Entwicklung innovativer Technologien zur Optimierung der Würze- und Bierqualität

Habilitationsschrift
vorgelegt von

Dr.-Ing. Martin Krottenthaler

Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I

Department
Ingenieurwissenschaften für Lebensmittel
und biogene Rohstoffe

Fakultät
Wissenschaftszentrum Weihenstephan
für Ernährung, Landnutzung und Umwelt

Freising, den 26.02.2007

Danksagung

Herrn Prof. Back gilt mein besonderer Dank, da er mir die Habilitation ermöglicht hat und stets mit fachlichem und persönlichem Rat meine wissenschaftlichen Arbeiten unterstützt hat. Sein strategisches Geschick und seine hilfsbereite Art waren Garanten dafür, dass die Projekte nie stockten, sondern immer erfolgreich zu Ende geführt werden konnten.

Es ist allgemein bekannt, dass große Leistungen nur dann erbracht werden können, wenn die Kräfte Mehrerer gebündelt werden. Ich hatte das Glück an der Universität und in den forschungsbegleitenden Gremien diejenigen Personen zu finden, welche sich für meine Projekte begeisterten. Mit gegenseitigem Vertrauen und gemeinsamer Arbeit konnten viele Projekte durchgeführt und letztendlich auch die Habilitationsschrift erstellt werden.

Bedanken möchte ich mich bei den Doktoranden unseres und anderer Lehrstühle, welche sich durch gemeinsame Veröffentlichungen in die Arbeit eingebracht haben. Diese sind Torsten Dickel, Gunther Fischer, Markus Fohr, Clemens Forster, Markus Herrmann, Dietmar Kaltner, Florian Kühbeck, Jörg Lehmann, Markus Lotz, Ralf Mezger, Martin Mitzscherling, Winfried Ruß, Bertram Sacher, Mark Schneeberger, Jan Schneider, Christina Schönberger, Martina Schütz, Elmar Spieleder, Martin Steinhaus, Kornel Vetterlein, Gerald Zanker und Joachim Zürcher. Eine Liste aller beteiligten Diplomanden findet sich im Anhang.

Dank sagen möchte ich den Lehrstuhlangehörigen und Laborkräften, welche immer Verständnis für die Betreuung von einer Vielzahl von Diplomanden hatten und, bei stets gutem Arbeitsklima, die Projekte unterstützt haben.

Für die finanzielle Unterstützung von Promotionen sei der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen "Otto von Guericke" e.V. (AiF), der Wissenschaftsförderung der Deutschen Brauwirtschaft e.V., der Wissenschaftlichen Station für Brauerei in München e.V. und der Weihenstephaner Jubiläums Stiftung 1905 sehr herzlich gedankt.

Ferner möchte ich mich bei den Vertretern aus Brauereien und der Zulieferindustrie bedanken, welche im Rahmen gemeinsamer Projekte mir die Möglichkeit Aying, des scale-up in den industriellen Maßstab gegeben haben. Vielen Dank an die Brauereien Augustiner, Aying, Beck & Co., Binding, Bitburg, Brauhaus zu Reudnitz, Distelhäuser, Einbeck, Flötzinger, Früh Kölsch, Gilde, Hasenbräu, Hofmühl, Maisel, Spaten-Löwenbräu, Tucher, Oettinger, Paulaner, Pilsner Urquell, Ustersbach, Pössneck, Pöllinger, Potts, Rothaus, Schlösser, Wernesgrün, Weihenstephaner Staatsbrauerei, sowie die Brauereigruppen Heineken, Inbev und South African Breweries. Mein Dank gilt den Firmen Alfa Laval, Barth, Grünbeck, Hopsteiner, Hosokawa Alpine, Huppmann, HVG, Jakob Carl, Kaspar Schulz, Krones, Meura, NateCo2, Pall, Steinecker, Sudhaustechnik Essen, Waldner, Ziemann.

Meiner Frau und meinen beiden Töchtern danke ich für das Verständnis und die Geduld.

Vorwort

Diese Habilitationsschrift setzt sich mit der Entwicklung moderner Technologien und neuer Anlagen auseinander, welche im Rahmen der Malz-, Würze- und Bierbereitung in den letzten zehn Jahren am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I erforscht und entwickelt wurden.

Die Arbeit stellt eine Zusammenfassung der relevanten Publikationen dar, die im Rahmen von über 10 Doktorarbeiten und über 50 Diplomarbeiten unter meiner Projektleitung entstanden sind (Liste siehe Anhang). Die Quellen sind jeweils am Ende eines jeden Kapitels ausgewiesen.

Insgesamt münden die durchgeführten Projekte in 11 Vorträgen und Postern bei internationalen Kongressen, über 30 Vorträgen bei nationalen Tagungen, 17 peer-review Veröffentlichungen und 53 weiteren Publikationen sowie in 12 Beteiligungen bei Büchern als Co-Autor.

Juni 2006

Dr. Martin Krottenthaler

1 ZUSAMMENFASSUNG / SUMMARY 6

2 EINLEITUNG UND ZIELSETZUNG 9

3 MALZ 16

3.1 EINFLUSS DER MÄLZUNGSBEDINGUNGEN AUF DIE MALZ- UND BIERQUALITÄT 16
3.1.1 Systematische technologische Versuche zur Keimung 16
3.1.2 Entwicklung einer Wirbelschichttrocknung zum Darren des Malzes 21

3.2 EINFLUSS DER GERSTENSORTE UND DES GERSTENTYPS 30
3.2.1 Einfluss der Gerstensorte auf den Biergeschmack 30
3.2.2 Praxistauglichkeit von Wintergerstenmalz 35

4 SCHROTEN 38

4.1 ERMITTLUNG DER BETRIEBSGRENZEN EINER WALZENSCHROTUNG MIT WEICHKONDITIONIERUNG 39

4.2 EINFLÜSSE DER SCHROTUNG AUF DIE LIPIDOXIDATION 44

4.3 ENTWICKLUNG NEUER SCHROTUNGSTECHNOLOGIEN 51
4.3.1 Untersuchung neuer Schrotungs- und Einmaischtechniken im industriellen Maßstab 51
4.3.2 Ein Schrotungskonzept zur Schonung der Blattkeime (Protektive Schrotung) 57
4.3.3 Ein Schrotungskonzept zur Verbesserung des β-Glucanabbaus (Fraktionierte Schrotung) 59

