsschwellenwert von 30 ng/l. [36, 41]

## 2.2 Klassifizierung der Lipide und Lipidabbauprodukte

### 2.2.1 Lipide

Lipide ist eine Sammelbezeichnung für Naturstoffe, die sich in ihrer chemischen Struktur teilweise erheblich unterscheiden, aber eine ausgeprägte Hydrophobizität gemeinsam haben. Daher sind sie nur in organischen Lösungsmitteln, nicht aber in Wasser löslich. Einige Lipide sind grenzflächenaktiv, da sie Bausteine mit hydrophilen Gruppen enthalten. Diese Verbindungen werden als polare (amphiphile) von den neutralen Lipiden abgegrenzt. Abhängig von ihrer Verseifbarkeit (durch Laugen) werden die Lipide auch in verseifbar und unverseifbar unterteilt. [42]

### A Klassifizierung nach dem Merkmal „Acyllrest“

#### *I Einfache Lipide (nicht verseifbar)*

Freie Fettsäuren, Isoprenoid-Lipide (Steroide, Carotinoide, Monoterpene u. a.), Tocopherole

#### *II Acyllipide (verseifbar)*

#### *Bausteine*

Mono-, Di-, Triacylglyceride

Fettsäure, Glycerin

Phospholipide (Phosphatide)

Fettsäure, Glycerin oder Sphingosin, Phosphorsäure, Base

|             |   |
|-------------|---|
| Glycolipide | Fettsäure, Glycerin oder Sphingosin,<br>Mono-, Di- oder Oligosaccharide |
| Diollipide  | Fettsäure, Ethan-, Propan- oder<br>Butandiol                            |
| Wachse      | Fettsäure, Fettalkohol  |
| Sterinester | Fettsäure, Sterin   |

## B Klassifizierung nach dem Merkmal „neutral-polar“

### ***Neutrale Lipide***

Fettsäuren (> C<sub>12</sub>)  
 Mono-, Di-, Triacylglyceride  
 Sterine, Sterinester  
 Carotinoide  
 Wachse  
 Tocopherole

### ***Polare (amphiphile) Lipide***

Glycerophospholipide  
 Glyceroglycolipide  
 Sphingophospholipide  
 Sphingoglycolipide

## 2.2.2 Fettsäuren und Folgeprodukte des Lipidabbaus

Durch Hydrolyse werden aus Acyllipiden aliphatische Carbonsäuren freigesetzt, die sich in der chemischen Struktur unterscheiden. Die Fettsäuren werden nach Länge der Alkylkette, Anzahl, Position und Konfiguration der Doppelbindungen sowie nach dem Vorkommen zusätzlicher funktioneller Gruppen klassifiziert.

Die ungesättigten Fettsäuren, die in den Lipiden dominieren, enthalten ein, zwei oder drei Allylgruppen im Acylrest. Die Doppelbindung liegt jeweils in cis-Konfiguration ((Z)-Isomer) vor. Die Position der Doppelbindung wird vom

Methylende des Moleküls aus angegeben (Bezeichnung „ $\omega$ “ oder „n“). Werden die Fettsäuren mit dem gleichen Methylene zusammengefasst, ergeben sich drei Familien  $\omega 3$ ,  $\omega 6$  und  $\omega 9$ . Abbildungen 3 und 4 erläutern dies graphisch.

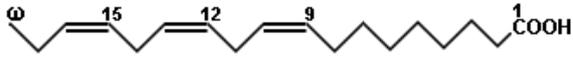


Abb. 3:  $\alpha$ -Linolensäure ( $\omega 3$ )

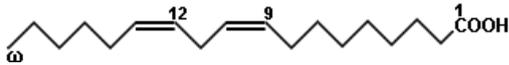


Abb. 4: Linolsäure ( $\omega 6$ )

Abbildung 5 stellt die chemische Struktur der Mono-, Di- und Trihydroxyfettsäuren sowie Hydroxyepoxyfettsäuren, deren Verantwortlichkeit als Precursorsubstanzen für alterungsrelevante Aromastoffe im Brauprozess Gegenstand der Forschung ist, dar. Insgesamt sind 32 verschiedene Stereoisomere (Enantiomere und Diastereomere) der THOE möglich.

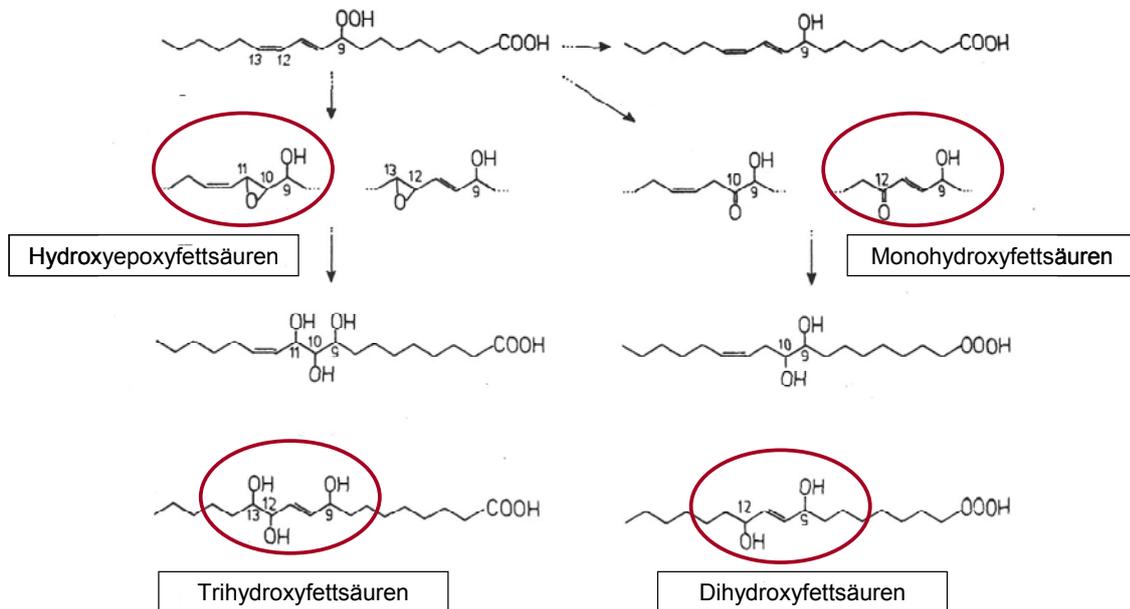


Abb. 5: Folgeprodukte des Lipidabbaus [30]

### 2.3 Pflanze-Pathogen-Interaktionen

Pflanzen sind ortsgebundene Organismen und in Folge dessen den Umweltbedingungen des Standortes unmittelbar ausgesetzt. Im Gegensatz zu Vertebraten besitzt das Immunsystem der Pflanze keine spezialisierten Zellen, die bei Erkrankungen schnell zum Infektionsort transportiert werden können, um eindringende Organismen abzuwehren. Jede Pflanzenzelle besitzt aber die Fähigkeit auf Infektionen zu reagieren und Abwehrreaktionen zu aktivieren. Pflanzen haben zahlreiche Mechanismen ausgebildet, um auf Einflüsse wie z. B. Trockenheit, mechanische Verwundung, UV-Strahlung, Temperaturstress oder Befall durch phytopathogene Organismen zu reagieren. Da die meisten Pathogene auf ein sehr enges Pflanzenspektrum spezialisiert sind, kommt es bei einem Großteil der angreifenden Pathogene (Bakterien, Viren, Pilze oder Insekten) nicht zu einer Besiedelung der Pflanze, da diese in den meisten Fällen keine Wirtspflanze darstellt. Wird die Pflanze von einem Pathogen parasitiert, kann dieser befallene Bereich durch Aktivierung induzierter Abwehrmechanismen lokal abgegrenzt werden. [43, 44] Gesunde Pflanzen bilden strukturelle und chemische Barrieren aus, um einen primären Schutz gegen das Eindringen von Pathogenen aufzuweisen (z. B. Auflagerung von Kallose auf die Zellwand, Einlagerung von Lignin in die Zellwand, Freisetzung toxischer Verbindungen aus pflanzlichen Vakuolen). Nach mikrobiellen Infektionen werden eine Reihe weiterer Abwehrmechanismen in Pflanzenzellen induziert, die durch die Erkennung spezifischer Signalmoleküle (Elicitoren) ausgelöst werden. Dabei kann zwischen externen Elicitoren, die von den Pathogenen selbst stammen, und endogenen Elicitoren, die aus den Zellwänden der Pflanze durch hydrolytische Enzyme freigesetzt werden, unterschieden werden. [45] Die so genannte „Hypersensitive Reaktion“ führt wenige Stunden nach dem Pathogenkontakt zum lokalen Absterben der pflanzlichen Zellen am Infektionsort. [44] Ein Zusammenhang zwischen der Hypersensitiven Reaktion und anderen Abwehrmechanismen konnte nicht nachgewiesen werden. [46] Mit der Ausprägung der Hypersensitiven Reaktion erfolgt die *de novo*-Synthese zahlreicher Proteine. Dazu gehören Enzyme wie Phenylalanin-Ammoniak-Lyase, Zimtsäure-4-Hydroxylase (Enzyme des Phenylpropanstoffwechsels), die die Synthese von Ligninvorstufen katalysieren. Ebenso wird eine Vielzahl von „pathogenesis related

proteins“ (RP-Proteine sind in gesunden Pflanzen nicht nachweisbar) und „defence related proteins“ akkumuliert. Bisher wurden insgesamt 14 PR-Protein-Familien klassifiziert, dazugehören z. B.  $\beta$ -1,3-Glucanasen, Chitinasen und Peroxidasen. [43, 47] Zu den „defence related proteins“ gehören die Lipoxygenasen, die an der pflanzlichen Abwehr einerseits durch die Synthese von Signalmolekülen, z. B. Jasmonsäure (Phytohormon), und andererseits durch die Bildung antimikrobieller Verbindungen, wie z. B. C6-Aldehyden, beteiligt sind. [43, 48, 49]

Nach Pathogenbefall (z. B. mikrobielle Infektionen) oder Gewebeverletzungen werden in den Pflanzenzellen Abwehrmechanismen induziert, welche durch die Erkennung spezifischer Signalmoleküle ausgelöst werden. Durch die Erzeugung sekundärer Signalmoleküle erfolgt die Regulation der Abwehrgenexpression sowie eine Verstärkung der Signale. Sekundäre Signalmoleküle sind beispielsweise Salicylsäure, Jasmonsäure und Ethylen. [43, 50]

## **2.4 Enzyme des Lipidabbaus**

### **2.4.1 Lipase (EC 3.1.1.3)**

Das Enzym Lipase (Triacylglycerol acylhydrolase EC 3.1.1.3) katalysiert die Hydrolyse von Triacylglyceriden. Es entstehen Glycerin und freie Fettsäuren. Lipasen hydrolysieren nur emulgierte Acyllipide, da sie an der Grenzschicht Wasser/Lipide aktiv sind.

Lipase wurde in der Literatur als membrangebundens, nicht gut wasserlösliches Enzym beschrieben. [51, 52] Die wasserlösliche Fraktion der Lipase war Gegenstand zahlreicher Untersuchungen, jedoch stellte sich v. a. die unlösliche Fraktion der Lipase als hitzestabiler heraus. [53] Aus diesem Grund kann ihr eine Bedeutung im Brauprozess zugeschrieben werden. Für die Lipase sind zwei Temperturoptima in der Literatur zu finden, zwischen 35 und 40 °C sowie zwischen 65 und 70 °C. Das pH-Optimum liegt im neutralen Bereich zwischen 6,8–7,0. [52, 54-58]

### 2.4.2 Peroxidasen (EC 1.11.1.7)

Peroxidasen überführen die durch Lipoxygenierung entstandenen toxischen Hydroperoxyfettsäuren unter Beibehaltung der Stereokonfiguration in die entsprechenden Hydroxyfettsäuren. Peroxidasen sind meist Cytochrom P-450 oder Häm-abhängig und benötigen für ihre katalytische Aktivität neben Co-Faktoren Reduktionsäquivalente (z. B. Glutathion, Ascorbinsäure). [59-61]

Reaktionsmechanismus:  $\text{H}_2\text{O}_2 + 2 \text{RH}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + (\text{R} + \text{RH}_2)$  oder  $(\text{HR}-\text{RH})$

In Gerste wurden sechzehn verschiedene Isoenzyme der Peroxidase und in Grünmalz zwanzig, von denen fünfzehn den Darrprozess überdauern, identifiziert. ANTROBUS et al. stellten fest, dass nach 1 h Maisarbeit bei 65 °C noch 52 % der Peroxidase-Aktivität vorhanden und ca. 45 % auch nach Aufheizen auf 76 °C nachweisbar ist. Erst mit Beginn des Kochens ist keine Aktivität mehr feststellbar. Folglich sind einige dieser Enzyme sehr hitzestabil. [18, 62, 63] Die pH-Optima wurden von den meisten Autoren sehr unterschiedlich im Bereich von 3–7 in Abhängigkeit von den Isoenzymen, dem vorliegenden Medium und der Reaktionspartner beschrieben. [64-66] BILLAUD et al. referierten, dass das pH-Optimum dieses Enzyms aus Gerstenkaltauszug zwischen 4,0–5,5 liegt. [67]

### 2.4.3 Lipoxygenasen in Pflanzen

Die Bedeutung oxygenierter Fettsäuren bei pflanzlichen Wund- und Abwehrreaktionen, der so genannten Oxylipine, und ihre Funktion bei pflanzlichen Wund- und Abwehrreaktionen ist nicht vollends aufgeklärt. Bei tierischen Systemen sind diese besser erforscht und an Entzündungs- und Immunprozessen sowie hypersensitiven Reaktionen beteiligt. [43, 45] Der erste Schritt der Oxylipinsynthese ist die autoxidative oder enzymatische Bildung von Hydroperoxid-Derivaten vielfach ungesättigter Fettsäuren. [68, 69] An der Bildung sind nicht Häm-haltige Lipoxygenasen und Häm-haltige  $\alpha$ -Dioxygenasen beteiligt. [43, 70, 71]

Pflanzliche LOXen bestehen aus einer einzelnen Polypeptidkette. Der Vergleich der Aminosäuresequenzen zeigt einen hohen Homologiegrad zwischen den einzelnen LOXen verschiedener Pflanzen, jedoch keine Verwandtschaft zu anderen Proteinen. [72] Daher erfolgt eine weitere Einteilung anhand differenzieller Sequenzhomologien. Dabei werden die Enzyme ohne chloroplastidärem Transitpeptid (LOX1-Typ, ca. 75 %ige Sequenzhomologie untereinander) und mit chloroplastidärem Transitpeptid (LOX2-Typ, 35 %ige Sequenzhomologie untereinander) unterschieden, wobei beide Familien einen erhöhten Grad an Sequenzhomologien aufweisen. [73, 74] Die üblicherweise in Gerste und Malz als LOX1 und LOX2 bezeichneten Lipoxygenasen sind beide dem LOX1-Typ zugeordnet. [75]

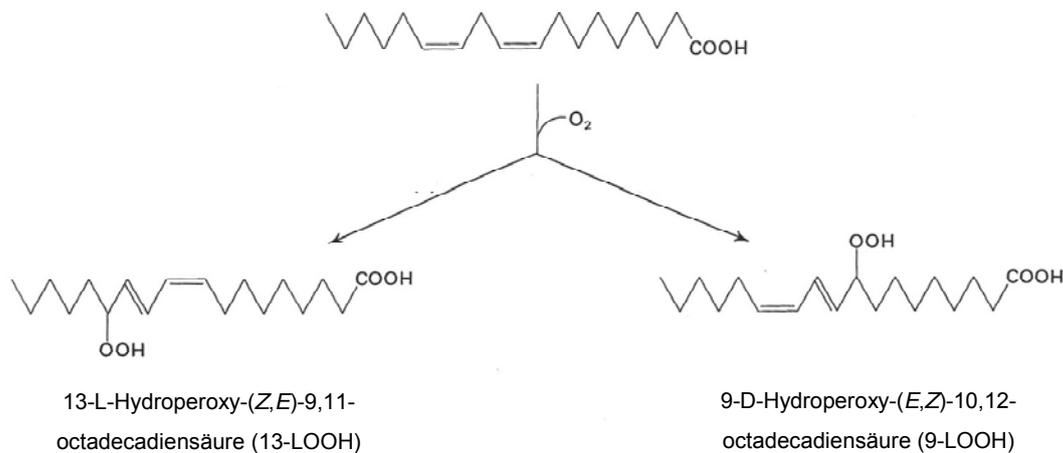
Trotz jahrelanger Forschung ist die physiologische Bedeutung der LOX immer noch Gegenstand neuerer Untersuchungen. Grund dafür ist die Homologie, die, wie beschrieben, keine nachweisbare Verwandtschaft gegenüber anderen Proteinstrukturen sowie das Vorkommen in Pflanzen als Multigenfamilie aufweist. Beispielsweise konnten bei der Sojabohne 12 verschiedene cDNAs isoliert werden [73], bei der Kartoffel ca. 30–40 verschiedene LOX-Gene [76]. Da sowohl ein entwicklungspezifisches Programm als auch abiotischer bzw. biotischer Stress die Regulation der Genexpression der LOX bestimmt, ist einer spezifischen LOX-Form jeweils eine physiologische Funktion zuzuordnen. Das Vorkommen von LOX in einer Pflanze variiert zwischen den verschiedenen Pflanzenteilen, dem Entwicklungsstadium der Pflanze und den äußeren Einflüssen. [71] Bei intrazellulären LOXs erfolgt die Einteilung zusätzlich in lösliche und an Membranen gebundene LOXs. Lösliche LOXs werden v. a. im Keimling oder im reifenden Samen, lokalisiert im Cytosol, gebildet. In weiteren pflanzlichen Entwicklungsstadien sind sie v. a. in den Blättern, den Vakuolen, im Zellkern und den Chloroplasten zu finden. Chloroplastidären LOXs konnte eine Beteiligung an der Biosynthese von Jasmonaten eindeutig nachgewiesen werden. Partikuläre LOXs wurden in mehreren Entwicklungsstadien sowie in verschiedenen Organen gefunden. Im Keimling liegen sie an der Plasmamembran und an die Membran der Lipidkörper gebunden vor, „in Blättern, Blüten und Früchten wurden sie an der Hüll-

und Thylakoidmembran gefunden“. [77] FEUSSNER et al. beschreiben eine im sehr frühen Stadium der Keimung (den ersten 24 Stunden) *de novo* synthetisierte LOX. Gerstenblätter zeigen nach Behandlung mit Jasmonsäure oder ihrem Methyl ester einen Seneszenz-ähnlichen Phänotyp, wobei sich mindestens drei der Jasmonat-induzierten Proteine als LOXs (92, 98 und 100 kDa) erwiesen. [78]

### 2.4.3.1 Lipoxygenase-Reaktion

Der pflanzliche Lipoxygenase-Pathway ist in vielerlei Hinsicht das equivalente Gegenstück zur Arachidonsäure-Kaskade bei Tieren. Lipoxygenasen (Linoleat: Sauerstoff Oxidoreduktase, EC 1.13.11.12) wurden in Vertebraten, Algen, Pilzen und höheren Pflanzen nachgewiesen. Sie gehören zur Familie der Dioxygenasen und enthalten ein über Aminoseitenketten gebundenes Eisenatom ( $\text{Fe}^{2+}$ -haltige, nicht-Häm Dioxygenasen). Sie katalysieren die regiospezifische Umsetzung von Fettsäuren mit einem (Z,Z)-1,4-Pentadiensystem und molekularem Sauerstoff unter Bildung von (Z,E)-1,3-Hydroperoxyfettsäuren. [72, 79] Dabei entsteht stereospezifisch das Hydroperoxid nur in der S-Konfiguration. [72, 77] Die LOXs werden nach ihrer Regiospezifität eingeteilt. Die häufigsten Substrate sind Linolsäure und  $\alpha$ -Linolensäure. Dementsprechend werden die LOXs nach den aus der LOX-Reaktion entstehenden Regioisomeren, der Position 9 und 13, eingeteilt. [80, 81] Es entstehen somit (S)-9-Hydroperoxy-(E,Z)-10,12-octadecadiensäure oder (S)-13-Hydroperoxy-(Z,E)-9,11-octadecadiensäure mit Linolsäure als Substrat und (S)-9-Hydroperoxy-(E,Z,Z)-10,12,15-octadecatriensäure oder (S)-13-Hydroperoxy-(Z,E,Z)-9,11,15-octadecatriensäure aus Linolensäure.

Abbildung 6 stellt die entstehenden Enantiomere aus der Reaktion der Typ-I-Lipoxygenase dar. Die Substrate pflanzlicher Lipoxygenasen sind v. a. Linol- und  $\alpha$ -Linolensäure. [69, 71, 74, 80, 82] Die Regiospezifität kann jedoch in Abhängigkeit von den Reaktionsbedingungen, wie z. B. dem pH-Wert, variieren. Daher werden pflanzliche LOXs zusätzlich basierend auf den Homologien in ihren cDNA-Sequenzen unterschieden. [79, 82]



**Abb. 6: Reaktion der Typ-I-Lipoxygenase [30, 72]**

Abbildung 7 zeigt ein Modell der Lipoxygenase-Katalyse (RH/Linolsäure, LOOH/Hydroperoxid der Linolsäure). Demnach beginnt die Aktivierung des Enzyms mit der Oxidation seines Eisenatoms. Dies geschieht z. B. durch ein Hydroperoxid, welches das  $\text{Fe}^{2+}$  in seine aktive  $\text{Fe}^{3+}$ -Form oxidiert. Anschließend setzt ein Katalysezyklus ein, der größere Mengen an Fettsäurehydroperoxiden bildet.

Nach der Bindung eines Substratmoleküls (Linolsäure) im aktiven Zentrum beginnt die eigentliche Reaktion mit der Abstraktion eines Protons von einer doppelt allylständigen Methylengruppe der mehrfach ungesättigten Fettsäure. Dabei entsteht ein Fettsäureradikal. Dies hat die Reduktion des Eisens nach  $\text{Fe}^{2+}$  zur Folge. Durch Bindung eines Sauerstoffs an das Fettsäureradikal entsteht ein Fettsäurehydroperoxyradikal. Der Zyklus wird durch die Bildung eines Hydroperoxidanions unter Oxidation des Eisens fortgesetzt. Parallel dazu verläuft also die Reaktivierung des Eisenatoms in die  $\text{Fe}^{3+}$ -Form durch stöchiometrische Mengen eines beliebigen Peroxides. Das Hydroperoxidanion wird protoniert und das entstandene Fettsäurehydroperoxid verlässt das aktive Zentrum. Das Eisen befindet sich wieder in der Oxidationsstufe  $\text{Fe}^{3+}$  (der Ausgangssituation) und ein neuer Katalysezyklus kann beginnen. [83]

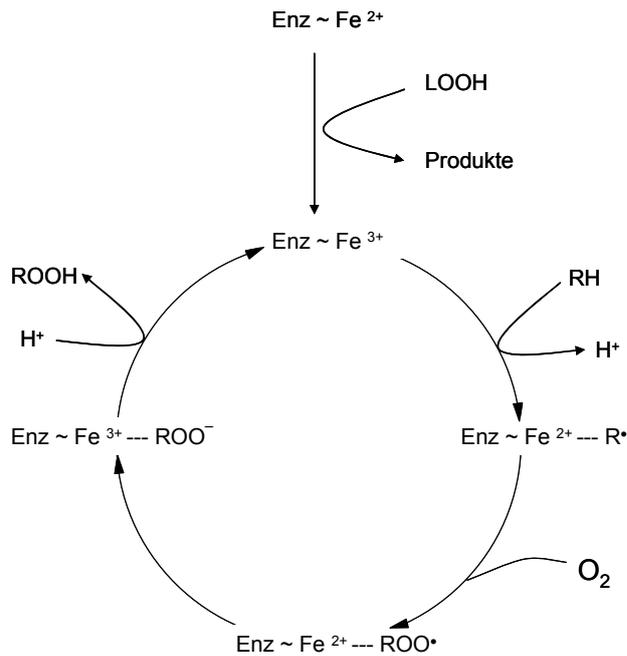
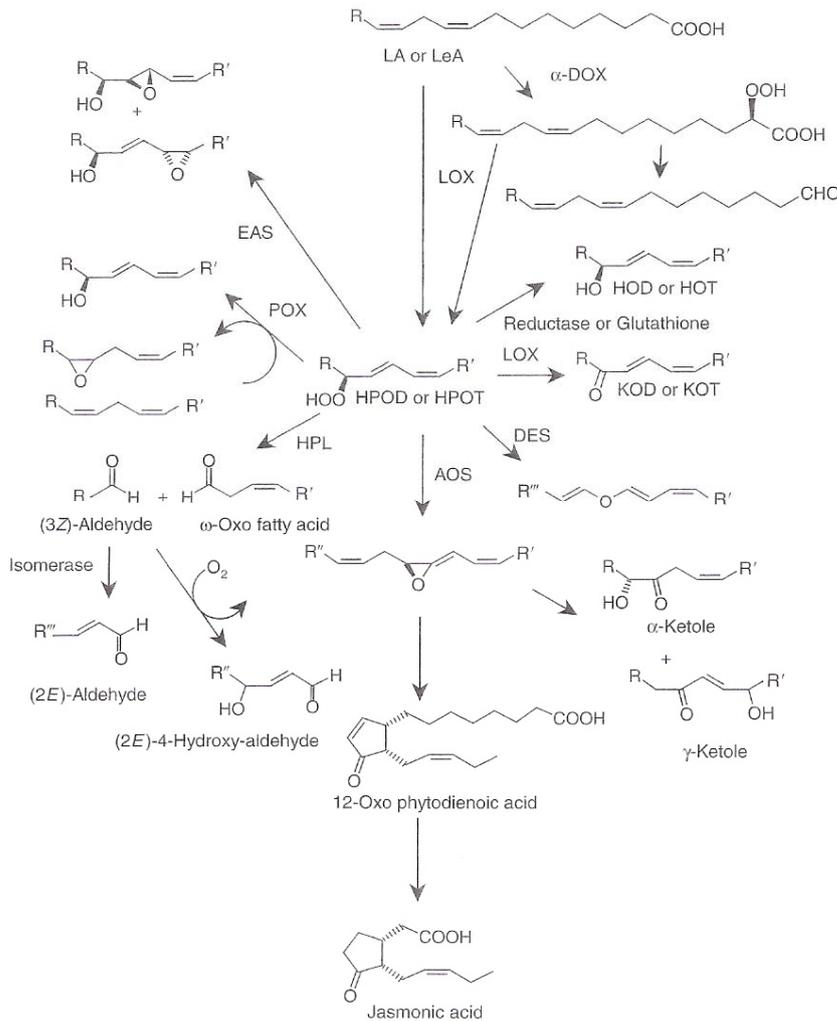


Abb. 7: Lipoxygenase-Katalyse [42, 77, 84, 85]

### 2.4.3.2 Der Lipoxygenase Reaktionsweg

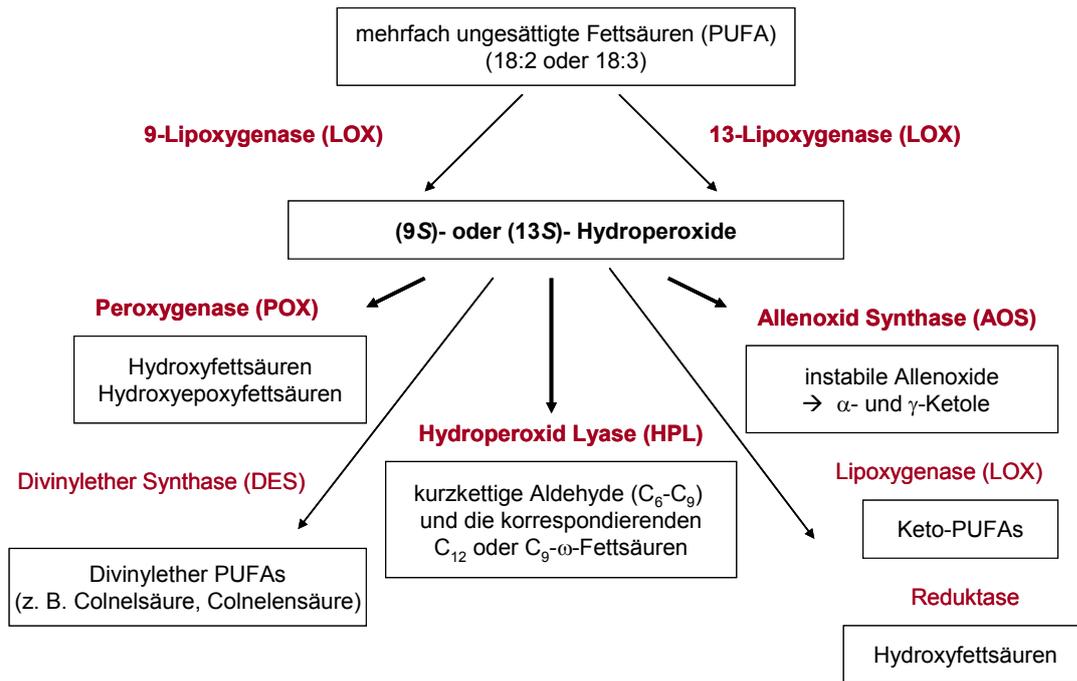
Die Umsetzung von PUFAs (mehrfach ungesättigte Fettsäuren) über einen durch das Enzym Lipoxygenase katalysierten Schritt und die folgenden Reaktionen werden als Lipoxygenase-Reaktionsweg (LOX Pathway) bezeichnet. Die Produkte der Lipoxygenase-Reaktion, die gebildeten Fettsäurehydroperoxide, werden sehr rasch durch eine Vielzahl von Enzymreaktionen weiter umgesetzt. Die enzymatischen Reaktionswege sowie die Funktionen der entstandenen Abbauprodukte im Abwehrsystem der Pflanze wurden von zahlreichen Autoren untersucht und beschrieben. [48, 71, 79, 81, 86]

Die Lipoxygenase-Reaktion wurde bereits im vorangegangenen Abschnitt 2.4.3.1 ausführlich behandelt. Unter bestimmten Bedingungen, wie z. B. Sauerstoffmangel, sind LOXen ebenfalls in der Lage die O-O-Bindung der Hydroperoxid-Derivate zu spalten und Alkoxyldradikale zu bilden, die sich dann zu Ketodien- und Ketotrien-Verbindungen umlagern. [69, 83] Abbildung 8 zeigt eine Übersicht des Lipoxygenase-Reaktionsweges.



**Abb. 8: Der Lipoxygenase-Reaktionsweg [69, 83]**

In der Literatur sind sieben Enzymfamilien in Pflanzen beschrieben, die Fettsäurehydroperoxide umzusetzen vermögen und in Folge dessen um die entstandenen LOX-Produkte konkurrieren. Abbildung 9 stellt die wichtigsten Enzyme und Abbauprodukte im Überblick dar.



**Abb. 9: Enzyme des Lipidabbaus**

| <u>Ehemalige Bezeichnung in der Literatur:</u> | <u>Aktuelle Bezeichnung in der Literatur:</u> |
|--|---|
| Hydroperoxid Isomerase                         | Peroxygenase (POX)                            |
| Hydroperoxid Dehydratase                       | Allenoxid Synthase (AOS)                      |
| Hydroperoxid Isomerase                         | Hydroperoxid Lyase (HPL)                      |

### Allenoxid Synthase (AOS)

Dieses Enzym gehört zur Familie der Cytochrom-P450-Enzyme, wobei die meisten AOS eine Substratspezifität für 13-Hydroperoxide besitzen und nur das (S)-Isomer umsetzen. [87, 88] Die Allenoxid Synthase dehydriert Hydroperoxide, woraus ein instabiles Allenoxid resultiert, welches in Gegenwart von Wasser in  $\alpha$ - und  $\gamma$ -Ketole hydrolysiert. Aus diesen Ketolen können Dihydroxyfettsäuren entstehen. [30] Das Wundhormon Jasmonsäure entsteht aus dem (S)-13-Hydroperoxid der Linolensäure. Der Bildungsweg beginnt mit einer Allenoxid-Synthase-Katalyse, mit anschließender Allenoxid Cyclase- und Reduktase-Reaktion und folgender dreimaliger  $\beta$ -Oxidation. Es entsteht (R,S)-3,7-Jasmonsäure (JA), die spontan zur (R,R)-3,7-JA epimerisiert. Beide sind biologisch aktiv und werden mit dem Begriff Jasmonate bezeichnet. [43, 69, 87-92] Während LOX, AOS und AOC in den Chloroplasten lokalisiert sind, befinden sich die Reduktase und die  $\beta$ -

Oxidationszyklen in den Peroxisomen. [69] Abbildung 10 zeigt den Reaktionsweg der Jasmonat-Kaskade.

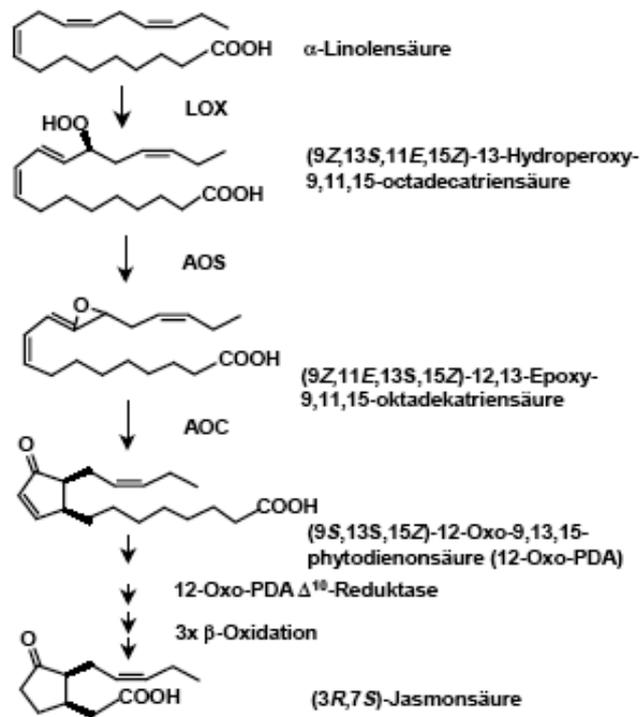


Abb. 10: Die Jasmonat-Kaskade als ein möglicher Stoffwechselweg des AOS-Reaktionsweges [77]

### Hydroperoxid Lyase (HPL)

Die HPL gehört ebenfalls zur Familie der Cytochrom-P450-Enzyme. Die Hydroperoxid Lyase spaltet die (S)-Isomere der Hydroperoxide in 3-(Z)-Aldehyde und  $\omega$ -Oxofettsäuren. 13-HPLs spalten 13-HPOD und 13-HPOT in 3-(Z)-Hexenal bzw. 3-(Z)-Hexenal und 9-(Z)-12-Oxo-9-dodecansäure. Eines der Endprodukte ist die Traumatinsäure (aus 9-(Z)-12-Oxo-9-dodecansäure). Daneben existiert eine zweite Familie der HPL, die neben der Spaltung von 13-Hydroperoxiden auch die 9-Isomere katalysiert. Diese Enzyme weisen eine höhere Enzymhomologie zur AOS-Enzymfamilie auf als zu den 13-HPLs. Dabei entstehen 3-(Z)-Nonenal und 3,6-(Z,Z)-Nonadienal. Die entstandenen 3-(Z)-Aldehyde werden durch Isomerisierung und eine Alkoholdehydrogenase zu 3-(Z)- bzw. 2-(E)-Alkoholen oder mit Traumatinsäure zu Hydroxyaldehyden und 9-Hydroxytraumatinsäure umgesetzt. [43, 69, 77, 93] Abbildung 11 zeigt den Reaktionsweg der Hydroperoxid-Lyase.

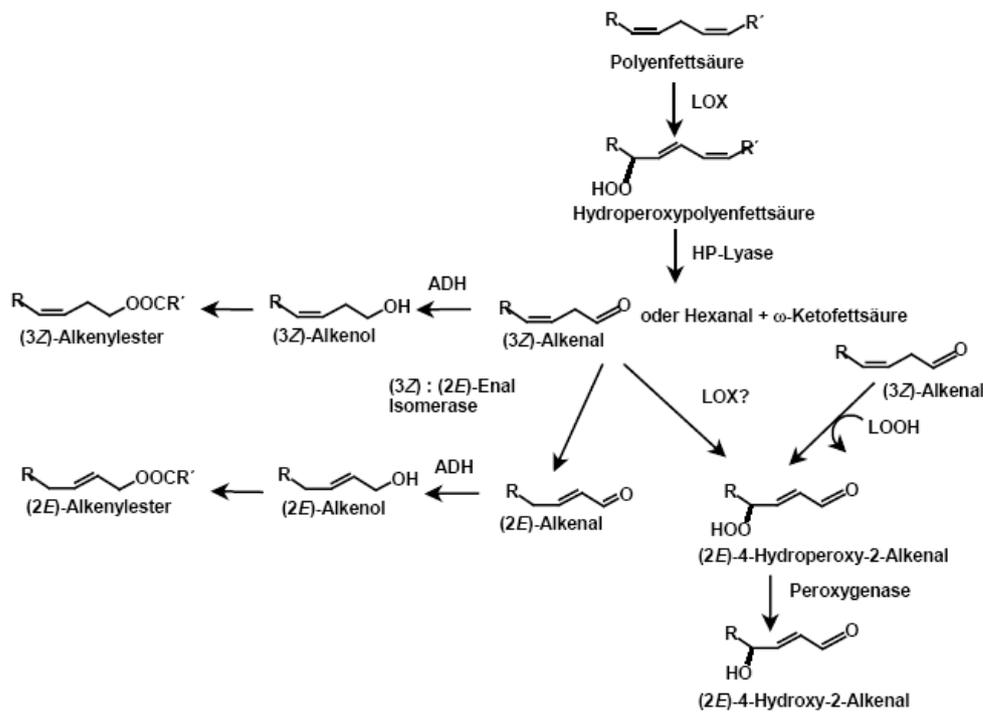


Abb. 11: Der Metabolismus von Aldehyden in Pflanzen (HPL-Reaktionsweg) [77]

### Divinylether Synthase (DES)

Die Divinylether Synthase ist das dritte Enzym aus der Familie der Cytochrom-P450-Enzyme und bildet aus Hydroperoxyfettsäuren Divinyletherfettsäuren. Dabei werden 9-HPOD und 9-HPOT zu Colnensäure bzw. Colnelensäure umgesetzt und aus 13-HPOD und 13-HPOT entsteht Etherolsäure bzw. Etherolensäure. [43, 69, 94, 95]

AOS, HPL und DES sind Monooxygenasen mit einem Häm-Molekül als prosthetische Gruppe. Sie benötigen allerdings keinen molekularen Sauerstoff und NADPH, sondern Acylhydroperoxide als Sauerstoffdonor und Substrat, in denen eine neue Kohlenstoff-Sauerstoff-Bindung gebildet wird. Sie gehören der Cytochrom-P450 Unterfamilie CYP74 an (charakterisiert durch eine geringe Affinität zu Kohlenmonoxid). [92, 95]

### Peroxygenasen (POX)

Die Peroxygenase ist ein membrangebundenes Cytochrom-P450-Enzym. Peroxygenasen katalysieren eine intramolekulare Umlagerung eines peroxidisch gebundenen Sauerstoffatoms von Hydroperoxyfettsäuren auf Doppelbindungen ungesättigter Fettsäuren. Ebenso kann die Übertragung auf die Doppelbindung des Hydroperoxides erfolgen (intermolekulare Umlagerung). Dabei entstehen Epoxyhydroxy-, Epoxy- und Monohydroxyfettsäuren. Durch weitere enzymatische Hydrierung der Epoxygruppen durch Epoxyhydrolase können Di- und Trihydroxyfettsäuren entstehen. [49, 96-99]

### Epoxyalkohol Synthase (EAS)

Der Epoxyalkohol-Synthaseweg führt zur Synthese von Epoxyhydroxiden und Trihydroxyfettsäuren. Dieses Enzym katalysiert die Bildung von Epoxyalkoholen. 9-(S)-HPOD und 9-(S)-HPOT werden jeweils spezifisch durch intrazelluläre Sauerstoffumlagerung zu  $\alpha,\beta$ - und  $\gamma,\delta$ -Epoxyalkoholen umgewandelt. Diese werden entweder hydrolytisch oder enzymatisch über Epoxyalkohol-Hydrolase in Trihydroxyfettsäuren umgewandelt. [70]

### Hydroperoxid Reduktase

Dieses Enzym katalysiert die Bildung von Hydroxyfettsäuren mit konjugiertem Diensystem. In der Literatur wurde bisher nur die pflanzliche Gluthation-Peroxidase beschrieben, die Hydroperoxide zu den entsprechenden Monohydroxyfettsäuren reduziert. [68] Abbildung 12 zeigt den Reaktionsweg der Hydroperoxid-Reduktase.

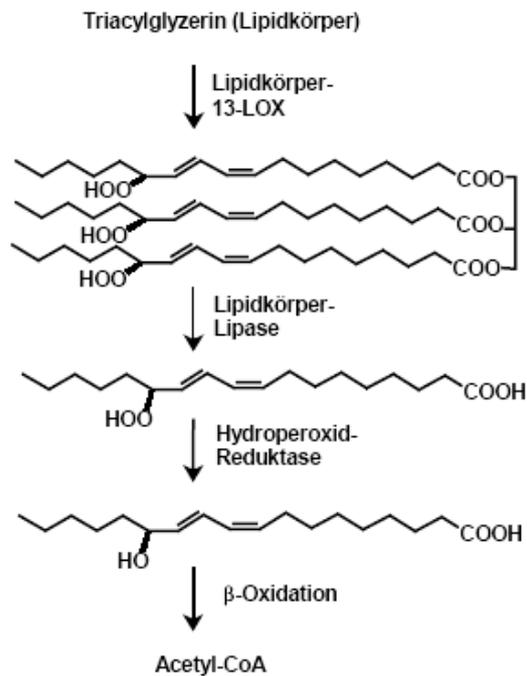


Abb. 12: Modell des Abbaus von PUFAs in Pflanzen (Reduktase-Reaktionsweg) [77]

### 2.4.3.3 Physiologische Eigenschaften der Lipoxygenasen und Aufgabe der Oxylipine in der pflanzlichen Pathogenabwehr

Oxylipine sind Oxidationsprodukte mehrfach ungesättigter Fettsäuren, die sich in Pflanzen hauptsächlich von der  $\alpha$ -Linolensäure ableiten. Pflanzliche Oxylipine (oxidierte Fette) spielen beim Menschen und allen anderen Säugetieren eine zentrale Rolle bei entzündlichen Prozessen und haben im Pflanzenreich eine wichtige Funktion bei der Abwehr von Schädlingen und Erkrankungen. Daher haben die Lipoxygenasen sowie die Produkte des Lipoxygenase-Reaktionsweges verschiedene physiologische Eigenschaften während der pflanzlichen Entwicklung, wie z. B.: [68, 71]

- Samenkeimung
- Knollenbildung z. B. bei *Solanum tuberosum*
- Seneszenzvorgänge

LOX-Produkte sind aber ebenso an zahlreichen Stressantworten beteiligt, wie z. B.:

- Wundantwort durch Förderung der Zellteilung (Traumatin und Traumatinsäure)
- mechanische Verwundung sowie Fraßschäden (Jasmonate und ihre Octadecan Vorstufen) [43]

Die enzymatische Oxygenierung von einfach und mehrfach ungesättigten Fettsäuren unter Einführung chiraler Stereozentren ist, wie beschrieben (siehe Abschnitt 2.4.3.2), der Initialschritt für die Bildung zahlreicher biologisch aktiver Verbindungen wie Jasmonate, Epoxyfettsäuren, Di- und Trihydroxyfettsäuren und Lactonen aus verschiedensten pflanzlichen, tierischen und mikrobiellen Organismen (Bildung von Signalmolekülen und Phytoalexinen). [80, 81, 100] Die LOX-Reaktion katalysiert in diesem Zusammenhang die Bildung von Hydroperoxiden, die die Substrate für die beschriebenen Enzyme darstellen. In *Hordeum vulgare* wird nach einer Salicylsäure-Behandlung bevorzugt die Hydroperoxid Reduktase stimuliert, wobei hauptsächlich 9,11,13,15-(Z,E,S,Z)-13-Hydroxy-9,11,15-octatriensäure entsteht. [101]

## **2.5 Einflussfaktoren auf die Geschmacksstabilität während der Malz- und Bierbereitung**

### **2.5.1 Enzymatische Faktoren**

Neben den bereits Vorgestellten sind weitere Enzyme bekannt, v. a. aus der Klasse der Oxidoreduktasen, die im Rahmen des Alterungsprozesses des Bieres von Bedeutung sind. Polyphenoloxidase und Peroxidase katalysieren  $O_2$ - oder  $H_2O_2$ -abhängige Oxidationsreaktionen von endogenen Polyphenolen in reaktive Chinone und begünstigen somit sekundäre Oxidationsreaktionen, die zur Bieralterung beitragen. Peroxidase (vgl. Abschnitt 2.4.2) ist vermutlich in der Lage eine oxidative Vernetzung zwischen Proteinen und/oder löslichen Pentosanen auszubilden, welche anschließend zu Läuter- und Filtrationsschwierigkeiten führen kann. [18] Die Rolle der Polyphenoloxidase wird in der Literatur sehr gegensätzlich beschrieben. Einerseits gilt sie als hitzestabiles Enzym, dessen Aktivität während des Maischprozesses weitgehend konstant bleibt. Laut Literatur bedarf es

Temperaturen von größer 85 °C, um eine Schädigung zu erzielen. [102, 103] Andere Autoren berichten, dass die Aktivität der Polyphenoloxidase in Gerste sehr gering ist und im Laufe des Mälzungsprozesses nochmals absinkt. Nach dem Darrprozess konnte keine Aktivität mehr nachgewiesen werden. Dies führt andererseits zu der Schlussfolgerung, dass dieses Enzym im Brauprozess vernachlässigbar zu sein scheint. [18, 59, 103]

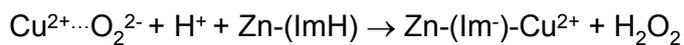
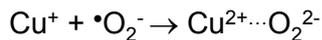
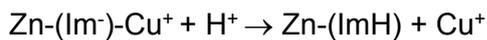
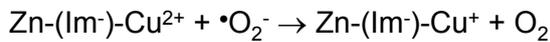
Das Enzym Superoxid Dismutase (SOD) ist eines der wichtigsten antioxidativen Enzyme, da es in der Lage ist das Medium vor Superoxidradikalen zu schützen. Die Sauerstoffradikalbildung ist als Initiator oder Promotor des Alterungsprozesses bekannt. Besonderes Interesse gilt hierbei den Superoxidradikalen ( $\cdot\text{O}_2^-$ ), da ihre Bildung den Initialschritt des oxidativen Stresses, nämlich die Übertragung eines Elektrons auf das Sauerstoffmolekül, darstellt. Für den Abbau der Superoxidradikale sind sauerstoffaffine Metallionen, deren Wertigkeit sich leicht ändern kann, erforderlich. Ebenso muss SOD gegenüber dem Radikalanion resistent sein. Andere  $\text{O}_2$ -aktivierende Zentren (z. B. Häm-Systeme, Nicht-Häm-Dimere, Kupfer/Cofaktor-Komplexe, Cytochrom C-Oxidase) enthalten mindestens zwei wechselwirkende, redoxaktive Zentren, um die Einelektronenreduktion von  $\text{O}_2$  zu  $\cdot\text{O}_2^-$  zu umgehen. Besonders Enzyme mit Häm- oder nicht-Hämeisen-enthaltenden prosthetischen Gruppen (enzymatische Katalyse durch Übergangsmetalle) dienen der Bindung und Reduktion oder auch der Aktivierung des Sauerstoffmoleküls sowie des Wasserstoffperoxids. Solche Enzyme werden als Oxidasen bzw. Oxygenasen bezeichnet und spielen bei der Biosynthese vieler Naturstoffe eine Rolle. [42, 104]

### 2.5.1.1 Superoxid Dismutase (EC 1.15.1.1)

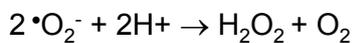
Das Enzym Superoxid Dismutase katalysiert die Umwandlung von Superoxidradikalen zu Sauerstoff und Wasserstoffperoxid. Die Reaktion ist in Abbildung 13 zusammengefasst. Das bei der Reaktion gebildete Wasserstoffperoxid wird über Katalasen zu Sauerstoff und Wasser disproportioniert.

Weitere Enzyme wie Peroxidasen können das Wasserstoffperoxid ebenfalls abbauen.

**Hypothetischer Mechanismus am aktiven Zentrum:**



**Gesamtreaktion:**



|     |   |
|-----|---|
| ImH | Imidazol-Ring eines Histidin-Restes                             |
| Zn  | dreifach koordiniertes Zn <sup>2+</sup> -Zentrum (2 His, 1 Asp) |
| Cu  | dreifach koordiniertes Kupfer-Zentrum (3 His)                   |

**Abb. 13: Mechanismus im katalytischen Zentrum [104]**

Die im Cytoplasma von Eukaryonten lokalisierte SOD enthält im katalytischen Zentrum ein Kupfer- und ein Zinkatom. Es sind auch andere Formen von SOD bekannt, welche anstelle von Kupfer und Zink, Eisen (Bakterien) oder Mangan (mitochondriale-SOD, Bakterien) enthalten. [104]

In Gerste konnten drei Isoenzyme identifiziert werden, gebunden an CuZn-SOD, Mn-SOD oder Fe-SOD. Die Superoxid-Dismutase-Aktivität steigt während des Mälzungsprozesses stark an, wird jedoch beim Darrprozess auf ca. 50 % minimiert. [18] Das pH-Optimum liegt zwischen 5 und 8. [105] Während des Maischprozesses ist nach 15–30 Minuten bei 65 °C keine Aktivität mehr nachweisbar. [60, 63] BOVIN stellte eine vollständige Inaktivierung bereits bei 62 °C fest. Die Superoxid Dismutase gehört neben der Peroxidase und der Katalase zu den antioxidativ wirkenden Enzymen. Da die SOD jedoch während des Maischprozesses eine rasche Inaktivierung erfährt, kann ihr im Brauprozess nur

wenig Bedeutung bezüglich dem Schutz vor Autoxidation zugesprochen werden. [18]

### **2.5.1.2 Katalase (EC 1.11.1.6)**

Die Katalase enthält vier Hämgruppen, in welchen sich  $\text{Fe}^{3+}$  befindet. In der Pflanze ist die Hauptaufgabe der Katalase die Zerstörung des Zellgifts Wasserstoffperoxid. Ihre Katalysewirkung betrifft die Redoxreaktion zwischen zwei  $\text{H}_2\text{O}_2$ -Molekülen, also eine Disproportionierung.

Reaktionsmechanismus:  $2 \text{H}_2\text{O}_2 \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$

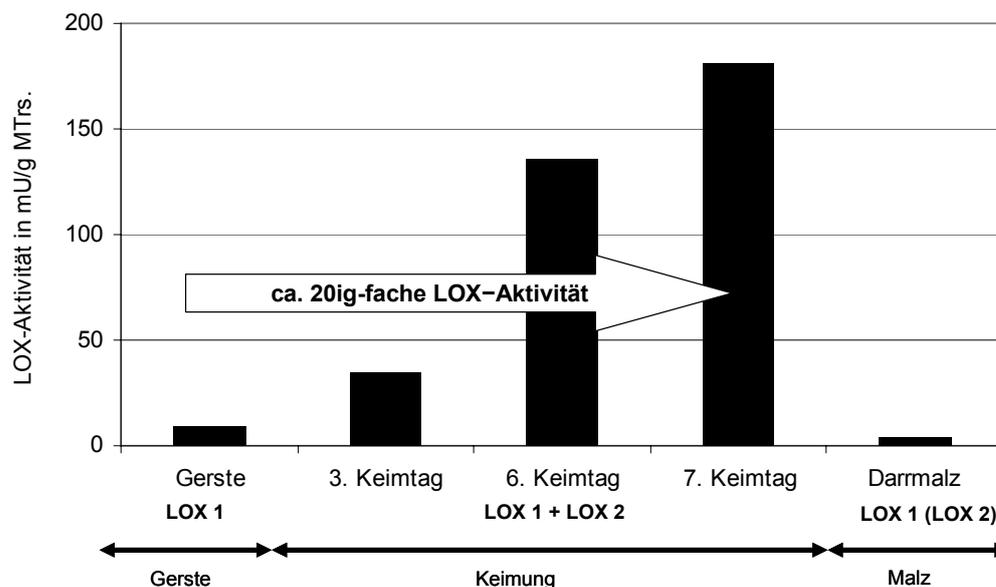
Wenn geringe Konzentrationen an  $\text{H}_2\text{O}_2$  vorhanden sind, kann die Katalase ähnlich dem Reaktionsmechanismus der Peroxidase funktionieren (vgl. Abschnitt 2.4.2). Das pH-Optimum der Katalase liegt zwischen 3 und 9. Allerdings ist die Katalase extrem hitzeempfindlich und wird bereits während des Darrprozesses nahezu vollständig zerstört. Die Katalase besitzt zwar ein antioxidatives Potential während des Mälzens, spielt jedoch während des Maischprozesses keine Rolle. [63, 105]

### **2.5.1.3 Bedeutung der Lipase und Lipoxygenase im Mälzungs- und Brauprozess**

Die Lipase zeigt bereits in der Gerste eine auffallend hohe Aktivität. Die Lipase-Aktivität steigt während der Keimung umso stärker an, je intensiver der Keimungsprozess abläuft (höhere Keimgutfeuchte 44–48 % und Keimtemperatur 18 °C, längere Keimzeit). Beim Maischprozess konnte bei Temperaturen um 67–70 °C eine fast vollständige Aktivität nachgewiesen werden. [52, 57] Da beide LOX Isoenzyme in der Lage sind, veresterte Fettsäuren umzusetzen und sich nicht nur auf frei vorliegende Substrate begrenzen und auch die Peroxidation veresterter Linol- bzw. Linolensäuren aus Speicherfett katalysieren sowie die Umsetzung von

Phospholipiden, können diese anschließend von Lipasen aus den Triacylglycerolen freigesetzt werden. Die Lipase ist ein ziemlich hitzestabiles Enzym und daher von großem Interesse, da sie aufgrund ihrer Thermostabilität während des Maischprozesses diese Lipidoxidationsprodukte freisetzen kann. Ebenso sind in der Literatur Hinweise auf membrangebundene LOX zu finden, die ebenfalls eine sehr hohe Thermostabilität besitzen sollen. [106]

Die erste Erwähnung eines Lipoxygenase-Enzyms in Soja erfolgte 1932 von ANDRE und HOU. [107] Den ersten Nachweis von Gerstenlipoxygenase erbrachten FRANKE et al. 1959 [108]. YABUUCHI entdeckte 1976 [109] das zweite LOX-Isoenzym in keimender Gerste. Unter dem Aspekt der Geschmacksstabilität des Bieres war die Entwicklung der LOX-Aktivität während der Keimung, des Schwelkens und des Darrens sowie der Lagerung des Malzes Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Abbildung 14 zeigt den ungefähren Verlauf der LOX-Aktivität über den Mälzungsprozess. [18, 30, 53, 110-119]



**Abb. 14:** Graphische Darstellung der tendenziellen Entwicklung der LOX-Aktivität während der Malzbereitung (zusammengestellt aus durchschnittlichen Angaben der angegebenen Literaturstellen)

Bei nahezu allen Untersuchungen wurde eine starke Beeinflussung der LOX-Entwicklung und LOX-Charakteristik in Abhängigkeit von Sorte und Standort

festgestellt. [114] Die beiden LOXs entwickeln sich jedoch unterschiedlich während der Keimung. Das Isoenzym LOX1 liegt bereits in Gerste vor, hingegen wird LOX2 als *de novo*-Enzym während der Keimung gebildet. Bei ersten Untersuchungen der Lipoxygenase in keimender Gerste wurde angenommen, dass LOX1 nur 9-HPOD [120] und LOX2 nur 13-HPOD bildet. [121-123] Zahlreiche Literaturstellen widerlegen aber diese Annahme. [109, 113] Neueste Erkenntnisse legen dar, dass LOX1 etwa 80 % 9-HPOD und 20 % 13-HPOD und LOX 2 etwa 30 % 9-HPOD und 70 % 13-HPOD bildet. [53, 111, 124-126] Bezüglich der Charakterisierung der LOX-Isoenzyme in keimender Gerste befinden sich in den Literaturstellen unterschiedliche Angaben. Tabelle 1 stellt die von verschiedenen Autoren ermittelten Charakteristika dar.

|  | <b>LOX1</b>                                | Literatur       | <b>LOX2</b>   | Literatur                 |
|--|--|-----------------|---|---------------------------|
| <b>pH-Optima</b>                               | 6,3  | [53]            | 6,5   | [121, 127]                |
|  | 6,5  | [121]           | 7,0-7,5   | [109]                     |
|  | 7,0  | [120]           | 6,0; 8,0  | [124]                     |
|  | 7,5  | [109]           |   |                           |
| <b>Molekulargewicht (kDa)</b>                  | 90   | [124, 125]      | 95  | [124]                     |
|  |  |                 | 110   | [124, 125]                |
| <b>pI-Wert</b>                                 | 5,2  | [120, 121, 124] | 6,4–6,9   | [109, 121, 124, 125, 127] |
|  | 4,9  | [109, 125]      |   |                           |
| <b>Temperaturstabilität/<br/>Inaktivierung</b> | 5 Minuten bei<br>55 °C                     | [124]           | 5 Minuten bei<br>65 °C  | [124]                     |
|  | nach 30 Minuten bei 60 °C (50– 80 %) [113] |                 |   |                           |
|  | nach 30 Minuten<br>bei 60 °C               | [113]           | etwas<br>thermostabiler,<br>30 Minuten bei<br>60 °C (14 %<br>Restaktivität) | [113]                     |
|  | Inaktivierung bei 65 °C [128]              |                 |   |                           |

|   |  |       |  |       |
|---|--|-------|--|-------|
| <b>pH-Abhängigkeit der Thermostabilität</b> | bei 65 °C etwas stabiler im neutralen als im sauren Milieu | [125] | bei 65 °C etwas stabiler im sauren Milieu als bei pH 7,0 | [125] |
|---|--|-------|--|-------|

**Tab. 1: Charakterisierung der LOX-Isoenzyme in keimender Gerste**

DE ALMEIDA et al. wiesen eine substratabhängige Regioselektivität von LOX1 und LOX2 der keimenden Gerste nach. Aus den durchgeführten Versuchen konnte resümiert werden, dass im Prinzip auch Phospholipide natürliche Substrate für LOX1 darstellen können, bevorzugt aber v. a. freie Fettsäuren (Linolsäure) umgesetzt werden und LOX2 eine hohe Affinität zu komplexen Lipiden (v. a. unpolaren) sowie Trilinolein aufweist. Des Weiteren konnte eine hohe (S)-Selektivität von LOX1 bei der Bildung von 9-HPOD aus Linolsäure festgestellt werden. LOX2 setzte ebenfalls Trilinolein und freie Fettsäuren bevorzugt zu (S)-Enantiomeren um. [129, 130] Beide Isoenzyme können somit auch veresterte Fettsäuren umsetzen und sind nicht nur auf frei vorliegende Substrate begrenzt. [111, 131] Ebenso katalysieren beide Isoenzyme (LOX2 zwei- bis dreimal schneller) eine Peroxidation veresterter Linol- bzw. Linolensäuren aus Speicherfett sowie die Umsetzung von Phospholipiden. Diese können dann von Lipasen aus den Triacylglycerolen freigesetzt werden. [111, 126, 131]

Als weiterer Schritt zur Verbesserung der Geschmacksstabilität wurden in den letzten Jahren low-LOX und LOX-freie (no-LOX1) Gerstenzüchtungen entwickelt. Die Autoren berichten von einer Verbesserung der Geschmacks- und Schaumstabilität des Bieres. [4-6, 132] In diesem Zusammenhang sei hinsichtlich der beiden LOX-Isoenzyme erneut darauf hingewiesen, dass die Aktivität von LOX1 bereits in Rohgerste vorhanden ist, hingegen das Isoenzym LOX2 erst während der Keimung gebildet wird. [108, 109, 119] Es ist daher zu beachten, dass bei Inhibierung der LOX1 keine vollständige Inhibierung beider LOX-Isoenzyme vorliegt. LOX2 weist ferner eine schnellere Umsetzung der Substrate vor. Außerdem sollte vor dem Hintergrund der Funktion der LOX im Abwehrsystem der Pflanze eine Eliminierung der LOX als kritisch beurteilt werden (siehe Abschnitt 2.4.3.3).

Des Weiteren untersuchten SCHWARZ und PYLER neben der LOX das Enzym Hydroperoxid-Isomerase, das ebenfalls während der Keimung gebildet wird. Stabilitätsversuche während des Keimens und Maischens deuteten aber darauf hin, dass hier keine Enzymaktivität vorhanden ist. [114] Während des Darrprozesses zeigten Untersuchungen, dass sich der Verlauf der LOX-Aktivität während des Schwelkens und Darrens zwischen oberer unter unterer Schicht der Darre sehr unterschiedlich entwickelt. Während in der unteren Schicht eine relativ rasche Inaktivierung eintritt, ist während des Schwelkens in der oberen Schicht ein weiterer Anstieg der LOX-Aktivität feststellbar. Daher liegt die LOX-Aktivität des abgedarrten Malzes der oberen Schicht auch weit höher als die Aktivität der unteren Schicht. [106, 133]

Auch der Einfluss der Lagerung von Gerste und Malz auf die LOX-Aktivität wurde von mehreren Autoren beschrieben. [117, 118, 124] KAUKOVIRTA-NORJA et al. stellten nach 110 Tagen Malzlagerung bei 7 °C nur noch 60–70 % der ursprünglichen Aktivität, bei 15 °C Lagerdauer nur noch 50 % und bei 23 °C nur noch 30–40 % der Ausgangsaktivität fest. ZÜRCHER fand bei einer Malzlagerdauer von zwei Monaten einen Rückgang der LOX-Aktivität um fast 30 %. Besonders negativ auf die Geschmacksstabilität wirkt sich die Lagerung des Schrotens aus. Hierbei ist bereits innerhalb weniger Stunden ein drastischer Anstieg an Lipidoxidationsprodukten feststellbar. [118]

Von Interesse für die Geschmacksstabilität des Bieres ist auch die Entwicklung der LOX-Aktivität während des Schrotens und Maischens. Die höchsten LOX-Aktivitäten beim Maischen wurden einheitlich zwischen 45–55 °C festgestellt. [112–114, 128] Von BAXTER wurde eine rasche Abnahme der LOX-Aktivität bei 65 °C beschrieben und eine fast vollständige Inaktivierung in Abhängigkeit vom Schüttungsverhältnis trat bereits nach einer Minute ein. [113] SCHWARZ und PYLER [114, 134] legten eine weitgehendste Inaktivierung der LOX nach 30 Minuten bei 65 °C in Malzextrakt dar, berichteten aber von einer minimalen LOX-Restaktivität bei 67 °C, die spätestens nach 20 Minuten bei 70 °C vollständig inaktiviert war.

Ebenso belegten sie, dass nur geringe Mengen der Grünmalz-LOX-Aktivität in der Maische vorzufinden ist (ca. 5 %) und diese restliche LOX nur mäßig in Lösung geht. Daher wiesen beide Autoren der LOX-Aktivität im Maischprozess eher geringe Bedeutung zu. KOBAYASHI [135] beurteilte die LOX-Aktivität während des Maischens anhand der entstandenen Abbauprodukte und bestätigte ebenfalls die Ergebnisse von SCHWARZ et al. Indes wiesen die Autoren dem Enzym Hydroperoxid Isomerase eine etwas höhere Thermostabilität als der LOX zu. Hingegen fand MARTEL eine Abnahme der LOX-Aktivität mit Erreichen der 64 °C-Rast, jedoch erst ab 74 °C eine vollständige Inaktivierung. [115] KURODA et al. [136] stellten nach 30 Minuten bei 60 °C eine deutliche Reduzierung der LOX-Aktivität auf ca. 25 % fest, eine Inhibierung der LOX-Aktivität erfolgte nach 30 Minuten bei 70 °C. Des Weiteren führten die Autoren Versuche mit rekombinater LOX durch. Hierbei entdeckten sie ein peroxidasen-ähnliches, relativ hitzestabiles Gerstenenzym in Maische, welches zusammen mit LOX die Bildung von THOD katalysiert. [136, 137] In neueren Veröffentlichungen wiesen sie auf eine relativ hitzelabile 9-HPL-ähnliche Aktivität im Malz hin, die während des Maischprozesses an der Bildung von (*E*)-2-Nonenal beteiligt ist. [138]

### **2.5.2 Lipide und Lipidoxidationsprodukte während der Malz- und Bierbereitung**

Die Beteiligung langkettiger Fettsäuren an der Bildung eines Alterungsgeschmack des Bieres und deren Einfluss auf die Carbonylbildung wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten bestätigt. [139, 140] Die beim Abbau der mehrfach ungesättigten Fettsäuren entstehenden Intermediär- und Abbauprodukte gelten als Vorläufer aromaintensiver Carbonyle sowie alterungsrelevanter Aromastoffe, die maßgeblichen Einfluss auf die Schaum- und Geschmacksstabilität des Bieres ausüben. Entscheidend für die Aromaänderung bei der Bieralterung ist, in welchem Maße beim Maischen und Läutern gesättigte und ungesättigte Fettsäuren und gebildete Zwischenprodukte bis ins abgefüllte Bier gelangen. [3, 30, 137, 141, 142]

Ein wichtiger Punkt zur Minimierung von alterungsrelevanten Aromastoffen ist die strikte Vermeidung eines Sauerstoffeintrags während des Brauprozesses mit Ausnahme der Würzebelüftung. [1, 143]

In der Gerste befinden sich Lipide in einer Menge von 2,2–4,0 % in der Trockensubstanz. Die Gerstenlipide setzen sich zusammen aus ca. 70 % Neutrallipiden (89–96 % Triacylglyceride), 20 % Phospholipiden und 10 % Glycolipiden. Bei den vorliegenden Triacylglyceriden kann Glycerin mit bis zu drei verschiedenen Fettsäuren verestert sein. In der Gerste handelt es sich dabei hauptsächlich um die Fettsäuren Linolsäure (56 %), Palmitinsäure (22 %) und Ölsäure (11–14 %). Somit stellt Linolsäure das wichtigste Substrat für den Lipidabbau dar. Bei der Vermälzung der Gerste sinkt der Rohfettgehalt durch die Atmungsvorgänge und die Ausbildung von Blatt- und Wurzelkeim um 20–27 %, somit wird ungefähr ein Viertel des in der Gerste vorkommenden Rohfettes verbraucht. Daneben verschiebt sich die Zusammensetzung der Triglyceride zu den mehrfach ungesättigten Fettsäuren Linolsäure und Linolensäure. [144, 145] Während der Malzbereitung ist eine gezielte Einflussnahme auf die Gesamtfraction der langkettigen Fettsäuren über die Mälzungsparameter (Temperatur, Haufenführung, Keimdauer, Weichgrad, Abdarrtemperatur) nur geringfügig gegeben. Lediglich mit zunehmendem Weichgrad kristallisierte sich ein Zusammenhang heraus. Mit steigender Malzlösung stieg auch der Gehalt an langkettigen Fettsäuren an. Der Fettabbau zeigte bei einer Keimgutfeuchte von 42 % ein deutliches Maximum. Der Abbau von Fetten beim Mälzungsprozess wird v. a. durch die Gerstensorte bestimmt. Der Rohfettgehalt und die Triacylglyceridzusammensetzung sind von der Sorte dominiert, unterliegen aber standort- und jahgangsbedingten Schwankungen. Der Fettabbau während der Keimung steht jedoch in keinem direkten Zusammenhang mit anderen Abbauvorgängen, wie z. B. Zytolyse oder Proteolyse. [145-147]

Hinsichtlich der Bildung von Aromastoffen aus dem Lipidabbau beim Schwelken konnte von KRETSCHMER eine eindeutige Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt festgestellt werden. Aromastoffe, die mit zunehmendem Sauerstoffgehalt beim Schwelken ansteigen, sind (*E*)-2-Hexenal, (*E*)-2-Heptenal,  $\gamma$ -Octalacton und  $\gamma$ -

Nonalacton. Aromastoffe, die mit vermindertem Sauerstoffgehalt beim Schwelken ansteigen sind: 1-Penten-3-ol, Pentanal, Pentanol, Hexanal, Heptanal, 1-Octen-3-ol, Octanol, (*E,E*)-2,4-Nonadienal, (*E,Z*)-2,4-Decadienal und (*E,E*)-2,4-Decadienal. Ergänzend sei erwähnt, dass die Konzentration einiger Aromasubstanzen aus dem Streckerabbau 3-Methylbutanal, 2-Methylbutanal und 2-Phenylethanal ebenso sinken. [146]

Eine Sauerstoffminimierung beim Keimen führt zu einer vermehrten Bildung von Lipidsubstanzen, wobei mit zunehmendem Sauerstoffgehalt der Haufenluft der Rohfettgehalt über die Keimung abnimmt. Eine Keimung mit CO<sub>2</sub>-Rast führte zu einem Ansteigen der Lipidsubstanzen. KRETSCHMER stellte auch einen Anstieg der Lipoxygenase-Aktivität im Malz mit sinkendem Sauerstoffgehalt beim Keimen fest. Der Lipidmetabolismus scheint folglich durch eine Reduzierung von Sauerstoff bei der Malzbereitung aktiviert zu werden, was sich in einem Anstieg der Enzymaktivitäten äußert. Erstaunlicherweise zeigten jedoch die Biere aus mit CO<sub>2</sub>-Rast hergestelltem Malz eine sehr hohe Geschmacksstabilität. [146] Im Rahmen dieser Arbeit wurden ebenfalls Versuche zur CO<sub>2</sub>-Anreicherung während der Keimung durchgeführt, allerdings konnten die zuvor beschriebenen Ergebnisse nicht in allen Punkten bestätigt werden (siehe Abschnitt 5.3).

HELLICH untersuchte ebenfalls den Einfluss der CO<sub>2</sub>-Rast während der Keimung und berichtete über eine Einschränkung der Enzyymbildung bzw. -wirkung (v. a. der  $\alpha$ -Amylase, jedoch eine leichte Zunahme der  $\beta$ -Amylase). Bei einer Anreicherung von CO<sub>2</sub> in der Haufenluft war eine stärkere Lösung und somit ein Anstieg von niedermolekularen Eiweißabbauprodukten, lösl. Stickstoff, die Zunahme von Extrakt und eine steigende Viskosität (v. a. bei niedriger Keimgutfeuchte) feststellbar. [147]

Nur ungefähr 1,4 % der Malzlipide finden sich in der Läuterwürze wieder. Jedoch ein großer Anteil (ca. 14 %) der Malzlipide wird während des Maischprozesses abgebaut. Bis zu 20 % der Lipide der Würze können durch die Hopfengabe eingetragen werden. [148, 149] Innerhalb des Brauprozesses hat v. a. der Läuterprozess Auswirkungen auf den Eintrag von langkettigen Fettsäuren. Es

wurde festgestellt, dass trübe Anstellwürzen mit sehr hohem Fettsäuregehalt die Alterungsstabilität des Bieres negativ beeinflussen. [150, 151] Auch die Treber selbst enthalten Lipide und Lipidoxidationsprodukte. YASUI et al. wiesen in den Trebern einen hohen Gehalt an (*E*)-2-Nonenal-Potential nach. [152] DE BUCK [153] und VAN WAESBERGHE [106] stellten außerdem LOX-Aktivität bei den Treberuntersuchungen fest. Daraus folgerten die Autoren das Vorhandensein einer membrangebundenen, hitzestabilen LOX.

Wie bereits erwähnt, gelten die beim Abbau der mehrfach ungesättigten Fettsäuren entstehenden Intermediär- und Abbauprodukte als Vorläufer aromaintensiver Carbonyle sowie alterungsrelevanter Aromastoffe, die maßgeblichen Einfluss auf die Geschmacks- und Schaumstabilität des Bieres ausüben. Zwischenprodukte des Lipidabbaus sind z. B. Hydroxy-, Hydroperoxy und Epoxyfettsäuren. Deren weiterer Abbau führt zu einer Mehrzahl von Alterungskomponenten wie Hexanal, (*E*)-2-Nonenal und Isomeren von 2,4-Decadienal. [1, 3, 12, 30, 154, 155] Hexanal zeigt die beste Korrelation als Folgeprodukt des enzymatischen Lipidabbaus der Lipoxygenase auf und bietet den Vorteil, dass es im Vergleich mit anderen Abbauprodukten analytisch gut erfassbar ist.

Trihydroxyfettsäuren wurden lange als Precursor für Alterungscarbonyle vermutet. [30, 156, 157] Sie wurden erstmals von DROST et al. als mögliche Vorläufer alterungsrelevanter Aromastoffe beschrieben. [158, 159] Diese erwiesen sich aber als sehr stabil und zerfallen erst bei Temperaturen über 60 °C und pH-Werten unter 2,0. [158, 160, 161] In frischen Gersten und Malzproben liegt eine Verteilung von ca. 50 % HOD, 30 % DHOE und 20 % THOE vor, wobei der Hauptanteil in gebundener Form vorliegt. Die absolute Menge wird dabei hauptsächlich über die Gerstensorte und die Provenienz beeinflusst. [162] Gersten zeigen vor der Keimung einen deutlich höheren Gehalt an HOD und DHOE auf als das fertige Malz. Gelagerte Gersten zeigen tendenziell höhere Mengen an freien und triglycerid-gebundenen Hydroxyfettsäuren. Insbesondere THOD konnten als Indikatoren der Gerstenalterung herausgearbeitet werden. [163, 164] Bereits während des Mälzungsprozesses erfolgt ein Abbau dieser Precursorsubstanzen. Somit liegt

bereits in der Geste ein erhebliches Potential an Alterungsprecursoren vor. Es konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Änderung einzelner Mälzungsparameter und dem Gehalt an oxygenierten Fettsäuren nachgewiesen werden. Der höchste Gehalt an oxygenierten Fettsäuren konnte am 5. bzw. 6. Keimtag festgestellt werden, der anschließend wieder abfiel und durch den Darrprozess erneut drastisch minimiert wurde. [154, 165] In Malz konnten Hydroperoxylinolsäuren nur in geringen Mengen frei vorliegend (1–3 ppm, überwiegend in S-Konfiguration) nachgewiesen werden. Jedoch triacylglyceridgebundene oder in polaren Lipiden gebundene Hydroperoxylinolsäuren konnten in Konzentrationen bis zu 50 ppm analysiert werden. [119]

MÖLLER-HERGT zeigte, dass die Gerstensorte den Gehalt an freien Hydroxyfettsäuren in Würze und Bier maßgeblich beeinflusst. Die Einmischtemperatur zeigt v. a. hinsichtlich der HOD nach leichter Erhöhung eine Verminderung der Konzentration über 57 °C mit steigenden Einmischtemperaturen. Ähnliche, wenn auch nicht ganz so intensiv ausgeprägte Tendenzen, fanden sich auch für die DHOE und THOE. [166-168] Während des Maischens erreichte die Menge an HOD zu Beginn einen Anstieg, erreicht bei 65 °C Maischtemperatur die höchste Konzentration und fällt anschließend wieder ab. [166] Bei den DHOE und THOD ergab sich eine sofortige Reduzierung der Konzentration, wohingegen bei 55 °C ein kontinuierlicher Anstieg zu verzeichnen war. Trotz kontroverser Diskussionen wurde der Lipidoxidation während des Maischens immer wieder in mehreren Veröffentlichungen eine Relevanz hinsichtlich der Ausbildung eines Alterungspotentials beigemessen. [53, 142] Vor allem der Gehalt an Mono-, Di- und Trihydroxyfettsäuren in Würze und Bier und deren Einfluss auf die Geschmacks- und Schaumstabilität des Bieres war Gegenstand dieser Forschungsarbeiten, da v. a. bestimmte Isomere der THOE als Vorläufer von Alterungscarbonylen vermutet wurden.

MÖLLER-HERGT stellte eine Konzentration von 0,6–1,0 mg/l der 9,10-Isomere der DHOE und 3,3–4,5 mg/l der 12,13-DHOE in der Anstellwürze fest. Die Wahl der Rohstoffe und die Maischparameter können die prozentualen Anteile der

verschiedenen Isomere der HOD und DHOE in der Anstellwürze beeinflussen. Im frischen Bier waren ca. 0,15–0,4 mg/l der 9,10- DHOE und ca. 0,3 mg/l der 12,13- DHOE und ca. 8–12 mg/l THOE enthalten. Im Bier wurden hauptsächlich isomere 9,10,13- und 9,12,13-Trihydroxyoctadecenfettsäuren in höheren Konzentrationen von 10–15 mg/l nachgewiesen. [166, 168] Dies deutet darauf hin, dass die übrigen Hydroperoxyfettsäuren von der Hefe verstoffwechselt werden. Bestehende Publikationen haben gezeigt, dass die Hefe beim Abbau von Fettsäuren und deren Oxidationsprodukten streng differenziert, und zwar insbesondere in Bezug auf die Stereochemie (siehe Abschnitt 2.5.3). [7, 126] Während der Gärung kam es zu einer deutlichen Reduzierung an HOD und DHOE. Lagerung und Reifung hatten demgegenüber kaum einen Einfluß auf diese beiden Fraktionen an oxygenierten Fettsäuren.

MEYNA [119, 169] bearbeitete die Fragestellung, ob es einen Zusammenhang zwischen der Menge an freien und triglycerid-gebundenen Hydroxyfettsäuren in Gerste und Malz und der Geschmacksstabilität des später daraus produzierten Bieres existiert. Er zeigte, dass weder der Geschmack der frischen Biere, noch die Geschmacksstabilität dieser Biere im Zusammenhang mit der Menge an freien und triglycerid-gebundenen Hydroxyfettsäuren (als Summe von HOD, DHOE und THOE) der Gersten sowie jeweiligen Malzen steht. Auch die Gehalte an freien THOE in Würze und Bier zeigten keine Korrelation mit den Ergebnissen der Alterungsverkostungen. Der Autor weist zusätzlich darauf hin, dass während bestimmter Prozesse in der Mälzerei und Brauerei, bei denen z. B. höhere Temperaturen angewendet werden (Darren, Würzekochen etc.) oder sich die pH-Verhältnisse ändern, wie beispielsweise bei der Gärung (natürlich findet hier auch eine intensive Metabolisierung der Hydroxyfettsäuren statt), Zerfallsreaktionen von oxygenierten Fettsäuren ablaufen und eine damit einhergehende Bildung von geschmacksaktiven Carbonylen stattfinden kann. Aufgrund der chemischen Verhältnisse ist ein Zerfall der Hydroxyfettsäuren zu Carbonylen (konstanter pH-Wert von etwa 4,2 bis 4,7 in Bier bei nach Möglichkeit möglichst niedriger Aufbewahrungstemperatur) wegen der hohen Stabilität der oxygenierten Fettsäuren eher unwahrscheinlich. [119]

### 2.5.3 Entstehung aromaintensiver Lipidabbauprodukte

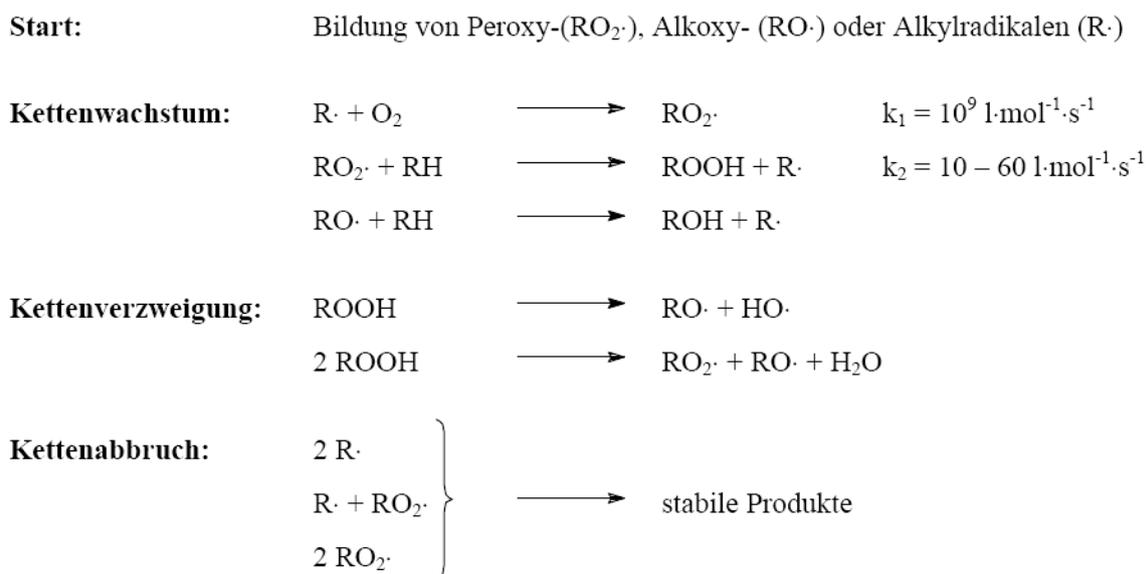
Die Peroxidation von Lipiden kann in drei verschiedene Reaktionsmechanismen untergliedert werden: die lichtunterstützte Photooxygenierung, die enzymatische Oxidation und die radikalische Autoxidation. Die Abbauprodukte dieser Reaktionen sind gleicher oder ähnlicher Struktur.

Zahlreiche neuere Forschungsarbeiten zeigten anhand von Phospholipiden und Lipidgemischen aus Membranpräparationen, dass LOXs aus der Sojabohne auch veresterte PUFAs *in vitro* als Substrate nutzen können (vgl. Abschnitt 2.5.1.3). Da ursprünglich ausschließlich freie PUFAs als natürliches Substrat angenommen wurden, blieb eine Vielzahl von Lipiden, die PUFAs enthalten, als Substrate für pflanzliche LOXs unberücksichtigt. [77, 131] Folglich können auch chemisch fixierte Oxidationsprodukte der Linolsäure (z. B. vorliegend als polare Lipide/Phospholipide bzw. Speicherlipide) für die Beurteilung der Geschmacksstabilität eine entscheidende Rolle spielen, da diese Oxidationsprodukte ebenfalls während der Würzebereitung eingetragen werden. Auch Ethylester der ungesättigten Fettsäuren können eine Quelle für Alterungscarbonyl sein. [3, 30]

Im Sauerstoff-Molekül sind zwei ungepaarte Elektronen vorhanden, deren Spin entweder gleich (Triplett-Sauerstoff) oder entgegengesetzt (Singulett-Sauerstoff) gerichtet ist. Dabei ist der Triplett-Zustand energieärmer. Sauerstoff liegt üblicherweise im Grundzustand als Triplettzustand ( $^3\text{O}_2$ ) vor und kann daher nicht mit anderen organischen Komponenten reagieren. Wenn die Änderung des elektronischen Zustands durch Energie angeregt (Licht, Hitze) aktiviert bzw. über Metalle katalysiert wird, entsteht Singulett-Sauerstoff aus dem reaktionsträgeren Triplett-Sauerstoff. Dabei wird der Sauerstoff in reaktive Sauerstoffspezies wie z. B. Singulett-Sauerstoff ( $^1\text{O}_2$ ), Superoxid ( $\text{O}_2^-$ ), Hydroperoxyradikale ( $\bullet\text{OOH}$ ), Wasserstoffperoxid ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) oder Hydroxyradikale ( $\bullet\text{OH}$ ) überführt. Über die Reaktion dieser ROS mit ungesättigten Fettsäuren entstehen beispielsweise Lipidhydroperoxide. [17]

Die Synthese der Lipidhydroperoxide erfolgt am einfachsten ausgehend von den entsprechenden Fettsäuren bzw. Estern durch Autoxidation. Modellversuche haben gezeigt, dass die Geschwindigkeit der Autoxidation von der Fettsäurezusammensetzung, der Konzentration und der Wirksamkeit von Pro- und Antioxidantien sowie dem Sauerstoffpartialdruck abhängig ist.

Bei der Autoxidation handelt es sich um eine Radikalkettenreaktion, die zur Bildung verschiedener Hydroperoxide führt. Der Prozeß läuft in drei Phasen ab (Start, Kettenwachstum bzw. Kettenverzweigung und Kettenabbruch), und zwar umso schneller, je mehr Doppelbindungen im Fettsäuremolekül vorhanden sind. Die Peroxidation der ungesättigten Fettsäuren beschleunigt sich autokatalytisch, da Radikale durch einen unimolekularen Zerfall der Hydroperoxide entstehen (siehe Abbildung 15). Die Bildung der Radikale erfolgt bei ungesättigten Fettsäuren durch Abstraktion eines allylischen Wasserstoffs. Aufgrund der Doppelbindung ist das freie Elektron über mehrere C-Atome delokalisiert. Ein Angriff von Sauerstoff kann somit an mehreren Stellen erfolgen, was zu mehreren isomeren Hydroperoxiden führt. Die Autoxidation erfolgt nicht stereoselektiv, daher werden (*S*)- und (*R*)-Hydroperoxide in etwa zu gleichen Teilen gebildet. Die Reaktion wird u. a. durch Schwermetallionen oder Hämverbindungen begünstigt. [42]



**Abb. 15: Teilreaktionen bei der Autoxidation von Lipiden [42]**

Abbildung 16 zeigt flüchtige Carbonylverbindungen, die bei der Autoxidation ungesättigter Fettsäuren entstehen können. [3, 30, 170]

| Ölsäure (C18:1) | Linolsäure (C18:2)   | Linolensäure (C18:3)  |
|-----------------|----------------------|-----------------------|
| Heptanal        | Pentanal             | Propanal              |
| (E)-2-Nonenal   | Hexanal              | 1-Penten-3-on         |
| Octanal         | Heptanal             | (E)-2-Butenal         |
| Decanal         | (E)-2-Heptanal       | (E)-2-Pentenal        |
| (E)-2-Decenal   | Octanal              | (Z)-2-Pentenal        |
| (E)-2-Undecenal | (E)-2-Octenal        | (E)-2-Hexenal         |
|                 | 1-Octen-3-on         | (E)-3-Hexenal         |
|                 | (Z)-2-Octenal        | (Z)-3-Hexenal         |
|                 | (E)-2-Nonenal        | (E)-2-Heptenal        |
|                 | (E)-3-Nonenal        | (E,Z)-2,4-Heptadienal |
|                 | (Z)-3-Nonenal        | (E,E)-2,4-Heptadienal |
|                 | (Z)-2-Decenal        | (Z,Z)-2,5-Octadienal  |
|                 | (E,E)-2,4-Nonadienal | 3,5-Octadien-2-on     |
|                 | (E,Z)-2,4-Decadienal | (E,Z)-2,6-Nonadienal  |
|                 | (E,E)-2,4-Decadienal | 2,4,7-Decatrienal     |

**Abb. 16: Carbonylverbindungen aus der Autoxidation ungesättigter Fettsäuren**

(E)-2-Nonenal und  $\gamma$ -Nonalacton sind jedoch umstrittene Indikatoren der Alterung, da deren genaue Bildungswege bisher noch nicht eindeutig aufgeklärt sind. Um eine Aussage über die Geschmacksstabilität zu ermöglichen, wird in der Literatur oftmals das Nonenal-Potential [37, 155, 171] in frischen Bier bzw. in Würze herangezogen. Diesem Aspekt liegt ein Zusammenhang zwischen Nonenal-Potential und LOX-Aktivität des verwendeten Malzes zugrunde. Infolgedessen soll mit dieser analytischen Methode die Bildung von (E)-2-Nonenal als Indikatorsubstanz während der Bieralterung erfasst werden, um auf die resultierende Geschmacksstabilität zurückschließen zu können. In diesem Zusammenhang wurde auch von mehreren Autoren eine starke pH-Abhängigkeit der Bildung von (E)-2-Nonenal referiert. [172, 173]

EICHHORN [23] und MIEDANER [20] fanden erhöhte  $\gamma$ -Nonalacton-Konzentrationen in gealtertem Bier (30–70  $\mu\text{g/l}$ ). TRESSL et al. hingegen wiesen bereits im frischen Bier weit höhere  $\gamma$ -Nonalacton-Konzentrationen (100–500  $\mu\text{g/l}$ ) nach. [174] Ein Bildungsweg von  $\gamma$ -Nonalacton ist bei LUSTIG [3] wie folgt beschrieben: Oxo-Carbonsäuren können aus Intermediärverbindungen der Octadecansäuren gebildet werden, insbesondere 4- und 9-Oxononansäure. Die 4-Oxononansäure kann über 4-Hydroxynonansäure und anschließenden inneren Ringschluss zu  $\gamma$ -Nonalacton umgewandelt werden.