5 MAISCHEN 61

5.1 VARIATION DER MAISCHPARAMETER UND DEREN EINFLUSS AUF DEN GEHALT AN B-GLUCAN, EXTRAKT UND FREIEN AMINOSTICKSTOFF 62
5.1.1 Variaton des Maischprogramms 64
5.1.2 Variaton der Schrotfeinheit 67
5.1.3 Variaton der Gussführung 69
5.1.4 Variaton der Rastdauer 70
5.1.5 Variaton der Malzqualität 72

5.2 ONLINE-VERFOLGUNG DES MAISCHPROZESSES 74

5.3 VERWENDUNG VON GERSTE ALS MALZERSATZSTOFF 77

5.4 VERGLEICH VON INFUSION UND DEKOKTION 84

5.5 EINFLUSS DER MAISCHTEMPERATUR AUF DIE LIPIDOXIDATION 88

5.6 ENERGIEBEDARF BEIM MAISCHEN 90

5.7 BEEINFLUSSUNG DER GÄRUNGSNEBENPRODUKTE DURCH DAS ZUCKERSPEKTRUM (MALTASEVERFAHREN) 92

5.8 ANFORDERUNGEN AN DIE WÜRZEZUSAMMENSETZUNG BEI DER KONTINUIERLICHEN REIFUNG 96

6 LÄUTERN 101

6.1 MÖGLICHKEITEN DES EINSATZES VON MEMBRANEN FÜR DEN PROZESS DER LÄUTERUNG UND BIERFILTRATION 101
6.1.1 Entwicklung eines Membran-Läutersystems 101
6.1.2 Untersuchungen zur Deckschichtbildung bei der Membran-Bierfiltration 109

6.2 OPTIMIERUNG DES LÄUTERPROZESSES MITTELS FUZZY-LOGIC 118

7 WÜRZEKOCHEN UND WÜRZEBEHANDLUNG 122

7.1 VORGÄNGE BEI DER WÜRZEKOCHUNG 122

7.2 ENTWICKLUNG UND EVALUIERUNG MODERNER KOCHSYSTEME 137
7.2.1 Innenkocher 138
7.2.2 Hochtemperaturwürzekochung (HTW) 140
7.2.3 Vakuumverdampfung 141
7.2.4 Aussenkocher 146
7.2.5 Wort Stripping 149
7.2.6 Mikrowellenkochung 150
7.2.7 Getrennte Kochung von Teilfraktionen der Läuterwürze (Fraktionierte Kochung) 154

7.3 EINFLUSS DES KÜHLTRUB-GEHALTES AUF DIE BIERQUALITÄT 172

7.4 MÖGLICHKEITEN DES EINSATZES VON PROZESSBIER IM SUDHAUS178

7.5 MÖGLICHKEITEN ZUR VERWERTUNG VON BRÜDENKONDENSAT 185
7.5.1 Eigenschaften von Brüdenkondensat aus der Würzekochung. 185
7.5.2 Verwendung von aufbereitetem Brüdenkondensat als Hauptguss 188
7.5.3 Verwendung von unaufbereitetem Brüdenkondensat 192

8 HOPFEN 195

8.1 INHALTSSTOFFE DES HOPFENS UND RELEVANZ FÜR DIE TECHNOLOGIE 195

8.2 TECHNOLOGIE DER HOPFUNG 201
8.2.1 Einfluss der Hopfensorte auf den Biercharakter 204
8.2.2 Einfluss einer frühen Gabe von Aromahopfen auf den Geschmack des Bieres 208
8.2.3 Spezielle Aspekte zum Thema Hopfen 211

9 DISKUSSION UND SCHLUSSFOLGERUNG 215

1 Zusammenfassung

Auf dem Gebiet der Malz- und Bierbereitung gibt es eine Vielzahl von etablierten und bewährten Prozesstechnologien. Dennoch besteht nach wie vor ein großes Potenzial an Innovationen, welche die Qualität und die Wirtschaftlichkeit verbessern können. Einerseits besteht die Möglichkeit, klassische Prozesse hinsichtlich ihrer Parametrierung zu optimieren, anderseits können Verfahrenstechniken aus der Lebensmittelindustrie in die Malz- und Bierbereitung sowie in die Erzeugung von Hopfenprodukten übertragen werden. Der Malz- und Würzebereitung kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu, da diese die Qualität des Endproduktes Bier entscheidend beeinflussen.

Durch den Züchtungsfortschritt entstehen neue Gerstensorten mit veränderten Mälzungseigenschaften. Anhand systematischer Mälzungsversuche wurde gezeigt, wie sich die Keimparameter Weichgrad, Keimtemperatur und Keimzeit auf die Malz- und Bierqualität bis hin zur Geschmacksstabilität auswirken. Untersucht wurden Gerstensorten mit unterschiedlichem Lösungsprofil hinsichtlich Proteolyse, Cytolyse und Amylolyse. Gewünscht ist eine moderate Proteolyse, welche einerseits ausreichende Mengen Freien Aminostickstoffs (FAN) für die Gärung bereitstellt und andererseits noch genügend hochmolekularen Stickstoff für die Schaumstabilität erhält. Eine möglichst hohe Cytolyse verringert das Risiko von Filtrationsproblemen und erhöht die Extraktausbeute. Der Einfluss der Gerstensorte auf den Biergeschmack konnte mittels gaschromatographischer Analyse der Malzaromastoffe erkannt werden. Außerdem zeigte sich, dass zweizeilige Wintergersten sich als Braugerste eignen, wenn ihr Rohproteingehalt ca. 1 % unter dem der Sommergersten lagen. Spezielle Verfahrenstechniken, wie z. B. die Wirbelschichttrocknung, wurden erstmals untersucht und ein Darrverfahren entwickelt. Während sich im Vergleich zu klassischen Hordendarren Unterschiede beim Schwelken zeigten, war das Verhalten in der Abdarrphase gleich.

Im Anschluss an die enzymatische Modifikation während der Keimung wurde die mechanische Modifikation bei der Schrotung untersucht. So standen bei der Ermittlung der Betriebsgrenzen einer Zwei-Walzen-Nassschrotmühle verfahrenstechnische Gesichtspunkte im Vordergrund. Der Walzenabstand einer Zwei-Walzen-Nassschrotmühle weitet sich unter Volllast um ca. 0,1 – 0,2 mm. Des Weiteren wurde bei der Schrotung die Lipidoxidation verfolgt, da hier ein deutlicher Einfluss auf die Geschmacksstabilität des Bieres besteht. Die Einflüsse der Gerstensorte, Provenienz, Malzlagerung, Schrotlagerung, Schrotfeinheit, Schrotungstemperatur bzw. Weichwassertemperatur bei der Nassschrotung sowie des Blattkeimanteiles werden dargestellt. Ein Schrotungskonzept zur Schonung der Blattkeime wurde erarbeitet. Hohe Einmaischtemperaturen (> 60 °C), eventuell in Verbindung mit einer Maischesäuerung, verringern die Lipidoxidation. Um Mängel in den cytolytischen Eigenschaften der Malze auszugleichen und die Filtrierbarkeit des Bieres zu verbessern, wurde das System der „Fraktionierten Schrotung“ entwickelt, welches eine Verbesserung des β-Glucanabbaus beim Maischen ermöglicht. Hier wird nach Aufschluss schlecht gelöster Schrotpartikel durch Zumaischen der restlichen Schrotfraktion der enzymatische β-Glucanabbau gefördert.

Die Schrotung und die Maischarbeit müssen im Hinblick auf die Malzqualität und auf die unterschiedlichen Läutersysteme aufeinander abgestimmt werden. Darüber hinaus stellt die Maischarbeit den letzten Schritt der Lösung der Malzinhaltsstoffe dar und ist somit für eine optimale Ausbeute und Würzequalität verantwortlich. Um hier entsprechende Einblicke zu

bekommen, wurden systematische Maischversuche unter Variation der Maischparameter Zeit, Temperatur, Schrotfeinheit, Gussverhältnis sowie des Lösungsgrades des Malzes durchgeführt. Außerdem wurden Methoden einer online-Verfolgung des Maischprozesses untersucht, wobei sich gezeigt hat, dass unterhalb der Verkleisterungstemperatur der Leitwert der Würze mit dem FAN-Gehalt korreliert. Die proteolytische und cytolytische Lösung sollte in der Mälzerei erfolgen, da beim Maischprozess nur noch schwer korrigiert werden kann. Eine vergleichende Untersuchung der Maischverfahren Infusion und Dekoktion zeigte, dass die Bierqualität vergleichbar ist, wenn der Temperaturverlauf des Infusionsmaischverfahrens dem der Restmaische der Dekoktion ähnlich ist. Die Möglichkeiten einer Verwendung von unvermälzter Gerste als Malzersatzstoff wurden untersucht, wobei bis zu 20 % Gerste ohne exogene Enzyme mit verarbeitet werden können. Die Maischarbeit wird auch unter energetischen Gesichtspunkten bewertet. Da die Maischarbeit einen Einfluss auf das Zuckerspektrum hat, bestehen auch Auswirkungen auf den Hefestoffwechsel und somit auf das Aromaprofil des Bieres. Aus diesen Untersuchungen ist das „Maltase-Maischverfahren“ hervorgegangen, welches den Estergehalt des Bieres über das Verhältnis Glucose : Maltose gezielt beeinflussen kann. Außerdem wird gezeigt, welche Anforderungen an die Würzequalität zu stellen sind, wenn eine kontinuierliche Reifung durchgeführt wird.

Für eine hohe Extraktausbeute ist eine gute Läuterarbeit Voraussetzung. In diesem Zusammenhang wird die Optimierung des Läuterprozesses mittels Fuzzy-Logic vorgestellt, welche zu kürzeren Läuterzeiten geführt hat. Welche Möglichkeiten eine Läuterung über Membranen bietet, zeigen die Versuche mit Scherspaltfiltern und Vibrations-Membran-Filtrationsanlagen (VMF). Besonders die Deckschichtbildung auf den Membranen und deren Auswirkungen auf die Würzequalität werden erläutert. So werden schaumpositive Proteine sowie β-Glucan teilweise zurückgehalten. Das Verhalten von Membranen wurde nicht nur bei der Maischefiltration untersucht, sondern auch in zahlreichen Versuchen bei der Bierfiltration. Dabei wurden nasschemische Methoden, Infrarot-Spektroskopie, Photonen-Korrelations-spektroskopie, Zeta-Potenzial-Messungen und Aufnahmen mittels Rasterelektronenmikroskop durchgeführt. Das Zeta-Potenzial eignet sich zur online-Diagnose des Verblockungsgrades, noch bevor ein Druckanstieg beobachtet wird. Durch eine enzymatische Reinigung mit Cellulasen konnte die Deckschicht aufgelöst und die Permeabilität der Membrane wieder hergestellt werden.

Die Würzekochung stellt einen thermischen Prozess dar und hat vor allem Auswirkungen auf das Aroma- und Geschmacksprofil des Bieres. Die Möglichkeiten der Würzekochung und -behandlung werden vorgestellt und diskutiert. Neben der Evaluierung der klassischen Kochsysteme Innenkocher, Außenkocher und Hochtemperaturwürzekocher wurden mit Praxisbetrieben neue Kochsysteme entwickelt und im Industriemaßstab eingeführt. Vor allem die unterschiedlichen Möglichkeiten des Einsatzes von Vakuumverdampfungsanlagen haben zu innovativen Kochsystemen geführt, welche untersucht und bewertet werden. Zur Verringerung unerwünschter thermischer Reaktionen wurden Systeme der „Würzevorkühlung“ vor dem Whirlpool entwickelt und am Markt eingeführt. Ebenso wurde auch eine Mikrowellenkochung erstmals untersucht. Entwickelt wurde die Technologie der „Fraktionierten Kochung“, bei welcher die Vorderwürze getrennt von den Nachgüssen gekocht wird.