Unter dem Aspekt der Geschmacksstabilität stellt sich die Frage, inwieweit die Hefe *Saccharomyces cerevisiae* (untergärige Bierhefe: *Saccharomyces carlsbergensis*, obergärige Bierhefe: *Saccharomyces cerevisiae*) in der Lage ist Lactone zu biosynthetisieren und die Epoxygenierung ungesättigter Fettsäuren der Initialschritt für die  $\gamma$ -Lactonbiosynthese ist. Während des Maischprozesses gelangen zahlreiche Lipoxygenaseabbauprodukte von Linolsäure,  $\alpha$ -Linolensäure und Epoxyfettsäuren in die Würze und können von *Saccharomyces cerevisiae* verstoffwechselt werden. [122, 175] Von den im Malz vorhandenen Trihydroxyfettsäuren wurden in der Würze Konzentrationen von 10–15 mg/l nachgewiesen. HAMBERG et al. [175] konnten allerdings noch einen Anteil von 60 % an (9S,12S,13S)-Trihydroxy-(E)-10-octadecensäure von allen im Bier nachgewiesenen isomeren Trihydroxyfettsäuren feststellen. LANGE [100] stellte fest, dass *Saccharomyces cerevisiae* über ein Enzympotential verfügt, das (13S)-Hydroperoxy-(Z,E)-9,11-octadecadiensäure teilweise in  $\delta$ -Decalacton überführen kann. Bei sehr hohen Konzentrationen dieses Substrates wurde allerdings eine Fragmentierung der Kohlenstoffkette von intermediär gebildeten vinylogen  $\gamma$ -Ketolfettsäuren nachgewiesen. Die Lactonbiosynthese fand daraufhin nicht mehr statt. Aus vinylogen  $\gamma$ -Ketolfettsäuren entstehen durch Oxidation Trihydroxyfettsäuren, die durch das Enzympotential der Hefe biosynthetisiert werden und dem Trihydroxyfettsäurespektrum der Gerste entsprechen. *Saccharomyces cerevisiae* scheint Trihydroxyfettsäuren nur unvollständig zu verstoffwechseln, da vornehmlich das Enantiomer vorlag, das an den drei Stereozentren (S)-konfiguriert vorlag. [100]

LANGE bestätigte ebenso ein Enzympotential aus Epoxygenasen, Peroxygenasen und Epoxidhydrolasen, das einfach und mehrfach ungesättigte Fettsäuren und Epoxyfettsäuren in Dihydroxyfettsäuren überführen kann. Des Weiteren konnte er eine Bildung von  $\delta$ -Decalacton und (S)- $\gamma$ -Nonalacton über den 13-Peroxygenase-Pathway (Ausgangssubstanz: (13S)-Hydroperoxy-(Z,E)-9,11-octadecadiensäure) im Kulturmedium nachweisen. [100]

Der enzymatische/chemische Metabolismus der (9S)-Hydroxy-(E,Z)-10,12-octadecadiensäure wurde in pflanzlichen Zellsystemen ausführlich untersucht und von GARBE [7] in einer Übersicht zusammengefasst:

- sie wird zu (9S)-Hydroxy-(E,Z)-10,12-octadecadiensäure reduziert (Peroxidase, EC 1.11.1.7),
- in Epoxyole und nachfolgend in Trihydroxysäuren umgewandelt (Hydroperoxid-Isomerase, Epoxid-Hydrolase (EC 3.3.2.3) oder chemisch durch übergangsmetallkatalysierte Umlagerung, [122, 175]
- in Allenoxide [92] isomerisiert und anschließend in  $\alpha$ -Ketole und  $\gamma$ -Ketole hydrolysiert,
- homolytisch in Decadienal gespalten, [30]
- heterolytisch in (Z)-3-Nonenal und 9-Oxononansäure gespalten, [93]
- oder in Divinylether umgebaut, die ebenfalls in (Z)-3-Nonenal und 9-Oxononansäure fragmentieren.

GARBE [7] erforschte die Entstehung von  $\gamma$ -Nonalacton im Abbau von 9-Hydroperoxiden bei *Saccharomyces cerevisiae*. Die Hefe verfügt über die enzymatische Ausstattung zur Lipoxygenierung von Linolsäure, jedoch nicht über das Substrat selbst. *Saccharomyces cerevisiae* weist zwei stereoselektiv arbeitende Stoffwechselwege für 9-Hydroxylinolsäuren auf:

1.  $\beta$ -Oxidation des Lipoxygenase-Produktes (9S)-Hydroxy-(E,Z)-10,12-octadecadiensäure.
2. Baeyer-Villiger-Typ: Spaltung der (9R)-Hydroxy-(E,Z)-10,12-octadecadiensäure (nach Oxidation und Hydrierung) in zwei C<sub>9</sub>-Fragmente.

Dabei wird in einer Reaktionssequenz aus (9*R*)-Hydroxy-(*E,Z*)-10,12-octadecadiensäure 9-Oxo-(*Z*)-12-octadecadiensäure gebildet, die wiederum unter Einsatz eines Baeyer-Villiger-Enzymes einen Ester liefert, der zu Azelainsäure und (*Z*)-3-Nonenol hydrolysiert. Dieses wird nachfolgend in  $\gamma$ -Nonalacton überführt, wobei hier ein Deuterium-Transfer von C-9 nach C-11 erfolgt (Ausgangsverbindung: 9-Hydroxy-(*E,Z*)-10,12-octadecadiensäure). Azelainsäure kann durch  $\beta$ -Oxidation,  $\gamma$ -Nonalacton bzw. 4-Hydroxynonansäure durch  $\alpha$ -Oxidation metabolisiert werden. Letztendlich stellen die Lactone keine Endprodukte der selektiven Lactonbiosynthese dar. Dieser stereoselektive Metabolismus der Hefe von Monohydroxysäuren erklärt warum 9-Hydroxy-(*E,Z*)-10,12-octadecadiensäure nach der Fermentation nicht mehr nachzuweisen ist, wo hingegen Trihydroxyoctadecensäuren in ihrer Konzentration zunehmen. [7, 126]

Zahlreiche Bildungswege zur Entstehung von (*E*)-2-Nonenal sind in der Literatur vorgestellt:

- Entstehung aus dem enzymatischen Lipidabbau während des Keim- und Darrprozesses, [39, 176]
- Autoxidation von Linolsäure während der Würzekochung, Bildungsweg über das 9-Hydroperoxid der Linolsäure, [177]
- Bildungsweg über Colnensäure (Vinylether-Derivate der Linolsäure): ein ionischer Mechanismus führt zur Umwandlung der 9-Hydroperoxide der Linolsäure zu Colnensäure, aus der über freie Radikale oder wiederum ionische Mechanismen (*E*)-2-Nonenal gebildet wird, [94]
- Bildung aus Trihydroxyoctadecensäuren, [39, 160]
- Abbau von ungesättigten Fettsäuren führt zu freien Radikal-Reaktionen (Aktivierung über Zugabe von Eisen-(III)-Ionen oder Wasserstoffperoxid, Inhibierung durch EDTA und Polyphenole), Bildungsweg über das 9-Hydroperoxid der Linolsäure in fertigen Bier. [178] Die Bildung von (*E*)-2-Nonenal und (*Z*)-3-Nonenal über Säurekatalyse aus 9-Hydroperoxiden der Linolsäure ist möglich (hypothetischer Bildungsweg), [36]

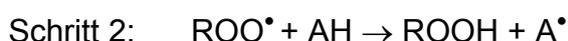
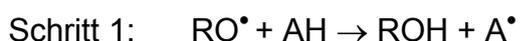
- Bildungsweg über Aldolkondensation von kurzkettigen Carbonylen katalysiert durch Aminosäuren und Bildung  $\alpha,\beta$ -ungesättigter Aldehyde. Das während der Würzekochung entstandene (*E*)-2-Nonenal wird z. B. über Sulfit-Derivate ins Bier transportiert. [179, 180] Aufgrund der von KOMAREK durchgeführten Fermentationsversuche sind jedoch Bisulfit-Addukte als Intermediate, die (*E*)-2-Nonenal im fertigen Bier freisetzen, auszuschließen. [36]

#### 2.5.4 Phenolische Substanzen

Die phenolischen Substanzen gehören zur Gruppe der sekundären Pflanzeninhaltsstoffe und dienen der Pflanze als Farbstoff-, Abwehr- oder Schutzsubstanzen. Zu den phenolischen Substanzen gehören die Phenolcarbonsäuren in freier Form oder gebunden an Glykoside sowie monomere und oligomere Flavonoide. [27, 144] Phenolische Substanzen wirken reduzierend und sind somit natürliche Antioxidantien. [181] Daneben besitzen sie die Eigenschaft Radikale zu neutralisieren. [182] Hierbei werden die Radikale reduziert und das radikalische Elektron durch eine Überführung in den aromatischen Ring der phenolischen Verbindung stabilisiert.

Unter Antioxidantien werden Inhaltsstoffe verstanden, die im Vergleich zu den oxidierbaren Substanzen in deutlich geringerer Konzentration vorliegen, die Oxidation jedoch signifikant verzögern oder verhindern. Antioxidantien sind in der Lage, Oxy- und Peroxyradikale abzufangen. [183] Die Funktionsweise der Flavonoide als Antioxidantien wird im Folgenden am Beispiel der Hemmung der Lipidoxidation erläutert.

*Reaktionsprinzip:*



Im ersten Reaktionsschritt (Schritt 1 oder 2) entstehen so genannte resonanzstabilisierte Phenoxyradikale. Diese können noch weitere Oxy- und Peroxyradikale binden (Schritt 3 und 4). Im Gegenzug sind sie jedoch zu reaktionsträge, um anderen Molekülen ein H-Atom zu entziehen. Dadurch entstehen relativ stabile Produkte, wodurch eine Hemmung der Lipidperoxidation erzielt wird. [42]

Die reduzierende und antioxidative Wirkung der phenolischen Eigenschaften ist auf folgende strukturelle Kriterien zurückzuführen. Abbildung 17 zeigt die antioxidativ wirksamen Gruppen einer phenolischen Substanz. [42, 183-185]

- *ortho*-Dihydroxy-Struktur am B-Ring
- 2,3-Doppelbindung und 4-oxo-Gruppe am C-Ring
- 5-OH-Gruppe am A-Ring → Chelatbildung mit Metallionen

Die antiradikalische Aktivität ist jedoch stark vom pH-Wert abhängig. Bei einem niedrigen pH-Wert von 4,3 konnte keine Reaktion der phenolischen Substanzen gegenüber Hydroxyl- und Superoxidradikalen festgestellt werden, hingegen bei einer Erhöhung des pH-Wertes auf 7,0 war wiederum antiradikalische Aktivität messbar. [186]

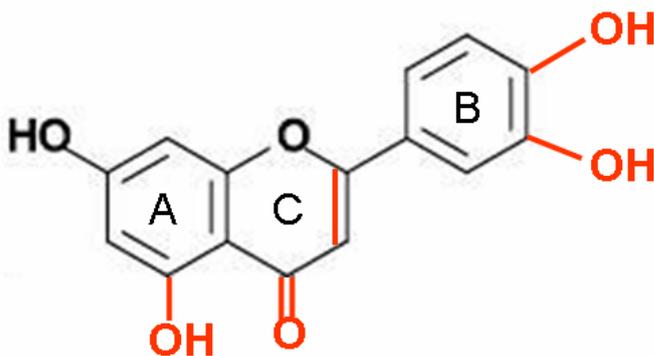


Abb. 17: Antioxidativ wirksame Gruppen bei phenolischen Substanzen [1, 27, 183]

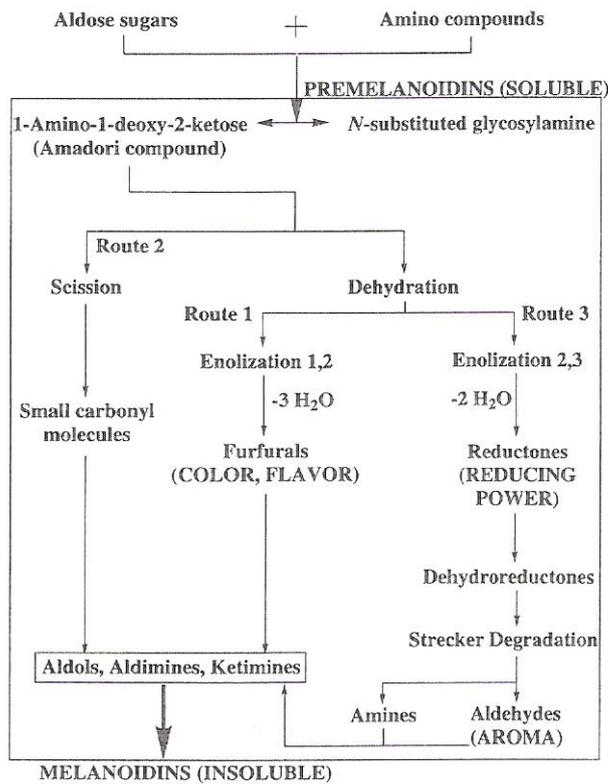
### 2.5.5 Proteolytische Abbauvorgänge und die Bildung aromarelevanter Abbauprodukte

Die Bildung von N-Glycosiden sowie die Entstehung zahlreicher Folgeprodukte lässt sich unter dem Begriff Maillard-Reaktion oder nicht-enzymatische Bräunungsreaktion zusammenfassen. In Lebensmitteln entstehen N-Glycoside, wenn reduzierende Zucker gemeinsam mit Proteinen, Peptiden, Aminosäuren oder Aminen unter den Bedingungen von höherer Temperatur, geringer Wasseraktivität oder längerer Lagerung vorhanden sind. [42]

Dabei entstehen:

- braune Pigmente, sogenannte Melanoidine
- flüchtige, oft aromawirksame Verbindungen
- Geschmacksstoffe
- Reduktone
- Verbindungen, die eine Quervernetzung von Proteinen verursachen können
- Verbindungen mit potenziell mutagenen Eigenschaften

Die große Vielfalt von aromawirksamen Verbindungen resultiert aus der großen Anzahl an Reaktionspartnern, die während der thermischen Reaktion kombiniert werden können. Die Anfangsphase der Maillard-Reaktion beinhaltet die Bildung einer Schiffschen Base (Imine) zwischen der Carbonylgruppe eines reduzierenden Zuckers und der freien Aminogruppe einer Aminosäure, eines Proteins oder Peptides. Durch die in der  $\alpha$ -Position vorliegende Hydroxygruppe können die Imine über die Amadori- bzw. Heyns-Verbindung zu reaktiven Zwischenverbindungen, der 1-Amino-desoxyketose bzw. 2-Amino-2-desoxyaldose, umlagern. Die entstandenen Amadori-Verbindungen können bereits im pH-Bereich 4–7 zu den Desoxyosonen abgebaut werden, die als reaktive  $\alpha$ -Dicarbonylverbindungen zahlreiche Folgeprodukte liefern (siehe Abbildung 18). [42, 187, 188]



**Abb. 18: Übersichtsschema der Maillard-Reaktion [189]**

Ebenso entstehen bei der Lipidoxidation zahlreiche aromaintensive Verbindungen (siehe Abschnitt 2.5.3). Jedoch sind diese Reaktionswege nicht isoliert zu betrachten, da in allen Lebensmitteln eine komplexe Mischung von Komponenten wie Lipiden, Zuckern und Aminosäuren vorzufinden ist. Dies lässt auch Reaktionswege innerhalb bzw. aus Interaktionen der Zwischenprodukte des Streckerabbaus, der Maillard-Reaktion und der Lipidoxidation, v. a. bei hohen Temperaturen ( $> 100\text{ °C}$ ) vermuten. Die Bedeutung von Lipid-Maillard-Wechselwirkungen wurde sowohl in Lebensmitteln als auch an Modellsystemen untersucht. Durch die Oxidation von Lipiden werden Carbonyle, insbesondere Aldehyde, gebildet. Diese können auf einem Maillard-typischen Weg zu Heterozyklen, wie z. B. Pyrazinen weiterreagieren. Die Bildung von Pyrazinen startet bei Temperaturen ab  $100\text{ °C}$ . [170, 190]

Streckeraldehyde sind Substanzen mit niedrigem Geruchs- und Geschmacksschwellenwert, deren Konzentration mit zunehmender Alterung des

Bieres signifikant ansteigt, und die somit als Indikatormoleküle dienen. Zahlreiche dieser Alterungs-carbonyle stammen in erster Linie aus Maillard-Reaktionen, speziell aus dem Strecker-Abbau von Aminosäuren. Durch die Reduktionskraft der Hefe werden die Aldehyde zu den korrespondierenden Alkoholen reduziert. [1, 24, 139, 191-193]

### **2.5.6 Einsatz biologischer Säuerung zur Verbesserung der Geschmacksstabilität**

Die biologische Säuerung von Malz, Maische und Würze ist ein Mittel zur gezielten Absenkung des pH-Wertes, wodurch technologische und qualitative Vorteile erreicht werden.

Die biologische Säuerung erfolgt überwiegend durch Verwendung von Sauermalz (mit biologischer Milchsäure angereichertes Darrrmalz) sowie aus Vorderwürze gewonnener biologischer Milchsäure oder außerhalb des in Deutschland gültigen Vorläufigen Biergesetzes mit technischer Milchsäure oder Mineralsäuren. Nach dem Zeitpunkt der Säuerung kann in Maischesäuerung und Würzesäuerung unterschieden werden. Beide Arbeitsweisen sind, kombiniert oder einzeln, üblich. In der Regel findet die Milchsäurebakterien-Art *Lactobacillus amylolyticus* Anwendung. [1, 143, 194-196]

#### Maischesäuerung

Die Maischesäuerung bringt mehrere Vorteile. Durch die Maischesäuerung werden wichtige proteolytische und zytolytische Enzyme gefördert. Zusätzlich ist zu erwarten, dass eine Reihe ungewünschter Enzymaktivitäten (z. B. Lipase, Lipoxygenase, Peroxidasen sowie die  $\beta$ -Glucansolubilase) durch die pH-Absenkung deutlich herabgesetzt werden. [1, 194] Die Einflüsse der Maischesäuerung zur Minimierung der enzymatischen Fettabbauprodukte in Hinblick auf eine Verbesserung der Geschmacksstabilität, insbesondere bei überlöstem Malz, bedarf noch intensiverer Untersuchungen.

Vorteile:

- Enzymangebot: Aktivierung aller wichtigen Enzyme mit Ausnahme der  $\alpha$ -Amylase, Hemmung der lipidabbauenden Enzyme
- besseres Wuchsstoffangebot durch intensivere Lösung (Zink)
- Redoxpotential: geringere O<sub>2</sub>-Anfälligkeit
- Gärverlauf: bessere Trubabscheidung, höherer Gärkellervergärungsgrad
- gesteigerte Filtrationseigenschaften (z. B. bessere Klärung)
- verbesserte chemisch-physikalische Stabilität
- sensorische Verbesserungen
- bessere Geschmacksstabilität

### Würzesäuerung

Die positiven Effekte der Würzesäuerung gleichen denen der Maischesäuerung. Allerdings hat die Würzesäuerung keinen Einfluss auf enzymatische Vorgänge während des Maischprozesses. Vielmehr werden physikalische Prozesse wie die Eiweißkoagulation während der Kochung unterstützt. Die Würzesäuerung sollte am Ende des Kochprozesses erfolgen, um sowohl Verluste bei der Isomerisierung der Hopfenbittersäuren und somit geringere Bitterstoffausbeuten als auch keine erhöhten DMS-Werte durch die verlangsamte Umwandlung der DMS-P zu freien DMS zu vermeiden.

Vorteile:

- bessere Eiweißausscheidung durch bessere Bruchbildung
- rascher Gärverlauf, schnellerer pH-Sturz
- verbesserte chemisch-physikalische Stabilität
- verbesserte Geschmacks-, Schaum und mikrobiologische Stabilität

### 3 Material und Methoden

#### 3.1 Statistische Methoden

Die Statistik bzw. statistische Kennzahlen dienen als wissenschaftliches Werkzeug zur Erfassung, Darstellung und Interpretation erhaltener Daten. Neben der Lage der Verteilung, beschrieben durch den Mittelwert  $\bar{x}$ , den Median  $\tilde{x}$  oder den Modalwert, ist die Streuung einer Datenreihe für den Analytiker von Interesse. Als Maß für Präzision der analytischen Arbeit kann die Spannweite R (Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Wert in der Datenreihe) herangezogen werden. Die häufigste Streuungskenngröße in Verteilungen ist jedoch die Varianz  $\text{var}(x)$  bzw.  $(s_x^2)$  und die Standardabweichung  $s_x$  der Einzelwerte. Allerdings ist beim Vergleich von Datenreihen mit verschiedenen Größenordnungen die Standardabweichung als Maß für die Präzision nicht aussagekräftig genug. Daher wird in der Analytik zur Bewertung der Genauigkeit und Aussagekraft einer Analyse der Variationskoeffizient  $Vk$  (relative Standardabweichung) herangezogen. Diese Größe wird meistens in Prozent angegeben und gibt die Standardabweichung  $s_x$  bezogen auf den Mittelwert  $\bar{x}$  wieder. [197]

Für den arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}_i$  gilt:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{Gl. 3.1.1})$$

Standardabweichung  $s$ :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)^2}{n-1}} \quad (\text{Gl. 3.1.2})$$

Die Standardabweichung  $s_M$  des Mittelwertes wird berechnet mit:

$$s_M = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gl. 3.1.3})$$

Streuung des Mittelwertes (Vertrauensbereich):

$$\bar{x}_i \pm \frac{s \times c}{\sqrt{n}} \quad (\text{Gl. 3.1.4})$$

|             |  |
|-------------|--|
| $\bar{x}_i$ | = Mittelwert der Verteilung  |
| $n$         | = Anzahl der unabhängigen Einzelergebnisse   |
| $x_i$       | = Wert eines unabhängigen Einzelergebnisses  |
| $s$         | = Standardabweichung   |
| $c$         | = Faktor aus Tabelle der t-Student-Verteilung für den jeweiligen Freiheitsgrad $f$ |
| $f$         | = die Anzahl $n$ der Daten, verringert um 1  |

$$Vk = \frac{s}{\bar{x}_i} \cdot 100 \% \quad (\text{Gl. 3.1.5})$$

### Statistische Versuchsplanung mittels der Software Design Expert®

Für die statistisch geplante Versuchsreihe im Rahmen der vorliegenden Arbeit, wurde die Software Design Expert der Firma Stat-Ease (Stat-Ease, Inc., 2021 E. Hennepin Avenue, Ste 480, Minneapolis, MN 55413-2726) in der Version 6.0.11 verwendet. Diese Software bietet die Möglichkeit, verschiedene faktorielle Versuchsplanungen sowie Response-Surface-Methodology Versuchsplanungen durchzuführen und die resultierenden Daten auszuwerten. Aus den statistisch geplanten Versuchen werden mit Hilfe von Regessionsanalysen mathematische Modelle gebildet. Nähere Angaben sind in der zugehörigen Literatur nachschlagbar. [198] Einige Kennzahlen sowie geforderte Bedingungen sind bei der Bewertung der Güte des erhaltenen mathematischen Modells zu beachten.

### Kennzahlen zur Bewertung der Güte der Modells und geforderte Bedingungen [199, 200]:

- F-Test (p-Wert): Modell signifikant, wenn p-Wert unter 0,05 liegt  
Term signifikant, wenn p-Wert unter 0,1 liegt
- p-Wert: gibt an, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass ein Term mit dem zugehörigen F-Wert keinen signifikanten Effekt hat (Wahrscheinlichkeit liegt unter 5 %).
- F-Wert: Verhältnis der Varianz des Modells zur Varianz der Residuen
- Lack of Fit: Streuung der erzielten Daten um das gebildete Modell, p-Wert für den Lack-of-Fit-Wert sollte größer 0,1 (nicht-signifikant) sein.
- Adeq Precision: adäquate Genauigkeit (Verhältnis Signal zu Rauschen), sollte

größer 4 sein.

- RSquared:  $R^2$ -Wert, sollte möglichst 1 sein.
- Adj R-Squared (Werte für die Regression) und Pred R-Squared (Wert für das Modell) sollten sich nicht um mehr als 0,2 unterscheiden.
- Residuen (Abweichungen zwischen den gemessenen Werten und den an dieser Stelle durch das Regressionsmodell geschätzten Werten) müssen normalverteilt sein, da die Berechnungen der Varianzanalyse nur dann Gültigkeit haben.
- Eliminierte Ausreißer sind die Standardnummern der Versuche, deren Werte bei der Modellbildung in der Residuenanalyse deutlich auffällig waren und aus diesem Grund für die Modellbildung ignoriert wurden.
- Mittels Varianzanalyse wird das Modell um nicht signifikante Terme reduziert. Die Eliminierung der Terme erfolgte programmgesteuert (rückwärtsgerichtete Eliminierung, p-Wert 0,1).

## 3.2 Analytische Methoden

### 3.2.1 Chemisch-technische Analysen

Tabellen 2–5 geben einen Überblick über die durchgeführten chemisch-technischen Analysen. Die Wasseranalytik erfolgt ebenfalls nach MEBAK [201].

| ANALYSE                            | VORSCHRIFT                                  |
|------------------------------------|---|
| Gesamthärte                        | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.1.10.2 |
| Karbonathärte                      | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.1.10.3 |
| Restalkalität                      | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.2.1    |
| Säurekapazität bis pH 8,2 bzw. 4,3 | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.1.11   |
| Kalziumhärte                       | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.1.13.1 |
| Magnesiumhärte                     | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 1.1.14.1 |

Tab. 2: Brauwasseranalysen [201]

Die Werte sind im Anhang Tabelle AH 32 abgebildet.

| ANALYSE                      | VORSCHRIFT   |
|------------------------------|--|
| Rohprotein                   | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.5.1.1  |
| löslicher Stickstoff         | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.5.2.1   |
| Eiweißlösungsgrad            | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.5.3   |
| $\alpha$ -Amino-Stickstoff   | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.5.5   |
| VZ 45 °C (VZ 65 °C)          | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.11  |
| Viskosität                   | Kugelfall-Viskosimeter nach HÖPPLER<br>MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.4.1    |
| Friabilimeter                | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.3.6.1   |
| Homogenität und Modifikation | Calcofluor-Carlsberg-Methode<br>nach EBC<br>MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.3.8 |
| $\beta$ -Glucan              | Kongresswürze und VZ 65 °C<br>MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.9.2             |
| Extrakt                      | Biegeschwinger (Anton Paar KG)<br>MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.13.2.3         |
| Endvergärungsgrad            | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.10  |
| Verzuckerung                 | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.3.1  |
| Geruch der Würze             | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.2  |
| Thiobarbitursäurezahl        | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.4  |
| Würzefarbe                   | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.2.8.2   |
| Kochfarbe                    | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 4.1.4.2.9   |
| pH-Wert                      | MEBAK Band II  |

|   |  |
|---|--|
|   | 3. Auflage Kapitel 2.17                |
| freier Rohfettgehalt (Rohfettextraktion nach SOXLETH) | MEBAK Band I<br>3. Auflage Kapitel 3.5 |

**Tab. 3: Malzanalysen [201, 202]**

| ANALYSE | VORSCHRIFT  |
|---------|---|
| Extrakt | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.13.2.3  |
| pH-Wert | MEBAK Band II 3. Auflage Kapitel 2.17   |
| Farbe   | spektralphotometrische Methode (EBC-Methode)<br>MEBAK Band I 3. Auflage Kapitel 3.6 |

**Tab. 4: Würzeanalysen [201, 202]**

| ANALYSE                               | VORSCHRIFT  |
|---------------------------------------|---|
| Extrakt                               | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.13.2.3  |
| pH-Wert                               | MEBAK Band II 3. Auflage Kapitel 2.17   |
| Farbe                                 | spektralphotometrische Methode (EBC-Methode)<br>MEBAK Band I 3. Auflage Kapitel 3.6 |
| Schaumhaltbarkeit nach ROSS und CLARK | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.13.2.3  |
| Schaumbestimmung nach Nibem           | MEBAK Band II<br>3. Auflage Kapitel 2.23.3  |

**Tab. 5: Bieranalysen [201, 202]**

### 3.2.2 Analyse des Proteingehaltes mittels Färbetechnik

#### Prinzip:

Diese Proteingehaltsbestimmung beruht auf der Bindung von Coomassie Brilliant Blue G-250 an Proteine. Die Bindung des Farbstoffs an das Protein bewirkt eine Änderung des Absorptionsmaximums von 465 nm auf 595 nm. Dieser Anstieg wird bei 595 nm spektralphotometrisch erfasst.

### *Herstellung des Coomassie Brilliant Blue G250:*

100 mg Brilliant Blue G in 50 ml 95%igen Ethanol geben und anschließend 100 ml Phosphorsäure zugeben, die gesamte Lösung auf 1000 ml auffüllen und anschließend über einen Schwarzbandfilter filtrieren.

### Durchführung:

Zu 0,1 ml Proteinlösung wird 1,5 ml Reagenz Coomassie Brilliant Blue G 250 geben. Für den Blindwert (Blank) anstelle von Reagenz Puffer verwenden. Die Messung erfolgt spektralphotometrisch bei 595 nm. Die Formel ist für Proben gültig, die eine Proteinkonzentration von 0,8 bis 10 µg/l aufweisen (bezogen auf das Gesamtvolumen). Über die Erstellung einer Standardkurve und unter Berücksichtigung der verwendeten Reagenzien wird der jeweilige Faktor und die entsprechende Proteinmenge in µg/ml errechnet.

### Berechnung der Proteinkonzentration:

$$\text{Proteinkonzentration } [\mu\text{g} / \text{ml}] = \frac{(E_{\text{Probe } 595 \text{ nm}} - E_{\text{Blank } 595 \text{ nm}}) \times \text{Gesamtvolumen } [\text{ml}]}{0,06 \times \text{Probevolumen } [\text{ml}]}$$

## **3.2.3 Chromatographische Analysen**

### **3.2.3.1 Chromatographische Methoden**

Die chromatographischen Analysenmethoden wurden nach am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I etablierten Analysenmethoden durchgeführt. Die Analysengenauigkeit und Aussagekraft der verwendeten chromatographischen Methoden wird im weiteren Verlauf der Arbeit über Variationskoeffizienten angegeben und bewertet. Da es sich bei den Methoden zur Bestimmung der Fettabbauprodukte zum einen um eine sehr aufwendige und kostenintensive Analytik handelt, und zum anderen aufgrund von Veränderungen in der Enzymzusammensetzung des Rohstoffes Malz diese in einem sehr engen Zeitrahmen durchgeführt werden musste, wird der Variationskoeffizient in dieser

Arbeit ebenfalls zur statistischen Auswertung und Beurteilung der Analyseenergebnisse herangezogen.

Die chromatographischen Analysen wurden nach internen Prüfverfahren durchgeführt. Die Bestimmung der Würzearomastoffe, Bieraromastoffe und Alterungskomponenten erfolgte nach vorausgegangener Wasserdampfdestillation und Abtrennung der organischen Phase über eine Flüssigextraktion mittels GC-FID. Die vicinalen Diketone sowie die höheren Alkohole und Ester wurden mittels Headspace Methode bestimmt und über GC-ECD bzw. GC-FID detektiert.

Die wasserdampfvlüchtigen Malzaromastoffe wurden nach dem Verfahren GC 015/06, die Würzearomastoffe nach der Vorschrift GC 005/96 und freies DMS sowie DMS-P nach GC 003/96 ermittelt. Bei der Untersuchung der hergestellten Biere erfolgte die Bestimmung der vicinalen Diketone in Bier nach der Methode GC 001/96, wasserdampfvlüchtigen Aromastoffe in Bier nach GC 011/98 und die Analyse der Alterungsindikatoren nach GC 007/96. [3, 20, 22, 24, 146, 203] Die für die folgenden gaschromatographischen Analysen angegebenen Variationskoeffizienten (siehe Tabellen 6–9) wurden nach einer Zehnfach-Bestimmung errechnet.

| Substanz/Substanzgruppe | Variationskoeffizient in % |                  |        |
|-------------------------|----------------------------|------------------|--------|
|                         | Malzaromastoffe            | Würzearomastoffe |        |
| 3-Methylbutanal         | 3,5                        | 1,7              | (A, W) |
| 2-Methylbutanal         | 3,9                        | 1,3              | (A, W) |
| Methional               | 6,6                        | 8,1              | (A)    |
| Benzaldehyd             | 9,8                        | 4,6              | (A)    |
| 2-Phenylethanal         | 6,4                        | 6,5              | (A, W) |
| Σ Strecker-aldehyde     |                            | 3,4              |        |
| Pentanal                | 3,5                        | 8,2              | (A)    |
| Hexanal                 | 6,2                        | 3,8              | (A)    |
| Heptanal                | 4,1                        | 3,4              | (A)    |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal    | 8,8                        |                  | (A)    |
| 2-Pentanon              |                            | 8,8              | (A)    |
| γ-Nonalacton            | 5,5                        | 6,2              | (A, W) |
| (E)-2-Nonenal           | 10,0                       |                  |        |
| 2-Furfural              | 3,9                        | 6,3              | (T)    |
| 3-Methylbutanol         | 4,3                        | 8,1              | (A)    |

|                 |      |      |     |
|-----------------|------|------|-----|
| 2-Methylbutanol | 3,5  | 7,3  | (A) |
| 1-Pentanol      | 3,0  | 7,9  | (A) |
| 1-Hexanol       |      | 5,1  | (A) |
| 1-Octanol       | 5,1  | 4,1  | (A) |
| 1-Octen-3-ol    | 4,3  | 13,5 | (A) |
| Phenylethanol   | 11,0 | 3,9  | (A) |

**Tab. 6: Variationskoeffizienten der Malz- und Würzearomastoffe**

A = Indikator für Ausdampfung beim Würzekochen

W = Indikator für thermische Belastung im Whirlpool

T = Indikator für thermische Belastung beim Würzekochen und im Whirlpool

| Substanz/Substanzgruppe       | Variationskoeffizient in %<br>Bieraromastoffe |
|-------------------------------|---|
| Hexanol-1                     | 5,9   |
| Heptanol-1                    | 6,0   |
| Octanol-1                     | 4,3   |
| Decanol-1                     | 3,2   |
| 2-Phenylethanol               | 2,2   |
| Furfurylalkohol               | 9,7   |
| Essigsäureisobutylester       | 2,1   |
| Essigsäurehexylester          | 3,0   |
| Essigsäureheptylester         | 3,1   |
| Essigsäureoctylester          | 1,7   |
| Essigsäurefurfurylester       | 6,4   |
| Essigsäure-2-Phenylethylester | 3,5   |
| Buttersäureethylester         | 1,7   |
| Hexansäureethylester          | 4,3   |
| Octansäureethylester          | 1,4   |
| Decansäureethylester          | 3,5   |
| Isovaleriansäure              | 9,4   |
| Hexansäure                    | 5,7   |
| Octansäure                    | 3,6   |
| Nonansäure                    | 8,3   |
| Decansäure                    | 4,0   |
| Dodecansäure                  | 5,8   |
| $\alpha$ -Terpineol           | 8,7   |
| Linalool                      | 9,3   |
| Nerol                         | 8,7   |
| $\gamma$ -Nonalacton          | 4,1   |

**Tab. 7: Variationskoeffizienten der Bieraromastoffe**

| Substanz/Substanzgruppe         | Variationskoeffizient in % |        |
|---------------------------------|----------------------------|--------|
|                                 | Alterungsindikatoren       |        |
| 3-Methylbutanal                 | 2,0                        | (S, A) |
| 2-Furfural                      | 4,6                        | (W, A) |
| 5-Methylfurfural                | 8,2                        | (A)    |
| Benzaldehyd                     | 6,0                        | (S, A) |
| 2-Phenylethanal                 | 3,2                        | (S, A) |
| Bernsteinsäurediethylester      | 5,3                        | (A)    |
| Nicotinsäureethylester          | 6,0                        |        |
| Phenyllessigsäureethylester     | 7,4                        | (A)    |
| 2-Propionylfuran                | 7,3                        | (A)    |
| $\gamma$ -Nonalacton            | 2,6                        | (W, A) |
| Summe der Wärmeindikatoren      | 0,8                        |        |
| Summe der Sauerstoffindikatoren | 1,2                        |        |
| Summe der Alterungskomponenten  | 1,0                        |        |

**Tab. 8: Variationskoeffizienten der Alterungsindikatoren**

S = Sauerstoffindikator

W = Wärmeindikator

A = Alterungsindikator

| Substanz/Substanzgruppe | Variationskoeffizient in % |
|-------------------------|----------------------------|
|                         | höhere Alkohole und Ester  |
| Acetaldehyd             | 4,1                        |
| Propanol                | 6,5                        |
| Ethylacetat             | 7,9                        |
| 2-Methylpropanol        | 2,6                        |
| 2-Methylbutanol         | 1,9                        |
| 3-Methylbutanol         | 1,6                        |
| 2-Methylpropylacetat    | 6,5                        |
| Buttersäureethylester   | 6,3                        |
| 2-Methylbutylacetat     | 4,7                        |
| 3-Methylbutylacetat     | 4,9                        |
| Hexansäureethylester    | 7,1                        |
| Substanz/Substanzgruppe | Variationskoeffizient in % |
|                         | vicinale Diketone          |
| Diacetyl                | 6,9                        |
| Pentandion              | 8,0                        |

**Tab. 9: Variationskoeffizienten der vicinalen Diketone sowie der höheren Alkohole und Ester**

### 3.2.3.2 Bestimmung der langkettigen Fettsäuren

#### Prinzip:

Die Probenaufbereitung zur Bestimmung der freien langkettigen Fettsäuren erfolgt mittels Festphasenextraktion, anschließender Methylierung und Analyse mittels GC-MS. Für den Derivatisierungsschritt wurde eine Methylierungsapparatur der Firma Sigma-Aldrich verwendet und die firmenseitig vorgeschlagene Applikation [204] angepasst. Mit der Aldrich Mini Diazald® Apparatur besteht die Möglichkeit, eine Konzentration von 1–50 mmol Diazomethan aus Diazald (N-Methyl-4-nitrosotoluolsulfonsäureamid) herzustellen. Abbildungen 19 und 20 stellen die verwendete Apparatur und den Versuchsaufbau dar.

#### Probenvorbereitung:

- Maischen bzw. trübe Würzen mit 3500 U/min für 20 Minuten bei 4 °C (Megafuge 1.0 R/Sigma 6k15, Fa. Heraeus Instruments), zentrifugieren, Biere entgasen
- auf 50 ml Würze oder Bier (temperiert auf 20 °C) 1 ml internen Standard (C15/ISTD) pipettieren
- Herstellung ISTD: Pentadecansäure (100 mg/l), gelöst in Ethanol und anschließend 1 : 50 verdünnt

#### Durchführung:

Die C18-Festphasensäule (Strata C18-E, Fa. Phenomenex) wurde mit jeweils 4 ml Diethylether, Methanol und dest. H<sub>2</sub>O konditioniert. Nach der Konditionierung wurden 20 ml der Probe aufgegeben. Anschließend folgte ein Waschschrift mit 5 ml dest. H<sub>2</sub>O. Die Elution der freien langkettigen Fettsäuren erfolgte mit 5 ml Diethylether.

#### **Bedingungen am GC:**

GC-MS: HP 5970 A, Fa. Hewlett Packard

Vorsäule: fused silica tube (Länge = 1 m, i. D. = 0,25 mm).

Säule: Optima-5-MS fused silica capillary column (Länge = 50 m; Filmdicke = 0,2 µm; i. D. = 0,2 mm, Fa. Macherey-Nagel)

Trägergas: Helium

Flussrate: 28 cm/s; split vent flow: 14 ml/min

Temperaturprogramm: Injektortemperatur 250 °C; Detektortemperatur 280 °C; 120 °C für 2 min, Aufheizen auf 260 °C mit einer Aufheizrate von 8 °C/min, 15 min halten, Aufheizen auf 280 °C mit einer Aufheizrate von 8 °C/min, 5 min halten; Laufzeit: 42 Minuten

### Methylierung:

#### **Reagenzien:**

|                          |                     |
|--------------------------|---------------------|
| Methanol p. a.           | Fa. J.T. Baker      |
| Diethylether p. a.       | Fa. Riedel-de-Haen  |
| Acetonitril              | Fa. Merk, Darmstadt |
| 95%iges Ethanol          | Fa. J.T. Baker      |
| Kaliumhydroxid-Plättchen | Fa. Sigma-Aldrich   |
| Aceton                   | Fa. Merk            |
| Natriumchlorid           | Fa. Sigma-Aldrich   |
| Diazald <sup>®</sup>     | Fa. Sigma-Aldrich   |

#### ***Vorgehensweise für alkoholhaltige, ätherische Lösung [204]:***

Den Kondensator mit Trockeneis füllen und dann Isopropanol langsam zugeben, bis der Kühlfinger zu einem Drittel gefüllt ist. Ethanol (95 %, 10 ml) mit Kalilauge [(5 g Kaliumhydroxidplättchen) und Wasser (8 ml)] in das Reaktionsgefäß vorlegen. Der die Probe enthaltende Rundkolben wird auf ca. –10 °C gekühlt. Über den Scheidetrichter wird die Lösung aus Diazald<sup>®</sup> (2 g in 25 ml Ether) in das unter dem Scheidetrichter angebrachte Reaktionsgefäß über einen Zeitraum von ca. 20 Minuten tropfenweise überführt. Das Reaktionsgefäß wird mittels eines Wasserbades auf 65 °C temperiert. Die Destillationsrate sollte der Umsetzungsreaktion entsprechen. Wenn das gesamte Diazald<sup>®</sup> verbraucht ist, erneut 20 ml Ether zuführen und mit der Destillation fortfahren bis das Destillat farblos ist.

Anschließend wird die methylierte Probe bis zur Trockene am Rotationsverdampfer (Fa. Heidolph) eingedampft, der Rückstand in 2 ml Ethanol aufgenommen, in ein Vial überführt und 2 µl injiziert.

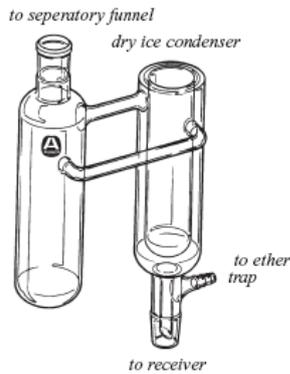


Abb. 19: Mini Diazald® Apparatur

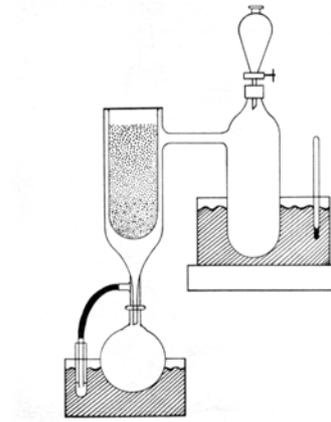


Abb. 20: Versuchsaufbau der Methylierungsapparatur

### Kalibrierung:

Die notwendigen Reinsubstanzen (C14, C15, C16, C18, C18:1, C18:2, C18:3) wurden ebenfalls von der Firma Sigma-Aldrich bezogen.

### **Kalibrationsniveaus:**

- 0,2; 0,5; 1,0; 2,0; 4,0 mg/l (Ausschlagwürze, Anstellwürze, Bier)
- zusätzliches Kalibrationsniveau 8,0 mg/l (Vorderwürze, Pfannevoll-Würze)
- Herstellung einer Stammlösung (1 g/l) und Erstellen eine Verdünnungsreihe
- additive Kalibrierung: Zugabe von 1 ml verdünnter Stammlösung zu 49 ml Würze bzw. Bier, Zugabe von 1 ml ISTD
- Verwendung von Standardwürze hergestellt aus Würzeextrakt „Bavarian Pilsner“ (Malzfabrik Weyermann) bzw. angepasstem Biertyp

### **Variationskoeffizient (n = 7):**

- C14            5 %
- C16            3 %
- C18            4 %

- C18:1 3 %
- C18:2 6 %
- C18:3 4 %

### 3.2.3.3 Bestimmung der Fettsäurehydroperoxide

#### Prinzip:

Die Bestimmung der Summe der C18:2- und C18:3-Fettsäurehydroperoxide erfolgt unter Sauerstoffausschluss. Nach Festphasenextraktion wurde die Probe mittels HPLC-DAD analysiert.

#### Probenvorbereitung:

- Schrot (Feinschrot, DLFU-Mühle) begasen, entgastes dest. H<sub>2</sub>O am Becherrand entlang vorsichtig eingießen
- nach dem Einmischen CO<sub>2</sub>-Puffer über den Flüssigkeitsspiegel legen und Maischbecher mit Deckel (Aussparung für Rührer vorhanden) abschließen
- alle 10 Minuten CO<sub>2</sub>-Puffer erneuern
- Proben nach Entnahme erneut begasen, verschließen und rasch auf 4 °C abkühlen
- Maische in verschraubbare Zentrifugenbecher (500 ml) umfüllen, begasen und verschließen
- Zentrifugieren der Proben unter CO<sub>2</sub>-Athmosphäre bei 3000 U/20 min

#### Durchführung:

Die Festphasensäule wurde mit 4 ml Methylenchlorid, 4 ml Methanol und 4 ml H<sub>2</sub>O mit einer Durchflussrate von 1 ml/min konditioniert. Danach wurden 20 ml zentrifugierte und filtrierte Maischprobe auf die Festphase (Strata C 18-E, 1000 mg/6 ml, Fa. Phenomenex) aufgebracht (1 ml/min) und das Sorbens mit 5 ml dest. H<sub>2</sub>O nachgespült. Anschließend wurde eine 20minütige Trocknungszeit eingehalten. Nach Aufbringen eines Dry-Aufsatzes (Fa. Macherey & Nagel) wurde die Festphase mit 6 ml Methylenchlorid mit ca. 1 ml/min Durchflussrate gespült. Nach der Elution wurde das Methylenchlorid mit Stickstoff bis zur vollständigen

Trockenheit verblasen und der Rückstand mit 1,5 ml Acetonitril/Wasser-Gemisch (70 : 30 v/v) wieder aufgenommen, über einen 0,45 µm Membranfilter filtriert und in die HPLC-DAD injiziert. Die Auswertung erfolgte über Flächenauswertung mit externem Standard (eingefrorene Standardlösungen).

***Substanzen:***

Die notwendigen Reinsubstanzen (C18:2, C18:3) wurden ebenfalls von der Firma Sigma-Aldrich bezogen.

***Bedingungen an der HPLC:***

HPLC-DAD: HP 1090, Fa. Hewlett Packard

HPLC-Tennsäule: ZORBAX Eclipse XDB-C8 (250 mm x 4,6 mm i. D.) mit Vorsäule,  
Fa. Agilent Technologies

Eluent: Acetonitril/Wasser (80 : 20 v/v) mit 0,07 % Essigsäure (isokratisch)

Laufzeit: 20 Minuten

Flussrate: 1,5 ml/min

Injektionsvolumen: 25 µl

Wellenlänge: 234 nm

**Kalibrierung:**

Die Herstellung der Linol- und Linolensäure-Hydroxperoxide erfolgte nach einer modifizierten Methode nach KERMASHA et al. [205]

Die langkettigen ungesättigten Fettsäuren C18:2 und C18:3 wurden in Ethanol gelöst. Danach wurden 25 µl Linolsäure (= 89,8 mg, 1 mM) und 480 µl Tween-20 mit gesättigter Tris-HCl-Pufferlösung (0,1 M, pH = 7,2) auf 100 ml aufgefüllt. Durch die anschließende Zugabe von LOX I (Fa. Sigma-Aldrich) erfolgte die Umsetzung der Fettsäuren zu Fettsäurehydroperoxiden. Das Reaktionsmedium wurde bei 25 °C auf einem Magnetrührer 2 h lang bei 100 U/min gerührt. Die Bildung der Linol- und Linolensäure-Hydroxperoxide wurde anhand der Absorbtionszunahme bei 234 nm spektralphotometrisch überprüft. Nach 2 h wurde die Reaktion nach vorausgesetzter vollständiger Umsetzung aller Fettsäuren durch Ansäuern auf

pH = 3,0 durch 1 M HCl gestoppt. Die Herstellung des Linolensäure-Hydroperoxid-Standards erfolgte analog mit 25 µl Linolensäure.

Die HPO-Standards wurden mit Tris-HCl-Pufferlösung verdünnt. Die 5-Punkt-Kalibrierung erfolgte mit den Konzentrationsniveaus 5, 20,50, 100 und 200 µM/l.

***Variationskoeffizient (n = 7):***

Σ Linolsäure-Hydroperoxide: 2,2 %

Σ Linolensäure-Hydroperoxide: 4,5 %

### **3.3 Enzymatische Untersuchungen**

#### **3.3.1 Bestimmung der Lipase-Aktivität**

Die zu untersuchenden Malze wurden bei 0 °C gelagert und im Rahmen des notwendigen Bearbeitungszeitraumes so schnell wie möglich untersucht.

#### **Methode 1 (modifizierte Methode nach KWON und RHEE):**

Prinzip:

Zur Bestimmung der Lipase-Aktivität wurden die entstandenen freien Fettsäuren, welche mit Kupfer-(II)-Salzen in Isooctan/Toluol lösliche Kupferseifen bilden, colorimetrisch erfasst. [52, 56]

Durchführung:

Zur Bestimmung der Lipase-Aktivität in Maische wird aus den gefriergetrockneten, nicht löslichen Maischebestandteilen ein Acetonpuder erstellt und die freien Fettsäuren, welche durch Lipase-Aktivität freigesetzt werden, analysiert.

Probenaufbereitung:**Herstellung von Acetonpuder zur Reduktion endogener Lipide:**

Es wurden 4 g des gefriergetrockneten Rückstandes mit 20 ml Aceton-Kaliumdihydrogenphosphatpuffer (50 mM, mit Kaliumhydroxid auf pH 7,0 eingestellt) 8 Minuten gerührt und anschließend filtriert. Der Vorgang wurde mit 20 ml Aceton wiederholt. Der gereinigte Rückstand wurde im Filter getrocknet.

In einem 50 ml Schraubbehälter wurden 0,1 g Triolein (Vermeidung von Störungen durch Esterasen, die nicht mit langkettigen Triacylglyceriden reagieren) mit 20 ml TritonX 100 (0,4 g in 20 ml 0,1 M Tris-HCl-Puffer mit Salzsäure auf pH 6,8 eingestellt) emulgiert. In die Emulsion wurde 1,0 g des Acetonpuders eingewogen, die Probe 15 min geschüttelt und anschließend bei 33 °C für 19 h inkubiert.

**Extraktion der freien Fettsäuren:**

Zur Extraktion der freien Fettsäuren wurden 20 ml Diethylether zur inkubierten Probe gegeben, gemischt und für 10 Minuten stehen gelassen. 5 ml der oberen Phase wurden abgezogen und in einem Rundkolben im Rotationsverdampfer vollständig eingedampft. Die freien Fettsäuren wurden in 5 ml Isooctan wieder aufgenommen.

Messung der freien Fettsäuren:

Zur Probe wurde 1 ml Kupferacetat-Farbreagenz (5 GV-%, mit Pyridin auf pH 6,1 eingestellt) dotiert und 2 Minuten geschüttelt. Die photometrische Messung erfolgte in Glasküvetten bei 715 nm.

Kalibrierung:

Die Kalibrierung der Methode erfolgt über fünf Kalibrationsniveaus. Zur Herstellung der Stammlösung wurden die Referenzsubstanzen (Ölsäure, Linolsäure, Linolensäure) in Isooctan gelöst und eine Verdünnung als Summenparameter im Bereich 0,4–10 mM hergestellt. Von den Verdünnungen wurden jeweils 5 ml mit 1 ml Kupferacetat-Farbreagenz gemischt und pro Reagenzglas 2 Minuten

geschüttelt. Nach der Phasentrennung wird die Extinktion der oberen Phase in einer Glasküvette bei 715 nm gemessen (siehe Abbildung 21).

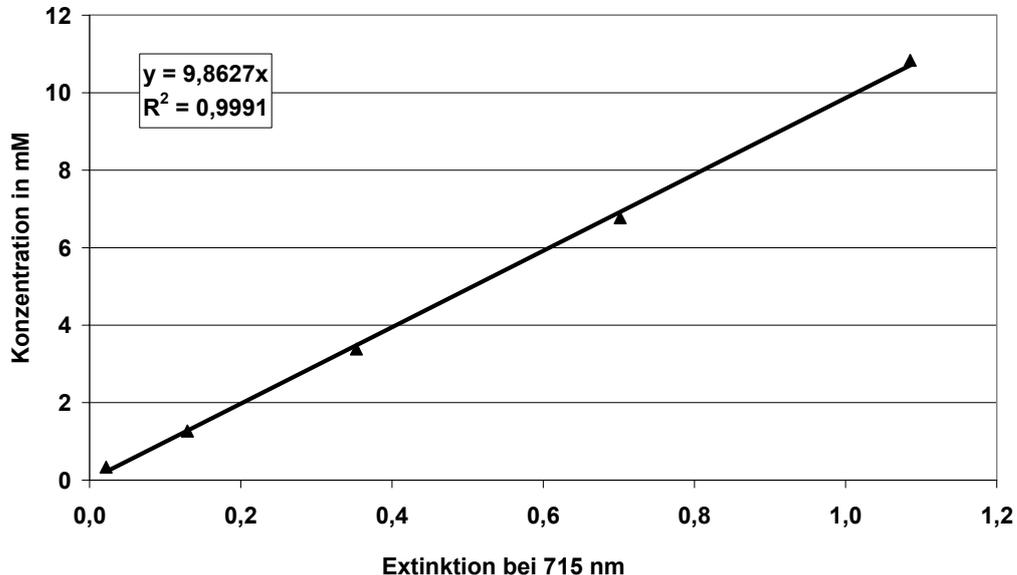


Abb. 21: Kalibriergerade der Summe der freien Fettsäuren (C18:1, C18:2, C18:3)

### **Methode 2 (modifizierte Methode nach KRETSCHMER):**

#### Prinzip:

Freisetzung von Ölsäure durch Lipase aus Triolein-Substrat und anschließende Titration mit 0,05 N NaOH auf pH 10,5. [146, 206]

#### Durchführung:

Die Bestimmung der Lipase erfolgt aus isotherm angesetzten Maischen (20 g Feinschrot und 300 ml dest. H<sub>2</sub>O; Maischzeit: 45 Minuten), wobei 5 Minuten vor der Probenahme das Rührwerk der einzelnen Proben abgestellt wird, so dass eine klare Flüssigkeit abgezogen werden kann.

1 ml Würze wird in einem Gemisch von 10 ml Natrium-Kalium-Pufferlösung (7,268 g Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> + 3,522 g KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> in 1000 ml dest. H<sub>2</sub>O lösen) und mit 10 ml Trioleatemulsion bei 40 °C und 5 Minuten inkubiert und mit 0,05 N NaOH auf

pH 10,5 titriert. Blindwerte für Probe und Substrat werden mitgeführt. Die Bestimmung der Probe erfolgte jeweils mittels Dreifach-Bestimmung.

Berechnung der Lipase-Aktivität:

Probe (ml) – Blindwert (ml) = Differenz (ml)

Differenz (ml) × 278 = Aktivität der Lipase in Internationalen Einheiten (IE)

### 3.3.2 Bestimmung der Lipoxygenase-Aktivität

Prinzip:

Die präparative Aufreinigung der lipidabbauenden Enzyme (Lipoxygenase und hydroperoxidabbauende Enzymfraktion) erfolgte gelchromatographisch nach dem Größenausschlussverfahren über eine Superdex 200 prep grade 26/60 Column (Fa. Amersham Biosciences) mit anschließender spektralphotometrischer Bestimmung ( $M_r = 1 \times 10^4 - 6 \times 10^5$ ). Die Herstellung des Substrates für LOX-Aktivität und hydroperoxidabbauende Enzymaktivität erfolgte nach einer modifizierten Methode von SURREY. [118, 207]

Durchführung:

Nach Erstellung eines Kaltauszuges (5 g Feinschrot + 20 ml 0,05 M Phosphatpuffer, pH 7,0/Eluent) wurde die Suspension 20 Minuten zentrifugiert (3500 U/min bei 4 °C) und ca. 10–15 ml des Überstandes durch einen 0,45 µm Membranfilter filtriert. Das erhaltene Filtrat wurde gelchromatographisch aufgetrennt und die entsprechenden Enzymfraktionen, die LOX-Aktivität aufwiesen, gesammelt. Die Erfassung der Enzymaktivität in der aufgereinigten Probe erfolgte spektralphotometrisch bei 234 nm.

- Flussrate 2,2 ml/min
- Injektionsvolumen 3 ml

Messung der LOX-Aktivität:

- 0,5 ml LOX-Fraktion (temperiert auf 20 °C) und 2,5 ml Phosphatpuffer (pH 7,0) in Quarzküvette vorlegen

- 100 µl Substrat zupipetieren und zügig mischen
- Messung starten
- Messung der Extinktionszunahme bei 234 nm (Messzeit: 3 Minuten)
- Berechnung der LOX-Aktivität über die lineare Steigung der Extinktionsgerade (Geschwindigkeit der Hydroperoxid-Bildung/konjugierte Diene)

Ein Unit der LOX-Aktivität entspricht der Bildung von 1 µM Hydroperoxid pro Minute bei 25 °C. Der VK der Aktivitätsmessung innerhalb einer gemessenen Fraktion liegt mit  $n = 7$  bei 5 %. Mit Hilfe des Verdünnungsfaktors aus der Extraktion erfolgt die Umrechnung in U/ml und unter Einbeziehung des Proteingehaltes der aufgereinigten Fraktionen die Umrechnung der Aktivität auf U/g.

### **3.3.3 Bestimmung der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität**

Die gelchromatographische Aufreinigung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion erfolgt analog wie unter Abschnitt 3.3.2 beschrieben.

#### Messung der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität:

- 3 ml Enzymfraktion (temperiert auf 20 °C) in Quarzküvette vorlegen
- 50 µl Substrat zupipetieren und zügig mischen
- Messung starten
- Messung der Extinktionsabnahme bei 234 nm (Messzeit: 3 Minuten)

Ein Unit der hydroperoxidabbauenden-Aktivität entspricht dem Abbau von 1 µM Hydroperoxid pro Minute bei 25 °C.

Der VK der Messmethode zur Bestimmung der Enzymaktivität liegt innerhalb einer gemessenen Fraktion ( $n = 7$ ) bei 5 %. Nach Aufreinigung ( $n = 5$ ) und anschließender Aktivitätsmessung beträgt der Analysen-VK 6 %.

### 3.4 Sensorische Beurteilung

#### 3.4.1 Verkostung nach DLG und Alterungsverkostung nach EICHHORN

Die maßgebende Analyse zur Beurteilung der Geschmacksstabilität ist die Sensorik. Zur Vorhersage der Geschmacksstabilität werden die Biere forciert gealtert. Die Proben werden hierzu 24 Stunden geschüttelt, um den Vertriebsweg zu simulieren und danach vier Tage bei 40 °C dunkel gelagert. Dies entspricht ungefähr einer natürlichen Alterung von 3 Monaten. Die Verkostung erfolgt frisch gegen forciert. [23, 204]

Zur sensorischen Beurteilung der Geschmacksstabilität wird nach dem 5-Punkte-Schema der DLG verkostet. [202] Zusätzlich wird der Alterungszustand [23] mit einer 4-Punkte-Skalierung bewertet. Die Akzeptanz des Bieres bezüglich der Alterung wird in Prozent angegeben, um die Benotung durch den subjektiven Eindruck des Alterungszustandes zu unterstützen, wobei 100 % einem frischen Bier entsprechen. Die Verkostungen wurden unter den geforderten Bedingungen von einem geschulten Verkosterteam mit mindestens fünf Teilnehmern durchgeführt. Um eine weitgehende Differenzierung zu gewährleisten, wurde die Bewertung der einzelnen Prüfmerkmale in Halbnotenschritten vorgenommen. [208] Ein beispielhaftes Schema für eine Verkostung nach DLG und eine Alterungsverkostung nach EICHHORN ist in Abbildung 22 dargestellt.

Die gewichtete Note der Alterungsverkostung wird mit nachstehender Gleichung berechnet:

$$\text{gewichtete Note} = \frac{2 \times \text{Geruch} + 2 \times \text{Trunk} + \text{Vollmundigkeit} + \text{Rezenz} + 2 \times \text{Bittere}}{8}$$

Die gewichtete Note der Alterungsverkostung wird mit nachstehender Gleichung berechnet:

$$\text{gewichtete Note} = \frac{2 \times \text{Geruch} + 2 \times \text{Trunk} + 1 \times \text{Bittere}}{5}$$

## Verkostung nach DLG:

Bewertung in Halbnotenschritten von 1 bis 5

Bitte Aromaeindruck angeben !

| Nr. | Probe      | Geruch | Trunk | Vollm. | Rezenz | Bittere |
|-----|------------|--------|-------|--------|--------|---------|
| A   | A frisch   | 4,0    | 4,5   | 4,0    | 4,0    | 4,0     |
| B   | A forciert | 3,0    | 3,0   | 4,0    | 4,0    | 3,5     |
| C   | B frisch   | 4,0    | 4,0   | 4,0    | 4,0    | 4,0     |
| D   | B forciert | 2,5    | 2,5   | 3,5    | 4,0    | 3,5     |

## Alterungsverkostung nach EICHHORN:

1 = frisch

2 = leicht gealtert

3 = stark gealtert

4 = extrem gealtert

Die Akzeptanz  
bezieht sich nur auf  
die Alterung des  
Bieres!

| Nr. | Probe      | Geruch | Trunk | Bittere | Akzeptanz [%] |    |    |    |    |   |  |
|-----|------------|--------|-------|---------|---------------|----|----|----|----|---|--|
|     |            |        |       |         | 100           | 80 | 60 | 40 | 20 | 0 |  |
| A   | A frisch   | 1,0    | 1,0   | 1,0     | x             |    |    |    |    |   |  |
| B   | A forciert | 2,0    | 2,5   | 2,0     |               |    | x  |    |    |   |  |
| C   | B frisch   | 1,0    | 1,0   | 1,0     | x             |    |    |    |    |   |  |
| D   | B forciert | 3,0    | 3,0   | 2,5     |               |    |    |    | x  |   |  |

Abb. 22: Beispielhaftes Schema für eine Verkostung nach DLG und Alterungsverkostung nach EICHHORN [23, 202]

### 3.4.2 Beschreibende Verkostung

Beschreibende Prüfungen dienen dazu, Proben qualitativ nach Aussehen, Geruch, Geschmack und Textur zu beschreiben. Dazu muss der Prüfer in der Lage sind, die empfundenen Eindrücke adäquat zu beschreiben. Für eine beschreibende Prüfung bei einer Bierverkostung wurde auf ausgewählte Attribute aus dem „Flavourrad“ zurückgegriffen. [209] Ergänzend zur beschreibenden Bewertung der Alterung wurde das „Flavour Stability Wheel“ herangezogen. [19]

### **3.5 Beschreibung der Mälzungs- und Brauanlagen am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I**

Die bestehenden Anlagen am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I weisen insgesamt eine gute Reproduzierbarkeit auf. Die Daten zur Überprüfung der Reproduzierbarkeit der apparativen Einrichtungen wurden von BURBERG et al. [210] veröffentlicht.

#### **3.5.1 Mälzungsanlagen und Beschreibung der Malze**

##### Kleinmälzungsanlage

Die Gerstenmuster wurden nach einem Standardmälzungsverfahren vermälzt. Die Gerstenmuster wurden bei 15 °C geweicht und gekeimt mit einer maximalen Keimgutfeuchte von 45 %. Dies erfolgte mittels zwei Nassweichen von je 5 h. Das Schwelkverfahren dauerte 24 h bei 50 °C und anschließend wurde je eine Stunde bei 60 und 70 °C und 5 h bei 80 °C gedarrt.

Alle Muster waren Vergleichssorten des dritten Wertprüfungsjahres des Bundessortenamtes. [211, 212] Von den Mustern der Ernte 2003 wurden zwei Sorten von acht Standorten untersucht.

##### **Ernte 2003**

Sorte: Annabell, Barke (Verrechnungssorte)

Standort:

Standortgruppe 1: Straßmoss, Gudendorf, Prenzlau

Standortgruppe 2: Gießen, Wörrstadt, Nossen, Dachwig

Standortgruppe 3: Hartenhof

Die Gerstenmuster des Berliner Programms Ernte 2004 wurden unter Variation des Parameters Weichgrad nach dem beschriebenen Standardmälzungsverfahren

vermälzt, um unterschiedliche Eiweißlösungsgrade zu erhalten (Vorgabe: 38, 41, 44 %).

**Ernte 2004** (Gerstenmuster Berliner Programm, siehe Anhang Tabelle AH 9) [213]

Sorte: Berras, Carafe, Pasadena

Standort: Garching

#### Auswahl geeigneter Parameter mittels Statistikmälzung

Über eine Statistikvermälzung wurde der Einfluss der Keimungsparameter Keimzeit, Keimtemperatur und Keimgutfeuchte auf die Malzqualität untersucht werden. Für den Aufbau der Versuche wurde eine Response-Surface-Methodology benutzt (Design Expert 6.0.10 Software), mit deren Hilfe ein Model („face-centred design“) für das Keimungsverhalten der Sorte Scarlett 2005 erstellt wurde, in welchem die faktoriellen Punkte sowie der Zentralpunkt doppelt bestimmt werden. Durch Variation der drei Parameter (Keimzeit, Keimtemperatur, Keimgutfeuchte) wurden insgesamt 24 Kleinmälzungen durchgeführt. Das aus den Versuchen resultierende Modell ermöglicht die Optimierung der Prozessführungsstrategie in Hinblick auf die Malzqualität.

Angestrebt wurde, Malze mit drei verschiedenen Eiweißlösungsgrade (37, 41 und 45 %) bei vergleichbaren amylolytischen, proteolytischen (so weit wie möglich) und zytolytischen Merkmalen zu produzieren. Anhand der Daten aus der Statistikmälzung wurden drei geeignete Mälzungsverfahren ausgewählt und Gerstenmuster dieser Sorte vermälzt, um Malze mit den gewünschten Eiweißlösungsgraden zu erhalten.

#### Malze des Berliner Programms

Die Brauversuche im Pilotmaßstab wurden mit sortenreinen Sommergerstenchargen aus dem Berliner Programm (veröffentlicht im Braugerstenjahrbuch 2004/2005 [214, 215]) der Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaus im Bundesgebiet e. V., die am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I im halbtechnischen Maßstab (2 Tonnen) vermälzt wurden, durchgeführt.

**Ernte 2002 (siehe Anhang Tabelle AH 4)**

Sorte: Auriga, Braemar, Pasadena, Ursa

Standort: Erbach, Fronhofen, Garching

**Ernte 2003 (siehe Anhang Tabelle AH 5)**

Sorte: Bellvue, Margret, Marnie, Pasadena

Standort: Erbach, Fronhofen, Weißensee

Pilsner Malz (siehe Anhang Tabelle AH 31)

Mälzungsversuche im Praxismaßstab (Handelsmalze)

Die Gerstenanbaufläche in Deutschland betrug im Jahr 2003 730000 ha, wobei 1,9 Mio. Tonnen Braugerste geerntet wurden. [214]

- Barke (15.9 % der Vermehrungsfläche in Deutschland)
- Auriga (8.1 % der Vermehrungsfläche in Deutschland)

**3.5.2 Labormaßstab**

Die Labormaischen wurden im Kongressmaßstab durchgeführt. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Maischverfahren (Maischzeit, Temperaturführung, Maische-pH) dem Ziel der verschiedenen Versuchsreihen angepasst. Je nach Analysenanforderung erfolgte die Fest-Flüssig-Trennung der Maischen über einen Faltenfilter bzw. mittels Zentrifugation (z. B. zur Vermeidung von Sauerstoffeintrag). Eine Beeinflussung des pH-Wertes durch die CO<sub>2</sub>-Begasung der Maische konnte nicht festgestellt werden.

### 3.5.3 Brauversuche im Pilotmaßstab

Zur Schrotung im Kleinsudwerk bzw. Pilotsudwerk wurde eine MIAG-Labormühle Typ AZ-531/4 bzw. eine 2-Walzenmühle der Firma Künzel verwendet. Der Walzenabstand wurde auf einen Sollwert von 0,8 mm eingestellt.

#### 3.5.3.1 Kleinsudwerk

Das Kleinsudwerk des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I besteht aus vier elektrischen Heizpilzen mit vier Kochkolben (zwei mit Rührwerk), einer Läutervorrichtung mit Heizmantel, einem herausnehmbaren Siebeinsatz und Senkboden sowie einem mantelbeheizten Gefäß für die Nachgüsse. Die Steuerung des Maischprogramms erfolgt über ein rechnergestütztes Programm der Firma Nerb (siehe Abbildung 23).

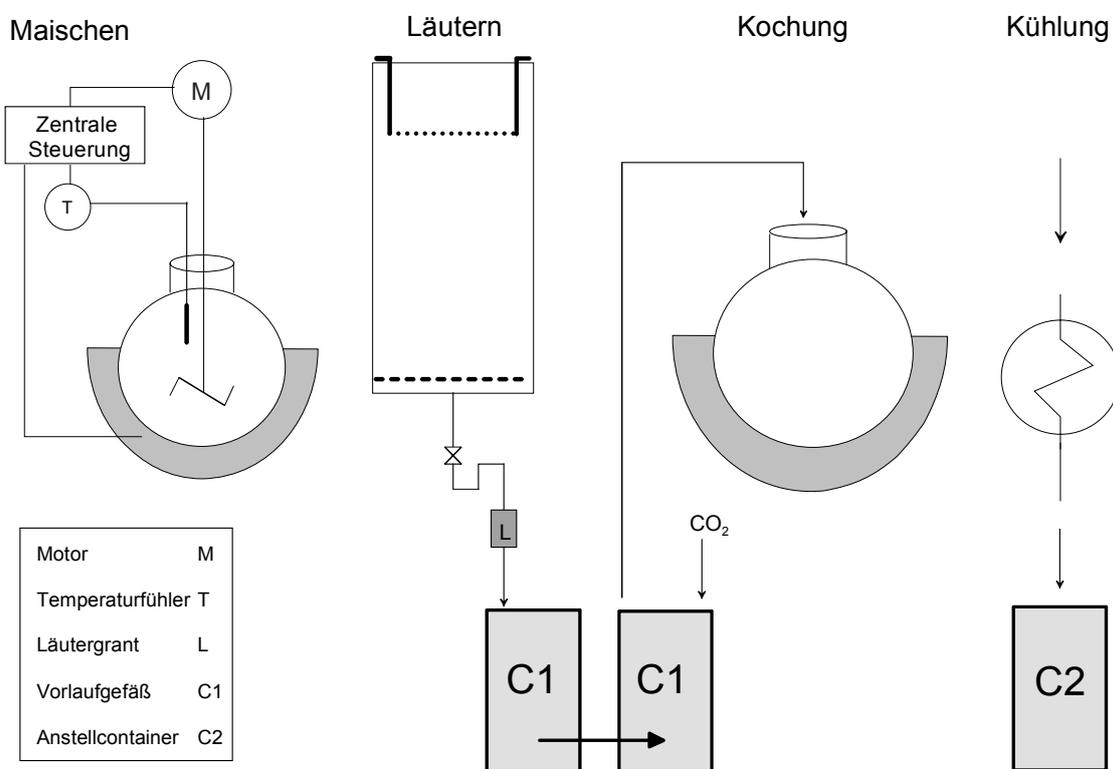


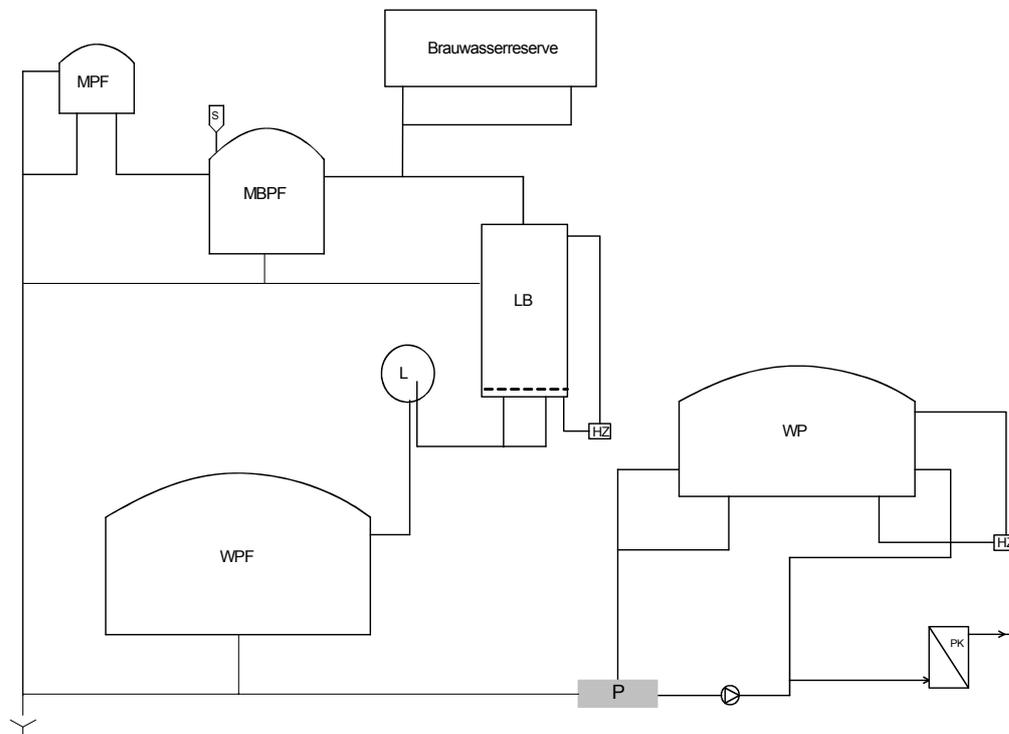
Abb. 23: Schema des Kleinsudwerks

Brautechnische Daten (Kleinsudwerk):

- Verdampfungsziffer: ca. 10 %
- Gesamtverdampfung: ca. 13 %

**3.5.3.2 Pilotsudwerk**

Die Pilotsudanlage des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I ist auf 60 l Ausschlagwürze ausgelegt und wurde von der Firma Kamm projektiert (siehe Abbildung 24).



**Abb. 24: Aufbau des Pilotsudwerks**

Die Anlage beinhaltet folgende Gerätschaften:

- Brauwasserreserve (elektrisch beheizbar)
- Schrotbehälter
- Maischepfanne

S

MPF

|   |      |
|---|------|
| ▪ Maischebottichpfanne                        | MBPF |
| ▪ Läuterbottich (beheizbar)                   | LB   |
| ▪ Läutergrant                                 | L    |
| ▪ Würzepfanne                                 | WPF  |
| ▪ Whirlpool (beheizbar über Heißwassermantel) | WP   |
| ▪ Plattenkühler                               | PK   |
| ▪ Heizung                                     | HZ   |
| ▪ Panel                                       | P    |

Die Energieversorgung der Anlage mit Frischdampf erfolgt über einen eigenen Dampferzeuger der Firma Stritzel. Die Anlage wird mit Brauwasser, kaltem und heißem Rohwasser durch die Versuchs- und Lehrbrauerei Weihenstephan versorgt. Die einzelnen Gefäße können über eine zentrale Steuerung separat angewählt und die Temperatur sowie die Programmschrittfolge manuell eingestellt werden. Das Aufheizen mit 1 °C/min und die Einhaltung der Temperaturresten (Temperaturmessung über eingebaute Temperaturfühler) erfolgt automatisch.

#### Brautechnische Daten (Pilotsudwerk):

|                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| ▪ Läutergeschwindigkeit: | ca. 0,50–0,75 l/min                |
| ▪ Ausbeute:              | ca. 72 %, je nach Malz und Biertyp |
| ▪ Bitterstoffausbeute:   | 30–33 %                            |
| ▪ Verdampfungsziffer:    | ca. 14,5 %                         |
| ▪ Gesamtverdampfung:     | ca. 18 %                           |

#### **3.5.3.3 Gär- und Lagerkeller, Filtration und Abfüllung**

Der Kleingärkeller des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I besteht aus baugleichen geschlossenen zylindrokonischen Gärtanks der Firma Pantolsky mit Mantel- und Konuskühlung. Die Steuerung der Gärtemperatur erfolgt rechnergestützt über eine elektronische Steuerung vom Typ Simatic S7-300. Die Nettovolumina der Gärtanks betragen 10 l, 25 l und 50 l. Während des Füllvorgangs

wird die Anstellwürze mittels Venturidüse (Volumenstrom 100 l/h) belüftet. Die Hefe wurde für alle Versuchsansätze in 12%iger ungehopfter Würze frisch hergezogen.

Für die Reifung und Lagerung des Bieres werden Cornelius-Container mit Füllinhalten von 20 l bzw. 10 l verwendet. Während der Reifung und Lagerung werden sie in verschiedene Temperaturkammern umgestellt. Dabei wird der CO<sub>2</sub>-Druck mittels eines Manometers kontrolliert und dieser auf ca. 1 bar eingestellt. Weiterhin steht dem Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I ein Plattenfilter der Firma Seitz zur Verfügung. Der Filter besteht aus sechs Filterelementen, in welche fünf Filterschichten des Typs SEITZ-K 100, 200 x 200 eingespannt werden können. Die Biere werden mit einer maximalen Druckdifferenz von 0,5 bar filtriert.

Die Abfüllung erfolgt isobarometrisch mit einem Langrohrfüller nach dreifacher Vorevakuierung der Flaschen. Die Abfüllanlage besteht aus einer Vakuumpumpe mit Flüssigkeitsabscheider, einem Container als CO<sub>2</sub>-Puffertank zum Vorspannen (ca. 1,3 bar), einem Füllorgan und einer Einspannvorrichtung. Die Flaschen werden dreimal vorevakuiert, mit CO<sub>2</sub> vorgespannt, über das Füllorgan befüllt und mit einem manuell zu bedienenden Kronkorkenverschließer der Firma Esau & Hueber verschlossen.

### 3.6 Mälzungsanlagen und Mälzungsverfahren im Praxismaßstab

Die Weich- und Keimbedingungen aller untersuchten Malze waren ähnlich. Die Vegetationszeit betrug sieben Tage (Trichterweiche, fallende Haufenführung).

#### **System 1: Kombisystem**

##### Prinzip:

Wiederverwendung der Abluft nach dem Durchbruch für das Schwelken des Grünmalzes der nächsten Darreinheit.

In einer dieser Darreinheiten wurden 40 % des gekeimten Grünmalzes geschwelkt und gedarrt (20 h), wobei das Schwelken und Darren der restlichen 60 % in einer weiteren Darreinheit (36 h) erfolgte. Die mit diesem System bereiteten Malzmuster heißen Auriga 2 und 3.

#### **System 2:**

1-Horden-Hochleistungsdarre (Darrzeit 20 h). Die erhaltenen Malzmuster sind als Auriga 1, Barke 1 und Barke 4 betitelt.

#### **System 3:**

Keimdarrkasten/2-Horden-Darre. Das Malzmuster Barke 2 und 3 wurden mit diesem System hergestellt (Darrzeit 36 h).

#### **Darrverfahren:**

##### Auriga 1

1-Horden-Hochleistungsdarre, Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 83 °C

##### Auriga 2

Kombisystem, Darre hoch beladen (60 %), langer Darrzyklus 36 h, Abdarrtemperatur 90 °C, Abluft nach Durchbruch

Auriga 3

Kombisystem, Darre niedrig beladen (40 %), kurzer Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 90 °C, Abluft nach Durchbruch

Barke 1

1-Horden-Hochleistungsdarre, Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 85 °C

Barke 2

Keimdarrkasten (2-Horden-Darre), Darrzyklus 36 h, Abdarrtemperatur 85 °C

Barke 3

Keimdarrkasten (2-Horden-Darre), Darrzyklus 36 h, Abdarrtemperatur 85 °C (wie Barke 2), Verwendung von Rückluft, um CO<sub>2</sub> während der Keimung anzureichern

Barke 3 wurde während der Keimung mit 100 % Rückluft geführt, um eine CO<sub>2</sub>-Anreicherung zu bewirken, um somit eine Verminderung der LOX-Aktivität zu erzielen.

Barke 4

Tennenmalz, 1-Horden-Hochleistungsdarre, Abdarrtemperatur 83 °C

## 4 Versuchsaufbau und Durchführung

### 4.1 Labormaßstab

#### 4.1.1 Charakterisierung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion und Molekulargewichtsbestimmung mittels Elektrophorese

In Gerste, Grünmalz und Malz konnte bereits ein relativ hitzestabiles hydroperoxidabbauendes Enzym nachgewiesen werden, dessen Einfluss beim Maischen zwar bekannt, jedoch noch nicht abschließend geklärt ist. [137] Auch eine vorangegangene Forschungsarbeit am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I belegt, dass in Maische ein relativ hitzestabiles, hydroperoxidabbauendes Enzymsystem vorkommt, welches die von Lipoxygenase gebildeten Linolsäurehydroperoxide umsetzen kann. [118]

#### Charakterisierung der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität

Um die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion näher charakterisieren zu können, wurde angestrebt über drei anschließend beschriebene Aufreinigungsschritte eine möglichst reine Enzymfraktion zu erhalten. Dazu wurde im ersten Aufreinigungsschritt der Malzkaltauszug einer fraktionierten Fällung mit Ammoniumsulfat in Sättigungskonzentrationen von 40–70 % unterzogen. Der Überstand sowie das in Puffer wieder aufgenommene Pellet wurden mittels einer Hi Prep 26/10 Desalting Column (Fa. Amersham Biosciences) entsalzt. In der entsalzten Proteinfraction konnte bei der anschließenden Aktivitätsmessung jedoch keine Enzymaktivität mehr festgestellt werden.

Des Weiteren wurde, um eine Verbesserung in der Reinheit zu erhalten, neben dem angewandten Größenausschlussverfahren eine Aufreinigung über Ionentauscherchromatographie Source 30Q (Fa. Amersham Biosciences) vorgenommen. Dies erfolgte in Anlehnung an eine von KURODA et al. beschriebene Methode. [137]

Mittels der Ionentauscherchromatographie werden Moleküle in Abhängigkeit von der Ladung getrennt. Proteine mit negativer Ladung binden sich an Anionentauscher, wobei die Adsorption mit Anstieg der Nettoladung des Proteins verstärkt wird. Die Nettoladung der Proteine wird über den pH-Wert des Puffers beeinflusst.

Dieser sollte möglichst 1–2 pH-Einheiten entfernt des isoelektrischen Punktes des Proteins liegen. Bei einer sehr starken Bindung des Proteins an die Säule ist allerdings auch eine hohe Salzkonzentration erforderlich, um die Proteine desorbieren zu können. Die Probenvorbereitung bzw. die Erstellung der Kaltauszüge wurde hinsichtlich Puffermolarität und pH-Wert an die Pufferbedingungen des Säulen-Eluenten angepasst. Um nicht erwünschte Fraktionen von Anfang an auszuschließen, wurde auch die im Größenausschlussverfahren aufgereinigte Enzymfraktion mittels Ionentauscherchromatographie erneut aufgereinigt. Durch die zusätzliche Verdünnung der Probe ergaben sich jedoch bei der Aktivitätsmessung schwache, instabile Enzymaktivitäten. Dies ist allerdings auch bei einer umgekehrten Vorgehensweise zu erwarten, da eine gleich bleibende Verdünnung zu erwarten ist.

Die Gewinnung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion beschränkt sich daher bei den folgenden Untersuchungen auf den präparativen Aufreinigungsschritt. Die präparative Aufreinigung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion erfolgte gelchromatographisch nach dem Größenausschlussverfahren über eine Superdex 200 prep grade 26/60 Column ( $M_r = 1 \times 10^4 - 6 \times 10^5$ ). Eine wiederholte gelchromatographische Auftrennung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion brachte keine Steigerung der Enzymaktivität mit sich.

In ersten Vorversuchen zur Charakterisierung wurde die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion (gewonnen aus einem Malz-Kaltauszug (1 : 4) über einen gelchromatographischen Aufreinigungsschritt) untersucht. Charakterisiert wurde die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion hinsichtlich ihrer pH-Abhängigkeit und Temperaturstabilität in Puffer. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, wurden alle Untersuchungen mit demselben Malz, innerhalb kurzer Zeit vorgenommen.

Eine wiederholte gelchromatographische Auftrennung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion brachte keine Steigerung der Enzymaktivität mit sich. Um bei den folgenden Versuchen eine reproduzierbare Analytik zur Bestimmung der Enzymaktivität zu erhalten, wurde einerseits der Zusammenhang zwischen der Substratkonzentration und der Enzymaktivität,

andererseits der Einfluss einer Verdünnung der Enzymfraktion bei gleich bleibender Substratkonzentration untersucht. Ein günstiges Verdünnungsverhältnis zwischen Puffer und Enzymfraktion sowie ein eingesetztes Substratvolumen von 20–25 µl gewährleiten einen linearen Verlauf der Extinktionsabnahme in der ersten Minute der Messung. Die Enzymaktivität errechnet sich aus der Extinktionsabnahme pro Minute, welche im linearen Bereich des Verlaufes der Extinktion abgelesen wird.

Aufgrund der erhaltenen Ergebnisse erfolgte die Messung der Enzymaktivität bei dem verwendeten Malz mit einem Verdünnungsverhältnis Enzymfraktion : Puffer = 1 : 6 und einer Substratkonzentration von 20 µl, um einen Extinktionsmesswert unter 1,0 sowie einen linearen Verlauf der Extinktionsabnahme (auch bei relativ hohem Proteingehalt der Fraktion) gewährleisten zu können. Bei zu geringem oder zu hohem Verdünnungsfaktor ist ein sehr steiler bzw. flacher Abfall der Extinktionskurve zu beobachten. Dies ermöglichte auch, den Einfluss des pH-Wertes der Enzymfraktion auf den pH-Wert der Mischung so gering wie möglich zu halten.

Um den Einfluss der Extraktion zu berücksichtigen, wurden Kaltauszüge jeweils im pH-Bereich des Eluenten der gelchromatographischen Aufreinigung sowie bei pH 7,0 erstellt. Diese wurden anschließend der präparativen Aufreinigung bei unterschiedlichen Eluenten-pH-Werten unterzogen. Als Extraktionsmittel bzw. Eluenten dienten Phosphatpuffer im pH-Bereich von 5–8.

Des Weiteren wurde die Temperaturstabilität der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion in Puffer untersucht. Die Einstellung der gewünschten Temperatur (errechnet über das Mischungskreuz) erfolgte mit Hilfe von zwei temperierbaren Wasserbädern. Um eine Aufheizphase zu umgehen, wurde dem vorgewärmten Puffer die Enzymfraktion (20 °C) im Mischungsverhältnis 1 : 6 zugesetzt und die eingestellte Temperatur für 10 Minuten konstant gehalten. Die Probenahme erfolgte nach 1/2, 1, 2, 4, 8 und 10 Minuten. Nach der Entnahme wurde die Probe sofort auf ca. 10 °C abgekühlt. Die Messung der Enzymaktivität erfolgte anschließend bei 20 °C spektralphotometrisch.

### Molekulargewichtsbestimmung

Um die fraktionierten Enzyme des Lipidabbaus hinsichtlich ihres Molekulargewichts einstufen zu können, wurde eine gelchromatographische Molekulargewichtsbestimmung mit Hilfe eines Molekülgrößenstandards durchgeführt (Molecular Weight Marker Kit 12400–700000 Da, Fa. Sigma-Aldrich). Der Proteinstandard bzw. die gewonnenen Enzymfraktionen wurden nach dem Größenausschlussverfahren gelchromatographisch getrennt und über einen Fluoreszenzdetektor ( $E_m = 225 \text{ nm}$ ,  $E_x = 280, 340, 410 \text{ nm}$ ) detektiert. Die logarithmische Auftragung des Molekulargewichts kDa über die ermittelte Retentionszeit ermöglichte die Erstellung einer Kalibrationsgeraden.

Die Reinheit sowie die Molekülgrößenbestimmung der aufgereinigten Fraktionen wurden anschließend mittels Gelelektrophorese überprüft. Zur weiteren Aufklärung wurde die Enzymfraktion daher einer elektrophoretischen Auftrennung mittels SDS-Page (Homogeneous 7.5, Fa. Sigma-Aldrich) unterzogen.

Die Molekulargewichtsbestimmung erfolgte mittels Molekülgrößenstandards in einem Größenbereich von 30000–200000 Da (Fa. Sigma-Aldrich). Die Bandenverteilung wurde an verschiedenen Malzsorten von unterschiedlichen Standorten überprüft.

Der Versuch einer exakten Sequenzierung und letztendlich die Identifizierung der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion brachte nicht den gewünschten Erfolg. Grund war möglicherweise ein zu geringer Proteingehalt, d. h. Enzymkonzentration, in der aufgereinigten Probe. Trotz der sehr wichtigen Frage, um welches Enzym es sich hierbei handelt, überstieg jede weitere Vorgehensweise zur Strukturaufklärung alle Möglichkeiten dieser Dissertation. Daher wurde diese Fragestellung im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

#### **4.1.2 Charakterisierung der lipidabbauenden Enzymaktivität über den Verlauf verschiedener isothermer Maischverfahren durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte**

Um den Einfluss von Temperatur und Zeit auf die Aktivität der Enzyme Lipase und Lipoxygenase während des Maischprozesses systematisch zu untersuchen, wurden über den Verlauf des Maischens die Konzentrationen an entstandenen Enzymabbauprodukten systematisch verfolgt. Ziel war es, das Aktivitätsmaximum der lipidabbauenden Enzyme beim Maischen über die Messung der entstandenen Abbauprodukte zu erfassen. Infolgedessen können die Temperaturoptima der Enzyme sowie die Entstehung von Abbauprodukten über den gesamten Zeitraum des Maischprozesses beschrieben werden.

Das Malz (Sorte Braemar/Standort Fronhofen) wurde bei 0 °C gelagert, um Veränderungen der Enzymaktivität über den Versuchszeitraum so gering wie möglich zu halten. Die Versuche wurden innerhalb von 3 Wochen durchgeführt.