Durch die Wiederverwendung von Reste-, Rück- und Hefebieren haben Brauereien die Möglichkeit, den Bierschwand zu minimieren. Die Möglichkeiten der Wiederverwertung dieser Prozessbiere im Sudhaus werden beschrieben. Ebenso werden die Möglichkeiten zur Wiederverwendung von aufbereitetem und unaufbereitetem Brüdenkondensat erläutert. Die

Verwendung von unaufbereitetem Brüdenkondensat als Kühlwasser für Verdunstungskondensatoren sowie für den Ansatz alkalischer Reinigungslaugen hat sich bewährt.

Nach der Kochung und Heißtrubabtrennung kann eine Abtrennung des Kühltrubes erfolgen. Praxisversuche zur Kühltrubabtrennung mittels Zentrifuge, Kaltwürzefilter und Flotation werden vorgestellt und deren Auswirkungen auf die Gärung und Bierqualität beschrieben. Bei einer guten Heißtrubabtrennung und Hefevitalität kann auf eine Kühltrubabtrennung verzichtet werden.

Beim Rohstoff Hopfen gibt es einerseits einen direkten Aromatransfer von z. B. ätherischen Ölen des Hopfens in die Würze bzw. in das Bier, wodurch dessen Aroma geprägt wird. Andererseits werden Geschmacksstoffe des Hopfens in der Würze gelöst und teilweise bis in das Bier transferiert. Der Einfluss der Bittersorten Merkur und Magnum sowie der Aromasorten Saphir, Perle und Tettnanger auf die Bierqualität werden vorgestellt. Saphir zeigt analytisch und sensorisch einen hohen Aromatransfer, was sich an den hohen Gehalten an der Leitsubstanz Linalool sowie an einer „Hopfenblume“ im Bier erkennen lässt. Neben den Brauversuchen zum Einfluss der Hopfensorte wird erläutert, inwieweit durch die Hopfungstechnologie die sensorischen Eigenschaften des Bieres beeinflusst werden können. So führt eine Gabe von Aromahopfen zu Kochbeginn zu höheren Polyphenolgehalten und zu besseren Verkostungsergebnissen, im Vergleich zu Suden mit einer ausschließlichen Bitterhopfengabe. Durch die Anwendung von Downstream-Produkten des Hopfens kann die Bitterausbeute, die mikrobiologische Stabilität und die Schaumstabilität erhöht werden. Wie sich die unterschiedlichen Hopfenprodukte in ihrer sensorischen Bitterkraft im Vergleich zur iso-α-Säure dem Bier mitteilen, wurde bestimmt. Aus den Umrechnungsfaktoren kann der Brauer die benötigte Dosagemenge eines Downstream-Produktes berechnen, welche er zur Erzielung einer bestimmten sensorischen Bitterkraft benötigt. Die Lagerbedingungen für Doldenhopfen und die unterschiedlichen Hopfenprodukte, die eingehalten werden müssen, um eine hohe Bierqualität zu erzeugen, werden vorgestellt.

Summary

Although a great variety of well known and established process technologies in malting and brewing is available there is still a potential for innovations intending improvements in product quality and economics. While conventional processes may be optimized in terms of parametrization, process engineering knowledge known from food processing may, on the other hand, be integrated into malt, beer and hop product manufacturing. Due to their impact on the quality of the final beer, the process steps of malt and wort production hold a key role.

The progress in breeding leads to new barley varieties with modified malting properties. Within systematic malting trials the influence of a variation of germination parameters, such as water content, germination temperature and germination duration on the malt and beer quality including flavor stability was investigated. Further, barley varieties having different modification profiles in terms of proteolysis, cytolysis and amylolysis were observed. Here, a moderate proteolysis is preferable, which provides sufficient free amino nitrogen (FAN) for yeast nutrition as well as a sufficient high molecular nitrogen content for a proper foam stability. An extensive cytolysis lowers the risk of filtration problems and increases extract yield. The influence of the barley variety on the beer flavor was detected by GC analysis of malt flavor compounds. More over, two-row winter barley varieties seem to be suitable for brewing purposes if the raw protein content is by approximately by 1 % lower compared to summer varieties. For the first time, special processing techniques, such as fluidized bed drying, were investigated. Further, a new kilning method with different withering but comparable final kilning characteristics compared to classic floor kilning methods was developed.

Beside the enzymatic modification during germination, the mechanical modification of milling was observed. Engineering aspects were focused when determining the operation limits of a two-roller mill for wet milling. The roller gap of a two-roller mill for wet milling expands by approximately 0.1 to 0.2 mm when fully loaded. Further, the oxidation of lipids during milling was investigated because of its important impact on the flavor stability of the final beer. The influence of barley variety, origin, malt storage conditions, grist storage conditions, grist fineness, milling and steeping temperature during wet milling as well as of the acrospire fraction is presented. A milling conception for conserving the acrospires was developed. High mashing-in temperatures (>60°C), possibly combined with mash acidification, lower the oxidation of lipids. In order to cope with cytolytic shortcomings of the malt and to improve the filterability of the beer a system of “fractionated milling” was developed, which allows an improvement of β-glucan degradation during mashing. Here, after digestion of insufficiently modified grist particles the enzymatic β-glucan degradation is enhanced by addition mashing of the remaining grist fraction.

Milling and mashing have to be coordinated with regard to malt quality and different lauter methods. More over, mashing represents the final step of degradation and dissolving of malt components and therefore, is responsible for an optimum yield and wort quality. In order to gain further knowledge systematic mashing trials were undertaken under variation of time of mash stands, temperature, grist fineness, grist-liquor ratio and malt modification. Besides, online monitoring methods for the mashing process were evaluated leading to the conclusion that the conductivity correlates with FAN content as long as the saccharification temperature is not reached yet. Proteolytic and cytolytic modification should take place during malting since corrections are difficult to carry out later on during mashing. A comparison of infusion

and decoction mashing method allowed the conclusion that the final beer quality is comparable if the temperature sequence of infusion mashing is similar to that of the remaining mash in the decoction method. Further, the possibilities of using unmalted barley were evaluated with the result that up to 20 % of barley may be processed without the addition of exogenic enzymes. Besides, mashing was considered under energetic aspects. Since mashing influences the profile of low molecular sugars in wort, too, consequences for yeast metabolism and therefore for the flavor profile of the resulting beer should be expected. As a result of these investigations the “maltase mashing procedure” was created which allows to precisely adjust the ester content of the beer via the glucose:maltose ratio. Beyond this, the requirements of wort quality for a continuous maturation were acquired.

Since a high extract yield requires a proper lautering step the optimization of the lautering process by the means of fuzzy logic is introduced, which caused shorter lautering durations. The chances of lautering using membranes were evaluated by trials with shear gap filters and vibration membrane filtration systems (VMF). Particularly the formation of face layers on the membranes and their consequences for the wort quality are elucidated. Thus, proteins being advantageous for foam stability as well as β-glucan are retained. The performance of membranes was not only investigated in terms of mash filtration but also in numerous trials regarding beer filtration. Here, chemical and instrumental methods, such as infrared spectroscopy, photon correlation spectroscopy, zeta potential measurements and scanning electron microscopy, were applied. Zeta potential measurements were suitable for online monitoring of the degree of blockage, even before a pressure increase was detected. Due to enzymatic cleaning using cellulases the face layers could be degraded and the permeability of the membrane could be re-established.

Wort boiling as a thermal process step has major influence on the flavor and taste profile of the final beer. The options of wort boiling and wort treatment are presented and discussed. Beside the evaluation of conventional boiling systems, such as internal boiler, external boiler and high temperature wort boiling, new boiling systems were developed and introduced in industrial scale in cooperation with brewhouse suppliers. Particularly the various options of applying vacuum evaporation lead to innovative boiling solutions, which were investigated and evaluated. In order to reduce unwanted thermal reactions a technology of wort pre-cooling prior to whirlpool operation were developed and launched into the market. Additionally, a boiling technology based on microwave application was investigated for the first time. Another technology, referred as “fractionated boiling”, was developed in which the first wort is boiled separately from sparging run-offs.

Thanks to the re-use of residual beers, beers returned from customers and beers contained in yeast, breweries were given the opportunity to minimize beer loss. The opportunities to re-use these so-called process beers in the brewhouse are highlighted. More over, the opportunities of recycling treated and untreated vapor condensates are described. Their re-use as cooling water for evaporation condensers and as caustic cleaning agent proved to be suitable.

After boiling and hot trub/break remove a separation of cold break may follow. Industrial scale trials to investigate cold trub separation by centrifuges, cold wort filtration and flotation are presented and their consequences on fermentation and beer quality are described. In case of proper hot trub remove and high yeast vitality the cold break separation may be omitted.

When considering hops as a raw material a direct transfer of aroma compounds, that is essential oils of the hops, into wort and thus beer takes place, determining its smell. The influence of the bitter varieties Merkur und Magnum as well as that of the aroma varieties

Saphir, Perle and Tettnanger on the beer quality is presented. Saphir shows a high analytical and sensory degree of aroma transfer expressed in high contents of the key indicator linalool as well as a flowery smell of the beer. Beside the brewing trials dealing with the influence of the hop variety the opportunities of influencing the sensory characteristics of the resulting beer are described. Thus, an addition of a aroma hop variety right at the start of boiling leads to increased contents of polyphenols and improved sensory evaluations compared to brews with solely bitter hopping. By applying downstream products of hops the bitter substance yield, microbiological stability and foam stability may be increased. It is also described, how different hop products appear in terms of their ability of sensory bittering compared to iso-α acid. From the conversion factors created the brewer may gain the dosage of a particular downstream product, which is required to attain a favored sensory bitter impression. Finally, the storage conditions that were found to be suitable for different hop products to maintain a high beer quality are presented.

2 Einleitung und Zielsetzung

In der vorliegenden Arbeit werden neue Wege beschrieben, welche zu einer optimalen Bierqualität führen. Der Würzebereitung fällt dabei eine Schlüsselrolle zu. Durch die analytische Erfassung der Würzequalität kann die zu erwartende Bierqualität bereits in einigen Punkten vorhergesagt werden. Die Würzezusammensetzung hat meist nur mittelbar Einfluss auf die Bierqualität, da der Prozess der Gärung nachgeschaltet ist. Ziel ist es, ein optimales Nährsubstrat für die Hefe bereitzustellen, um so eine optimale Bierqualität zu erzeugen.

Die einzelnen Schritte der Malz- und Bierbereitung sind in Abbildung 1 dargestellt. Jeder Produktionsschritt führt zu einem Zwischenprodukt, welches durch Prozessparameter in seinen Eigenschaften beeinflusst wird. Je nach Beschaffenheit des Zwischenproduktes wird dieses im nächst folgenden Schritt durch dessen Prozessparameter in die eine oder andere Richtung gelenkt. Da sich alle Schritte mittelbar oder unmittelbar auf die Bierqualität auswirken, ist die Komplexität der Malz- und Bierbereitung sehr hoch. Im Sinne einer hohen Bierqualität ist es wichtig, die Zusammenhänge zu erkennen, um möglichst früh die Bierqualität positiv beeinflussen zu können.