Zur Untersuchung des Verlaufs des Gehaltes freier Fettsäuren als Abbauprodukte der Lipase und der Summe der C18:2- und C18:3-Hydroperoxidgehaltes als Abbauprodukte der Lipoxygenase wurden CO<sub>2</sub>-begaste, isotherme Maischen hergestellt. Die Proben wurden sofort nach der Probenahme im Eisbad auf 4 °C gekühlt und bis zur Analyse, die unmittelbar danach erfolgte, bei 0 °C unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre aufbewahrt.

##### Isotherme Maischverfahren

Für das isotherme Labormaischverfahren wurden jeweils 50 g Malzschrot eingewogen und das Schrot mit CO<sub>2</sub> begast. Das Einmaischen erfolgte mit 300 ml temperiertem, entgastem und destilliertem Wasser.

Zur Messung der Summe des C18:2- und C18:3-Hydroperoxidgehaltes wurde der Überstand weiterverarbeitet. Der Rückstand wurde gefriergetrocknet und zur Bestimmung der freien Fettsäuren verwendet. Zur Kontrolle wurden bei allen Proben der pH-Wert und der Stammwürzegehalt bestimmt. Die Fest-Flüssig-

Trennung erfolgte mittels Zentrifugation (3000 U/min bei 0 °C, 20 Minuten). Die Zentrifugenbecher wurden mit CO<sub>2</sub> begast und verschlossen, um eine sauerstofffreie Atmosphäre zu gewährleisten.

Es wurde bei folgenden Temperaturen sowohl gesäuert (mit 2 ml 5%iger Milchsäure) als auch ungesäuert isotherm gemischt:

45 °C, 50 °C, 55 °C, 60 °C, 65 °C, 70 °C, 75 °C, 80 °C

Zeitpunkt der Probenahme zur Messung

1. der freien Fettsäuren (C18:1, C18:2, C18:3): 10., 30., 60. Minute
2. der Summe der C18:2- und C18:3-LOOH: 2., 20., 40., 60., 80., 100. Minute

Die Messung des pH-Wertes und des Stammwürzegehaltes (Kontrolle) erfolgte bei jeder Probenahme.

#### **4.1.3 Beurteilung des lipidabbauenden Enzympotential während des Maischprozesses in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und den gewählten Maischparametern durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte**

##### Parameter

- Sortenauswahl/Rohstoffqualität (Enzympotential)
- Maischverfahren/Einmischtemperatur
- Maische-pH

Alle durchgeführten Laborversuche wurden mit den im Folgenden beschriebenen Kongressmaisverfahren bzw. Hochkurzmaisverfahren durchgeführt. Das Feinschrot für die Laborversuche wurde über eine DLFU-Mühle mit 0,2 mm Mahlsplatt vermahlen.

##### Kongressmaisverfahren (niedrige Einmischtemperatur)

Das Kongressmaisverfahren im Labormaßstab wurde nach MEBAK [201] durchgeführt. Beim Kongressmaisverfahren werden 50 g Feinschrot eingewogen und mit 200 ml temperiertem und destilliertem Wasser eingemischt. Nach dem

Abkühlen auf 20 °C werden die Maischen auf 450 g aufgewogen. Zu Beginn des Maischens erfolgte eine CO<sub>2</sub>-Begasung des Schrotes für 10–15 Sekunden. Die Maischen wurden anschließend wiederum alle 15 Minuten für 10–15 Sekunden mit CO<sub>2</sub> begast, um einen O<sub>2</sub>-Einfluss (Autoxidation) auszuschließen und den CO<sub>2</sub>-Puffer zu erneuern. Die Fest-Flüssig-Trennung erfolgte mittels Zentrifugation (3000 U/min bei 0 °C, 20 Minuten). Die Zentrifugenbecher wurden mit CO<sub>2</sub> begast und verschlossen, um eine sauerstofffreie Atmosphäre zu gewährleisten.

#### Hochkurzmaisverfahren (hohe Einmaischttemperatur)

50 g CO<sub>2</sub>-begastetes Feinschrot wurde mit 200 ml H<sub>2</sub>O dest. (temperiert auf 62 °C und entgast) eingemischt.

*Maischprogramm:* 45 Minuten bei 62 °C, Aufheizen mit 1 °C pro Minute auf 70 °C, Zugabe von 100 ml H<sub>2</sub>O dest. bei Erreichen der 70 °C-Rast, 62 Minuten Rast bei 70 °C

#### Maischesäuerung

Die Maischesäuerung erfolgte mit 2 ml 5%iger Milchsäure, welche dem vorgelegten Schrot zugegeben wurde. Um den pH-Wert gezielt einzustellen, wurde die benötigte Milchsäuremenge (18%ige Milchsäure) beim Einmaischen für das jeweilige Malz titrimetrisch ermittelt.

Anhand von drei Gerstensorten (Braemar, Pasadena, Ursa) von zwei Standorten (Garching, Fronhofen) wurde der Einfluss des im Malz vorhanden lipidabbauenden Enzympotentials auf die Entstehung von Lipidabbauprodukten untersucht. Dazu wurde der Verlauf des Hydroperoxid-Gehaltes beim Maischen sowohl mit und ohne Maischesäuerung sowie bei unterschiedlichen Maischverfahren (Kongressmaisverfahren, Hochkurzmaisverfahren) über die Maischdauer verfolgt.

#### **4.1.4 Einfluss von proteolytischer Lösung und Maische-pH auf die Entstehung von Würzearomastoffen zur Beurteilung der technologischen Einflussnahmemöglichkeiten während des Maischprozesses**

##### **4.1.4.1 Orientierende Untersuchungen zum Einfluss des ELG und pH-Wertes**

Die Gerstenmuster des Berliner Programms Ernte 2004 wurden unter Variation des Parameters Weichgrad nach dem Standardmälzungsverfahren vermälzt, um eine unterschiedliche proteolytische Lösung des Malzes, gemessen am Eiweißlösungsgrad (38, 41, 44 %), zu erzielen. Ziel dieser Untersuchungen war, die Bildung von Aromastoffen aus dem Eiweißabbau sowie die aus dem Fettabbau entstandenen Abbauprodukte in Abhängigkeit von der Malzqualität (Lösungseigenschaften des Malzes, Sorte) verfolgen zu können. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob durch eine Absenkung des Maische-pH und eine damit verbundene Hemmung der lipidabbauenden Enzyme die Aromastoffbildung während des Maischens beeinflusst bzw. minimiert werden kann. Eine Gegenüberstellung der aus den verschiedenen Abbauwegen entstandenen Aromastoffe soll Auskunft über die Relevanz der jeweiligen Abbauprodukte in Hinblick auf eine frühzeitige Beurteilung der Geschmacksstabilität des Bieres geben. Zur Beurteilung wird die Summe der gebildeten Streckeraldehyde (3-Methylbutanal, 2-Methylbutanal, Methional, Benzaldehyd, 2-Phenylethanal) sowie die Summe der Fettabbauprodukte (Pentanal, Hexanal, Heptanal, (*E,Z*)-2,6-Nonadienal,  $\gamma$ -Nonalacton, (*E*)-2-Nonenal) herangezogen.

Hohe Einmaischtemperaturen und Maischesäuerung beeinflussen die Geschmacksstabilität des Bieres erfahrungsgemäß positiv. Zusätzlich zur Wahl hoher Einmaischtemperaturen sollen weitere positive Einflussnahmemöglichkeiten herausgearbeitet werden. Um eine zu intensive Lösung durch das Absenken des Maische-pHs zu vermeiden, wurde ein pH-Wert von ca. 5,5–5,6 eingestellt.

Aus den Ergebnissen können Ansatzmöglichkeiten abgeleitet werden, um gezielte technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Geschmacksstabilität beim Maischen treffen zu können.

#### Hochkurzmaisverfahren

50 g Feinschrot wurde mit 200 ml H<sub>2</sub>O dest. (temperiert auf 62 °C) eingemaischt. *Maischprogramm*: 45 Minuten bei 62 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C, Aufwiegen auf 400 g (Stw: 13,5–13,8 GG-%, pH-Wert 5,89–6,04)

#### Maischesäuerung

Die Maischesäuerung erfolgte mit 1 ml 5%iger Milchsäure, welche dem vorgelegten Schrot (pH-Wert ca. 5,5–5,6) zugegeben wurde.

Die Aromastoffe der Malze und der hergestellten Würzen wurden analysiert, um die Ursache der Aromabildung bezüglich Rohstoffeinfluss und Einflussnahme durch die gewählten Maischbedingungen einordnen zu können.

#### **4.1.4.2 Unterschiede in der Bildung von aromaintensiven Abbauprodukten bei Einsatz von biologischer Milchsäure und technischer Milchsäure**

In Anlehnung an die unter Abschnitt 4.1.4.1 durchgeführten Versuche wird im Folgenden unter weiterer Berücksichtigung des Einflusses der Art der Milchsäuregabe die Aromastoffbildung in Abhängigkeit von den verschiedenen Einflussfaktoren ermittelt. Die Versuchsplanung wurde mit der Response-Surface-Methodology durchgeführt, so dass aus den resultierenden Daten ein statistisch abgesichertes Modell berechnet werden kann. Somit kann aus den erhaltenen Daten, trotz z. B. variierender Rohstoffe und möglicher Fehler bei der Versuchsdurchführung, eine objektive Schlussfolgerung basierend auf statistischen Methoden gezogen werden. Das aus den Versuchen resultierende Modell ermöglicht die Optimierung technologischer Einflussmöglichkeiten in Hinblick auf eine begrenzte Bildung alterungsrelevanter Aromastoffe während des Maischprozesses. Durch die Kenntnis der Haupteinflussfaktoren auf die

Aromastoffbildung kann über die Wahl der Rohstoffqualität und Einsatz geeigneter Maischparameter technologisch eine Minimierung der Aromakomponenten erzielt werden.

Nach Auswahl dreier zweckmäßiger Mälzungsverfahren, die mittels eines Statistikmälzungsverfahrens ermittelt wurden, welche unterschiedliche proteolytische Eigenschaften (ELG 37, 41 und 45 %) bei vergleichbaren amylolytischen, proteolytischen (Rohproteingehalt, lösl. Stickstoff - so weit wie möglich) und zytolytischen Merkmalen aufweisen (siehe Abschnitt 3.5.1, Tabelle AH 13 im Anhang), wurden für diese Versuchsreihe drei Gerstenmuster Sorte Scarlett der Ernte 2005 vermälzt.

Zur Untersuchung des Einflusses von pH-Wert, Art der Milchsäuregabe, Eiweißlösungsgrad und Einmischtemperatur sowie auf die Bildung von Streckeraldehyden und Fettabbauprodukten während des Maischprozesses wurde eine faktorielle Versuchsplanung gewählt. Die Parameter pH-Wert, ELG und Temperatur wurden als numerische Faktoren, die Art der Milchsäuregabe (technisch oder biologisch) als Kategoriefaktor deklariert. Bei der faktoriellen Versuchsplanung werden in einer Versuchsreihe alle möglichen Kombinationen der Faktoren und der zu untersuchenden Stufen als Versuchsansatz durchgeführt. Dabei wurden 64 Versuchsansätze ermittelt. Somit können die Einflüsse der einzelnen Faktoren sowie die Interaktionen mehrerer Faktoren durch die Verwendung von mathematischen Regressionsmodellen untersucht werden.

Parameter:

*ELG:* 37 %, 41 %, 45 %

*Maische-pH:* Einstellen des Maische-pH zu Beginn des Einmischens durch Vorlage ins Schrot mittels 9%iger technischer Milchsäure bzw. biologischer Milchsäure (Säuregabe wurde in Vorversuchen titrimetrisch ermittelt) auf pH 5,6 bzw. 5,3 eingestellt. Der pH-Wert der ungesäuerten Maischen lag bei 5,9.

### Hochkurzmaisverfahren

50 g Feinschrot wurde mit 300 ml H<sub>2</sub>O dest. (temperiert auf 55/60/65 °C) eingemaischt und nach dem Abkühlen auf 20 °C über einen Faltenfilter filtriert und auf 350 g aufgewogen.

#### *Maischprogramm/Temperaturführung:*

- 20 Minuten bei 55 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 78 °C
- 25 Minuten bei 60 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 78 °C
- 30 Minuten bei 65 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 78 °C

Anschließend erfolgte unverzüglich die Bestimmung der Würzearomastoffe. Zur Kontrolle wurden der pH-Wert der Würzen sowie der Stammwürzegehalt gemessen.

#### **4.1.4.3 Orientierende Untersuchungen zur Hexanalbildung während der Würzebereitung**

Hexanal fungiert in zahlreichen Forschungsarbeiten als eine analytische Indikatorsubstanz für die Intensität des Lipidabbaus, da sie analytisch gut erfassbar ist. Um die Entstehung und den Verlust durch Ausdampfen des Hexanals über den Würzebereitungsprozess und in verschiedenen Matrices beurteilen zu können, wurde die Aromakomponente Hexanal sowohl in wässriger Lösung als auch additiv zu einem Malzkaltauszug sowie zu Würze zugegeben, erfasst.

- 1) wässrige Hexanallösung
- 2) Malzkaltauszug 1 : 5 (Pasadena Fronhofen)
- 3) Würze 12 GG-% (Anstellwürze)

Die Anfangskonzentration wurde jeweils auf  $C_{\text{Hexanal}} \sim 40 \text{ mg/l}$  eingestellt. Anschließend wurden jeweils 250 g der drei Ansätze bei 56, 62 und 68 °C 20 Minuten isotherm gemaischt. Dann wurden die Würzen auf 20 °C abgekühlt, auf 250 g aufgewogen und die Hexanalkonzentration bestimmt. Der Probenansatz

erfolgte jeweils als Doppelbestimmung. Die jeweilige 0-Probe wurde 20 Minuten bei 20 °C temperiert und identisch behandelt.

#### **4.1.5 Untersuchungen zum Verhalten der proteolytischen Abbauvorgänge während des Maischprozesses in Abhängigkeit von ELG des Malzes und pH-Wert der Maische**

*Malz: Berliner Programm (halbindustrielle Versuchsreihe), Ernte 2003*

##### Hochkurzmaisverfahren

50 g Feinschrot wurde mit 200 ml H<sub>2</sub>O dest. (temperiert auf 62 °C) eingemaischt.  
*Maischprogramm:* 45 Minuten bei 62 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C, Aufwiegen auf 250 g

##### Maischesäuerung

Die Maischesäuerung erfolgte mit 1 ml bzw. 1,5 ml 5%iger Milchsäure direkt ins Schrot.

Anschließend wurden der pH-Wert, der Stammwürzegehalt sowie die Konzentration an löslichem Stickstoff und FAN der Würzen ermittelt, um das Verhalten der Proteolyse in Abhängigkeit von Maische-pH und Eiweißlösungsgrad beurteilen zu können. Da in dieser Versuchsreihe bereits eine relativ hohe Einmaischttemperatur (62 °C) gewählt wurde, ist eine weitgehende Inaktivierung der bekannten proteolytischen Enzyme zu erwarten. Ziel der Untersuchungen ist, inwieweit noch eine Steigerung der proteolytischen Abbauvorgänge durch Variation der gewählten Parameter trotz hoher Einmaischttemperaturen erfolgt.

## **4.2 Kleinsudwerk**

Die unter Abschnitt 4.1 erhaltenen Ergebnisse aus den Laborversuchen wurden nun anhand von Brauversuchen auf ihre Praxistauglichkeit überprüft. Nach

Variation der Parameter Sorte, Maische-pH und Einmischtemperatur wurde die Geschmacksstabilität der resultierenden Biere beurteilt. Ziel der Untersuchungen ist, eine verbesserte Geschmacksstabilität durch Auswahl geeigneter Rohstoffe und technologische Maßnahmen während des Maischens zu erzielen. Besonders die Bildung von alterungsrelevanten Aromastoffen und Produkten aus dem Lipidabbau sowie die Ursachen einer erhöhten Aromastoffbildung (wie z. B. vorhandenes Aromastoffniveau des Malzes, lipidabbauendes Enzympotential des Malzes, Maischparameter) stehen im Fokus der Untersuchungen. Die Entstehung dieser Substanzen, im speziellen die Reaktionswege zur Entstehung derselben, sollen dabei so weit wie möglich gehemmt werden. Daher wurde die Aromabildung, v. a. der Aromastoffe aus dem Lipidabbau, über den gesamten Brauprozess vom Rohstoff beginnend bis hin zum forciert gealterten Bier verfolgt. Infolgedessen können Rückschlüsse auf die Ursachen einer verminderten Geschmacksstabilität und geeignete technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Geschmacksstabilität der Biere gezogen werden. Über die Beurteilung von Malz- und Würzequalität in Hinblick auf die Geschmacksstabilität des Bieres soll eine frühzeitige Vorhersage der zu erwartenden Geschmacksstabilität bereits in den Rohstoffen bzw. bei der Würzeanalyse getroffen werden.

#### **4.2.1 Brauersuche zur Untersuchung des Einflusses von Gerstensorte und Maische-pH auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres**

Die Brauersuche wurden im 10 Liter Kleinsudmaßstab mit 3 Sorten von 2 Standorten im Schüttungsverhältnis 1 : 5 (1,5 kg Schrot zu 6 kg Brauwasser) durchgeführt. Die Säuerung erfolgte zum Einmischen mit 18%iger technischer Milchsäure. Der Maische-pH wurde zu Beginn des Einmischens eingestellt, wobei die benötigte Menge an technischer Milchsäure titrimetrisch für jedes Malzmuster ermittelt wurde.

Nach der Läuterung (2 Nachgüsse mit jeweils 3 Liter Brauwasser) erfolgte eine definierte Kochung von 70 Minuten, wobei der Stammwürzegehalt über Wägung

definiert auf 12 GG-% eingestellt wurde. Die Hopfengabe erfolgte einheitlich 10 Minuten vor Kochende. Bei jedem Sud wurden einheitlich 12 g Aromahopfen (Hallertauer Perle;  $\alpha$ -Säure-Gehalt: 5,9 %) zugegeben. Die Bittereinheiten im Bier lagen somit bei ca. 6 BE. Die Hopfengabe wurde bewusst niedrig gehalten und die Hefe in ungehopfter Würze hergezogen, um eine intensive Hopfennote und zu starke Beeinflussungen durch den Hopfen zu vermeiden.

Die Würzen wurden nach Kühlung und Whirlpool (20 Minuten Whirlpoolrast) mit 20 g frisch hergeführter abzentrifugierter (3000 U/ml; 5 Minuten) Hefe angestellt. Die Hauptgärung erfolgte bei 8,0 °C, bis ein Restextrakt ( $E_S$ ) von 3,5 % erreicht wurde. Die Reifung des Jungbieres erfolgte 7 Tage bei 16 °C in Cornelius-Behältern. Nach der Reifung wurden die Behälter auf 1 bar gespundet und bei 0 °C für weitere drei Wochen gelagert.

*Malz: Berliner Programm (halbindustrielle Versuchsreihe), Ernte 2003*

*Temperaturprogramm des Infusionsmaisverfahrens:*

45 Minuten bei 62 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C

*Maischesäuerung:* Einstellen des Maische-pH zu Beginn des Einmaischens auf pH 5,7 bzw. 5,4 mit 18%iger technischer Milchsäure (Säuregabe erfolgte basierend auf Vorversuchen)

*Probenahme während der Würzebereitung:*

Analysen:

- Summe der C18:2-Hydroperoxide
- Summe der C18:3-Hydroperoxide
- pH-Wert
- Extrakt

Zeitpunkt der Probenahme:

- 10. Minute
- 45. Minute
- 85. Minute
- 101. Minute

Die Maischeproben wurden nach Entnahme in einen Zentrifugenbehälter sofort begast, luftdicht verschlossen und auf 0 °C gekühlt, um weitere Enzymaktivität zu verhindern. Um eine weitere Sauerstoffbelastung zu vermeiden, wurden die Proben in CO<sub>2</sub>-begasteten Zentrifugenbechern zentrifugiert (3000 U/min, 0 °C, 10 Minuten).

- Vorderwürze (Verdünnung auf 9,7 GG-% zur Aromastoffanalyse)
- Pfannevoll-Würze
- Ausschlagwürze

#### **4.2.2 Brauversuche zur Untersuchung des Einflusses von Maische- und Würzesäuerung sowie Einmischtemperatur auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres**

Die Würzebereitung sowie Gärung und Lagerung erfolgten wie unter Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

*Malz: Pilsner Malz, Ernte 2003*

*Temperaturprogramm der Infusionsmaisverfahren:*

41 Minuten (mit Aufheizen) bei 58 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C

45 Minuten (mit Aufheizen) bei 62 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C

49 Minuten (mit Aufheizen) bei 66 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 10 Minuten bei 76 °C

*Maischesäuerung:* Einstellen des Maische-pH zu Beginn des Einmischens auf pH 5,6/5,7 mit 18%iger technischer Milchsäure (Säuregabe erfolgte basierend auf Vorversuchen)

*Würzesäuerung:* Zugabe von 18%iger technischer Milchsäure 10 Minuten vor Kochende auf pH 5,4 (0,05 ml/100 g Würze; Säuregabe erfolgte basierend auf Vorversuchen)

Bei jedem Sud erfolgte die Hopfengabe einheitlich mit 15 g Aromahopfen (Tschechischer Saazer, Typ 45; Ernte 2001;  $\alpha$ -Säure-Gehalt: 5,8 %). Zur ersten Hopfengabe wurden 5 g 10 Minuten nach Kochbeginn und zur zweiten Hopfengabe 10 g 10 Minuten vor Kochende zugegeben. Die Bittereinheiten im Bier lagen somit bei ca. 6 BE.

*Probenahme während der Würzebereitung:*

Analysen:

- Summe der C18:2-Hydroperoxide
- Summe der C18:3-Hydroperoxide
- pH-Wert
- Extrakt

Zeitpunkt der Probenahme :

- 10 Minuten nach Maischbeginn
- 10 Minuten vor Maischende (vor Hopfengabe)

Um Oxidationsreaktionen so weit wie möglich zu vermeiden, wurden die Maischen in zehnmütigen Abständen zur Erzeugung einer Pufferschicht mit CO<sub>2</sub> begast. Die Maischeproben wurden zur Bestimmung der Fettsäurehydroperoxide nach Entnahme in einen Zentrifugenbehälter sofort luftdicht verschlossen und auf 0 °C gekühlt. Weiterhin wurden die Proben unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre zentrifugiert (3000 U/min, 0 °C, 10 Minuten).

- Pfannevoll-Würze
- Ausschlagwürze

Labormaischverfahren zur Vorhersage und Kontrolle der zu erwartenden Lipidabbauprodukte aus dem Malz (Versuch Pilsner Malz):

Die Kleinsudmaischen, welche mit Pilsner Malz durchgeführt wurden, wurden ebenfalls im Labormaßstab (Kongressmaische) hergestellt. 50 g Malzschrot wurden mit 200 ml temperierten, destilliertem und entgastem Wasser eingemaischt. Die Säuerung erfolgte beim Einmaischen mit 2 ml 18%iger technischer Milchsäure. Die Maischen wurden wie bereits beschrieben mit CO<sub>2</sub> begast. Ziel war es, die erhaltenen Ergebnisse (Summe der Fettsäurehydroperoxide) mit den zugehörigen Kleinsudmaischen zu vergleichen. Bei Erzielen ähnlicher Analysenwerte wäre eine Beurteilung der zu erwartenden Fettabbauprodukte bereits im Labormaßstab möglich. Eine frühzeitige Beurteilung des Malzes und des Maischverfahrens hinsichtlich der Bildung von Fettabbauprodukten und der zu erwartenden Geschmacksstabilität wäre somit durchführbar.

**4.3 Brauversuche im Pilotmaßstab zur Untersuchung von Zusammenhängen zwischen vorliegender Braumalzqualität und zu erwartender Geschmacksstabilität**

Die Versuche im Pilotmaßstab wurden mit den beschriebenen Handelsmalzmustern (vermälzt im Praxismaßstab in verschiedenen Systemen) durchgeführt. Insgesamt umfassten die Versuche zwei Sorten, wobei die Weich- und Keimbedingungen vergleichbar waren, jedoch die Mälzungssysteme und Mälzungsbedingungen verändert wurden. Der Darrprozess wurde bezüglich der Länge des Darrzyklus, Beladungshöhe der Darre, Luftführung und Abdarrtemperaturen (83–90 °C) variiert. Die Biere wurden anschließend am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I im 60 l-Maßstab hergestellt. Ziel dieser Untersuchung ist eine frühzeitige Vorhersage der zu erwartenden Geschmacksstabilität anhand der durchgeführten Malz- und Würzeanalysen. Ermittelte Korrelationen zwischen Malz- und Würzeanalysen und der Akzeptanz des gealterten Bieres sowie der analysierten Alterungsindikatoren geben Einflüsse der vorliegenden Rohstoffqualität auf die Geschmacksstabilität wieder. Dabei soll auch die Bedeutsamkeit der Fettabbauprodukte für die Geschmacksstabilität beurteilt werden.

*Malz: Malze aus Praxismaßstab (3 verschiedene Systeme), Ernte 2003*

*Temperaturprogramm des Infusionsmaisverfahrens:*

30 Minuten bei 62 °C, 30 Minuten bei 72 °C, 5 Minuten bei 78 °C

Nach der Läuterung erfolgte eine definierte Kochung von 70 Minuten. Die Hopfengabe war zu Kochbeginn mit Hallertauer Taurus ( $\alpha$ -Säure-Gehalt: 16 %). Die Bittereinheiten im Bier lagen somit bei ca. 22 BE. Die Whirlpoolrast dauerte 20 Minuten.

Die Gärung geschah unter standardisierten Bedingungen wie im Kleinsudmaßstab (siehe Abschnitt 4.2). Die Hauptgärung erfolgte bei 8,0 °C bis ein Restextrakt ( $E_S$ ) von 3,5% erreicht wurde. Die Reifung des Jungbieres erfolgte 7 Tage bei 16 °C in Cornelius-Behältern. Nach der Reifung wurden die Behälter auf 1 bar gespundet und bei 0 °C für weitere drei Wochen gelagert.

## 5 Ergebnisse und Diskussion

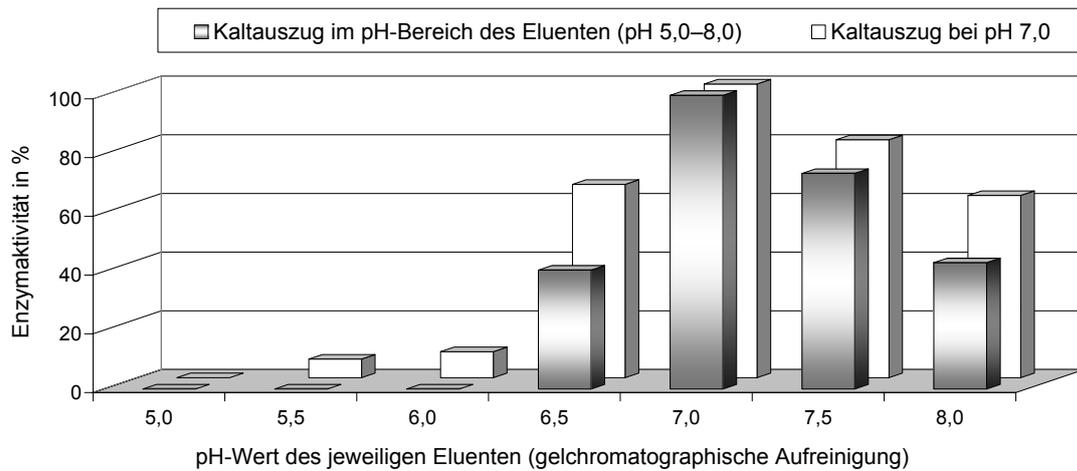
### 5.1 Laborversuche

#### 5.1.1 Charakterisierung der aufgereinigten hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion

##### Charakterisierung

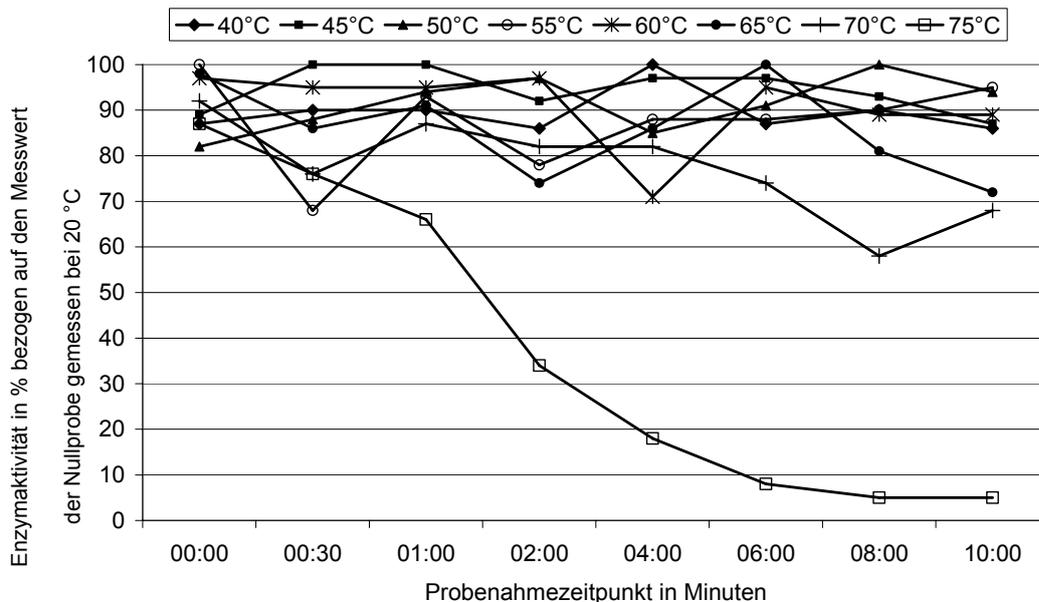
Die durchgeführten Aktivitätsmessungen in Pufferlösungen mit unterschiedlichen pH-Werten zeigten die höchste Aktivität der gewonnenen Enzymfraktion bei einem pH-Wert von 7,0. Dabei konnte tendenziell im leicht basischen Bereich eine geringere Abnahme der Aktivität als im leicht sauren Bereich beobachtet werden. Eine Extraktion der Enzymfraktion im sauren Bereich zeigte eine zusätzliche Schwächung der Enzymaktivität. Die Extinktionsabnahme bei der Messung der Aktivität des hydroperoxidabbauenden Enzyms ist sehr gering. Die Extinktionsdifferenz bei der Messung der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität kann im Vergleich zur LOX-Aktivitätsmessung um Faktor zwei bis zehn niedriger liegen. Daher wurde die Aktivität prozentual bezogen auf den höchsten Messwert angegeben.

Die Ergebnisse (siehe Abbildung 25) legen die Vermutung nahe, dass die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion im pH-Bereich der Maische (5,2-5,8) sowie während der Würzebereitung (ungeachtet auftretender Matrixeffekte) in ihrer Aktivität bereits stark beeinträchtigt ist. Der Einsatz von Maischesäuerung könnte diese Beeinträchtigung beschleunigen.



**Abb. 25: Aktivität der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion in Abhängigkeit vom pH-Wert**

Hinsichtlich der Untersuchungen zur Temperaturstabilität zeigte sich im Bereich von 40–60 °C keine Beeinträchtigung der Enzymaktivität. Im Temperaturbereich ab 70 °C konnten nach 6 Minuten bereits Instabilitäten festgestellt werden. Nach 4 Minuten bei 75 °C nahm die Enzymaktivität stark ab auf unter 50 % der maximalen Enzymaktivität. Als Referenz diente die Aktivitätsmessung einer untemperierten Fraktion bei 20 °C (siehe Abbildung 26).

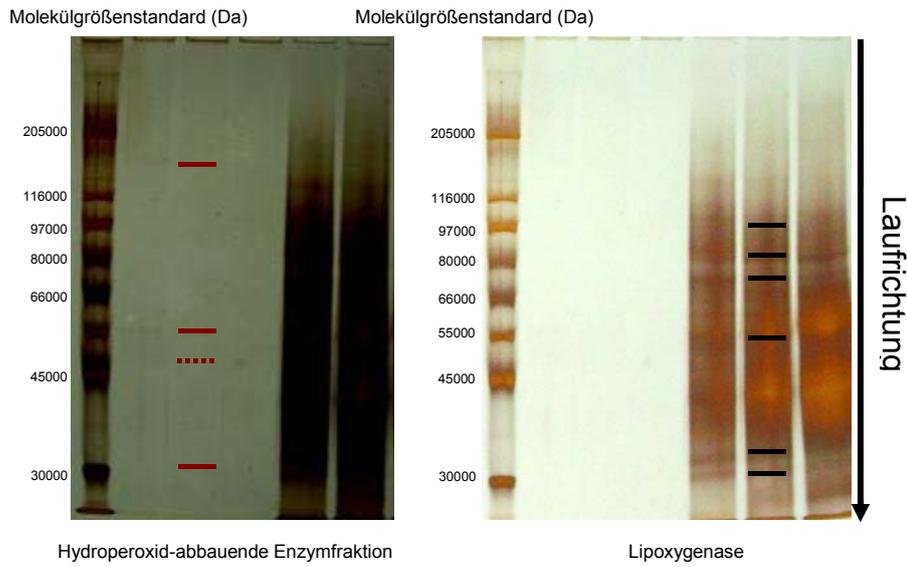


**Abb. 26: Untersuchungen zur Temperaturstabilität der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion**

### Molekulargewichtsbestimmung

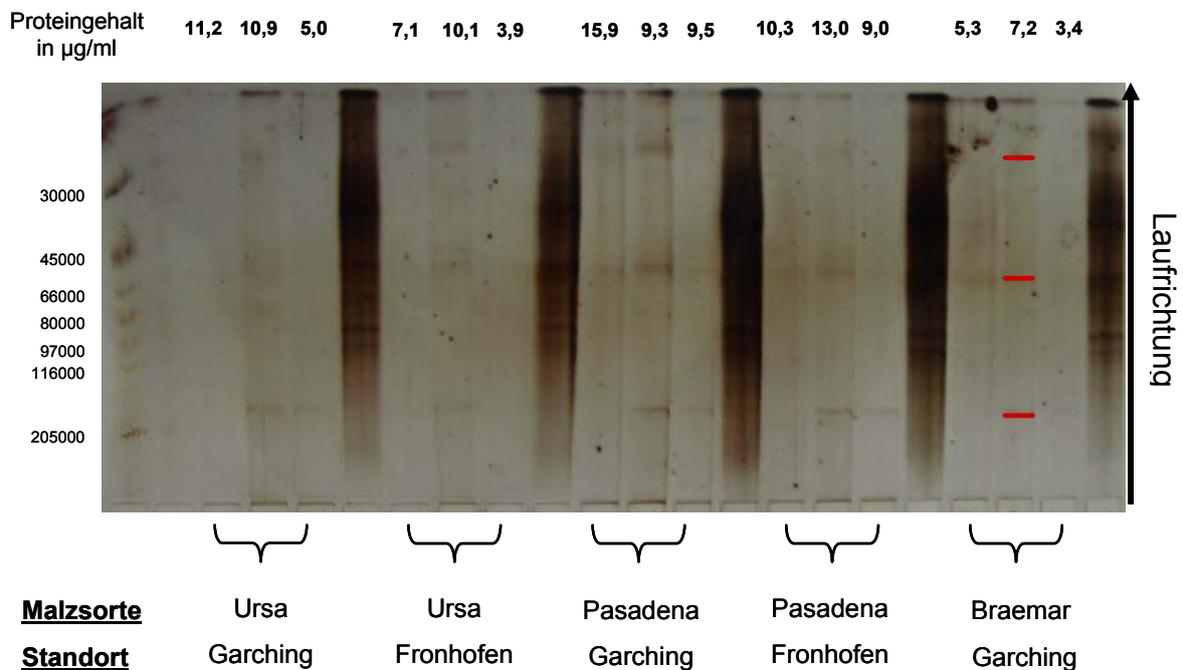
Für die gelchromatographisch getrennte hydroperoxidabbauende Enzymfraktion errechnete sich ein Molekulargewicht größer 600000 Da. Folglich konnte im Rahmen des Trennbereiches der Gelsäule hier keine exakte Bestimmung vorgenommen werden. Zur Kontrolle wurden die Enzyme Lipoxygenase (aufgereinigte Fraktion) und Lipase (wheat germ, Fa. Sigma-Aldrich) mitgeführt. Die ermittelten Molekülgrößen stimmten mit den aus der Literatur bekannten Molekulargewichten überein. Dies lässt darauf schließen, dass es sich bei der aufgereinigten Enzymfraktion möglicherweise um einen Enzymkomplex oder ein an andere Proteine gebundenes Enzym handeln könnte.

Bei der elektrophoretischen Auftrennung konnten drei Banden identifiziert werden. Die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion zeigt Banden im Bereich von 30 kDa, 50 kDa (schwach) und 55 kDa. Diese Banden finden sich jedoch auch in der aufgetragenen Lipoxygenase-Fraktion wieder. Eine gesonderte Bande befindet sich im Bereich zwischen 130–150 kDa. Die aufgereinigte Lipoxygenase zeigte eine für Lipoxygenase aus Gerste charakteristische Bande im Bereich von 95 kDa. In der Literatur sind bei der Molekulargewichtsbestimmung von LOX1 ebenfalls im Bereich von 55–65 kDa Banden identifiziert und beschrieben worden, wobei hier ein Abbauprodukt der LOX1 als Ursache vermutet wurde. [111, 120] Abbildung 27 zeigt die SDS-Page.



**Abb. 27: SDS-Page der Enzyme hydroperoxidabbauende Enzymfraktion und Lipoxygenase**

Diese Bandenverteilung bestätigt sich, wie in Abbildung 28 zu sehen ist, bei verschiedenen Malzsorten und Standorten. Unabhängig von Standort und Sorte zeigt sich hier eine identische Bandenverteilung.



**Abb. 28: SDS-Page der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion aufgereinigt aus verschiedenen Malzsorten bzw. Standorten**

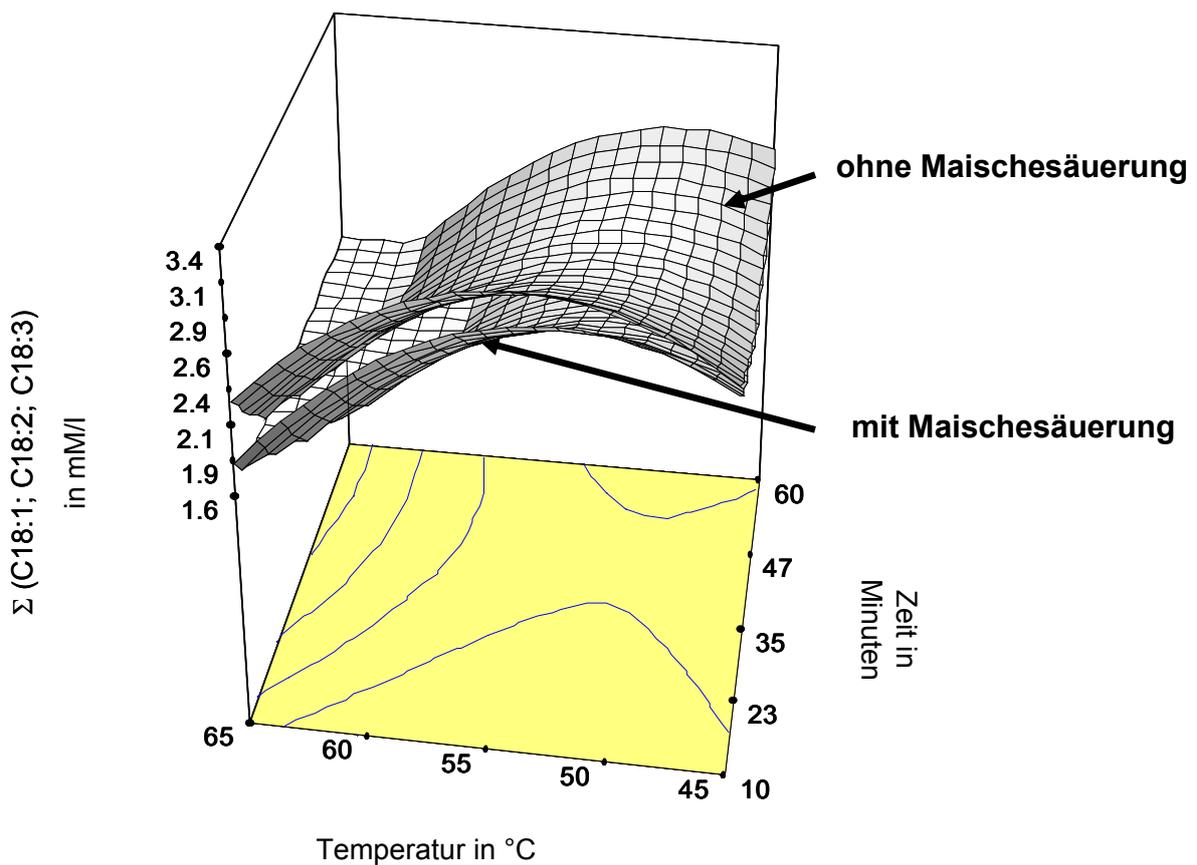
Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die hydroperoxidabbauende Enzymfraktion ein pH-Optimum bei 7,0 besitzt und im pH-Bereich zwischen 6,5–8,0 mehr als 40 % der maximal gemessenen Enzymaktivität vorhanden ist. Hinsichtlich der Temperaturstabilität lagen nach 4 Minuten bei 75 °C weniger als 50 % der maximal gemessenen Enzymaktivität vor. Die Extinktionsabnahme bei der Aktivitätsmessung der aufgereinigten hydroperoxidabbauenden Fraktion ist im Vergleich zum Extinktionsunterschied bei der Lipoxygenase-Aktivitätsmessung eher gering. Die Untersuchung der Thermostabilität bestätigt jedoch, dass es sich bei der hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion wohl um ein relativ hitzestabiles Enzym handelt. Da innerhalb der hydroperoxidabbauenden Enzyme in Pflanzen das Enzym Hydroperoxid Lyase eher als thermolabil einzustufen ist, liegt die Vermutung nahe, dass es sich bei dieser Enzymfraktion um die Enzyme Peroxygenase, Allenoxid Synthase oder Peroxidase handelt.

### **5.1.2 Charakterisierung der lipidabbauenden Enzymaktivität über den Verlauf verschiedener isothermer Maischverfahren durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte**

Zur Bestimmung der Lipase-Aktivität in Maische wurden aus den gefriergetrockneten, nicht löslichen Maischebestandteilen ein Acetonpuder erstellt und die freien ungesättigten Fettsäuren, welche durch Lipase-Aktivität freigesetzt werden, analysiert. SCHWARZ et al. zeigten, dass sowohl bei Gersten als auch in Reis Lipasenaktivität bis zu Temperaturen von 67-70 °C während des Maischprozesses festzustellen ist. [52, 140]

Die isotherm gemischte Versuchsreihe zeigte sowohl bei der gesäuerten (mit Maischesäuerung) als auch bei der ungesäuerten Maische (ohne Maischesäuerung) ein deutliches Aktivitätsmaximum bei 55 °C. Ab Temperaturen über 65 °C nimmt die Konzentration der freien Fettsäuren sprunghaft ab. Bei Temperaturen über 70 °C ist kaum noch Aktivität, gemessen an der Konzentration der freien Fettsäuren, feststellbar. Bei den gesäuerten Maischproben ist das

Konzentrationsmaximum zwar nicht so ausgeprägt und durchschnittlich auf niedrigerem Niveau, aber ebenso deutlich im Bereich um 60 °C zu lokalisieren. Nach 10 Minuten Maischzeit liegt das Maximum an freien langkettigen Fettsäuren bei 45 und 55–60 °C, nach 30 Minuten zwischen 45 und 55 °C und nach 60 Minuten Maischzeit verschiebt sich das Maximum deutlich in Richtung niedrigerer Temperaturen um 45–50 °C. Über den Verlauf der Maischzeit ist eine deutliche Abnahme an langkettigen ungesättigten Fettsäuren erkennbar. Hohe Temperaturen ab 65 °C sowie eine Absenkung des pH-Wertes scheinen eine deutliche Einschränkung der Lipase-Aktivität, d. h. einen niedrigeren Gehalt an langkettigen ungesättigten Fettsäuren, zur Folge zu haben (siehe Abbildung 29).



**Abb. 29:** Lipase-Aktivität ermittelt über die vorliegende Konzentration der Summe an freien ungesättigten Fettsäuren (C18:1, C18:2, C18:3)

Ebenso wurde die Summe der Fettsäurehydroperoxide zur Beurteilung der Lipoxygenasen-Aktivität über den Verlauf isothermer (40 °C bis 80 °C) Maischen verfolgt. Dabei zeigte sich ein deutlich erhöhter Gehalt an Fettsäurehydroperoxiden bei 55–60 °C, eine sprunghafte Abnahme ab 65 °C. Das niedrigste Niveau ist bei 70 °C vorzufinden, wobei ab 75 °C, speziell bei den ungesäuerten Maischen, wiederum ein starker Anstieg zu beobachten ist. Dies ist möglicherweise auf unspezifische Lipasen, die eine Freisetzung von Fettsäurehydroperoxiden aus glyceridischen Bindungen katalysieren [118, 137], thermische Einflüsse oder die fortschreitende Lösung und Freisetzung zahlreicher Malzinhaltstoffe zurückzuführen.

In der gesäuerten Maische liegt die ermittelte Konzentration durchschnittlich etwas niedriger, insbesondere bei Maischtemperaturen zwischen 75 und 80 °C. Bei Temperaturen zwischen 50 und 65 °C sind hier aber ebenfalls die höchsten Hydroperoxidkonzentrationen in der Maische feststellbar.

Abbildung 30 und 31 stellen den Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration, verfolgt über die Maischzeit in isotherm (40–80 °C in 5 °C-Schritten) geführten Maischen, dar. Bei allen gewählten Temperaturstufen ist eine Zunahme der Konzentration über den Verlauf der Maischzeit feststellbar.

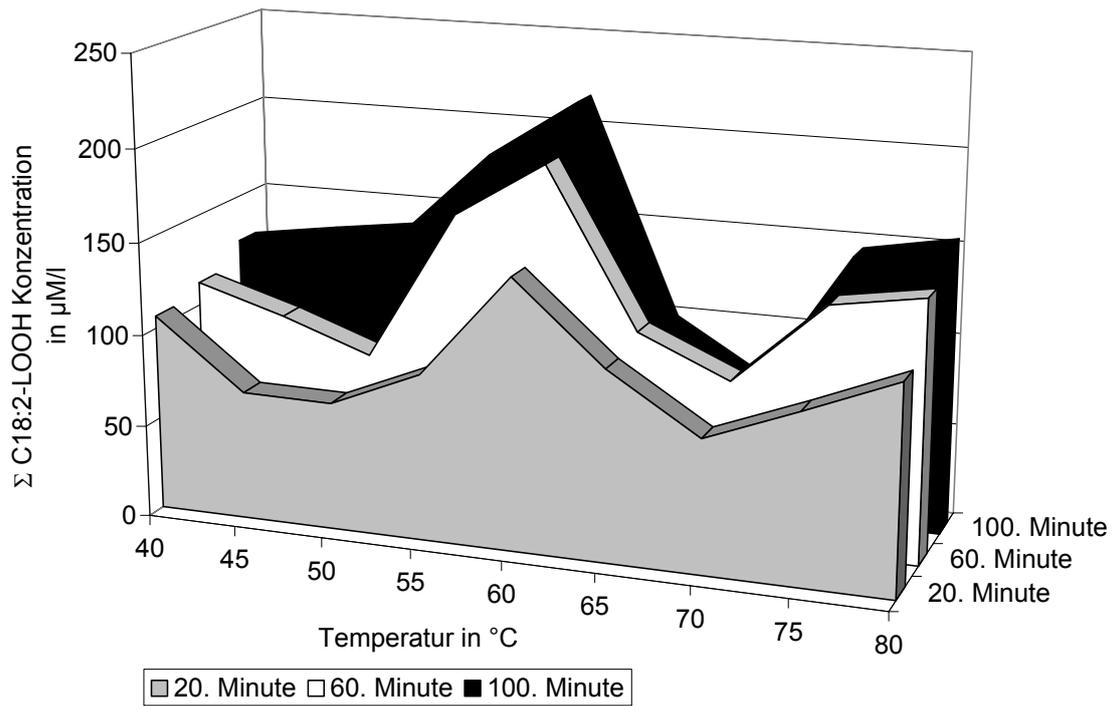


Abb. 30: Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration in gesäuerten isotherm (40–80  $^{\circ}\text{C}$ ) geführten Maischen

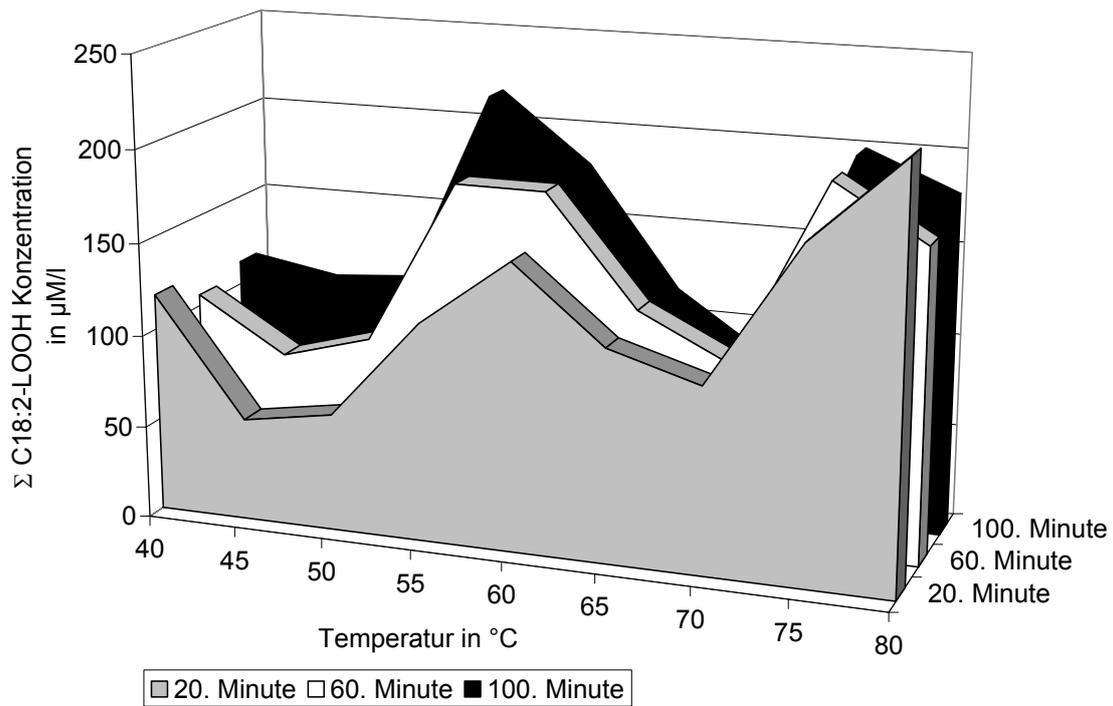
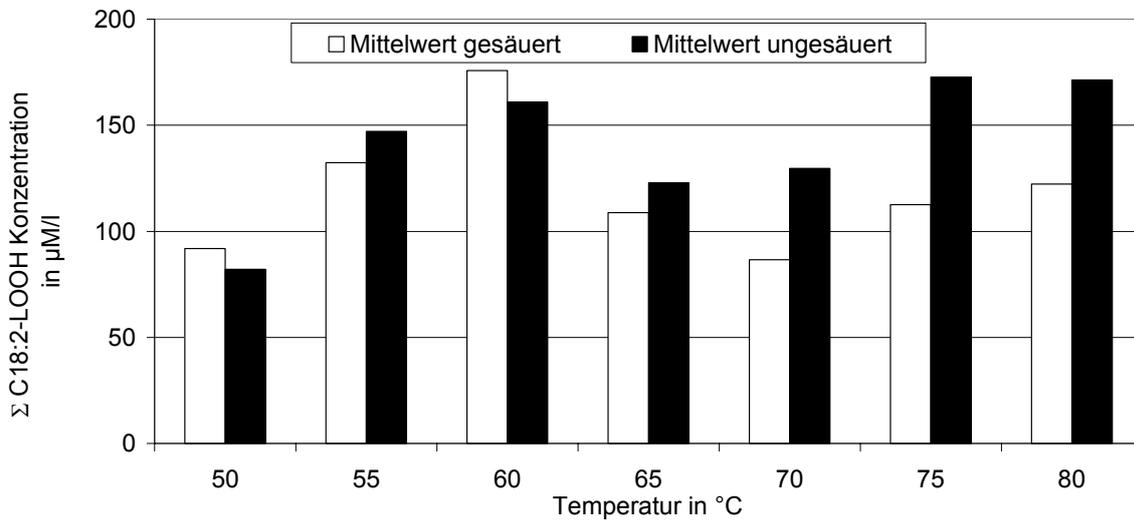


Abb. 31: Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration in ungesäuerten isotherm (40–80  $^{\circ}\text{C}$ ) geführten Maischen

In Abbildung 32 wird anhand des Mittelwertes der gebildeten C18:2-Hydroperoxidkonzentration über den Maischverlauf eine maximale Hydroperoxidbildung bei 60 °C und 75–80 °C bestätigt.



**Abb. 32: Mittelwerte der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration über den Verlauf der Maischdauer (100 Minuten) in gesäuerten und ungesäuerten isotherm geführten Maischen**

Rückblickend ist festzustellen, dass eine Abnahme des Gehaltes an langkettigen ungesättigten Fettsäuren mit einer Zunahme der Summe der C18:2-Hydroperoxidkonzentration einhergeht. Die Konzentration der Summe der C18:3-Hydroperoxidkonzentration zeigt prinzipiell einen ähnlichen Verlauf, sie liegt jedoch um das 3–4fache niedriger. Die pH-Werte und Messdaten dieser Versuchsreihe sind im Anhang Tabelle AH 1–3 dargestellt.

### 5.1.3 Beurteilung des lipidabbauenden Enzympotentials während des Maischprozesses in Abhängigkeit von der Rohstoffqualität und den gewählten Maischparametern durch Erfassung der entstandenen Abbauprodukte

Das lipidabbauende Enzympotential des Malzes drückt das Verhältnis zwischen Lipase-Aktivität, Lipoxygenase-Aktivität und der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität der gelchromatographisch aufgereinigten Enzymfraktion aus.

Wie aus der Literatur bekannt ist, haben Sorte und Standort maßgeblichen Einfluss auf die lipidabbauende Enzymaktivität des Malzes (siehe Tabelle 10). [146]

| Sorte/Standort     | Lipoxygenase-Aktivität<br>in U/ml | Aktivität der<br>hydroperoxidabbauenden<br>Enzymfraktion in % (bezogen auf<br>den höchsten Messwert) |
|--------------------|-----------------------------------|--|
| Pasadena Fronhofen | 33 (↑)                            | 90 (↑)   |
| Pasadena Garching  | 20 (↑)                            | 100 (↑)  |
| Ursa Fronhofen     | 18 (→)                            | 69 (→)   |
| Ursa Garching      | 12 (↓)                            | 75 (→)   |
| Braemar Fronhofen  | 27 (↑)                            | 63 (↓)   |
| Braemar Garching   | 28 (↑)                            | 70 (→)   |

**Tab. 10: Einteilung der Enzymaktivitäten der untersuchten Malze**  
(↑ hoch, → mittel, ↓ niedrig)

### **5.1.3.1 Einfluss der hydroperoxidabbauenden Enzymaktivität gegenüber LOX-Aktivität auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide**

Abbildung 33 zeigt die Konzentrationen der Summe der C18:2-Hydroperoxide der Sorten Pasadena und Ursa mit vergleichbarer LOX-Aktivität (20 bzw. 18 U/ml), jedoch unterschiedlicher hydroperoxidabbauender Aktivität (100 bzw. 69 %), nach 40 Minuten Maischzeit und den Mittelwert aus 6 Stichproben, genommen über den Maischverlauf über ein Hochkuzmaisverfahren. Dabei wurde angenommen, dass gleiche LOX-Aktivität eine gleiche enzymatische Hydroperoxidbildung bedingt. Die Malzsorte Ursa mit deutlich niedrigerer Aktivität an hydroperoxidabbauendem Enzym zeigt eine höhere Hydroperoxidkonzentration als die Sorte Pasadena mit vergleichsweise hoher hydroperoxidabbauender Aktivität. Im Kongressmaisverfahren verhält sich dies umgekehrt. Eine mögliche Interpretation wäre, dass die hydroperoxidabbauende Fraktion thermotoleranter als die Lipoxygenase ist und somit maßgeblichen Einfluss auf die Hydroperoxidkonzentration in der Maische, speziell bei Maischverfahren mit hohen Einmaischttemperaturen, hat. Diese Vermutung bestätigt sich durch die bereits durchgeführten Versuche zur Temperaturstabilität. Der Einfluss des Enzympotentials wird daher in weiteren Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Sortenauswahl unter Variation des Maischverfahrens untersucht. Obwohl in diesem Versuchsansatz ein deutlicher Einfluss des hydroperoxidabbauenden Enzyms auf die Hydroperoxidkonzentration feststellbar ist, überwog in den folgenden Versuchsreihen im Hinblick auf die Hydroperoxidbildung eindeutig die LOX-Aktivität. Dabei ist auch zu beachten, dass nur sehr geringe Aktivitäten des hydroperoxidabbauenden Enzyms in Relation zur LOX-Aktivität gemessen wurden.

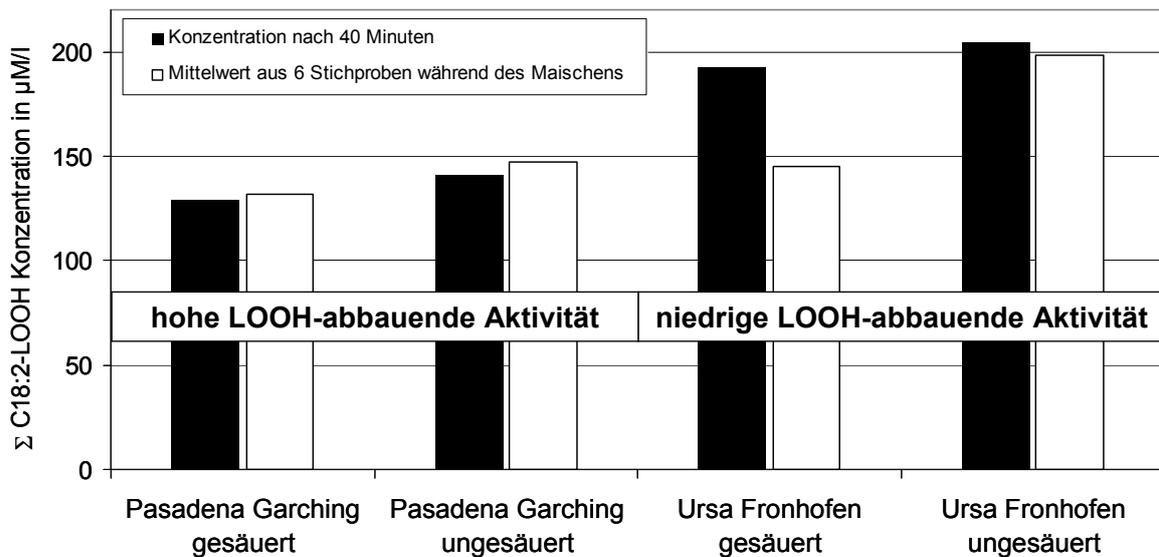


Abb. 33: Auswirkungen des unterschiedlichen Enzymopotentials (Hochkurzmaisverfahren)

### 5.1.3.2 Einfluss der Rohstoffauswahl in Abhängigkeit vom Maischverfahren auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide

Die Ergebnisse zeigen den Sorteneinfluss (v. a. bedingt durch die enzymatische Ausstattung) und den Einfluss des Maischverfahrens (niedrige bzw. hohe Einmischtemperatur) auf die Hydroperoxidbildung. Im Vergleich von Hochkurz- und Kongressmaisverfahren wurden die Sortenunterschiede in Hinblick auf die Hydroperoxidkonzentration (Ursa, Pasadena und Braemar jeweils Standort Fronhofen) vor allem im Kongressmaisverfahren deutlich. Mit Fortschreiten der Maischdauer sind im Kongressmaisverfahren größere Unterschiede bis zu 250 µM/l in der C18:2-Hydroperoxidkonzentration zwischen den Sorten erkennbar, hingegen ist im Hochkurzmaisverfahren ein relativ gleichmäßiger Verlauf, jedoch von Beginn an auf relativ hohem Niveau über die gesamte Maischdauer zu beobachten. Die Erhöhung des Konzentrationsniveaus beim Kongressmaisverfahren steigt mit dem Aufheizen auf die 70 °C-Rast sprunghaft an. Die Höhe der Maischtemperatur beeinflusst eindeutig die Hydroperoxidbildung. Beim Hochkurzmaisverfahren ist der Sorteneinfluss deutlich geringer ersichtlich und die Unterschiede betragen lediglich 80 µM/l. In Abbildung 34 und 35 ist aber zu

erkennen, dass die Sorte mit der höchsten LOX-Aktivität (Pasadena) die höchste Hydroperoxidkonzentration aufweist. Die Summe der C18:3-Hydroperoxide verhält sich bei allen Versuchsreihen ähnlich, jedoch ist die Konzentration um Faktor drei bis fünf geringer (siehe Tabellen AH 7 und AH 8 im Anhang).

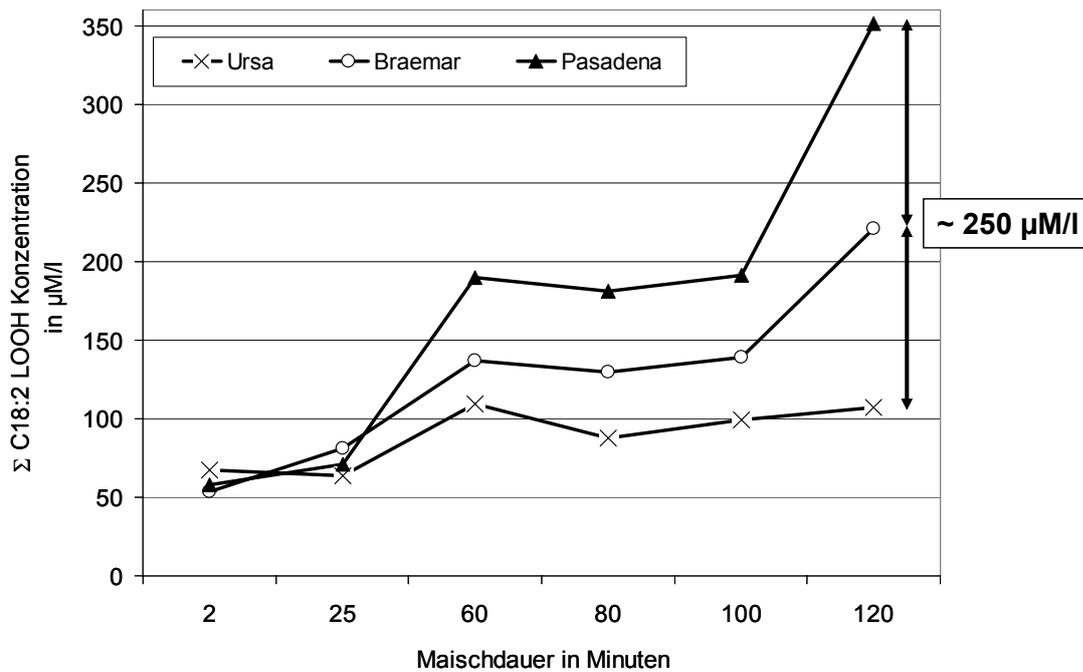
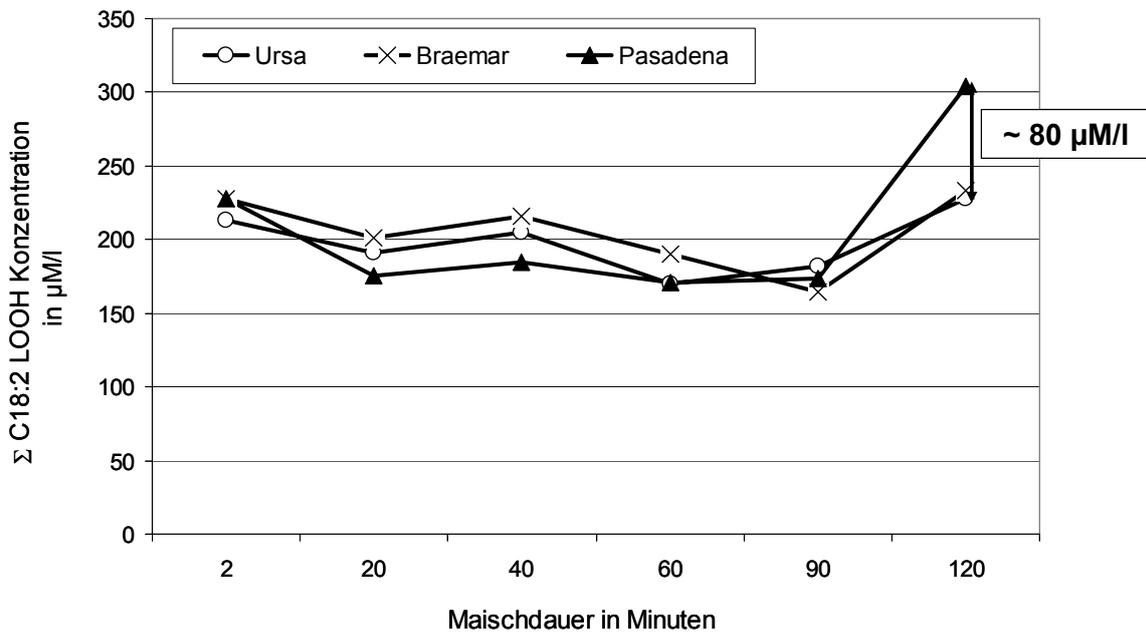


Abb. 34: Hydroperoxid-Bildung in Abhängigkeit von der Sortenauswahl und Maischverfahren (Kongressmaisverfahren)

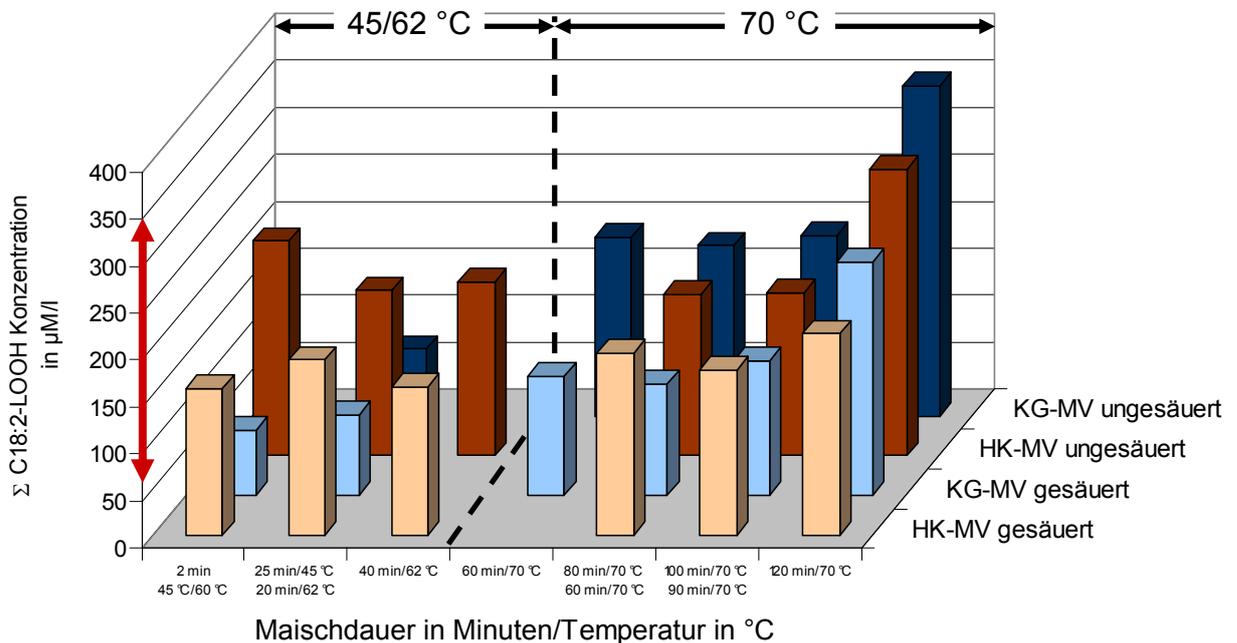


**Abb. 35: Hydroperoxid-Bildung in Abhängigkeit von der Sortenauswahl und Maischverfahren (Hochkurzmaisverfahren)**

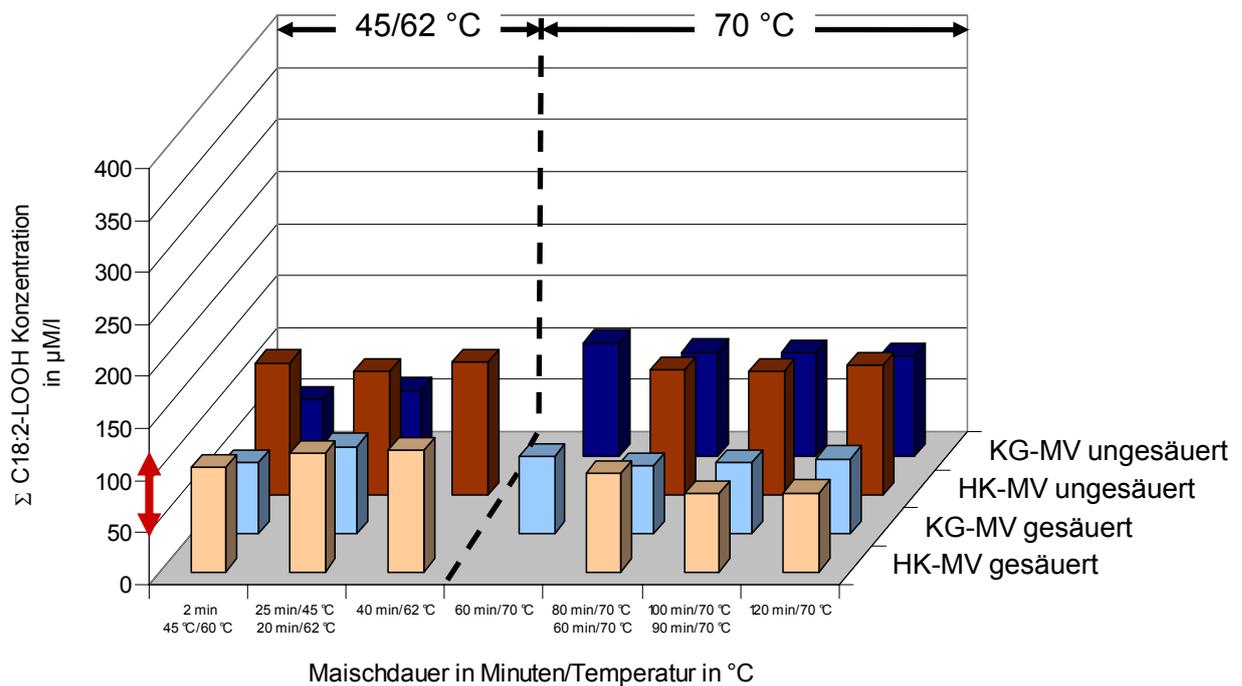
### 5.1.3.3 Einfluss der Rohstoffauswahl in Abhängigkeit vom Maischverfahren und Maische-pH auf die Konzentration der Linolsäure-Hydroperoxide

Abbildung 36 und 37 zeigen einen Vergleich der beiden Maischverfahren (Kongress- und Hochkurzmaisverfahren) mit und ohne Maischesäuerung. Im Rahmen dieser Versuchreihe wurden die in Abschnitt 5.3.1 dargestellten Malze untersucht. Beispielhaft werden die Ergebnisse an der Sorte Pasadena Fronhofen und Ursa Garching erläutert. Die Abbildungen verdeutlichen, dass Temperaturführung und pH-Wert der Maische die Summe an C18:2-Hydroperoxiden in der Würze wesentlich beeinflussen können. Der Einsatz von Maischesäuerung (Zugabe von technischer Milchsäure) bewirkt eine geringere Hydroperoxidkonzentration in der Würze im Vergleich zu den ungesäuerten Maischen. Hohe Einmaishtemperaturen und ein niedriger pH-Wert erzielen am Ende des Maischens die geringste Hydroperoxidkonzentration in der Würze. Ebenso wurde der Einfluss der LOX-Aktivität der jeweiligen Sorte geprüft. Pasadena Fronhofen besitzt eine LOX-Aktivität von 33 U/ml und Ursa Garching

lediglich 12 U/ml. Die Ergebnisse bestätigen, dass die Sorte bzw. die vorhandene LOX-Aktivität des Rohstoffes die Hydroperoxidkonzentration maßgeblich beeinflusst. Das Malzmuster Pasadena Fronhofen mit dreifacher LOX-Aktivität zeigt im Vergleich mit dem Muster Ursa Garching ein um das Dreifache erhöhtes Niveau der Summe der C18:2-Hydroperoxide. Die einzelnen Messwerte sind in Tabelle AH 6 im Anhang nachzulesen. Die LOX-Aktivität steht also in direktem Zusammenhang mit der Entstehung der Hydroperoxide.



**Abb. 36: Variation der Maischparameter I (Vergleich Kongressmaisverfahren-Hochkurzmaisverfahren/Pasadena Fronhofen)**



**Abb. 37: Variation der Maischparameter II (Vergleich Kongressmaisverfahren-Hochkurzmaisverfahren/Ursa Garching)**

Der Verlauf der Summe der C18:3-Hydroperoxide verhält sich bei allen Versuchsreihen ähnlich, jedoch ist die Konzentration um Faktor drei bis fünf geringer.

In den Labormaischversuchen zeigte sich deutlich, dass durch eine hohe Einmischtemperatur, kombiniert mit niedrigem Maische-pH (technische Milchsäure, pH 5,4–5,5), die Hydroperoxid-Bildung deutlich reduziert wird. Die Analysenwerte der nicht dargestellten Untersuchungen der beschriebenen Sorten und Standorte (vgl. Abschnitt 5.1.3) bestätigen dies. Die Daten sind im Anhang Tabellen AH 7 und AH 8 dargestellt. Zusammenfassend ist erkennbar, dass sich Standort- und Sorteneinfluss maßgeblich auf das Enzympotential des Malzes und somit auf die Entstehung von Lipidabbauprodukten auswirken. Die Untersuchungen zeigen, dass bei hoher LOX-Aktivität eindeutig ein erhöhter Gehalt an Fettsäure-Hydroperoxiden (C18:2-LOOH/C18:3-LOOH) resultiert. Die Konzentration der Summe der C18:3-Hydroperoxide verläuft auch in dieser Versuchreihe

vergleichbar, jedoch ist das Niveau um Faktor drei bis fünf geringer. KRETSCHMER [146] zeigte eine Verlagerung der Standortabhängigkeit der LOX-Aktivität in Richtung Sortenabhängigkeit über den Verlauf der Mälzung auf. Während die LOX-Aktivität der Gerste stärker von den jeweiligen Anbaubedingungen beeinflusst wird, gewinnt der Einfluss der Sorte durch die Vermälzung an Bedeutung.

#### 5.1.4 Einfluss von proteolytischer Lösung und Maische-pH auf die Entstehung von Würzearomastoffen zur Beurteilung der technologischen Einflussnahmemöglichkeiten während des Maischprozesses

##### 5.1.4.1 Orientierende Untersuchungen zum Einfluss des ELG und des pH-Wertes

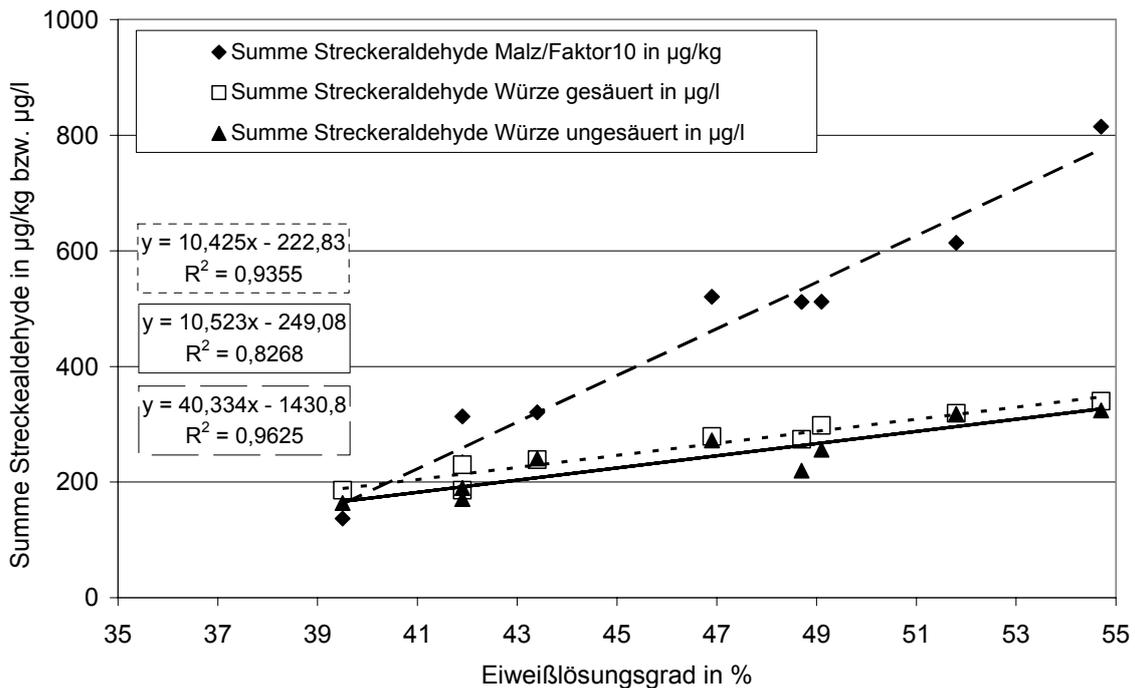
Die Gerstenmuster des Berliner Programms Ernte 2004 wurden unter Variation des Parameters Weichgrad nach einem Standardmälzungsverfahren vermälzt. Die erzielte proteolytische Lösung ist in Tabelle 11 dargestellt.

| Sorte                             |                                    | Berras      |             |             | Carafe      |             |             | Pasadena    |             |             |     |
|-----------------------------------|------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----|
| Malzanalyse                       | lösl. Stickstoff in mg/100 g MTrs. | 658         | 708         | 777         | 697         | 802         | 875         | 667         | 736         | 804         |     |
|                                   | LOX-Aktivität in U/ml              | 13,3        | 14,1        | 11,7        | 14,1        | 15,3        | 9,0         | 11,7        | 17,6        | 14,7        |     |
|                                   | ELG in %                           | <b>39,5</b> | <b>43,4</b> | <b>49,1</b> | <b>41,9</b> | <b>48,7</b> | <b>54,7</b> | <b>41,9</b> | <b>46,9</b> | <b>51,8</b> |     |
|                                   | Σ Streckeraldehyde/10              | µg/kg       | 137         | 321         | 512         | 234         | 512         | 815         | 313         | 521         | 614 |
|                                   | Σ Fettabbauprodukte                | µg/kg       | 256         | 330         | 549         | 361         | 563         | 812         | 306         | 364         | 469 |
| Würzeanalyse mit Maischesäuerung  | Hexanal                            | µg/kg       | 146         | 224         | 358         | 250         | 337         | 503         | 235         | 264         | 328 |
|                                   | 2-Furfural                         | µg/kg       | 119         | 287         | 466         | 179         | 375         | 614         | 379         | 558         | 700 |
|                                   | Σ Streckeraldehyde                 | µg/l        | 186         | 239         | 298         | 186         | 274         | 340         | 230         | 279         | 319 |
|                                   | Σ Fettabbauprodukte                | µg/l        | 65          | 55          | 69          | 58          | 53          | 58          | 71          | 67          | 61  |
|                                   | Hexanal                            | µg/l        | 57          | 48          | 60          | 52          | 47          | 52          | 65          | 61          | 55  |
| Würzeanalyse ohne Maischesäuerung | 2-Furfural                         | µg/l        | 20          | 31          | 40          | 23          | 46          | 64          | 39          | 60          | 72  |
|                                   | Σ Streckeraldehyde                 | µg/l        | 164         | 241         | 256         | 171         | 220         | 324         | 190         | 272         | 318 |
|                                   | Σ Fettabbauprodukte                | µg/l        | 86          | 77          | 68          | 65          | 52          | 61          | 59          | 55          | 54  |
|                                   | Hexanal                            | µg/l        | 73          | 69          | 55          | 52          | 43          | 53          | 53          | 49          | 48  |
|                                   | 2-Furfural                         | µg/l        | 20          | 33          | 39          | 26          | 37          | 60          | 31          | 52          | 79  |

**Tab. 11: Einfluss des Eiweißlösungsgrades und Maische-pHs auf die Bildung von Aromastoffen**

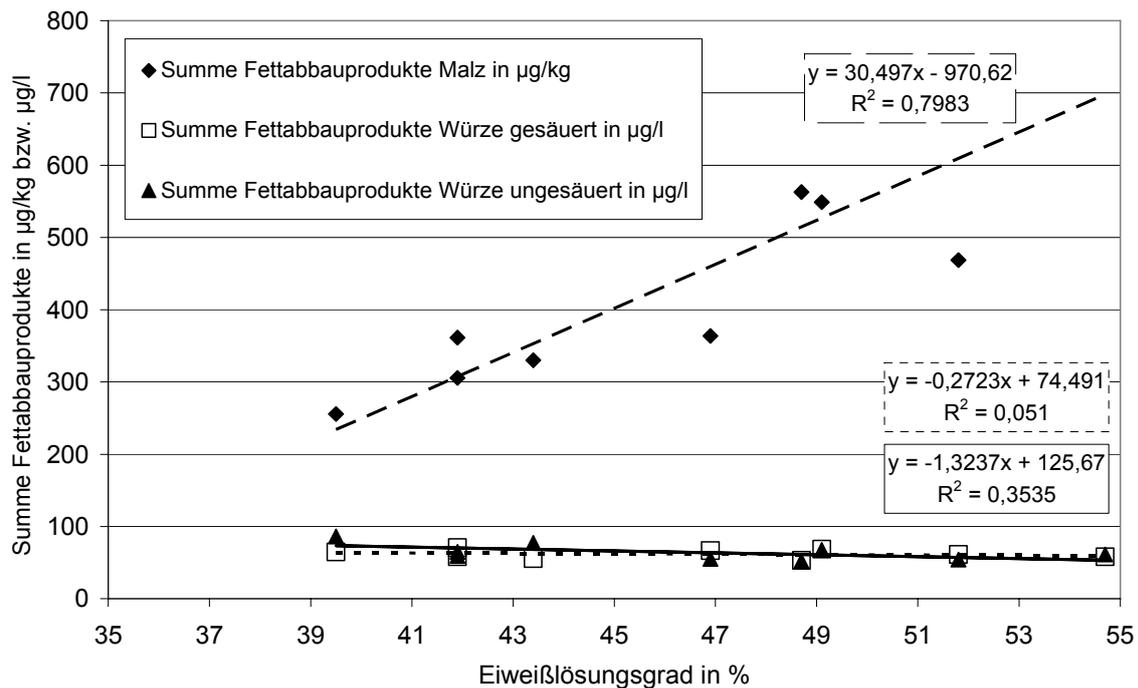
Die Bildung von Aromastoffen, geprägt durch den proteolytischen Abbau (Summe der Streckeraldehyde, 2-Furfural), korreliert in Malz und Würze mit dem Eiweißlösungsgrad. Der Einfluss der Maischesäuerung wirkt sich nur gering aus, dennoch ist die Summe der Streckeraldehyde der Würzen mit Maischesäuerung tendenziell leicht erhöht. Ein Vergleich zwischen Würze- und Malzaromastoffen

bestätigt, dass ein erhöhtes Ausgangspotential an Aromastoffen im Malz in der Konzentration der Würze wieder zu finden ist. Die Rohstoffauswahl beeinflusst somit maßgeblich das Potential zur Bildung alterungsrelevanter Aromastoffe, und die im Malz vorliegende Aromastoffkonzentration bestimmt das Konzentrationsniveau der Würze. Je höher die proteolytische Lösung des Malzes, desto höher ist die Summe der Streckeraldehyde (siehe Abbildung 38). Somit ist im Hinblick auf eine frühzeitige Beurteilung der Geschmacksstabilität des Bieres der Eiweißlösungsgrad des Malzes von großer Bedeutung. Ebenso steigt der 2-Furfural-Gehalt mit steigendem Eiweißlösungsgrad in Malz und Würze an, jedoch unabhängig vom Maische-pH. Bei der Deutung der Ergebnisse ist zu beachten, dass hier kein direkter Zusammenhang zwischen der Summe der Aromastoffe in Malz und Würze besteht. Die Aromastoffe des Malzes werden auf die Einwaage bezogen in  $\mu\text{g}/\text{kg}$ , die Würze aromastoffe in  $\mu\text{g}/\text{l}$  angegeben. Dennoch dient ein hohes Niveau an Aromastoffen im Malz als Indikator für einen erwartungsgemäß erhöhten Gehalt an Würze aromastoffen. Ein hoher Gehalt an Würze aromastoffen der ungekochten Würze deutet wiederum auf eine verminderte Geschmacksstabilität des Bieres hin. Die analytische Beurteilung der Malze und der Pfannevoll-Würze eignet sich somit als frühzeitiger Hinweis zur Vorhersage der Geschmacksstabilität. Diese Hypothese wird im weiteren Verlauf der Forschungsarbeit anhand von Brauversuchen untermauert.



**Abb. 38: Zusammenhang ELG des Malzes/Summe der Streckeraldehyde**

Die Summe der Fettabbauprodukte weist, wie aus Abbildung 39 ersichtlich ist, nur bei der Malzanalyse einen Zusammenhang mit dem Grad der Eiweißlösung des Malzes auf. Innerhalb der untersuchten Würzen bestätigt sich dieser Zusammenhang nicht. Des Weiteren kann innerhalb der untersuchten Proben kein Zusammenhang zwischen der Hexanal-Bildung und der LOX-Aktivität (siehe Tabelle 11) hergestellt werden.



**Abb. 39: Zusammenhang ELG des Malzes/Summe der Fettabbauprodukte**

Grundsätzlich ist festzustellen, dass trotz hoher Einmischtemperaturen und Maischesäuerung die Konzentration der gebildeten Aromastoffe, v. a. die Konzentration der Streckeraldehyde, auch bei niedrigem Eiweißlösungsgrad, tendenziell ansteigt. Die lipidabbauenden Enzyme werden jedoch durch diese Maßnahmen, wie in den vorangegangenen Versuchen dargelegt (vgl. Abschnitt 5.1), gehemmt. Ein Grund könnte sein, dass durch ein Absenken des pH-Wertes die proteolytische Lösung unterstützt wird und somit die Lösungsvorgänge während des Maischprozesses zusätzlich gefördert werden. Daraus resultieren intensivere Lösungsvorgänge während des Maischprozesses, verbunden mit einer zunehmenden Freisetzung an Zwischen- und Abbauprodukten und folglich einer erhöhten Aromastoffkonzentration. Tabellen AH 10–12 im Anhang stellen die zugehörigen Analysendaten im Überblick dar.

### 5.1.4.2 Darstellung und Bewertung der erhaltenen Modelle der statistischen Versuchsplanung

Tabelle 12 stellt die statistischen Kennzahlen und F-Werte der erhaltenen Modelle für die Summe der Streckeraldehyde, Summe der Fettabbauprodukte und Hexanal dar. Die Versuchsansätze und die zugehörigen Messwerte sind im Anhang Tabelle AH 20 aufgelistet.