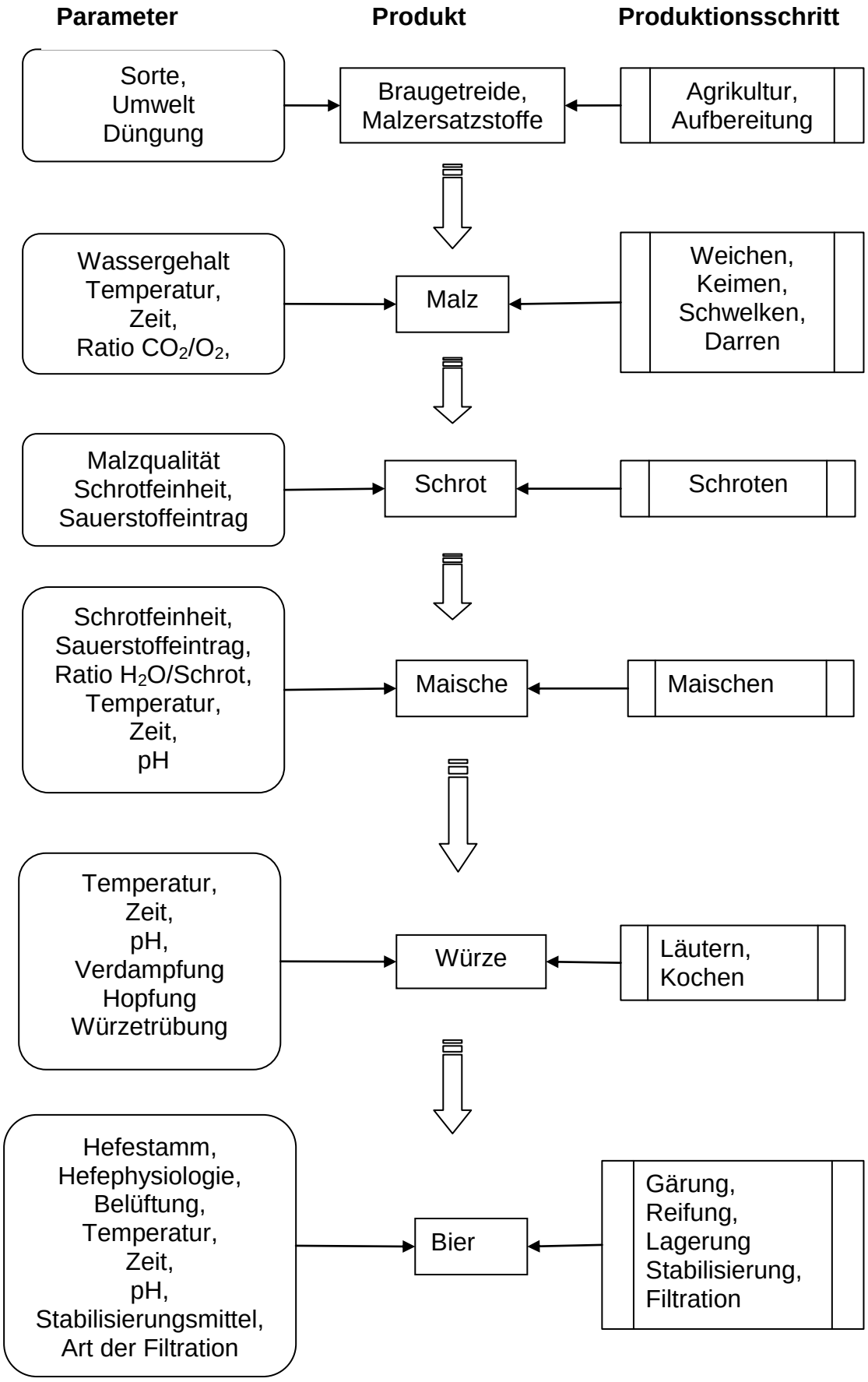


Abbildung 1: Bierbereitung im Überblick

Da mit Rohstoffen landwirtschaftlichen Ursprungs (Gerste, Hopfen) gearbeitet wird, sind jahrgangsbedingte Qualitätsschwankungen unvermeidbar. Die Zusammensetzung des Wassers ist meist konstant und kann mittels Aufbereitungsverfahren in der Brauerei eingestellt werden. Eine im Bayrischen Reinheitsgebot [337] noch nicht genannte Zutat bei der Bierbereitung ist die Hefe. Deren physiologischer Zustand ist entscheidend für die Bierqualität. Über die Würzezusammensetzung und das Hefemanagement kann deren Zustand beeinflusst werden. Im Sinne einer konstant hohen Bierqualität müssen alle Rohstoffe und deren Verarbeitungsprozesse aufeinander abgestimmt werden. Dies ist Aufgabe der Technologie.

Von Seiten der Industrie besteht der Anspruch, eine definierte Bierqualität unter möglichst wirtschaftlichen Bedingungen zu erzeugen. Da es sich bei der Bierbereitung um ein komplexes System mehrerer Verfahrensschritte handelt, gilt es jeden Einzelschritt zu optimieren und gleichzeitig die Bierqualität nicht aus den Augen zu verlieren. Im Folgenden werden allgemein anerkannte Qualitätskriterien der Bierqualität genannt:

Qualitätskriterien für Bier:

- Geschmacksprofil (aroma design)
- Geschmacksstabilität (Mindesthaltbarkeit von Lebensmitteln)
- Schaumstabilität (Verbrauchererwartung)
- Chemisch-physikalische bzw. kolloidale Stabilität (Verbrauchererwartung)
- Mikrobiologische Stabilität (Anfälligkeit gegenüber Getränkeschädlingen)

Kriterien der Wirtschaftlichkeit:

- Ausbeute an Substrat
- Energieverbrauch
- Produktionszeit bzw. Kapazität
- Verarbeitbarkeit in den einzelnen Produktionsschritten
- Anlageninvestition sowie laufende Anlagen- und Personalkosten

Die Bierbereitung lässt sich nach ihren Zwischenprodukten Braugetreide, Malz, Schrot, Maische, Würze und Bier in verschiedene Bereiche einteilen (Abbildung 1). Als Braugetreide wird im Rahmen des Reinheitsgebotes für untergärige Biere ausschließlich Gerste verwendet. Weizen, Hafer, Dinkel, Roggen usw. können bei obergärigen Bieren eingesetzt werden [337]. Außerhalb des Reinheitsgebotes kommen stärkehaltige Surrogate wie Reis, Mais, Hirse, Zucker usw. zum Einsatz. Den größten Einfluss auf die Qualität des Braugetreides haben hierbei die Umweltbedingungen bzw. die Provenienz und die Sorte sowie die Lagerbedingungen bis zur Vermälzung. Die Qualität der Malzersatzstoffe wird zusätzlich durch die Aufbereitung (z.B. Reisschälung, Maisentfettung, saure oder enzymatische Hydrolyse bei Zuckersirup) beeinflusst. Bei der Malzbereitung wird aus Getreide mittels den Keimparametern Weichgrad, Temperatur, Zeit und Ratio CO_2:O_2 eine künstliche Keimung induziert, welche vor allem zur Bildung von hydrolytischen, Enzymen führt. Diese wirken im Korn und auch später im Maischprozess in der Brauerei. Aus Gründen der Lagerstabilität wird das Grünmalz auf einen Wassergehalt von ca. 5°% gedarrt, wobei dies den ersten thermischen Behandlungsschritt bei der Malz- und Bierbereitung darstellt. Bei der Schrotung erfolgt der mechanische Aufschluss des Malzkornes. Die Schrotsortierung ist abhängig vom

Mahlsystem und kann selbst bei gleicher Mühleneinstellung je nach Malzlösung variieren. Die Schrotfeinheit hat einen Einfluss auf die jeweiligen enzymatischen Vorgänge beim Maischen. Die Maischebereitung dient der Lösung von Malzinhaltsstoffen in Wasser. Im Maischprozess wird das Schrot mit Wasser (Hauptguss) versetzt, und es erfolgt eine physikalische Lösung gefolgt von einer enzymatischen Modifikation der Malzinhaltsstoffe bei unterschiedlichen Temperaturen (Maischprogramm). Die wasserlöslichen Bestandteile des Malzes werden dabei in der Maische gelöst und im Läuterprozess von den unlöslichen Bestandteilen (Treber) getrennt. Während des Kochprozesses wird Hopfen zugesetzt, wobei die Humulone (α-Säuren des Hopfens) zu den wasserlöslichen iso-Humulonen isomerisieren und sich Hopfenöle lösen. Bei der Kochung ist die Ausdampfung von Aromastoffen (Ausdampfeffizienz), welche vorwiegend aus der Maillard-Reaktion und dem Lipidstoffwechsel stammen, von Bedeutung. Sie haben auf das Geschmacks- und Aromaprofil des frischen und gealterten Bieres einen Einfluss. Bei der Heißtrubabscheidung werden das Präzipitat der Kochung (Heißtrub) sowie die Hopfenfeststoffe (Hopfentreber) aus der heißen Würze entfernt. Nach der Kühlung der Würze auf Anstelltemperatur kann eine Ausscheidung des Kühltrubes durchgeführt werden, bevor die Kaltwürze belüftet und mit Hefe versetzt wird. Anschließend folgt die Gärung mit unter- oder obergäriger Hefe. Nach dem Extraktabbau schließt sich die Reifung an, welche vor allem dem Diacetylabbau dient. Die Lagerung und die Stabilisierung wirken sich vorwiegend auf die kolloidale Stabilität und die geschmackliche Abrundung des Bieres aus.

Ausgehend von neuen technischen und technologischen Verfahren soll der Mälzungs- und Bierbereitungsprozess näher beschrieben werden, um die komplexen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Produktionsschritten besser erkennen zu können.

In den folgenden Kapiteln werden Versuche vorgestellt, welche eine Optimierung der einzelnen Produktionsschritte zum Ziel hatten. Auf die klassische Literatur wird in den einzelnen Kapiteln verwiesen. Literaturangaben zu eigenen Arbeiten sind am Ende jeden Kapitels zusammengefasst.

3 Malz

3.1 Einfluss der Mälzungsbedingungen auf die Malz- und Bierqualität

Eine der Hauptaufgaben des Mälzens ist die Förderung und Bildung von Enzymen, welche die Lösung und den Abbau des Mehlkörpers beim Maischen bewirken [321]. Dem Embryo mit seiner Wurzel- und Blattkeimanlage kommt bei der Regulation der Enzymproduktion und der Lösungsvorgänge während der Keimung eine Schlüsselrolle zu [111, 112]. Zum Erreichen der gewünschten Umsetzungen im Mälzungsprozess darf das Wachstum des Keimlings aber nur in einem begrenzten Umfang stattfinden. Eine Überlösung von Malz führt zu höheren Mälzungsverlusten und ist mit einem zu weitgehenden Abbau hochmolekularer Malzinhaltsstoffe verbunden. Daraus resultieren Nachteile für wesentliche Qualitätsmerkmale wie Farbe, Schaumhaltbarkeit, Geschmack und Geschmacksstabilität des Bieres. Eine Unterlösung des Malzes ist wiederum mit Nachteilen verbunden, die auf einen unzureichenden Abbau der Malzinhaltsstoffe beim Mälzen und Maischen zurückgeführt werden können. Unterlöste Malze liefern Würzen, die in der Regel bereits bei der Läuterarbeit zu Verarbeitungsschwierigkeiten führen, eine unzureichende Ausstattung an Nährstoffen für die Hefe aufweisen und zu einer langsameren Gärung und Reifung des Bieres führen. Die Biere zeichnen sich durch eine schlechte Filtrierbarkeit aus und lassen qualitative Nachteile, insbesondere bei der chemisch-physikalischen Stabilität, erkennen [140].

3.1.1 Systematische technologische Versuche zur Keimung

Gerstensorten zeigen oft ein unharmonisches Bild bezüglich der cytolytischen und proteolytischen Enzymaktivität. Klassische Keimungsverfahren führen nicht selten zu unbefriedigenden Malzqualitäten. Die Frage ist, ob durch Variation der Keimungstechnologie eine schwache cytolytische Lösung und eine starke proteolytische Lösung ausgeglichen werden können. Ziel ist es, ein Malz zu erzeugen, welches eine gute Filtrierbarkeit (hohe Cytolyse) und eine gute Geschmacksstabilität (moderate Proteolyse) des Bieres erbringt.

Es wurden Kleinmälzungen der Gerstensorten Steffi, Thuringia, Barke und Extrakt durchgeführt, welche sich hinsichtlich der cytolytischen und proteolytischen Enzymkraft unterscheiden. Die Gerstensorten wurden bei verschiedenen Keimtemperaturen (12-15-18 °C), verschiedenen Weichgraden (41-45-49 % H_2O) und verschiedenen Keimzeiten (4-6-8 Tage) vermälzt.

In Abbildung 2 ist eine Varianzkomponentenschätzung von Malzanalysendaten dargestellt. Es zeigt sich, dass außer der Diastatischen Kraft und dem Rohproteingehalt alle Malzanalysenwerte durch das Keimungsverfahren signifikant beeinflusst werden können.