#### *Summe der Streckeraldehyde*

| <b>Faktor</b>          | <b>F-Wert</b> | <b>p-Wert</b> |                                |       |
|------------------------|---------------|---------------|--------------------------------|-------|
| Temperatur             | 5,6           | 0,0209        | Lack of Fit [p-Wert]           | 0,74  |
| ELG                    | 225,6         | < 0,0001      | Adj R-Squared                  | 0,81  |
| Art der Milchsäuregabe | 36,5          | < 0,0001      | Pred R-Squared                 | 0,80  |
|                        |               |               | Adeq Precision                 | 28,96 |
|                        |               |               | eliminierte Ausreißer [Stdnr.] | 17,50 |
|                        |               |               | Modell: signifikant, linear    |       |

#### *Summe der Fettabbauprodukte*

| <b>Faktor</b>          | <b>F-Wert</b> | <b>p-Wert</b> |                                  |       |
|------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|-------|
| pH-Wert                | 5,9           | 0,018         | Lack of Fit [p-Wert]             | 0,59  |
| Temperatur             | 48,7          | < 0,0001      | Adj R-Squared                    | 0,74  |
| ELG                    | 3,9           | 0,054         | Pred R-Squared                   | 0,71  |
| Art der Milchsäuregabe | 2,9           | 0,0919        | Adeq Precision                   | 21,56 |
| ELG                    | 111,4         | < 0,0001      | eliminierte Ausreißer [Stdnr.]   | 17,50 |
|                        |               |               | Modell: signifikant, quadratisch |       |

#### *Hexanal*

| <b>Faktor</b>          | <b>F-Wert</b> | <b>p-Wert</b> |                                  |       |
|------------------------|---------------|---------------|----------------------------------|-------|
| pH-Wert                | 6,3           | 0,0152        | Lack of Fit [p-Wert]             | 0,62  |
| Temperatur             | 41,9          | < 0,0001      | Adj R-Squared                    | 0,71  |
| ELG                    | 4,0           | 0,0506        | Pred R-Squared                   | 0,68  |
| Art der Milchsäuregabe | 3,3           | 0,0749        | Adeq Precision                   | 20,32 |
| ELG                    | 90,7          | < 0,0001      | eliminierte Ausreißer [Stdnr.]   | 17,50 |
|                        |               |               | Modell: signifikant, quadratisch |       |

**Tab. 12: Statistische Kennzahlen und F-Werte zur Beurteilung der erhaltenen Modelle**

Über die F-Werte kann zusätzlich eine Aussage über die Relevanz der einzelnen Terme des Modells getroffen werden bzw. welcher Faktor in dieser Versuchskombination den größten Einfluss auf die Zielgröße hat. Je größer der F-Wert ist, desto größer ist der Effekt dieses Terms auf die Zielgröße gegenüber dem Fehler des Modells. [200]

Hinsichtlich der Summe der Streckeraldehyde zeigt der F-Wert, dass diese Größe fast ausschließlich durch den Eiweißlösungsgrad beeinflusst wird. Der pH-Wert hat keinen Einfluss und wurde in der Modellgleichung (siehe Gleichungen 5.1.4.2.1–6) nicht berücksichtigt. Die F-Werte der Summe der Fettabbauprodukte und der einzeln betrachteten, dominierenden Komponente Hexanal belegen, dass die Bildung maßgeblich durch den Eiweißlösungsgrad und die Einmischtemperatur beeinflusst wird. [200] Aus den dargestellten Modellgleichungen ist ersichtlich, dass der Einfluss der Art der Milchsäuregabe (biologisch oder technisch) nur sehr gering ist. Wären die eliminierten Ausreißer im Modell enthalten, wäre der Fehler so groß, dass statistisch kein Unterschied vorhanden wäre. Dennoch liegen die Aromastoffkonzentrationen der biologisch gesäuerten Maischen grundsätzlich etwas niedriger als die der mit technischer Milchsäure gesäuerten Maischen.

#### Modellgleichungen:

##### Summe der Streckeraldehyde

**Technische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.1)  
Summe der Streckeraldehyde in  $\mu\text{g/l}$  =  $-247,93610 - 1,73137 \times \text{Temperatur} + 13,29167 \times \text{ELG}$

**Biologische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.2)  
Summe der Streckeraldehyde in  $\mu\text{g/l}$  =  $-280,54901 - 1,73137 \times \text{Temperatur} + 13,29167 \times \text{ELG}$

##### Summe der Fettabbauprodukte

**Technische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.3)  
 $\text{Sqrt (Summe der Fettabbauprodukte in } \mu\text{g/l}) = -146,6912965 - 0,794460688 \times \text{pH- Wert} - 0,138673948 \times \text{Temperatur} + 8,107998856 \times \text{ELG} - 0,098299894 \times \text{ELG}^2$

**Biologische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.4)  
 $\text{Sqrt (Summe der Fettabbauprodukte in } \mu\text{g/l}) = -146,9431417 - 0,794460688 \times \text{pH- Wert} - 0,138673948 \times \text{Temperatur} + 8,107998856 \times \text{ELG} - 0,098299894 \times \text{ELG}^2$

##### Hexanal

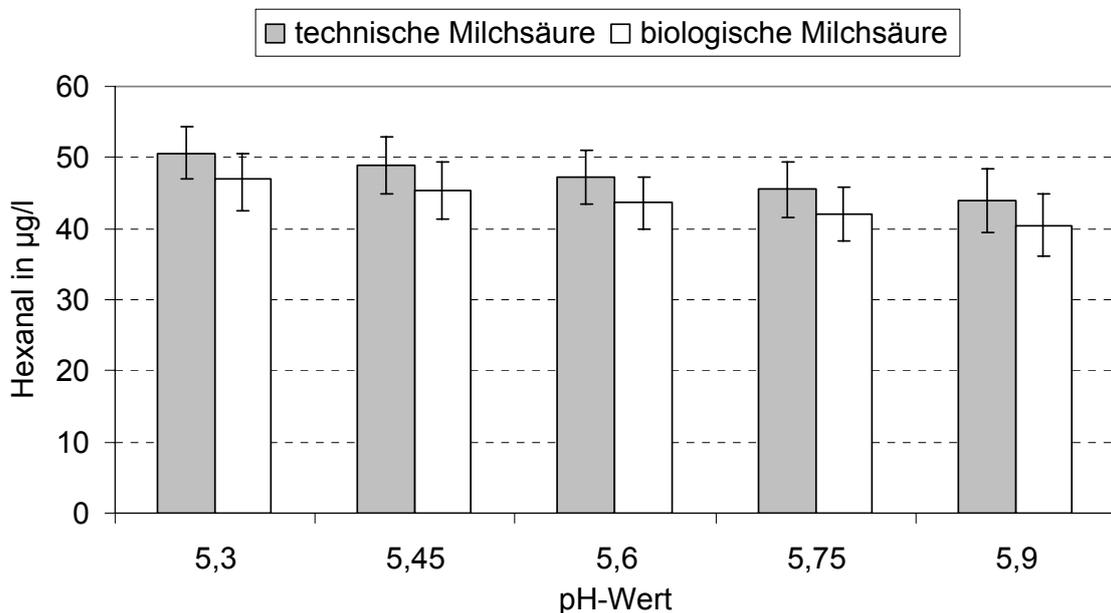
**Technische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.5)  
 $\text{Sqrt (Hexanal in } \mu\text{g/l}) = -132,0978885 - 0,817742401 \times \text{pH- Wert} - 0,12890498 \times \text{Temperatur} + 7,331476985 \times \text{ELG} - 0,088820545 \times \text{ELG}^2$

**Biologische Milchsäure** (Gl. 5.1.4.2.6)  
 $\text{Sqrt (Hexanal in } \mu\text{g/l}) = -132,3648164 - 0,817742401 \times \text{pH- Wert} - 0,12890498 \times \text{Temperatur} + 7,331476985 \times \text{ELG} - 0,088820545 \times \text{ELG}^2$

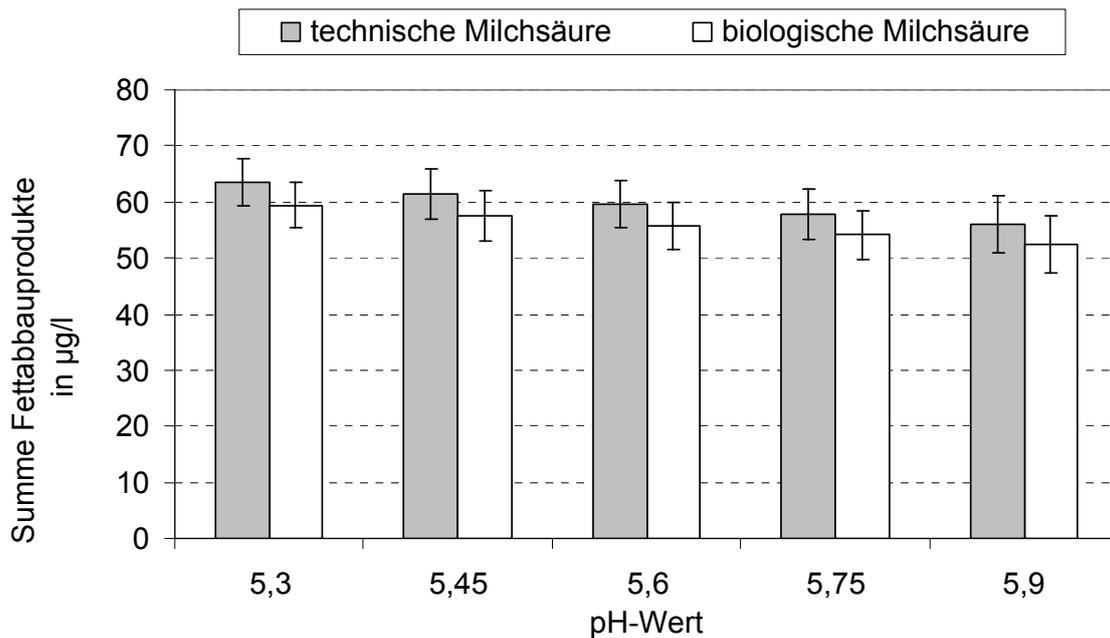
Generell ist bei der Auswertung und Bewertung der statistischen Modelle zu beachten, dass es sich hierbei um sehr komplexe Modellansätze mit zahlreichen unberücksichtigten Einflussfaktoren handelt, und Analysemethoden Anwendung finden, die z. T. einer sehr aufwendigen Probenvorbereitung bedürfen. Aus diesem Grund können sich Fehlerabweichungen bis zu 10 % ergeben. Alle Daten dieser Versuchsreihe sind im Anhang Tabellen AH 14–18 dargestellt.

#### 5.1.4.2.1 Beurteilung des Einflusses von Maische-pH und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung)

Wie bereits aus den Modellgleichungen in Abschnitt 5.1.4.2 ersichtlich ist der Einfluss der Art der Säuregabe nur gering und liegt im Bereich des Analysefehlers. Abbildung 40 und 41 zeigen, dass mit steigendem pH-Wert eine leicht Abnahme des Hexanalgehaltes bzw. der Summe der Fettabbauprodukte feststellbar ist.



**Abb. 40: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Maische-pH auf den Hexanalgehalt**



**Abb. 41: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Maische-pH auf die Summe der Fettabbauprodukte**

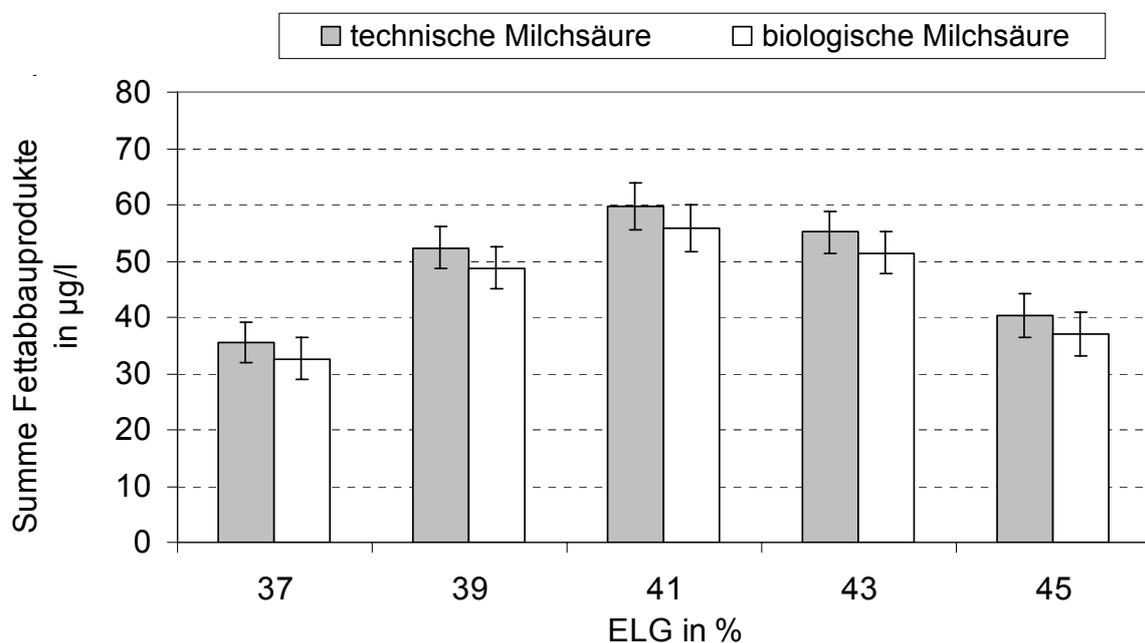
Hinsichtlich der Summe der Streckeraldehyde in Abhängigkeit vom Maische-pH und der Art der Milchsäure wurde bei der Bildung der Modellgleichung der pH-Wert nicht als Einflussfaktor einbezogen. Es scheint hier, statistisch bewertet, kein Unterschied zwischen biologischer und technischer Milchsäuregabe vorzuliegen. Dennoch ist bei Betrachtung der Absolutwerte die Summe der Streckeraldehyde der mit biologischer Milchsäure gesäuerten Maischen niedriger (siehe Abschnitt 5.1.4.2.4).

#### 5.1.4.2.2 Beurteilung des Einflusses des Eiweißlösungsgrades und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung)

Abbildung 42 zeigt, dass der Eiweißlösungsgrad innerhalb dieser einen Sorte maßgeblichen Einfluss auf die Bildung der Fettabbauprodukte hat. Bei den vorangegangenen orientierenden Untersuchungen (vgl. Abschnitt 5.1.4.1) konnte innerhalb von drei untersuchten Sorten bei der Würzeanalyse kein abgesicherter Zusammenhang festgestellt werden. Allerdings lagen hier hauptsächlich überlöst Malze vor. Besondere Beachtung gilt daher der Tatsache, dass die Summe der

gebildeten Aromastoffe aus dem Fettabbau bei dem üblicherweise für Braumalze als optimal bewerteten Eiweißlösungsgrad (geforderte Spezifikation für Hochkurzmaisverfahren ELG 39–42% [1, 216]) am höchsten liegt. Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1.4.1 der Sorten Berras, Carafe und Pasadena mit ELG 39,5–41,9 % untermauern dies (siehe Anhang Tabellen AH 13 und AH 14). Das bedeutet, dass sowohl überlöst als auch unterlöst Malze die geringsten Aromastoffkonzentrationen aus dem Fettabbau in der Würze aufweisen. In diesem Zusammenhang ist auch der Weichgrad zu beachten. KETTERER [145] analysierte bei einem Weichgrad von 42 % den höchsten Gehalt an Lipidabbauprodukten. Dieser Wert liegt wiederum im Bereich der in der Praxis üblicherweise eingesetzten Parameter.

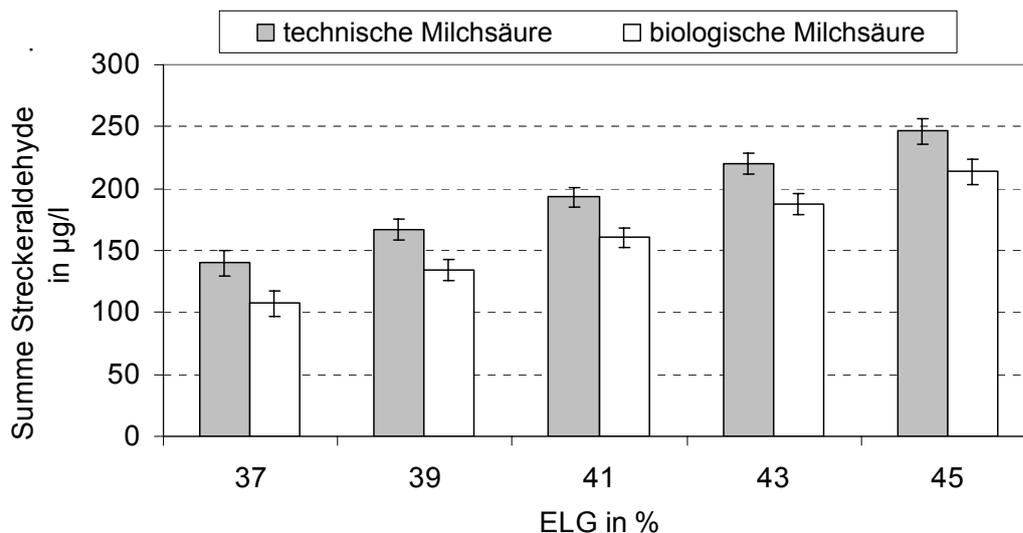
Die biologische Maischesäuerung erzielt ein geringeres Konzentrationsniveau, jedoch liegt der Unterschied eindeutig innerhalb der Fehlerbalken und ist somit nicht signifikant.



**Abb. 42: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Eiweißlösungsgrad auf die Summe der Fettabbauprodukte**

Abbildung 43 belegt in der statistisch geplanten Untersuchung, wie bereits bei den orientierenden Untersuchungen in Abschnitt 5.1.4.1 vermutet, dass die Summe der

Streckeraldehyde mit steigendem Eiweißlösungsgrad bis zu 100 µg/l zunimmt und somit maßgeblich von der proteolytischen Malzlösung beeinflusst wird. Die biologische Milchsäure bewirkt hier eindeutig geringere Konzentrationen der Summe der Streckeraldehyde als der Einsatz technischer Milchsäure. Die Konzentrationsunterschiede betragen ca. 40 µg/l.

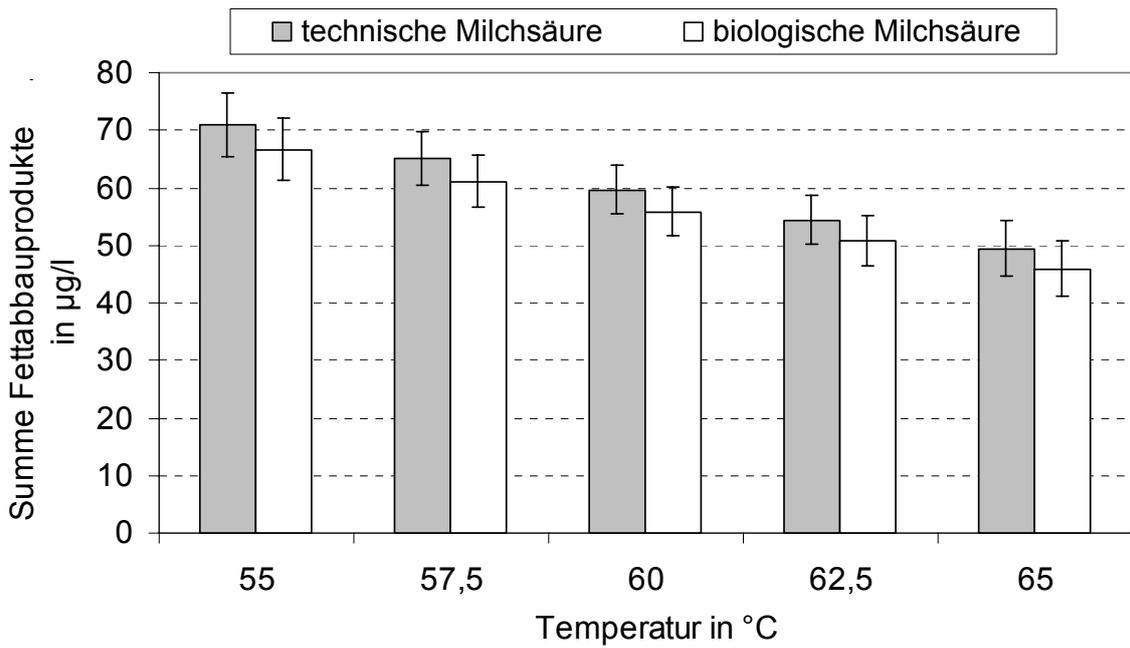


**Abb. 43: Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Eiweißlösungsgrad auf die Summe der Streckeraldehyde**

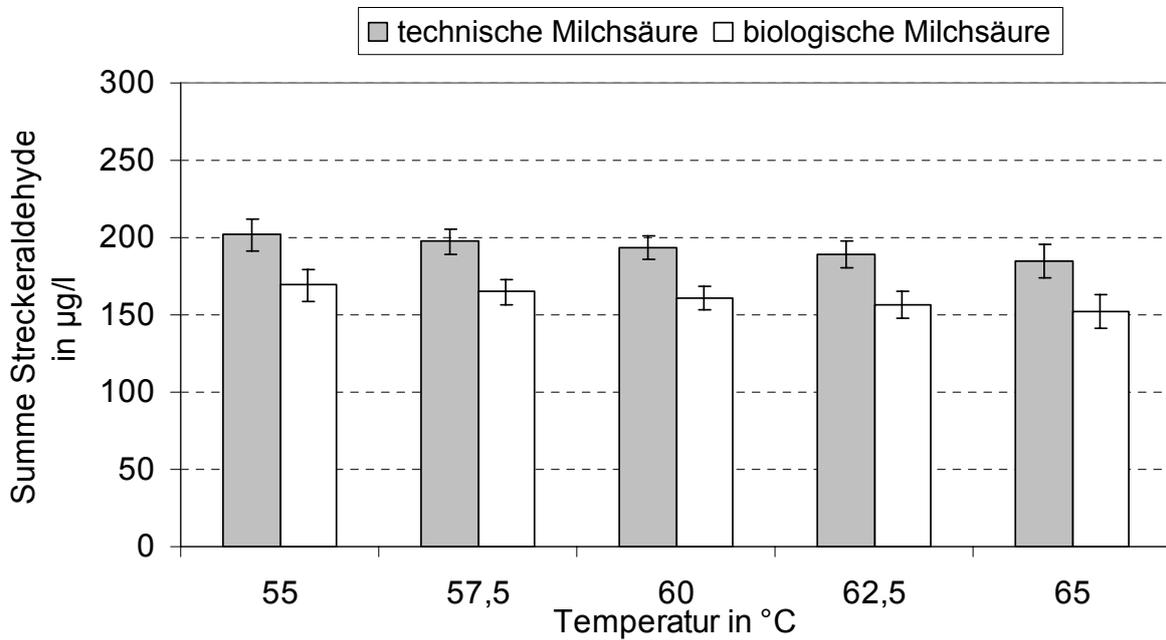
#### 5.1.4.2.3 Beurteilung des Einflusses der Einmischtemperatur und Art der Säuregabe auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung)

Als dritter Einflussfaktor wurde die Höhe der Einmischtemperatur auf die Aromabildung untersucht. Abbildung 44 belegt, dass mit steigenden Einmischtemperaturen von 55 °C auf 65 °C ein deutlicher Rückgang der Summe der Fettabbauprodukte um ca. 25 % erkennbar ist.

Abbildung 45 zeigt, dass die Höhe der Einmischtemperatur nur relativ geringe Auswirkungen auf die Konzentration der Streckeraldehyde hat. Tendenziell lässt sich ein leichter Rückgang der Summe der Streckeraldehyde mit steigender Einmischtemperatur verzeichnen. Die biologisch gesäuerten Würzen zeigen ein um ca. 15 % niedriger liegendes Konzentrationsniveau.



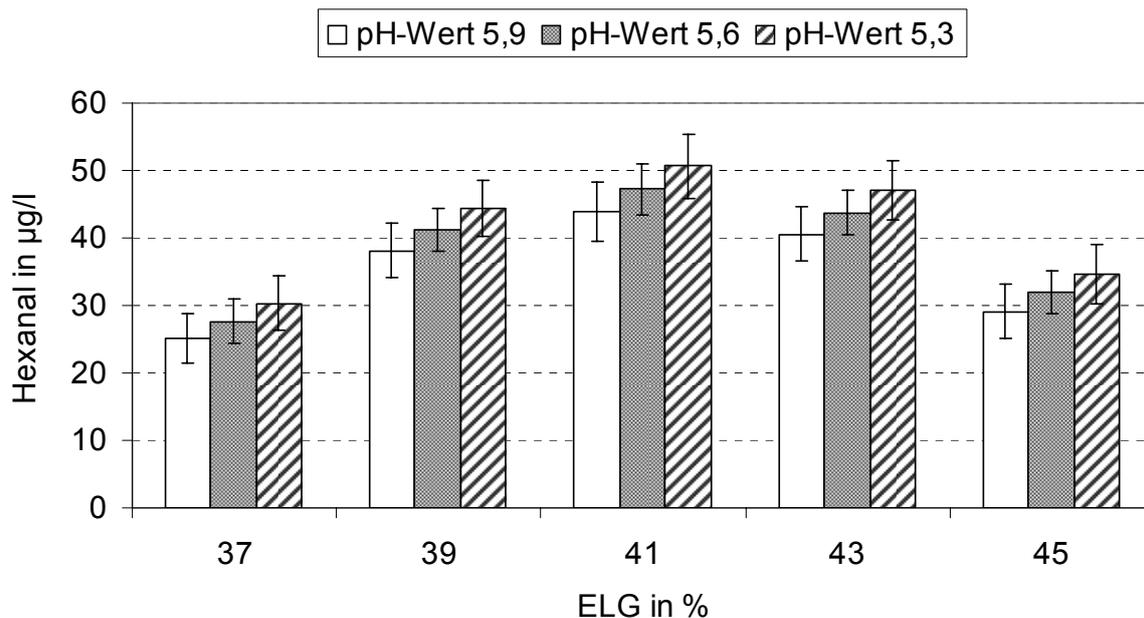
**Abb. 44:** Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Einmischtemperatur auf die Summe der Fettabbauprodukte



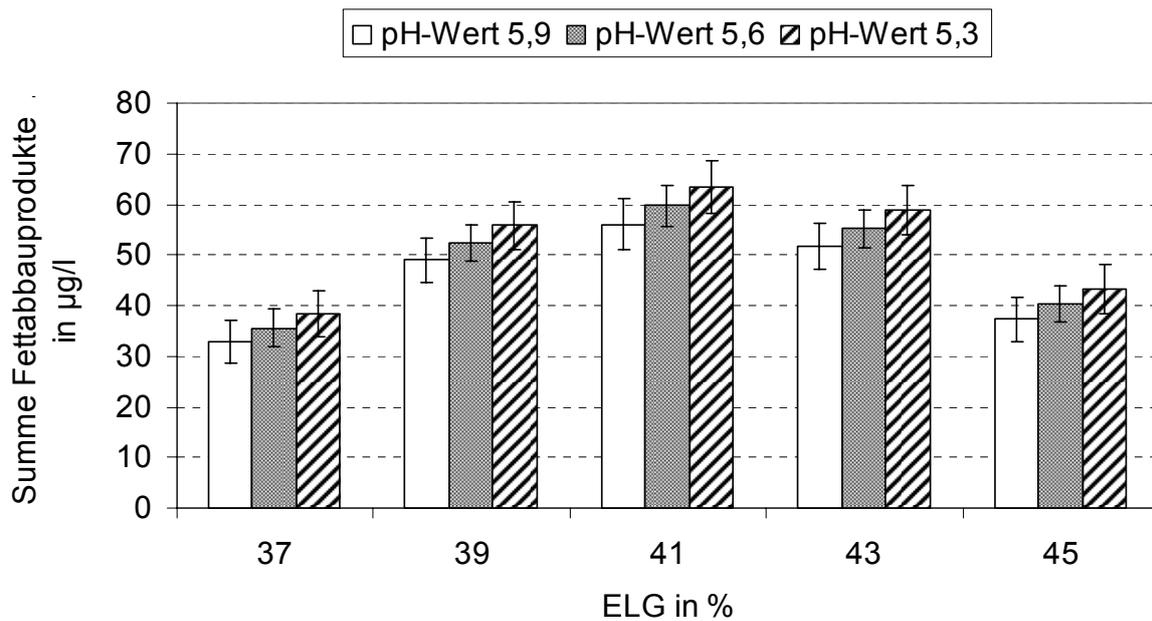
**Abb. 45:** Einfluss von technischer und biologischer Milchsäuregabe sowie Einmischtemperatur auf die Summe der Streckeralehyde

#### 5.1.4.2.4 Beurteilung des Einflusses von Eiweißlösungsgrad und Einmischtemperatur in Abhängigkeit vom Maische-pH auf die Bildung von Aromastoffen (statistische Versuchsplanung)

Die Darstellung der Hexanalkonzentration und der Summe der Fettabbauprodukte über den Eiweißlösungsgrad bei konstanter Einmischtemperatur von 60 °C verdeutlicht erneut, dass überlöste und unterlöste Malze die geringsten Aromastoffkonzentrationen aus dem Fettabbau aufweisen (siehe Abbildungen 46 und 47). Ein Absenken des pH-Wertes fördert tendenziell die Aromastoffkonzentration beim Vergleich der Absolutwerte. Jedoch ist zu beachten, dass die Fehlergrenzen keine statistisch abgesicherte Aussage über eine Erhöhung der Aromastoffkonzentration erlauben. In den folgenden Darstellungen wurde aufgrund der geringen Unterschiede nur die Absenkung des Maische-pHs mittels technischer Milchsäure dargestellt.

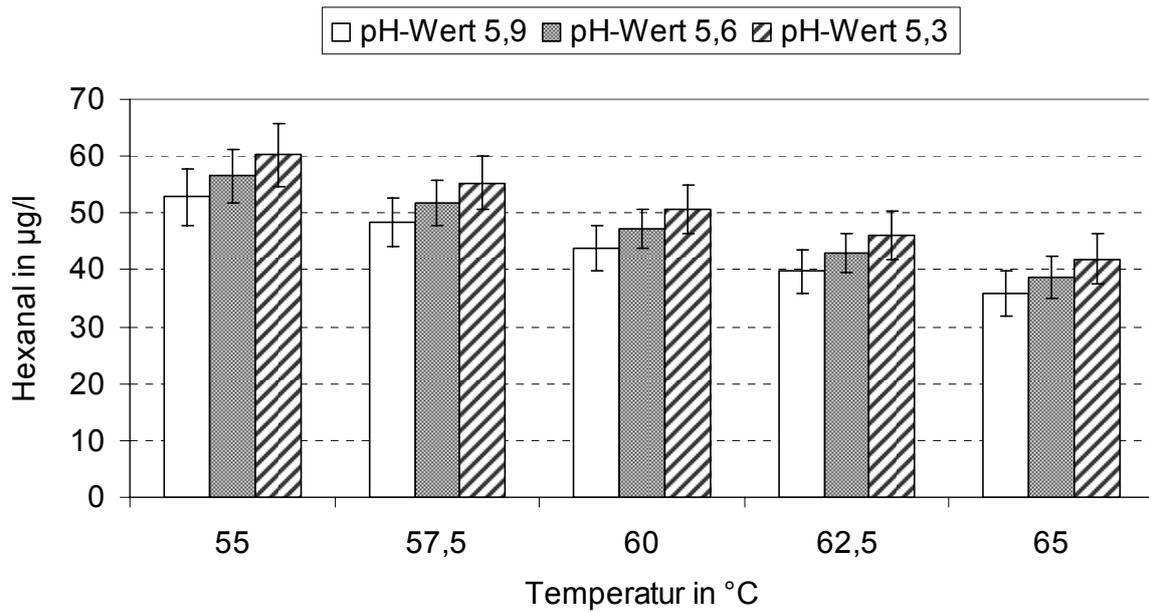


**Abb. 46: Einfluss des Eiweißlösungsgrades auf die Hexanalkonzentration in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe)**

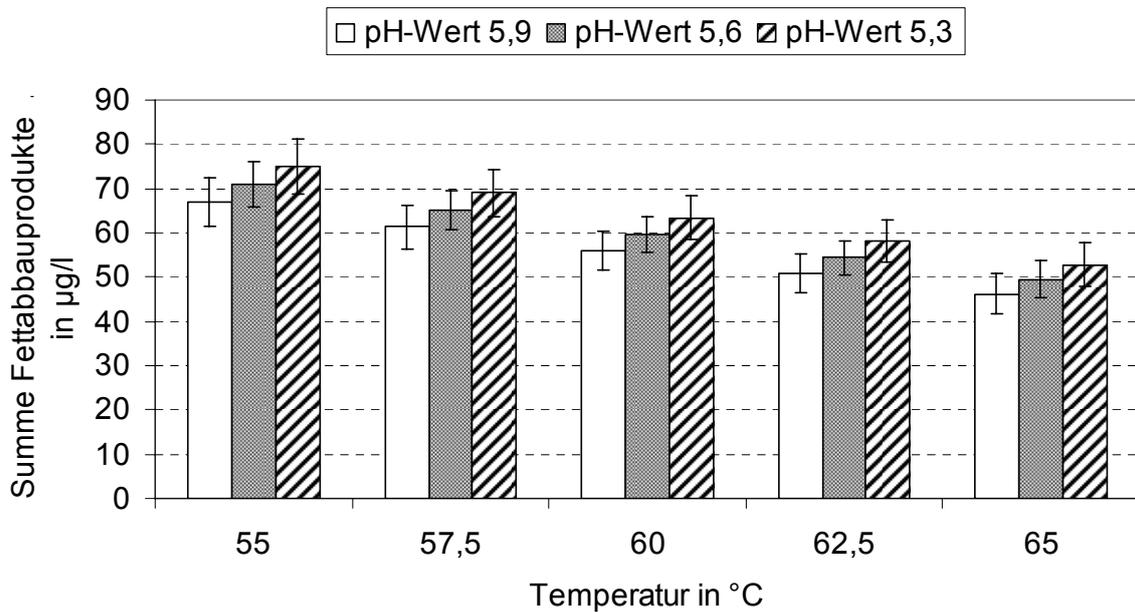


**Abb. 47: Einfluss des Eiweißlösungsgrades auf die Summe der Fettabbauprodukte in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe)**

Hinsichtlich des Einflusses der Einmischtemperatur auf die Hexanalkonzentration und die Summe der Fettabbauprodukte kann mit steigender Einmischtemperatur eindeutig eine Reduzierung der Aromastoffe festgestellt werden. Ein Absenken des pH-Wertes zeigt tendenziell wiederum eine erhöhte Aromastoffkonzentration beim Vergleich der Absolutwerte. Die Fehlergrenzen lassen aber lediglich im Vergleich von 55 °C- und 65 °C-Einmischtemperatur eine statistisch gesicherte Aussage zu (siehe Abbildungen 48 und 49).



**Abb. 48: Einfluss der Einmischtemperatur auf die Hexanalkonzentration in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe)**



**Abb. 49: Einfluss der Einmischtemperatur auf die Summe der Fettabbauprodukte in Abhängigkeit vom Maische-pH (technische Milchsäuregabe)**

Generell liegt bei Betrachtung der Absolutwerte die Summe der Streckeraldehyde der mit biologischer Milchsäure gesäuerten Maischen niedriger. Der Einfluss des

pH-Wertes auf die Bildung von Streckeraldehyden geht jedoch nicht in die errechnete Modellgleichung mit ein (siehe Abschnitt 5.1.4.2 und 5.1.4.2.2). Es ist jedoch zu erwarten, dass trotz der überschrittenen Temperaturoptima der proteolytischen Enzyme auch eiweißseitig noch Lösungsvorgänge auftreten (vgl. Abschnitt 5.1.5). Aufgrund dieser Ergebnisse liegt die Vermutung nahe, dass ein Herabsetzen des Maische-pHs die Lösungsvorgänge während des Maischprozesses zwar zu fördern scheint, aber die technische Milchsäure diese Lösungsvorgänge mehr unterstützt als der Einsatz biologischer Milchsäure. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass in erster Linie der Eiweißlösungsgrad die Bildung von Aromastoffen beeinflusst. Die aus dem Fettabbau entstandenen Abbauprodukte können zusätzlich über die Einmischtemperatur deutlich beeinflusst werden. Neue Hinweise für die technologische Beeinflussbarkeit der Geschmacksstabilität gibt die Tatsache, dass bei einem nach den üblichen Malzspezifikationen geforderten Eiweißlösungsgrad die höchste Konzentration an Fettabbauprodukten vorzufinden ist. Des Weiteren zeigen die erhaltenen Ergebnissen, dass der Einfluss der Art der Milchsäuregabe (biologisch oder technisch) nur sehr gering ist, allerdings liegt die Aromastoffkonzentrationen der biologisch gesäuerten Maischen tendenziell etwas niedriger als die der mit technischer Milchsäure gesäuerten Maischen. Dabei ist zusätzlich zu beachten, dass sich der Einsatz biologischer Milchsäure, z. B. in Bezug auf die Gärung, positiv auswirkt und somit eindeutig zur Verbesserung der Geschmacksstabilität beiträgt. [1, 194]

#### **5.1.4.3 Orientierende Untersuchungen zur Hexanalbildung während der Würzebereitung**

Die Darstellung des Hexanalgehaltes in Abbildung 50 zeigt, dass beim Maischprozess eine eindeutige Zunahme an Hexanal zu beobachten ist. Basierend auf der alleinigen Zunahme der Hexanalkonzentration im Kaltauszug isotherm gemischt bei 56, 62 und 68 °C erfolgt der Rückschluss, dass im Maischprozess mehr Hexanal nachgebildet als ausgedampft wird. Weder die wässrige Hexanallösung noch die „temperierte Würze“ zeigt einen Konzentrationsanstieg.

Dies ist auf den bei diesen Temperaturen gegebenen enzymatischen Lipidabbau und Lösungsvorgänge während des Maischprozesses zurückzuführen. Allerdings ist in der Würze (Anstellwürze) bereits bei einer Temperatur von 56 °C (Siedepunkt Hexanal 131 °C [217]) ein Verlust an Hexanal zu beobachten bzw. eine Nachbildung auszuschließen. In diesem Fall ist eine enzymatische Nachbildung nicht mehr möglich. Des Weiteren ist mit höheren Temperaturen eine stärkere Abnahme feststellbar.

Bei der Würzekochung werden je nach Kochsystem die freien Fettsäuren um ca. 70–80 % vermindert und die Aromastoffe aus dem Fettabbau bis zu 90 % ausgedampft. Hexanal, 1-Hexanol und 1-Pentanol werden in Abhängigkeit von der Verdampfung nahezu vollständig ausgetrieben. [146, 218] Generell liegen die Aromastoffgehalte nach dem Kochprozess auf vergleichbarem niedrigem Niveau. Abbildung 50 zeigt die gemessenen Hexanalkonzentrationen nach 20-minütiger „Maischzeit“ (Temperierzeit).

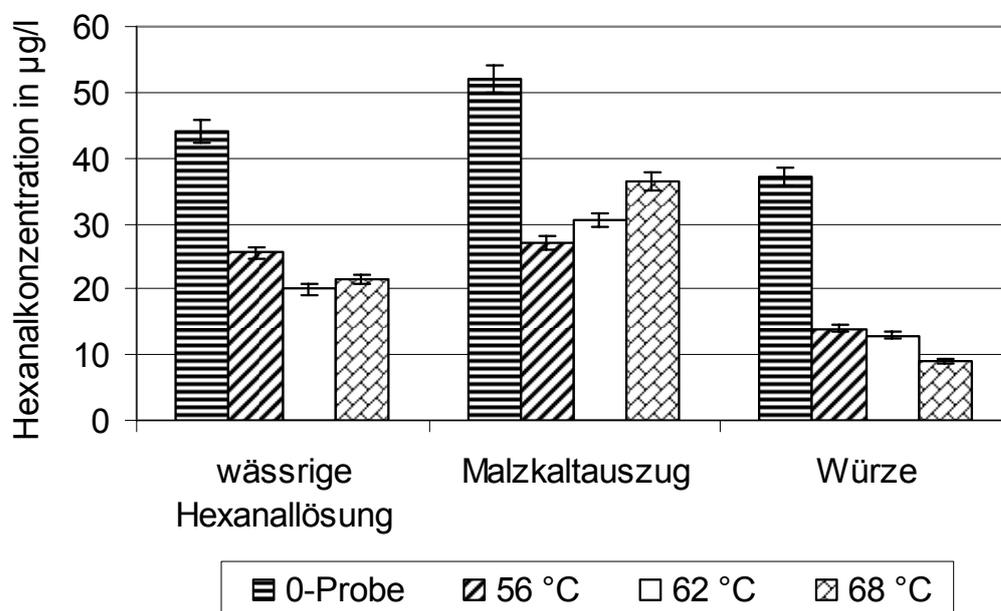


Abb. 50: Hexanalkonzentration in µg/l

### 5.1.5 Untersuchungen zum Verhalten der proteolytischen Abbauvorgänge während des Maischprozesses in Abhängigkeit vom ELG des Malzes und pH-Wert der Maische

Abbildung 51 zeigt, dass trotz hoher Einmaischttemperaturen (62 °C) mit sinkendem Maische-pH und steigendem ELG des Malzes tendenziell eine verstärkte proteolytische Lösung festgestellt werden kann. Dies bedeutet, dass auch bei hohen Einmaischttemperaturen außerhalb des Temperaturbereiches der proteolytischen Enzyme durch die Senkung des Maische-pHs eine Intensivierung der Lösungsvorgänge während des Maischprozesses stattfindet. Eine gute proteolytische Lösung des Malzes, gemessen am Eiweißlösungsgrad, verstärkt diesen Effekt. Infolgedessen ist eine gesteigerte Menge an Aromakomponenten aus dem proteolytischen Abbau (Summe der Streckeraldehyde) in der ungekochten Würze zu erwarten. Tabelle AH 21 im Anhang fasst die Ergebnisse zur Beurteilung der proteolytischen Abbauvorgänge anhand proteolytischer Kennzahlen zusammen.

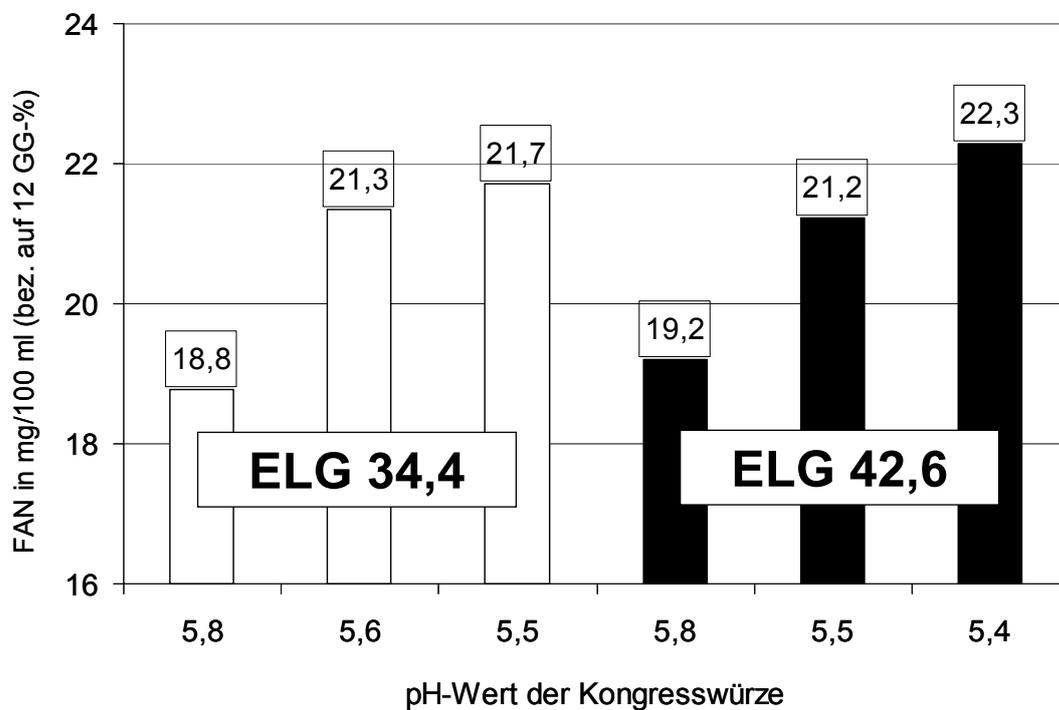


Abb. 51: Beurteilung der Proteolyse (FAN) in Abhängigkeit vom Maische-pH

Mit steigendem Eiweißlösungsgrad nimmt die Summe der Alterungskomponenten signifikant zu (vgl. Abschnitt 5.1.4.1). Dies hat zur Folge, dass mit steigendem Eiweißlösungsgrad die Geschmacksstabilität des Bieres abnimmt. Ebenfalls wird in der Literatur der Einfluss der Gerstensorte, durch die ein unterschiedliches Lösungsverhalten festgelegt wird, bekräftigt. [203]

In der Dissertation von KRETSCHMER ist beschrieben, dass bei Sommergersten ein Zusammenhang zwischen ELG und der Bildung der Malzaromastoffe (2-Methylbutanal, 3-Methylbutanal und 2-Furfural) festgestellt werden konnte. Nach dem Mälzungsprozess zeigten die Malzaromastoffe 2-Methylbutanal, 3-Methylbutanal, 2-Furfural, Phenylacetaldehyd, Methional, 2-Methylbutanol und 3-Methylbutanol eindeutige Abhängigkeiten von der Sorte. Generell geht das Niveau der Malzaromastoffe mit der Intensität der Malzlösung einher. [146]

## **5.2 Brauversuche zur Beeinflussung des enzymatischen Lipidabbaus zur Verbesserung der Geschmacksstabilität des Bieres**

### **5.2.1 Untersuchung des Einflusses von Gerstensorte und Maische-pH auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres**

#### **5.2.1.1 Erfassung der freien langkettigen Fettsäuren in Würze über den Verlauf der Würzebereitung**

Tabellen 13 und 14 zeigen eine Abnahme in der Gesamtkonzentration an freien langkettigen Fettsäuren mit Erniedrigung des Maische-pH auf 5,6/5,7 bzw. 5,4. Der Maische-pH der ungesäuerten Maischen lag zu Maischbeginn bei ca. 5,9–6,0. Die weiteren Analysenwerte dieser Versuchsreihe sind im Angang Tabellen AH 19 und AH 22–30 nachzulesen. Weiterhin zeigen die Daten in Tabelle 13 eine signifikante Abnahme der Konzentration in Vorderwürze und Pfannevoll-Würze, jedoch sinkt der Gehalt an freien langkettigen Fettsäuren in der Ausschlagwürze auf ein ähnliches Niveau ab. Die Sorte Pasadena zeigt einen leicht erhöhten Gehalt an freien langkettigen Fettsäuren gegenüber der Sorte Bellevue. Der Fettgehalt der

Malze liegt zwischen 1,5–1,7 % MTrs. und ist somit auf ähnlichem Niveau. Daher könnte dies auf eine unterschiedliche Enzymausstattung zurückzuführen sein.

Hinsichtlich des Lipidgehalts der Gerste überwiegt der Einfluss der Sorte gegenüber dem Standort, wobei während der Vermälzung ein ähnliches Niveau an freien langkettigen Fettsäuren erzielt wird. Es ist zu beachten, dass das vorliegende Konzentrationsniveau der Ausschlagwürze absolut gesehen keine Aussage über die Menge sowie folglich die Zusammensetzung der entstandenen Lipidabbauprodukte erlaubt. In Bezug auf die Abbaurate während der Vermälzung konnte festgestellt werden, dass je mehr Rohfett in der Gerste vorhanden ist, desto größer ist die Abbaurate während der Vermälzung. Gersten mit hohem Rohfettanteil bauen dementsprechend mehr Rohfett ab und weisen daher im Malz ebenfalls höhere Werte auf. In diesem Fall sind die Rohfettgehalte jedoch auf zu gleichem Niveau, um messbare Unterschiede feststellen zu können. Auch ein Zusammenhang zwischen steigender Malzlösung und der Zunahme an freien langkettigen Fettsäuren wird in der Literatur berichtet. [140, 145, 146]

Die in den Untersuchungen erhaltenen Ergebnisse belegen eine eindeutige Standortabhängigkeit der Lipase-Aktivität. Die Malze der Standorte Weissensee und Fronhofen zeigen unabhängig von der Sorte ähnliche Werte um 1160 IE. Hingegen konnte beim Standort Erbach im Rahmen der Analysengenauigkeit keine Lipase-Aktivität festgestellt werden. Dies könnte eine Erklärung für die geringeren Mengen an freien ungesättigten Fettsäuren in Vorderwürze und Pfannevoll-Würze des Standortes Erbach erklären. Die deutliche Abnahme an freien langkettigen Fettsäuren mit niedrigerem Maische-pH ist vermutlich über eine verminderte Lipase-Aktivität im sauren Milieu zu erklären. Die Ergebnisse der Tabellen 13 und 14 bestätigen diese Annahme. Als Fehlergrenze wurde jeweils die über den VK errechnete Abweichung in mg/l angegeben.

| <b>Vorderwürze</b>      | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
|-------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pasadena Weissensee     | 24,84 ± 1,49                | 21,19 ± 1,27  | 20,08 ± 1,20  |
| Pasadena Erbach         | 22,62 ± 1,36                | 20,98 ± 1,26  | 19,94 ± 1,20  |
| Bellevue Weissensee     | 23,78 ± 1,43                | 22,50 ± 1,35  | 18,17 ± 1,09  |
| Bellevue Erbach         | 23,96 ± 1,44                | 21,81 ± 1,31  | 18,36 ± 1,10  |
| <b>Pfannevoll-Würze</b> | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
| Pasadena Weissensee     | 18,79 ± 1,13                | 16,72 ± 1,00  | 14,97 ± 0,90  |
| Pasadena Erbach         | 18,30 ± 1,10                | 17,06 ± 1,02  | 15,43 ± 0,93  |
| Bellevue Weissensee     | 16,67 ± 1,00                | 16,44 ± 0,99  | 13,10 ± 0,79  |
| Bellevue Erbach         | 16,58 ± 0,99                | 18,04 ± 1,08  | 14,20 ± 0,85  |
| <b>Anstellwürze</b>     | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
| Pasadena Weissensee     | 4,70 ± 0,28                 | 3,64 ± 0,22   | 4,09 ± 0,25   |
| Pasadena Erbach         | 4,34 ± 0,26                 | 3,50 ± 0,21   | 3,94 ± 0,24   |
| Bellevue Weissensee     | 4,27 ± 0,26                 | 2,81 ± 0,17   | 2,76 ± 0,17   |
| Bellevue Erbach         | 2,86 ± 0,17                 | 2,77 ± 0,17   | 2,34 ± 0,14   |

**Tab. 13: Gesamtgehalt an freien langkettigen Fettsäuren in mg/l ± VK in mg/l**

Tabelle 14 zeigt den Gesamtgehalt der gemessenen freien langkettigen Fettsäuren bezogen auf 12 GG-% Stammwürze. Dabei stellt sich heraus, dass bedingt durch den Läuterprozess die Menge der freien langkettigen Fettsäuren in der Pfannevoll-Würze um ca. 3–4 mg/l ansteigt.

| <b>Vorderwürze</b>      | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
|-------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pasadena Weissensee     | 19,51 ± 1,17                | 16,38 ± 0,98  | 15,95 ± 0,96  |
| Pasadena Erbach         | 17,42 ± 1,05                | 16,10 ± 0,97  | 15,63 ± 0,94  |
| Bellevue Weissensee     | 18,38 ± 1,10                | 17,43 ± 1,05  | 14,19 ± 0,85  |
| Bellevue Erbach         | 18,27 ± 1,10                | 16,35 ± 0,98  | 14,25 ± 0,86  |
| <b>Pfannevoll-Würze</b> | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
| Pasadena Weissensee     | 23,13 ± 1,39                | 19,81 ± 1,19  | 18,47 ± 1,11  |
| Pasadena Erbach         | 21,59 ± 1,30                | 19,77 ± 1,19  | 18,25 ± 1,10  |
| Bellevue Weissensee     | 20,23 ± 1,21                | 19,53 ± 1,17  | 15,96 ± 0,96  |
| Bellevue Erbach         | 20,14 ± 1,21                | 21,20 ± 1,27  | 16,89 ± 1,01  |
| <b>Anstellwürze</b>     | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
| Pasadena Weissensee     | 4,70 ± 0,28                 | 4,06 ± 0,24   | 4,19 ± 0,25   |
| Pasadena Erbach         | 4,40 ± 0,26                 | 3,66 ± 0,22   | 4,04 ± 0,24   |
| Bellevue Weissensee     | 4,35 ± 0,26                 | 2,88 ± 0,17   | 2,86 ± 0,17   |
| Bellevue Erbach         | 2,86 ± 0,17                 | 2,84 ± 0,17   | 2,44 ± 0,15   |

**Tab. 14: Gesamtgehalt an freien langkettigen Fettsäuren in mg/l ± VK in mg/l bezogen auf 12 GG-%**

Tabelle 15 stellt die ermittelten Absolutwerte der Linolsäure dar. Diese macht zusammen mit der Palmitinsäure (C16, Hexadecansäure) den Hauptanteil der

freien langkettigen Fettsäuren in Malz aus und ist sozusagen das überwiegende Substrat für das Enzym Lipoxygenase. Aus diesem Grund sind die erhaltenen Messwerte im Folgenden dargestellt.

| <b>Vorderwürze</b>  | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pasadena Weissensee | 10,58 ± 0,63                | 9,98 ± 0,60   | 8,76 ± 0,53   |
| Pasadena Erbach     | 10,22 ± 0,61                | 9,26 ± 0,56   | 9,21 ± 0,55   |
| Bellevue Weissensee | 10,32 ± 0,62                | 10,87 ± 0,65  | 9,04 ± 0,54   |
| Bellevue Erbach     | 11,14 ± 0,67                | 12,28 ± 0,74  | 9,14 ± 0,55   |

| <b>Pfannevoll-Würze</b> | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
|-------------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pasadena Weissensee     | 9,55 ± 0,57                 | 7,86 ± 0,47   | 6,37 ± 0,38   |
| Pasadena Erbach         | 9,24 ± 0,55                 | 8,28 ± 0,50   | 6,88 ± 0,41   |
| Bellevue Weissensee     | 8,58 ± 0,51                 | 8,46 ± 0,51   | 6,09 ± 0,37   |
| Bellevue Erbach         | 9,50 ± 0,57                 | 9,06 ± 0,54   | 7,04 ± 0,42   |

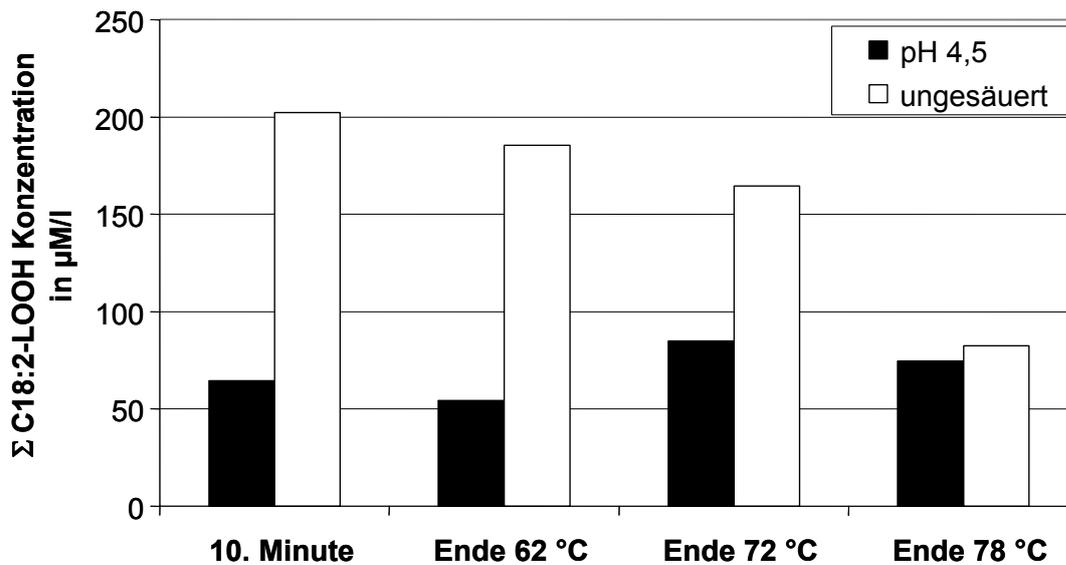
  

| <b>Anstellwürze</b> | <b>ohne Maischesäuerung</b> | <b>pH 5,7</b> | <b>pH 5,4</b> |
|---------------------|-----------------------------|---------------|---------------|
| Pasadena Weissensee | 1,25 ± 0,08                 | 1,15 ± 0,07   | 1,20 ± 0,07   |
| Pasadena Erbach     | 1,57 ± 0,09                 | 1,17 ± 0,07   | 1,23 ± 0,07   |
| Bellevue Weissensee | 1,50 ± 0,09                 | 0,71 ± 0,04   | 0,76 ± 0,05   |
| Bellevue Erbach     | 1,09 ± 0,07                 | 1,01 ± 0,06   | 0,72 ± 0,04   |

**Tab. 15: Linolsäurekonzentration in mg/l ± VK in mg/l**

### 5.2.1.2 Erfassung der Fettsäurehydroperoxide in Würze über den Verlauf der Würzebereitung

Die Bestimmung der Fettsäurehydroperoxide während des Brauprozesses ist analytisch schwer durchführbar, da Oxidationsreaktionen während der Probenahme und der Probenaufbereitung ohne den Einsatz einer CO<sub>2</sub>-Begasung unvermeidbar sind. Da hier jedoch die Praxistauglichkeit der ermittelten Grundlagen im Fokus der Untersuchungen steht, sind die im Folgenden ermittelten Analysenwerte aufgrund der fehlenden CO<sub>2</sub>-Begasung stark fehlerbehaftet. Aus diesem Grund wird die tendenzielle Entwicklung der Fettsäurehydroperoxide an einem Extrembeispiel (Sorte Marnie Weissensee, pH-Wert 4,5) zur Bestätigung der bisher beschriebenen Daten dargestellt.



**Abb. 52: Summe der C18:2-Hydroperoxide der Sorte Marnie/Standort Weissensee über den Verlauf eines Hochkurzmaisverfahrens**

Abbildung 52 gibt den Verlauf der Summe der C18:2-Hydroperoxide über den Verlauf des Maischverfahrens am Beispiel Marnie Weissensee wieder. Die Konzentration der Hydroperoxide sinkt über den Verlauf des Maischprozesses in den ungesäuerten Proben um ca. 50 % ab, in den gesäuerten Maischen liegt von Beginn an ein niedrigeres Niveau vor. In den untersuchten Vorderwürzen und Pfannevoll-Würzen (ohne Maischesäuerung/pH 5,9/6,0, pH 5,7, pH 5,4) der durchgeführten Brauversuche, zeigten die gesäuerten Proben ebenfalls geringere Hydroperoxidkonzentrationen. Ob eine Verminderung des Hydroperoxid-Gehaltes die Folge eines erhöhten Abbaus der Hydroperoxide aufgrund von Instabilität der Hydroperoxide im sauren Milieu, autoxidativen Abbau oder enzymatischer Abbauvorgänge ist, bedarf weiterer Untersuchungen, v. a. der enzymatischen Abbauvorgänge.

Es wurde bereits mehrfach nachgewiesen, dass die Lipoxygenase-Aktivität mit sinkendem pH-Wert gehemmt wird. BAXTER stellt ebenfalls die Option vor, dass bei höheren Temperaturen nicht nur die Lipoxygenase-Aktivität vermindert ist, sondern weist auf die Tatsache hin, dass möglicherweise das für die Peroxidation nötige Sauerstoffangebot der begrenzte Faktor ist. [113] Einerseits wäre somit eine Hemmung des enzymatischen Lipidabbaus, der eine verminderte Hydroperoxid-

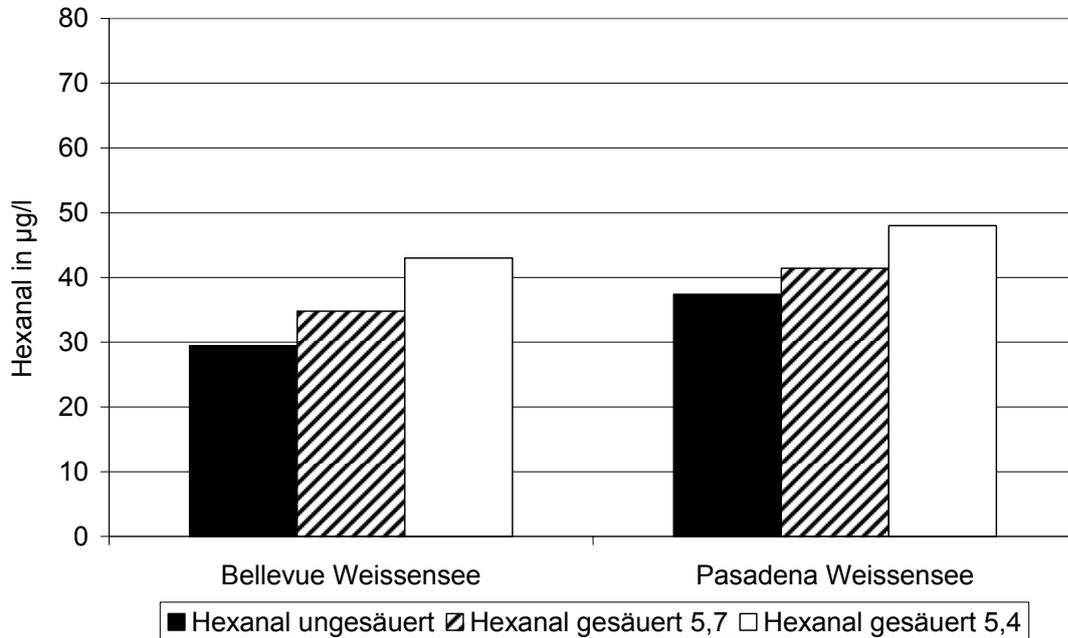
Bildung zur Folge hat, als Ursache denkbar. Andererseits könnten durch intensivere Lösungsvorgänge während des Maischprozesses, hervorgerufen durch die pH-Absenkung, mehr freie langkettige Fettsäuren und somit Fettsäurehydroperoxide freigesetzt werden, die anschließend weiter abgebaut werden. Diese Hypothese müsste zwangsläufig negative Auswirkungen für die Geschmacksstabilität mit sich bringen. Die Untersuchung und Verfolgung der entstehenden Abbauprodukte und enzymatischen Reaktionswege ist somit weiterhin von großem Interesse. Eine schnellere Umsetzung müsste in den folgenden Würze- und Bieruntersuchungen in einem erhöhten Gehalt an Abbauprodukten wiederzufinden sein.

### **5.2.1.3 Beurteilung der Aromastoffe des Fettabbaus über den Verlauf Würzebereitung**

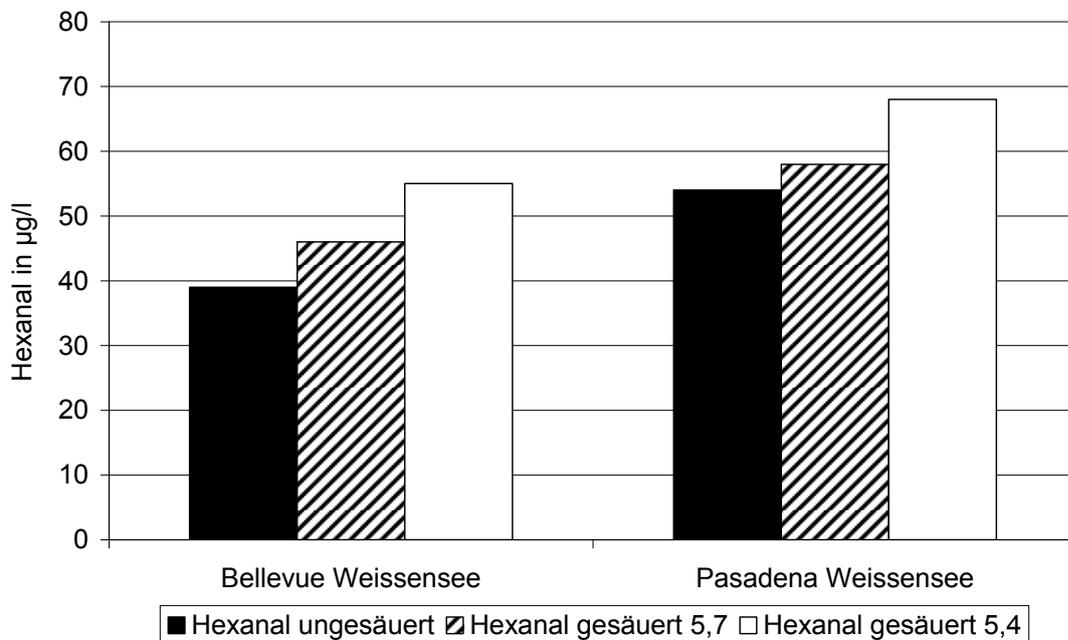
Direkte Aromakomponenten aus dem enzymatischen Fettabbau der Linolsäure sind Hexanal, Caprylsäure, 9-Oxononansäure und 2,4-Decadienale. [30] Die Abbildungen 53 und 53 stellen am Beispiel des Hexanals die Entwicklung der Hauptaromakomponente aus dem Fettabbau über den Läuterprozess an den Sorten Bellevue und Pasadena (Anbauort Weissensee) dar. Der Maische-pH der ungesäuerten Maischen lag zu Maischbeginn bei ca. 5,9–6,0. Die weiteren Analysenwerte dieser Versuchsreihe sind im Anhang Tabellen AH 22–30 nachzulesen.

Dazu wurde der Gehalt an Hexanal in Vorderwürze und Pfannevoll-Würze (9,7 GG-%) analytisch verfolgt. Die Pfannevoll-Würze zeigt einen deutlich höheren Hexanalgehalt als die Vorderwürze. Dabei verdeutlichen Abbildungen 53 und 54, dass mit sinkendem Maische-pH ein Anstieg der Hexanal-Konzentration festzustellen ist. Dies bestätigt wiederum, dass ein Absenken des Maische-pH die Lösungsvorgänge fördert. Des Weiteren ist davon auszugehen, dass auch das „In-Lösung-Gehen“ von Lipidverbindungen aus der Matrix sowie deren Abbauprodukte begünstigt wird. Auch der Abbau der freien langkettigen Fettsäuren, der Fettsäurehydroperoxide und der folgenden Abbauprodukte scheint trotz der Limitierung der enzymatischen Aktivität vorhanden zu sein. Dies könnte den erhöhten Gehalt

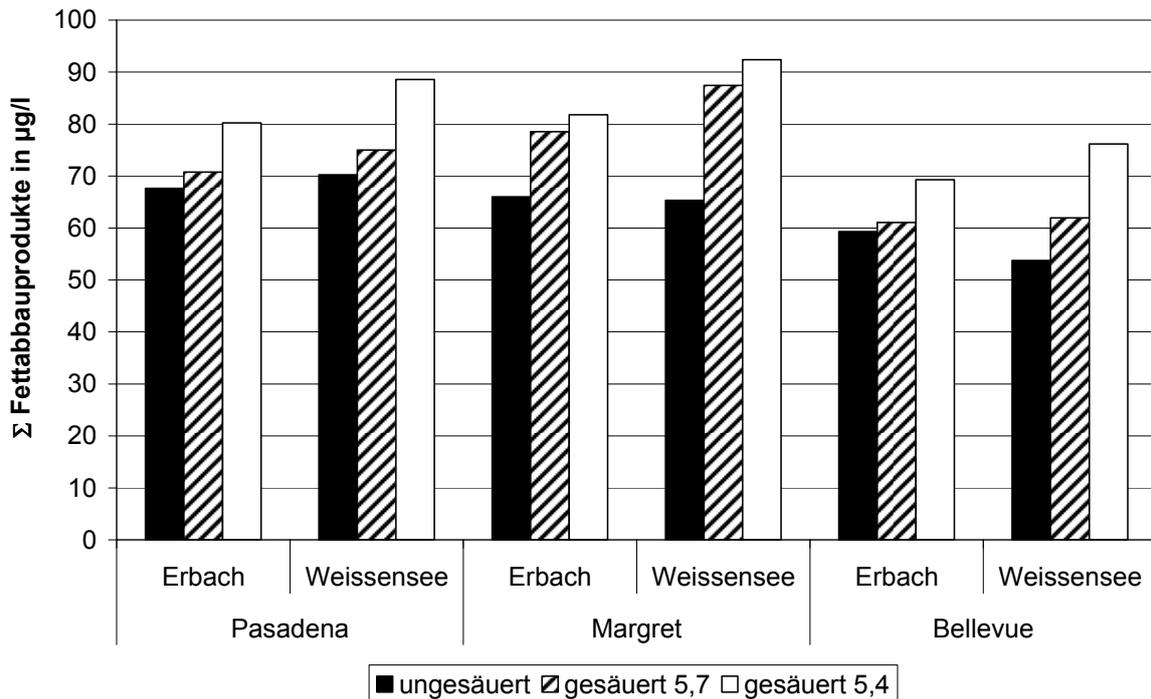
an Hexanal in der Pfannevoll-Würze begründen. Tendenziell konnte dieser Verlauf bei allen untersuchten Sorten bestätigt werden.



**Abb. 53:** Hexanal-Konzentration in µg/l in der Vorderwürze (eingestellt auf 9,7 GG-%)

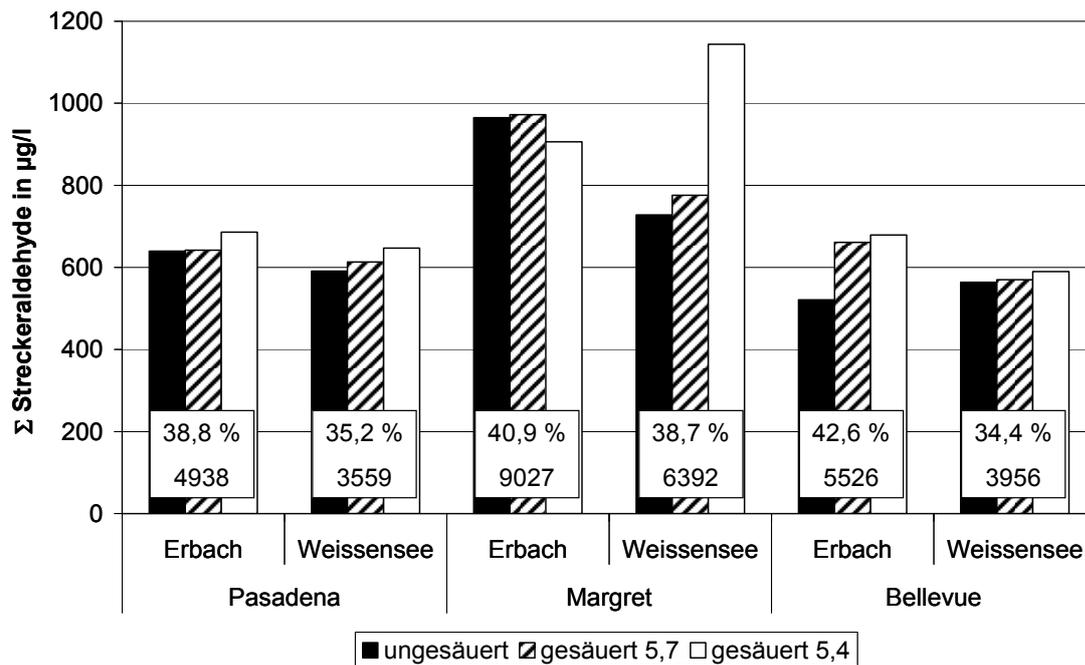


**Abb. 54:** Hexanal-Konzentration in µg/l in der Pfannevoll-Würze (ca. 9,7 GG-%)



**Abb. 55: Summe der Fettabbauprodukte in Pfannevoll-Würze in µg/l**

Abbildung 55 stellt die Summe der Streckeraldehyde der untersuchten Pfannevoll-Würzen dar. Auch hier ist tendenziell eine Zunahme der Streckeraldehyde mit sinkendem Maische-pH zu beobachten, jedoch scheint, dass grundsätzlich das Niveau der Summe der Streckeraldehyde von anderen Einflussfaktoren abhängig ist. Der Sorteneinfluss dominiert und es kann nur tendenziell ein Zusammenhang mit dem ELG hergestellt werden. Die Ergebnisse sind in Tabellen AH 19 und AH 22–30 dargestellt. Eine Erklärung liefert die Summe der Streckeraldehyden in µg/kg (Werte in Abbildung 56 umrahmt mit ELG dargestellt), die im Malz analysiert wurde. Hier zeigt sich ein tendenzieller Zusammenhang mit dem Niveau an Streckeraldehyden in der Pfannevoll-Würze. Die Summe der Streckeraldehyde wird folglich nicht nur von Intensität der Eiweißlösung des Malzes bestimmt, sondern hängt auch deutlich von dem aus dem Rohstoff eingebrachten Potential ab.



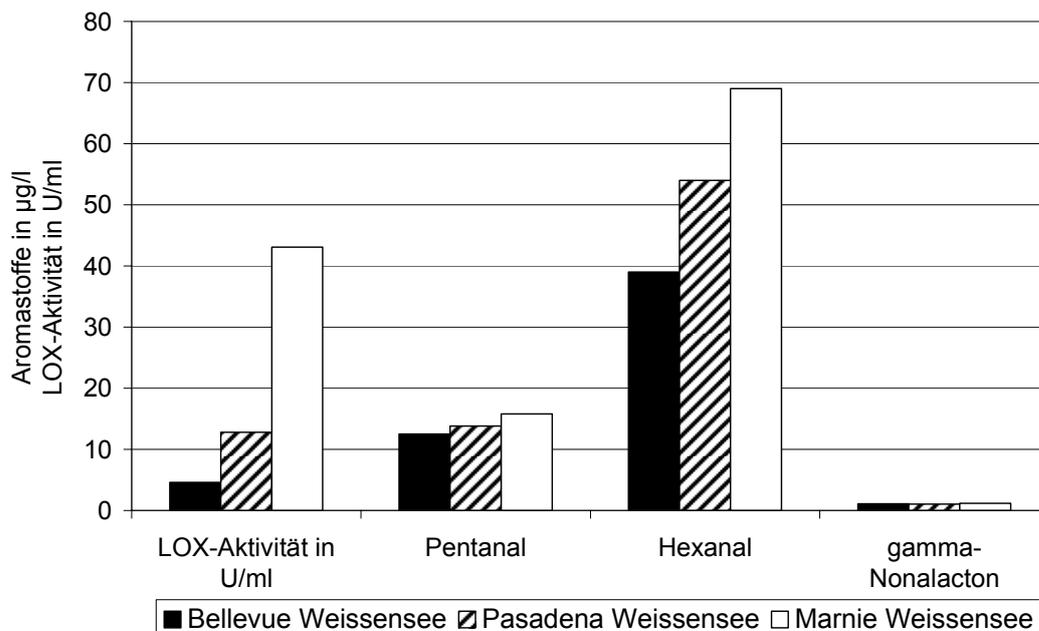
**Abb. 56: Zusammenhang Summe der Streckeraldehyde in Malz in µg/kg, Pfannevoll-Würze in µg/l und ELG des Malzes in %**

Die Untersuchungen der Ausschlagwürze belegen, dass nach dem Kochprozess alle wasserdampfvlüchtigen analysierten Würzearomastoffe auf einem vergleichbaren niedrigen Niveau vorliegen. Diese Tatsache kann unabhängig vom vorhandenen Konzentrationsniveau dieser Aromastoffe in der Pfannevoll-Würze bestätigt werden. Die Analyse der Würzearomastoffe der Ausschlagwürze dient der Kontrolle des Kochprozesses (z. B. Ausdampfung), jedoch erlaubt diese keine Rückschlüsse auf die Geschmacksstabilität. Im weiteren Verlauf bleibt nun zu klären, ob eine intensive Lösung während des Maischprozesses und eine anschließende intensive Ausdampfung der entstandenen Abbauprodukte eine Verbesserung der Geschmacksstabilität mit sich bringt.

#### 5.2.1.4 Auswirkungen der LOX-Aktivität auf die Bildung von Aromastoffen

Abbildung 57 zeigt anhand von drei Sorten eines Standortes den Zusammenhang zwischen LOX-Aktivität des Rohstoffes und den erfassten Aromastoffen in der Pfannevoll-Würze. Die Darstellung zeigt deutlich, dass die LOX-Aktivität des

Malzes die Aromastoffbildung, v. a. des Hexanals, deutlich beeinflusst. Wie bereits in den Laborversuchen nachgewiesen, verdeutlicht Abbildung 58, dass auch bei den durchgeführten Brauverfahren die LOX-Aktivität auf das Niveau der Aromastoffkonzentration deutlichen Einfluss nimmt.



**Abb. 57: Zusammenhang LOX-Aktivität des Malzes und Aromastoffe der Pfannevoll-Würze**

Es konnte in den Versuchen im Labormaßstab gezeigt werden, dass sich Standort- und Sorteneinfluss maßgeblich auf das Enzympotential des Malzes und auf die Entstehung von Lipidabbauprodukten auswirken. Durch den Einfluss von Standort und Sorte ist das enzymatische Potential des Rohstoffes festgelegt. Ebenso bestätigt sich, dass das Absenken des Maische-pHs zusammen mit einer bereits vorhanden erhöhten Lipoxygenase-Aktivität eine Vermehrung von Abbauprodukten während der Würzebereitung zur Folge hat. Die Lipase- und die LOX-Aktivität wird jedoch nachweislich, wie in den Vorversuchen erarbeitet wurde, während des Maischprozesses gehemmt. Dennoch scheinen beide Enzyme während des Maischprozesses (trotz Hemmung durch die Maische-pH-Absenkung) noch ausreichend aktiv zu sein, um die Substrate für eine Aromastoffbildung zur Verfügung zu stellen. Ein weiterer Aspekt sollte jedoch zur Beurteilung dieser

Ergebnisse nicht außer Acht gelassen werden. Intrazellulär vorkommende LOXen liegen sowohl löslich als auch an Membranen gebunden in Pflanzen vor. Allgemein unterscheidet sich ihr Vorkommen in Pflanzen zwischen den verschiedenen Teilen der Pflanze, ihren Entwicklungsstadien und in Abhängigkeit von externen Stimuli. [71] Lösliche LOXen werden v. a. in Keimlingen oder reifenden Samen gebildet. Partikulär gebundene LOXen befinden sich an der Plasmamembran oder an der Membran der Lipidkörper. Die Keimung fettreicher Samen ist dadurch gekennzeichnet, dass als einzige Kohlenstoff- und Energiequelle Triacylglyceride mobilisiert werden. Lipidkörper stellen die Speicherorganellen für Triacylglyceride in Pflanzen dar. Mit dem Abbau der Lipidkörper geht die Bildung der *de novo* synthetisierten LOX einher. [77, 219] Während des Mälzungsprozess erfolgt die Bildung einer *de novo* synthetisierten Lipoxygenase (LOX2) und eine beträchtliche Steigerung der LOX1-Aktivität. Die entstandenen oxidierten Fettsäuren und deren Zwischen- und Abbauprodukte liegen im fertigen Malz in freier oder gebundener Form vor. Zusätzlich ist zu vermuten, dass membrangebunden vorliegende LOX eine höhere Stabilität aufweist. Dieses Potential an Lipidoxidationsprodukten des Malzes wird ebenfalls beim Maischprozess in Lösung gebracht und frei- bzw. umgesetzt. Eine Steigerung der Malzlösung und eine Intensivierung der Lösungsvorgänge beim Maischen begünstigt die Freisetzung dieser Lipidoxidationsprodukte. Die Intensität ist bei der Analyse der Pfannevoll-Würze nachvollziehbar.

Tabelle 16 zeigt im Malz vorliegende Konzentrationen an Fettabbauprodukten und die gemessene LOX-Aktivität. In beiden Fällen ist der Einfluss der Sorte auf das Niveau deutlich erkennbar.

| Malz                         | Pasadena |            | Margret |            | Bellevue |            | Marnie |            |
|------------------------------|----------|------------|---------|------------|----------|------------|--------|------------|
|                              | Erbach   | Weissensee | Erbach  | Weissensee | Erbach   | Weissensee | Erbach | Weissensee |
| Σ Fettabbauprodukte in µg/kg | 337      | 267        | 508     | 482        | 239      | 202        | 365    | 325        |
| LOX-Aktivität in U/ml        | 12,5     | 12,8       | 12,5    | 21,3       | 9,8      | 4,6        | 30,3   | 43,0       |

**Tab. 16: Lipidoxidationsprodukte der Berliner Programm Malze in Verhältnis zur LOX-Aktivität**

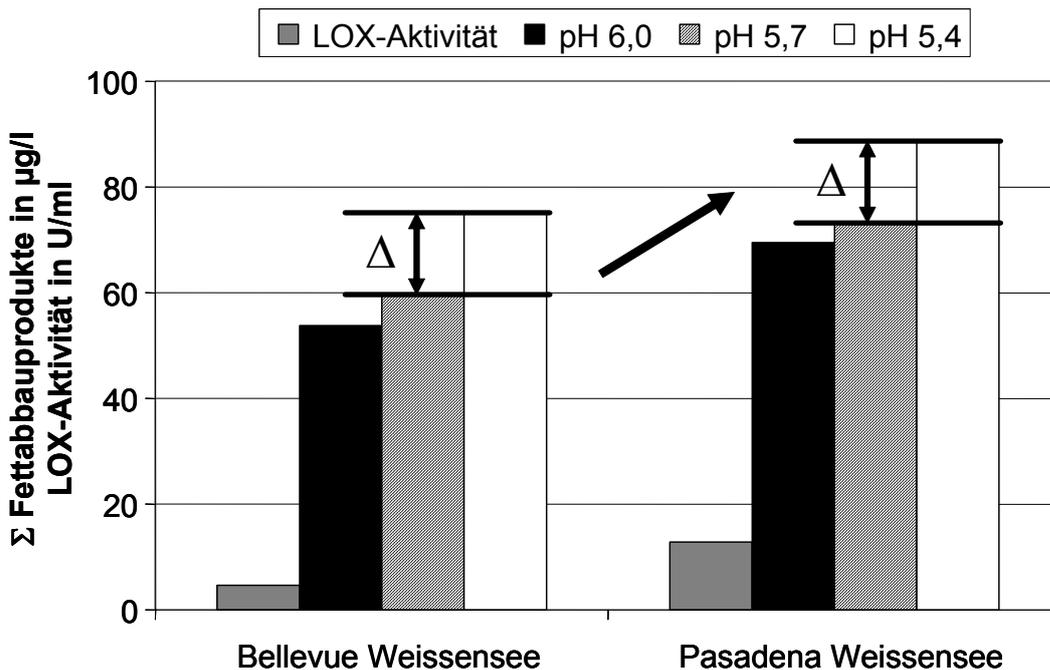


Abb. 58: Auswirkungen einer bereits im Malz erhöhten LOX-Aktivität auf die Aromastoffkonzentration in der Pfannevoll-Würze

#### 5.2.1.5 Beurteilung der Aussagekraft ausgewählter Kennzahlen und der verschiedenen Einflussfaktoren unter dem Aspekt der Geschmacksstabilität

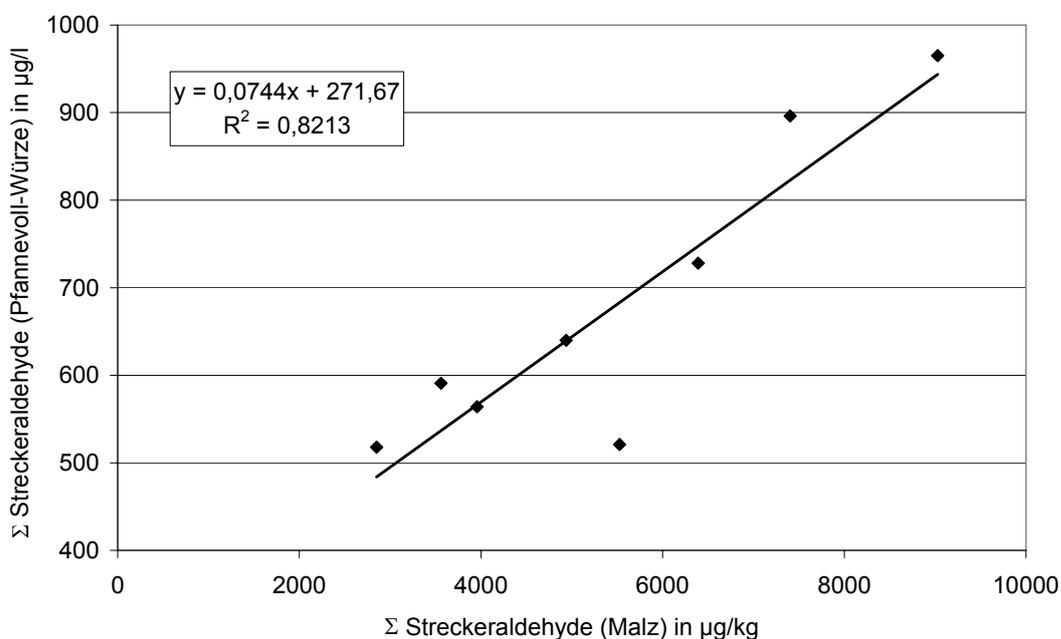
Abschließend stellt Tabelle 17 die wichtigsten Analysendaten und die sensorische Beurteilung der resultierenden Biere im Überblick dar. Die sensorische Beurteilung der Biere belegt, dass in den aus ungesäuerten Maischen hergestellten Biere (Maische-pH 6,0) mit steigender LOX-Aktivität des Malzes die gew. DLG-Note im frischen und forcierten Bier sowie die Akzeptanz bei den gealterten Biere abnimmt. Die Biere aus einer moderat gesäuerten Maische (pH 5,6/5,7) erzielten die beste sensorische Bewertung und zeigen die beste Geschmacksstabilität. Hingegen wurden die Biere aus den auf pH 5,4 gesäuerten Maischen sowohl in der DLG-Note (frisch wie forciert) als auch in der Alterungsverkostung deutlich schlechter bewertet.

| Malz   | Pasadena  |            | Margret  |            | Bellevue |            | Marnie   |            |
|--|---|------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|
|  | Erbach  | Weissensee | Erbach   | Weissensee | Erbach   | Weissensee | Erbach   | Weissensee |
| Σ Strecker-aldehyde in µg/kg                                   | 4938  | 3559       | 9027     | 6392       | 5526     | 3956       | 7404     | 2851       |
| ELG in %   | 38,8  | 35,2       | 40,9     | 38,7       | 42,6     | 34,4       | 45,1     | 37,5       |
| Σ Fettabbauprodukte in µg/kg                                   | 337   | 267        | 508      | 482        | 239      | 202        | 365      | 325        |
| LOX-Aktivität in U/ml  | 12,5  | 12,8       | 12,5     | 21,3       | 9,8      | 4,6        | 30,3     | 43,0       |
| <b>Pfannevoll-Würze</b>  | <b>Σ Strecker-aldehyde in µg/l</b>              |            |          |            |          |            |          |            |
| pH-Wert 6,0  | 640   | 591        | 965      | 728        | 521      | 564        | 896      | 518        |
| pH-Wert 5,7  | 642   | 613        | 972      | 776        | 661      | 570        | 955      | 573        |
| pH-Wert 5,4  | 686   | 647        | 906      | 1144       | 679      | 590        | —        | —          |
| <b>Pfannevoll-Würze</b>  | <b>Σ Fettabbauprodukte in µg/l</b>              |            |          |            |          |            |          |            |
| pH-Wert 6,0  | 68  | 70         | 66       | 65         | 59       | 54         | 89       | 80         |
| pH-Wert 5,7  | 71  | 75         | 79       | 87         | 61       | 62         | 103      | 96         |
| pH-Wert 5,4  | 80  | 89         | 82       | 92         | 69       | 76         | —        | —          |
| <b>Pfannevoll-Würze</b>  | <b>Hexanal in µg/l</b>                          |            |          |            |          |            |          |            |
| pH-Wert 6,0  | 52  | 54         | 48       | 49         | 39       | 39         | 69       | 60         |
| pH-Wert 5,7  | 54  | 58         | 60       | 68         | 45       | 46         | 81       | 75         |
| pH-Wert 5,4  | 62  | 68         | 62       | 71         | 52       | 55         | —        | —          |
| <b>Bier</b>  | <b>Alterungskomponenten in µg/l pH-Wert 6,0</b> |            |          |            |          |            |          |            |
| Summe der Alterungskomponenten frisch in µg/l                  | 30  | 32         | 35       | 35         | 33       | 29         | 33       | 29         |
| Summe der Alterungskomponenten forciert in µg/l                | 154   | 131        | 119      | 139        | 146      | 136        | 141      | 156        |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten in µg/l               | 124   | 99         | 84       | 104        | 113      | 107        | 108      | 127        |
| <b>Bier</b>  | <b>Alterungskomponenten in µg/l pH-Wert 5,7</b> |            |          |            |          |            |          |            |
| Summe der Alterungskomponenten frisch in µg/l                  | —   | 43         | 33       | 59         | 44       | 30         | 37       | 39         |
| Summe der Alterungskomponenten forciert in µg/l                | 82  | 90         | 145      | 145        | 80       | 61         | 130      | 125        |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten in µg/l               | —   | 47         | 112      | 86         | 36       | 31         | 93       | 86         |
| <b>Bier</b>  | <b>Alterungskomponenten in µg/l pH-Wert 5,4</b> |            |          |            |          |            |          |            |
| Summe der Alterungskomponenten frisch in µg/l                  | 27  | 30         | 34       | 49         | 35       | 31         | —        | —          |
| Summe der Alterungskomponenten forciert in µg/l                | 124   | 119        | 144      | 196        | 103      | 117        | —        | —          |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten in µg/l               | 97  | 89         | 110      | 147        | 68       | 86         | —        | —          |
| <b>Bier</b>  | <b>pH-Wert 6,0</b>                              |            |          |            |          |            |          |            |
| <b>Rangfolge nach Akzeptanz des forciert gealterten Bieres</b> | <b>1</b>  | <b>5</b>   | <b>8</b> | <b>7</b>   | <b>2</b> | <b>3</b>   | <b>4</b> | <b>6</b>   |
| Verkostung (DLG-Note)  | 4,29  | 4,16       | 4,25     | 4,24       | 4,38     | 4,25       | 4,24     | 4,15       |
| Verkostung forciert (DLG-Note)                                 | 3,66  | 3,59       | 3,56     | 3,56       | 3,82     | 3,74       | 3,68     | 3,62       |
| Akzeptanz forciert in %  | 68,0  | 50,0       | 28,0     | 36,0       | 67,5     | 63,8       | 56,3     | 46,3       |
| <b>Bier</b>  | <b>pH-Wert 5,7</b>                              |            |          |            |          |            |          |            |
| <b>Rangfolge nach Akzeptanz des forciert gealterten Bieres</b> | <b>1</b>  | <b>3</b>   | <b>5</b> | <b>7</b>   | <b>4</b> | <b>2</b>   | <b>8</b> | <b>6</b>   |
| Verkostung   | 4,47  | 4,27       | 4,36     | 4,23       | 4,45     | 4,45       | 4,25     | 4,17       |
| Verkostung forciert  | 4,13  | 3,99       | 3,89     | 3,66       | 3,97     | 4,08       | 3,59     | 3,74       |
| Akzeptanz, forciert gealtertes Bier                            | 76,0  | 68,0       | 60,0     | 46,7       | 60,0     | 68,0       | 43,3     | 51,7       |
| <b>Bier</b>  | <b>pH-Wert 5,4</b>                              |            |          |            |          |            |          |            |
| <b>Rangfolge nach Akzeptanz des forciert gealterten Bieres</b> | <b>1</b>  | <b>6</b>   | <b>4</b> | <b>5</b>   | <b>2</b> | <b>3</b>   |          |            |
| Verkostung (DLG-Note)  | 4,10  | 3,95       | 4,16     | 4,14       | 4,08     | 4,18       | —        | —          |
| Verkostung forciert (DLG-Note)                                 | 3,79  | 3,65       | 3,54     | 3,54       | 3,66     | 3,66       | —        | —          |
| Akzeptanz forciert in %  | 58,3  | 43,3       | 46,7     | 43,3       | 50,0     | 46,7       | —        | —          |

Tab. 17: Sensorische Beurteilung und Kennzahlen

Dabei zeigt sich, dass bei der Versuchsreihe mit moderater Maischesäuerung die beste sensorisch beurteilte Geschmacksstabilität vorzufinden ist. Die Sorten mit geringerer LOX-Aktivität zeigen innerhalb jeder Versuchsreihe ebenfalls eine höhere Geschmacksstabilität. Dabei sollte aber auch der Einfluss des Eiweißlösungsgrades berücksichtigt werden. Wie bereits mehrfach erwähnt, führt eine geringere Malzlösung zu geschmacksstabileren Bieren. Diese ist auf die vermehrte Bildung von Strecker-aldehyden bei erhöhter Malzlösung zurückzuführen.

Hier zeigt sich eine deutliche Beeinflussung der Summe der Streckeraldehyde im Malz durch den Standort. Der Standort Weissensee weist bei allen Malzen einen geringeren Gehalt an Streckeraldehyden auf, hingegen wird die LOX-Aktivität und die damit verbundene Summe an Lipidabbauprodukten in erster Linie durch die Sorte festgelegt. Abbildung 59 beweist, dass das Niveau der Streckeraldehyde bereits im Malz festgelegt wird. Daher ist die Malzqualität von größter Bedeutung für die Geschmacksstabilität. Es besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Summe der Streckeraldehyde des Malzes und der Summe der Streckeraldehyde der Pfannevoll-Würze.



**Abb. 59: Zusammenhang Summe der Streckeraldehyde in Malz und Pfannevoll-Würze**

Hinsichtlich der Summe der Fettabbauprodukte des Malzes und der Summe der Fettabbauprodukte der Pfannevoll-Würze ist zwar kein signifikanter Zusammenhang gegeben, aber dennoch zeigen die Ergebnisse (siehe Tabelle 17), dass das Niveau der Fettabbauprodukte im Malz neben dem bestehenden Rohfettgehalt wohl auch auf die Enzym-Aktivität während der Keimung zurückzuführen ist. Ein hohes Potential an Lipidoxidationsprodukten im Malz, meist einhergehend mit hoher LOX-Aktivität, und eine hohe Lösungsintensität beim

Maischen verursachen eine Verringerung der Geschmacksstabilität. Die Ergebnisse aus Abschnitt 5.2.1.4 belegen, dass mit erhöhter LOX-Aktivität die Konzentration an gebildeten Fettabbauprodukten ansteigt. Für die Geschmacksstabilität scheint es förderlich zu sein, einen Mittelweg zwischen Hemmung der lipidabbauenden Enzyme durch Absenken des Maische-pHs und nach Möglichkeit nicht zu intensiver Lösung beim Maischprozess zu finden. Dies bestätigt sich in der höheren Geschmacksstabilität der mit moderater Maischesäuerung (pH 5,6/5,7) hergestellten Biere. Auch einer zu starken Ausprägung der proteolytischen Lösung während des Maischens kommt der moderate Einsatz der Maischesäuerung entgegen.

Ein weiterer Gesichtspunkt dieser Arbeit ist die Bewertung der Relevanz der Lipidabbauprodukte gegenüber anderen einflussreichen Abbauwegen, wie z. B. dem Streckerabbau. Abbildung 60 stellt verschiedene Analysendaten von zwei ungesäuerten Bieren mit ähnlichem ELG, aber unterschiedlicher LOX-Aktivität gegenüber. Die Summe der Streckeraldehyde in der Pfannevoll-Würze aus Malz mit hoher LOX-Aktivität liegt sogar unter der Konzentration des Malzes mit niedriger LOX-Aktivität. Normalerweise sind die Abbauprodukte des Streckerabbaus gegenüber den Fettabbauprodukten quantitativ dominant. In diesem Fall ist die Summe der Fettabbauprodukte in der Pfannevoll-Würze aufgrund hoher LOX-Aktivität deutlich höher und das resultierende Bier wird im forciert gealterten Zustand eindeutig schlechter bewertet.

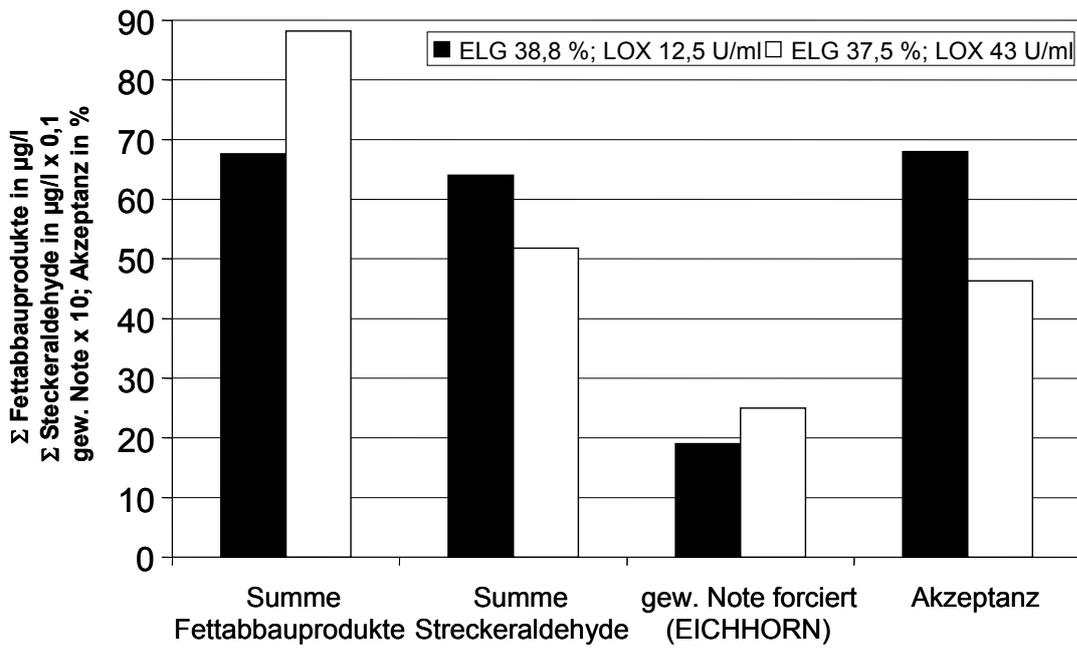


Abb. 60: Aussagekraft der Summe der Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze) hinsichtlich der Geschmacksstabilität des Bieres

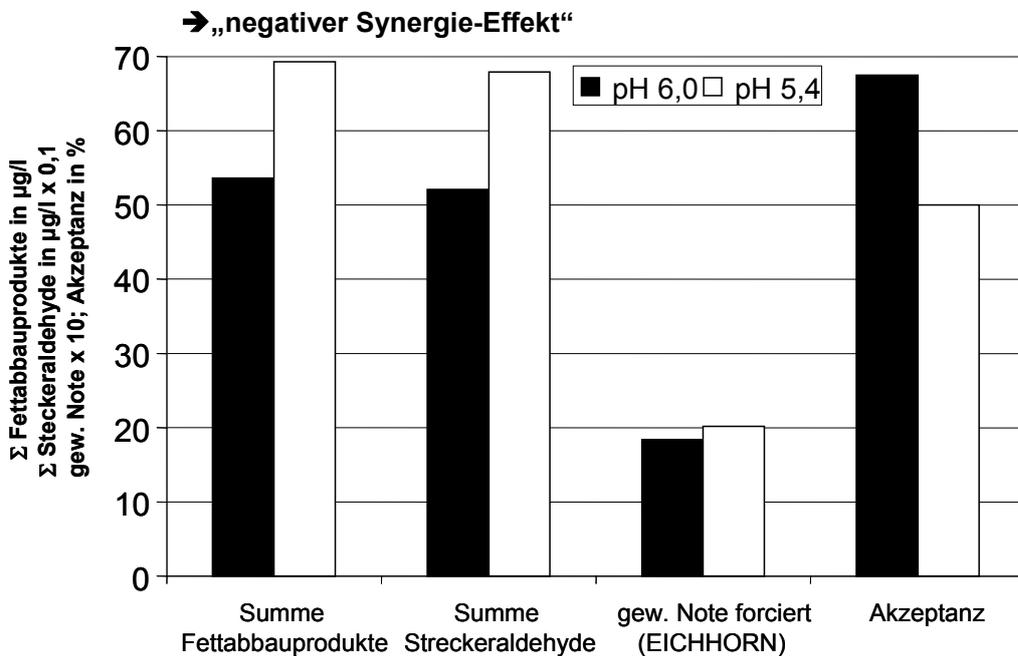


Abb. 61: Auswirkungen der pH-Senkung auf die Bildung von Aromastoffen (Pfannevoll-Würze) und die Geschmacksstabilität des Bieres

Abbildung 61 stellt die Auswirkungen der Absenkung des Maische-pH auf die Bildung von Aromastoffen in der Pfannevoll-Würze und die Folgen für die Geschmacksstabilität des Bieres dar. In diesem Fall zeigt sich, dass eine Senkung des Maische-pH sowohl einen Anstieg in der Summe der Fettabbauprodukte als auch in der Summe der Streckeraldehyde bewirkt. Die Hemmung des enzymatischen Lipidabbaus durch einen niedrigen pH-Wert scheint sich geringer auszuwirken als die Bildung von Lipidabbauprodukten bedingt durch einen intensiveren Lösungsprozess während des Maischens. Es ist zu beachten, dass eine bessere Lösung auch eine bessere Angreifbarkeit der Substrate gewährleistet. Falls noch ausreichend Enzymaktivität vorhanden ist, kann eine enzymatische Umsetzung erfolgen, auch wenn die Enzyme außerhalb ihres pH-Optimums wirken. Durch das hohe Niveau an Aromastoffen beider Abbauwege tritt in jedem Fall ein negativer Synergie-Effekt auf.

Eine Förderung des Lipidabbaus während des Maischprozesses im Hinblick auf eine intensivere Ausdampfung der entstandenen Abbauprodukte bei der Kochung ist aufgrund der erhaltenen Ergebnisse aus Tabelle 11 nicht anzuraten. Die Analysendaten unterstützen die hier so benannte „Precursor-Theorie“, die besagt, dass sich eine hohe Konzentration an Abbauprodukten in der Pfannevoll-Würze negativ auf die Geschmacksstabilität des Bieres auswirkt. Die Abbauprodukte der Pfannevoll-Würze können somit einen Hinweis auf das Potential zur Bildung von alterungsrelevanten Substanzen und über die Reaktionsintensität der Bildung von Zwischenprodukten Auskunft geben. Letzendlich spiegelt sich auch die verwendete Rohstoffqualität deutlich in der Analyse der Pfannevoll-Würze wider. Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Aromastoffanalyse der Pfannevoll-Würze als guter Indikator zur Vorhersage der zu erwartenden Geschmacksstabilität erwiesen hat. Allerdings kann hier über den Maischprozess, v. a. in Hinblick auf enzymatische Abbauvorgänge, nicht mehr technologisch reagiert werden. Daher empfiehlt es sich eine Analyse der Malzaromastoffe vorzunehmen, um den Einfluss des Rohstoffes auf die Geschmacksstabilität zu beurteilen. Hier kann bereits das Potential an proteolytischen Abbauprodukten und Lipidoxidationsprodukten abgeschätzt werden. Daneben spielen weitere

Malzspezifikationen, insbesondere der ELG, eine entscheidende Rolle zur Erhaltung einer guten Geschmacksstabilität.

Obwohl durch die Kochung die entstandenen Carbonyle und andere Substanzen aus dem Fettabbau auf ein annähernd gleiches Konzentrationsniveau reduziert wurden, konnte im forciert gealterten Bier eine Verschlechterung der Geschmacksstabilität festgestellt werden, wenn die Ergebnisse der Pfannevoll-Würze dies andeuteten. Möglicherweise entstehen während des Abbaus eine Vielzahl von Zwischenprodukten und korrespondierenden Komponenten, die nicht ausgetrieben werden, die sich selbst oder aber aus ihnen entstehende Produkte im Laufe der Bieralterung negativ auswirken können. Auch die Stoffwechselwege der Hefe sind an der Bildung von Alterungscarbonylen durch die Umsetzung dieser Zwischenprodukte beteiligt.

Ein erneuter Anstieg der bisher gemessenen Aromakomponenten aus dem Fettabbau (Pentanal, Hexanal, Heptanal,  $\gamma$ -Nonalacton) konnte weder im forciert noch im natürlich gealterten Bier (verfolgt über 2 Jahre) nachgewiesen werden. Die Summe der Alterungsindikatoren bestätigt aber den sensorisch beurteilten Abfall der Geschmacksstabilität.

Hinsichtlich des Lipidabbaus kann resümiert werden, dass mit Erniedrigung des Maische-pH-Wertes eine Abnahme der Gesamtkonzentration an freien langkettigen Fettsäuren und eine Minimierung der Summe des Gehaltes an C18:2-Hydroperoxiden sowie eine Zunahme der entstandenen Aromastoffe in der Pfannevoll-Würze auftritt. Da die Laborversuche gezeigt haben, dass die lipidabbauenden Enzyme durch die Anwendung einer Säuerung gehemmt werden, ist der Anstieg an Aromakomponenten auf eine verstärkte Frei- und Umsetzung von Lipiden und Lipidoxidationsprodukten durch eine Förderung der Lösungsvorgänge beim Maischen zurückzuführen. Ein Mittelweg zwischen moderater Lösung und Hemmung der Enzymaktivität führt zu einer verbesserten Geschmacksstabilität. Die Ergebnisse unterstützen die „Precursor-Theorie“, nach der in der Pfannevoll-Würze vorhandene Lipidabbauprodukte sich als analytische Indikatoren bzw. Marker für

den späteren Grad der Alterung des forcierten Bieres erweisen. Die Precursor-Theorie wird auch durch die Daten anderer Forschungsarbeiten unterstützt. [203, 220] Auch das im Rohstoff enthaltene Potential an Lipidoxidationsprodukten, bedingt durch Sorteneinflüsse und Mälzungstechnologie, sowie die vorhandene Enzymausstattung spielen eine entscheidende Rolle. Die Geschmacksschwelle der einzelnen Aromakomponenten aus dem Lipidabbau wird üblicherweise nicht überschritten.

Abschließend sei nochmals darauf hingewiesen, dass diese Versuche mit Einsatz von technischer Milchsäure durchgeführt wurden. Beim Einsatz einer biologischen Säuerung sollte eine Absenkung des pH-Wertes in Abhängigkeit von ELG auf 5,3–5,5 erfolgen, da die biologische Säuerung die Hefe durch Zuführung von Wuchsstoffen, Vitaminen und Spurenelementen zusätzlich positiv beeinflusst. Die Laborversuche weisen auch darauf hin, dass die Lösungsvorgänge beim Einsatz biologischer Milchsäure nicht so ausgeprägt wie beim Einsatz technischer Milchsäure gefördert werden. Der Einsatz biologischer Milchsäure hat sich erfahrungsgemäß positiv auf die resultierende Geschmacksstabilität ausgewirkt. [1, 221]

#### **5.2.1.6 Beurteilung der Schaumstabilität des Bieres**

Die Ergebnisse zur Beurteilung der Schaumstabilität, die im Rahmen dieser Versuchsreihe durchgeführt wurden, sind aufgrund der vollständigen Darstellung der Ergebnisse hier erwähnt, sollten jedoch lediglich als richtunggebend gewertet werden und bedürfen weiterer systematischer Untersuchungen. In den durchgeführten Versuchsreihen konnte kein direkter Zusammenhang zwischen einer hohen LOX-Aktivität im Malz und einer Verschlechterung des Bierschaums nachgewiesen werden. Biere aus Malzen mit hoher LOX-Aktivität zeigten nicht zwangsläufig schlechtere Schaumzahlen. Jedoch zeigte sich unabhängig vom eingestellten Maische-pH ein signifikanter Zusammenhang ( $R^2 \approx 0,8$ :  $n = 8$  (pH 6,0 und 5,7);  $n = 6$  (pH 5,4)) zwischen der prozentualen Abnahme der Schaumzahl (ROSS und CLARK, Nibem) zwischen frischem und forciertem Bier und der

gemessenen LOX-Aktivität des Malzes. Das heißt, eine hohe LOX-Aktivität bedeutet nicht zwangsläufig schlechte Schaumwerte, aber es deutet sich an, dass die Schaumstabilität zwischen frischen und forciert gealtertem Bier mit steigender LOX-Aktivität, möglicherweise aufgrund des resultierenden höheren Gehaltes an Fettabbauprodukten, sinkt.

### **5.2.2 Brauversuche zur Untersuchung des Einflusses von Maische- und Würzesäuerung sowie Einmischtemperatur auf die Bildung von Lipidabbauprodukten und die Geschmacksstabilität des Bieres**

Hohe Einmischtemperaturen bzw. die Verwendung von Hochkurzmaisverfahren und deren positive Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität sind hinlänglich bekannt. [1, 10, 11, 106, 143, 167, 222-224] Inwieweit sich Temperaturunterschiede im oberen Bereich kombiniert mit Maische- bzw. Würzesäuerung auf eine Verbesserung der Geschmacksstabilität auswirken, wird in der folgenden Versuchsreihe dargelegt. Unter der Voraussetzung eines sehr gut gelösten Malzes mit einem ELG von 45,4 % wurden die genannten Parameter variiert und deren Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität untersucht. Unter dem Aspekt der heutzutage sehr gut gelösten Malze wurden technologische Einflussnahmemöglichkeiten mit dem Ziel einer Verbesserung der Geschmacksstabilität überprüft.

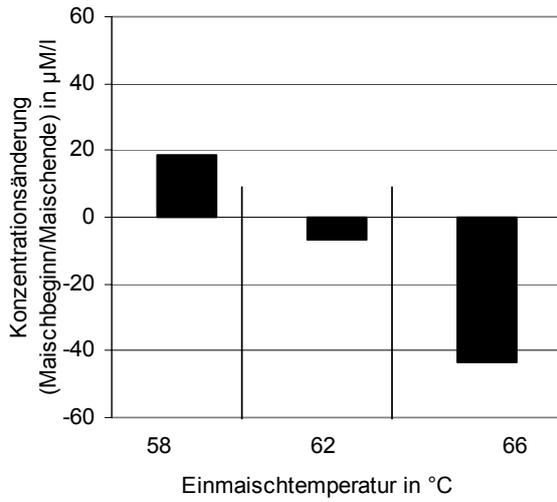
#### **5.2.2.1 Erfassung der Fettsäurehydroperoxide in Würze über den Verlauf der Würzebereitung**

Zur Klärung, ob sich bereits aus der Kongressmaische über den Hydroperoxidgehalt eine frühzeitige Vorhersage über die zu erwartende Menge an Fettabbauprodukte treffen lässt, soll die Übertragbarkeit vom Labormaßstab auf den Kleinsudmaßstab überprüft werden. Die Analysendaten dieser Versuchsreihe sind im Anhang Tabellen AH 33 und 34 dargestellt.

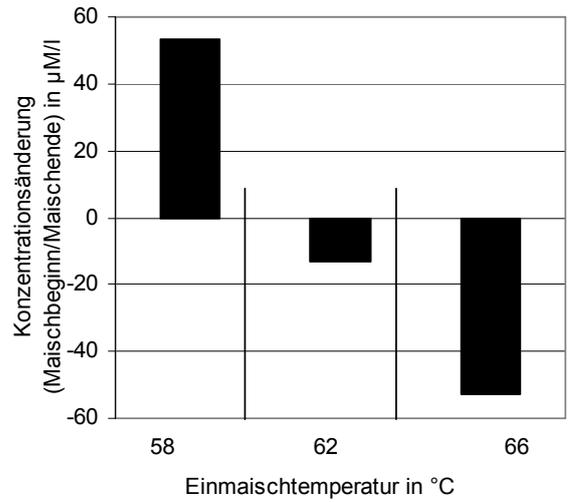
|                        | Kleinsudmaßstab                      | Kongressmaßstab |                |                        |
|------------------------|--------------------------------------|-----------------|----------------|------------------------|
| 58 °C Maischbeginn     | 76,6                                 | 75,7            | 5,84           | 11,89                  |
| 58 °C Maischbeginn MS  | 84,1                                 | 64,1            | 5,43           | 12,24                  |
| 58 °C Maischen Ende    | 105,1                                | 94,3            | 5,72           | 17,6                   |
| 58 °C Maischen Ende MS | 109,6                                | 117,6           | 5,30           | 17,7                   |
| 62 °C Maischbeginn     | 201,3                                | 107,1           | 5,75           | 15,48                  |
| 62 °C Maischbeginn MS  | 194,4                                | 103,9           | 5,29           | 14,41                  |
| 62 °C Maischen Ende    | 132,5                                | 101,2           | 5,62           | 17,5                   |
| 62 °C Maischen Ende MS | 110,3                                | 90,7            | 5,26           | 18,0                   |
| 66 °C Maischbeginn     | 120,7                                | 146,6           | 5,73           | 17,11                  |
| 66 °C Maischbeginn MS  | 102,8                                | 156,9           | 5,32           | 16,91                  |
| 66 °C Maischen Ende    | 77,6                                 | 102,9           | 5,60           | 17,5                   |
| 66 °C Maischen Ende MS | 72,6                                 | 104,0           | 5,28           | 18,0                   |
|                        | <b>Summe der C18:2-Hydroperoxide</b> |                 | <b>pH-Wert</b> | <b>Stammwürze GV-%</b> |

**Tab. 18: Vergleich Summe der C18:2-Hydroperoxide gemessen im Kleinsud- bzw. Labormaßstab**

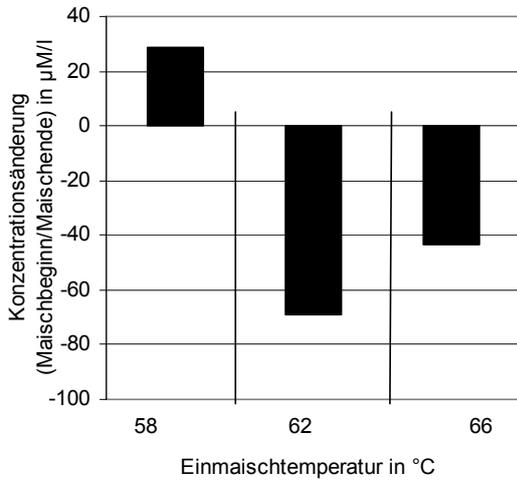
Die Vermeidung von Sauerstoffeintrag während der Würzebereitung ist in der Praxis üblicherweise Standard. Die Bestimmung der reaktiven Fettsäurehydroperoxide setzt jedoch die strikte Vermeidung eines Sauerstoffeintrags voraus und ist daher eigentlich nur im Labormaßstab unter CO<sub>2</sub>-Atmosphäre sinnvoll durchführbar. Die ungesäuerte Kleinsudmaische mit 62 °C Einmischtemperatur zeigt in dieser Versuchsreihe eine deutliche Abweichung vom Labormaßstab. Die Analysendaten sind in Tabelle 18 aufgeführt. Bei den restlichen Ergebnissen ist eine gute Übereinstimmung zwischen Labormaßstab und Kleinsudmaßstab gegeben, daher kann hier die Übertragbarkeit der Laborversuche auf die Ergebnisse des Kleinsudes als gegeben betrachtet werden. Somit besteht die Möglichkeit, im Labormaßstab die Konzentrationsänderungen der Fettsäurehydroperoxide analysieren zu können und eine adäquate Vorhersage über den Verlauf während des Maischprozesses zu erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass bei Einmischtemperaturen (ETen) über 62 °C sowohl in der gesäuerten als auch in der ungesäuerten Maische eine Abnahme der Hydroperoxidkonzentration und somit erwartungsgemäß eine verstärkte Umsetzung erkennbar ist (siehe Abbildungen 62–65). Die höchste Konzentration an Lipidabbauprodukten in der Pfannevoll-Würze wäre nach dieser Theorie bei 66 °C ET zu erwarten. In den Abbildungen 62–65 ist bei einer Temperatur von ca. 60 °C ein Wendepunkt in der Konzentrationsänderung der Hydroperoxide feststellbar.



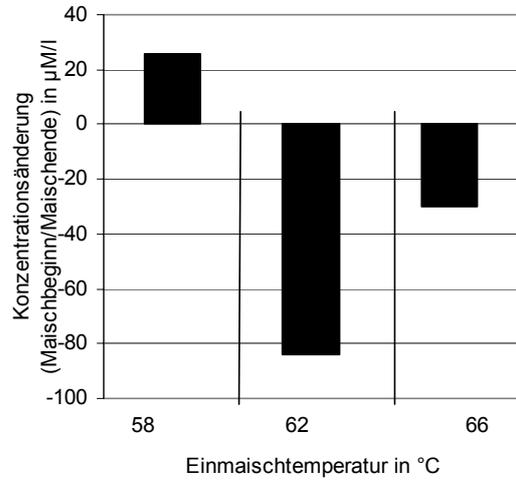
**Abb. 62:**  $\Sigma$  C18:2-Hydroperoxide im Labormaßstab ungesäuert



**Abb. 63:**  $\Sigma$  C18:2-Hydroperoxide im Labormaßstab mit Maischesäuerung



**Abb. 64:**  $\Sigma$  C18:2-Hydroperoxide im Kleinsudmaßstab ungesäuert



**Abb. 65:**  $\Sigma$  C18:2-Hydroperoxide im Kleinsudmaßstab mit Maischesäuerung

### 5.2.2.2 Aromastoffe der Pfannevoll-Würze und ihre Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität

Tabelle 19 stellt die erfassten Aromakomponenten aus dem Strecker- und Fettabbau in der Pfannevoll-Würze der analytischen und sensorischen Beurteilung der Geschmacksstabilität gegenüber. In den Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass mit steigender ET eine Abnahme an Lipidabbauprodukten einhergeht (vgl. Abschnitt 5.1.4.2.3).

|  |      | 58/72/76    | 62/72/76    | 66/72/76    |
|--|------|-------------|-------------|-------------|
| Akzeptanz forciert gealtertes Bier                 | %    | 61,4        | 51,4        | 48,6        |
| Σ Alterungsindikatoren (Differenz frisch/forciert) | µg/l | 134         | 74          | 106         |
| Σ Streckeraldehyde (Pfannevoll-Würze)              | µg/l | 880         | 1034        | 750         |
| Σ Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze)             | µg/l | 116         | 116         | 105         |
|  |      | 58/72/76 MS | 62/72/76 MS | 66/72/76 MS |
| Akzeptanz forciert gealtertes Bier                 | %    | 51,4        | 35,7        | 51,4        |
| Σ Alterungsindikatoren (Differenz frisch/forciert) | µg/l | 132         | 87          | 112         |
| Σ Streckeraldehyde (Pfannevoll-Würze)              | µg/l | 885         | 1000        | 880         |
| Σ Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze)             | µg/l | 121         | 116         | 115         |
|  |      | 58/72/76 WS | 62/72/76 WS | 66/72/76 WS |
| Akzeptanz forciert gealtertes Bier                 | %    | 56,7        | 50,0        | 61,7        |
| Σ Alterungsindikatoren (Differenz frisch/forciert) | µg/l | 108         | 121         | 101         |
| Σ Streckeraldehyde (Pfannevoll-Würze)              | µg/l | 920         | 813         | 971         |
| Σ Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze)             | µg/l | 108         | 104         | 122         |

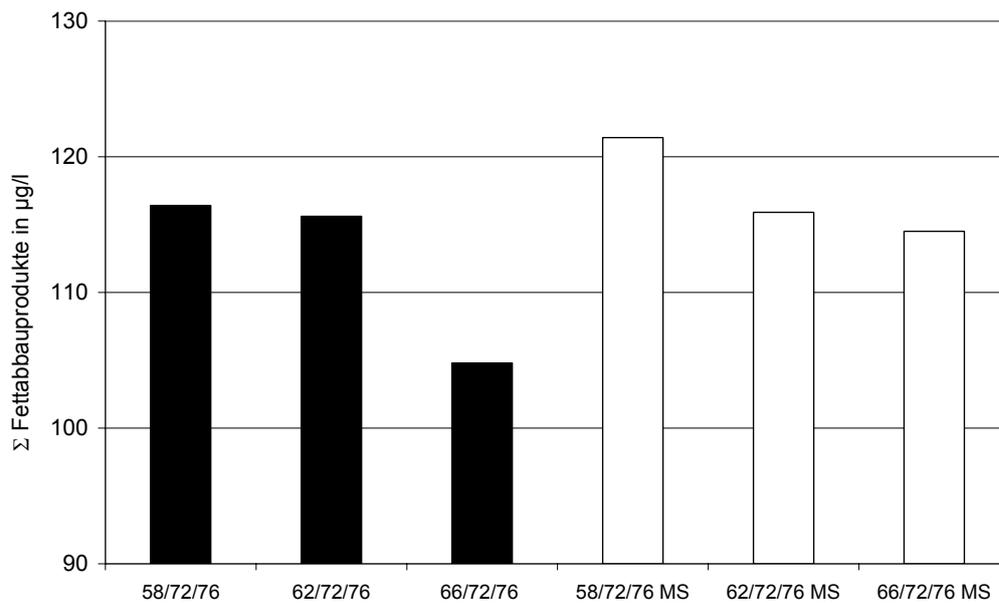
**Tab. 19: Aromastoffniveau in der Pfannevoll-Würze zur Beurteilung der Geschmacksstabilität**

Beim Vergleich der unterschiedlichen Einmischtemperaturen kristallisiert sich bei den ungesäuerten Maischen in der sensorischen Beurteilung eine deutliche Abnahme der Geschmacksstabilität mit steigenden Einmischtemperaturen heraus (vgl. Abschnitt 5.2.2.3). Die Summe der Alterungsindikatoren im frischen Zustand liegt auf ähnlichem Niveau bei ca. 30–47 µg/l. Die Konzentration der Summe der Fettabbauprodukte in der Pfannevoll-Würze konnte - wie aus den Laborversuchen bekannt - mit steigenden Einmischtemperaturen minimiert werden. Die Zunahme der Alterungsindikatoren deutet auf eine schlechtere Geschmacksstabilität bei 66 °C ET hin. Der Anstieg von Alterungscarbonylen (siehe Tabelle 19) dürfte auf die beträchtliche proteolytische Mehrlösung zurückzuführen sein, wobei die entstandenen Abbauprodukte anschließend während der Würzekochung zu Alterungskomponenten reagieren können. [143] Die geringste Zunahme an Alterungsindikatoren zwischen frischem und forciert gealtertem Bier zeigt die

Versuchsreihe mit 62 °C ET. Dies ist analytisch jedoch anhand des erhöhten Gehalts an Streckeraldehyden in der Pfannevoll-Würze nicht nachvollziehbar.

Da das verwendete Malz bereits eine sehr gute proteolytische Lösung aufweist, wurde durch Einsatz der Maischesäuerung zusätzlich eine Intensivierung der proteolytischen Lösung erzielt. Trotz hoher Einmaischtemperaturen und Überschreiten des Temperaturbereichs der proteolytischen Enzyme kann durch die Erniedrigung des pH-Wertes eine erhöhte eiweißseitige Lösung festgestellt werden. Dies belegen auch die Ergebnisse aus Abschnitt 5.1.5. Die Summe der Fettabbauprodukte sinkt zwar mit steigenden Einmaischtemperaturen, steigt jedoch mit Absenken des pH-Wertes (siehe Abbildung 66). Deutliche Vorteile zur Verbesserung der Geschmacksstabilität können in diesem Fall (hohe proteolytische Malzlösung) durch den Einsatz einer Würzesäuerung erzielt zu werden. Hohe Einmaischtemperaturen und der Einsatz von Würzesäuerung bewirkten sensorisch deutlich bessere Ergebnisse.

Abbildung 66 stellt die Summe der Fettabbauprodukte in der Pfannevoll-Würze nochmals graphisch dar. Die Summe der Fettabbauprodukte nimmt mit steigender Einmaischtemperatur ab. Die Ergebnisse zeigen, dass bei gleichen Rohstoffbedingungen die Konzentrationsabnahme der Fettsäurehydroperoxide nicht auf eine verstärkte Frei- bzw. Umsetzung oder rohstoffbedingte Schwankungen zurückzuführen ist, sondern in der Verminderung der lipidabbauenden Enzymaktivität durch die Temperaturerhöhung begründet liegt. Dies bestätigen ebenfalls die durchgeführten Laborversuche.



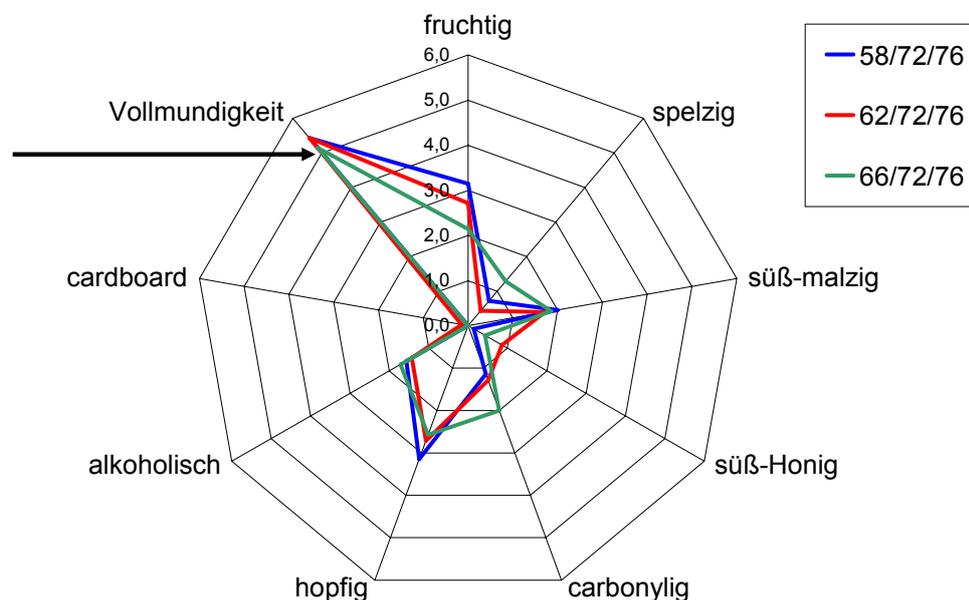
**Abb. 66: Summe der Fettabbauprodukte der Pfannevoll-Würzen**

Technologisch sind hohe Einmischtemperaturen (62 °C) und ein moderater Einsatz der Säuerung (pH 5,6) bei sehr hoch gelösten Malzen positiv zu bewerten, da einerseits die lipidabbauenden Enzyme und die Entstehung von Abbauprodukten gehemmt werden, andererseits eine Überlösung verhindert wird. Zu ausgeprägte Lösungsvorgänge während des Maisch- und Läuterprozesses sind jedoch zu verhindern, um eine erhöhte Fracht von Intermediär- und Abbauprodukten in die Würze zu vermeiden. Dieser Aspekt ist vor allem bei bereits hoch gelösten Malzen zu berücksichtigen. In diesem Fall wirkte sich der Einsatz von Würzesäuerung in Kombination mit hohen Einmischtemperaturen positiv auf die Geschmacksstabilität aus.

### 5.2.2.3 Sensorische Beurteilung der Biere

Trotz verminderter Aromastoffkonzentrationen in der Pfannevoll-Würze weisen die Biere mit 66 °C eine relativ schlechte sensorische Bewertung auf. Eine Ausnahme stellt das mit Würzesäuerung hergestellte Bier dar. Der Grund dieser schlechten Bewertung ist allerdings nicht nur auf die Ausbildung eines stark ausgeprägten Alterungsgeschmacks, sondern kann vor allem, wie in Abbildungen 67 und 68 zu

sehen ist, auf die fehlende Vollmundigkeit der Biere zurückgeführt werden. Dies steht vermutlich mit der starken Proteolyse in Zusammenhang, die sich hier in Hinblick auf die Vollmundigkeit nachteilig auswirkt. Daher können entstehende Alterungsaromen stärker hervortreten, da keine maskierenden Matrixeffekte vorhanden sind. Zusätzlich sei erwähnt, dass bei den Bieren mit 66 °C ET ein deutlicher Abfall der Schaumwerte zu beobachten ist. Der Abfall der Vollmundigkeit ist beim Einsatz von Maischesäuerung verstärkt vorzufinden. Zu beachten ist in diesem Zusammenhang, dass die sensorische Beurteilung nur tendenziell erfolgen konnte, da im Rahmen der DLG-Verkostung ein sensorisch wahrnehmbarer bzw. statistisch signifikanter Unterschied zwischen zwei Bieren erst ab einem Unterschied von 0,2 DLG-Einheiten in der Gesamtnote gegeben ist. Des Weiteren sei nochmals darauf hingewiesen, dass das verwendete Malz bereits einen sehr hohen ELG von 45 % besitzt und daher von Anfang an eine sehr hohe proteolytische Lösung aufweist. Eine Förderung der Lösungsvorgänge durch das Absenken des Maische-pHs äußert sich somit in einer geringen Vollmundigkeit.



**Abb. 67: Profilprüfung nach 10-Punkte-Bewertungsskala ohne Maischesäuerung**

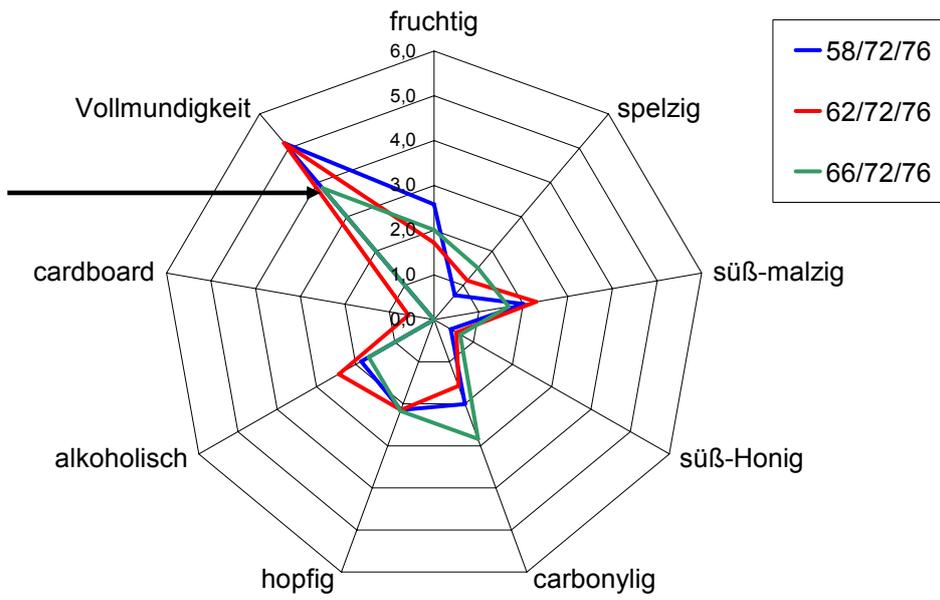


Abb. 68: Profilprüfung nach 10-Punkte-Bewertungsskala mit Maischesäuerung

### 5.3 Einfluss der Mälzungstechnologie auf die Lipide und Lipidabbauprodukte in Malz und Würze sowie Beurteilung der Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität des Bieres

#### 5.3.1 Analytische und sensorische Kriterien zur Beurteilung der Geschmacksstabilität

Da sich in den bisher durchgeführten Versuchsreihen herauskristallisierte, dass bereits die Rohstoffqualität einen entscheidenden Einfluss auf die Geschmacksstabilität hat, wurden sieben verschiedene hergestellte Handelsmalze untersucht. Die bisher verwendeten Beurteilungskriterien sollen in dieser Versuchsreihe ebenso auf ihre Gültigkeit überprüft werden. Tabelle 21 zeigt die Analysenwerte dieser Malze, die mit unterschiedlichen Schwelk- und Darrverfahren, sowie Systemen (siehe Tabelle 20) hergestellt wurden. Die Analysendaten dieser Untersuchungen sind im Anhang Tabellen AH 35–37 einzusehen.

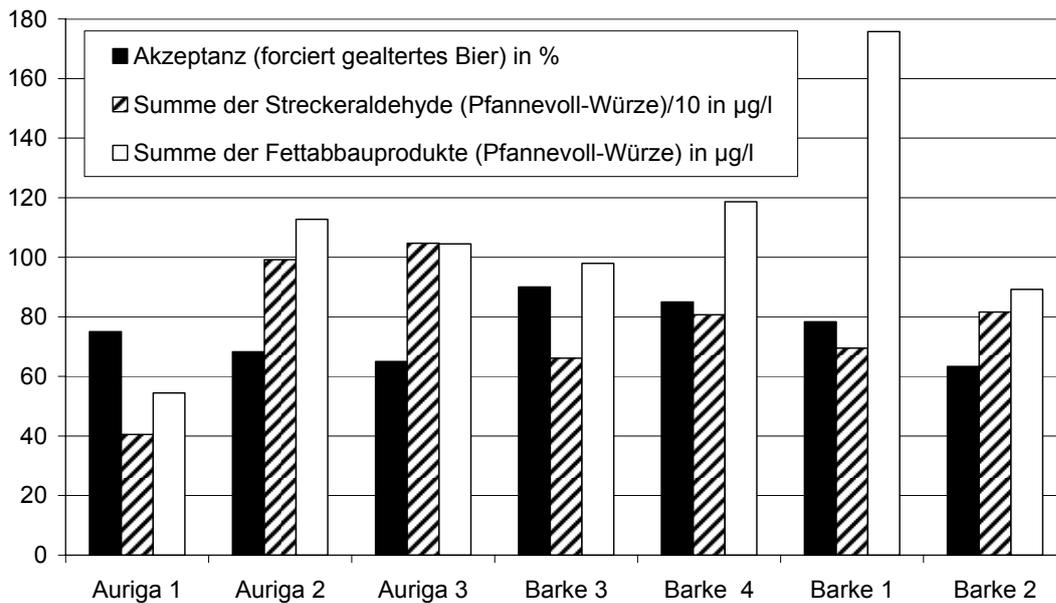
| Malzmuster | Mälzungsverfahren   |
|------------|---|
| Auriga 1   | 1-Horden-Hochleistungsdarre, Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 83 °C  |
| Auriga 2   | Kombisystem, Darre hoch beladen (60 %), langer Darrzyklus 36 h, Abdarrtemperatur 90 °C, Abluft nach Durchbruch zur Beheizung der nächsten Schwelkhorde    |
| Auriga 3   | Kombisystem, Darre niedrig beladen (40 %), kurzer Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 90 °C, Abluft nach Durchbruch zur Beheizung der nächsten Schwelkhorde |
| Barke 1    | 1-Horden-Hochleistungsdarre, Darrzyklus 20 h, Abdarrtemperatur 85 °C, Abluft nach Durchbruch  |
| Barke 2    | Keimdarrkasten (2-Horden-Darre), Darrzyklus 36 h, Abdarrtemperatur 85 °C, Abluft nach Durchbruch  |
| Barke 3    | Keimdarrkasten (2-Horden-Darre), Darrzyklus 36 h (wie Barke 2), Verwendung von Rückluft, um CO <sub>2</sub> während der Keimung anzureichern              |
| Barke 4    | Tennenmalz, 1-Horden-Hochleistungsdarre, Abdarrtemperatur 83 °C   |

Tab. 20: Mälzungsverfahren der Handelsmalze

|   | Auriga 1 | Auriga 2 | Auriga 3 | Barke 3 | Barke 4 | Barke 1 | Barke 2 |
|---|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Rangfolge nach Akzeptanz des forciert gealterten Bieres | 1        | 2        | 3        | 1       | 2       | 3       | 4       |
| DLG -Note, frisch                                       | 4,32     | 4,25     | 4,33     | 4,49    | 4,45    | 4,32    | 4,50    |
| DLG -Note, forciert                                     | 4,00     | 3,94     | 3,83     | 4,16    | 4,15    | 4,06    | 3,88    |
| Akzeptanz, forciert gealtertes Bier %                   | 75,0     | 68,3     | 65,0     | 90,0    | 85,0    | 78,3    | 63,3    |
| Eiweißlösungsgrad %                                     | 42,8     | 42,6     | 42,8     | 38,6    | 37,8    | 44,5    | 40,2    |
| lösl. Stickstoff mg/100 g Trs.                          | 719      | 715      | 713      | 674     | 593     | 719     | 669     |
| Summe der Streckeraldehyde (Pfannevoll-Würze) µg/l      | 405      | 992      | 1047     | 661     | 807     | 695     | 816     |
| Summe der Streckeraldehyde (Anstellwürze) µg/l          | 264      | 270      | 279      | 137     | 186     | 215     | 225     |
| Pentanal µg/l   | 9,5      | 18,4     | 18       | 15,0    | 17,9    | 22,2    | 14      |
| Hexanal µg/l  | 43       | 88       | 82       | 76      | 97      | 146     | 72      |
| Heptanal µg/l   | 1,2      | 2,6      | 2,7      | 3,1     | 2,3     | 4,4     | 2,2     |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal µg/l                               | Sp.      | Sp.      | Sp.      | 0,8     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
| γ-Nonalacton µg/l                                       | 1,1      | 3,4      | 2,2      | 3,1     | 1,6     | 3,1     | 1,0     |
| Summe der Fettabbauprodukte (Pfannevoll-Würze) µg/l     | 54,4     | 112,7    | 104,5    | 98,0    | 118,7   | 175,8   | 89,2    |
| Pentanal µg/l   | 1,4      | 1,4      | 5,9      | 2,3     | 1,7     | 2,8     | 1,5     |
| Hexanal µg/l  | 4,6      | 4,6      | 4,6      | 2,6     | 4,1     | 6,6     | 5,7     |
| Heptanal µg/l   | 0,6      | 0,6      | 0,4      | 0,9     | 0,5     | 0,9     | 0,6     |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal µg/l                               | Sp.      | Sp.      | Sp.      | n. n.   | Sp.     | Sp.     | 1,3     |
| γ-Nonalacton µg/l                                       | 1,8      | 2,9      | 1,9      | 2,2     | 1,7     | 2,7     | 1,8     |
| Summe der Fettabbauprodukte (Anstellwürze) µg/l         | 8,4      | 9,6      | 12,8     | 8,0     | 8,0     | 13,0    | 10,9    |

**Tab. 21: Analytische und sensorische Beurteilungskriterien der Handelsmalze**

Die Malze der Sorte Auriga weisen einen fast identischen Eiweißlösungsgrad sowie ein ähnliches Niveau an lösl. Stickstoff im Malz auf. Die vier verschiedenen Barke-Malze unterschieden sich in beiden Punkten deutlich. Die Summe der Streckeraldehyde und der Lipidabbauprodukte sollen wiederum als Hinweis auf die zu erwartende Geschmacksstabilität herangezogen werden. Bei den Auriga-Versuchen geht die steigende Streckeraldehydkonzentration mit einer Abnahme der Akzeptanz des forciert gealterten Bieres einher. Die zusätzlich hohe Konzentration der Summe der Fettabbauprodukte bestätigt die schlechte Beurteilung von Auriga 2 und 3. Bei den Auriga-Versuchen ist die Vorhersage der zu erwartenden Geschmacksstabilität über die Aromakomponenten der Pfannevoll-Würze zutreffend (siehe Abbildung 69).



**Abb. 69: Vergleich Aromastoffe in Pfannevoll-Würze und resultierende Akzeptanz des forciert gealterten Bieres**

Deutlich interessanter gestaltet sich die Beurteilung der Barke-Versuche. Barke 1 zeigt zwar eine überdurchschnittliche Malzlösung, aber sowohl der Gehalt an lösl. Stickstoff sowie die Summe der Streckeraldehyde in der Pfannevoll-Würze ist im Verhältnis zu den anderen Malzmustern relativ gering. Barke 4 hingegen zeigt als eher unterlöstes Malz einen sehr hohen Gehalt an Streckeraldehyden. Die Summe der Fettabbauprodukte steigt ebenfalls mit zunehmender Malzlösung an. In diesem Fall wäre eine Aromastoffanalyse des Malzes zur Beurteilung der Malzqualität hilfreich, die im Rahmen dieser Versuchsreihe jedoch nicht durchgeführt werden konnte.

### **5.3.2 Beurteilung der Mälzungsverfahren hinsichtlich der Geschmacksstabilität**

Die Ergebnisse der Malz,- Würze- und Bieruntersuchungen der beiden Sorten Auriga 2 und 3 zeigen keine gravierenden Unterschiede. Die Beladung des untersuchten Systems sowie die unterschiedlich langen Darrzyklen scheinen daher keinen großen Einfluss zu haben. Die hohe Abdarrtemperatur macht sich allerdings

im Anstieg der Streckeraldehyde deutlich bemerkbar, ebenso steigt die Summe der Fettabbauprodukte im Vergleich zu Auriga 1 drastisch an.

Die Barke-Versuche weisen fast identische Abdarrtemperaturen, jedoch unterschiedliche Schwelkverfahren auf. Barke 1 dient als Vergleich, liefert aber widersprüchliche Ergebnisse hinsichtlich ELG und Streckeraldehydkonzentration. Während der Keimung von Barke 3 wurde eine CO<sub>2</sub>-Anreicherung vollzogen, was sich hier in einem deutlichen Rückgang der Lipoxygenase-Aktivität des Malzes und gleichzeitig einer geringeren Hexanal-Konzentration in der Pfannevoll-Würze bemerkbar macht. Ähnlich niedrige Lipoxygenase-Aktivität zeigt auch das Tennenmalz. Barke 2 zeigt im Vergleich trotz hoher LOX-Aktivität den niedrigsten Hexanalgehalt. Der vorliegende Eiweißlösungsgrad lässt tendenziell eher einen höheren Hexanalgehalt vermuten. Erstaunlicherweise zeigt Barke 1 den höchsten Hexanalgehalt, evtl. bedingt durch die hohe Lösung des Malzes.

|          | ELG in % | LOX-Aktivität in U/ml | (E)-2-Nonenal-Potential in µg/l | Hexanal (Pfannevoll-Würze) in µg/l | Hexanal (Anstellwürze) in µg/l | Akzeptanz (forciert gealtertes Bier) in % |
|----------|----------|-----------------------|---------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---|
| Auriga 1 | 42,8     | 36,34                 | 0,236                           | 43                                 | 4,6                            | 75,0                                      |
| Auriga 2 | 42,6     | 30,96                 | 0,246                           | 88                                 | 4,6                            | 68,3                                      |
| Auriga 3 | 42,8     | 37,11                 | 0,182                           | 82                                 | 4,6                            | 65,0                                      |
| Barke 1  | 44,5     | 57,54                 | 0,095                           | 146                                | 6,6                            | 78,3                                      |
| Barke 2  | 40,2     | 33,71                 | 0,087                           | 72                                 | 5,7                            | 63,3                                      |
| Barke 3  | 38,6     | 17,57                 | —                               | 76                                 | 2,6                            | 90,0                                      |
| Barke 4  | 37,8     | 24,16                 | 0,144                           | 97                                 | 4,1                            | 85,0                                      |

**Tab. 22: Kriterien zur Beurteilung des Fettabbaus und der resultierenden Geschmacksstabilität**

Tabelle 22 zeigt die zur Beurteilung des Einflusses des Fettabbaus auf die Geschmacksstabilität herangezogenen analytischen Parameter. Die Versuchsergebnisse zeigen keinen signifikanten Zusammenhang zwischen der LOX-Aktivität des Malzes, dem Hexanal-Gehalt der ungekochten Würze und dem (E)-2-Nonenal-Potential des frischen Bieres sowie der Akzeptanz des gealterten Bieres. Das (E)-2-Nonenal-Potential konnte hier nicht als geeigneter Alterungsindikator bestätigt werden. Innerhalb dieser Versuche geben die Fettabbauprodukte ebenfalls wieder einen Hinweis, aber zahlreiche weitere Einflussfaktoren wie der ELG und vor allem die Abdarrtemperatur müssen hier in die Beurteilung einbezogen werden. Der Einfluss der unterschiedlichen Systeme

kommt in erster Linie nur dann zum Ausdruck, wenn eine erhöhte thermische Belastung des Malzes und daraus resultierende Substanzen verursacht werden. Eine verminderte LOX-Aktivität bei Barke 3 und 4 durch erhöhte CO<sub>2</sub>-Gehalte während des Keimens konnte allerdings festgestellt werden. Dies deutet auf eine geringe Lipidperoxidation und LOX-Aktivität bzw. LOX-Entwicklung während des Keimungsprozesses hin. Die Unterdrückung dieser Abbauvorgänge äußert sich in einer guten Geschmacksstabilität. Die Akzeptanz der forcierten Biere liegt bei 90 bzw. 85 %.

Der ELG gibt in jedem Fall einen Hinweis auf die Geschmacksstabilität des Bieres. Unterlöst Malze sind in diesem Zusammenhang deutlich positiver zu bewerten. Eine Kombination aus vermindertem Gehalt an Streckeraldehyden und niedrigem Gehalt an Aromastoffen aus dem Fettabbau wirkt sich positiv auf die Geschmacksstabilität des Bieres aus. Neben der Analyse der Summe der Streckeraldehyde in der Pfannevoll-Würze sollten zusätzlich die Malzaromastoffe zur Beurteilung herangezogen werden, um zu sehen, inwieweit die Streckeraldehyde schon durch das Malz in den Brauprozess eingetragen werden. Der negative Einfluss durch ein hohes Potential an Streckeraldehyden aus dem Malz kann auch durch den Brauprozess nicht wieder beseitigt werden. Hingegen scheint der Fettabbau offensichtlich durch eine geeignete Wahl der Würzebereitung noch beeinflusst werden zu können, obwohl auch hier das Potential bereits durch den Rohstoff bedingt ist. In diesem Zusammenhang scheint insbesondere eine Malzbereitung mit CO<sub>2</sub>-Anreicherung während der Keimung einen positiven Effekt auf die Geschmacksstabilität auszuüben, da hier die Lipidoxidation minimiert wird. Dies belegen die Brauversuche mit Barke 3 und 4. Bei der Beurteilung der Geschmacksstabilität ist zusätzlich zu beachten, dass die Biere der Malze Barke 1 und 3 höhere Schwefeldioxidgehalte (4,8 bzw. 6,8 mg/l) im Bier aufwiesen und somit die Geschmacksstabilität positiv beeinflusst wurde.

Zusammengefasst kann festgehalten werden, dass ein geringer Gehalt an Streckeraldehyden in Malz, Würze und Bier sowie ein hoher SO<sub>2</sub>-Gehalt im frischen Bier (Einfluss der Gärung) die Geschmacksstabilität des Bieres fördert (vgl. Abschnitt 2.1). Eine hohe thermische Belastung des Malzes und natürlich auch der

Würze verringert die Geschmacksstabilität. Diese kann anhand der TBZ einfach überprüft werden. Eine gute Gärung fördert die Geschmacksstabilität des Bieres und verbessert die Bewertung des frischen Bieres. Jedoch ist das Potential an Aromakomponenten der ungekochten Würze bereits ein guter Hinweis auf die Geschmacksstabilität. Auch die Fettabbauprodukte erwiesen sich als gute analytische Indikatoren.

#### **5.4 Schlussfolgerungen**

Zahlreiche Forschungsarbeiten beschäftigten sich mit dem Ziel, die Bildung der aus dem Lipidabbau entstehenden alterungsrelevanten Carbonyle zu minimieren und somit eine Verbesserung der Geschmacksstabilität zu erzielen. Ein Weg ist die technologische Beeinflussung des Mälzungs- und Brauprozesses, beginnend bei der Variation der Mälzungsparameter bis hin zur konsequenten Vermeidung eines Sauerstoffeintrages bei der Würzebereitung. Neuere Forschungsarbeiten beschäftigen sich mit der genauen Untersuchung der verschiedenen Reaktionsmechanismen (v. a. enzymatischen Reaktionswegen), die zur Bildung dieser aromawirksamen Carbonyle führen. Ziel dieser Arbeit war, dem Praktiker analytische Kennzahlen zur Hand zu geben, die eine frühzeitige Beurteilung der Geschmacksstabilität ermöglichen sowie die Beurteilung der Relevanz der Lipidabbauprodukte für die Geschmacksstabilität. Ferner wurden verschiedene technologische Möglichkeiten, insbesondere zur Beeinflussbarkeit des enzymatischen Lipidabbaus, untersucht, um auf das durch den Rohstoff vorgegebene Potential an alterungsrelevanten Einflussfaktoren (wie z. B. LOX-Aktivität, ELG, Aromakomponenten des Malzes) technologisch gezielt reagieren zu können.

Erstmals wurde in dieser Arbeit ein statistisch abgesicherter, systematischer Vergleich zwischen dem Einsatz von biologischer und technischer Milchsäure zur Maischesäuerung im Labormaßstab vorgenommen, und die Auswirkungen auf die Lipidoxidation dargestellt. Zusätzlich wurden die Einflussparameter Eimaischtemperatur, Eiweißlösungsgrad des Malzes und das Niveau des

eingestellten pH-Wertes in die Untersuchungen mit einbezogen. Neue Hinweise für die technologische Beeinflussbarkeit der Geschmacksstabilität ergaben sich dadurch, dass bei einem nach den üblichen Malzspezifikationen für moderne Maischverfahren geforderten Eiweißlösungsgrad (40–42 %) die höchste Konzentration an Fettabbauprodukten bei der untersuchten Sorte vorzufinden war. Haupteinfluss auf die Verringerung von Lipidoxidationsprodukten hat die Einmischtemperatur, gleichzeitig bleibt aber die Summe der Streckeraldehyde unbeeinflusst. Die Summe der Streckeraldehyde steigt jedoch signifikant mit dem Eiweißlösungsgrad des Malzes an. Ein Herabsetzen des Maische-pHs fördert die Lösungsvorgänge während des Maischprozesses zusätzlich. Dies ist in erster Linie bei hoch gelösten Malzen zu berücksichtigen, da auch bei hohen Einmischtemperaturen ( $> 62\text{ °C}$ ) noch proteolytische Lösungsvorgänge festgestellt werden konnten. Jedoch scheint die Verwendung von technischer Milchsäure diese Lösungsvorgänge mehr zu unterstützen als die biologische Milchsäure. Statistisch kann diese Aussage allerdings im mathematischen Modell nicht signifikant abgesichert werden. Generell liegen die Absolutwerte der Summe der Streckeraldehyde, bei Einsatz von biologischer Milchsäure niedriger als bei Verwendung von technischer Milchsäure. Ein weiterer Vorteil des Einsatzes der biologischen Milchsäure ist ein bereits aus der Literatur bekannter positiver Effekt auf die Gärung, der sich eindeutig förderlich auf die Geschmacksstabilität auswirkt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit verdeutlichen, dass bereits die Malzanalyse (Bestimmung des Enzympotentials des Malzes, Malzaromastoffe) eine Aussage hinsichtlich des Niveaus der zu erwartenden Abbauprodukte aus dem Fettabbau liefert. Ein hohes Potential an LOX steigert eindeutig das in der Pfannevoll-Würze vorliegende Niveau an Fettabbauprodukten. Das lipidabbauende enzymatische Potential ist durch den Rohstoff vorgegeben. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine hydroperoxidabbauende Enzymfraktion charakterisiert, die ein pH-Optimum bei 7,0 besitzt und im pH-Bereich zwischen 6,5–8,0 noch mehr als 40 % der maximal gemessenen Enzymaktivität aufweist. Die Thermostabilität ( $> 70\text{ °C}$ ) zeigt, dass es sich um ein relativ hitzestabiles Enzym handelt. Daher kommen prinzipiell die Enzyme Peroxygenase, Peroxidase oder Allenoxid Synthase in Frage. Die

Untersuchung der Lipaseaktivität beim Maischprozess zeigte ein Aktivitätsmaximum bei 55–60 °C, ab 70 °C war kaum noch Aktivität feststellbar. Dies ist von Bedeutung, da beide LOX Isoenzyme in der Lage sind, veresterte Fettsäuren umzusetzen und sich nicht nur auf frei vorliegende Substrate begrenzen sowie eine Peroxidation veresterter Linol- bzw. Linolensäuren aus Speicherfett zu katalysieren wie auch die Umsetzung von Phospholipiden. Diese können dann von Lipasen aus den Triacylglycerolen freigesetzt werden. Daher kommt dem Potential an Lipidoxidationsprodukten, das während der Keimung entsteht bzw. im Malz vorliegt, große Bedeutung in Hinblick auf die Geschmacksstabilität zu. Das Malz dient als Basis und gibt somit das Grundniveau an alterungsrelevanten Abbauprodukten vor. Ebenso ist das Enzym Lipase von Relevanz, da es als hitzestabiles Enzym an der Freisetzung dieser Lipidoxidationsprodukte während des Maischprozesses beteiligt ist. In Kombination mit einem hohen Gehalt an Streckerabbauprodukten wirkt sich ein hoher Gehalt an Lipidoxidationsprodukten eindeutig negativ in der Beurteilung der Geschmacksstabilität aus.

Hinsichtlich der technologischen Einflussfaktoren, die anhand von Brauversuchen überprüft wurden, kann resümiert werden, dass in erster Linie der Eiweißlösungsgrad die Bildung von Aromastoffen beeinflusst. Die Bildung der Lipidabbauprodukte wird durch hohe Einmaischtemperaturen vermindert. Auch eine Unterdrückung der Lipidoxidation während des Keimungsprozesses durch CO<sub>2</sub>-Anreicherung vermindert die Lipidoxidationsprodukte. Maßgeblichen Einfluss hat das Potential an Abbauprodukten, das rohstoffseitig miteingebracht wird. Der Einfluss der Sorte konnte bei der Bildung von aromarelevanten Alterungscarbonylen als wichtiges Kriterium herausgearbeitet werden, da auch die enzymatische Ausstattung des Malzes in erster Linie auf den Sorteneinfluss zurückzuführen ist. Eine erhöhte Lipoxygenase-Aktivität im Malz geht mit einer gesteigerten Entstehung von Abbauprodukten einhergeht.

Technologisch sind hohe Einmaischtemperaturen (62 °C) und ein moderater Einsatz der Säuerung (pH 5,6) positiv zu bewerten, da einerseits die lipidabbauenden Enzyme und die Entstehung von Abbauprodukten gehemmt

werden, andererseits eine Überlösung verhindert wird. Dieser Aspekt ist in Anbetracht der heute meist gut gelösten Malze zu berücksichtigen, um zu ausgeprägte Lösungsvorgänge während des Maisch- und Läuterprozesses zu verhindern und somit eine erhöhte Fracht von Intermediär- und Abbauprodukten in die Würze zu vermeiden. Aus den Ergebnissen wurde die so benannte Precursor-Theorie als Hinweis auf die Geschmacksstabilität entwickelt, die besagt, dass sich die in der Pfannevoll-Würze vorhandenen Lipidabbauprodukte als Indikatoren bzw. Marker für den späteren Grad der Alterung des forcierten Bieres erweisen. Die Analyse der Pfannevoll-Würze dient somit als analytischer Fingerprint zur Beurteilung der zu erwartenden Geschmacksstabilität. Obwohl die Lipide und ihre Abbauprodukte das Geschmacksprofil des frischen bzw. forcierten Bieres nicht dominieren, besitzen sie eine analytische Bedeutung als Indikatorensubstanzen für die Geschmacksstabilität des Bieres. Die hat sich bestätigt, selbst wenn durch den Kochprozess die entstandenen Carbonyle und andere Substanzen aus dem Fettabbau auf ein annähernd gleiches Konzentrationsniveau reduziert werden und auch, wenn bei der Gärung Carbonyle in die korrespondierenden Alkohole und Ester umgewandelt werden. [225] Eine Förderung des Lipidabbaus während des Maischprozesses im Hinblick auf eine intensivere Ausdampfung der entstandenen Abbauprodukte bei der Kochung ist daher aufgrund der erhaltenen Ergebnisse nicht anzuraten. Unter Berücksichtigung der Rohstoffqualität gibt die Analyse der Summe der Fettabbauprodukte und der Summe der Produkte aus dem Streckerabbau in der Pfannevoll-Würze aussagekräftige Hinweise auf die Geschmacksstabilität des Bieres.

## 6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Dissertation wurden Möglichkeiten zur technologischen Einflussnahme auf den Lipidabbau in Hinblick auf eine Verbesserung der Geschmacksstabilität untersucht. Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss von Produkten des Lipidabbaus und der Lipidoxidation auf jene Aromasubstanzen zu untersuchen, die bei der Alterung des Bieres von Bedeutung sind. Hierzu wurden Versuche im Labormaßstab sowie im Kleinsudmaßstab (10 Liter-Maßstab) und an einer Pilotanlage (60 Liter-Maßstab) durchgeführt. Mit Hilfe der technologisch möglichen Parameter wurde die Bildung alterungsrelevanter Lipidabbau- und Oxidationsprodukte mittels HPLC und GC verfolgt und deren Relevanz auf die Bildung von Alterungskomponenten sowie auf die organoleptisch ermittelte Geschmacksstabilität bewertet. Parallel dazu erfuhren auch Alterungssubstanzen aus der Maillard-Reaktion und dem Streckerabbau Berücksichtigung. Die erhaltenen Ergebnisse geben dem Praktiker analytische Kennzahlen zur Hand, die eine frühzeitige Beurteilung der Geschmacksstabilität des Bieres ermöglichen, um gezielt im Brauprozess reagieren zu können.

Die Ergebnisse zeigten, dass bereits die Malzanalyse durch die Bestimmung des Enzympotentials und der Malzaromastoffe eine Aussage hinsichtlich des Niveaus der zu erwartenden Fettabbauprodukte liefert. Ein hohes Potential an Lipoxygenase-Aktivität (LOX-Aktivität) im Malz hebt das Niveau an Lipidoxidationsprodukten in der ungekochten Würze (Pfannevoll-Würze) an. Des Weiteren konnte die Bedeutung einer neu charakterisierten, hitzestabilen, hydroperoxidabbauenden Enzymfraktion, wie auch des Enzyms Lipase im Zusammenspiel mit dem Enzym Lipoxygenase untermauert werden. Diese neue Erkenntnis über die Thermostabilität dieser hydroperoxidabbauenden Enzymaktivitäten bestätigt deren Relevanz während des Brauprozesses.

Mittels eines statistisch geplanten Versuchsaufbaus wurde erstmalig die Wirkung von technischer und biologisch gewonnener Milchsäure zur Maischesäuerung

systematisch verglichen. Generell förderte eine pH-Erniedrigung die Abbauvorgänge. Bei Malzuntersuchungen mit definiert eingestellter Eiweißlösung (37–46 % ELG) zeigten überraschenderweise die häufig vom Brauer bevorzugten Malze mit 40–42 % ELG die höchste Konzentration an Lipidabbauprodukten. Als Haupteinflussfaktor auf die Verringerung der Lipidoxidation erwies sich eine hohe Einmischtemperatur von über 62 °C. Zusammen mit einer moderaten Absenkung des Maische-pHs auf pH 5,6 konnte bei den heute vornehmlich sehr gut gelösten Malzen (v. a. beim Einsatz von biologischer Milchsäure) eine angepasste Lösung von Fett- und Eiweißsubstanzen erzielt werden, was sich in einem geringen Potential an Alterungskomponenten widerspiegelt und infolgedessen die Geschmacksstabilität fördert.

Neben den zuvor genannten technologischen Einflussfaktoren bei der Würzebereitung im Sudhaus konnten bereits in der Mälzerei durch Begrenzung der Eiweißlösung die Bildung von Malzaromastoffen beeinflusst werden. Auch eine Unterdrückung der Lipidoxidation während des Keimprozesses durch CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Prozessluft verminderte die Lipidoxidationsprodukte und die LOX-Aktivität. Maßgeblichen Anteil hat das Potential an Abbauprodukten, das malzseitig eingebracht wird und im Maischprozess nur begrenzt beeinflusst werden kann. Auch die Braugerstensorte konnte als wichtiges Kriterium bei der Bildung von aromarelevanten Alterungscarbonylen herausgearbeitet werden.

Aus diesen Ergebnissen wurde die so benannte Precursor-Theorie als Hinweis auf die Geschmacksstabilität entwickelt. Diese besagt, dass in der Pfannevoll-Würze vorhandene Lipidabbauprodukte und Produkte aus dem Streckerabbau sich als gute Indikatoren für den späteren Grad der Alterung des forcierten Bieres erweisen. Die Analyse der Pfannevoll-Würze dient somit als „Fingerprint“. Obwohl die Lipide und die analysierten Abbauprodukte das Geschmacksprofil des frischen bzw. forcierten Bieres nicht dominieren, haben sie sich analytisch als aussagekräftige Indikatorsubstanzen für die Geschmacksstabilität des Bieres erwiesen.

## 7 Literatur

- [1] Back, W.: *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie*. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl GmbH, 2005.
- [2] Schütz, M.; Hartmann, K.; Herrmann, M.; Keßler, M.; Kreis, S.; Krottenthaler, M.; Mezger, R.; Schneeberger, M.; Thiele, F.; Zarnkow, M.; Back, W.: Technologie und Analytik–Teil III: Analytische Kontrollmöglichkeiten zur Optimierung technologischer Prozesse In: *Brauwelt* 146 (2006), Nr. 11, S. 312–316.
- [3] Lustig, S.: *Das Verhalten flüchtiger Aromastoffe bei der Lagerung von Flaschenbier und deren technologische Beeinflussung beim Brauprozess*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1994.
- [4] Doderer, A.; Skadhauge, B.; Banks, D.: Improved flavour stability of beers produced from null-Lox-1 barley. In: *European Brewery Convention: Proceedings of the 30th Congress*. Prague, 2005, S. 737–739.
- [5] Skadhauge, B.; Doderer, A.: Barley for production of flavour-stable beer. In: *Scandinavian Brewers' Review* 63 (2006), Nr. 1, S. 8–11.
- [6] Skadhauge, B.; Knudsen, S.; Lok, F.; Olsen, O.: Barley for production of flavour-stable beer. In: *European Brewery Convention: Proceedings of the 30th Congress*. Prague, 2005, S. 676–688.
- [7] Garbe, L.-A.: *Untersuchungen zum Metabolismus von Mono- und Dihydroxyfettsäuren in Hefen*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Dissertation, 2002.
- [8] Garbe, L.-A.; Hübke, H.; Tressl, R.: Enantioselective formation pathway of a trihydroxy fatty acid during mashing. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 63 (2005), Nr. 4, S. 157–162.
- [9] Dalglish, C. E.: Flavour stability. In: *European Brewery Convention: Proceedings of the 16th Congress*. Amsterdam, 1977, S. 623–659.
- [10] Narziß, L.; Miedaner, H.; Eichhorn, P.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität des Bieres (Teil 1). In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 52 (1999), Nr. 3/4, S. 49–57.
- [11] Narziß, L.; Miedaner, H.; Eichhorn, P.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität des Bieres (Teil 2). In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 52 (1999), Nr. 5/6, S. 80–85.
- [12] 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.
- [13] McMurrough, I.; Roche, G. P.; Cleary, K. G.: Phenolic acids in beers and worts. In: *J. Inst. Brew.* 90 (1984), May–June, S. 181–187.
- [14] Boivin, P.; Malanda, M.; Maillard, M. N.; Berset, C.; Richard, H.; Hugues, M.; Richard-Forget, F.; Nicolas, J.: Rôle des antioxygènes naturels du malt dans la stabilité organoleptique de la bière. In: *European Brewery Convention: Proceedings of the 25th Congress*. Brussels, 1995.
- [15] Bright, D.; Stewart, G.; Patino, H.: A novel assay for antioxidant potential of specialty malt. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 57 (1999), Nr. 4, S. 133–137.

- [16] Kaneda, H.; Kobayashi, N.; Furusho, S.; Sahara, H.; Koshino, S.: Chemical evaluation of beer flavor stability. In: *MBAA Techn. Quart.* 32 (1995), Nr. 2, S. 76–80.
- [17] Kaneda, H.; Kobayashi, N.; Takashio, M.; Tamaki, T.; Shinotsuka, K.: Beer staling mechanism. In: *MBAA Techn. Quart.* 36 (1999), Nr. 1, S. 41–47.
- [18] Boivin, P.: A review of pro- and anti-oxidant of malt. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [19] Hill, P.: Keeping the Flavour Wheel turning - the development of a Flavour Stability Wheel. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 29th Congress*. Dublin, 2003, S. 791–795.
- [20] Miedaner, H.; Narziß, L.; Eichhorn, P.: Einige Faktoren der Geschmacksstabilität - sensorische und analytische Bewertung. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 23th Congress*. Lisbon, 1991, S. 401–408.
- [21] Van Waesberghe, J.: Anti-oxidants and pro-oxidants in preprocessed brewing ingredients. In: *MBAA Technical Quaterly* 33 (1996), Nr. 2, S. 96–101.
- [22] Kaltner, D.: *Untersuchungen zur Ausbildung des Hopfenaromas und technologische Maßnahmen zur Erzeugung hopfenaromatischer Biere*. München, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Dissertation, 2000.
- [23] Eichhorn, P.: *Untersuchungen zur Geschmacksstabilität*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Dissertation, 1991.
- [24] Eichhorn, P.; Komori, T.; Miedaner, H.; Narziss, L.: Alterungscarbonyl im sub-ppb-Bereich. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 22th Congress*. Zurich, 1989, S. 717–724.
- [25] Kaneda, H.; Kano, Y.; Kamimura, M.; Kawaskishi, S.; Osawa, T.: A study of beer staling using chemiluminescence analysis. In: *Journal of the Institute of Brewing* 97 (1995), Nr. 2, S. 105–109.
- [26] Forster, C.; Schwieger, J.; Narziß, L.; Back, W.; Uchida, M.; Ono, M.; Yanagi, K.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität von Bier mittels Elektronenspinresonanz-Spektroskopie freier Radikale. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 52 (1999), Nr. 5/6, S. 86–93.
- [27] Franz, O.: *Systematische Untersuchungen zur endogenen antioxidativen Aktivität von hellem, untergäurigem Bier unter besonderer Berücksichtigung technologischer Maßnahmen beim Brauprozess*. München, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Dissertation, 2004.
- [28] Franz, O.; Back, W.: Stability index - a new approach to measure the flavor stability of beer. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 40 (2003), Nr. 1, S. 20–24.
- [29] Uchida, K.; Ono, M.: Technological approach to improve beer flavor stability: analysis of the effect of brewing processes on beer flavor stability by the electron spin resonance method. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 58 (2000), Nr. 1, S. 8–13.
- [30] Tressl, R.; Bahri, D.; Silwar, R.: Bildung von Aldehyden durch Lipidoxidation und deren Bedeutung als "off-flavor"-Komponenten in Bier. In: European

- Brewery Convention: *Proceedings of the 17th Congress*. Berlin, 1997, S. 27–41.
- [31] Grönqvist, A.; Siirilä, J.; Virtanen, H.; Home, S.; Pajunen, E.: Carbonyl compounds during beer production and in beer. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 24th Congress*. Oslo, 1993.
- [32] Lustig, S.; Miedaner, H.; Narziß, L.; Back, W.: Beeinflussung alterungsrelevanter Aromastoffe durch technologische Maßnahmen bei der Malz-, Würze- und Bierbereitung. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 25th Congress*. Brussels, 1995, S. 499–506.
- [33] 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.
- [34] Van Eerde, P.; Strating, J.: Trans-2-nonenal. In: European Brewery Convention: *EBC Monograph*. 1982, S. 117–121.
- [35] Williams, R. S.; Wagner, H. P.: Contribution of hop bitter substances to beer staling mechanisms. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 37 (1979), Nr. 1, S. 13–19.
- [36] Komarek, D.: *Key odorants in beer - Influence of storage on the flavor stability*. München, Technische Universität München, Fakultät für Chemie, Dissertation, 2001.
- [37] Drost, B. W.; Van den Berg, R.; Freijee, F. J. M.; Van der Velde, E. G.; Hollemans, M.: Flavor Stability. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 48 (1990), Nr. 4, S. 124–131.
- [38] Jamieson, A. M.; Van Gheluwe, J. E. A.: Identification of a compound responsible for cardboard flavor in beer. In: *ASBC Proceedings* (1970), S. 192–197.
- [39] Drost, B. W.; Van Eerde, P.; Hoekstra, S. F.; Strating, J.: Fatty acid and staling of beer. In: European Brewery Convention: *EBC Monograph* (1971), S. 451–457.
- [40] Hashimoto, N.; Eshima, T.: Composition and pathway of formation of stale aldehydes in bottled beer. In: *ASBC Journal* 35 (1977), Nr. 3, S. 145–150.
- [41] Hill, P.; Lustig, S.; Barklage, H.-J.: Seeing the light - using innovative instrumental analysis to assess new packaging. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 28th Congress*. Budapest, 2001, S. 910–915.
- [42] Belitz, H.-D.; Grosch, W.; Schieberle, P.: *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2001.
- [43] Göbel, C.: *Untersuchungen zur Funktion von Oxylipinen bei der Pathogenantwort in Solanum tuberosum L.* Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität Halle Wittenberg, Fachbereich Biochemie/Biotechnologie Mathematisch-Naturwissenschaftliche-Technische Fakultät, Dissertation, 2001.
- [44] Lam, E.; Kato, N.; Lawton, M.: Programmed cell death, mitochondria and the plant hypersensitive response. In: *Nature* 411 (2001), Nr. S. 848–853.
- [45] Göbel, C.; Feussner, I.; Hamberg, M.; Rosahl, S.: Oxylipins profiling in pathogen-infected potato leaves. In: *Biochimica et Biophysica Acta* 1548 (2002), S. 55–64.

- [46] Dangl, J. L.; Dietrich, R. A.; Richberg, M. H.: Death don't have no mercy: cell death programs in plant-microbe interactions. In: *Plant Cell* 8 (1996), S. 1793–1807.
- [47] Hammond-Kosack, K. E.; Jones, J. D. G.: Responses to plant pathogenes. In: Buchanan, B.; Gruissem, W.; Jones, R.: *Biochemistry and molecular biology of plants*. Rockville, Maryland: American Society of Plant Physiologists (2000), S. 1102–1156.
- [48] Blée, E.: Phytooxylipins and plant defense reactions. In: *Prog. Lipid Res.* 37 (1998), Nr. 1, S. 33–72.
- [49] Blée, E.: Biosynthesis of phytooxylipins: the peroxygenase pathway. In: *Fett/Lipid* 100 (1998), Nr. 4/5, S. 121–127.
- [50] Yang, Y.; Shah, J.; Klessig, D. F.: Signal perception and transduction in plant defence responses. In: *Genes Dev* 11 (1997), S. 1621–1639.
- [51] Bamforth, C. W.: Beer quality: oxidation. In: *Brewers' Guardian* (2000), April, S. 31–34.
- [52] Schwarz, P. B.; Stanley, P.; Solberg, S.: Activity of lipase during mashing. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 60 (2002), Nr. 3, S. 107–109.
- [53] Yang, G.; Schwarz, P. B.: Activity of lipoxygenase isoenzymes during malting and mashing. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 53 (1995), Nr. 2, S. 45–49.
- [54] Kermasha, S.; Van de Voort, F.: Characterization of french bean (*Phaseolus vulgaris*) seed lipase. In: *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 19 (1986), Nr. 1, S. 23–27.
- [55] Kermasha, S.; Van de Voort, F.: Lipase activity and fatty acid composition in stored full-fat french bean flour. In: *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.* 19 (1986), Nr. 3, S. 92–94.
- [56] Kwon, D. Y.; Rhee, J. S.: A simple and rapid colorimetric method for determination of free fatty acids for lipase assay. In: *J. Am. Oil Chem. Soc.* 63 (1986), Nr. 1, S. 89–92.
- [57] Narziß, L.; Sekin, Y.: Über das Verhalten der Lipase während des Mälzungs- und Brauprozesses. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 27 (1974), Nr. 11, S. 311–318.
- [58] Grill, W.; Püskök, J.: Die freien höheren Fettsäuren bei der Verarbeitung von Rohfrucht. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 16th Congress*. Amsterdam, 1977, S. 195–207.
- [59] Bamforth, C. W.; Clarkson, S.; Large, P.: The relative importance of polyphenol oxidase, lipoxygenase and peroxidases during wort oxidation. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 23th Congress*. Lisbon, 1991, S. 617–624.
- [60] Clarkson, S.; Large, P.; Bamforth, C. W.: A two-substrate kinetic study of peroxidase cationic isoenzymes in barley malt In: *Phytochemistry* 31 (1992), Nr. 3, S. 743–749.
- [61] Omidiji, O.; Okpuzor, J.; Otubu, O.: Peroxidase activity of germinating *Sorghum bicolor* grains: effect of some cations. In: *J. Sci. Food Agric.* 82 (2002), S. 1881–1885.
- [62] Antrobus, C. J.; Large, P. J.; Bamforth, C. W.: Changes in the cationic isoenzymes of peroxidase during the malting of barley. I : Tissue location studies. In: *Journal of the Institute of Brewing* 103 (1997), Nr. 4, S. 227–231.

- [63] Bamforth, C. W.; Muller, R. E.; Walker, M. D.: Oxygen and oxygen radicals in malting and brewing: a review. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 51 (1993), Nr. 3, S. 79–88.
- [64] Billaud, C.; Garcia, R.; Boivin, P.; Nicolas, J.: Evolution des activités lipoxygénasique et polyphénoloxydasique de différentes variétés d'orge au cours du maltage. In: *European Brewery Convention: Proceedings of the 26th Congress*. Maastricht, 1997, S. 159–166.
- [65] Rasmussen, C.; Hiner, A.; Smith, A.; Welinder, K.: Effect of calcium, other ions and pH on the reactions of barley peroxidase with hydrogen peroxide and fluoride. In: *The Journal of Biological Chemistry* 273 (1998), Nr. 4, S. 2232–2240.
- [66] Bamforth, C. W.: Enzymic and non-enzymic oxidation in the brewhouse: a theoretical consideration. In: *J. Inst. Brew.* 105 (1999), Nr. 4, S. 237–242.
- [67] Billaud, C.; Louarme, L.; Nicolas, J.: Comparison of peroxidases from barley kernel (*Hordeum vulgare* L.) and wheat germ (*Triticum aestivum* L.): Isolation and preliminary characterization. In: *Journal of Food Biochemistry* 23 (1999), Nr. 2, S. 145–172.
- [68] Feussner, I.; Kühn, H.; Wasternack, C.: Lipoxygenase-dependent degradation of storage lipids. In: *Trends in Plant Science* 6 (2001), Nr. 6, S. 268–273.
- [69] Feussner, I.; Wasternack, C.: The lipoxygenase pathway. In: *Annu. Rev. Plant Biol.* 53 (2002), S. 275–297.
- [70] Hamberg, M.: An epoxy alcohol synthase pathway in higher plants: biosynthesis of antifungal trihydroxy oxylipins in leaves of potato. In: *Lipids* 34 (1999), S. 1131–1142.
- [71] Rosahl, S.: Lipoxygenases in plant – their role in development and stress response. In: *Z. Naturforsch.* 51c (1996), S. 123–138.
- [72] Siedow, J. N.: Plant Lipoxygenase: Structure and Function In: *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42 (1991), S. 145–188.
- [73] Shibata, D.: Lipoxygenase and Lipoxygenase Pathway Enzymes- *Plant lipoxygenase genes*. AOCS Press, 1996.
- [74] Shibata, D.; Slusarenko, A.; Casey, R.; Hildebrand, D.; Bell, E.: Lipoxygenases. In: *Plant Molecular Biology Reporter* 12 (1994), S. 541–542.
- [75] Vörös, K.; Feussner, I.; Kühn, H.; Lee, J.; Graner, A.; Löbler, M.; Parthier, B.; Wasternack, C.: Characterization of a methyljasmonate-inducible lipoxygenase from barley (*Hordeum vulgare* cv. Salome) leaves. In: *Eur. J. Biochem.* 251 (1998), S. 36–44.
- [76] Bachem, C.; Van der Hoeven, R.; De Bruijn, S.; Vreugdenhil, D.; Zabeau, C.; Visser, R.: Visualization of differential gene expression using a novel method of RNA fingerprinting based on AFLP: analysis of gene expression during potato tuber development. In: *Plant J.* 9 (1996), S. 745–753.
- [77] Feussner, I.: *Oxidation von Polyenfettsäuren durch Lipoxygenasen*. Halle-Wittenberg, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Habilitationsschrift, 2000.
- [78] Wasternack, C.; Parthier, B.: Jasmonate signalled plant gene expression. In: *Trend Plant Sci.* 2 (1997), S. 302–307.
- [79] Gardner, H.: Recent investigations into the lipoxygenase pathway of plants. In: *Biochimica et Biophysica Acta* 1084 (1991), Nr. 3, S. 221–239.

- [80] Vick, B. A.: Oxygenated fatty acids of the lipoxygenase pathway. In: Press, C.: London: Moore, J., 1993, S. 167–191.
- [81] Vick, B. A.; Zimmerman, D. C.: Oxidative Systems for modification of fatty acids: the lipoxygenase pathway. In: *The Biochemistry of Plants* 9 (1987), S. 53–90.
- [82] Gardner, H.: Soybean lipoxygenase-1 enzymatically forms both 9(S)- and 13(S)-hydroperoxides from linolic acid by a pH-dependent mechanism. In: *Biochimica et Biophysica Acta* 1001 (1989), S. 274–281.
- [83] Feussner, I.; Kühn, H.: Application of lipoxygenases and related enzymes for preparation of oxygenated lipids. In: Bornscheuer, U. T.: *Enzymes in lipid modification*. Weinheim: Wiley-VCH, 2000, S. 309–336.
- [84] Veldink, G. A.; Vliegenghardt, J. F. G.; Boldingh, J.: Plant lipoxygenases. In: *Prog. Chem. Fats Other Lipids* 15 (1977), Nr. 2, S. 131–166.
- [85] De Groot, J. J. M. C.; Veldink, G. A.; Vliegenghart, J. F. G.; Boldingh, J.; Wever, R.; Van Gelder, B. F.: Demonstration by EPR spectroscopy of the functional role of iron in soybean lipoxygenases-1. In: *Biochim. Biophys. Acta* 377 (1975), S. 71–79.
- [86] Gardner, H.: Lipoxygenase as a versatile biocatalyst. In: *J. Am. Oil Chem. Soc.* 73 (1996), Nr. 11, S. 1347–1357.
- [87] Maucher, H.; Hause, B.; Feussner, I.; Ziegler, J.; Wasternack, C.: Allene oxide synthases of barley (*Hordeum vulgare* cv. *Salome*): tissue specific regulation in seedling development. In: *The Plant Journal* 21 (2000), Nr. 2, S. 199–213.
- [88] Maucher, H.; Stenzel, I.; Miersch, O.; Stein, N.; Prasad, M.; Zierold, U.; Schweizer, P.; Dorer, C.; Hause, B.; Wasternack, C.: The allene oxide cyclase of barley (*Hordeum vulgare* L.) - cloning and organ-specific expression. In: *Phytochemistry* 65 (2004), S. 801–811.
- [89] Ziegler, J.; Keinänen, M.; Baldwin, I. T.: Herbivore-induced allene oxide synthase transcripts and jasmonic acid in *Nicotiana attenuata*. In: *Phytochemistry* 58 (2001), S. 729–738.
- [90] Harms, K.; Ramirez, I.; Pena-Cortès, H.: Inhibition of wound-induced accumulation of allene oxide synthase transcripts in flax leaves by aspirin and salicylic acid. In: *Plant Physiol.* 118 (1998), S. 1057–1065.
- [91] Ziegler, J.; Hamberg, M.; Miersch, O.; Parthier, B.: Purification and characterization of allene oxide cyclase from dry corn seeds. In: *Plant Physiol.* 114 (1997), S. 565–573.
- [92] Song, W.-C.; Brash, A.: Purification of an allene oxide synthase and identification of the enzyme as a cytochrome P-450. In: *Science* 253 (1991), S. 781–784.
- [93] Noordermeer, M.; Veldink, G.; Vliegenghart, J.: Fatty acid hydroperoxide lyase: a plant cytochrome P450 enzyme involved in wound healing and pest resistance. In: *Chembiochem* 2 (2001), S. 494–504.
- [94] Dominguez, X. A.; Canales, A. M.: Oxidation of beer. In: *The Brewers Digest* July (1974), S. 40–47.
- [95] Itoh, A.; Howe, G. A.: Molecular cloning of a divinyl ether synthase. Identification as a CYP74 cytochrome P-450. In: *J. Biol. Chem.* 276 (2001), S. 3620–3627.

- [96] Hamberg, M.: Hydroperoxide isomerases. In: *J. Lipid Mediators Cell Signalling* 12 (1995), S. 283–292.
- [97] Blée, E.; Stahl, U.; Schuber, F.; Stymne, S.: Regio- and stereoselectivity of cytochrome P-450 and peroxygenase-dependent formation of cis-12,13-epoxy-9(Z)-octadecenoic acid (vernolic acid) in *Euphorbia Lagascae*. In: *Biochemical and Biophysical Research Communications* 197 (1993), Nr. 2, S. 778–784.
- [98] Matsunaga, I.; Sumimoto, T.; Ayata, M.; Ogura, H.: Functional modulation of a peroxygenase cytochrome P450: novel insight into the mechanisms of peroxygenase and peroxidase enzymes. In: *FEBS Letters* 528 (2002), S. 90–94.
- [99] Hamberg, M.; Hamberg, G.: Peroxygenase-catalyzed fatty acid epoxidation in cereal seeds. In: *Plant Physiol.* 110 (1996), S. 807–815.
- [100] Lange, H.: *Untersuchungen zum Metabolismus ungesättigter Hydroxyfettsäuren in Hefen*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Dissertation, 2001.
- [101] Weichert, H.; Stenzel, I.; Berndt, E.; Wasternack, C.; Feussner, I.: Metabolic profiling of oxylipins upon salicylate treatment in barley leaves - preferential induction of the reductase pathway by salicylate. In: *FEBS Letters* 464 (1999), S. 133–137.
- [102] Narziß, L.; Sekin, Y.: Über die Entwicklung der Peroxidase während des Mälzungs- und Brauprozesses. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 27 (1974), Nr. 6, S. 155–164.
- [103] Jerumanis, J.; Van Huynh, N.; Devreux, A.: Determination and properties of barley and malt polyphenoloxidase. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 34 (1975), Nr. 1, S. 38–43.
- [104] Kaim, W.; Schwederski, B.: *Bioanorganische Chemie*. 4. Auflage Stuttgart: Teubner Verlag, 2005.
- [105] Billaud, C.; Nicolas, J.: The primary oxidoreductases involved in the malting and brewing technological processes. In: *Sci. Aliments* 21 (2001), Nr. 2, S. 83–131.
- [106] Van Waesberghe, J.; Aerts, G.; De Cooman, L.: Flavour stability starts with malt and compensations in the brewhouse for LOX and aldehydes in malt. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [107] Andre, E.; Hou, K.-W.: The presence of a lipid oxidase in soybean, glycine soya. In: *Lieb. C. R. Acad. Sci (Paris)* 194 (1932), S. 645–647.
- [108] Franke, W.; Frehse, H.: Autoxidation of unsaturated fatty acids. VI. The lipoxydase of cereal in particular barley. In: *Z. Phys. Chem.* 295 (1959), S. 333–338.
- [109] Yabuuchi, S.: Occurrence of a new lipoxygenase isoenzyme in germination barley embryos. In: *Agr. Biol. Chem.* 40 (1976), Nr. 10, S. 1987–1992.
- [110] Holtmann, W.; Van Duijn, G.; Sedee, N.; Douma, A.: Differential Expression of lipoxygenase isoenzymes in embryos of germinating barley. In: *Plant Physiol.* 111 (1996), S. 569–576.
- [111] Holtmann, W.; Vredenburg-Heistek, J.; Schmitt, N.; Feussner, I.: Lipoxygenase-2 oxygenates storage lipids in embryos of germinating barley. In: *Eur. J. Biochem.* 248 (1997), S. 452–458.

- [112] Lulai, E. C.; Baker, C. W.: The alteration and distribution of lipoxygenase in malting barley and in finished malt In: *ASBC Proceedings* 33 (1975), Nr. 4, S. 154–158.
- [113] Baxter, E. D.: Lipoxygenases in malting and mashing. In: *J. Inst. Brew.* 88 (1982), November–December, S. 390–396.
- [114] Schwarz, P. B.; Pylar, R. E.: Lipoxygenase and hydroperoxide isomerase activity of malting barley. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 42 (1984), Nr. 2, S. 47–53.
- [115] Martel, C.; Kohl, S.; Boivin, P.: Lipoxygénase: Origine, évolution et conséquence dans la filière malterie-brasserie. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 23th Congress*. Lisbon, 1991, S. 425–432.
- [116] Kaukovirta-Norja, A.; Laakso, S.; Reinikainen, P.; Olkku, J.: Lipolytic and oxidative changes of barley lipids during malting and mashing. In: *J. Inst. Brew.* 99 (1993), September–October, S. 395–403.
- [117] Kaukovirta-Norja, A.; Reinikainen, P.; Laakso, S.; Olkku, J.: Lipoxygenase activity during malting and storage of malt. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 25th Congress*. Brussels, 1995, S. 193–200.
- [118] Zürcher, J.: *Der Einfluss des Blattkeims von Gerstenmalz auf die Geschmacksstabilität und weitere Qualitätsmerkmale von Bier*. München, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Dissertation, 2003.
- [119] Meyna, S.: *Freie und triglycerid-gebundene Hydroxyfettsäuren in Gerste und Malz und ihre Bedeutung für die Geschmacksstabilität des Bieres*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät III - Prozeßwissenschaften, Dissertation, 2005.
- [120] Van Aerle, P.; De Barse, M.; G., V.; Vliegenthart, J.: Purification of a lipoxygenase from ungerminated barley. In: *FEBS Letters* 280 (1991), Nr. 1, S. 159–162.
- [121] Doderer, A.; Kokkelink, I.; Van der Veen, S.; Valk, B.; Douma, A.: Purification and characterization of lipoxygenase from germinating barley. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 23th Congress*. Lisbon, 1991.
- [122] Hamberg, M.: Regio- and stereochemical analysis of trihydroxyoctadecenoic acids derived from linoleic acid 9- and 13-hydroperoxides. In: *Lipids* 26 (1991), Nr. 6, S. 407–415.
- [123] De Buck, A.; Aerts, G.; Bonte, S.; Dupire, S.: Rapid evaluation of the two lipoxygenase isoenzyme activities in malt. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 25th Congress*. Brussels, 1995, S. 209–216.
- [124] Yang, G.; Schwarz, P. B.; Vick, B. A.: Purification and characterization of lipoxygenase isoenzymes in germinating barley. In: *Cereal Chemistry* 70 (1993), Nr. 5, S. 589–595.
- [125] Hugues, M.; Boivin, P.; Gaillard, F.; Nicolas, J.; Thiry, J.-M.; Richard-Forget, F.: Two lipoxygenases from germinated barley - heat and kilning stability. In: *Journal of Food Science* 59 (1994), Nr. 4, S. 885–889.
- [126] Garbe, L.-A.; Hübke, H.; Tressl, R.: Oxygenated fatty acids and flavour stability – new insights. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 29th Congress*. Dublin, 2003, S. 740–748.
- [127] Doderer, A.; Kokkelink, I.; Van der Veen, S.; Valk, B.; Schram, A.; Douma, A.: Purification and characterization of two lipoxygenase isoenzymes from

- germinating barley. In: *Biochimica et Biophysica Acta* 1120 (1992), S. 97–104.
- [128] Lulai, E. C.; Baker, C. W.: Physicochemical characterization of barley lipoxygenase. In: *Cereal Chemistry* 53 (1976), Nr. 5, S. 777–786.
- [129] De Almeida, R.; Garbe, L.-A.; Nagel, R.; Wackerbauer, K.; Tressl, R.: Characterization of LOX1 and LOX2 from germinating barley: isoelectric focussing, substrate-, regio-, and enantiospecificity In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 30th Congress*. Prague, 2005, S. 740–749.
- [130] De Almeida, R.; Garbe, L.-A.; Nagel, R.; Wackerbauer, K.; Tressl, R.: Regio- and stereoselectivity of malt lipoxygenase LOX1 and LOX2. In: *J. Inst. Brew.* 111 (2005), Nr. 3, S. 265–274.
- [131] Feussner, I.; Wasternack, C.; Kindl, H.; Kühn, H.: Lipoxygenase-catalyzed oxygenation of storage lipids is implicated in lipid mobilization during germination. In: *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92 (1995), S. 11849–11853.
- [132] Hirota, N.; Kuroda, H.; Takoi, K.; Kaneko, T.; Kaneda, H.; Yoshida, I.; Takashio, M.; Ito, K.; Takeda, K.: Development of novel barley with improved beer foam and flavour stability - the impact of lipoxygenase-1-less barley in brewing industry. In: *MBAA Techn. Quart.* 42 (2006), Nr. 2, S. 131–135.
- [133] Van Waesberghe, J.: The outdevelopment of pale lagermalt. In: *MBAA Techn. Quart.* 30 (1993), Nr. 1, S. 31–36.
- [134] Peterson, D. M.: Oat antioxidants. In: *Journal of Cereal Science* 33 (2001), Nr. S. 115–129.
- [135] Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Kano, Y.; Koshino, S.: The production of linoleic and linolenic acid hydroperoxides during mashing. In: *J. Ferment. Bioeng.* 76 (1993), Nr. 5, S. 371–375.
- [136] Kuroda, H.; Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Watari, J.; Takashio, M.: Characterization of factors that transform linoleic acid into di- and trihydroxyoctadecenoic acids in mash. In: *J. Biosci. Bioeng.* 93 (2002), Nr. 1, S. 73–77.
- [137] Kuroda, H.; Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Takashio, M.; Shinotsuka, K.: Trihydroxyoctadecenoic acids having negative effects on beer foam are produced by enzymatic factors present in malt. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 28th Congress*. Budapest, 2001, S. 657–662.
- [138] Kuroda, H.; Kojima, H.; Kaneda, H.; Takashio, M.: 'Fatty acid hydroperoxide lyase' as a key enzyme for the production of *trans*-2-nonenal during mashing In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 30th Congress*. Prague, 2005, S. 750–756.
- [139] Graf, H.: *Carbonyl und Alterung des Bieres*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1984.
- [140] Mück, E. A.: *Über das Verhalten der Fettsäuren beim Brauprozess*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1985.
- [141] Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Kano, Y.; Koshino, S.: Lipid oxidation during wort production. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 24th Congress*. Oslo, 1993, S. 405–411.

- [142] Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Kano, Y.; Koshino, S.: Determination of fatty acid hydroperoxides produced during the production of wort. In: *J. Inst. Brew.* 99 (1993), March–April, S. 143–146.
- [143] Narziß, L.; Back, W.; Miedaner, H.; Takahashi, Y.: Pilotversuche über den Einfluss der verschiedenen Maischparameter auf die Eigenschaften der Würze und des Bieres unter besonderer Berücksichtigung der Geschmacksstabilität. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 53 (2000), Nr. 11/12, S. 204–216.
- [144] Narziss, L.: *Abriß der Bierbrauerei*. 7. Auflage Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [145] Ketterer, M.: *Untersuchungen zum Fettstoffwechsel bei der Keimung und der hieraus resultierenden Metaboliten*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1994.
- [146] Kretschmer, H.: *Der Einfluss physiologischer Vorgänge beim Mälzen auf das Verhalten der Lipide und deren Einfluss auf Bieraromastoffe und Bieralterung*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1996.
- [147] Hellich, P.: *Versuche über den Einfluss verschiedener hoher CO<sub>2</sub>-Gehalte in der Haufenluft auf die Qualität der Malze und einiger daraus hergestellter Biere*. München, Technische Hochschule München, Fakultät für Brauwesen, Dissertation, 1969.
- [148] Anness, B. J.; Reed, R. J. R.: Lipids in brewery - a material balance. In: *J. Inst. Brew.* 91 (1985), March–April, S. 82–87.
- [149] Anness, B. J.; Reed, R. J. R.: Lipids in wort. In: *J. Inst. Brew.* 91 (1985), September–October, S. 313–317.
- [150] Krauß, G.; Zürcher, C.; Holstein, H.: Die schaumzerstörende Wirkung einiger Malzlipide und ihr Schicksal im Verlaufe des Mälzungs- und Brauprozesses. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 25 (1972), Nr. 5, S. 113–123.
- [151] Forch, M.: Lipide und Bierqualität – eine Übersicht. In: *Monatsschrift für Brauerei* 30 (1977), Nr. 5, S. 125–135.
- [152] Yasui, T.; Matsuura, C.; Hori, T.; Ogawa, Y.; Ohkochi, M.: Importance of raw material and the wort production process on trans-2-nonenal formation in beer. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [153] De Buck, A.; Aerts, G.; Bonte, S.; Dupire, S.; Van den Eynde, E.: Relation between lipoxygenase extraction during brewing, reducing capacity of the wort and the organoleptical stability of beer. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 26th Congress*. Maastricht, 1997, S. 333–340.
- [154] Wackerbauer, K.; Meyna, S.: Evolution of oxygenated fatty acids during the malting process. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [155] Wackerbauer, K.; Meyna, S.; Pahl, R.: Nonenal potential of wort and beer. In: *Brauwelt International* 22 (2004), Nr. 3, S. 159–163.
- [156] Vande Meerssche, J.; Blockmans, C.; Devreux, A.; Masschelein, C. A.: Formation de trans-2-nonenal par photo-oxydation des acides

- octadécénoïques hydroxyles. In: *Proceedings of the 18th Congress*. London, 1983, S. 525–532.
- [157] Yabuuchi, S.; Yamashita, H.: Gas chromatography determination of trihydroxyoctadecenoic acids in beer. In: *J. Inst. Brew.* 85 (1979), July–August, S. 216–218.
- [158] Drost, B. W.; Duidam, J.; Hoekstra, S. F.; Strating, J.: Role of individual compounds in beer staling. In: *MBAA Techn. Quart.* 11 (1974), Nr. 2, S. 127–134.
- [159] Esterbauer, H.; Schauenstein, E.: Isomeric trihydroxy-octadecenoic acids in beer: Evidence for their presence and quantitative determination. In: *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 164 (1977), S. 255–259.
- [160] Stenross, L.; Wang, P.; Siebert, K.; Meilgaard, M.: Origin and formation of 2-nonenal in heated beer. In: *MBAA Techn. Quart.* 13 (1976), Nr. 4, S. 227–232.
- [161] Drost, B. W.: Geschmacksstabilität. In: *Brauwelt* (1981), S. 786–790.
- [162] Wackerbauer, K.; Meyna, S.: The occurrence of free and triglyceride-bonded hydroxy fatty acids in barley and malt. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [163] Wackerbauer, K.; Meyna, S.; Westphal, M.: Veränderung von Gerste und Malz während der Lagerung und Auswirkungen auf die Geschmacksstabilität der hergestellten Biere. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 56 (2003), Nr. 1/2, S. 27–33.
- [164] Wackerbauer, K.; Meyna, S.; Marre, S.: Hydroxy fatty acids as indicators for ageing and the influence of oxygen in the brewhouse on the flavour stability of beer. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 56 (2003), Nr. 9/10, S. 174–178.
- [165] Wackerbauer, K.; Meyna, S.: Freie und triglycerid-gebundene Hydroxyfettsäuren in Gerste und Malz II. Die Entwicklung während des Mälzungsprozesses. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 55 (2002), Nr. 5/6, S. 110–114.
- [166] Möller-Hergt, G.: *Die Bedeutung der Hydroxyfettsäuren bei der Bierherstellung*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fachbereich 15 - Lebensmittelwissenschaft und Biotechnologie, Dissertation, 1999.
- [167] Möller-Hergt, G.; Roderfeld, H.-J.; Waterkamp, H.-J.: Changes of hydroxy acids and other ageing relevant compounds in wort and beer depending on storage of malt and barley. In: European Brewery Convention: *Monograph 31 - Symposium Flavour and Flavour Stability*. Nancy, 2001.
- [168] Möller-Hergt, G.; Wackerbauer, K.; Tressl, R.; Garbe, L.-A.; Zufall, C.: Die Hydroxyfettsäuren in Würze und Bier. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 27th Congress*. Cannes, 1999, S. 123–132.
- [169] Meyna, S.: *Freie und triglycerid-gebundene Hydroxyfettsäuren in Gerste und Malz und ihre Bedeutung für die Geschmacksstabilität des Bieres*. Berlin, Technische Universität Berlin, Fakultät III Prozesswissenschaften, Dissertation, 2005.
- [170] Whitfield, F.: Volatiles from interactions of Maillard reactions and lipids. In: *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* 31 (1992), Nr. 1/2, S. 1–58.

- [171] Fournier, R.; Dumoulin, M.; Boivin, P.: Linoleic acid hydroperoxides, trans-2-nonenal and nonenal potential during the brewing process: evolution and relationship. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 28th Congress*. Budapest, 2001, S. 540–546.
- [172] Meilgaard, M.; Moya, E.: A study of carbonyl compounds in beer - I. Background and literature review. In: *MBAA Techn. Quart.* 7 (1970), Nr. 3, S. 135–142.
- [173] Wang, P. S.; Siebert, K. J.: Determination of trans-2-nonenal in beer. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 11 (1974), Nr. 2, S. 110–117.
- [174] Tressl, R.; Kossa, T.; Renner, R.; Köppler, H.: Gaschromatographisch-massenspektrometrische Untersuchungen flüchtiger Inhaltsstoffe von Hopfen, Würze und Bier und deren Genese. In: *Monatsschrift für Brauerei* 28 (1975), Nr. 5, S. 109–118.
- [175] Hamberg, M.: Trihydroxyoctadecenoic acids in beer. Qualitative and quantitative analysis. In: *J. Agric. Food Chem.* 39 (1991), Nr. 9, S. 1568–1572.
- [176] Graveland, A.; Pesman, L.; Van Eerde, P.: Enzymatic oxidation of linoleic acid in barley suspensions. In: *MBAA Techn. Quart.* 9 (1972), Nr. 2, S. 98–104.
- [177] Grosch, W.: Reaction of hydroperoxide-products of low molecular weight In: *Autoxidation of unsaturated Lipids*. Academic Press London, (Cand, H. W.-S., ed.), 1987, S. 95–139.
- [178] Kaneda, H.; Kano, Y.; Osawa, T.; Kamimura, M.; Osawa, T.; Kawaskishi, S.: Analysis of long-chain fatty acids in beer by HPLC-fluorescence detection method. In: *J. Agric. Food. Chem.* 38 (1990), S. 1363–1367.
- [179] Hashimoto, N.; Kuroiwa, Y.: Proposed pathways for the formation of volatile aldehydes during storage of bottled beer. In: *ASBC Journal* 33 (1975), Nr. 3, S. 104–111.
- [180] Dufour, J. P.; Leus, M.; Baxter, A. J.; Hayman, A. R.: Characterization of the reaction of bisulfite with unsaturated aldehydes in a beer model system using nuclear magnetic resonance spectroscopy. In: *J. Am. Soc. Brew. Chem.* 57 (1999), Nr. 4, S. 138–144.
- [181] Bellmer, H.-G.; Galensa, R.; Gromus, J.: Bedeutung der Polyphenole für die Bierherstellung. Teil 1. In: *Brauwelt* 28/29 (1995), S. 1372–1379.
- [182] Bellmer, H.-G.; Galensa, R.; Gromus, J.: Bedeutung der Polyphenole für die Bierherstellung. Teil 2. In: *Brauwelt* 30 (1995), S. 1477–1496.
- [183] Halliwell, B.; Cuttidge, J.: *Free Radicals in Biology and Medicine*. Oxford: Clarendon Press, 1989.
- [184] Cao, G.; Sofic, E.; Prior, R. L.: Antioxidant and prooxidant behaviour of flavonoids: structure-activity relationships. In: *Free Radicals in Biology and Medicine* 22 (1989), Nr. 5, S. 749–760.
- [185] Woellersen, H.: *Bestimmung und Identifizierung von Flavonoiden in Gerste mit HPLC-DAD-MS/MS*. Paderborn, Universität Paderborn, Fakultät für Naturwissenschaften, Department Chemie, Dissertation, 2004.
- [186] Nakamura, T.; Franz, O.; Back, W.: pH dependence of radical scavenging activity polyphenols, phenolic acid and sulfite. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 28th Congress*. Budapest, 2001, S. 612–620.

- [187] Ikan, R.: *The Maillard Reaction*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 1996.
- [188] Tressl, R.: Bildung von Aromastoffen durch Maillardreaktion. In: *Monatsschrift für Brauerei* (1979), Nr. 5, S. 240–254.
- [189] Deshpande, S. S.: *Handbook of food toxicology*. New York, Basel: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- [190] Maga, J. A.; Sizer, C. E.: Pyrazines in food. A review. In: *J. Agric. Food. Chem.* 1 (1973), Nr. 21, S. 22–30.
- [191] Narziß, L.; Miedaner, H.; Graf, H.: Carbonyle und Alterung des Bieres Teil 1: Analytik. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 38 (1985), Nr. 10, S. 396–402.
- [192] Narziß, L.; Miedaner, H.; Graf, H.: Carbonyle und Alterung des Bieres Teil 2: Einfluss einiger technologischer Parameter. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 38 (1985), Nr. 12, S. 472–477.
- [193] Thum, B.; Miedaner, H.; Narziß, L.; Back, W.: Bildung von "Alterungscarbonylen" – mögliche Mechanismen und Bedeutung bei der Bierlagerung. In: European Brewery Convention: *Proceedings of the 25th Congress*. Brussels, 1995, S. 491–498.
- [194] Back, W.: Biologische Säuerung. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 41 (1988), S. 152–155.
- [195] Back, W.: *Farbatlas und Handbuch der Getränkebiologie, Teil 1. Kultivierung/Methoden, Brauerei, Winzerei*. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl, 1994.
- [196] Narziss, L.; Back, W.; Leibhard, M.: Optimierung biologischer Verfahren zur Herstellung von alkoholfreiem Bier mittels geeigneter Kulturen. In: *Brauwelt* 45 (1989), Nr. S. 2206–2214.
- [197] Gottwald, W.: *Statistik für Anwender*. Weinheim: Wiley-VCH Verlag, 2000.
- [198] Kraber, S.; Whitcomb, P.; Andersen, M.: *Handbook for Experimenters*. Minneapolis: Stat-Ease, Inc., 2005.
- [199] Thiele, F.: *Einfluss der Hefevitalität und der Gärparameter auf die Stoffwechselprodukte der Hefe und auf die Geschmacksstabilität*. München, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Dissertation, 2006.
- [200] Brown, A. K.; Hammond, J. R. M.: Flavour control in small-scale beer fermentations. In: *Trans IChemE* 81 C (2003), S. 40–49.
- [201] Pfenninger, H. B.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band I*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 1997.
- [202] Pfenninger, H. B.: *Brautechnische Analysenmethoden, Band II*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 2002.
- [203] Mader, F.: *Ermittlung geschmacklich relevanter Faktoren zur frühen Bewertung von Braugersten-Neuzüchtungen*. München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1998.
- [204] *Technical Information Bulletin AL-180: Diazald, MNNG and Diazomethane Generators* <[http://www.sigmaaldrich.com/aldrich/bulletin/al\\_techbull\\_al180, pdf](http://www.sigmaaldrich.com/aldrich/bulletin/al_techbull_al180.pdf)> (2004-11-05). Sigma Aldrich Co. (ed.), 2003.
- [205] Kermasha, S.; Metche, M.: Characterization of Seed Lipxygenase from *Phaseolus Vulgaris* cv. *Haricot*. In: *Journal of Food Science* 51 (1986), S. 1224–1227.

- [206] Tietz, N. W.; Fiereck, E. A.: A specific method for Serum Lipase determination. In: *Clinica Chimica Acta* (1966), S. 352–358.
- [207] Surrey, K.: Spectrophotometric method for determination of lipoxidase activity. In: *Plant Physiol.* 39 (1964), S. 65–70.
- [208] *EBC-Analytica Kap. 13.10.* Lauf a. d. Pegnitz: Fachverlag Hans Carl, 1998.
- [209] Meilgaard, M. C.; Dalglish, C. E.; Clapperton, J. F.: Sammlung beschreibender Ausdrücke für die objektive sensorische Beschreibung von Bier (II). In: *Brauwissenschaft* 32 (1979), Nr. 2, S. 33–40.
- [210] Burberg, F.; Zarnkow, M.; Back, W.: Apparative Möglichkeiten der Malz-, Würze- und Bierbereitung. In: *Brauwelt* 146 (2006), Nr. 18, S. 536–539.
- [211] Kattein, U.; Kreis, S.; Zarnkow, M.; Hartmann, K.; Back, W.: Ergebnisse der halbtechnischen Versuche mit neuen Braugerstensorten der Ernte 2004 im Rahmen des Berliner Programms. In: *Braugersten Jahrbuch Bd. 42.* Eichenau Selbstverlag: Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaues im Bundesgebiet e. V. (Hrsg.), 2004.
- [212] Kattein, U.; Kreis, S.; Zarnkow, M.; Hartmann, K.; Back, W.: Ergebnisse der halbtechnischen Versuche mit neuen Braugerstensorten der Ernte 2004 im Rahmen des Berliner Programms. In: *Braugersten Jahrbuch Bd. 43.* Eichenau Selbstverlag: Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaues im Bundesgebiet e. V. (Hrsg.), 2005.
- [213] Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaues im Bundesgebiet e. V. (Hrsg.): *Braugersten Jahrbuch* 2006. Eichenau.
- [214] Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaues im Bundesgebiet e. V. (Hrsg.): *Braugersten Jahrbuch* 2004. Eichenau.
- [215] Arbeitsgemeinschaft zur Förderung des Qualitätsgerstenanbaues im Bundesgebiet e. V. (Hrsg.): *Braugersten Jahrbuch* 2005. Eichenau.
- [216] Schütz, M.; Hartmann, K.; Herrmann, M.; Keßler, M.; Kreis, S.; Krottenthaler, M.; Mezger, R.; Schneeberger, M.; Thiele, F.; Zarnkow, M.; Back, W.: Technologie und Analytik–Teil I: Analytische Kontrollmöglichkeiten zur Optimierung technologischer Prozesse In: *Brauwelt* 146 (2006), Nr. 8/9, S. 312–319.
- [217] Römpp, H.: *Chemie Lexikon.* Stuttgart: Georg Thieme, 1993.
- [218] Mezger, R.: *Betrachtung moderener Würzekochsysteme bezüglich ihres Einflusses auf technologisch und physiologisch bedeutende Würzeinhaltsstoffe.* München, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, Dissertation, 2006.
- [219] Feussner, I.; Hause, B.; Nellen, A.; Wasternack, C.; Kindl, H.: Lipid-body lipoxygenase is expressed in cotyledons during germination prior other lipoxygenase forms. In: *Planta* 198 (1996), Nr. 288–293.
- [220] Forster, C.: *Der Einfluss der Darrtechnologie auf die Malz- und Bierqualität.* München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1996.
- [221] Back, W.; Forster, C.; Krottenthaler, M.; Lehmann, M.; Sacher, B.; Thum, B.: Neue Erkenntnisse zur Verbesserung der Geschmacksstabilität In: *Brauwelt* 38 (1997), S. 1677–1692.
- [222] Takahashi, Y.: *Pilotversuche über den Einfluss der verschiedenen Maischparameter auf die Eigenschaften der Würze und des Bieres unter*

- besonderer Berücksichtigung der Geschmacksstabilität.* München, Technische Universität München, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Dissertation, 1996.
- [223] Narziss, L.; Miedaner, H.; Eichhorn, P.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität des Bieres. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 52 (1999), Nr. 7-8, S. 122–122.
- [224] Narziss, L.; Miedaner, H.; Eichhorn, P.; Graf, H.: Technological approach to improve flavour stability. In: *Master Brewers Association of the Americas Technical Quarterly* 30 (1993), Nr. 2, S. 48–53.
- [225] Miedaner, H.; Narziss, L.; Schneider, F. P.: Influence of evaporation on wort and beer quality. In: European Brewery Convention: *EBC Monograph 18*. 1991, S. 37–43.

## 8 Anhang

|       | Versuchsreihe zur Bestimmung der Lipase-Aktivität |      |                      |             | Versuchsreihe zur Bestimmung der Summe der Fettsäurehydroperoxide |      |                      |  |
|-------|---|------|----------------------|-------------|---|------|----------------------|--|
|       | mit Maischesäuerung                               |      | ohne Maischesäuerung |             | mit Maischesäuerung   |      | ohne Maischesäuerung |  |
| 45 °C | 10. Minute  | 5,33 | 5,61                 | 2. Minute   | 5,10  | 5,63 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,47 | 5,68                 | 20. Minute  | 5,43  | 5,63 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,47 | 5,79                 | 40. Minute  | 5,40  | 5,66 |                      |  |
|       |   |      |                      | 60. Minute  | 5,42  | 5,78 |                      |  |
| 50 °C |   |      |                      | 80. Minute  | 5,46  | 5,82 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,33 | 5,60                 | 100. Minute | 5,48  | 5,70 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,47 | 5,70                 | 2. Minute   | 5,28  | 5,65 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,47 | 5,79                 | 20. Minute  | 5,30  | 5,66 |                      |  |
| 55 °C |   |      |                      | 40. Minute  | 5,45  | 5,66 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,35 | 5,79                 | 60. Minute  | 5,33  | 5,74 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,37 | 5,78                 | 80. Minute  | 5,36  | 5,59 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,42 | 5,74                 | 100. Minute | 5,30  | 5,59 |                      |  |
| 60 °C |   |      |                      | 2. Minute   | 5,10  | 5,51 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,28 | 5,63                 | 20. Minute  | 5,20  | 5,73 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,29 | 5,65                 | 40. Minute  | 5,25  | 5,67 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,30 | 5,63                 | 60. Minute  | 5,30  | 5,58 |                      |  |
| 65 °C |   |      |                      | 80. Minute  | 5,25  | 5,53 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,26 | 5,55                 | 100. Minute | 5,23  | 5,55 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,25 | 5,62                 | 2. Minute   | 5,18  | 5,68 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,23 | 5,55                 | 20. Minute  | 5,21  | 5,68 |                      |  |
| 70 °C |   |      |                      | 40. Minute  | 5,21  | 5,52 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,33 | 5,68                 | 60. Minute  | 5,19  | 5,51 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,31 | 5,68                 | 80. Minute  | 5,20  | 5,53 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,26 | 5,58                 | 100. Minute | 5,20  | 5,48 |                      |  |
| 75 °C |   |      |                      | 2. Minute   | 5,18  | 5,68 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,33 | 5,69                 | 20. Minute  | 5,21  | 5,61 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,31 | 5,65                 | 40. Minute  | 5,25  | 5,64 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,32 | 5,89                 | 60. Minute  | 5,24  | 5,54 |                      |  |
| 80 °C |   |      |                      | 80. Minute  | 5,18  | 5,50 |                      |  |
|       | 10. Minute  | 5,32 | 5,67                 | 100. Minute | 5,20  | 5,47 |                      |  |
|       | 30. Minute  | 5,31 | 5,62                 | 2. Minute   | 5,25  | 5,65 |                      |  |
|       | 60. Minute  | 5,30 | 5,57                 | 20. Minute  | 5,32  | 5,58 |                      |  |
|       |   |      | 40. Minute           | 5,32        | 5,62  |      |                      |  |
|       |   |      | 60. Minute           | 5,32        | 5,89  |      |                      |  |
|       |   |      | 80. Minute           | 5,25        | 5,52  |      |                      |  |
|       |   |      | 100. Minute          | 5,19        | 5,48  |      |                      |  |
|       |   |      | 2. Minute            | 5,28        | 5,56  |      |                      |  |
|       |   |      | 20. Minute           | 5,20        | 5,53  |      |                      |  |
|       |   |      | 40. Minute           | 5,25        | 5,51  |      |                      |  |
|       |   |      | 60. Minute           | 5,16        | 5,48  |      |                      |  |
|       |   |      | 80. Minute           | 5,21        | 5,46  |      |                      |  |
|       |   |      | 100. Minute          | 5,16        | 5,45  |      |                      |  |

Tab. AH 1: pH-Werte der isothermen Maischen zur Bestimmung der Lipase- und Lipoxygenase Aktivitätsmaxima

| mit Maischesäuerung<br>Probenahmezeitpunkt in Minuten | Temperatur in °C |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|   | 40               | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    |
| 2. Minute   | 91,7             | 68,4  | 73,6  | 59,2  | 98,2  | 97,2  | 133,6 | 68,8  | 70,8  |
| 20. Minute  | 106,8            | 69,5  | 69,0  | 89,8  | 146,2 | 103,2 | 72,3  | 91,7  | 112,3 |
| 40. Minute  | 102,2            | 85,6  | 79,8  | 119,6 | 206,7 | 123,4 | 79,7  | 107,5 | 119,0 |
| 60. Minute  | 112,6            | 98,3  | 81,3  | 162,9 | 193,5 | 108,8 | 87,5  | 132,7 | 140,9 |
| 80. Minute  | 101,2            | 116,9 | 108,9 | 177,8 | 192,8 | 121,3 | 76,2  | 129,4 | 135,6 |
| 100. Minute   | 124,7            | 131,9 | 138,5 | 184,8 | 217,0 | 99,4  | 70,2  | 145,7 | 154,9 |
| Mittelwert  | 106,5            | 95,1  | 91,8  | 132,3 | 175,7 | 108,9 | 86,6  | 112,7 | 122,3 |

| ohne Maischesäuerung<br>Probenahmezeitpunkt in Minuten | Temperatur in °C |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  | 40               | 45    | 50    | 55    | 60    | 65    | 70    | 75    | 80    |
| 2. Minute  | 131,7            | 66,9  | 62,1  | 47,4  | 118,6 | 109,9 | 252,0 | 123,5 | 120,8 |
| 20. Minute   | 118,8            | 55,0  | 63,1  | 117,5 | 154,5 | 114,4 | 100,0 | 177,0 | 222,9 |
| 40. Minute   | 103,0            | 63,8  | 74,2  | 135,5 | 147,3 | 136,1 | 157,0 | 163,8 | 156,6 |
| 60. Minute   | 106,1            | 77,0  | 90,7  | 179,7 | 179,5 | 120,7 | 96,8  | 197,0 | 167,7 |
| 80. Minute   | 121,4            | 91,7  | 94,4  | 185,7 | 186,3 | 141,0 | 90,3  | 175,0 | 180,8 |
| 100. Minute  | 112,8            | 104,5 | 108,4 | 217,0 | 179,7 | 114,8 | 82,1  | 199,6 | 179,3 |
| Mittelwert   | 115,6            | 76,5  | 82,1  | 147,2 | 161,0 | 122,8 | 129,7 | 172,6 | 171,3 |

**Tab. AH 2: Konzentration der C18:2-Hydroperoxide in µM/l über den Maischprozess (isotherme Maischen)**

| mit Maischesäuerung<br>Probenahmezeitpunkt in Minuten | Temperatur in °C |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|   | 40               | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   | 80   |
| 2. Minute   | 16,3             | 16,0 | 15,6 | 14,5 | 27,5 | 26,4 | 36,0 | 13,8 | 14,8 |
| 20. Minute  | 20,5             | 18,9 | 18,6 | 23,2 | 34,5 | 25,4 | 16,0 | 14,6 | 21,0 |
| 40. Minute  | 22,8             | 22,8 | 24,6 | 28,0 | 44,0 | 28,9 | 16,9 | 19,3 | 23,0 |
| 60. Minute  | 28,9             | 26,6 | 25,4 | 39,2 | 45,7 | 27,1 | 18,3 | 26,5 | 27,7 |
| 80. Minute  | 26,6             | 31,0 | 32,7 | 42,9 | 45,4 | 27,9 | 16,5 | 25,7 | 27,0 |
| 100. Minute   | 30,8             | 35,6 | 42,3 | 41,6 | 50,1 | 24,5 | 15,2 | 28,6 | 31,6 |
| Mittelwert  | 24,3             | 25,2 | 26,5 | 31,6 | 41,2 | 26,7 | 19,8 | 21,4 | 24,2 |

| ohne Maischesäuerung<br>Probenahmezeitpunkt in Minuten | Temperatur in °C |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|  | 40               | 45   | 50   | 55   | 60   | 65   | 70   | 75   | 80   |
| 2. Minute  | 23,7             | 14,3 | 15,7 | 12,5 | 33,5 | 26,8 | 64,5 | 28,6 | 30,7 |
| 20. Minute   | 22,8             | 13,0 | 19,2 | 31,8 | 41,2 | 31,8 | 23,5 | 32,3 | 45,4 |
| 40. Minute   | 21,1             | 17,5 | 24,1 | 32,9 | 38,7 | 34,1 | 32,3 | 31,3 | 33,5 |
| 60. Minute   | 25,1             | 22,2 | 30,0 | 48,8 | 50,3 | 32,8 | 22,4 | 39,8 | 34,5 |
| 80. Minute   | 29,8             | 27,2 | 36,9 | 49,1 | 51,0 | 36,1 | 21,9 | 34,7 | 37,7 |
| 100. Minute  | 28,4             | 32,8 | 41,0 | 55,2 | 49,3 | 31,5 | 19,9 | 40,0 | 37,3 |
| Mittelwert   | 25,2             | 21,2 | 27,8 | 38,4 | 44,0 | 32,2 | 30,7 | 34,4 | 36,5 |

**Tab. AH 3: Konzentration der C18:3-Hydroperoxide in µM/l über den Maischprozess (isotherme Maischen)**

|                          |                 | Erbach   |        |         |       | Fronhofen |        |         |       | Garching |        |         |       |
|--------------------------|-----------------|----------|--------|---------|-------|-----------|--------|---------|-------|----------|--------|---------|-------|
|                          |                 | Pasadena | Auriga | Braemar | Ursa  | Pasadena  | Auriga | Braemar | Ursa  | Pasadena | Auriga | Braemar | Ursa  |
| Rohprotein               | % wfr.          | 8,5      | 8,9    | 8,9     | 8,9   | 7,8       | 8,8    | 8,0     | 8,3   | 10,2     | 10,5   | 10,6    | 10,3  |
| löslicher Stickstoff     | mg/100 g MTrs.  | 544      | 645    | 568     | 629   | 532       | 706    | 621     | 605   | 691      | 740    | 623     | 798   |
| Eiweißlösungsgrad        | %               | 40,4     | 45,3   | 39,9    | 44,2  | 42,6      | 50,1   | 47,9    | 45,6  | 42,3     | 44,0   | 39,7    | 48,4  |
| freier α-Aminostickstoff | mg/100 g MTrs.  | 110      | 143    | 112     | 136   | 124       | 178    | 145     | 138   | 150      | 174    | 137     | 195   |
| VZ 45 °C                 | %               | 33,1     | 37,9   | 36,5    | 33,6  | 38,6      | 44,2   | 41,3    | 38,6  | 38,7     | 43,0   | 39,8    | 44,4  |
| Viskosität               | mPa s, 8,6 GG-% | 1,594    | 1,468  | 1,540   | 1,516 | 1,504     | 1,484  | 1,497   | 1,508 | 1,424    | 1,445  | 1,424   | 1,427 |
| Viskosität (65 °C)       | mPa s, 8,6 GG-% | 1,742    | 1,505  | 1,583   | 1,685 | 1,552     | 1,589  | 1,544   | 1,644 | 1,457    | 1,462  | 1,465   | 1,445 |
| Friabilimeterwert        | %               | 88,3     | 94,6   | 92,4    | 90,1  | 96,9      | 94,0   | 96,1    | 96,2  | 98,2     | 98,6   | 97,0    | 99,1  |
| ganzgläserige Körner     | %               | 0,2      | n. n.  | n. n.   | 0,2   | 0,1       | 0,1    | n. n.   | 0,2   | 0,2      | 0,2    | 0,2     | 0,3   |
| Homogenität (Carlsberg)  | %               | —        | —      | —       | —     | 84        | —      | 81      | 78    | 83       | —      | 83      | 87    |
| Modifikation (Carlsberg) | %               | —        | —      | —       | —     | 94        | —      | 93      | 92    | 95       | —      | 96      | 97    |
| β-Glucan (Kongr.M.)      | mg/l            | 352      | 155    | 248     | 211   | 178       | 130    | 239     | 210   | 68       | 62     | 46      | 27    |
| β-Glucan (65 °C-Maische) | mg/l            | 504      | 245    | 380     | 470   | 215       | 263    | 312     | 291   | 189      | 113    | 47      | 50    |
| Extrakt                  | % wfr.          | 82,8     | 81,9   | 82,7    | 82,5  | 82,9      | 83,6   | 84,4    | 82,7  | 80,6     | 81,1   | 81,3    | 81,0  |
| Endvergärungsgrad        | %               | 77,8     | 80,9   | 77,1    | 76,4  | 80,0      | 82,3   | 78,0    | 78,5  | 82,2     | 81,8   | 79,4    | 80,6  |
| Verzuckerungszeit        | min             | < 10     | < 10   | < 10    | < 10  | < 10      | < 10   | < 10    | < 10  | < 10     | < 10   | < 10    | < 10  |
| Ablauf                   | klar            | klar     | klar   | opale   | opale | klar      | klar   | klar    | klar  | klar     | klar   | klar    | opale |
| TBZ                      |                 | 11,0     | 12,0   | 13,0    | 11,0  | 12,0      | 21,0   | 16,0    | 11,0  | 11,0     | 14,0   | 13,0    | 14,0  |
| Würzfarbe, fotometrisch  | EBC             | 2,8      | 2,5    | 3,6     | 2,9   | 3,1       | 3,1    | 3,3     | 2,8   | 2,7      | 2,8    | 3,1     | 3,5   |
| Kochfarbe, fotometrisch  | EBC             | 5,7      | 5,2    | 5,4     | 5,7   | 5,2       | 5,9    | 6,1     | 5,7   | 5,7      | 5,4    | 5,9     | 6,2   |
| pH                       |                 | 5,93     | 5,87   | 5,98    | 5,90  | 5,98      | 5,82   | 5,89    | 5,91  | 5,87     | 5,91   | 5,98    | 5,95  |
| Rohfettgehalt            | % MTrs.         | —        | —      | —       | —     | 1,3       | 1,5    | 1,5     | 1,5   | 1,3      | 1,3    | 1,3     | 1,3   |
| LOX-Aktivität            | U/ml            | —        | —      | —       | —     | 32,6      | —      | 26,7    | 18,4  | 20,0     | —      | 25,7    | 11,9  |
| DMS-Vorläufer            | ppm, lfr.       | 2,7      | 7,8    | 3,6     | 5,5   | 2,8       | 5,1    | 2,9     | 2,9   | 5,3      | 7,1    | 4,0     | 6,5   |

Tab. AH 4: Analysen der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2002

|                          |                 | Erbach   |          |         |        | Weißensee |          |         |        | Fronhofen |          |         |        |
|--------------------------|-----------------|----------|----------|---------|--------|-----------|----------|---------|--------|-----------|----------|---------|--------|
|                          |                 | Pasadena | Bellevue | Margret | Marnie | Pasadena  | Bellevue | Margret | Marnie | Pasadena  | Bellevue | Margret | Marnie |
| Rohprotein               | % wfr.          | 9,1      | 10,2     | 9,7     | 10,5   | 11,1      | 11,7     | 10,7    | 12,8   | 9,5       | 12,1     | 10,7    | 11,3   |
| löslicher Stickstoff     | mg/100 g MTrs.  | 565      | 695      | 634     | 758    | 626       | 644      | 663     | 767    | 575       | 757      | 703     | 775    |
| Eiweißlösungsgrad        | %               | 38,8     | 42,6     | 40,9    | 45,1   | 35,2      | 34,4     | 39,7    | 37,5   | 37,8      | 39,1     | 41,1    | 42,9   |
| freier α-Aminostickstoff | mg/100 g MTrs.  | 120      | 142      | 133     | 150    | 113       | 137      | 146     | 149    | 122       | 148      | 153     | 137    |
| VZ 45 °C                 | %               | 32,1     | 36,3     | 38,1    | 38,8   | 33,3      | 36       | 41,7    | 39     | 36,5      | 40,2     | 37,7    | 41,1   |
| Viskosität               | mPa s, 8,6 GG-% | 1,467    | 1,453    | 1,506   | 1,478  | 1,493     | 1,463    | 1,464   | 1,49   | 1,48      | 1,445    | 1,493   | 1,5    |
| Viskosität (65 °C)       | mPa s, 8,6 GG-% | 1,502    | 1,481    | 1,651   | 1,515  | 1,633     | 1,503    | 1,617   | 1,639  | 1,579     | 1,466    | 1,573   | 1,532  |
| Friabilimeterwert        | %               | 96,4     | 98       | 88,6    | 94,6   | 85,8      | 90,6     | 79,7    | 90,4   | 92,1      | 95,4     | 86,5    | 93,2   |
| ganzgläserige Körner     | %               | 0,3      | 0,3      | 0,3     | n. n.  | n. n.     | n. n.    | 0,1     | 0,1    | 0,5       | 0,2      | 0,4     | 0,5    |
| Homogenität (Carlsberg)  | %               | 80       | 73       | 71      | 75     | 78        | 84       | 72      | 70     | 83        | 88       | 78      | 78     |
| Modifikation (Carlsberg) | %               | 93       | 94       | 89      | 93     | 93        | 95       | 90      | 92     | 95        | 98       | 94      | 97     |
| β-Glucan (Kongr.M.)      | mg/l            | 181      | 107      | 335     | 198    | 290       | 98       | 212     | 202    | 227       | 83       | 245     | 200    |
| β-Glucan (65 °C-Maische) | mg/l            | 205      | 171      | 498     | 299    | 401       | 200      | 360     | 350    | 352       | 128      | 362     | 320    |
| Extrakt                  | % wfr.          | 82,2     | 82,3     | 82,3    | 82,7   | 80,5      | 81,4     | 82      | 80,9   | 83,1      | 81,5     | 82,7    | 82,5   |
| Endvergärungsgrad        | %               | 82,6     | 81,9     | 80,5    | 80,8   | 81,2      | 80,9     | 82,4    | 79,2   | 81,2      | 80,1     | 79,4    | 78,8   |
| Verzuckerungszeit        | min             | < 10     | < 10     | < 10    | < 10   | < 10      | < 10     | < 10    | < 10   | < 10      | < 10     | < 10    | < 10   |
| Ablauf                   | klar            | klar     | klar     | opale   | opale  | klar      | klar     | klar    | klar   | klar      | klar     | klar    | opale  |
| TBZ                      |                 | 12       | 14       | 16      | 18     | 13        | 13       | 18      | 12     | 14        | 19       | 23      | 13     |
| Würzfarbe, fotometrisch  | EBC             | 2,4      | 2,4      | 2,2     | 3,1    | 2,8       | 3,1      | 2,5     | 3,2    | 3         | 3        | 2,9     | 3,5    |
| Kochfarbe, fotometrisch  | EBC             | 5,6      | 6        | 5,3     | 5,9    | 5,9       | 5,6      | 5,5     | 5,8    | 5,9       | 5,6      | 5,9     | 6      |
| pH                       |                 | 6,01     | 5,98     | 5,98    | 5,99   | 5,98      | 5,96     | 5,93    | 5,98   | 5,91      | 5,85     | 5,91    | 5,95   |
| Rohfettgehalt            | % MTrs.         | 1,5      | 1,6      | 1,7     | 1,6    | 1,7       | 1,5      | 2,1     | 1,7    | 1,9       | 1,6      | —       | —      |
| LOX-Aktivität            | U/ml            | 12,5     | 9,8      | 12,5    | 30,3   | 12,8      | 4,6      | 21,3    | 43,0   | —         | —        | —       | —      |
| DMS-Vorläufer            | ppm, lfr.       | 3,1      | 6,6      | 4,4     | 4,4    | 3,8       | 6,5      | 5,2     | 5,2    | 3,2       | 4,4      | 3,1     | 2,1    |

Tab. AH 5: Analysen der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003

| Sorte/Standort   | Pasadena<br>Fronhofen | Pasadena<br>Garching | Ursa<br>Fronhofen | Ursa<br>Garching | Braemar<br>Fronhofen | Braemar<br>Garching |
|--|-----------------------|----------------------|-------------------|------------------|----------------------|---------------------|
| LOX-Aktivität in U/ml  | 33                    | 20                   | 18                | 12               | 27                   | 26                  |
| Hydroperoxid-abbauende Enzymaktivität in %<br>(bez. auf den höchsten Messwert) | 90                    | 100                  | 69                | 75               | 63                   | 70                  |

Tab. AH 6: Aktivität der Lipoxygenase und des hydroperoxidabbauenden Enzyms der Berliner Programm-Malze Ernte 2002

| Probenahmezeitpunkt | Kongressmaisverfahren/mit Maischesäuerung |       |         |          |      |         | Kongressmaisverfahren/ohne Maischesäuerung |       |         |          |       |         |
|---------------------|---|-------|---------|----------|------|---------|--|-------|---------|----------|-------|---------|
|                     | Fronhofen                                 |       |         | Garching |      |         | Fronhofen                                  |       |         | Garching |       |         |
|                     | Pasadena                                  | Ursa  | Braemar | Pasadena | Ursa | Braemar | Pasadena                                   | Ursa  | Braemar | Pasadena | Ursa  | Braemar |
| 2. Minute           | 69,3                                      | 72,1  | 85,1    | 103,7    | 68,5 | 84,4    | 57,8                                       | 67,7  | 53,4    | 111,4    | 55,6  | 90,7    |
| 25. Minute          | 85,5                                      | 62,0  | 75,4    | 158,7    | 83,8 | 79,1    | 71,0                                       | 63,8  | 81,0    | 128,7    | 63,8  | 85,1    |
| 60. Minute          | 126,6                                     | 195,5 | 143,6   | 84,2     | 73,8 | 107,8   | 189,8                                      | 109,1 | 137,1   | 135,9    | 109,8 | 99,3    |
| 80. Minute          | 118,4                                     | 145,8 | 140,0   | 160,2    | 65,5 | 143,9   | 181,0                                      | 87,6  | 129,6   | 165,1    | 101,1 | 125,8   |
| 100. Minute         | 142,7                                     | 122,2 | 160,6   | 175,9    | 67,9 | 167,1   | 191,5                                      | 99,3  | 139,1   | 179,4    | 100,1 | 138,4   |
| 120. Minute         | 248,2                                     | 118,9 | 216,5   | 278,6    | 71,9 | 226,7   | 350,9                                      | 107,3 | 220,9   | 253,4    | 97,0  | 196,8   |

| Probenahmezeitpunkt | Hochkurzmaisverfahren/mit Maischesäuerung |       |         |          |       |         | Hochkurzmaisverfahren/ohne Maischesäuerung |       |         |          |       |         |
|---------------------|---|-------|---------|----------|-------|---------|--|-------|---------|----------|-------|---------|
|                     | Fronhofen                                 |       |         | Garching |       |         | Fronhofen                                  |       |         | Garching |       |         |
|                     | Pasadena                                  | Ursa  | Braemar | Pasadena | Ursa  | Braemar | Pasadena                                   | Ursa  | Braemar | Pasadena | Ursa  | Braemar |
| 2. Minute           | 155,9                                     | 127,7 | 189,4   | 112,1    | 100,1 | 107,5   | 228,1                                      | 212,7 | 228,1   | 130,6    | 127,2 | 71,2    |
| 25. Minute          | 185,9                                     | 183,1 | 240,2   | 150,6    | 113,3 | 138,8   | 175,4                                      | 191,3 | 201,5   | 122,7    | 119,6 | 116,1   |
| 60. Minute          | 157,3                                     | 192,5 | 207,0   | 128,7    | 117,3 | 131,0   | 184,5                                      | 204,6 | 216,0   | 140,7    | 127,8 | 131,2   |
| 80. Minute          | 193,2                                     | 136,2 | 228,7   | 119,6    | 94,6  | 149,7   | 171,1                                      | 170,3 | 190,0   | 133,8    | 121,1 | 125,3   |
| 100. Minute         | 175,4                                     | 82,2  | 122,1   | 110,9    | 75,0  | 137,5   | 173,5                                      | 181,7 | 164,0   | 123,8    | 119,2 | 123,1   |
| 120. Minute         | 214,4                                     | 147,3 | 199,7   | 168,5    | 75,9  | 220,6   | 304,3                                      | 228,0 | 233,7   | 230,7    | 124,9 | 215,3   |

**Tab. AH 7: Summe der C18:2-Hydroperoxide in µM/l im Vergleich HK-MV und KG-MV**

| Probenahmezeitpunkt | Kongressmaisverfahren/mit Maischesäuerung |      |         |          |      |         | Kongressmaisverfahren/ohne Maischesäuerung |      |         |          |      |         |
|---------------------|---|------|---------|----------|------|---------|--|------|---------|----------|------|---------|
|                     | Fronhofen                                 |      |         | Garching |      |         | Fronhofen                                  |      |         | Garching |      |         |
|                     | Pasadena                                  | Ursa | Braemar | Pasadena | Ursa | Braemar | Pasadena                                   | Ursa | Braemar | Pasadena | Ursa | Braemar |
| 2. Minute           | 15,0                                      | 12,8 | 19,3    | 16,1     | 15,1 | 16,8    | 15,1                                       | 16,5 | 13,5    | 20,5     | 14,6 | 18,4    |
| 25. Minute          | 24,7                                      | 22,8 | 20,2    | 34,5     | 17,4 | 17,5    | 23,5                                       | 20,0 | 22,3    | 31,2     | 20,3 | 20,3    |
| 60. Minute          | 33,9                                      | 17,8 | 41,0    | 17,9     | 49,7 | 21,6    | 56,2                                       | 35,3 | 42,0    | 32,7     | 27,3 | 23,5    |
| 80. Minute          | 37,3                                      | 16,5 | 38,5    | 35,5     | 39,5 | 31,7    | 60,2                                       | 27,9 | 42,1    | 42,7     | 24,8 | 29,9    |
| 100. Minute         | 40,3                                      | 17,0 | 43,4    | 40,5     | 33,6 | 38,8    | 57,6                                       | 34,1 | 44,1    | 45,8     | 26,0 | 36,5    |
| 120. Minute         | 64,3                                      | 17,0 | 53,9    | 62,4     | 33,3 | 52,7    | 105,5                                      | 35,1 | 69,4    | 68,3     | 25,5 | 54,6    |

| Probenahmezeitpunkt | Hochkurzmaisverfahren/mit Maischesäuerung |      |         |          |      |         | Hochkurzmaisverfahren/ohne Maischesäuerung |      |         |          |      |         |
|---------------------|---|------|---------|----------|------|---------|--|------|---------|----------|------|---------|
|                     | Fronhofen                                 |      |         | Garching |      |         | Fronhofen                                  |      |         | Garching |      |         |
|                     | Pasadena                                  | Ursa | Braemar | Pasadena | Ursa | Braemar | Pasadena                                   | Ursa | Braemar | Pasadena | Ursa | Braemar |
| 2. Minute           | 41,3                                      | 36,4 | 51,6    | 22,2     | 24,6 | 24,1    | 64,6                                       | 62,0 | 68,9    | 30,2     | 34,3 | 12,2    |
| 25. Minute          | 45,6                                      | 53,0 | 58,3    | 30,4     | 26,1 | 33,8    | 52,1                                       | 57,0 | 63,0    | 28,8     | 30,8 | 29,1    |
| 60. Minute          | 40,5                                      | 58,0 | 53,0    | 26,7     | 27,7 | 35,3    | 53,6                                       | 62,0 | 67,1    | 32,5     | 32,2 | 35,6    |
| 80. Minute          | 57,5                                      | 42,1 | 55,7    | 22,6     | 20,8 | 33,4    | 44,4                                       | 53,9 | 53,9    | 27,1     | 28,0 | 31,8    |
| 100. Minute         | 55,6                                      | 23,4 | 30,9    | 19,6     | 14,4 | 28,5    | 54,5                                       | 62,3 | 47,1    | 24,8     | 27,4 | 28,2    |
| 120. Minute         | 46,8                                      | 40,2 | 47,7    | 29,3     | 13,8 | 45,4    | 77,2                                       | 70,0 | 64,4    | 44,8     | 30,5 | 49,3    |

**Tab. AH 8: Summe der C18:3-Hydroperoxide in µM/l im Vergleich HK-MV und KG-MV**

|                                |                | Berras |       |       | Carafe |       |       | Pasadena |       |       |
|--------------------------------|----------------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Wassergehalt Malz              | %              | 4,6    | 4,2   | 4,3   | 4,4    | 4,4   | 4,5   | 4,5      | 4,5   | 4,6   |
| Extrakt Malz                   | %, lfr.        | 77,7   | 78,6  | 79,4  | 79,4   | 80,2  | 80,5  | 78,5     | 78,6  | 79,3  |
| Extrakt Malz TrS.              | %, wfr.        | 81,4   | 82    | 83    | 83,1   | 83,9  | 84,3  | 82,2     | 82,3  | 83,1  |
| Viskosität (8,6 GG-%)          | mPa s          | 1,621  | 1,551 | 1,551 | 1,541  | 1,478 | 1,435 | 1,646    | 1,546 | 1,461 |
| Viskosität 65 °C (8,6 GG-%)    | mPa s          | 2,207  | 1,82  | 1,58  | 1,922  | 1,632 | 1,479 | 2,35     | 1,899 | 1,578 |
| Friabilimeter Mürbigkeit       | %              | 67,1   | 79,5  | 90,1  | 70,9   | 82,9  | 93,1  | 60,6     | 74,5  | 88,7  |
| Verzuckerungszeit              | min            | < 10   | < 10  | < 10  | < 10   | < 10  | < 10  | < 10     | < 10  | < 10  |
| Ablauf                         | klar/opal      | klar   | klar  | klar  | klar   | klar  | klar  | klar     | klar  | klar  |
| Endvergärungsgrad              | %, schb.       | 80,2   | 81,2  | 82,8  | 81,1   | 81,9  | 82,5  | 78,7     | 80,1  | 82,3  |
| Farbe Fotometer                | EBC            | 3,5    | 4,1   | 5,0   | 3,5    | 3,8   | 4,4   | 4,1      | 4,3   | 4,6   |
| Kochfarbe Fotometer            | EBC            | 4,9    | 5,7   | 7,1   | 4,9    | 5,7   | 6,5   | 5,6      | 6     | 6,8   |
| pH-Wert                        |                | 5,99   | 5,92  | 5,81  | 5,99   | 5,82  | 5,83  | 5,97     | 5,89  | 5,81  |
| Rohprotein Malz                | %, wfr.        | 10,4   | 10,2  | 9,9   | 10,4   | 10,3  | 10    | 10,1     | 9,8   | 9,7   |
| löslicher Stickstoff Malz TrS. | mg/100 g MTrs. | 658    | 708   | 777   | 697    | 802   | 875   | 677      | 736   | 804   |
| Eiweiss-Lösungsgrad            | %              | 39,5   | 43,4  | 49,1  | 41,9   | 48,7  | 54,7  | 41,9     | 46,9  | 51,8  |
| freier Amino-Stickstoff TrS.   | mg/100 g MTrs. | 131    | 150   | 179   | 149    | 181   | 211   | 138      | 163   | 183   |
| Diastatische Kraft             | WK             | 298    | 308   | 329   | 327    | 310   | 305   | 321      | 296   | 298   |
| $\alpha$ -Amylase              | ASBC, wfr.     | 66     | 60    | 60    | 79     | 86    | 88    | 58       | 62    | 73    |
| $\beta$ -Glucan 65 °C          | mg/l           | 925    | 721   | 365   | 820    | 448   | 196   | 939      | 761   | 368   |
| DMS-Vorläufer                  | ppm, lfr.      | 4,1    | 5,5   | 7,5   | 4,9    | 7,6   | 9,2   | 5,2      | 6,5   | 8,6   |
| Rohfettgehalt Malz             | %, MTrs.       | 1,4    | 1,5   | 1,3   | 1,2    | 1,3   | 1,4   | 1,3      | 1,4   | 1,3   |
| LOX-Aktivität                  | U/ml           | 13,3   | 14,1  | 11,7  | 14,05  | 15,3  | 9,0   | 11,7     | 17,6  | 14,7  |

Tab. AH 9: Malzanalyse der Sorten Berras, Carafe und Pasadena (Variation des ELG)

| Sorte  | Berras      |             |             | Carafe      |             |             | Pasadena    |             |             |
|--|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| lösl. Stickstoff in mg/100 g MTrs.           | 658         | 708         | 777         | 697         | 802         | 875         | 667         | 736         | 804         |
| ELG in %                                     | <b>39,5</b> | <b>43,4</b> | <b>49,1</b> | <b>41,9</b> | <b>48,7</b> | <b>54,7</b> | <b>41,9</b> | <b>46,9</b> | <b>51,8</b> |
| 3-Methylbutanal                              | 719         | 1705        | 2647        | 1189        | 2615        | 4260        | 1653        | 2672        | 3222        |
| 2-Methylbutanal                              | 245         | 606         | 1062        | 450         | 947         | 1550        | 590         | 953         | 1217        |
| Methional                                    | 114         | 258         | 446         | 228         | 486         | 742         | 186         | 433         | 433         |
| Benzaldehyd                                  | 4,4         | 6,4         | 11,9        | 4,5         | 8,4         | 13,2        | 6,5         | 8,1         | 8,1         |
| 2-Phenylethanal                              | 288         | 633         | 954         | 474         | 1059        | 1581        | 699         | 1140        | 1259        |
| <b><math>\Sigma</math> Streckeraldehyde</b>  | <b>1371</b> | <b>3208</b> | <b>5120</b> | <b>2345</b> | <b>5115</b> | <b>8146</b> | <b>3134</b> | <b>5206</b> | <b>6138</b> |
| Pentanal                                     | 16          | 22          | 31          | 17          | 18          | 24          | 20          | 19          | 24          |
| Hexanal                                      | 146         | 224         | 358         | 250         | 337         | 503         | 235         | 264         | 328         |
| Heptanal                                     | 13          | 12          | 16          | 11          | 16          | 21          | 11          | 10          | 13          |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal                         | 51          | 43          | 85          | 54          | 113         | 139         | 25          | 43          | 64          |
| $\gamma$ -Nonalacton                         | 4,9         | 4,1         | 4,0         | 3,4         | 4,2         | 6,8         | 2,7         | 4,2         | 5,9         |
| (E)-2-Nonenal                                | 25          | 26          | 56          | 26          | 76          | 120         | 12          | 23          | 35          |
| <b><math>\Sigma</math> Fettabbauprodukte</b> | <b>256</b>  | <b>330</b>  | <b>549</b>  | <b>361</b>  | <b>563</b>  | <b>812</b>  | <b>306</b>  | <b>364</b>  | <b>469</b>  |
| 2-Furfural                                   | 119         | 287         | 466         | 179         | 375         | 614         | 379         | 558         | 700         |
| 3-Methylbutanol                              | 320         | 489         | 609         | 354         | 541         | 661         | 589         | 600         | 697         |
| 2-Methylbutanol                              | 86          | 138         | 180         | 97          | 151         | 206         | 145         | 159         | 194         |
| 1-Pentanol                                   | 59          | 76          | 74          | 68          | 62          | 71          | 114         | 69          | 74          |
| 1-Octanol                                    | 2,4         | 3,1         | 3,6         | 3,5         | 2,4         | 2,7         | 5,0         | 2,5         | 2,6         |
| 1-Octen-3-ol                                 | 17          | 18          | 20          | 16          | 18          | 18          | 15          | 15          | 15          |
| Phenylethanol                                | 243         | 317         | 368         | 204         | 335         | 382         | 300         | 344         | 390         |

Tab. AH 10: Malzaromastoffe in  $\mu\text{g}/\text{kg}$  der Sorten Berras, Carafe und Pasadena (Variation des ELG)

| Sorte                      | Berras     |            |            | Carafe     |            |            | Pasadena   |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ELG in %                   | 39,5       | 43,4       | 49,1       | 41,9       | 48,7       | 54,7       | 41,9       | 46,9       | 51,8       |
| 3-Methylbutanal            | 56         | 93         | 87         | 47         | 79         | 126        | 58         | 85         | 112        |
| 2-Methylbutanal            | 17         | 26         | 27         | 13         | 21         | 33         | 16         | 22         | 29         |
| Methional                  | n. a.      | n. a.      | 20,0       | n. a.      | 4,8        | 7,1        | 16,0       | 31,0       | 15,0       |
| Benzaldehyd                | 2,2        | 2,5        | 2,2        | 3,6        | 2,4        | 2,8        | 2,6        | 2,6        | 3,4        |
| 2-Phenylethanal            | 89         | 119        | 120        | 106        | 113        | 155        | 97         | 132        | 158        |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>164</b> | <b>241</b> | <b>256</b> | <b>171</b> | <b>220</b> | <b>324</b> | <b>190</b> | <b>272</b> | <b>318</b> |
| Pentanal                   | 10,9       | 6,5        | 9,2        | 9,2        | 6,2        | 5,7        | 4,6        | 4,0        | 4,9        |
| Hexanal                    | 73         | 69         | 55         | 52         | 43         | 53         | 53         | 49         | 48         |
| Heptanal                   | 1,8        | 1,8        | 2,2        | 2,1        | 2,0        | 1,6        | 1,3        | 1,3        | 1,2        |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | n. a.      | n. a.      | 0,5        | 0,7        | 0,4        | 0,5        | Sp.        | 0,3        | Sp.        |
| γ-Nonalacton               | 0,5        | n. a.      | 0,7        | 0,9        | 0,5        | 0,4        | 0,5        | 0,5        | Sp.        |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>86</b>  | <b>77</b>  | <b>68</b>  | <b>65</b>  | <b>52</b>  | <b>61</b>  | <b>59</b>  | <b>55</b>  | <b>54</b>  |
| 2-Furfural                 | 20         | 33         | 39         | 26         | 37         | 60         | 31         | 52         | 79         |
| 3-Methylbutanol            | 11         | 13         | 12         | 10         | 9          | 12         | 13         | 12         | 14         |
| 2-Methylbutanol            | 4,1        | 5,1        | 7,5        | 3,8        | 3,8        | 5,4        | 4,9        | 4,7        | 5,2        |
| 1-Pentanol                 | 17,2       | 16,0       | 13,0       | 20,1       | 13,8       | 15,1       | 15,4       | 11,7       | 15,4       |
| 1-Octanol                  | 0,8        | 1,0        | 0,7        | 1,4        | 0,9        | 1,0        | 1,0        | 0,9        | 12,0       |
| 1-Octen-3-ol               | 2,5        | 2,4        | 2,3        | 2,9        | 2,1        | 2,4        | 2,0        | 2,0        | 2,1        |
| Phenylethanol              | 40         | 55         | 56         | 46         | 39         | 47         | 66         | 60         | 61         |

Tab. AH 11: Würzearomastoffe in µg/l der Sorten Berras, Carafe und Pasadena ohne Maischesäuerung (Variation des ELG)

| Sorte                      | Berras     |            |            | Carafe     |            |            | Pasadena   |            |            |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| ELG in %                   | 39,5       | 43,4       | 49,1       | 41,9       | 48,7       | 54,7       | 41,9       | 46,9       | 51,8       |
| 3-Methylbutanal            | 45         | 57         | 88         | 53         | 87         | 115        | 69         | 91         | 103        |
| 2-Methylbutanal            | 12         | 15         | 28         | 14         | 22         | 29         | 21         | 23         | 27         |
| Methional                  | 33         | 42         | 44         | 26         | 18         | 23         | 22         | 15         | 24         |
| Benzaldehyd                | 2,2        | 3,0        | 2,5        | 2,1        | 3,0        | 4,1        | 2,9        | 2,7        | 2,4        |
| 2-Phenylethanal            | 93         | 123        | 138        | 90         | 144        | 169        | 115        | 147        | 162        |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>186</b> | <b>239</b> | <b>298</b> | <b>186</b> | <b>274</b> | <b>340</b> | <b>230</b> | <b>279</b> | <b>319</b> |
| Pentanal                   | 4,7        | 4,6        | 5,2        | 3,8        | 3,9        | 3,5        | 4,2        | 4,0        | 4,7        |
| Hexanal                    | 57         | 48         | 60         | 52         | 47         | 52         | 65         | 61         | 55         |
| Heptanal                   | 1,7        | 1,6        | 2,1        | 1,3        | 1,3        | 1,5        | 1,1        | 1,1        | 1,6        |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 0,5        | 0,5        | 0,6        | 0,5        | 0,4        | 0,5        | Sp.        | Sp.        | Sp.        |
| γ-Nonalacton               | 0,7        | 0,7        | 0,7        | 0,5        | 0,5        | 0,6        | 0,5        | 0,5        | Sp.        |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>65</b>  | <b>55</b>  | <b>69</b>  | <b>58</b>  | <b>53</b>  | <b>58</b>  | <b>71</b>  | <b>67</b>  | <b>61</b>  |
| 2-Furfural                 | 20         | 31         | 40         | 23         | 46         | 64         | 39         | 60         | 72         |
| 3-Methylbutanol            | 7,0        | 7,6        | 9,1        | 7,4        | 9,0        | 11,0       | 6,1        | 11,0       | 14,0       |
| 2-Methylbutanol            | 2,8        | 3,2        | 3,8        | 3,2        | 4,1        | 5,2        | n. a.      | 4,9        | 6,8        |
| 1-Pentanol                 | 15,7       | 15,2       | 15,4       | 17,4       | 15,2       | 17,1       | 12,5       | 13,9       | 14,0       |
| 1-Octanol                  | 0,7        | 0,9        | 0,8        | 0,8        | 1,0        | 1,4        | 2,3        | 2,1        | 0,7        |
| 1-Octen-3-ol               | 1,3        | 1,3        | 1,3        | 1,1        | 2,2        | 2,8        | 1,1        | 0,9        | 2,2        |
| Phenylethanol              | 34         | 52         | 46         | 32         | 45,0       | 48         | 86         | 52         | 50         |

Tab. AH 12: Würzearomastoffe in µg/l der Sorten Berras, Carafe und Pasadena mit Maischesäuerung (Variation des ELG)

| Mälzungsparameter<br>(Keimzeit, Temperatur, Weichgrad) |               | Scarlett    |             |             |
|--|---------------|-------------|-------------|-------------|
|  |               | 7d 18°C 41% | 7d 18°C 43% | 6d 15°C 46% |
| Wassergehalt Malz                                      | %             | 4,6         | 4,4         | 4,6         |
| Extrakt Malz   | %, lfr.       | 78,2        | 78,3        | 78,8        |
| Extrakt MTrs.  | %, wfr.       | 82          | 81,9        | 82,6        |
| Viskosität (8,6 GG-%)                                  | mPas          | 1,53        | 1,484       | 1,507       |
| Viskosität 65 °C (8,6 GG-%)                            | mPas          | 1,684       | 1,509       | 1,62        |
| Verzuckerungszeit                                      | min.          | < 10        | < 10        | < 10        |
| Ablauf   | klar/opal     | opal        | opal        | opal        |
| Endvergärungsgrad                                      | %, schb.      | 78,8        | 82,9        | 80,3        |
| Farbe Photometer                                       | EBC           | 4           | 3,7         | 4           |
| pH-Wert  |               | 6,06        | 4,6         | 5,98        |
| Rohprotein Malz  | %, wfr.       | 9,5         | 9,2         | 9,1         |
| löslicher Stickstoff Malz TrS.                         | mg/100g MTrs. | 563         | 603         | 667         |
| <b>Eiweiss-Lösungsgrad</b>                             | <b>%</b>      | <b>37,0</b> | <b>41,0</b> | <b>45,8</b> |

**Tab. AH 13: Analysendaten der Sorte Scarlett (Auswahl der drei Mälzungsregime mit Hilfe einer Statistikmälzung)**

| pH-Wert                    | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        | 5,90        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ELG, Einmischtemperatur    | 45 %, 55 °C | 37 %, 55 °C | 37 %, 60 °C | 45 %, 65 °C | 41 %, 65 °C | 37 %, 65 °C | 45 %, 60 °C | 41 %, 55 °C | 41 %, 60 °C |
| 3-Methylbutanal            | 50          | 44          | 28          | 41          | 63          | 19          | 57          | 41          | 51          |
| 2-Methylbutanal            | 14,3        | 13,7        | 8,4         | 11,5        | 18,7        | 5,9         | 16,3        | 12,0        | 14,8        |
| Methional                  | 24,3        | 5,6         | 8,4         | 13,8        | 16,7        | 5,3         | 10,4        | 21,7        | 15,1        |
| Benzaldehyd                | 4,5         | 2,7         | 3,0         | 6,0         | 5,3         | 3,2         | 8,4         | 3,7         | 4,0         |
| 2-Phenylethanal            | 141         | 79          | 76          | 141         | 117         | 60          | 121         | 111         | 94          |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>233</b>  | <b>145</b>  | <b>124</b>  | <b>213</b>  | <b>220</b>  | <b>94</b>   | <b>213</b>  | <b>190</b>  | <b>180</b>  |
| Pentanal                   | 6,3         | 4,3         | 3,8         | 4,0         | 7,4         | 3,8         | 5,3         | 7,9         | 6,3         |
| Hexanal                    | 32          | 33          | 26          | 17          | 51          | 16          | 32          | 39          | 45          |
| Heptanal                   | 1,9         | 0,3         | 2,0         | 0,8         | 2,7         | 1,1         | 1,7         | 2,3         | 1,8         |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 1,2         | 1,0         | 0,6         | 0,5         | 0,6         | 0,4         | 0,8         | 1,3         | 1,4         |
| γ-Nonalacton               | 0,5         | 0,7         | 0,5         | 0,8         | 1,8         | 0,6         | 1,0         | 2,9         | 2,1         |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>42</b>   | <b>39</b>   | <b>33</b>   | <b>23</b>   | <b>64</b>   | <b>22</b>   | <b>41</b>   | <b>54</b>   | <b>56</b>   |
| 2-Pentanon                 | 0,5         | 0,6         | 0,5         | 0,5         | 0,6         | 0,5         | 0,4         | 0,5         | 1,0         |
| 2-Furfural                 | 61          | 30          | 27          | 75          | 54          | 20          | 62          | 44          | 46          |
| 2-Acetylfuran              | 1,0         | 1,0         | 1,2         | Sp.         | 1,3         | 0,5         | 0,7         | 1,2         | 2,0         |
| 3-Methylbutanol            | 23,2        | 18,4        | 8,9         | 10,3        | 18,5        | 4,3         | 12,4        | 36,3        | 21,2        |
| 2-Methylbutanol            | 5,7         | 4,1         | 2,2         | 4,0         | 6,4         | 1,3         | 4,4         | 11,5        | 8,6         |
| 1-Pentanol                 | 24          | 18          | 16          | 15          | 26          | 12          | 19          | 26          | 32          |
| 1-Hexanol                  | 6,2         | 8,3         | 3,1         | 2,2         | 16,2        | 1,7         | 3,6         | 17,1        | 12,3        |
| 1-Octanol                  | 1,7         | n.a.        | n.a.        | n.a.        | 1,5         | n.a.        | n.a.        | 0,9         | 1,2         |
| 1-Octen-3-ol               | 3,2         | 3,9         | 2,3         | 2,3         | 4,1         | 1,9         | 2,6         | 3,0         | 3,4         |
| Phenylethanol              | 58          | 43          | 34          | 47          | 89          | 27          | 46          | 102         | 98          |

**Tab. AH 14: Würzearomastoffe in µg/l der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, ohne Maischesäuerung)**

| pH-Wert                    | 5,30        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ELG, Einmischtemperatur    | 37 %, 55 °C | 45 %, 55 °C | 45 %, 55 °C | 41 %, 60 °C | 37 %, 60 °C | 41 %, 65 °C | 41 %, 60 °C | 37 %, 60 °C | 45 %, 65 °C | 41 %, 55 °C | 37 %, 55 °C |
| 3-Methylbutanal            | 29          | 62          | 60          | 49          | 26          | 42          | 63          | 27          | 48          | 44          | 40          |
| 2-Methylbutanal            | 8,3         | 16,7        | 17,4        | 14,0        | 7,5         | 11,7        | 17,7        | 7,4         | 13,5        | 12,5        | 11,9        |
| Methional                  | 13,2        | 27,3        | 26,2        | 17,4        | 10,0        | 18,7        | 16,0        | 14,4        | 10,5        | 16,6        | 5,5         |
| Benzaldehyd                | 3,9         | 5,1         | 4,6         | 4,5         | 3,0         | 5,7         | 8,8         | 3,1         | 6,3         | 4,2         | 3,0         |
| 2-Phenylethanal            | 101         | 189         | 155         | 115         | 79          | 128         | 106         | 88          | 149         | 107         | 82          |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>156</b>  | <b>300</b>  | <b>263</b>  | <b>200</b>  | <b>126</b>  | <b>205</b>  | <b>211</b>  | <b>140</b>  | <b>228</b>  | <b>185</b>  | <b>143</b>  |
| Pentanal                   | 4,7         | 5,6         | 6,7         | 7,7         | 5,2         | 5,6         | 8,1         | 6,1         | 4,2         | 5,8         | 5,4         |
| Hexanal                    | 32          | 46          | 38          | 55          | 26          | 38          | 59          | 30          | 24          | 44          | 45          |
| Heptanal                   | 2,4         | 2,1         | 2,1         | 2,0         | 1,9         | 1,5         | 2,2         | 2,1         | 1,1         | 2,1         | 3,0         |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 1,1         | 1,3         | 1,3         | 0,9         | 0,7         | 0,7         | 0,8         | 0,7         | 0,5         | 1,2         | 0,7         |
| γ-Nonalacton               | 1,0         | 0,6         | 0,5         | 3,1         | 0,9         | 1,7         | 1,9         | 0,7         | 0,8         | 3,2         | 0,6         |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>41</b>   | <b>55</b>   | <b>48</b>   | <b>69</b>   | <b>35</b>   | <b>47</b>   | <b>72</b>   | <b>40</b>   | <b>30</b>   | <b>57</b>   | <b>55</b>   |
| 2-Pentanon                 | 0,6         | 0,6         | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,6         | 0,6         | 0,4         | 0,5         | 0,5         | 0,5         |
| 2-Furfural                 | 43          | 81          | 70          | 47          | 27          | 57          | 57          | 31          | 73          | 47          | 31          |
| 2-Acetylfuran              | 1,3         | 1,3         | 1,5         | 1,2         | 1,0         | n.a.        | 0,9         | 1,3         | 0,7         | 6,2         | 1,1         |
| 3-Methylbutanol            | 30,3        | 23,3        | 26,2        | 17,9        | 9,5         | 15,5        | 20,0        | 7,4         | 11,4        | 24,5        | 17,5        |
| 2-Methylbutanol            | 9,0         | 7,8         | 6,5         | 5,8         | 2,6         | 4,9         | 6,2         | 2,0         | 4,3         | 6,5         | 4,8         |
| 1-Pentanol                 | 38          | 45          | 33          | 31          | 23          | 31          | 37          | 24          | 18          | 29          | 22          |
| 1-Hexanol                  | 5,7         | 6,3         | 7,8         | 14,2        | 3,9         | 12,0        | 17,1        | 3,1         | 2,6         | 15,5        | 5,1         |
| 1-Octanol                  | 1,6         | 1,9         | 2,0         | 1,1         | n.a.        | 1,5         | 2,5         | n.a.        | n.a.        | 0,9         | n.a.        |
| 1-Octen-3-ol               | 3,9         | 4,5         | 4,0         | 3,4         | 2,4         | 3,5         | 4,8         | 3,2         | 2,0         | 3,2         | 3,8         |
| Phenylethanol              | 64          | 62          | 67          | 95          | 34          | 104         | 101         | 30          | 49          | 114         | 47          |

**Tab. AH 15: Würzearomastoffe in µg/l der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit technischer Milchsäure) Teil I**

| pH-Wert                    | 5,30        | 5,30        | 5,60        | 5,30        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ELG, Einmischtemperatur    | 37 %, 65 °C | 45 %, 65 °C | 37 %, 65 °C | 41 %, 55 °C | 45 %, 60 °C | 45 %, 60 °C | 41 %, 65 °C | 41 %, 60 °C |
| 3-Methylbutanal            | 18          | 46          | 16          | 42          | 57          | 66          | 52          | 46          | 56          | 99          | 48          |
| 2-Methylbutanal            | 4,7         | 12,7        | 4,7         | 11,8        | 15,3        | 19,0        | 15,4        | 13,0        | 15,9        | 28,9        | 13,8        |
| Methional                  | 4,5         | 20,3        | 60,4        | 18,2        | 9,9         | 15,4        | 14,1        | 25,3        | 15,0        | 25,9        | 15,7        |
| Benzaldehyd                | 3,0         | 6,0         | 3,0         | 7,7         | 6,7         | 5,0         | 8,3         | 4,0         | 7,0         | 8,6         | 5,4         |
| 2-Phenylethanal            | 75          | 182         | 73          | 99          | 168         | 141         | 93          | 133         | 111         | 168         | 111         |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>105</b>  | <b>267</b>  | <b>158</b>  | <b>179</b>  | <b>257</b>  | <b>247</b>  | <b>183</b>  | <b>222</b>  | <b>204</b>  | <b>330</b>  | <b>194</b>  |
| Pentanal                   | 4,0         | 5,2         | 2,6         | 5,8         | 5,3         | 6,8         | 9,5         | 8,0         | 7,8         | 13          | 6,4         |
| Hexanal                    | 16          | 23          | 15          | 47          | 40          | 40          | 53          | 57          | 55          | 90          | 48          |
| Heptanal                   | 1,0         | 1,0         | 1,0         | 1,9         | 1,7         | 2,0         | 2,2         | 2,1         | 2,1         | 2,9         | 1,9         |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 0,4         | 0,6         | 0,4         | 1,1         | 0,8         | 0,9         | 0,9         | 0,9         | 0,9         | 1,2         | 1,1         |
| γ-Nonalacton               | 0,5         | 0,7         | 0,7         | 2,2         | 0,8         | 1,1         | 2,3         | 2,6         | 1,8         | 0,8         | 2,7         |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>22</b>   | <b>30</b>   | <b>19</b>   | <b>58</b>   | <b>49</b>   | <b>51</b>   | <b>68</b>   | <b>70</b>   | <b>67</b>   | <b>108</b>  | <b>60</b>   |
| 2-Pentanon                 | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,9         | 0,5         | 0,5         | 0,6         | 0,5         | 0,6         | 1,2         | 0,6         |
| 2-Furfural                 | 26          | 94          | 26          | 49          | 79          | 68          | 54          | 53          | 56          | 78          | 44          |
| 2-Acetylfuran              | 0,6         | 0,7         | 0,6         | 2,9         | 1,0         | 0,8         | 1,2         | 1,4         | 1,3         | n.a.        | 7,4         |
| 3-Methylbutanol            | 4,8         | 10,7        | 5,0         | 32,9        | 14,3        | 13,9        | 42,4        | 25,0        | 20,5        | 31,0        | 17,4        |
| 2-Methylbutanol            | 1,5         | 4,3         | 1,8         | 9,4         | 5,3         | 4,8         | 11,6        | 8,5         | 6,7         | 8,7         | 4,5         |
| 1-Pentanol                 | 15          | 18          | 16          | 34          | 33          | 25          | 36          | 38          | 35          | 49          | 28          |
| 1-Hexanol                  | 2,0         | 2,8         | 1,7         | 17,8        | 3,9         | 4,2         | 15,1        | 12,2        | 16,1        | 18,0        | 11,6        |
| 1-Octanol                  | n.a.        | n.a.        | n.a.        | 2,2         | n.a.        | n.a.        | 2,2         | 0,8         | 2,0         | 1,8         | 1,4         |
| 1-Octen-3-ol               | 2,2         | 1,9         | 1,8         | 4,9         | 3,7         | 3,2         | 4,2         | 3,9         | 4,6         | n.a.        | 3,9         |
| Phenylethanol              | 30          | 51          | 30          | 151         | 55          | 50          | 148         | 101         | 98          | 156         | 109         |

**Tab. AH 16: Würzearomastoffe in µg/l der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit technischer Milchsäure) Teil II**

| pH-Wert                    | 5,30        | 5,60        | 5,30        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ELG, Einmischtemperatur    | 45 %, 60 °C | 45 %, 55 °C | 37 %, 55 °C | 45 %, 55 °C | 37 %, 60 °C | 37 %, 55 °C | 45 %, 60 °C | 37 %, 60 °C | 41 %, 60 °C | 41 %, 60 °C | 41 %, 60 °C |
| 3-Methylbutanal            | 49          | 59          | 40          | 65          | 25          | 32          | 50          | 20          | 43          | 35          | 41          |
| 2-Methylbutanal            | 13,6        | 16,8        | 12,1        | 18,7        | 7,6         | 9,7         | 14,2        | 5,5         | 12,4        | 10,1        | 12,0        |
| Methional                  | 21,3        | 12,0        | 12,9        | 15,8        | 15,5        | 13,7        | 13,4        | 22,7        | 25,8        | 35,4        | 27,2        |
| Benzaldehyd                | 7,7         | 5,7         | 9,5         | 6,7         | 3,0         | 4,3         | 5,4         | 4,7         | 6,0         | 6,4         | 5,4         |
| 2-Phenylethanal            | 120         | 118         | 33          | 119         | 44          | 42          | 109         | 58          | 104         | 89          | 96          |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>211</b>  | <b>211</b>  | <b>108</b>  | <b>225</b>  | <b>95</b>   | <b>102</b>  | <b>192</b>  | <b>112</b>  | <b>191</b>  | <b>176</b>  | <b>182</b>  |
| Pentanal                   | 4,1         | 4,6         | 7,7         | 5,4         | 5,3         | 8,0         | 3,8         | 3,1         | 8,4         | 6,2         | 6,8         |
| Hexanal                    | 30          | 35          | 47          | 40          | 26          | 34          | 27          | 23          | 44          | 29          | 41          |
| Heptanal                   | 1,4         | 1,9         | 3,0         | 2,0         | 1,7         | 2,5         | 1,2         | 1,5         | 2,3         | 1,5         | 2,0         |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 0,6         | 1,0         | 1,1         | 1,3         | 0,7         | 1,1         | 0,6         | 0,4         | 0,8         | Sp.         | 0,8         |
| γ-Nonalacton               | 0,8         | 1,1         | 1,7         | 1,1         | 1,1         | 1,2         | 0,9         | 0,7         | 2,5         | 2,5         | 3,0         |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>37</b>   | <b>44</b>   | <b>60</b>   | <b>49</b>   | <b>34</b>   | <b>47</b>   | <b>34</b>   | <b>29</b>   | <b>58</b>   | <b>39</b>   | <b>54</b>   |
| 2-Pentanon                 | 0,5         | 0,5         | 0,6         | 0,6         | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,5         | 0,6         | 0,6         | 0,8         |
| 2-Furfural                 | 64,7        | 63,9        | 23,6        | 71,1        | 19,9        | 20,5        | 55,9        | 27,9        | 52,9        | 63,6        | 53,8        |
| 2-Acetylfuran              | Sp.         | Sp.         | Sp.         | 0,7         | Sp.         | Sp.         | Sp.         | Sp.         | 1,0         | Sp.         | 1,1         |
| 3-Methylbutanol            | 12,8        | 20,8        | 16,1        | 25,2        | 6,9         | 11,9        | 10,0        | 9,2         | 20,8        | 23,5        | 20,3        |
| 2-Methylbutanol            | 4,0         | 6,7         | 4,4         | 7,5         | 2,1         | 2,9         | 4,1         | 3,0         | 6,0         | 7,3         | 6,7         |
| 1-Pentanol                 | 23          | 23          | 23          | 30          | 15          | 18          | 19          | 24          | 39          | 48          | 40          |
| 1-Hexanol                  | 3,6         | 6,7         | 7,4         | 8,0         | 3,0         | 6,2         | 3,4         | 3,0         | 15,4        | 16,9        | 15,4        |
| 1-Octanol                  | n.a.        | n.a.        | n.a.        | 1,2         | n.a.        | 0,6         | n.a.        | 0,7         | 1,6         | 1,4         | 1,3         |
| 1-Octen-3-ol               | 4,1         | 2,8         | 3,9         | 3,3         | 2,2         | 3,3         | 3,5         | 3,7         | 3,6         | 3,3         | 3,2         |
| Phenylethanol              | 61          | 61          | 48          | 63          | 32          | 39          | 46          | 41          | 107         | 138         | 106         |

**Tab. AH 17: Würzearomastoffe in µg/l der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit biologischer Milchsäure) Teil I**

| pH-Wert                    | 5,60        | 5,30        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,60        | 5,30        | 5,60        | 5,30        |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| ELG, Einmischtemperatur    | 41 %, 60 °C | 37 %, 65 °C | 45 %, 65 °C | 37 %, 65 °C | 41 %, 65 °C | 41 %, 55 °C | 41 %, 55 °C | 41 %, 60 °C | 41 %, 60 °C | 41 %, 60 °C | 41 %, 65 °C | 41 %, 65 °C |
| 3-Methylbutanal            | 35          | 24          | 55          | 23          | 48          | 62          | 60          | 36          | 38          | 38          | 53          | 52          |
| 2-Methylbutanal            | 10,8        | 7,2         | 16,0        | 6,9         | 14,2        | 19,7        | 17,8        | 10,7        | 11,8        | 11,3        | 15,6        | 15,3        |
| Methional                  | 24,6        | 12,4        | 13,4        | 15,6        | 31,3        | 20,0        | 24,1        | 21,2        | 19,4        | 14,8        | 14,8        | 20,7        |
| Benzaldehyd                | 5,9         | 4,0         | 7,9         | 3,9         | 9,5         | 8,3         | 4,4         | 12,3        | 10,6        | 11,5        | 10,3        | 10,7        |
| 2-Phenylethanal            | 62          | 57          | 101         | 46          | 93          | 57          | 83          | 36          | 48          | 53          | 79          | 60          |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>138</b>  | <b>105</b>  | <b>193</b>  | <b>95</b>   | <b>195</b>  | <b>167</b>  | <b>190</b>  | <b>116</b>  | <b>128</b>  | <b>129</b>  | <b>173</b>  | <b>159</b>  |
| Pentanal                   | 8,0         | 4,6         | 4,7         | 3,2         | 5,8         | 7,0         | 7,5         | 4,5         | 7,5         | 5,8         | 4,1         | 6,7         |
| Hexanal                    | 30          | 23          | 26          | 19          | 41          | 60          | 63          | 30          | 54          | 42          | 25          | 46          |
| Heptanal                   | 1,3         | 1,5         | 1,2         | 1,2         | 1,8         | 3,0         | 2,6         | 1,3         | 1,8         | 1,6         | 1,1         | 1,5         |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 0,7         | 0,5         | 0,6         | 0,5         | 0,5         | 1,0         | 1,4         | 0,6         | 0,6         | 0,6         | 0,5         | 0,6         |
| γ-Nonalacton               | 3,0         | 0,9         | 1,3         | 1,3         | 2,1         | 2,0         | 3,3         | 2,8         | 3,1         | 2,5         | 0,8         | 3,0         |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>43</b>   | <b>31</b>   | <b>34</b>   | <b>25</b>   | <b>51</b>   | <b>73</b>   | <b>78</b>   | <b>39</b>   | <b>67</b>   | <b>53</b>   | <b>32</b>   | <b>58</b>   |
| 2-Pentanon                 | 0,4         | 0,6         | 0,6         | 0,5         | 0,7         | 3,9         | 2,7         | Sp.         | 0,6         | 0,5         | 0,6         | 0,6         |
| 2-Furfural                 | 46          | 23          | 62          | 20          | 52          | 45          | 43          | 45          | 45          | 41          | 56          | 47          |
| 2-Acetylfuran              | Sp.         | 0,8         | 0,7         | 0,6         | Sp.         | 1,0         | 1,1         | 0,7         | 0,9         | 0,7         | 0,5         | 0,6         |
| 3-Methylbutanol            | 21,6        | 7,4         | 11,3        | 6,1         | 17,4        | 23,3        | 18,4        | 22,1        | 19,6        | 13,3        | 9,6         | 18,4        |
| 2-Methylbutanol            | 6,9         | 2,6         | 4,9         | 2,2         | 5,4         | 5,1         | 4,6         | 6,9         | 6,8         | 3,9         | 4,2         | 7,1         |
| 1-Pentanol                 | 41          | 17          | 17          | 13          | 27          | 40          | 26          | 37          | 40          | 29          | 14          | 29          |
| 1-Hexanol                  | 15,6        | 2,9         | 3,5         | 2,5         | 15,1        | 18,4        | 13,5        | 14,4        | 13,6        | 8,1         | 3,0         | 13,3        |
| 1-Octanol                  | 1,7         | n.a.        | n.a.        | n.a.        | n.a.        | n.a.        | n.a.        | 3,5         | 2,9         | 3,2         | 2,3         | 2,8         |
| 1-Octen-3-ol               | 3,3         | 2,7         | 2,4         | 2,1         | 3,0         | 5,0         | 4,0         | n.a.        | 3,8         | 3,0         | 2,3         | 3,0         |
| Phenylethanol              | 108         | 36          | 46          | 29          | 103         | 121         | 93          | 101         | 93          | 79          | 40          | 89          |

**Tab. AH 18: Würzearomastoffe in µg/l der Sorte Scarlett (ET 55/60/65 °C, Maischesäuerung mit biologischer Milchsäure) Teil II**

| Standort<br>Sorte          | Erbach      |             |             |             | Fronhofen   |             |             |             | Weissensee  |             |             |             |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                            | Pasadena    | Bellevue    | Margret     | Marnie      | Pasadena    | Bellevue    | Margret     | Marnie      | Pasadena    | Bellevue    | Margret     | Marnie      |
| 3-Methylbutanal            | 2285        | 2737        | 4321        | 3768        | 2342        | 2800        | 5032        | 1972        | 1714        | 2018        | 3261        | 1488        |
| 2-Methylbutanal            | 910         | 982         | 1530        | 1360        | 876         | 1117        | 1717        | 818         | 673         | 690         | 1150        | 582         |
| Methional                  | 508         | 658         | 966         | 902         | 482         | 562         | 828         | 448         | 313         | 450         | 565         | 207         |
| Benzaldehyd                | 16          | 12          | 29          | 19          | 17          | 15          | 41          | 23          | 14,2        | 9,1         | 37          | 45          |
| 2-Phenylethanal            | 1218        | 1136        | 2181        | 1354        | 1050        | 1071        | 2003        | 838         | 844         | 789         | 1378        | 529         |
| <b>Σ Streckeraldehyde</b>  | <b>4938</b> | <b>5526</b> | <b>9027</b> | <b>7404</b> | <b>4766</b> | <b>5565</b> | <b>9621</b> | <b>4098</b> | <b>3559</b> | <b>3956</b> | <b>6392</b> | <b>2851</b> |
| Pentanal                   | 28          | 27          | 38          | 33          | 23          | 27          | 37          | 41          | 20          | 23          | 33          | 19          |
| Hexanal                    | 224         | 169         | 316         | 234         | 150         | 141         | 236         | 223         | 175         | 124         | 292         | 176         |
| Heptanal                   | 12          | 13          | 14          | 15          | 11          | 12          | 21          | 21          | 10          | 11          | 14          | 13          |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal       | 37          | 11          | 68          | 35          | 31          | 22          | 36          | 30          | 30          | 18          | 67          | 44          |
| γ-Nonalacton               | 12          | 11          | 13          | 14          | 14          | 16          | 14          | 23          | 13          | 13          | 14          | 33          |
| (E)-2-Nonenal              | 25          | 7,3         | 59          | 34          | 17          | 14          | 32          | 30          | 19          | 12          | 62          | 40          |
| <b>Σ Fettabbauprodukte</b> | <b>337</b>  | <b>239</b>  | <b>508</b>  | <b>365</b>  | <b>245</b>  | <b>232</b>  | <b>377</b>  | <b>368</b>  | <b>267</b>  | <b>202</b>  | <b>482</b>  | <b>325</b>  |
| 2-Furfural                 | 434         | 387         | 728         | 545         | 663         | 437         | 1421        | 375         | 370         | 308         | 809         | 196         |
| 3-Methylbutanol            | 393         | 400         | 410         | 465         | 533         | 845         | 705         | 660         | 430         | 419         | 568         | 362         |
| 2-Methylbutanol            | 117         | 122         | 114         | 135         | 139         | 216         | 175         | 179         | 102         | 112         | 124         | 115         |
| 1-Pentanol                 | 163         | 148         | 160         | 163         | 160         | 166         | 204         | 355         | 158         | 158         | 160         | 176         |
| 1-Octanol                  | 4,2         | 3,9         | 5,0         | 3,7         | 3,3         | 4,1         | 4,0         | 7,1         | 3,4         | 4,2         | 4,0         | 6,4         |
| 1-Octen-3-ol               | 17,5        | 9,8         | 18,2        | 26,0        | 18,8        | 24,7        | 11,0        | 51,0        | 16,9        | 17,6        | 20,6        | 28,0        |
| Phenylethanol              | 435         | 463         | 384         | 483         | 500         | 658         | 582         | 541         | 493         | 429         | 597         | 455         |

Tab. AH 19: Malzaromastoffe in µg/kg der Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003

| Standardnummer | Faktor 1: pH-Wert | Faktor 2: Temperatur [°C] | Faktor 3: ELG [%] | Faktor 4: Art der<br>Milchsäuregabe | Σ Streckeraldehyde [µg/l] | Σ Fettabbauprodukte [µg/l] | Hexanal [µg/l] |
|----------------|-------------------|---------------------------|-------------------|-------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------------|
| 1              | 5,3               | 55                        | 37                | technisch                           | 156                       | 41,1                       | 32             |
| 2              | 5,6               | 55                        | 37                | technisch                           | 143                       | 55                         | 45             |
| 3              | 5,9               | 55                        | 37                | ne                                  | 145                       | 39,3                       | 33             |
| 4              | 5,3               | 60                        | 37                | technisch                           | 140                       | 40                         | 30             |
| 5              | 5,6               | 60                        | 37                | technisch                           | 126                       | 34,7                       | 26             |
| 6              | 5,9               | 60                        | 37                | ohne                                | 124                       | 33,1                       | 26             |
| 7              | 5,3               | 65                        | 37                | technisch                           | 105                       | 22,3                       | 16             |
| 8              | 5,6               | 65                        | 37                | technisch                           | 158                       | 19,1                       | 15             |
| 9              | 5,9               | 65                        | 37                | ohne                                | 94                        | 22,3                       | 16             |
| 10             | 5,3               | 55                        | 41                | technisch                           | 179                       | 58,5                       | 47             |
| 11             | 5,6               | 55                        | 41                | technisch                           | 185                       | 56,8                       | 44             |
| 12             | 5,9               | 55                        | 41                | ohne                                | 190                       | 53,7                       | 39             |
| 13             | 5,3               | 60                        | 41                | technisch                           | 222                       | 70,4                       | 57             |
| 14             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 211                       | 72,2                       | 59             |
| 15             | 5,9               | 60                        | 41                | ohne                                | 180                       | 56,3                       | 45             |
| 16             | 5,3               | 65                        | 41                | technisch                           | 205                       | 47,3                       | 38             |
| 17             | 5,6               | 65                        | 44                | technisch                           | 330                       | 108,3                      | 90             |
| 18             | 5,9               | 65                        | 41                | ohne                                | 220                       | 63,6                       | 51             |
| 19             | 5,3               | 55                        | 45                | technisch                           | 300                       | 55,4                       | 46             |
| 20             | 5,6               | 55                        | 45                | technisch                           | 263                       | 48,4                       | 38             |
| 21             | 5,9               | 55                        | 45                | ohne                                | 233                       | 41,9                       | 32             |
| 22             | 5,3               | 60                        | 45                | technisch                           | 257                       | 48,6                       | 40             |
| 23             | 5,6               | 60                        | 45                | technisch                           | 247                       | 51,1                       | 40             |
| 24             | 5,9               | 60                        | 45                | ohne                                | 213                       | 41,3                       | 32             |
| 25             | 5,3               | 65                        | 45                | technisch                           | 267                       | 30,2                       | 23             |
| 26             | 5,6               | 65                        | 45                | technisch                           | 228                       | 30,4                       | 24             |
| 27             | 5,9               | 65                        | 45                | ohne                                | 213                       | 23                         | 17             |
| 28             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 211                       | 72,2                       | 59             |
| 29             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 183                       | 67,6                       | 53             |
| 30             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 194                       | 60,5                       | 48             |
| 31             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 200                       | 69                         | 55             |
| 32             | 5,6               | 60                        | 41                | technisch                           | 204                       | 67,2                       | 55             |
| 33             | 5,3               | 55                        | 37                | biologisch                          | 108                       | 60,5                       | 47             |
| 34             | 5,6               | 55                        | 37                | biologisch                          | 102                       | 47,2                       | 34             |
| 35             | 5,9               | 55                        | 37                | ohne                                | 145                       | 39,3                       | 33             |
| 36             | 5,3               | 60                        | 37                | biologisch                          | 112                       | 29,1                       | 23             |
| 37             | 5,6               | 60                        | 37                | biologisch                          | 95                        | 34,4                       | 26             |
| 38             | 5,9               | 60                        | 37                | ohne                                | 124                       | 33,1                       | 26             |
| 39             | 5,3               | 65                        | 37                | biologisch                          | 105                       | 30,8                       | 23             |
| 40             | 5,6               | 65                        | 37                | biologisch                          | 95                        | 24,8                       | 19             |
| 41             | 5,9               | 65                        | 37                | ohne                                | 94                        | 22,3                       | 16             |
| 42             | 5,3               | 55                        | 41                | biologisch                          | 190                       | 78,3                       | 63             |
| 43             | 5,6               | 55                        | 41                | biologisch                          | 167                       | 72,8                       | 60             |
| 44             | 5,9               | 55                        | 41                | ohne                                | 190                       | 53,7                       | 39             |
| 45             | 5,3               | 60                        | 41                | biologisch                          | 129                       | 52,6                       | 42             |
| 46             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 116                       | 38,9                       | 30             |
| 47             | 5,9               | 60                        | 41                | ohne                                | 180                       | 56,3                       | 45             |
| 48             | 5,3               | 65                        | 41                | biologisch                          | 159                       | 58,1                       | 46             |
| 49             | 5,6               | 65                        | 41                | biologisch                          | 195                       | 51                         | 41             |
| 50             | 5,9               | 65                        | 44                | ohne                                | 220                       | 63,6                       | 51             |
| 51             | 5,3               | 55                        | 45                | biologisch                          | 225                       | 49,3                       | 40             |
| 52             | 5,6               | 55                        | 45                | biologisch                          | 211                       | 44                         | 35             |
| 53             | 5,9               | 55                        | 45                | ohne                                | 233                       | 41,9                       | 32             |
| 54             | 5,3               | 60                        | 45                | biologisch                          | 211                       | 37,1                       | 30             |
| 55             | 5,6               | 60                        | 45                | biologisch                          | 192                       | 33,7                       | 27             |
| 56             | 5,9               | 60                        | 45                | ohne                                | 213                       | 41,3                       | 32             |
| 57             | 5,3               | 65                        | 45                | biologisch                          | 193                       | 33,6                       | 26             |
| 58             | 5,6               | 65                        | 45                | biologisch                          | 173                       | 31,6                       | 25             |
| 59             | 5,9               | 65                        | 45                | ohne                                | 213                       | 23                         | 17             |
| 60             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 176                       | 39,4                       | 29             |
| 61             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 138                       | 43,3                       | 30             |
| 62             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 191                       | 58,4                       | 44             |
| 63             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 182                       | 53,5                       | 41             |
| 64             | 5,6               | 60                        | 41                | biologisch                          | 128                       | 66,7                       | 54             |

Tab. AH 20: Ergebnisliste (Response Surface Methodology)

| Sorte/Standort      | ELG in % | pH-Wert | Stammwürzegehalt<br>in GG-% | FAN<br>in mg/100ml | FAN in mg/100ml<br>(bez.auf 12GG-%) | lösl. N<br>in mg/l |
|---------------------|----------|---------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------------|--------------------|
| Margret Weissensee  | 38,7     | 5,47    | 16,4                        | 33,3               | 24,3                                | 1587               |
| Margret Erbach      | 40,9     | 5,48    | 16,8                        | 32,5               | 23,3                                | 1520               |
| Marnie Erbach       | 45,1     | 5,82    | 16,5                        | 30,7               | 22,3                                | 1562               |
| Marnie Erbach       | 45,1     | 5,63    | 16,5                        | 33,2               | 24,1                                | 1569               |
| Marnie Erbach       | 45,1     | 5,52    | 16,3                        | 34,1               | 25,1                                | 1683               |
| Marnie Weissensee   | 37,5     | 5,90    | 15,9                        | 26,7               | 20,2                                | 1549               |
| Marnie Weissensee   | 37,5     | 5,70    | 15,8                        | 29,7               | 22,6                                | 1660               |
| Marnie Weissensee   | 37,5     | 5,57    | 16,0                        | 31,5               | 23,7                                | 1713               |
| Pasadena Erbach     | 38,8     | 5,83    | 16,3                        | 24,3               | 17,8                                | 1233               |
| Pasadena Erbach     | 38,8     | 5,56    | 16,4                        | 27,8               | 20,3                                | 1361               |
| Pasadena Erbach     | 38,8     | 5,49    | 16,4                        | 28,5               | 20,9                                | 1383               |
| Pasadena Weissensee | 35,2     | 5,91    | 16,1                        | 23,2               | 17,3                                | 1259               |
| Pasadena Weissensee | 35,2     | 5,63    | 16,1                        | 26,3               | 19,6                                | 1374               |
| Pasadena Weissensee | 35,2     | 5,52    | 16,0                        | 25,4               | 19,1                                | 1331               |
| Bellevue Erbach     | 42,6     | 5,76    | 16,5                        | 26,4               | 19,2                                | 1095               |
| Bellevue Erbach     | 42,6     | 5,53    | 16,6                        | 29,3               | 21,2                                | 1366               |
| Bellevue Erbach     | 42,6     | 5,45    | 16,6                        | 30,9               | 22,3                                | 1524               |
| Bellevue Weissensee | 34,4     | 5,84    | 16,3                        | 25,5               | 18,8                                | 1405               |
| Bellevue Weissensee | 34,4     | 5,62    | 16,3                        | 28,9               | 21,3                                | 1876               |
| Bellevue Weissensee | 34,4     | 5,52    | 16,1                        | 29,2               | 21,7                                | 1517               |

**Tab. AH 21: Kennzahlen der Proteolyse in Abhängigkeit vom Maische-pH (vgl. Abschnitt 5.1.5)**

|                        |                                  | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |           |
|------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                        |                                  | Einheit                | PAS E/6,0 | PAS W/6,0 | MAG E/6,0 | MAG W/6,0 | BEL E/6,0 | BEL W/6,0 | MAN E/6,0 | MAN W/6,0 |
| Malzanalyse            | Wassergehalt Malz                | %                      | 4,0       | 4,1       | 3,8       | 4,0       | 3,8       | 4,0       | 3,7       | 3,8       |
|                        | Extrakt Malz                     | % lfr.                 | 78,9      | 77,2      | 79,2      | 78,7      | 79,2      | 78,1      | 79,6      | 77,8      |
|                        | Extrakt MTrs.                    | % wfr.                 | 82,2      | 80,5      | 82,3      | 82        | 82,3      | 81,4      | 82,7      | 80,9      |
|                        | Viskosität (8,6 GG-%)            | mPa s                  | 1,467     | 1,493     | 1,506     | 1,464     | 1,453     | 1,463     | 1,478     | 1,490     |
|                        | Viskosität 65 °C (8,6 GG-%)      | mPa s                  | 1,502     | 1,633     | 1,651     | 1,617     | 1,481     | 1,503     | 1,515     | 1,639     |
|                        | Friabilimeter Mübigkeit          | %                      | 96,4      | 85,8      | 88,6      | 79,7      | 98,0      | 90,6      | 94,6      | 90,4      |
|                        | Ganzglasigkeit                   | %                      | 0,3       | 0         | 0,3       | 0,1       | 0,3       | 0         | 0         | 0,1       |
|                        | Teilglasigkeit                   | %                      | 1,0       | 1,4       | 4,2       | 2,2       | 0,8       | 0,2       | 0,7       | 0,2       |
|                        | Verzuckerungszeit                | min.                   | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      |
|                        | Ablauf                           | klar/opal              | klar      | klar      | opal      | klar      | klar      | klar      | opal      | klar      |
|                        | Endvergärungsgrad                | %, schb.               | 82,6      | 81,2      | 80,5      | 82,4      | 81,9      | 80,9      | 80,8      | 79,2      |
|                        | Farbe Fotometer                  | EBC                    | 2,4       | 2,8       | 2,2       | 2,5       | 2,4       | 3,1       | 3,1       | 3,2       |
|                        | Kochfarbe Fotometer              | EBC                    | 5,6       | 5,9       | 5,3       | 5,5       | 6         | 5,6       | 5,9       | 5,8       |
|                        | pH-Wert                          |                        | 6,01      | 5,98      | 5,98      | 5,93      | 5,98      | 5,96      | 5,99      | 5,98      |
|                        | Rohprotein Malz                  | %, wfr.                | 9,1       | 11,1      | 9,7       | 10,7      | 10,2      | 11,7      | 10,5      | 12,8      |
|                        | Löslicher Stickstoff MTrs.       | mg/100g                | 565       | 626       | 634       | 663       | 695       | 644       | 758       | 767       |
|                        | Eiweiss-Lösungsgrad              | %                      | 38,8      | 35,2      | 40,9      | 38,7      | 42,6      | 34,4      | 45,1      | 37,5      |
|                        | freier Amino-Stickstoff TrS.     | mg/100g                | 120       | 113       | 133       | 146       | 142       | 137       | 150       | 149       |
|                        | β-Glucan                         | mg/l                   | 181       | 290       | 335       | 212       | 107       | 98        | 198       | 202       |
|                        | β-Glucan 65 °C                   | mg/l                   | 205       | 401       | 498       | 360       | 171       | 200       | 299       | 350       |
|                        | Thiobarbitursäurezahl            |                        | 12        | 13        | 16        | 18        | 14        | 13        | 18        | 12        |
|                        | DMS-Vorläufer                    | µg/l                   | 3,1       | 3,8       | 4,4       | 5,2       | 6,6       | 6,5       | 4,4       | 5,2       |
|                        | Diastatische Kraft               | WK                     | 266       | 347       | 286       | 329       | 245       | 263       | 318       | 335       |
| α-Amylase              | ASBC, wfr.                       | 62                     | 61        | 65        | 62        | 46        | 51        | 67        | 54        |           |
| Maischen/Läuern/Kochen | Stammwürze 10 Minuten            | GG-%                   | 14,56     | 13,46     | 14,48     | 13,95     | 14,63     | 14,28     | 14,74     | 14,20     |
|                        | Stammwürze 62E                   | GG-%                   | 15,42     | 14,88     | 15,30     | 15,28     | 15,63     | 15,37     | 15,77     | 15,32     |
|                        | Stammwürze 72A                   | GG-%                   | 15,96     | 15,78     | 15,96     | 15,81     | 16,28     | 15,86     | 16,32     | 15,79     |
|                        | Stammwürze 72E                   | GG-%                   | 16,14     | 15,96     | 16,19     | 16,11     | 16,44     | 16,05     | 16,61     | 15,92     |
|                        | Stammwürze 78A                   | GG-%                   | 16,16     | 16,02     | 16,24     | 16,21     | 16,46     | 16,08     | 16,61     | 16,08     |
|                        | Stammwürze 78E                   | GG-%                   | 16,16     | 16,04     | 16,29     | 16,23     | 16,48     | 16,05     | 16,62     | 16,07     |
|                        | Stammwürze VW                    | GG-%                   | 15,58     | 15,28     | 15,42     | 15,66     | 15,74     | 15,53     | 15,53     | 15,23     |
|                        | Stammwürze Pfv                   | GG-%                   | 10,17     | 9,75      | 10,00     | 10,06     | 9,88      | 9,89      | 10,09     | 9,87      |
|                        | Stammwürze KA                    | GG-%                   | 10,22     | 9,85      | 10,05     | 10,53     | 10,11     | 10,05     | 10,27     | 10,45     |
|                        | Stammwürze vH                    | GG-%                   | 11,82     | 11,79     | 11,76     | 12,17     | 11,83     | 11,24     | 11,68     | 11,49     |
|                        | Stammwürze KE                    | GG-%                   | 12,06     | 12,25     | 12,26     | 12,46     | 12,19     | 12,27     | 12,53     | 12,20     |
|                        | Stammwürze AW                    | GG-%                   | 11,85     | 12,00     | 12,21     | 12,29     | 11,99     | 11,80     | 11,91     | 11,76     |
|                        | pH-Wert 10 Minuten               |                        | 5,98      | 6,09      | 5,96      | 6,02      | 5,90      | 6,04      | 6,09      | 6,08      |
|                        | pH-Wert 62E                      |                        | 5,94      | 6,03      | 5,90      | 5,93      | 5,86      | 5,96      | 6,02      | 6,04      |
|                        | pH-Wert 72A                      |                        | 5,92      | 6,01      | 5,90      | 5,92      | 5,86      | 5,93      | 5,99      | 6,01      |
|                        | pH-Wert 72E                      |                        | 5,90      | 5,99      | 5,88      | 5,91      | 5,85      | 5,92      | 5,96      | 5,98      |
|                        | pH-Wert 78A                      |                        | 5,90      | 5,99      | 5,87      | 5,89      | 5,80      | 5,90      | 5,96      | 5,98      |
|                        | pH-Wert 78E                      |                        | 5,89      | 5,96      | 5,88      | 5,87      | 5,80      | 5,90      | 5,94      | 5,96      |
|                        | pH-Wert VW                       |                        | 5,78      | 5,87      | 5,93      | 5,76      | 5,81      | 5,74      | 5,92      | 5,76      |
|                        | pH-Wert Pfv                      |                        | 5,85      | 5,93      | 6,03      | 5,88      | 5,94      | 5,85      | 5,99      | 5,91      |
|                        | pH-Wert KA                       |                        | 5,77      | 5,91      | 6,02      | 5,90      | 5,90      | 5,87      | 5,97      | 5,84      |
|                        | pH-Wert vH                       |                        | 5,75      | 5,82      | 5,91      | 5,78      | 5,82      | 5,79      | 5,89      | 5,91      |
|                        | pH-Wert KE                       |                        | 5,69      | 5,82      | 5,84      | 5,72      | 5,75      | 5,76      | 5,82      | 5,82      |
|                        | pH-Wert AW                       |                        | 5,69      | 5,77      | 5,82      | 5,73      | 5,73      | 5,76      | 5,85      | 5,73      |
|                        | Farbe 10 Minuten                 |                        | 5,78      | 6,96      | 5,66      | 6,55      | 4,86      | 4,92      | 4,80      | 5,72      |
|                        | Farbe 62E                        |                        | 6,17      | 6,72      | 6,07      | 7,03      | 5,03      | 5,83      | 5,07      | 5,82      |
|                        | Farbe 72A                        |                        | 6,35      | 6,87      | 6,74      | 7,32      | 5,12      | 5,69      | 5,34      | 6,24      |
|                        | Farbe 72E                        |                        | 6,41      | 7,09      | 6,74      | 7,51      | 5,07      | 5,93      | 5,66      | 6,30      |
|                        | Farbe 78A                        |                        | 6,47      | 7,19      | 6,60      | 7,59      | 5,13      | 5,46      | 5,73      | 6,02      |
|                        | Farbe 78E                        |                        | 6,61      | 7,06      | 7,19      | 7,80      | 5,02      | 5,68      | 5,64      | 5,91      |
|                        | Farbe VW                         |                        | 7,41      | 7,60      | 6,57      | 7,64      | 6,14      | 6,55      | 6,52      | 8,37      |
|                        | Farbe Pfv                        |                        | 5,76      | 5,75      | 4,94      | 5,88      | 4,52      | 4,97      | 5,10      | 6,00      |
|                        | Farbe KA                         |                        | 5,76      | 5,87      | 5,31      | 5,73      | 4,89      | 5,21      | 5,93      | 6,38      |
|                        | Farbe vH                         |                        | 7,43      | 7,57      | 7,22      | 7,92      | 6,25      | 6,25      | 7,02      | 7,25      |
|                        | Farbe KE                         |                        | 8,42      | 9,26      | 9,03      | 9,59      | 8,01      | 8,09      | 8,90      | 9,11      |
|                        | Farbe AW                         |                        | 8,70      | 9,41      | 9,67      | 9,70      | 8,67      | 8,17      | 8,95      | 9,10      |
|                        | Reduktionsvermögen 10 Minuten    | %                      | 38,2      | 43,5      | 24,8      | 32,1      | 32,3      | 34,1      | 63,5      | 56,3      |
|                        | Reduktionsvermögen 62E           | %                      | 50,7      | 49,3      | 40,8      | 39,7      | 33,8      | 32,2      | 65,3      | 60,5      |
|                        | Reduktionsvermögen 72A           | %                      | 23,7      | 22,4      | 23,9      | 27,1      | 23,6      | 25,8      | 39,4      | 20,7      |
|                        | Reduktionsvermögen 72E           | %                      | 25,3      | 22,7      | 22,9      | 24,3      | 24,1      | 25,3      | 32,2      | 21,9      |
|                        | Reduktionsvermögen 78A           | %                      | 21,9      | 22,6      | 22,3      | 23,1      | 24,0      | 22,6      | 28,7      | 22,5      |
|                        | Reduktionsvermögen 78E           | %                      | 24,8      | 24,9      | 22,9      | 22,7      | 25,1      | 21,9      | 26,3      | 24,0      |
|                        | Reduktionsvermögen VW            | %                      | 61,7      | 68,8      | 54,8      | 64,1      | 64,1      | 52,9      | 63,6      | 64,0      |
|                        | Reduktionsvermögen Pfv           | %                      | 33,9      | 62,1      | 35,3      | 34,2      | 40,5      | 26,4      | 29,8      | 55,2      |
|                        | Reduktionsvermögen KA            | %                      | 42,7      | 69,6      | 38,8      | 32,7      | 48,8      | 35,9      | 37,2      | 63,5      |
|                        | Reduktionsvermögen vH            | %                      | 65,9      | 61,1      | 63,3      | 45,7      | 65,9      | 50,6      | 61,4      | 62,3      |
|                        | Reduktionsvermögen KE            | %                      | 81,9      | 47,0      | 68,6      | 41,2      | 67,2      | 46,4      | 54,3      | 37,5      |
|                        | Reduktionsvermögen AW            | %                      | 65,7      | 42,0      | 75,8      | 32,8      | 59,0      | 35,6      | 49,7      | 33,6      |
|                        | Reduktionsvermögen 9% 10 Minuten | %                      | 23,5      | 32,0      | 25,4      | 24,4      | 22,3      | 23,4      | 39,5      | 43,1      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% 62E    | %                      | 34,0      | 34,1      | 14,4      | 26,6      | 23,3      | 15,2      | 37,1      | 49,8      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% 72A    | %                      | 11,6      | 14,3      | 17,2      | 18,9      | 16,0      | 17,9      | 21,2      | 27,3      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% 72E    | %                      | 13,9      | 13,4      | 17,6      | 15,0      | 15,1      | 16,8      | 15,0      | 20,1      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% 78A    | %                      | 12,2      | 16,3      | 16,4      | 15,8      | 14,9      | 16,5      | 13,8      | 19,1      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% 78E    | %                      | 13,5      | 14,5      | 17,1      | 17,9      | 15,9      | 17,2      | 13,7      | 18,0      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% VW     | %                      | 41,5      | 53,1      | —         | —         | 45,7      | 40,8      | 40,9      | 52,3      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% Pfv    | %                      | 36,1      | 57,5      | —         | —         | 39,0      | 34,4      | 29,0      | 54,8      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% KA     | %                      | 43,4      | 63,8      | —         | —         | 70,3      | 39,8      | 36,6      | 66,8      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% vH     | %                      | 52,8      | 46,0      | —         | —         | 54,3      | 43,9      | 52,2      | 55,3      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% KE     | %                      | 72,4      | 34,2      | —         | —         | 52,5      | 33,7      | 40,5      | 25,3      |
|                        | Reduktionsvermögen 9 GG-% AW     | %                      | 55,6      | 33,8      | —         | —         | 47,0      | 27,0      | 39,5      | 26,3      |
|                        | TBZ 10 Minuten                   |                        | 21        | 21        | 27        | 30        | 23        | 20        | 25        | 18        |
|                        | TBZ 62E                          |                        | 21        | 23        | 26        | 30        | 23        | 20        | 25        | 18        |
|                        | TBZ 72A                          |                        | 21        | 23        | 27        | 30        | 22        | 20        | 25        | 19        |
|                        | TBZ 72E                          |                        | 21        | 23        | 27        | 30        | 22        | 20        | 25        | 18        |
|                        | TBZ 78A                          |                        | 21        | 24        | 27        | 29        | 23        | 20        | 25        | 19        |
|                        | TBZ 78E                          |                        | 22        | 23        | 28        | 30        | 23        | 20        | 25        | 18        |
|                        | TBZ VW                           |                        | 18        | 22        | 27        | 24        | 23        | 22        | 27        | 24        |
| TBZ Pfv                |                                  | 14                     | 14        | 19        | 13        | 14        | 14        | 18        | 14        |           |
| TBZ KA                 |                                  | 15                     | 16        | 20        | 20        | 16        | 15        | 19        | 17        |           |
| TBZ vH                 |                                  | 30                     | 31        | 39        | 39        | 29        | 28        | 35        | 28        |           |
| TBZ KE                 |                                  | 32                     | 34        | 43        | 43        | 36        | 34        | 40        | 34        |           |
| TBZ AW                 |                                  | 33                     | 34        | 42        | 43        | 36        | 35        | 40        | 36        |           |
| FAN AW                 | mg/100 ml                        | 17,75                  | 17,97     | 19,64     | 19,41     | 19,01     | 17,92     | 20,09     | 18,61     |           |

**Tab. AH 22: Analysendaten der Brauersuche Teil I  
(ohne Maischesäuerung/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)**

|   |  | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |           |
|---|--|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   |  | Einheit                | PAS E/6,0 | PAS W/6,0 | MAG E/6,0 | MAG W/6,0 | BEL E/6,0 | BEL W/6,0 | MAN E/6,0 | MAN W/6,0 |
| Bieranalyse                               | pH-Wert                                |                        | 4,85      | 4,77      | 4,93      | 4,73      | 4,80      | 4,64      | 4,77      | 4,74      |
|   | pH-Wert forciert                       |                        | 4,87      | 4,83      | 4,86      | 4,91      | 4,83      | 4,74      | 4,80      | 4,74      |
|   | Farbe                                  |                        | 5,3       | 6,2       | 5,5       | 6,0       | 5,2       | 5,2       | 6,2       | 5,4       |
|   | Farbe forciert                         |                        | 5,5       | 6,8       | 6,0       | 6,5       | 5,5       | 5,5       | 6,3       | 5,8       |
|   | TBZ                                    |                        | 24        | 25        | 32        | 33        | 26        | 24        | 28        | 23        |
|   | TBZ forciert                           |                        | 25        | 26        | 33        | 34        | 26        | 23        | 30        | 23        |
|   | Reduktionsvermögen                     | %                      | 17        | 20        | 18        | 17        | 17        | 17        | 21        | 17        |
|   | Reduktionsvermögen forciert            | %                      | 18        | 22        | 18        | 19        | 21        | 19        | 21        | 18        |
|   | Stammwürze                             | GG-%                   | 11,19     | 12,09     | 11,74     | 12,06     | 12,01     | 12,09     | 11,95     | 11,93     |
|   | Stammwürze forciert                    | GG-%                   | 11,13     | 11,87     | 11,73     | 11,87     | 11,88     | 11,95     | 11,91     | 11,78     |
|   | scheinbarer Extrakt                    | GG-%                   | 1,68      | 2,11      | 1,83      | 1,83      | 1,92      | 1,98      | 1,93      | 2,10      |
|   | scheinbarer Extrakt forciert           | GG-%                   | 1,69      | 2,13      | 1,84      | 1,86      | 1,97      | 2,02      | 1,94      | 2,16      |
|   | Alkohol                                | Vol-%                  | 5,02      | 5,30      | 5,25      | 5,43      | 5,36      | 5,37      | 5,32      | 5,22      |
|   | Alkohol forciert                       | Vol-%                  | 4,98      | 5,17      | 5,24      | 5,31      | 5,26      | 5,27      | 5,29      | 5,11      |
|   | Viskosität (bez. auf 12 GG-%)          | mPa s                  | 1,543     | 1,588     | 1,654     | 1,599     | 1,512     | 1,525     | 1,525     | 1,605     |
|   | Viskosität (bez. auf 12 GG-%) forciert |                        | 1,545     | 1,603     | 1,648     | 1,611     | 1,588     | 1,512     | 1,599     | 1,605     |
|   | Vergärungsgrad scheinbar               | %                      | 85,5      | 83,2      | 85,0      | 85,4      | 83,2      | 84,2      | 84,5      | 83,1      |
|   | Vergärungsgrad scheinbar forciert      | %                      | 85,3      | 82,7      | 84,9      | 84,9      | 84,1      | 83,7      | 84,3      | 82,4      |
|   | Verkostung                             |                        | 4,29      | 4,16      | 4,25      | 4,24      | 4,38      | 4,25      | 4,24      | 4,15      |
|   | Verkostung forciert                    |                        | 3,66      | 3,59      | 3,56      | 3,56      | 3,82      | 3,74      | 3,68      | 3,62      |
|   | Alterungsverkostung                    |                        | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      |
|   | Alterungsverkostung forciert           |                        | 1,90      | 2,08      | 2,20      | 2,08      | 1,84      | 1,98      | 2,09      | 2,20      |
|   | Akzeptanz, forciert gealtertes Bier    |                        | 68,0      | 50,0      | 28,0      | 36,0      | 67,5      | 63,8      | 56,3      | 46,3      |
|   | Gesamtpolyphenole                      | mg/l                   | 164       | 169       | 158       | 124       | 164       | 118       | 158       | 131       |
|   | Gesamtpolyphenole forciert             | mg/l                   | 166       | 173       | 145       | 133       | 175       | 148       | 153       | 129       |
|   | Anthozyanogene                         | mg/l                   | 65        | 59        | 48        | 41        | 58        | 48        | 48        | 35        |
|   | Anthozyanogene forciert                | mg/l                   | 66        | 73        | 52        | 45        | 49        | 52        | 48        | 37        |
|   | Tanninoide                             | mg PVP/l               | 18        | 26,1      | 19,8      | 14,8      | 19,3      | 11,7      | 16,2      | 16,6      |
|   | Tanninoide forciert                    | mg PVP/l               | 20,7      | 24,7      | 18,4      | 7,7       | 18,9      | 14,4      | 19,8      | 0         |
|   | SO <sub>2</sub>                        | mg/l                   | 4,1       | 6,2       | 0,7       | 0,7       | 4,0       | 4,4       | 0,7       | 2,2       |
| SO <sub>2</sub> forciert                  | mg/l                                   | —                      | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         |           |
| Schaum nach ROSS und CLARK                |  | 96                     | 111       | —         | 109       | 111       | 121       | 133       | 131       |           |
| Schaum nach ROSS und CLARK forciert       |  | 95                     | 108       | —         | 102       | 110       | 118       | 128       | 124       |           |
| Alterungsindikatoren                      | 2-Methylbutanal                        | µg/l                   | n. a.     |
|   | 2-Methylbutanal forciert               | µg/l                   | n. a.     |
|   | 3-Methylbutanal                        | µg/l                   | 9,1       | 10        | 11        | 9,3       | 8,0       | 7,5       | 7,9       | 7,1       |
|   | 3-Methylbutanal forciert               | µg/l                   | 16        | 15        | 13        | 13        | 15        | 15        | 12        | 10        |
|   | 2-Furfural                             | µg/l                   | Sp.       |
|   | 2-Furfural forciert                    | µg/l                   | 96        | 76        | 68        | 84        | 90        | 82        | 83        | 106       |
|   | 5-Methylfurfural                       | µg/l                   | 3,4       | 3,1       | 5         | 3,9       | 2,9       | 3,2       | 3,4       | 3,1       |
|   | 5-Methylfurfural forciert              | µg/l                   | 3,4       | 3,9       | 4,5       | 4,3       | 4,8       | 3,5       | 4,1       | 3,7       |
|   | Benzaldehyd                            | µg/l                   | Sp.       |
|   | Benzaldehyd forciert                   | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | 1,2       | 0,9       | 0,8       | 1,0       |
|   | 2-Phenylethanal                        | µg/l                   | 5,5       | 6,8       | 7,4       | 7,5       | 7,1       | 5,6       | 7,1       | 5,0       |
|   | 2-Phenylethanal forciert               | µg/l                   | 15        | 11        | 10        | 13        | 13        | 11        | 13        | 10        |
|   | Bernsteinsäurediethylester             | µg/l                   | 1,6       | 1,4       | Sp.       | 2,1       | 2,9       | 1,9       | 2,4       | 1,7       |
|   | Bernsteinsäurediethylester forciert    | µg/l                   | 1,8       | 1,7       | 2,5       | 2,5       | 3,0       | 2,0       | 2,8       | n. a.     |
|   | Nicotinsäureethylester                 | µg/l                   | 3,4       | 3,3       | 4,3       | 4,4       | 4,7       | 3,7       | 4,1       | 3,8       |
|   | Nicotinsäureethylester forciert        | µg/l                   | 15        | 12        | 13        | 13        | 15        | 12        | 11        | 11        |
|   | Phenylsigssäureethylester              | µg/l                   | 0,7       | 0,6       | 0,8       | 0,8       | 0,6       | 0,6       | Sp.       | 0,6       |
|   | Phenylsigssäureethylester forciert     | µg/l                   | 0,9       | 0,8       | 0,9       | 0,8       | 0,8       | 0,7       | 0,8       | 0,6       |
|   | 2-Acetylfuran                          | µg/l                   | Sp.       |
|   | 2-Acetylfuran forciert                 | µg/l                   | 3,2       | 3,4       | 3,1       | 4,4       | Sp.       | 3,2       | 2,9       | 3,3       |
|   | 2-Propionylfuran                       | µg/l                   | 2,1       | 2,3       | 3,0       | 3,0       | 2,9       | 2,3       | 2,7       | 2,3       |
|   | 2-Propionylfuran forciert              | µg/l                   | 2,7       | 2,9       | 2,5       | 3,0       | 3,2       | 2,5       | 3,4       | 2,8       |
|   | γ-Nonalacton                           | µg/l                   | 7,6       | 8,1       | 8,1       | 8,0       | 8,7       | 8,2       | 9,4       | 9,2       |
| γ-Nonalacton forciert                     | µg/l                                   | 15                     | 17        | 14        | 14        | 14        | 15        | 17        | 18        |           |
| Summe der Wärmeindikatoren                | µg/l                                   | 7,6                    | 8,1       | 8,1       | 8,0       | 8,7       | 8,2       | 9,4       | 9,2       |           |
| Summe der Wärmeindikatoren forciert       | µg/l                                   | 111                    | 92        | 82        | 97        | 104       | 97        | 101       | 124       |           |
| Differenz Summe der Wärmeindikatoren      | µg/l                                   | 103                    | 84        | 74        | 89        | 95        | 89        | 92        | 115       |           |
| Summe der Sauerstoffindikatoren           | µg/l                                   | 15                     | 17        | 19        | 17        | 15        | 13        | 15        | 12        |           |
| Summe der Sauerstoffindikatoren forciert  | µg/l                                   | 31                     | 26        | 23        | 26        | 30        | 26        | 26        | 22        |           |
| Differenz Summe der Sauerstoffindikatoren | µg/l                                   | 16                     | 9         | 4         | 9         | 15        | 13        | 11        | 10        |           |
| Summe der Alterungskomponenten            | µg/l                                   | 30                     | 32        | 35        | 35        | 33        | 29        | 33        | 29        |           |
| Summe der Alterungskomponenten forciert   | µg/l                                   | 154                    | 131       | 119       | 139       | 146       | 136       | 141       | 156       |           |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten  | µg/l                                   | 124                    | 99        | 84        | 104       | 113       | 107       | 108       | 127       |           |
| Höhere Alkohole                           | Acetaldehyd                            | mg/l                   | 10        | 10        | 11        | 8,1       | 10        | 8,9       | 6,9       | 8,3       |
|   | Propanol-1                             | mg/l                   | 11        | 11        | 11        | 13        | 10        | 12        | 14        | 12        |
|   | Ethylacetat                            | mg/l                   | 15        | 14        | 20        | 12        | 22        | 15        | 13        | 14        |
|   | 2-Methylpropanol                       | mg/l                   | 12        | 10        | 10        | 11        | 11        | 14        | 14        | 16        |
|   | 3-Methylbutanol                        | mg/l                   | 35        | 29        | 39        | 38        | 37        | 34        | 43        | 33        |
|   | 2-Methylbutanol                        | mg/l                   | 12        | 10        | 11        | 11        | 12        | 14        | 16        | 15        |
|   | 2-Methylpropylacetat                   | mg/l                   | 0,10      | 0,05      | 0,10      | 0,04      | 0,10      | 0,10      | 0,04      | 0,07      |
|   | Buttersäureethylester                  | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       |
|   | 3-Methylbutylacetat                    | mg/l                   | 1,2       | 1,1       | 2,0       | 1,1       | 2,2       | 1,4       | 1,3       | 1,3       |
|   | 2-Methylbutylacetat                    | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,2       |
| Hexansäureethylester                      | mg/l                                   | 0,2                    | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,2       |           |

**Tab. AH 23: Analysendaten der Brauersuche Teil II**  
**(ohne Maischesäuerung/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)**

|  | Einheit                       | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |       |
|--|-------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|  |                               | PAS E/6,0              | PAS W/6,0 | MAG E/6,0 | MAG W/6,0 | BEL E/6,0 | BEL W/6,0 | MAN E/6,0 | MAN W/6,0 |       |
| Wurzearomastoffe (Vordenswürze, eingestelllt auf 9,7 GC-%) | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 235       | 265       | 412       | 292       | 272       | 206       | 389       | 201   |
|  | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 81        | 98        | 133       | 92        | 99        | 75        | 138       | 70    |
|  | Methional                     | µg/l                   | 32        | 40        | 104       | 78        | 90        | 42        | 75        | 52    |
|  | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 3,8       | 3,3       | 5,3       | 5,8       | 3,3       | 3,3       | 4,8       | 4,7   |
|  | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 160       | 185       | 276       | 176       | 231       | 159       | 208       | 147   |
|  | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 512       | 591       | 930       | 644       | 694       | 484       | 815       | 475   |
|  | Pentanal                      | µg/l                   | 10,2      | 10,4      | 12,2      | 11,1      | 11,4      | 11,3      | 13,7      | 13,5  |
|  | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 1,7       | 0,9       | 2,6       | 2,7       | 3,2       | 0,9       | 1,8       | 2,2   |
|  | Hexanal                       | µg/l                   | 38        | 37        | 38        | 35        | 31        | 29        | 55        | 46    |
|  | Heptanal                      | µg/l                   | 1,1       | 1,1       | 1,3       | 1,1       | 1,0       | 1,4       | 1,7       | 1,8   |
|  | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | 5,6       | n. n. |
|  | 2-Furfural                    | µg/l                   | 57        | 53        | 91        | 93        | 46        | 35        | 67        | 37    |
|  | 2-Acetylfuluran               | µg/l                   | n. n.     | 9,0       | n. n.     | n. n. |
|  | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 0,99      | 0,91      | 0,97      | 0,78      | 0,70      | 0,80      | 0,81      | 0,95  |
|  | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 58        | 45        | 41        | 40        | 36        | 35        | 37        | 36    |
|  | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 55        | 16        | 16        | 12        | 14        | 13        | 14        | 12    |
|  | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 6,4       | 18,2      | 15,4      | 13,1      | 15,0      | 13,6      | 20,3      | 20,1  |
|  | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 40,5      | 14,7      | 11,7      | 6,0       | 8,9       | 9,8       | 8,1       | 8,3   |
|  | 1-Octanol                     | µg/l                   | 0,2       | 1,2       | 1,8       | 1,9       | 0,1       | 1,1       | 0,2       | 1,6   |
|  | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 1,6       | 1,9       | 2,1       | 1,5       | 1,9       | 1,5       | 2,9       | 2,7   |
| Phenylethanol  | µg/l                          | 58                     | 56        | 49        | 44        | 50        | 55        | 41        | 48        |       |
| Wurzearomastoffe (Planensvoll-Würze)                       | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 299       | 275       | 433       | 341       | 282       | 232       | 420       | 218   |
|  | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 112       | 95        | 143       | 111       | 105       | 86        | 153       | 78    |
|  | Methional                     | µg/l                   | 33        | 42        | 99        | 79        | 96        | 48        | 86        | 54    |
|  | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 9,0       | 6,4       | 8,0       | 6,5       | 0,3       | 4,2       | 6,2       | 5,9   |
|  | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 186       | 173       | 282       | 191       | 39        | 194       | 231       | 163   |
|  | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 640       | 591       | 965       | 728       | 521       | 564       | 896       | 518   |
|  | Pentanal                      | µg/l                   | 13        | 14        | 15        | 14        | 13        | 13        | 16        | 16    |
|  | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 2,5       | 2,3       | 1,0       | 2,1       | 2,2       | 2,6       | 3,7       | 0,5   |
|  | Hexanal                       | µg/l                   | 52        | 54        | 48        | 49        | 39        | 39        | 69        | 60    |
|  | Heptanal                      | µg/l                   | 1,3       | 0,7       | 1,7       | 1,6       | 1,3       | 1,2       | 2,2       | 2,1   |
|  | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | 0,7       | n. n.     | n. n.     | 5,7       | Sp.       | 0,7       | 0,7   |
|  | 2-Furfural                    | µg/l                   | 55        | 57        | 90        | 95        | 46        | 39        | 73        | 39    |
|  | 2-Acetylfuluran               | µg/l                   | n. n.     | 1,0       | 39        | n. n.     | 1,0       | n. n.     | n. n.     | 1,0   |
|  | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 1,02      | 1,03      | 1,53      | 1,15      | 0,82      | 1,08      | 1,18      | 1,51  |
|  | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 44        | 46        | 42        | 45        | 36        | 38        | 41        | 40    |
|  | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 16        | 15        | 16        | 14        | 14        | 13        | 17        | 13    |
|  | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 17,8      | 14,8      | 16,7      | 15,2      | 15,3      | 15,2      | 22,5      | 22,5  |
|  | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 17,2      | 15,8      | 13,9      | 12,3      | 60,0      | 11,7      | 9,6       | 9,6   |
|  | 1-Octanol                     | µg/l                   | 0,2       | 0,2       | 2,6       | 0,2       | 1,3       | 0,2       | 0,2       | 2,0   |
|  | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 2,8       | 2,3       | 2,6       | 2,2       | n. n.     | 2,2       | 4,0       | 3,7   |
| Phenylethanol  | µg/l                          | 57                     | 57        | 56        | 50        | 52        | 54        | 46        | 47        |       |
| Wurzearomastoffe (Anstellwürze)                            | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 34        | 51        | 52        | 49        | 50        | 29        | 53        | 33    |
|  | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 9,0       | 5,0       | 15,0      | 14,0      | 15,0      | 9,0       | 17,0      | 11,0  |
|  | Methional                     | µg/l                   | 34        | 19        | 34        | 29        | 30        | 30        | 27        | n. n. |
|  | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 1,3       | 1,5       | 1,0       | 1,8       | 1,1       | 1,4       | 1,8       | 1,8   |
|  | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 67        | 100       | 117       | 87        | 131       | 70        | 96        | 70    |
|  | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 146       | 177       | 219       | 182       | 226       | 139       | 193       | 115   |
|  | Pentanal                      | µg/l                   | 3,5       | 4,3       | 3,3       | 3,2       | 3,8       | 3,4       | 3,3       | 3,2   |
|  | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 0,5       | n. n.     | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 0,5       | 166,4     | 0,7   |
|  | Hexanal                       | µg/l                   | 3,0       | 4,0       | 3,0       | 3,0       | 4,0       | 3,0       | 4,0       | 3,0   |
|  | Heptanal                      | µg/l                   | 0,5       | 0,6       | 0,5       | 0,6       | 0,6       | 0,3       | 0,5       | n. n. |
|  | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | 0,4       | 0,5       | 0,7       | 1,1       | n. n.     | n. n.     | n. n.     | n. n. |
|  | 2-Furfural                    | µg/l                   | 62        | 52        | 94        | 77        | 75        | 41        | 77        | 40    |
|  | 2-Acetylfuluran               | µg/l                   | 3,0       | n. n.     | 1,0       | 4,0       | 2,0       | n. n.     | 3,0       | n. n. |
|  | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 0,58      | 0,53      | 0,61      | 0,53      | 0,69      | 0,38      | 0,52      | 0,58  |
|  | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | n. n.     | 100       | n. n.     | 1         | n. n.     | 1         | n. n.     | n. n. |
|  | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 1,0       | n. n.     | 8,0       | 1,0       | 9,0       | 8,0       | 9,0       | n. n. |
|  | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 0,3       | 0,4       | 0,3       | 0,3       | 0,4       | 1,3       | 4,2       | 3,1   |
|  | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 0,3       | Sp.       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 17,8  |
|  | 1-Octanol                     | µg/l                   | n. n.     | Sp.       | Sp.       | n. n.     | n. n.     | n. n.     | n. n.     | Sp.   |
|  | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 0,2       | 0,8       | 0,2       | 0,1       | 0,4       | 0,2       | 0,5       | 0,2   |
| Phenylethanol  | µg/l                          | 38                     | 40        | 34        | 31        | 36        | 34        | 30        | 29        |       |
| Bieraromastoffe  | Hexanol-1                     | µg/l                   | 12        | 11        | 10        | 11        | 10        | 11        | 13        | 13    |
|  | Heptanol-1                    | µg/l                   | 3,2       | 3,8       | 3,6       | 6,5       | 2,8       | 3,5       | 7,3       | 3,4   |
|  | Octanol-1                     | µg/l                   | 10        | 9,0       | 14        | 12        | 14        | 14        | 12        | 14    |
|  | Decanol-1                     | µg/l                   | 5,7       | 4,6       | 5,8       | 5,3       | 6,3       | 6,6       | 4,6       | 5,7   |
|  | 2-Phenylethanol               | µg/l                   | 20676     | 21248     | 26756     | 23629     | 23141     | 22402     | 25821     | 21723 |
|  | Furfurylalkohol               | µg/l                   | 333       | 354       | 521       | 405       | 507       | 352       | 437       | 377   |
|  | Essigsäureisobutylester       | µg/l                   | 56        | 47        | 58        | 43        | 63        | 78        | 49        | 84    |
|  | Essigsäurehexylester          | µg/l                   | 3,5       | 2,6       | 4,0       | 3,1       | 3,6       | 2,7       | 3,5       | 3,5   |
|  | Essigsäureheptylester         | µg/l                   | 1,4       | 1,5       | 1,9       | 1,6       | 1,4       | 2,2       | 1,4       | 1,5   |
|  | Essigsäureoctylester          | µg/l                   | 2,1       | 2,1       | 2,9       | 2,3       | 2,8       | 2,8       | 2,3       | 3,2   |
|  | Essigsäurefurfurylester       | µg/l                   | 1,4       | 1,1       | 2,4       | 1,9       | 2,3       | 1,6       | 1,7       | 1,4   |
|  | Essigsäure-2-Phenylethylester | µg/l                   | 479       | 462       | 894       | 414       | 772       | 634       | 531       | 667   |
|  | Buttersäureethylester         | µg/l                   | 77        | 74        | 94        | 70        | 99        | 86        | 74        | 84    |
|  | Hexansäureethylester          | µg/l                   | 143       | 128       | 163       | 110       | 204       | 181       | 131       | 168   |
|  | Octansäureethylester          | µg/l                   | 229       | 226       | 244       | 195       | 276       | 266       | 207       | 242   |
|  | Decansäureethylester          | µg/l                   | 55        | 60        | 41        | 37        | 40        | 47        | 40        | 38    |
|  | Isovaleriansäure              | µg/l                   | 815       | 763       | 822       | 666       | 1006      | 817       | 988       | 798   |
|  | Hexansäure                    | µg/l                   | 1605      | 1579      | 1738      | 1294      | 2028      | 1920      | 1508      | 1843  |
|  | Octansäure                    | µg/l                   | 4900      | 4688      | 5117      | 3857      | 5786      | 5397      | 4273      | 5331  |
|  | Nonansäure                    | µg/l                   | 10,0      | 9,1       | 8,1       | 6,8       | 8,2       | 8,5       | 8,1       | 9,4   |
| Decansäure   | µg/l                          | 958                    | 981       | 636       | 569       | 586       | 727       | 585       | 595       |       |
| Dodecansäure   | µg/l                          | 39                     | 70        | 30        | 30        | 46        | 53        | 28        | 33        |       |
| α-Terpineol  | µg/l                          | n. a.                  | n. a.     | n. a.     | n. a.     | n. a.     | n. a.     | n. a.     | n. a.     |       |
| Linalool   | µg/l                          | 13,0                   | 4,6       | 6,5       | 8,3       | 4,5       | 1,9       | 8,5       | 2,3       |       |
| Nerol  | µg/l                          | 2,0                    | 2,3       | 1,8       | 2,4       | 1,4       | 1,3       | 2,3       | 1,1       |       |
| γ-Nonalacton   | µg/l                          | 7,9                    | 7,6       | 8,4       | 7,9       | 8,7       | 7,7       | 10        | 10        |       |

**Tab. AH 24: Analysendaten der Brauversuche Teil III  
(ohne Maischesäuerung/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)**

|                               | Einheit                          | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |       |
|-------------------------------|----------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|                               |                                  | PAS E/5,7              | PAS W/5,7 | MAG E/5,7 | MAG W/5,7 | BEL E/5,7 | BEL W/5,7 | MAN E/5,7 | MAN W/5,7 |       |
| Malzanalyse                   | Wassergehalt Malz                | %                      | 4,0       | 4,1       | 3,8       | 4,0       | 3,8       | 4,0       | 3,7       | 3,8   |
|                               | Extrakt Malz                     | %, lfr.                | 78,9      | 77,2      | 79,2      | 78,7      | 79,2      | 78,1      | 79,6      | 77,8  |
|                               | Extrakt MTrs.                    | %, wfr.                | 82,2      | 80,5      | 82,3      | 82        | 82,3      | 81,4      | 82,7      | 80,9  |
|                               | Viskosität (8,6 GG-%)            | mPa s                  | 1,467     | 1,493     | 1,506     | 1,464     | 1,453     | 1,463     | 1,478     | 1,49  |
|                               | Viskosität 65 °C (8,6 GG-%)      | mPa s                  | 1,502     | 1,633     | 1,651     | 1,617     | 1,481     | 1,503     | 1,515     | 1,639 |
|                               | Friabilimeter Mürbigkeit         | %                      | 96,4      | 85,8      | 88,6      | 79,7      | 98        | 90,6      | 94,6      | 90,4  |
|                               | Ganzglasigkeit                   | %                      | 0,3       | n. n.     | 0,3       | 0,1       | 0,3       | n. n.     | n. n.     | 0,1   |
|                               | Teilglasigkeit                   | %                      | 1         | 1,4       | 4,2       | 2,2       | 0,8       | 0,2       | 0,7       | 0,2   |
|                               | Verzuckerungszeit                | min.                   | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10  |
|                               | Ablauf                           | klar/opal              | klar      | klar      | opal      | klar      | klar      | klar      | opal      | klar  |
|                               | Endvergärungsgrad                | %, schb.               | 82,6      | 81,2      | 80,5      | 82,4      | 81,9      | 80,9      | 80,8      | 79,2  |
|                               | Farbe Fotometer                  | EBC                    | 2,4       | 2,8       | 2,2       | 2,5       | 2,4       | 3,1       | 3,1       | 3,2   |
|                               | Kochfarbe Fotometer              | EBC                    | 5,6       | 5,9       | 5,3       | 5,5       | 6         | 5,6       | 5,9       | 5,8   |
|                               | pH-Wert                          |                        | 6,01      | 5,98      | 5,98      | 5,93      | 5,98      | 5,96      | 5,99      | 5,98  |
|                               | Rohprotein Malz                  | %, wfr.                | 9,1       | 11,1      | 9,7       | 10,7      | 10,2      | 11,7      | 10,5      | 12,8  |
|                               | Löslicher Stickstoff MTrs.       | mg/100g                | 565       | 626       | 634       | 663       | 695       | 644       | 758       | 767   |
|                               | Eiweiss-Lösungsgrad              | %                      | 38,8      | 35,2      | 40,9      | 38,7      | 42,6      | 34,4      | 45,1      | 37,5  |
|                               | freier Amino-Stickstoff TrS.     | mg/100g                | 120       | 113       | 133       | 146       | 142       | 137       | 150       | 149   |
|                               | β-Glucan                         | mg/l                   | 181       | 290       | 335       | 212       | 107       | 98        | 198       | 202   |
|                               | β-Glucan 65 °C                   | mg/l                   | 205       | 401       | 498       | 360       | 171       | 200       | 299       | 350   |
| Thiobarbitursäurezahl         |                                  | 12                     | 13        | 16        | 18        | 14        | 13        | 18        | 12        |       |
| DMS-Vorläufer                 | µg/l                             | 3,1                    | 3,8       | 4,4       | 5,2       | 6,6       | 6,5       | 4,4       | 5,2       |       |
| Diastatische Kraft            | WK                               | 266                    | 347       | 286       | 329       | 245       | 263       | 318       | 335       |       |
| α-Amylase                     | ASBC, wfr.                       | 62                     | 61        | 65        | 62        | 46        | 51        | 67        | 54        |       |
| Maischen/Lautern/Kochen       | Stammwürze 10 Minuten            | GG-%                   | 14,51     | 14,28     | 14,61     | 14,45     | 14,64     | 14,24     | 14,91     | 14,39 |
|                               | Stammwürze 62E                   | GG-%                   | 15,39     | 15,28     | 15,40     | 15,28     | 15,56     | 15,54     | 15,73     | 15,26 |
|                               | Stammwürze 72A                   | GG-%                   | 15,91     | 15,85     | 16,00     | 15,85     | 16,36     | 16,17     | 16,29     | 15,74 |
|                               | Stammwürze 72E                   | GG-%                   | 16,20     | 16,07     | 16,35     | 16,01     | 16,44     | 16,30     | 16,59     | 16,09 |
|                               | Stammwürze 78A                   | GG-%                   | 16,22     | 16,11     | 16,43     | 16,13     | 16,51     | 16,39     | 16,62     | 16,08 |
|                               | Stammwürze 78E                   | GG-%                   | 16,27     | 16,20     | 16,45     | 16,10     | 16,56     | 16,33     | 16,60     | 16,09 |
|                               | Stammwürze VW                    | GG-%                   | 15,64     | 15,52     | 15,86     | 15,62     | 16,01     | 15,49     | 15,99     | 15,42 |
|                               | Stammwürze Pfv                   | GG-%                   | 10,36     | 10,13     | 10,69     | 10,27     | 10,21     | 10,10     | 10,26     | 10,05 |
|                               | Stammwürze KA                    | GG-%                   | 10,49     | 10,22     | 10,74     | 10,29     | 10,25     | 10,16     | 10,45     | 10,12 |
|                               | Stammwürze vH                    | GG-%                   | 11,92     | —         | 11,96     | 11,81     | 11,75     | 10,43     | 11,26     | 11,35 |
|                               | Stammwürze KE                    | GG-%                   | 11,61     | 11,34     | 11,97     | 11,99     | 11,72     | 11,92     | 11,90     | 11,97 |
|                               | Stammwürze AW                    | GG-%                   | 11,48     | 10,75     | 11,79     | 11,76     | 11,73     | 11,71     | 11,86     | 11,67 |
|                               | pH-Wert 10 Minuten               |                        | 5,78      | 5,78      | 5,82      | 5,77      | 5,80      | 5,85      | 5,84      | 5,82  |
|                               | pH-Wert 62E                      |                        | 5,78      | 5,74      | 5,80      | 5,74      | 5,73      | 5,77      | 5,74      | 5,77  |
|                               | pH-Wert 72A                      |                        | 5,73      | 5,70      | 5,76      | 5,73      | 5,73      | 5,74      | 5,76      | 5,75  |
|                               | pH-Wert 72E                      |                        | 5,72      | 5,68      | 5,75      | 5,72      | 5,73      | 5,73      | 5,75      | 5,72  |
|                               | pH-Wert 78A                      |                        | 5,72      | 5,67      | 5,71      | 5,71      | 5,71      | 5,71      | 5,75      | 5,72  |
|                               | pH-Wert 78E                      |                        | 5,72      | 5,67      | 5,71      | 5,70      | 5,67      | 5,71      | 5,76      | 5,73  |
|                               | pH-Wert VW                       |                        | 5,59      | 5,55      | 5,58      | 5,48      | 5,64      | 5,62      | 5,57      | 5,52  |
|                               | pH-Wert Pfv                      |                        | 5,70      | 5,66      | 5,61      | 5,58      | 5,72      | 5,73      | 5,64      | 5,69  |
|                               | pH-Wert KA                       |                        | 5,69      | 5,65      | 5,65      | 5,67      | 5,74      | 5,75      | 5,59      | 5,61  |
|                               | pH-Wert vH                       |                        | 5,67      | —         | 5,57      | 5,60      | 5,61      | 5,75      | 5,55      | 5,58  |
|                               | pH-Wert KE                       |                        | 5,65      | 5,64      | 5,50      | 5,50      | 5,63      | 5,65      | 5,54      | 5,52  |
|                               | pH-Wert AW                       |                        | 5,66      | 5,84      | 5,48      | 5,45      | 5,63      | 5,69      | 5,54      | 5,46  |
|                               | Farbe 10 Minuten                 |                        | 5,14      | 5,54      | 4,90      | 5,66      | 5,06      | 5,62      | 5,54      | 5,85  |
|                               | Farbe 62E                        |                        | 5,42      | 5,95      | 5,37      | 5,96      | 5,45      | 6,05      | 6,36      | 6,38  |
|                               | Farbe 72A                        |                        | 5,43      | 5,86      | 5,44      | 6,11      | 5,54      | 6,26      | 6,14      | 6,31  |
|                               | Farbe 72E                        |                        | 5,71      | 5,81      | 5,55      | 6,02      | 5,72      | 6,15      | 6,17      | 6,56  |
|                               | Farbe 78A                        |                        | 5,71      | 5,85      | 5,94      | 6,07      | 5,75      | 6,26      | 6,22      | 6,78  |
|                               | Farbe 78E                        |                        | 5,60      | 6,06      | 5,65      | 6,33      | 5,91      | 6,08      | 6,26      | 6,35  |
|                               | Farbe VW                         |                        | 7,41      | 7,30      | 6,81      | 7,31      | 7,38      | 7,27      | 6,22      | 6,71  |
|                               | Farbe Pfv                        |                        | 6,02      | 5,63      | 5,61      | 5,64      | 5,80      | 5,82      | 5,02      | 5,11  |
|                               | Farbe KA                         |                        | 6,29      | 5,71      | 5,47      | 5,56      | 5,67      | 5,70      | 5,07      | 5,63  |
|                               | Farbe vH                         |                        | 6,93      | —         | 6,84      | 7,53      | 6,63      | 6,59      | 5,95      | 6,26  |
|                               | Farbe KE                         |                        | 8,34      | 7,69      | 8,08      | 8,31      | 7,90      | 7,92      | 7,92      | 8,46  |
|                               | Farbe AW                         |                        | 7,92      | 7,59      | 8,90      | 8,64      | 8,23      | 8,00      | 8,37      | 7,89  |
|                               | Reduktionsvermögen 10 Minuten    | %                      | 23,9      | 28,9      | 24,6      | 23,8      | 25,8      | 21,4      | 27,0      | 28,2  |
|                               | Reduktionsvermögen 62E           | %                      | 23,7      | 29,1      | 25,6      | 22,7      | 26,7      | 22,5      | 24,3      | 24,4  |
|                               | Reduktionsvermögen 72A           | %                      | 24,1      | 23,4      | 24,4      | 20,0      | 27,4      | 24,2      | 21,4      | 21,3  |
|                               | Reduktionsvermögen 72E           | %                      | 23,9      | 20,6      | 20,7      | 20,9      | 21,9      | 22,6      | 21,5      | 25,2  |
|                               | Reduktionsvermögen 78A           | %                      | 23,4      | 21,2      | 23,1      | 22,1      | 24,9      | 24,7      | 22,1      | 22,7  |
|                               | Reduktionsvermögen 78E           | %                      | 23,2      | 22,3      | 21,9      | 23,0      | 24,7      | 22,5      | 21,9      | 21,4  |
|                               | Reduktionsvermögen VW            | %                      | 59,3      | 48,4      | 42,1      | 56,5      | 68,8      | 53,8      | 48,5      | 57,8  |
|                               | Reduktionsvermögen Pfv           | %                      | 62,2      | 50,6      | 40,3      | 56,0      | 67,5      | 55,7      | 47,2      | 58,5  |
|                               | Reduktionsvermögen KA            | %                      | 68,9      | 61,4      | 35,0      | 52,2      | 73,4      | 72,5      | 39,2      | 40,8  |
|                               | Reduktionsvermögen vH            | %                      | 61,3      | —         | 55,6      | 56,2      | 67,5      | 56,1      | 67,9      | 61,7  |
|                               | Reduktionsvermögen KE            | %                      | 75,4      | 42,6      | 76,9      | 54,5      | 76,5      | 41,8      | 44,9      | 70,8  |
|                               | Reduktionsvermögen AW            | %                      | 58,1      | 31,6      | 56,8      | 42,5      | 47,2      | 35,6      | 66,7      | 48,8  |
|                               | Reduktionsvermögen 9% 10 Minuten | %                      | 13,9      | 19,8      | 17,0      | 17,1      | 16,6      | 16,5      | 16,0      | 19,1  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% 62E    | %                      | 14,2      | 19,1      | 16,6      | 17,6      | 16,5      | 16,5      | 14,1      | 19,7  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% 72A    | %                      | 13,5      | 18,7      | 13,2      | 15,5      | 16,1      | 17,3      | 12,5      | 15,7  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% 72E    | %                      | 14,5      | 17,5      | 12,6      | 16,5      | 13,8      | 15,6      | 13,1      | 18,7  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% 78A    | %                      | 13,6      | 16,8      | 13,8      | 17,5      | 15,2      | 17,9      | 12,4      | 18,8  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% 78E    | %                      | 14,2      | 15,8      | 14,3      | 20,1      | 16,0      | 14,6      | 14,2      | 14,9  |
|                               | Reduktionsvermögen 9 GG-% VW     | %                      | 42,7      | 34,5      | 33,8      | 42,3      | 48,8      | 35,3      | 37,4      | 42,3  |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% Pfv | %                                | 61,6                   | 48,5      | 44,8      | 55,8      | 60,8      | 51,8      | 53,4      | 54,8      |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% KA  | %                                | 64,9                   | 58,8      | 37,0      | 56,5      | 66,9      | 66,4      | 47,9      | 55,5      |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% vH  | %                                | 49,9                   | —         | 44,1      | 44,6      | 54,2      | 44,7      | 59,0      | 53,5      |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% KE  | %                                | 63,5                   | 31,6      | 63,1      | 40,2      | 61,2      | 33,2      | 35,3      | 58,2      |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% AW  | %                                | 46,8                   | 26,3      | 41,9      | 29,9      | 33,9      | 24,8      | 53,5      | 39,0      |       |
| TBZ 10 Minuten                |                                  | 19                     | 22        | 28        | 31        | 22        | 23        | 19        | 26        |       |
| TBZ 62E                       |                                  | 19                     | 22        | 28        | 30        | 22        | 22        | 19        | 26        |       |
| TBZ 72A                       |                                  | 19                     | 22        | 27        | 30        | 21        | 22        | 19        | 26        |       |
| TBZ 72E                       |                                  | 19                     | 22        | 27        | 30        | 20        | 22        | 19        | 26        |       |
| TBZ 78A                       |                                  | 19                     | 22        | 28        | 30        | 22        | 23        | 20        | 26        |       |
| TBZ 78E                       |                                  | 19                     | 22        | 27        | 30        | 20        | 23        | 20        | 26        |       |
| TBZ VW                        |                                  | 20                     | 22        | 35        | 27        | 24        | 21        | 27        | 20        |       |
| TBZ Pfv                       |                                  | 16                     | 15        | 21        | 21        | 17        | 15        | 18        | 14        |       |
| TBZ KA                        |                                  | 16                     | 17        | 22        | 21        | 17        | 15        | 20        | 16        |       |
| TBZ vH                        |                                  | 31                     | —         | 40        | 38        | 35        | 29        | 35        | 30        |       |
| TBZ KE                        |                                  | 33                     | 34        | 42        | 40        | 37        | 33        | 33        | 34        |       |
| TBZ AW                        |                                  | 33                     | 32        | 43        | 40        | 38        | 34        | 41        | 42        |       |
| FAN AW                        | mg/100 ml                        | 19,39                  | 17,80     | 20,46     | 19,73     | 19,61     | 18,67     | 20,79     | 18,94     |       |

**Tab. AH 25: Analysendaten der Brauersuche Teil I**  
**(mit Maischesäuerung pH 5,7/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)**

|  | Einheit                                   | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |       |
|--|---|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|  |   | PAS E/5,7              | PAS W/5,7 | MAG E/5,7 | MAG W/5,7 | BEL E/5,7 | BEL W/5,7 | MAN E/5,7 | MAN W/5,7 |       |
| Bieranalyse                              | pH-Wert                                   | 4,79                   | 4,74      | 4,75      | 4,67      | 4,76      | 4,77      | 4,81      | 4,69      |       |
|  | pH-Wert forciert                          | 4,81                   | 4,74      | 4,75      | 4,69      | 4,75      | 4,76      | 4,82      | 4,67      |       |
|  | Farbe                                     | 5,5                    | 5,0       | 6,1       | 6,1       | 5,3       | 5,2       | 6,1       | 5,6       |       |
|  | Farbe forciert                            | 5,5                    | 5,2       | 6,3       | 6,5       | 5,5       | 5,2       | 6,4       | 6,1       |       |
|  | TBZ                                       | 26                     | 32        | 32        | 34        | 29        | 27        | 31        | 25        |       |
|  | TBZ forciert                              | 24                     | 25        | 33        | 35        | 26        | 24        | 32        | 27        |       |
|  | Reduktionsvermögen                        | %                      | 23        | 22        | 27        | 23        | 24        | 22        | 21        |       |
|  | Reduktionsvermögen forciert               | %                      | 25        | 23        | 30        | 28        | 24        | 26        | 24        |       |
|  | Stammwürze                                | GG-%                   | 11,35     | 11,21     | 11,64     | 11,40     | 11,62     | 11,15     | 11,77     | 11,30 |
|  | Stammwürze forciert                       | GG-%                   | 11,31     | 11,18     | 11,66     | 11,32     | 11,62     | 11,16     | 11,75     | 11,26 |
|  | scheinbarer Extrakt                       | GG-%                   | 1,52      | 1,68      | 1,69      | 1,68      | 1,67      | 1,86      | 1,77      | 2,20  |
|  | scheinbarer Extrakt forciert              | GG-%                   | 1,52      | 1,69      | 1,69      | 1,69      | 1,68      | 1,85      | 1,79      | 2,21  |
|  | Alkohol                                   | Vol-%                  | 5,19      | 5,03      | 5,27      | 5,14      | 5,27      | 4,91      | 5,30      | 4,82  |
|  | Alkohol forciert                          | Vol-%                  | 5,17      | 5,01      | 5,28      | 5,09      | 5,26      | 4,92      | 5,28      | 4,79  |
|  | Viskosität (bez. auf 12 GG-%)             | mPa s                  | 1,554     | 1,606     | 1,672     | 1,634     | 1,531     | 1,578     | 1,586     | 1,660 |
|  | Viskosität (bez. auf 12 GG-%) forciert    |                        | 1,557     | 1,61      | 1,669     | 1,608     | 1,556     | 1,572     | 1,587     | 1,662 |
|  | Vergärungsgrad scheinbar                  | %                      | 87,1      | 85,6      | 86,0      | 85,8      | 86,2      | 83,9      | 85,6      | 81,3  |
|  | Vergärungsgrad scheinbar forciert         | %                      | 87,1      | 85,4      | 86,1      | 85,7      | 86,1      | 84,0      | 85,4      | 81,1  |
|  | Verkostung                                |                        | 4,47      | 4,27      | 4,36      | 4,23      | 4,45      | 4,45      | 4,25      | 4,17  |
|  | Verkostung forciert                       |                        | 4,13      | 3,99      | 3,89      | 3,66      | 3,97      | 4,08      | 3,59      | 3,74  |
|  | Alterungsverkostung                       |                        | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,04      | 1,00      | 1,07  |
|  | Alterungsverkostung forciert              |                        | 1,66      | 1,64      | 1,82      | 2,20      | 1,94      | 1,76      | 2,23      | 2,00  |
|  | Akzeptanz, forciert gealtertes Bier       |                        | 76,0      | 68,0      | 60,0      | 46,7      | 60,0      | 68,0      | 43,3      | 51,7  |
|  | Gesamtpolyphenole                         | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | Gesamtpolyphenole forciert                | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | Anthozyanogene                            | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | Anthozyanogene forciert                   | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | Tanninoide                                | mg PVP/l               | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | Tanninoide forciert                       | mg PVP/l               | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|  | SO <sub>2</sub>                           | mg/l                   | 0,9       | 0,7       | 0,6       | 0,5       | 0,3       | 0,2       | 0,2       | 0,3   |
|  | SO <sub>2</sub> forciert                  | mg/l                   | 0,2       | 0,2       | 0,3       | 0,2       | 0,3       | 0,3       | 0,4       | 0,2   |
| Schaum nach Nibem                        | s   | 167                    | 205       | 257       | 311       | 240       | 242       | 280       | 276       |       |
| Schaum nach Nibem forciert               | s   | 200                    | 218       | 253       | 321       | 251       | 249       | 267       | 265       |       |
| Alterungsindikatoren                     | 2-Methylbutanal                           | µg/l                   | —         | n. a.     |       |
|  | 2-Methylbutanal forciert                  | µg/l                   | n. a.     |       |
|  | 3-Methylbutanal                           | µg/l                   | —         | 16        | n. a.     | 20        | 7,3       | 6,5       | 7,3       |       |
|  | 3-Methylbutanal forciert                  | µg/l                   | n. a.     | 16,0      | 24,0      | 24,0      | 8,7       | 10,0      | 10,0      |       |
|  | 2-Furfural                                | µg/l                   | —         | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       |       |
|  | 2-Furfural forciert                       | µg/l                   | 33        | 43        | 69        | 69        | 29        | 19        | 69        |       |
|  | 5-Methylfurfural                          | µg/l                   | —         | 3,4       | 3,6       | 3,5       | 3,6       | 2,8       | 4,1       |       |
|  | 5-Methylfurfural forciert                 | µg/l                   | 4         | 3,4       | 3,8       | 3,8       | 3,9       | 3,5       | 5,5       |       |
|  | Benzaldehyd                               | µg/l                   | —         | Sp.       | Sp.       | 0,9       | Sp.       | 0,5       | Sp.       |       |
|  | Benzaldehyd forciert                      | µg/l                   | 0,9       | Sp.       | 0,9       | 0,9       | Sp.       | 1,1       | Sp.       |       |
|  | 2-Phenylethanal                           | µg/l                   | —         | 6,0       | 11        | 14        | 16        | 5,9       | 6,8       |       |
|  | 2-Phenylethanal forciert                  | µg/l                   | 8,1       | 8,6       | 17        | 17        | 18        | 8,2       | 15        |       |
|  | Bernsteinsäurediethylester                | µg/l                   | —         | 1,7       | Sp.       | 1,9       | 1,9       | 1,3       | Sp.       |       |
|  | Bernsteinsäurediethylester forciert       | µg/l                   | 2,3       | 2,4       | 2,2       | 2,2       | 1,9       | 2,2       | Sp.       |       |
|  | Nicotinsäureethylester                    | µg/l                   | —         | 5         | 4,1       | 5,1       | 6,0       | 5,0       | 5,0       |       |
|  | Nicotinsäureethylester forciert           | µg/l                   | 12        | 8,9       | 13        | 13        | 12        | 10        | 14        |       |
|  | Phenyllessigsäureethylester               | µg/l                   | —         | 0,7       | 0,8       | 0,7       | 0,9       | 0,5       | 0,8       |       |
|  | Phenyllessigsäureethylester forciert      | µg/l                   | 1,1       | 0,8       | 0,8       | 0,8       | 0,9       | 1,0       | 1,2       |       |
|  | 2-Acetylfuran                             | µg/l                   | —         | Sp.       | 3,0       | 2,9       | Sp.       | Sp.       | Sp.       |       |
|  | 2-Acetylfuran forciert                    | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | 3,5       | 3,5       | Sp.       | Sp.       | Sp.       |       |
|  | 2-Propionylfuran                          | µg/l                   | —         | 3,3       | 2,9       | 3,1       | 3,3       | 2,1       | 3,2       |       |
|  | 2-Propionylfuran forciert                 | µg/l                   | 14        | n. a.     | 3,3       | 3,3       | 3,4       | n. a.     | 5,1       |       |
|  | γ-Nonalacton                              | µg/l                   | —         | 12        | 12        | 12        | 11        | 10        | 15        |       |
|  | γ-Nonalacton forciert                     | µg/l                   | 19        | 16        | 19        | 19        | 15        | 15        | 24        |       |
|  | Summe der Wärmeindikatoren                | µg/l                   | —         | 12        | 12        | 12        | 11        | 10        | 15        |       |
|  | Summe der Wärmeindikatoren forciert       | µg/l                   | 52        | 59        | 89        | 89        | 44        | 34        | 93        |       |
|  | Differenz Summe der Wärmeindikatoren      | µg/l                   | —         | 47        | 77        | 77        | 33        | 24        | 78        |       |
|  | Summe der Sauerstoffindikatoren           | µg/l                   | —         | 22        | 11        | 35        | 23        | 13        | 14        |       |
|  | Summe der Sauerstoffindikatoren forciert  | µg/l                   | 8,9       | 24        | 42        | 42        | 27        | 19        | 25        |       |
|  | Differenz Summe der Sauerstoffindikatoren | µg/l                   | —         | 2         | 31        | 7         | 4         | 6         | 11        |       |
|  | Summe der Alterungskomponenten            | µg/l                   | —         | 43        | 33        | 59        | 44        | 30        | 37        |       |
| Summe der Alterungskomponenten forciert  | µg/l                                      | 82                     | 90        | 145       | 145       | 80        | 61        | 130       |           |       |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten | µg/l                                      | —                      | 47        | 112       | 86        | 36        | 31        | 93        |           |       |
| Höhere Alkohole                          | Acetaldehyd                               | mg/l                   | 13        | 9,0       | 13        | 11        | 8,0       | 8,0       | 12        |       |
|  | Propanol-1                                | mg/l                   | 12        | 11        | 10        | 12        | 19        | 12        | 14        |       |
|  | Ethylacetat                               | mg/l                   | 17        | 119       | 12        | 15        | 8,0       | 19        | 6,4       |       |
|  | 2-Methylpropanol                          | mg/l                   | 13        | 12        | 11        | 12        | 18        | 14        | 14        |       |
|  | 3-Methylbutanol                           | mg/l                   | 39        | 38        | 41        | 41        | 48        | 37        | 43        |       |
|  | 2-Methylbutanol                           | mg/l                   | 11        | 11        | 12        | 12        | 15        | 12        | 14        |       |
|  | 2-Methylpropylacetat                      | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | Sp.       | 0,1       | Sp.       |       |
|  | Buttersäureethylester                     | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | Sp.       | 0,1       | Sp.       |       |
|  | 3-Methylbutylacetat                       | mg/l                   | 2,0       | 2,0       | 1,4       | 2,0       | 1,0       | 2,0       | 0,7       |       |
|  | 2-Methylbutylacetat                       | mg/l                   | 0,1       | 0,2       | 0,1       | 0,2       | 0,1       | 0,2       | 0,1       |       |
| Hexansäureethylester                     | mg/l                                      | 0,2                    | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,2       | 0,1       |           |       |

Tab. AH 26: Analysendaten der Brauversuche Teil II

(mit Maischesäuerung pH 5,7/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)

|   | Einheit                       | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |           |           |       |
|---|-------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|   |                               | PAS E/5,7              | PAS W/5,7 | MAG E/5,7 | MAG W/5,7 | BEL E/5,7 | BEL W/5,7 | MAN E/5,7 | MAN W/5,7 |       |
| Wurzaromastoffe (Vordervürze, eingestellt auf 6,7 GC-%) | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 227       | 227       | 421       | 34        | 279       | 216       | 396       | 184   |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 82        | 79        | 141       | 11        | 105       | 76        | 142       | 66    |
|   | Methional                     | µg/l                   | 32        | 41        | 46        | 32        | 33        | 29        | 104       | 69    |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 6,8       | 4,1       | 6,0       | 7,1       | 3,7       | 4,0       | 4,2       | 5,3   |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 188       | 1730      | 250       | 192       | 221       | 175       | 209       | 134   |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 537       | 2082      | 864       | 276       | 642       | 501       | 854       | 458   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 10,2      | 10,4      | 12,5      | 1,1       | 10,3      | 10,1      | 13,3      | 12,3  |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 0,9       | 0,9       | 0,9       | 0,1       | 0,8       | 1,8       | 0,8       | 1,8   |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 41        | 41        | 44        | 5         | 35        | 335       | 64        | 55    |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 1,3       | 1,2       | 1,2       | 1,1       | 0,9       | 0,9       | 1,7       | 1,7   |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n. n.     | 0,6       | n. n.     | 0,3       | n. n.     | 5,7   |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 44        | 48        | 84        | 88        | 42        | 33        | 65        | 35    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | n. n.     | n. n. |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 0,86      | 1,01      | 0,95      | 0,93      | 0,85      | 0,68      | 0,8       | 1,11  |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 22        | 32        | 33        | 4         | 34        | 24        | 26        | 27    |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 21        | 10        | 31        | 1,0       | 13        | 9         | 10        | 9     |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 11        | 15        | 551       | 768       | 15        | 12        | 21        | 581   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 47        | 12        | 3448      | 585       | 9         | 10        | 8         | 233   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | 0,2       | 0,1       | 8,5       | 8,6       | 1,2       | 0,1       | 1,3       | 5,3   |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 2,1       | 1,1       | 56,1      | 85,0      | 2,0       | 4,3       | 3,2       | 78,7  |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 42                     | 46        | 2296      | 1965      | 46        | 41        | 34        | 960       |       |
| Wurzaromastoffe (Plannevoll-Würze)                      | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 271       | 288       | 471       | 379       | 293       | 245       | 412       | 229   |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 101       | 94        | 158       | 125       | 111       | 90        | 146       | 85    |
|   | Methional                     | µg/l                   | 50        | 45        | 41        | 39        | 42        | 32        | 141       | 85    |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 5,2       | 5,7       | 8,3       | 8,3       | n. n.     | 4,2       | 5,6       | 7     |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 214       | 201       | 293       | 225       | 215       | 199       | 250       | 167   |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 642       | 613       | 972       | 776       | 661       | 570       | 955       | 573   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 11,9      | 12,2      | 15        | 14,3      | 12,6      | 11,9      | 16,2      | 16,7  |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 1,9       | 0,9       | 1,1       | 1         | 0,9       | 0,9       | 2,1       | 0,9   |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 54        | 58        | 60        | 68        | 45        | 46        | 81        | 75    |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 2,6       | 1,5       | 2,2       | 1,6       | 1,3       | 1,3       | 2,3       | 2,2   |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | 1,1       | 1,9       | n. n.     | 2,3       | 1,2       | 0,8       | 2,2       | 0,9   |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 54        | 53        | 97        | 95        | 46        | 37        | 83        | 43    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n. n.     | 1,0       | n. n.     | n. n.     | n. n.     | n. n. |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 1,17      | 1,42      | 1,33      | 1,24      | 0,97      | 0,96      | 1,03      | 1,08  |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 36        | 35        | 36        | 41        | 31        | 25        | 34        | 28    |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 13        | 11        | 14        | 14        | 12        | 8         | 14        | 9     |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 17        | 16        | 826       | 1032      | 15        | 14        | 27        | 625   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 16        | 15        | 697       | 852       | 10        | 12        | 10        | 267   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | 0,2       | 0,2       | 10,7      | 150       | 0,2       | 0,2       | 0,3       | 6,4   |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 3         | 3         | 130       | 151       | 3         | 3         | 5         | 105   |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 53                     | 49        | 2415      | 94        | 47        | 43        | 43        | 1021      |       |
| Wurzaromastoffe (Anstellwürze)                          | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 47        | 48        | 51        | 52        | 68        | 43        | 61        | 48    |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 13        | 13        | 14        | 13        | 18        | 2         | 18        | 13    |
|   | Methional                     | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n. n.     | 22        | 47        | n. n.     | 37        | 49    |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 1,7       | 3,1       | 2,3       | 1,9       | 1,5       | 2,2       | 1,5       | 1,3   |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 90        | 100       | 107       | 93        | 109       | 88        | 113       | 87    |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 152       | 163       | 175       | 181       | 243       | 135       | 230       | 198   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 2,3       | 2,1       | 2,2       | 2,1       | 2,3       | 2,1       | 2,2       | 2,2   |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 0,4       | n. a.     | 1,2       | 0,5       | 1         | 0,4       | n. n.     | 0,6   |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 3,0       | 3,0       | 3,0       | 3,0       | 4,0       | 3,0       | 4,0       | 4,0   |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 0,7       | 0,7       | 0,7       | 0,6       | 0,9       | 0,6       | 0,8       | 0,7   |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | 3,5       | n. n.     | n. n.     | 0,5       | n. n.     | n. n.     | 0,5       | n. n. |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 76        | 60        | 127       | 126       | 69        | 54        | 127       | 77    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | 5,0       | n. n.     | 5,0       | 1,0       | 10,0      | 3,0       | 5,0       | 2,0   |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 0,69      | n. n.     | 0,74      | 0,67      | Sp.       | 0,56      | 0,75      | 0,84  |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | n. n.     | n. n. |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 9         | 7         | 9         | 10        | 10        | 8         | 9         | 10    |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 0,3       | 0,3       | 87        | 108       | 0,3       | 0,3       | 2,8       | 3,4   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 0,1       | 0,1       | 16        | 7,3       | 0,5       | 0,1       | n. n.     | 0,1   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | 7,5       | 1,9       | n. n.     | 0,2       | n. n.     | 0,3   |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 0,7       | 0,3       | 166       | 41,1      | 0,9       | 0,6       | 0,6       | 0,7   |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 33                     | 31        | 6316      | 1641      | 33        | 29        | 29        | 31        |       |
| Bieraromastoffe   | Hexanol-1                     | µg/l                   | 14        | 12        | 14        | 14        | 18        | 13        | 17        | 20    |
|   | Heptanol-1                    | µg/l                   | 3,8       | 4,0       | 5,1       | 5,1       | 12        | 8,3       | 7,8       | 6,1   |
|   | Octanol-1                     | µg/l                   | 14        | 16        | 12        | 15        | 13        | 16        | 12        | 13    |
|   | Decanol-1                     | µg/l                   | 6,2       | 5,6       | 5,1       | 5,8       | 6,1       | 6,8       | 4,8       | 5,6   |
|   | 2-Phenylethanol               | µg/l                   | 24136     | 23945     | 15436     | 19065     | 36512     | 27845     | 18196     | 14376 |
|   | Furfurylalkohol               | µg/l                   | 747       | 371       | 614       | 690       | 665       | 635       | 748       | 611   |
|   | Essigsäureisobutylester       | µg/l                   | 79        | 78        | 65        | 84        | 40        | 79        | 38        | 83    |
|   | Essigsäurehexylester          | µg/l                   | 5,2       | 4,6       | 4,0       | 5,1       | 3,0       | 4,8       | 2,4       | 5,0   |
|   | Essigsäureheptylester         | µg/l                   | 1,8       | 2,1       | 2,0       | 3,1       | 4,1       | 5,4       | 1,5       | 2,8   |
|   | Essigsäureoctylester          | µg/l                   | 2,0       | 3,5       | 2,1       | 2,7       | 1,3       | 2,9       | 1,9       | 3,3   |
|   | Essigsäurefurfurylester       | µg/l                   | 2,9       | 2,5       | 2,8       | 3,8       | 1,7       | 2,3       | 2,0       | 2,8   |
|   | Essigsäure-2-Phenylethylester | µg/l                   | 841       | 944       | 483       | 705       | 448       | 981       | 228       | 444   |
|   | Buttersäureethylester         | µg/l                   | 98        | 91        | 86        | 91        | 56        | 86        | 61        | 80    |
|   | Hexansäureethylester          | µg/l                   | 171       | 163       | 173       | 179       | 79        | 160       | 100       | 165   |
|   | Octansäureethylester          | µg/l                   | 314       | 307       | 280       | 308       | 156       | 281       | 189       | 237   |
|   | Decansäureethylester          | µg/l                   | 69        | 63        | 29        | 63        | 39        | 59        | 40        | 47    |
|   | Isovaleriansäure              | µg/l                   | 49        | n. a.     | n. a.     | n. a.     | 47        | n. a.     | n. a.     | n. a. |
|   | Hexansäure                    | µg/l                   | 2634      | 2492      | 2182      | 2542      | 1410      | 2410      | 1542      | 2545  |
|   | Octansäure                    | µg/l                   | 6564      | 6564      | 5884      | 6505      | 3181      | 6243      | 3796      | 5569  |
|   | Nonansäure                    | µg/l                   | 25        | 17        | 24        | 18        | 17        | 24        | 21        | 23    |
| Decansäure  | µg/l                          | 1098                   | 103       | 453       | 965       | 566       | 924       | 616       | 779       |       |
| Dodecansäure  | µg/l                          | 139                    | 160       | 109       | 128       | 51        | 160       | 58        | 149       |       |
| α-Terpineol   | µg/l                          | 4,0                    | Sp.       | 1,9       | 1,7       | 1,8       | 2,3       | 2,4       | 2,4       |       |
| Linalool  | µg/l                          | 10                     | 2,5       | 17        | 15        | 17        | 10        | 11        | 17        |       |
| Nerol   | µg/l                          | 1,9                    | 2,1       | 2,5       | 2,4       | 1,5       | 1,1       | 2,4       | 1,6       |       |
| γ-Nonalacton  | µg/l                          | 12                     | 10        | 13        | 12        | 14        | 10        | 16        | 16        |       |

Tab. AH 27: Analysendaten der Brauersuche Teil III

(mit Maischesäuerung pH 5,7/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)

|                                  | Einheit                      | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |       |       |
|----------------------------------|------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|
|                                  |                              | PAS E/5,4              | PAS W/5,4 | MAG E/5,4 | MAG W/5,4 | BEL E/5,4 | BEL W/5,4 |       |       |
| Malzanalyse                      | Wassergehalt Malz            | %                      | 4,0       | 4,1       | 3,8       | 4,0       | 3,8       | 4,0   |       |
|                                  | Extrakt Malz                 | %, lfr.                | 78,9      | 77,2      | 79,2      | 78,7      | 79,2      | 78,1  |       |
|                                  | Extrakt MTrs.                | %, wfr.                | 82,2      | 80,5      | 82,3      | 82        | 82,3      | 81,4  |       |
|                                  | Viskosität (8,6 GG-%)        | mPa s                  | 1,467     | 1,493     | 1,506     | 1,464     | 1,453     | 1,463 |       |
|                                  | Viskosität 65 °C (8,6 GG-%)  | mPa s                  | 1,502     | 1,633     | 1,651     | 1,617     | 1,481     | 1,503 |       |
|                                  | Friabilimeter Mürbigkeit     | %                      | 96,4      | 85,8      | 88,6      | 79,7      | 98        | 90,6  |       |
|                                  | Ganzglasigkeit               | %                      | 0,3       | n. n.     | 0,3       | 0,1       | 0,3       | 0     |       |
|                                  | Teilglasigkeit               | %                      | 1         | 1,4       | 4,2       | 2,2       | 0,8       | 0,2   |       |
|                                  | Verzuckerungszeit            | min.                   | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10      | < 10  |       |
|                                  | Ablauf                       | klar/opal              | klar      | klar      | opal      | klar      | klar      | klar  |       |
|                                  | Endvergärungsgrad            | %, schb.               | 82,6      | 81,2      | 80,5      | 82,4      | 81,9      | 80,9  |       |
|                                  | Farbe Fotometer              | EBC                    | 2,4       | 2,8       | 2,2       | 2,5       | 2,4       | 3,1   |       |
|                                  | Kochfarbe Fotometer          | EBC                    | 5,6       | 5,9       | 5,3       | 5,5       | 6         | 5,6   |       |
|                                  | pH-Wert                      |                        | 6,01      | 5,98      | 5,98      | 5,93      | 5,98      | 5,96  |       |
|                                  | Rohprotein Malz              | %, wfr.                | 9,1       | 11,1      | 9,7       | 10,7      | 10,2      | 11,7  |       |
|                                  | Löslicher Stickstoff MTrs.   | mg/100g                | 565       | 626       | 634       | 663       | 695       | 644   |       |
|                                  | Eiweiss-Lösungsgrad          | %                      | 38,8      | 35,2      | 40,9      | 38,7      | 42,6      | 34,4  |       |
|                                  | freier Amino-Stickstoff TrS. | mg/100g                | 120       | 113       | 133       | 146       | 142       | 137   |       |
|                                  | β-Glucan                     | mg/l                   | 181       | 290       | 335       | 212       | 107       | 98    |       |
|                                  | β-Glucan 65 °C               | mg/l                   | 205       | 401       | 498       | 360       | 171       | 200   |       |
|                                  | Thiobarbitursäurezahl        |                        | 12        | 13        | 16        | 18        | 14        | 13    |       |
|                                  | DMS-Vorläufer                | µg/l                   | 3,1       | 3,8       | 4,4       | 5,2       | 6,6       | 6,5   |       |
|                                  | Diastatische Kraft           | WK                     | 266       | 347       | 286       | 329       | 245       | 263   |       |
|                                  | α-Amylase                    | ASBC, wfr.             | 62        | 61        | 65        | 62        | 46        | 51    |       |
|                                  | Maischen/Läutern/Kochen      | Stammwürze 10 Minuten  | GG-%      | 14,21     | 14,10     | 14,36     | 13,82     | 14,52 | 14,37 |
|                                  |                              | Stammwürze 62E         | GG-%      | 15,11     | 14,99     | 15,39     | 15,13     | 15,49 | 15,42 |
|                                  |                              | Stammwürze 72A         | GG-%      | 15,65     | 15,64     | 16,01     | 15,82     | 16,20 | 15,98 |
| Stammwürze 72E                   |                              | GG-%                   | 15,72     | 15,93     | 16,28     | 16,11     | 16,40     | 16,13 |       |
| Stammwürze 78A                   |                              | GG-%                   | 15,73     | 15,90     | 16,40     | 16,14     | 16,46     | 16,16 |       |
| Stammwürze 78E                   |                              | GG-%                   | 15,88     | 15,90     | 16,40     | 16,16     | 16,49     | 16,20 |       |
| Stammwürze VW                    |                              | GG-%                   | 15,31     | 15,11     | 15,26     | 15,18     | 15,46     | 15,36 |       |
| Stammwürze Pfv                   |                              | GG-%                   | 10,15     | 9,73      | 10,12     | 9,83      | 10,09     | 9,85  |       |
| Stammwürze KA                    |                              | GG-%                   | 10,18     | 9,77      | 10,57     | 10,00     | 10,21     | 9,87  |       |
| Stammwürze vH                    |                              | GG-%                   | 11,82     | 11,55     | 11,61     | 11,56     | 11,54     | 11,21 |       |
| Stammwürze KE                    |                              | GG-%                   | 12,23     | 12,01     | 11,99     | 11,87     | 11,84     | 11,76 |       |
| Stammwürze AW                    |                              | GG-%                   | 11,70     | 11,70     | 11,93     | 11,80     | 11,47     | 11,56 |       |
| pH-Wert 10 Minuten               |                              |                        | 5,80      | 5,90      | 5,69      | 5,69      | 5,76      | 5,89  |       |
| pH-Wert 62E                      |                              |                        | 5,74      | 5,84      | 5,68      | 5,65      | 5,73      | 5,82  |       |
| pH-Wert 72A                      |                              |                        | 5,70      | 5,79      | 5,64      | 5,62      | 5,70      | 5,76  |       |
| pH-Wert 72E                      |                              |                        | 5,71      | 5,78      | 5,64      | 5,61      | 5,71      | 5,76  |       |
| pH-Wert 78A                      |                              |                        | 5,74      | 5,78      | 5,61      | 5,61      | 5,70      | 5,75  |       |
| pH-Wert 78E                      |                              |                        | 5,72      | 5,77      | 5,59      | 5,60      | 5,71      | 5,78  |       |
| pH-Wert VW                       |                              |                        | 5,59      | 5,65      | 5,61      | 5,65      | 5,60      | 5,64  |       |
| pH-Wert Pfv                      |                              |                        | 5,69      | 5,76      | 5,70      | 5,72      | 5,67      | 5,73  |       |
| pH-Wert KA                       |                              |                        | 5,64      | 5,72      | 5,82      | 5,82      | 5,69      | 5,77  |       |
| pH-Wert vH                       |                              |                        | 5,58      | 5,61      | 5,66      | 5,67      | 5,57      | 5,64  |       |
| pH-Wert KE                       |                              |                        | 5,53      | 5,58      | 5,61      | 5,61      | 5,52      | 5,59  |       |
| pH-Wert AW                       |                              |                        | 5,61      | 5,56      | 5,66      | 5,61      | 5,63      | 5,63  |       |
| Farbe 10 Minuten                 |                              |                        | 4,69      | 5,36      | 5,18      | 6,05      | 5,61      | 5,57  |       |
| Farbe 62E                        |                              |                        | 4,95      | 6,25      | 5,37      | 6,28      | 6,56      | 6,49  |       |
| Farbe 72A                        |                              |                        | 5,55      | 6,16      | 5,91      | 6,50      | 6,23      | 6,43  |       |
| Farbe 72E                        |                              |                        | 5,54      | 6,10      | 5,65      | 6,42      | 6,05      | 6,39  |       |
| Farbe 78A                        |                              |                        | 5,44      | 6,01      | 6,05      | 6,25      | 6,11      | 6,43  |       |
| Farbe 78E                        |                              |                        | 5,64      | 5,72      | 6,00      | 6,05      | 6,24      | 6,75  |       |
| Farbe VW                         |                              |                        | 6,13      | 7,10      | 6,18      | 9,09      | 6,19      | 6,62  |       |
| Farbe Pfv                        |                              |                        | 4,84      | 5,23      | 4,92      | 6,90      | 4,69      | 4,74  |       |
| Farbe KA                         |                              |                        | 4,86      | 5,31      | 4,90      | 6,81      | 4,86      | 5,17  |       |
| Farbe vH                         |                              |                        | 6,46      | 6,93      | 6,63      | 7,75      | 6,06      | 6,21  |       |
| Farbe KE                         |                              |                        | 7,55      | 8,38      | 7,85      | 9,01      | 7,54      | 7,53  |       |
| Farbe AW                         |                              |                        | 8,00      | 7,84      | 10,60     | 10,70     | 7,60      | 7,95  |       |
| Reduktionsvermögen 10 Minuten    |                              | %                      | 23,3      | 23,2      | 23,4      | 21,5      | 27,1      | 23,4  |       |
| Reduktionsvermögen 62E           |                              | %                      | 23,8      | 27,8      | 27,5      | 21,8      | 26,7      | 24,3  |       |
| Reduktionsvermögen 72A           |                              | %                      | 26,5      | 21,5      | 42,1      | 22,2      | 25,8      | 23,5  |       |
| Reduktionsvermögen 72E           |                              | %                      | 22,0      | 24,3      | 29,6      | 21,8      | 23,9      | 22,2  |       |
| Reduktionsvermögen 78A           |                              | %                      | 23,0      | 26,1      | 41,2      | 21,8      | 23,9      | 29,9  |       |
| Reduktionsvermögen 78E           |                              | %                      | 22,7      | 23,5      | 34,7      | 21,9      | 24,3      | 26,2  |       |
| Reduktionsvermögen VW            |                              | %                      | 68,2      | 66,5      | 65,6      | 65,3      | 65,6      | 57,9  |       |
| Reduktionsvermögen Pfv           |                              | %                      | 61,5      | 60,6      | 63,3      | 65,5      | 66,7      | 63,0  |       |
| Reduktionsvermögen KA            |                              | %                      | 58,9      | 61,8      | 57,7      | 64,1      | 63,9      | 55,0  |       |
| Reduktionsvermögen vH            |                              | %                      | 63,0      | 50,9      | 55,1      | 48,9      | 68,3      | 51,3  |       |
| Reduktionsvermögen KE            |                              | %                      | 83,7      | 66,4      | 67,8      | 62,3      | 75,6      | 57,2  |       |
| Reduktionsvermögen AW            |                              | %                      | 58,9      | 68,8      | 40,4      | 61,7      | 61,1      | 65,0  |       |
| Reduktionsvermögen 9% 10 Minuten |                              | %                      | 14,9      | 14,2      | 15,5      | 13,1      | 18,6      | 18,6  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% 62E    |                              | %                      | 14,5      | 16,6      | 16,6      | 12,5      | 17,9      | 17,9  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% 72A    |                              | %                      | 17,8      | 15,2      | 21,0      | 12,4      | 19,0      | 17,9  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% 72E    |                              | %                      | 12,8      | 15,0      | 15,0      | 13,5      | 16,3      | 15,8  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% 78A    |                              | %                      | 13,9      | 13,7      | 18,2      | 12,3      | 16,1      | 19,3  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% 78E    |                              | %                      | 14,4      | 13,0      | 15,6      | 13,9      | 15,8      | 16,1  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% VW     |                              | %                      | 51,4      | 53,5      | 47,1      | 49,4      | 48,5      | 45,4  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% Pfv    |                              | %                      | 60,6      | 61,0      | 63,8      | 68,7      | 66,3      | 63,2  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% KA     |                              | %                      | 60,5      | 63,2      | 56,3      | 68,1      | 64,1      | 64,8  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% vH     |                              | %                      | 50,4      | 43,3      | 44,0      | 39,1      | 57,6      | 42,4  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% KE     |                              | %                      | 73,9      | 54,0      | 54,3      | 50,1      | 66,6      | 45,2  |       |
| Reduktionsvermögen 9 GG-% AW     |                              | %                      | 49,8      | 55,0      | 28,6      | 44,6      | 52,1      | 52,7  |       |
| TBZ 10 Minuten                   |                              |                        | 21,35     | 18,25     | 27,4      | 29,5      | 22        | 19,25 |       |
| TBZ 62E                          |                              |                        | 21,4      | 19,65     | 27,85     | 32,2      | 21,65     | 20,14 |       |
| TBZ 72A                          |                              |                        | 20,75     | 19,4      | 27,45     | 29,45     | 22,15     | 20,75 |       |
| TBZ 72E                          |                              |                        | 23,1      | 18,8      | 27,2      | 30,2      | 22,85     | 21,15 |       |
| TBZ 78A                          |                              |                        | 22,05     | 18,89     | 28,5      | 30,3      | 22,5      | 21,35 |       |
| TBZ 78E                          |                              |                        | 19,745    | 20        | 28,4      | 31,2      | 23,65     | 21,05 |       |
| TBZ VW                           |                              |                        | 19,35     | 20,55     | 42,595    | 26,65     | 22,9      | 23,45 |       |
| TBZ Pfv                          |                              |                        | 13,7      | 14,45     | 29,35     | 18,3      | 15,8      | 16,2  |       |
| TBZ KA                           |                              |                        | 14,45     | 14,6      | 31,7      | 19,35     | 16,6      | 18,35 |       |
| TBZ vH                           |                              |                        | 30,65     | 31,8      | 39,94     | 38,6      | 31,2      | 34,6  |       |
| TBZ KE                           |                              |                        | 31,85     | 34,3      | 55,8      | 39,75     | 36,95     | 37,15 |       |
| TBZ AW                           |                              |                        | 32,6      | 31,9      | 60,7      | 59,7      | 36,85     | 38,65 |       |
| FAN AW                           |                              | mg/100 ml              | n. a.     | n. a.     | n. a.     | n. a.     | 19,47     | 19,65 |       |

Tab. AH 28: Analysendaten der Brauersuche Teil I

(mit Maischesäuerung pH 5,4/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)

|   | Einheit                                | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |       |
|---|--|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|   |  | PAS E/5,4              | PAS W/5,4 | MAG E/5,4 | MAG W/5,4 | BEL E/5,4 | BEL W/5,4 |       |
| Bieranalyse                               | pH-Wert                                | 4,82                   | 4,89      | 4,77      | 4,77      | 4,90      | 4,74      |       |
|   | pH-Wert forciert                       | 4,84                   | 4,78      | 4,84      | 4,79      | 4,90      | 4,78      |       |
|   | Farbe                                  | 4,9                    | 5,6       | 5,4       | 7,9       | 5,1       | 5,4       |       |
|   | Farbe forciert                         | 5,4                    | 5,8       | 5,6       | 8,3       | 5,3       | 5,6       |       |
|   | TBZ                                    | 23                     | 24        | 29        | 44        | 26        | 25        |       |
|   | TBZ forciert                           | 23                     | 24        | 28        | 44        | 25        | 26        |       |
|   | Reduktionsvermögen                     | %                      | 20        | 21        | 22        | 30        | 23        | 20    |
|   | Reduktionsvermögen forciert            | %                      | 21        | 21        | 21        | 28        | 21        | 21    |
|   | Stammwürze                             | GG-%                   | 11,61     | 11,66     | 11,59     | 11,75     | 11,41     | 11,59 |
|   | Stammwürze forciert                    | GG-%                   | 11,59     | 11,63     | 11,52     | 11,71     | 11,33     | 11,53 |
|   | scheinbarer Extrakt                    | GG-%                   | 1,63      | 1,75      | 1,71      | 1,76      | 1,70      | 1,85  |
|   | scheinbarer Extrakt forciert           | GG-%                   | 1,65      | 1,77      | 1,73      | 1,78      | 1,70      | 1,86  |
|   | Alkohol                                | Vol-%                  | 5,28      | 5,25      | 5,23      | 5,29      | 5,13      | 5,16  |
|   | Alkohol forciert                       | Vol-%                  | 5,26      | 5,22      | 5,18      | 5,26      | 5,09      | 5,12  |
|   | Viskosität (bez. auf 12 GG-%)          | mPa s                  | 1,568     | 1,596     | 1,686     | 1,594     | 1,538     | 1,541 |
|   | Viskosität (bez. auf 12 GG-%) forciert |                        | 1,571     | 1,602     | 1,687     | 1,600     | 1,545     | 1,544 |
|   | Vergärungsgrad scheinbar               | %                      | 86,5      | 85,6      | 85,8      | 85,6      | 85,6      | 84,7  |
|   | Vergärungsgrad scheinbar forciert      | %                      | 86,3      | 85,4      | 85,5      | 85,5      | 85,5      | 84,5  |
|   | Verkostung                             |                        | 4,10      | 3,95      | 4,16      | 4,14      | 4,08      | 4,18  |
|   | Verkostung forciert                    |                        | 3,79      | 3,65      | 3,54      | 3,54      | 3,66      | 3,66  |
|   | Alterungsverkostung                    |                        | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00      | 1,00  |
|   | Alterungsverkostung forciert           |                        | 1,82      | 2,15      | 2,25      | 2,35      | 2,02      | 2,00  |
|   | Akzeptanz, forciert gealtertes Bier    |                        | 58,3      | 43,3      | 46,7      | 43,3      | 50,0      | 46,7  |
|   | Gesamtpolyphenole                      | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | Gesamtpolyphenole forciert             | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | Anthozyanogene                         | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | Anthozyanogene forciert                | mg/l                   | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | Tannoide                               | mg PVP/l               | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | Tannoide forciert                      | mg PVP/l               | —         | —         | —         | —         | —         | —     |
|   | SO <sub>2</sub>                        | mg/l                   | 1,8       | 0,4       | 2,3       | 2,5       | 1,3       | 0,9   |
|   | SO <sub>2</sub> forciert               | mg/l                   | 0,5       | 0,3       | 0,4       | 0,5       | 0,4       | 0,3   |
|   | Schaum nach Nibem                      | s                      | 244       | 283       | 264       | 271       | 256       | 273   |
| Schaum nach Nibem forciert                | s                                      | 238                    | 271       | 261       | 245       | 248       | 264       |       |
| Alterungsindikatoren                      | 2-Methylbutanal                        | µg/l                   | n. a.     |       |
|   | 2-Methylbutanal forciert               | µg/l                   | n. a.     |       |
|   | 3-Methylbutanal                        | µg/l                   | n. a.     | 5,4       | 7,1       | 17        | 5,8       | 5,8   |
|   | 3-Methylbutanal forciert               | µg/l                   | 8,7       | 13        | 12        | 25        | 8,7       | 15    |
|   | 2-Furfural                             | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.   |
|   | 2-Furfural forciert                    | µg/l                   | 75        | 63        | 88        | 122       | 50        | 62    |
|   | 5-Methylfurfural                       | µg/l                   | 3,9       | 3,6       | 3,6       | 3,7       | 2,6       | 3,6   |
|   | 5-Methylfurfural forciert              | µg/l                   | 4,0       | 3,6       | 4,2       | 4,4       | 3,7       | 4,5   |
|   | Benzaldehyd                            | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.   |
|   | Benzaldehyd forciert                   | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.   |
|   | 2-Phenylethanal                        | µg/l                   | 4,8       | 7,5       | 5,8       | 9,1       | 4,7       | 5,1   |
|   | 2-Phenylethanal forciert               | µg/l                   | 8,8       | 12        | 14        | 17        | 10        | 12    |
|   | Bernsteinsäurediethylester             | µg/l                   | 1,7       | Sp.       | 2,1       | Sp.       | 1,6       | 1,5   |
|   | Bernsteinsäurediethylester forciert    | µg/l                   | 1,8       | 1,5       | 2,1       | 2,2       | 1,8       | 1,9   |
|   | Nicotinsäureethylester                 | µg/l                   | 4,9       | 4,8       | 4,3       | 4,2       | 6,1       | 4,4   |
|   | Nicotinsäureethylester forciert        | µg/l                   | 16        | 15        | 13        | 10        | 14        | 8,69  |
|   | Phenyllessigsäureethylester            | µg/l                   | 0,7       | 0,7       | 0,8       | 0,8       | 0,7       | 0,5   |
|   | Phenyllessigsäureethylester forciert   | µg/l                   | 0,8       | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 0,8       | 0,7   |
|   | 2-Acetylfuran                          | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | 2,4       | Sp.   |
|   | 2-Acetylfuran forciert                 | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | Sp.       | Sp.       | 3,2       | Sp.   |
|   | 2-Propionylfuran                       | µg/l                   | 3,0       | n. a.     | 2,5       | 2,8       | 2,9       | 2,0   |
|   | 2-Propionylfuran forciert              | µg/l                   | 3,2       | 3,8       | 2,7       | n. a.     | 2,9       | 2,8   |
|   | γ-Nonalacton                           | µg/l                   | 13        | 13        | 13        | 15        | 14        | 13    |
|   | γ-Nonalacton forciert                  | µg/l                   | 22        | 22        | 20        | 24        | 22        | 18    |
|   | Summe der Wärmeindikatoren             | µg/l                   | 13        | 13        | 13        | 15        | 14        | 13    |
|   | Summe der Wärmeindikatoren forciert    | µg/l                   | 97        | 84        | 108       | 146       | 72        | 80    |
|   | Differenz Summe der Wärmeindikatoren   | µg/l                   | 84        | 71        | 95        | 131       | 58        | 67    |
| Summe der Sauerstoffindikatoren           | µg/l                                   | 4,8                    | 13        | 13        | 27        | 11        | 11        |       |
| Summe der Sauerstoffindikatoren forciert  | µg/l                                   | 17                     | 25        | 26        | 42        | 19        | 27        |       |
| Differenz Summe der Sauerstoffindikatoren | µg/l                                   | 12,2                   | 12        | 13        | 15        | 8         | 16        |       |
| Summe der Alterungskomponenten            | µg/l                                   | 27                     | 30        | 34        | 49        | 35        | 31        |       |
| Summe der Alterungskomponenten forciert   | µg/l                                   | 124                    | 119       | 144       | 196       | 103       | 117       |       |
| Differenz Summe der Alterungskomponenten  | µg/l                                   | 97                     | 89        | 110       | 147       | 68        | 86        |       |
| Höhere Alkohole                           | Acetaldehyd                            | mg/l                   | 9,5       | 6,4       | 8,8       | 10        | 6,8       | 8,6   |
|   | Propanol-1                             | mg/l                   | 10        | 16        | 9,6       | 9,5       | 9,3       | 11    |
|   | Ethylacetat                            | mg/l                   | 22        | 14        | 18        | 21        | 30,0      | 19    |
|   | 2-Methylpropanol                       | mg/l                   | 9,1       | 10        | 8,5       | 8,8       | 13        | 8,1   |
|   | 3-Methylbutanol                        | mg/l                   | 42        | 42        | 42        | 45        | 46        | 36    |
|   | 2-Methylbutanol                        | mg/l                   | 12        | 10        | 11        | 11        | 15        | 11    |
|   | 2-Methylpropylacetat                   | mg/l                   | Sp.       | n. n.     | n. n.     | Sp.       | 0,1       | n. n. |
|   | Buttersäureethylester                  | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1   |
|   | 3-Methylbutylacetat                    | mg/l                   | 1,7       | 0,9       | 1,5       | 2,1       | 2,7       | 1,3   |
|   | 2-Methylbutylacetat                    | mg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,2       | 0,1   |
| Hexansäureethylester                      | mg/l                                   | 0,2                    | 0,1       | 0,2       | 0,2       | 0,3       | 0,2       |       |

Tab. AH 29: Analysendaten der Brauersuche Teil II

(mit Maischesäuerung pH 5,4/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)

|   | Einheit                       | Sorte/Standort/pH-Wert |           |           |           |           |           |       |
|---|-------------------------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------|
|   |                               | PAS E/5,4              | PAS W/5,4 | MAG E/5,4 | MAG W/5,4 | BEL E/5,4 | BEL W/5,4 |       |
| Wurzaromastoffe (Vordervürze, eingestellt auf 6,7 GC-%) | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 282       | 244       | 416       | 574       | 263       | 239   |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 96        | 78        | 132       | 173       | 93        | 82    |
|   | Methional                     | µg/l                   | 29        | 31        | Sp.       | 55        | 31        | 45    |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 16,2      | 16,9      | 15,8      | 19,2      | 7         | 15,5  |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 214       | 156       | 256       | 207       | 210       | 151   |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 637       | 525       | 821       | 1028      | 604       | 531   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 13,3      | 13,9      | 14,1      | 12,3      | 11,5      | 12,6  |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 0,9       | 1         | 0,9       | 1         | 0,8       | 0,9   |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 44        | 48        | 44        | 50        | 42        | 43    |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 1,4       | 1,4       | 1,2       | 1,4       | 1         | 1,1   |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n.n       | n. n.     | 0,5       | n. n. |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 63        | 58        | 81        | 181       | 38        | 44    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | Sp.       | 1,0       | 1,0       | n. n. |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 1,0   |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 25        | 34        | 26        | 53        | 22        | 34    |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 9         | 10        | 11        | 18        | 9         | 12    |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 0,8       | 0,8       | 0,4       | 0,5       | 0,7       | 0,8   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 0,3       | 0,1       | 0,3       | 0,3       | 0,1       | 0,1   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | 0,1       | Sp.       | 0,1       | 0,1       | 0         | 0     |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 0,2       | 0,2       | 0,2       | 0,3       | 0,2       | 0,3   |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 6                      | 6         | 7         | 14        | 7         | 5         |       |
| Wurzaromastoffe (Pflanzvöllwürze)                       | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 311       | 306       | 474       | 672       | 305       | 258   |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 106       | 101       | 156       | 202       | 109       | 88    |
|   | Methional                     | µg/l                   | 40        | 41        | 40        | 59        | 51        | 42    |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 21,6      | 21,4      | 29,2      | 42,7      | 20,4      | 15,8  |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 207       | 178       | 208       | 168       | 194       | 144   |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 686       | 647       | 906       | 1144      | 679       | 590   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 15,7      | 16,6      | 16        | 16,6      | 14,8      | 15,6  |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | 1         | 1,5       | 1,1       | 1,1       | 1         | 1     |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 62        | 68        | 62        | 71        | 52        | 55    |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 1,5       | 2         | 1,8       | 2         | 1,5       | 2,6   |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n.n       | 0,8       | n. n.     | 1     |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 66        | 72        | 76        | 202       | 58        | 52    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n.n       | 2,0       | n. n.     | n. n. |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 2,0       | 2,0       | 2,0       | 2,0       | 1,0       | 2,0   |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | 37        | 47        | 27        | 46        | 34        | 37    |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 13        | 14        | 12        | 16        | 13        | 13    |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 0,8       | 1,0       | 0,5       | 0,5       | 0,9       | 0,8   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 0,1       | 0,1       | 0,2       | 0,2       | 0,3       | 0,3   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | 0,1       | 0,1       | 0,1       | 0,1   |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | 0,3       | 0,3       | 0,2       | 0,4       | 0,4       | 0,3   |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 7                      | 7         | 10        | 19        | 9         | 7         |       |
| Wurzaromastoffe (Anstellwürze)                          | 3-Methylbutanal               | µg/l                   | 45        | 40        | 54        | n. n.     | 47        | 52    |
|   | 2-Methylbutanal               | µg/l                   | 11        | 9         | 14        | 41        | 12        | 13    |
|   | Methional                     | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | Sp.       | n. n.     | n. n.     | n. n. |
|   | Benzaldehyd                   | µg/l                   | 2,7       | 2,9       | 3,9       | 9,8       | 3         | 1,7   |
|   | 2-Phenylethanal               | µg/l                   | 83        | 69        | 93        | 64        | 108       | 111   |
|   | Σ Streckeraldehyde            | µg/l                   | 142       | 121       | 165       | 115       | 170       | 178   |
|   | Pentanal                      | µg/l                   | 3,3       | 3,4       | 2,3       | n. n.     | 2,2       | 2,5   |
|   | 2-Pentanon                    | µg/l                   | n. n.     | 0,4       | Sp.       | 2,0       | 0,5       | n. n. |
|   | Hexanal                       | µg/l                   | 3,0       | 3,0       | 4,0       | 4,0       | 3,0       | 3,0   |
|   | Heptanal                      | µg/l                   | 0,6       | 0,6       | 1         | 1,9       | 0,6       | n. n. |
|   | (E,Z)-2,6-Nonadienal          | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n.n       | n. n.     | 0,5       | n. n. |
|   | 2-Furfural                    | µg/l                   | 78        | 73        | 89        | 126       | 95        | 92    |
|   | 2-Acetylfuran                 | µg/l                   | 3,0       | 2,0       | n.n       | n. n.     | 1,0       | 3,0   |
|   | γ-Nonalacton                  | µg/l                   | 1,0       | 1,0       | 1,0       | 2,0       | 1,0       | 1,0   |
|   | 3-Methylbutanol               | µg/l                   | n. n.     | n. n.     | n. n.     | n. n.     | 112       | 110   |
|   | 2-Methylbutanol               | µg/l                   | 1,0       | 9,0       | 1,0       | 7,0       | 1,0       | 9,0   |
|   | 1-Pentanol                    | µg/l                   | 0,4       | 0,4       | 0,4       | 0,3       | 0,2       | 0,4   |
|   | 1-Hexanol                     | µg/l                   | 0,2       | 0,2       | 0,1       | 0,3       | 0,1       | 0,1   |
|   | 1-Octanol                     | µg/l                   | 1,9       | 1,7       | n. n.     | 2,1       | 1,6       | 1,6   |
|   | 1-Octen-3-ol                  | µg/l                   | Sp.       | Sp.       | 0,3       | 0,9       | 0,1       | 0,1   |
| Phenylethanol   | µg/l                          | 1                      | 1         | 49        | 3         | 2         | 2         |       |
| Bieraromastoffe   | Hexanol-1                     | µg/l                   | 13        | 17        | 15        | 11        | 13        | 14    |
|   | Heptanol-1                    | µg/l                   | 5,3       | 9,1       | 4,2       | 3,1       | 3,8       | 6,3   |
|   | Octanol-1                     | µg/l                   | 8,7       | 11        | 10        | 11        | 14        | 10    |
|   | Decanol-1                     | µg/l                   | 4,6       | 5,0       | 4,9       | 6,5       | 7,8       | 5,5   |
|   | 2-Phenylethanol               | µg/l                   | 18285     | 24239     | 19428     | 16892     | 21663     | 15124 |
|   | Furfurylalkohol               | µg/l                   | 423       | 418       | 442       | 676       | 704       | 534   |
|   | Essigsäureisobutylester       | µg/l                   | 32        | 19        | 30        | 38        | 54        | 28    |
|   | Essigsäurehexylester          | µg/l                   | 3,3       | 2,4       | 3,4       | 4,0       | 3,8       | 2,7   |
|   | Essigsäureheptylester         | µg/l                   | 2,1       | 2,2       | 1,5       | 1,8       | 1,9       | 2,0   |
|   | Essigsäureoctylester          | µg/l                   | 1,5       | 1,1       | 1,9       | 2,0       | 1,9       | 1,8   |
|   | Essigsäurefurfurylester       | µg/l                   | 2,0       | 1,2       | 1,6       | 2,9       | 3,0       | 1,8   |
|   | Essigsäure-2-Phenylethylester | µg/l                   | 432       | 244       | 443       | 490       | 624       | 334   |
|   | Buttersäureethylester         | µg/l                   | 88        | 58        | 80        | 83        | 93        | 79    |
|   | Hexansäureethylester          | µg/l                   | 184       | 88        | 143       | 166       | 173       | 162   |
|   | Octansäureethylester          | µg/l                   | 304       | 188       | 256       | 253       | 324       | 248   |
|   | Decansäureethylester          | µg/l                   | 72        | 77        | 64        | 54        | 69        | 57    |
|   | Isovaleriansäure              | µg/l                   | n. a.     | n. a.     | 417       | 466       | 494       | 437   |
|   | Hexansäure                    | µg/l                   | 2295      | 1426      | 1988      | 1786      | 2717      | 2138  |
|   | Octansäure                    | µg/l                   | 6314      | 4026      | 5177      | 5619      | 7079      | 5303  |
|   | Nonansäure                    | µg/l                   | 14        | 13        | 13        | 13        | 15        | 13    |
| Decansäure  | µg/l                          | 1185                   | 1264      | 1000      | 902       | 1086      | 969       |       |
| Dodecansäure  | µg/l                          | 180                    | 35        | 100       | 50        | 86        | 115       |       |
| α-Terpineol   | µg/l                          | 2,7                    | 5,2       | 3,8       | 2,1       | 1,6       | 2,8       |       |
| Linalool  | µg/l                          | 8,5                    | 6,6       | 13        | 6,4       | 6,5       | 6,6       |       |
| Nerol   | µg/l                          | 1,5                    | 1,4       | 1,9       | 0,8       | 1,7       | 1,0       |       |
| γ-Nonalacton  | µg/l                          | 12                     | 15        | 13        | 13        | 12        | 14        |       |

Tab. AH 30: Analysendaten der Brauversuche Teil III

(mit Maischesäuerung pH 5,4/Sudmalze Berliner Programm Ernte 2003)

|                             |                | Pilsner Malz |
|-----------------------------|----------------|--------------|
| Wassergehalt                | %              | 4,4          |
| Rohprotein                  | %, wfr.        | 11,2         |
| löslicher Stickstoff        | mg/100 g MTrs. | 813          |
| Eiweißlösungsgrad           | %              | 45,4         |
| Viskosität 65 °C (8,6 GG-%) | mPa s          | 1,516        |
| Friabilimeterwert           | %              | 82           |
| ganzglasige Körner          | %              | 1,1          |
| Extrakt                     | %, wfr.        | 81,8         |
| TBZ                         |                | 24           |
| Würzefarbe, fotometrisch    | EBC            | 3,9          |
| pH                          |                | 5,7          |

**Tab. AH 31: Analysendaten Pilsner Malz**

|                    |      | Sude Pilsner Malz | Sude Berliner Programm | Sude Handelsmalze |
|--------------------|------|-------------------|------------------------|-------------------|
| Kalziumhärte       | ° dH | 3,4               | 3,6                    | 4,1               |
| Gesamthärte        | ° dH | 7,7               | 7,1                    | 9,1               |
| Magnesiumhärte     | ° dH | 4,3               | 3,5                    | 5,0               |
| Nichtkarbonathärte | ° dH | 4,8               | 2,8                    | 2,9               |
| Karbonathärte      | ° dH | 2,9               | 4,3                    | 6,2               |
| pH-Wert (pH-Meter) |      | 8,4               | 7,7                    | 8,0               |
| pH-Wert (Stäbchen) |      | 6,7               | —                      | 6,4               |

**Tab. AH 32: Wasseranalysen der Brauersuche**

|                                      |  | 58/72/76  | 62/72/76 | 66/72/76 | 58/72/76MS | 62/72/76MS | 66/72/76MS | 58/72/76WS | 62/72/76WS | 66/72/76WS |       |
|--------------------------------------|--|-----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------|
| Maischen/Läutern/Kochen              | Stammwürze 10 Minuten                              | GG-%      | 10,49    | 13,84    | 15,31      | 10,85      | 14,08      | 15,26      | 9,75       | 13,95      | 14,85 |
|                                      | Stammwürze Maischen Ende                           | GG-%      | 16,41    | 16,24    | 16,35      | 16,32      | 16,35      | 16,42      | 16,35      | 15,85      | 16,19 |
|                                      | Stammwürze VW                                      | GG-%      | 15,23    | 15,61    | 15,25      | 15,25      | 15,48      | 15,31      | 15,75      | 15,26      | 15,62 |
|                                      | Stammwürze Pfv                                     | GG-%      | 9,78     | 10,01    | 9,73       | 9,68       | 10,20      | 9,77       | 10,03      | 9,77       | 10,10 |
|                                      | Stammwürze AW                                      | GG-%      | 11,57    | 11,59    | 11,58      | 11,40      | 11,65      | 11,76      | 11,82      | 11,64      | 11,57 |
|                                      | Endvergärungsgrad scheinbar (AW)                   | GG-%      | 80,90    | 83,65    | 86,13      | 80,46      | 84,35      | 83,31      | 79,39      | 83,38      | 83,15 |
|                                      | FAN (AW)   | mg/100 ml | 22,59    | 20,13    | 19,51      | 24,09      | 22,90      | 21,13      | 20,00      | 21,68      | 15,20 |
|                                      | pH-Wert 10 Minuten                                 |           | 5,78     | 5,70     | 5,70       | 5,58       | 5,57       | 5,51       | 5,85       | 5,78       | 5,77  |
|                                      | pH-Wert Maischen Ende                              |           | 5,62     | 5,62     | 5,57       | 5,48       | 5,45       | 5,41       | 5,67       | 5,63       | 5,63  |
|                                      | pH-Wert VW   |           | 5,60     | 5,56     | 5,53       | 5,46       | 5,40       | 5,36       | 5,62       | 5,58       | 5,56  |
|                                      | pH-Wert Pfv  |           | 5,73     | 5,67     | 5,70       | 5,63       | 5,49       | 5,52       | 5,67       | 5,66       | 5,72  |
|                                      | pH-Wert AW   |           | 5,64     | 5,57     | 5,59       | 5,46       | 5,38       | 5,31       | 5,35       | 5,36       | 5,36  |
|                                      | Farbe 10 Minuten                                   | EBC       | 6,8      | 6,5      | 7,8        | 5,7        | 7,4        | 7,0        | 6,8        | 6,5        | 7,8   |
|                                      | Farbe Maischen Ende                                | EBC       | 7,1      | 6,9      | 7,5        | 6,5        | 7,0        | 7,1        | 7,1        | 6,9        | 7,5   |
|                                      | Farbe VW   | EBC       | 7,2      | 7,8      | 8,3        | 7,1        | 7,6        | 7,6        | 6,9        | 6,4        | 6,4   |
|                                      | Farbe Pfv  | EBC       | 6,5      | 5,6      | 5,1        | 4,5        | 5,8        | 4,7        | 4,7        | 5,1        | 5,7   |
|                                      | Farbe AW   | EBC       | 9,7      | 9,1      | 9,8        | 9,1        | 9,5        | 9,4        | 8,9        | 7,7        | 7,3   |
|                                      | Reduktionsvermögen 10 Minuten                      | %         | 20,9     | 13,1     | 12,6       | 18,9       | 15,7       | 13,6       | 20,9       | 13,1       | 12,6  |
|                                      | Reduktionsvermögen Maischen Ende                   | %         | 14,1     | 13,2     | 10,8       | 13,2       | 15,1       | 12,6       | 14,1       | 13,2       | 10,8  |
|                                      | Reduktionsvermögen VW                              | %         | 64,8     | 57,0     | 58,8       | 63,2       | 58,8       | 64,5       | 59,2       | 48,9       | 59,9  |
|                                      | Reduktionsvermögen Pfv                             | %         | 56,3     | 58,5     | 46,6       | 58,6       | 61,9       | 22,9       | 68,9       | 54,6       | 70,0  |
|                                      | Reduktionsvermögen AW                              | %         | 67,0     | 58,9     | 49,1       | 66,9       | 64,2       | 55,2       | 74,0       | 62,1       | 49,6  |
|                                      | Reduktionsvermögen (bez. auf 9 GG-%) 10 Minuten    | %         | 14,4     | 3,6      | 9,2        | 13,2       | 6,6        | 10,5       | 14,4       | 3,6        | 9,2   |
|                                      | Reduktionsvermögen (bez. auf 9 GG-%) Maischen Ende | %         | 4,5      | 3,5      | 7,9        | 5,0        | 4,9        | 9,1        | 4,5        | 3,5        | 7,9   |
|                                      | Reduktionsvermögen (bez. auf 9 GG-%) VW            | %         | 51,0     | 43,9     | 48,2       | 46,8       | 44,0       | 50,8       | 54,7       | 30,5       | 60,0  |
|                                      | Reduktionsvermögen (bez. auf 9 GG-%) Pfv           | %         | 59,9     | 61,9     | 19,9       | 58,7       | 64,2       | 27,3       | 60,6       | 46,0       | 62,2  |
|                                      | Reduktionsvermögen (bez. auf 9 GG-%) AW            | %         | 65,3     | 47,4     | 16,9       | 65,0       | 49,6       | 49,1       | 55,4       | 37,4       | 28,6  |
|                                      | TBZ 10 Minuten                                     |           | 44,5     | 39,2     | 41,1       | 43,6       | 40,7       | 41,1       | 44,5       | 39,2       | 41,1  |
|                                      | TBZ Maischen Ende                                  |           | 45,6     | 39,9     | 42,4       | 43,5       | 41,8       | 42,1       | 45,6       | 39,9       | 42,4  |
|                                      | TBZ VW   |           | 44,2     | 40,1     | 41,3       | 41,9       | 40,8       | 41,1       | 41         | 38         | 41    |
|                                      | TBZ Pfv  |           | 29,4     | 26,5     | 26,7       | 27,2       | 28,5       | 26,3       | 27         | 26         | 27    |
|                                      | TBZ AW   |           | 61,9     | 58,0     | 57,2       | 59,1       | 58,6       | 58,7       | 63         | 57         | 56    |
| Bieranalyse                          | Geruch   |           | 4,4      | 4,5      | 4,1        | 4,3        | 4,2        | 4,3        | 4,4        | 4,4        | 4,4   |
|                                      | Geruch forciert                                    |           | 3,8      | 3,5      | 3,4        | 3,5        | 3,4        | 3,5        | 3,4        | 3,4        | 3,4   |
|                                      | Trunk  |           | 4,3      | 4,5      | 4,1        | 4,0        | 4,3        | 4,1        | 4,3        | 4,5        | 4,3   |
|                                      | Trunk forciert                                     |           | 3,6      | 3,4      | 3,4        | 3,4        | 3,2        | 3,4        | 3,4        | 3,4        | 3,6   |
|                                      | Vollmundigkeit                                     |           | 4,4      | 4,5      | 4,3        | 4,4        | 4,4        | 4,1        | 4,4        | 4,4        | 4,3   |
|                                      | Vollmundigkeit forciert                            |           | 4,1      | 4,1      | 4,0        | 4,1        | 4,1        | 4,2        | 4,2        | 4,2        | 4,1   |
|                                      | Rezenz   |           | 4,4      | 4,6      | 4,5        | 4,4        | 4,4        | 4,3        | 4,5        | 4,3        | 4,5   |
|                                      | Rezenz forciert                                    |           | 4,2      | 4,3      | 4,3        | 4,1        | 4,1        | 4,2        | 4,3        | 4,3        | 4,3   |
|                                      | Bittere  |           | 4,4      | 4,5      | 4,3        | 4,1        | 4,1        | 4,2        | 4,3        | 4,3        | 4,4   |
|                                      | Bittere forciert                                   |           | 4,0      | 4,1      | 3,9        | 3,9        | 3,8        | 3,9        | 3,9        | 3,9        | 4,1   |
|                                      | gew. Note  |           | 4,35     | 4,51     | 4,24       | 4,19       | 4,23       | 4,19       | 4,39       | 4,38       | 4,40  |
|                                      | gew. Note forciert                                 |           | 3,85     | 3,80     | 3,70       | 3,71       | 3,63       | 3,77       | 3,74       | 3,72       | 3,82  |
|                                      | Geruch   |           | 1,7      | 2,0      | 2,2        | 2,1        | 2,5        | 2,2        | 2,2        | 2,3        | 2,1   |
|                                      | Trunk  |           | 1,9      | 2,1      | 2,3        | 2,2        | 2,6        | 2,2        | 2,2        | 2,0        | 1,8   |
|                                      | Bittere  |           | 1,5      | 1,7      | 1,6        | 1,6        | 1,8        | 1,7        | 1,6        | 1,5        | 1,4   |
|                                      | gew. Note  |           | 1,73     | 2,00     | 2,13       | 2,03       | 2,41       | 2,11       | 2,05       | 2,00       | 1,85  |
|                                      | Akzeptanz forciert gealtertes Bier                 | %         | 61,4     | 51,4     | 48,6       | 51,4       | 35,7       | 51,4       | 56,7       | 50,0       | 61,7  |
|                                      | Stammwürze   | GV-%      | 11,62    | 12,36    | 11,94      | 11,43      | 12,39      | 12,05      | 11,99      | 12,01      | 12,04 |
|                                      | Stammwürze forciert                                | GV-%      | 11,58    | 12,34    | 12,04      | 11,43      | 12,34      | 12,12      | 12,00      | 12,04      | 12,09 |
|                                      | Alkohol  | Vol-%     | 4,69     | 5,27     | 5,08       | 4,61       | 5,34       | 5,06       | 4,89       | 5,09       | 5,08  |
|                                      | Alkohol forciert                                   | Vol-%     | 4,67     | 5,23     | 5,13       | 4,61       | 5,29       | 5,11       | 4,89       | 5,05       | 5,12  |
|                                      | Farbe  |           | 5,7      | 6,9      | 5,8        | 5,0        | 7,6        | 5,9        | 6,2        | 6,0        | 5,5   |
|                                      | Farbe forciert                                     |           | 7,6      | 7,6      | 6,3        | 7,8        | 7,8        | 6,3        | 6,2        | 6,2        | 5,9   |
|                                      | pH-Wert  |           | 4,82     | 4,88     | 4,88       | 4,82       | 4,92       | 4,83       | 4,78       | 4,77       | 4,73  |
|                                      | pH-Wert forciert                                   |           | 4,85     | 4,80     | 4,85       | 4,84       | 4,90       | 4,85       | 4,80       | 4,72       | 4,75  |
|                                      | Gesamtpolyphenole                                  | mg/l      | 136      | 185      | 102        | 115        | 160        | 105        | 140        | 127        | 137   |
|                                      | Anthozyanogene                                     |           | 33       | 92       | 42         | 46         | 105        | 44         | 63         | 77         | 52    |
|                                      | Tanninoide   | mg PVP/l  | 13,5     | 24,0     | 22,9       | 25,3       | 28,8       | 27,3       | 14,1       | 9,3        | 18,6  |
|                                      | Reduktionsvermögen                                 | %         | 28,9     | 35,7     | 27,8       | 33,0       | 29,9       | 28,0       | 39,7       | 21,3       | 27,1  |
|                                      | Reduktionsvermögen forciert                        | %         | 36,5     | 36,5     | 29,0       | 23,3       | 35,0       | 27,1       | 29,4       | 28,7       | 26,5  |
|                                      | TBZ  |           | 41       | 40,0     | 39         | 40         | 41         | 39         | 41         | 41         | 35    |
|                                      | TBZ forciert                                       |           | 41       | 37,0     | 38         | 40         | 39         | 39         | 41         | 37         | 35    |
| SO <sub>2</sub>                      | mg/l   | 4,5       | 4,4      | 1,9      | 3,3        | 0,5        | 1,3        | 4,9        | 2,6        | 2,5        |       |
| Schaumbestimmung nach Nibem forciert | s  | 286       | 285      | 256      | 264        | 286        | 256        | 257        | 259        | 239        |       |
| Schaumbestimmung nach Nibem          | s  | 276       | 283      | 245      | 259        | 281        | 247        | 247        | 259        | 233        |       |

Tab. AH 33: Analysendaten der Brauersuche Teil I

(ET 58/62/66 °C, ohne und mit Maischesäuerung, Würzesäuerung, Pilsner Malz)



| Analysenbezeichnung                  | Einheit    | Auriga 1 | Auriga 2 | Auriga 3 | Barke 1 | Barke 2 | Barke 3 | Barke 4 |
|--------------------------------------|------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Wassergehalt Malz                    | %          | 4,2      | 4,3      | 3,9      | 4,0     | 3,5     | 4,1     | 5,8     |
| Extrakt Malz                         | %, lfr.    | 76,9     | 77,0     | 77,5     | 79,2    | 79,3    | 78,9    | 77,4    |
| Extrakt MTrs.                        | %, wfr.    | 80,3     | 80,5     | 80,6     | 82,5    | 82,2    | 82,3    | 82,2    |
| Viskosität (bez. auf 8,6 GG-%)       | mPa s      | 1,523    | 1,541    | 1,549    | 1,490   | 1,510   | 1,528   | 1,496   |
| Viskosität 65 °C (bez. auf 8,6 GG-%) | mPa s      | 1,565    | 1,562    | 1,605    | 1,527   | 1,545   | 1,596   | 1,537   |
| Friabilimeter Mürbigkeit             | %          | 92,3     | 87,9     | 91,3     | 92,7    | 90,8    | 86,8    | 90,0    |
| Ganzglasigkeit                       | %          | 0,5      | 1,6      | 0,8      | 0,8     | 0,9     | 1,1     | 0,1     |
| Verzuckerungszeit                    | min.       | < 10     | < 10     | < 10     | < 10    | < 10    | < 10    | < 10    |
| Ablauf                               | klar/opal  | klar     | klar     | klar     | klar    | klar    | opal    | klar    |
| Endvergärungsgrad                    | %, schb.   | 82,5     | 81,8     | 81,9     | 82,1    | 82,2    | 83,0    | 82,0    |
| Farbe Fotometer                      | EBC        | 3,5      | 3,9      | 3,5      | 3,3     | 3,4     | 3,3     | 3,2     |
| Kochfarbe Fotometer                  | EBC        | 5,5      | 6,2      | 6,0      | 5,6     | 5,7     | 5,4     | 5,1     |
| pH-Wert                              |            | 5,94     | 5,88     | 5,89     | 5,83    | 5,93    | 5,91    | 5,96    |
| Rohprotein Malz                      | %, wfr.    | 10,5     | 10,5     | 10,4     | 10,1    | 10,4    | 10,9    | 9,8     |
| Löslicher Stickstoff MTrs.           | mg/100g    | 719      | 715      | 713      | 719     | 669     | 674     | 593     |
| Eiweiss-Lösungsgrad                  | %          | 42,8     | 42,6     | 42,8     | 44,5    | 40,2    | 38,6    | 37,8    |
| freier Amino-Stickstoff TrS.         | mg/100g    | 154      | 144      | 149      | 145     | 137     | 133     | 115     |
| β-Glucan 65 °C                       | mg/l       | 123      | 104      | 177      | 167     | 203     | 276     | 188     |
| Homogenität                          | %          | 92       | 92       | 86       | 88      | 88      | 83      | 87      |
| Modifikation                         | %          | 99       | 99       | 98       | 98      | 98      | 96      | 98      |
| DMS-Vorläufer                        | mg/l, lfr. | 6,1      | 4,4      | 4,4      | 5,3     | 4,4     | 2,2     | 3,8     |
| Sortierung > 2,8 mm Malz             | %          | 84,8     | 86,3     | 86,3     | 87,9    | 88,4    | 85,2    | 92,6    |
| Sortierung 2,5 - 2,8 mm Malz         | %          | 12,5     | 11,3     | 11,2     | 9,6     | 9,6     | 12,2    | 6,1     |
| Sortierung 2,2 - 2,5 mm Malz         | %          | 1,9      | 2,0      | 2,3      | 1,8     | 1,3     | 2,1     | 0,9     |
| Abputz Malz                          | %          | 0,8      | 0,4      | 0,2      | 0,7     | 0,7     | 0,5     | 0,4     |
| Fett in MTrs.                        | %          | 1,5      | 1,5      | 1,5      | 1,6     | 1,6     | 1,2     | 1,6     |
| TBZ nach Birkenstock                 |            | 11       | 16       | 13       | 10      | 10      | 9       | 9       |
| Stammwürze                           | GG-%       | 11,73    | 11,45    | 11,9     | 12,08   | 11,94   | 11,33   | 12,11   |
| Stammwürze                           | GV-%       | 12,26    | 11,95    | 12,44    | 12,64   | 12,49   | 11,82   | 12,68   |
| Endvergärungsgrad scheinbar          | %          | 83,9     | 82,2     | 83,4     | 83,1    | 83,4    | 83,8    | 83      |
| pH                                   |            | 5,82     | 5,73     | 5,75     | 5,79    | 5,83    | 5,97    | 5,84    |
| Farbe                                | EBC        | 7,3      | 7,5      | 6,3      | 8,3     | 6,9     | 5,3     | 5,8     |
| Gesamt-N                             | mg/100 ml  | 96       | 85       | 97,2     | 107,6   | 93,5    | 90,7    | 82,5    |
| Gesamt-N (bez. auf 12 GG-%)          | mg/100 ml  | 98,2     | 89,1     | 98       | 106,9   | 94      | 96,1    | 81,8    |
| FAN                                  | mg/100 ml  | 19,9     | 19,7     | 24,6     | 21,5    | 18,7    | 17,1    | 18,2    |
| FAN (bez. auf 12 GG-%)               | mg/100 ml  | 20,4     | 20,6     | 24,8     | 21,4    | 18,8    | 18,1    | 18      |
| Gesamtpolyphenole                    | mg/l       | 168      | 175      | 166      | 184     | 154     | 210     | 141     |
| Gesamtpolyphenole (bez. auf 12 GG-%) | mg/l       | 172      | 183      | 167      | 183     | 155     | 222     | 140     |
| Anthozyanogene                       | mg/l       | 95       | 91       | 54       | 115     | 84      | 102     | 75      |
| Anthozyanogene (bez. auf 12 GG-%)    | mg/l       | 97       | 95       | 54       | 114     | 84      | 108     | 74      |
| Tanninoide                           | mg PVP/l   | 106      | 93       | 101      | 93      | 87      | 120     | 112     |
| Indikator-Time-Test                  | s          | 37       | 36       | 31       | 34      | 42      | 30      | 28      |
| TBZ                                  |            | 21       | 26       | 24       | 21      | 18      | 14      | 18      |
| Polymerisationsindex                 |            | 1,77     | 1,93     | 3,09     | 1,61    | 1,85    | 2,06    | 1,89    |
| 3-Methylbutanal (A, W)               | µg/l       | 202      | 520      | 540      | 349     | 423     | 328     | 419     |
| 2-Methylbutanal (A, W)               | µg/l       | 82       | 215      | 217      | 126     | 190     | 125     | 172     |
| Methional (A)                        | µg/l       | 22       | 49       | 60       | 45      | 45      | 40      | 43      |
| Benzaldehyd (A)                      | µg/l       | 2,3      | 4,9      | 5,4      | 3,9     | 4,3     | 5,4     | 5,0     |
| 2-Phenylethanal (A, W)               | µg/l       | 96       | 203      | 225      | 170     | 154     | 162     | 169     |
| ε-Streckerdehyde (A)                 | µg/l       | 405      | 992      | 1047     | 695     | 816     | 661     | 807     |
| Pentanal (A)                         | µg/l       | 9,5      | 18,4     | 18,1     | 22,2    | 14,4    | 15,0    | 17,9    |
| 2-Pentanon (A)                       | µg/l       | 2,8      | 5,4      | 5,7      | 4,8     | 6,7     | 4,7     | 5,8     |
| Hexanal (A)                          | µg/l       | 43       | 88       | 82       | 146     | 72      | 76      | 97      |
| Heptanal (A)                         | µg/l       | 1,2      | 2,6      | 2,7      | 4,4     | 2,2     | 3,1     | 2,3     |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal (A)             | µg/l       | Sp.      | Sp.      | Sp.      | Sp.     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
| 2-Furfural (T)                       | µg/l       | 40       | 98       | 88       | 58      | 54      | 59      | 76      |
| 2-Acetylfuran (T)                    | µg/l       | 0,5      | 1,2      | Sp.      | 2,6     | 1,7     | 1,4     | Sp.     |
| γ-Nonalacton (A, W)                  | µg/l       | 1,1      | 3,4      | 2,2      | 3,1     | 1,0     | 3,1     | 1,6     |
| 3-Methylbutanol (A)                  | µg/l       | 59       | 125      | 101      | 59      | 67      | 68      | 82      |
| 2-Methylbutanol (A)                  | µg/l       | 19       | 35       | 28       | 19      | 22      | 22      | 24      |
| 1-Pentanol (A)                       | µg/l       | 13       | 27       | 20       | 22      | 16      | 31      | 25      |
| 1-Hexanol (A)                        | µg/l       | 14       | 28       | 21       | 46      | 18      | 27      | 20      |
| 1-Octanol (A)                        | µg/l       | n. a.    | n. a.    | n. a.    | n. a.   | n. a.   | 1,7     | n. a.   |
| 1-Octen-3-ol (A)                     | µg/l       | 2,1      | 4,3      | 3,8      | 8,7     | 2,9     | 2,2     | 3,7     |
| Phenylethanol (A)                    | µg/l       | 72       | 138      | 107      | 83      | 71      | 73      | 77      |
| Stammwürze                           | GG-%       | 11,73    | 12,38    | 11,96    | 12,08   | 12,49   | 12,43   | 12,11   |
| Stammwürze                           | GV-%       | 12,26    | 12,97    | 12,51    | 12,64   | 13,09   | 13,03   | 12,68   |
| Endvergärungsgrad scheinbar          | %          | 83,9     | 81,9     | 83,1     | 83,1    | 82,9    | 83,3    | 83,0    |
| pH                                   |            | 5,82     | 5,59     | 5,65     | 5,79    | 5,7     | 5,79    | 5,84    |
| Farbe                                | EBC        | 7,3      | 11,0     | 8,6      | 8,3     | 9,1     | 8,9     | 5,8     |
| Gesamt-N                             | mg/100 ml  | 96,0     | 97,7     | 95,8     | 107,6   | 92,0    | 95,9    | 82,5    |
| Gesamt-N (bez. auf 12 GG-%)          | mg/100 ml  | 98,2     | 94,7     | 96,1     | 106,9   | 88,4    | 92,6    | 81,8    |
| FAN                                  | mg/100 ml  | 19,9     | 17,9     | 23,4     | 21,5    | 18,8    | 17,9    | 18,2    |
| FAN (bez. auf 12 GG-%)               | mg/100 ml  | 20,4     | 17,4     | 23,5     | 21,4    | 18,1    | 17,3    | 18      |
| Gesamtpolyphenole                    | mg/l       | 168      | 209      | 220      | 184     | 218     | 243     | 141     |
| Gesamtpolyphenole (bez. auf 12 GG-%) | mg/l       | 172      | 203      | 221      | 183     | 209     | 235     | 140     |
| Anthozyanogene                       | mg/l       | 95       | 100      | 64       | 115     | 98      | 46      | 75      |
| Anthozyanogene (bez. auf 12 GG-%)    | mg/l       | 97       | 97       | 64       | 114     | 94      | 44      | 74      |
| Tanninoide                           | mg PVP/l   | 106      | 91       | 83       | 93      | 94      | 105     | 112     |
| Indikator-Time-Test                  | s          | 37       | 45       | 35       | 34      | 44      | 31      | 28      |
| TBZ                                  |            | 21       | 42       | 36       | 21      | 29      | 25      | 18      |
| Polymerisationsindex                 |            | 1,77     | 2,09     | 3,45     | 1,61    | 2,22    | 5,34    | 1,89    |
| 3-Methylbutanal (A, W)               | µg/l       | 60       | 62       | 68       | 52      | 57      | 32      | 40      |
| 2-Methylbutanal (A, W)               | µg/l       | 22       | 22       | 24       | 16      | 20      | 10      | 14      |
| Methional (A)                        | µg/l       | 20       | 25       | 25       | 26      | 27      | 11      | 17      |
| Benzaldehyd (A)                      | µg/l       | 2,6      | 0,8      | 2,7      | 3,3     | 2,3     | 1,7     | 2,2     |
| 2-Phenylethanal (A, W)               | µg/l       | 159      | 160      | 159      | 118     | 119     | 82      | 113     |
| ε-Streckerdehyde (A)                 | µg/l       | 264      | 270      | 279      | 215     | 225     | 137     | 186     |
| Pentanal (A)                         | µg/l       | 1,4      | 1,4      | 5,9      | 2,8     | 1,5     | 2,3     | 1,7     |
| 2-Pentanon (A)                       | µg/l       | 4,6      | 4,6      | 4,9      | 5,9     | 5,9     | 3,5     | 5,1     |
| Hexanal (A)                          | µg/l       | 4,6      | 4,6      | 4,6      | 6,6     | 5,7     | 2,6     | 4,1     |
| Heptanal (A)                         | µg/l       | 0,6      | 0,6      | 0,4      | 0,9     | 0,6     | 0,9     | 0,5     |
| (E,Z)-2,6-Nonadienal (A)             | µg/l       | Sp.      | Sp.      | Sp.      | Sp.     | 1,3     | n. n.   | Sp.     |
| 2-Furfural (T)                       | µg/l       | 124      | 147      | 130      | 97      | 104     | 73      | 100     |
| 2-Acetylfuran (T)                    | µg/l       | 1,2      | 1,5      | 2,0      | 2,1     | n. a.   | 2,3     | 1,3     |
| γ-Nonalacton (A, W)                  | µg/l       | 1,8      | 2,9      | 1,9      | 2,7     | 1,8     | 2,2     | 1,7     |
| 3-Methylbutanol (A)                  | µg/l       | 23       | 26       | 13       | 9,4     | 14      | 3,4     | 12      |
| 2-Methylbutanol (A)                  | µg/l       | 8,4      | 7,7      | 4,1      | 3,4     | 5,6     | 7,3     | 4,6     |
| 1-Pentanol (A)                       | µg/l       | 4,8      | 4,8      | 3,0      | 3,5     | 3,4     | 1,4     | 2,2     |
| 1-Hexanol (A)                        | µg/l       | 4,4      | 4,5      | 2,9      | 4,2     | 3,5     | 0,6     | 2,6     |
| 1-Octanol (A)                        | µg/l       | n. a.    | n. a.    | n. a.    | n. a.   | n. a.   | 0,5     | n. a.   |
| 1-Octen-3-ol (A)                     | µg/l       | n. a.    | n. a.    | n. a.    | 1,4     | n. a.   | 1,1     | 0,2     |
| Phenylethanol (A)                    | µg/l       | 103      | 133      | 91       | 75      | 67      | 59      | 63      |

Tab. AH 35: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil I

| Analysenbezeichnung           | Einheit                              | Auriga 1    | Auriga 2 | Auriga 3 | Barke 1 | Barke 2 | Barke 3 | Barke 4 |       |      |
|-------------------------------|--------------------------------------|-------------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|-------|------|
| Bieranalyse frisch            | Stammwürze                           | GG-%        | 12,59    | 12,46    | 12,06   | 12,64   | 12,43   | 12,76   | 12,28 |      |
|                               | Stammwürze                           | GV-%        | 13,21    | 13,07    | 12,62   | 13,26   | 13,03   | 13,39   | 12,85 |      |
|                               | Alkohol                              | GG-%        | 4,38     | 4,19     | 4,02    | 4,24    | 4,28    | 4,39    | 4,14  |      |
|                               | Alkohol                              | Vol-%       | 5,58     | 5,35     | 5,13    | 5,42    | 5,46    | 5,60    | 5,28  |      |
|                               | scheinbarer Extrakt                  | GG-%        | 2,13     | 2,43     | 2,42    | 2,48    | 2,18    | 2,27    | 2,35  |      |
|                               | wirklicher Extrakt                   | GG-%        | 4,14     | 4,36     | 4,27    | 4,44    | 4,15    | 4,28    | 4,25  |      |
|                               | Vergärungsgrad scheinbar             | %           | 83,8     | 81,3     | 80,7    | 81,1    | 83,1    | 82,9    | 81,6  |      |
|                               | Vergärungsgrad wirklich              | %           | 68,6     | 66,5     | 66      | 66,4    | 68,1    | 67,9    | 66,8  |      |
|                               | Endvergärungsgrad scheinbar          | %           | 83,8     | 82,6     | 82,6    | 82,5    | 83,3    | 84,0    | 82,6  |      |
|                               | Farbe                                | EBC         | 5,9      | 6,9      | 5,9     | 6,1     | 5,4     | 6,8     | 5,0   |      |
|                               | pH                                   |             | 4,84     | 4,82     | 4,8     | 4,9     | 4,78    | 4,92    | 4,85  |      |
|                               | Gesamtpolyphenole                    | mg/l        | 167      | 157      | 154     | 179     | 152     | 167     | 163   |      |
|                               | Gesamtpolyphenole (bez. auf 12 GG-%) | mg/l        | 159      | 151      | 153     | 170     | 147     | 157     | 160   |      |
|                               | Anthozyanogene                       | mg/l        | 56       | 62       | 54      | 67      | 58      | 76      | 58    |      |
|                               | Anthozyanogene (bez. auf 12 GG-%)    | mg/l        | 53       | 60       | 54      | 64      | 56      | 71      | 57    |      |
|                               | Polymerisationsindex                 |             | 3        | 2,52     | 2,83    | 2,66    | 2,63    | 2,21    | 2,81  |      |
|                               | Tanninoide                           | mg PVP/l    | 18       | 18       | 17      | 22      | 19      | 31      | 22    |      |
|                               | Indikator-Time-Test (ITT)            | s           | 26       | 28       | 20      | 35      | 20      | —       | 24    |      |
|                               | Viskosität                           | mPa s       | 1,665    | 1,661    | 1,582   | 1,621   | 1,528   | 1,667   | 1,611 |      |
|                               | Viskosität (bez. auf 12 GG-%)        | mPa s       | 1,625    | 1,630    | 1,578   | 1,581   | 1,505   | 1,616   | 1,595 |      |
|                               | TBZ                                  |             | 27       | 35       | 29      | 24      | 23      | 22      | 21    |      |
|                               | Schwefeldioxid                       | mg/l        | 1,0      | 0,2      | 1,3     | 4,8     | 0,2     | 6,8     | 0,3   |      |
|                               | Schaum nach Ross und Clark           |             | 116      | 119      | 124     | 105     | 119     | 119     | 115   |      |
|                               | Gesamt-N                             | mg/100 ml   | 76,4     | 72,5     | 70,6    | 77,8    | 59,9    | 92,1    | 56,6  |      |
|                               | Gesamt-N (bez. auf 12 GG-%)          | mg/100 ml   | 72,8     | 69,8     | 70,2    | 73,9    | 57,8    | 86,6    | 55,4  |      |
|                               | FAN                                  | mg/100 ml   | 14,1     | 13,6     | 12,2    | 14,2    | 7,8     | 9,7     | 8,1   |      |
|                               | FAN (bez. auf 12 GG-%)               | mg/100 ml   | 13,4     | 13,1     | 12,1    | 13,5    | 7,5     | 9,1     | 7,9   |      |
|                               | Gesamt-Diacetyl                      | mg/l        | 0,05     | 0,07     | 0,06    | 0,06    | —       | 0,05    | 0,05  |      |
| Gesamt -2,3-Pentandion        | mg/l                                 | 0,02        | 0,03     | 0,03     | 0,03    | —       | 0,02    | 0,02    |       |      |
| Lag-Time                      | min.                                 | 47          | 32       | 54       | 64      | 25      | 132     | 39      |       |      |
| Bieranalyse fröcielt          | Stammwürze                           | GG-%        | 12,63    | 12,46    | 12,08   | 12,6    | 12,43   | 12,83   | 12,3  |      |
|                               | Stammwürze                           | GV-%        | 13,25    | 13,07    | 12,64   | 13,22   | 13,03   | 13,47   | 12,88 |      |
|                               | Alkohol                              | GG-%        | 4,39     | 4,19     | 4,03    | 4,23    | 4,28    | 4,43    | 4,15  |      |
|                               | Alkohol                              | Vol-%       | 5,60     | 5,35     | 5,14    | 5,40    | 5,46    | 5,65    | 5,30  |      |
|                               | scheinbarer Extrakt                  | GG-%        | 2,13     | 2,43     | 2,42    | 2,48    | 2,18    | 2,25    | 2,35  |      |
|                               | wirklicher Extrakt                   | GG-%        | 4,15     | 4,36     | 4,28    | 4,43    | 4,15    | 4,28    | 4,26  |      |
|                               | Vergärungsgrad scheinbar             | %           | 83,8     | 81,3     | 80,7    | 81,1    | 83,1    | 83,2    | 81,7  |      |
|                               | Vergärungsgrad wirklich              | %           | 68,6     | 66,5     | 66      | 66,4    | 68,1    | 68,1    | 66,8  |      |
|                               | Endvergärungsgrad scheinbar          | %           | 84,2     | 82,6     | 83,1    | 83      | 83,7    | 83,7    | 83,1  |      |
|                               | Farbe                                | EBC         | 6        | 7,2      | 6       | 6,3     | 5,5     | 6,7     | 5,3   |      |
|                               | pH                                   |             | 4,86     | 4,82     | 4,82    | 4,90    | 4,78    | 4,9     | 4,86  |      |
|                               | Gesamtpolyphenole                    | mg/l        | 144      | 162      | 148     | 177     | 167     | 203     | 166   |      |
|                               | Gesamtpolyphenole (bez. auf 12 GG-%) | mg/l        | 137      | 156      | 147     | 169     | 161     | 190     | 162   |      |
|                               | Anthozyanogene                       | mg/l        | 55       | 57       | 54      | 71      | 57      | 57      | 56    |      |
|                               | Anthozyanogene (bez. auf 12 GG-%)    | mg/l        | 52       | 55       | 54      | 68      | 55      | 53      | 55    |      |
|                               | Polymerisationsindex                 |             | 2,63     | 2,84     | 2,72    | 2,49    | 2,93    | 3,58    | 2,95  |      |
|                               | Tanninoide                           | mg PVP/l    | 19       | 21       | 18      | 29      | 24      | 36      | 25    |      |
|                               | Indikator-Time-Test (ITT)            | s           | 19       | 22       | 20      | 27      | 23      | —       | 18    |      |
|                               | Viskosität                           | mPa s       | 1,667    | 1,656    | 1,660   | 1,632   | 1,629   | 1,656   | 1,609 |      |
|                               | Viskosität (bez. auf 12 GG-%)        | mPa s       | 1,624    | 1,624    | 1,655   | 1,593   | 1,598   | 1,602   | 1,590 |      |
|                               | TBZ                                  |             | 28       | 34       | 29      | 24      | 22      | 20      | 21    |      |
|                               | Schwefeldioxid                       | mg/l        | 0,2      | 0,2      | 0,3     | 3,6     | 0,2     | —       | 0,1   |      |
|                               | Schaum nach Ross und Clark           |             | 122      | 121      | 119     | 103     | 121     | 102     | 110   |      |
|                               | Gesamt-N                             | mg/100 ml   | 75,2     | 70,8     | 69,6    | 83,0    | 57,7    | 74,8    | 61,3  |      |
|                               | Gesamt-N (bez. auf 12 GG-%)          | mg/100 ml   | 71,4     | 68,2     | 69,1    | 79,0    | 55,7    | 70,0    | 59,8  |      |
|                               | FAN                                  | mg/100 ml   | 13,9     | 13,4     | 11,8    | 14,3    | 8       | 9,7     | 7,9   |      |
|                               | FAN (bez. auf 12 GG-%)               | mg/100 ml   | 13,2     | 12,9     | 11,7    | 13,6    | 7,7     | 9,1     | 7,7   |      |
|                               | Bieraromastoffe                      | Hexanol-1   | µg/l     | 15,6     | 13,4    | 8,5     | 14,7    | 16,9    | 8,9   | 19,0 |
| Heptanol-1                    |                                      | µg/l        | 5,8      | 6,0      | 4,3     | 2,8     | 3,7     | 5,5     | 10,7  |      |
| Octanol-1                     |                                      | µg/l        | 12       | 11       | 11      | 15      | 18      | 13      | 15    |      |
| Decanol-1                     |                                      | µg/l        | 6,9      | 6,4      | 6,3     | 6,9     | 10      | 5,7     | 8,2   |      |
| 2-Phenylethanol               |                                      | µg/l        | 16410    | 17157    | 16297   | 13607   | 21637   | 23669   | 17261 |      |
| Furfurylalkohol               |                                      | µg/l        | 937      | 765      | 436     | 1015    | 548     | —       | 876   |      |
| Essigsäureisobutylester       |                                      | µg/l        | 32       | 25       | 29      | 46      | 43      | 57      | 35    |      |
| Essigsäurehexylester          |                                      | µg/l        | 4,1      | 3,7      | 4,2     | 5,8     | 3,8     | 4,5     | 3,9   |      |
| Essigsäureheptylester         |                                      | µg/l        | 3,4      | 3,4      | 4,1     | 1,7     | 1,5     | 3,6     | 3,8   |      |
| Essigsäureoctylester          |                                      | µg/l        | 2,5      | 2,4      | 2,6     | 2,4     | 2,3     | 2,8     | 2,0   |      |
| Essigsäurefurfurylester       |                                      | µg/l        | 3,2      | 2,7      | 2,4     | 3,9     | n. a.   | 3,3     | n. a. |      |
| Essigsäure-2-Phenylethylester |                                      | µg/l        | 490      | 427      | 466     | 459     | 444     | 780     | 468   |      |
| Buttersäureethylester         |                                      | µg/l        | 106      | 91       | 81      | 110     | 91      | 122     | 83    |      |
| Hexansäureethylester          |                                      | µg/l        | 208      | 186      | 190     | 256     | 156     | 292     | 166   |      |
| Octansäureethylester          |                                      | µg/l        | 322      | 282      | 283     | 357     | 275     | 411     | 269   |      |
| Decansäureethylester          |                                      | µg/l        | 64       | 23       | 44      | 48      | 30      | 67      | 39    |      |
| Isovaleriansäure              |                                      | µg/l        | 224      | 1258     | 225     | 244     | 202     | 582     | 488   |      |
| Hexansäure                    |                                      | µg/l        | 2999     | 2274     | 1831    | 3053    | 2318    | 2267    | 2653  |      |
| Octansäure                    |                                      | µg/l        | 6491     | 5817     | 5741    | 7969    | 5306    | 7639    | 5844  |      |
| Nonansäure                    |                                      | µg/l        | 14       | 14       | 11      | 17      | 9,0     | 13      | 15    |      |
| Decansäure                    |                                      | µg/l        | 1041     | 385      | 740     | 884     | 483     | 1123    | 658   |      |
| Dodecansäure                  |                                      | µg/l        | 49       | 36       | 41      | 34      | 18      | 59      | 19    |      |
| α-Terpineol                   |                                      | µg/l        | Sp.      | 1,8      | Sp.     | 1,7     | 3,0     | 1,1     | 2,3   |      |
| Linalool                      |                                      | µg/l        | 11,9     | 10,5     | 9,3     | 10,6    | 16,2    | 1,5     | 12,4  |      |
| Nerol                         |                                      | µg/l        | 5,2      | 4,8      | 3,4     | 3,3     | n. a.   | 1,3     | 6,3   |      |
| γ-Nonalacton                  |                                      | µg/l        | 19       | 21       | 16      | 20      | 15      | 15      | 18    |      |
| Höhere Alkohole               |                                      | Acetaldehyd | mg/l     | 6,4      | 14      | 11      | 11,2    | 4,8     | 7,3   | 8,4  |
|                               |                                      | Propanol-1  | mg/l     | 9,8      | 11      | 9,6     | 10,6    | 12      | 9,9   | 13   |
|                               | Ethylacetat                          | mg/l        | 23       | 20       | 19      | 24      | 23      | 27      | 21    |      |
|                               | 2-Methylpropanol                     | mg/l        | 7        | 7        | 7,7     | 9       | 10      | 11      | 9     |      |
|                               | 3-Methylbutanol                      | mg/l        | 33       | 37       | 39      | 36      | 34      | 37      | 30    |      |
|                               | 2-Methylbutanol                      | mg/l        | 9,8      | 10,4     | 11,0    | 9,9     | 10,2    | 12,0    | 9,7   |      |
|                               | 2-Methylpropylacetat                 | mg/l        | n. n.    | n. n.    | n. n.   | 0,1     | n. n.   | 0,1     | n. n. |      |
|                               | Buttersäureethylester                | mg/l        | 0,1      | 0,2      | 0,1     | 0,2     | 0,1     | 0,1     | 0,1   |      |
| 3-Methylbutylacetat           | mg/l                                 | 1,3         | 1,4      | 1,6      | 2,1     | 1,4     | 2,4     | 1,3     |       |      |
| 2-Methylbutylacetat           | mg/l                                 | 0,1         | 0,1      | 0,1      | 0,2     | 0,1     | 0,2     | 0,1     |       |      |
| Hexansäureethylester          | mg/l                                 | 0,2         | 0,2      | 0,2      | 0,3     | 0,2     | 0,3     | 0,2     |       |      |

Tab. AH 36: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil II

|  | Analysenbezeichnung                      | Einheit | Auriga 1 | Auriga 2 | Auriga 3 | Barke 1 | Barke 2 | Barke 3 | Barke 4 |
|--|--|---------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|
| Alterungsindikatoren                     | 2-Methylbutanal                          | µg/l    | n. a.    | n. a.    | n. a.    | n. a.   | n. a.   | n. a.   | n. a.   |
|  | 2-Methylbutanal forciert                 | µg/l    | n. a.    | n. a.    | n. a.    | n. a.   | n. a.   | n. a.   | n. a.   |
|  | 3-Methylbutanal (S,A)                    | µg/l    | 7,2      | 12       | 10       | 9,4     | 6,1     | n. a.   | n. a.   |
|  | 3-Methylbutanal forciert (S,A)           | µg/l    | 11,9     | 17       | 11       | 14,3    | 7,9     | 8,8     | 8,8     |
|  | 2-Furfural (W,A)                         | µg/l    | Sp.      | Sp.      | Sp.      | Sp.     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | 2-Furfural forciert (W,A)                | µg/l    | 35       | 51       | 28       | 29      | 43      | 44      | 44      |
|  | 5-Methylfurfural (A)                     | µg/l    | 4,3      | 5,1      | 5,4      | 4,7     | 4,5     | 5,3     | 5,3     |
|  | 5-Methylfurfural forciert (A)            | µg/l    | 4,5      | 5,2      | 3,7      | 5,4     | 5,3     | 6,5     | 6,5     |
|  | Benzaldehyd (S,A)                        | µg/l    | Sp.      | Sp.      | Sp.      | Sp.     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | Benzaldehyd forciert (S,A)               | µg/l    | 0,9      | 0,8      | Sp.      | Sp.     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | 2-Phenylethanal (S,A)                    | µg/l    | 4,3      | 7,6      | 5,2      | 3,9     | 3,7     | 7,4     | 7,4     |
|  | 2-Phenylethanal forciert (S,A)           | µg/l    | 10,2     | 14,1     | 8,7      | 7,8     | 6,9     | 7,8     | 7,8     |
|  | Bernsteinsäurediethylester (A)           | µg/l    | Sp.      | Sp.      | Sp.      | 4,4     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | Bernsteinsäurediethylester forciert (A)  | µg/l    | Sp.      | Sp.      | Sp.      | 4,8     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | Nicotinsäureethylester                   | µg/l    | 3,4      | 2,3      | 2,5      | 4,6     | 4,3     | 2,4     | 2,4     |
|  | Nicotinsäureethylester forciert          | µg/l    | 11,6     | 11,4     | 8,6      | 13,2    | 14,7    | 11,5    | 11,5    |
|  | Phenyllessigsäureethylester (A)          | µg/l    | 0,5      | Sp.      | Sp.      | 0,7     | 0,6     | 0,6     | 0,6     |
|  | Phenyllessigsäureethylester forciert (A) | µg/l    | 0,6      | 0,6      | 0,5      | 0,7     | 0,8     | 0,8     | 0,8     |
|  | 2-Acetylfuran (A)                        | µg/l    | Sp.      | Sp.      | Sp.      | 6,8     | Sp.     | Sp.     | Sp.     |
|  | 2-Acetylfuran forciert (A)               | µg/l    | 2,2      | 3,2      | Sp.      | n. a.   | 3,1     | Sp.     | Sp.     |
|  | 2-Propionylfuran (A)                     | µg/l    | 2,1      | 1,9      | Sp.      | 2,6     | 2,3     | 2,5     | 2,5     |
|  | 2-Propionylfuran forciert (A)            | µg/l    | 2,5      | 2,1      | 1,9      | 2,9     | 2,5     | 2,9     | 2,9     |
|  | γ-Nonalacton (W,A)                       | µg/l    | 11,7     | 14,0     | 12,6     | 13,1    | 10,4    | 12,1    | 12,1    |
|  | γ-Nonalacton forciert (W,A)              | µg/l    | 17,2     | 19,3     | 15,7     | 14,2    | 14,4    | 17,9    | 17,9    |
|  | Summe der Wärmeindikatoren               | µg/l    | 11,7     | 14,0     | 12,6     | 13,1    | 10,4    | 12,1    | 12,1    |
|  | Summe der Wärmeindikatoren forciert      | µg/l    | 52       | 70       | 44       | 44      | 57      | 62      | 62      |
|  | Summe der Sauerstoffindikatoren          | µg/l    | 11       | 20       | 15       | 13      | 10      | 7,4     | 7,4     |
| Summe der Sauerstoffindikatoren forciert | µg/l                                     | 23      | 32       | 20       | 22       | 15      | 17      | 17      |         |
| Summe der Alterungskomponenten           | µg/l                                     | 30      | 41       | 33       | 46       | 28      | 28      | 28      |         |
| Summe der Alterungskomponenten forciert  | µg/l                                     | 85      | 113      | 70       | 80       | 84      | 82      | 88      |         |
| DLG-Verkostung (frisch/forciert)         | Geruch                                   |         | 4,1      | 4,1      | 4,3      | 4,3     | 4,4     | 4,7     | 4,5     |
|  | Geruch forciert                          |         | 3,9      | 3,6      | 3,6      | 3,9     | 3,4     | 4,2     | 4,1     |
|  | Trunk                                    |         | 4,4      | 4,3      | 4,3      | 4,1     | 4,6     | 4,5     | 4,4     |
|  | Trunk forciert                           |         | 3,9      | 3,7      | 3,6      | 4,0     | 3,6     | 4,1     | 4,1     |
|  | Vollmundigkeit                           |         | 4,4      | 4,5      | 4,3      | 4,5     | 4,7     | 4,5     | 4,3     |
|  | Vollmundigkeit forciert                  |         | 4,2      | 4,3      | 4,2      | 4,3     | 4,3     | 4,3     | 4,2     |
|  | Rezenz                                   |         | 4,6      | 4,4      | 4,3      | 4,5     | 4,5     | 4,4     | 4,5     |
|  | Rezenz forciert                          |         | 4,4      | 4,4      | 4,2      | 4,3     | 4,3     | 4,2     | 4,2     |
|  | Bittere                                  |         | 4,3      | 4,1      | 4,4      | 4,5     | 4,3     | 4,3     | 4,5     |
|  | Bittere forciert                         |         | 4,0      | 4,2      | 3,9      | 4,1     | 4,3     | 4,1     | 4,2     |
|  | gew. Note                                |         | 4,32     | 4,25     | 4,33     | 4,32    | 4,5     | 4,49    | 4,45    |
| gew. Note forciert                       |  | 4,00    | 3,94     | 3,83     | 4,06     | 3,88    | 4,16    | 4,15    |         |
| Alterungs-<br>verkostung                 | Geruch                                   |         | 1,6      | 1,9      | 1,9      | 1,7     | 2,1     | 1,2     | 1,5     |
|  | Trunk                                    |         | 1,6      | 1,7      | 2,0      | 1,5     | 2,0     | 1,4     | 1,6     |
|  | Bittere                                  |         | 1,5      | 1,4      | 1,4      | 1,3     | 1,3     | 1,2     | 1,1     |
|  | gew. Note                                |         | 1,6      | 1,7      | 1,8      | 1,6     | 1,9     | 1,3     | 1,4     |
|  | Akzeptanz                                | %       | 75,0     | 68,6     | 65,0     | 78,3    | 63,3    | 90,0    | 85,0    |

Tab. AH 37: Brauversuche mit Handelsmalzen Teil III

# **Lebenslauf**

## **Persönliche Daten**

Name: Martina Ingeborg Gastl (geb. Schütz)  
Geburtsdatum: 16.12.1974  
Geburtsort: Bamberg  
Familienstand: verheiratet  
Staatsangehörigkeit: deutsch

## **Schulbildung**

09/1981–08/1985: Grundschule am Jahnweg, Neufahrn bei Freising  
09/1985–08/1987: Dom-Gymnasium, Freising  
09/1987–05/1994: Kronberg Gymnasium, Aschaffenburg  
05/1994: Schulabschluss mit allgemeiner Hochschulreife  
9/1994–5/1996: Berufsschule, München

## **Berufsausbildung**

09/1994–05/1996: Ausbildung zur Brauerin und Mälzerin in der Klosterbrauerei Andechs, Malzfabrik Weyermann  
05/1996–03/2002: Studium Brauwesen und Getränketechnologie an der Technischen Universität München (Dipl.-Ing.),  
Verwaltungsstelle Weihenstephan  
5/2000–03/2001: Nebentätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft/Werkstudentin  
am Lehrstuhl für Fluidmechanik und Prozessautomation,  
Technische Universität München, Verwaltungsstelle  
Weihenstephan  
4/2001–2/2002: Nebentätigkeit als wissenschaftliche Hilfskraft/Werkstudentin  
am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I, Technische  
Universität München, Verwaltungsstelle Weihenstephan

seit 06/2002: Promotionsstudium am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I, Technische Universität München, Verwaltungsstelle Weihenstephan

### **Berufspraxis**

8/1998–10/1998 Löwenbräu AG, München

03/2002–04/2005: Wissenschaftliche Angestellte am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I der TU München, Verwaltungsstelle Weihenstephan

seit 05/2005: Laborleiterin des GC/HPLC-Labors am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I der TU München, Verwaltungsstelle Weihenstephan