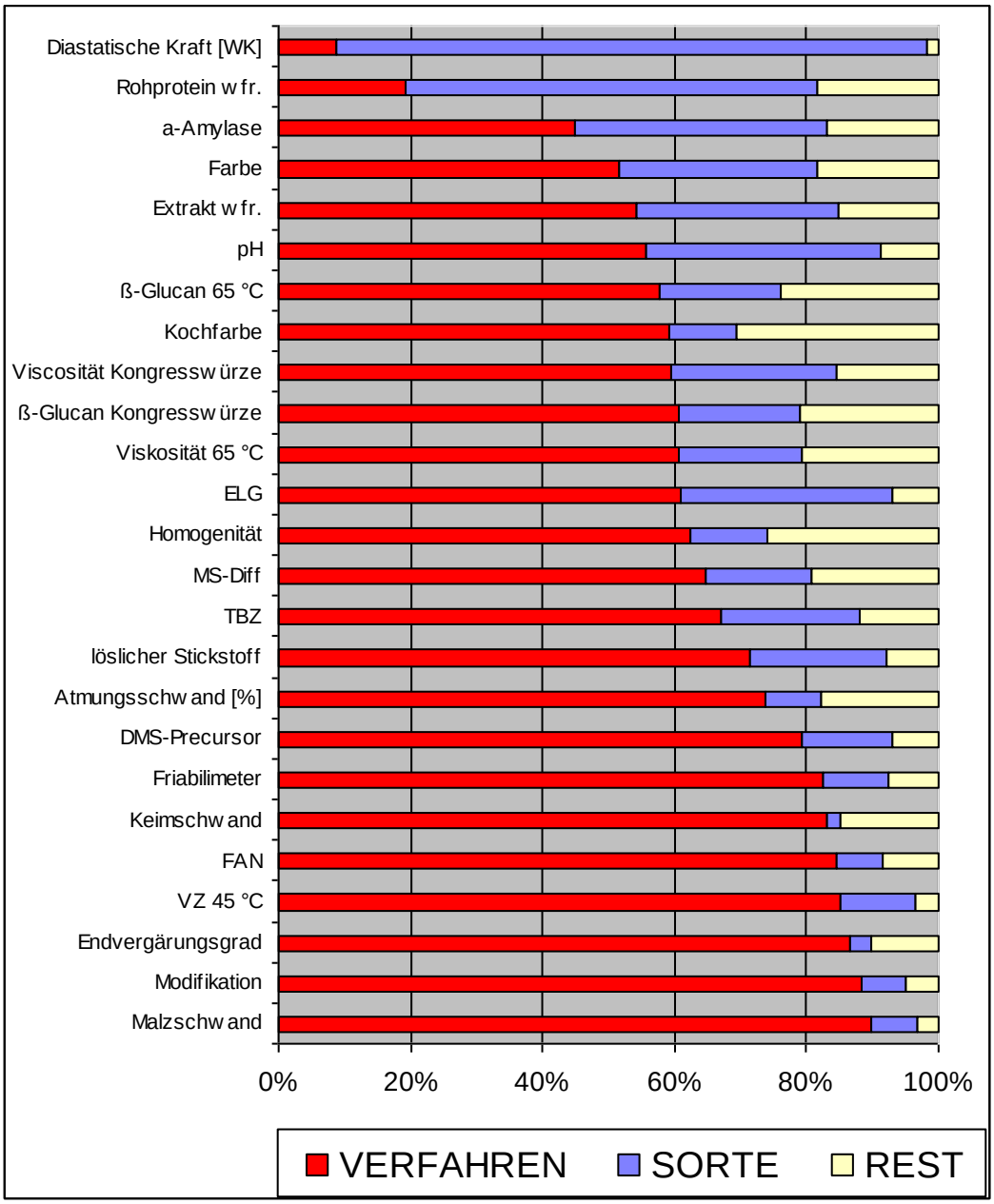


Abbildung 2: Varianzkomponentenschätzung von Malzanalysendaten

Durch eine verlängerte Keimzeit wird besonders die Cytolyse gefördert, so dass der Friabilimeterwert steigt und der β-Glucangehalt sowie die Viskosität in der VZ - 65°C Maische sinken. Dies führt außerdem zu einer höheren Proteolyse und zu einem höheren Malzschwand. Die Keimzeit ist meist anlagenbedingt vorgegeben oder wird aus Kapazitätsgründen möglichst gering gehalten.

Ein erhöhter Weichgrad führt primär zu einer verstärkten Proteolyse. Dies ist der Geschmacksstabilität abträglich, wie Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen. Zudem steigt durch eine erhöhte Mälzungsintensität der Malzschwand.

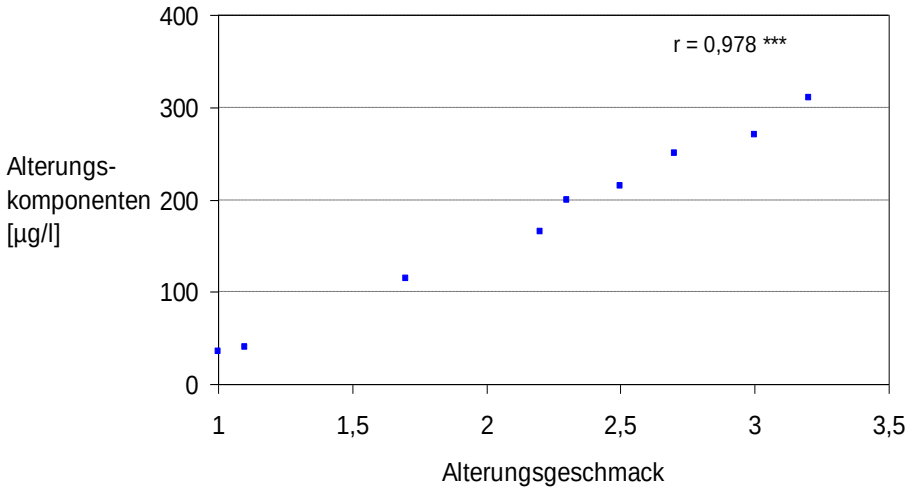


Abbildung 3: Alterungskomponenten und Alterungsgeschmack von Bier

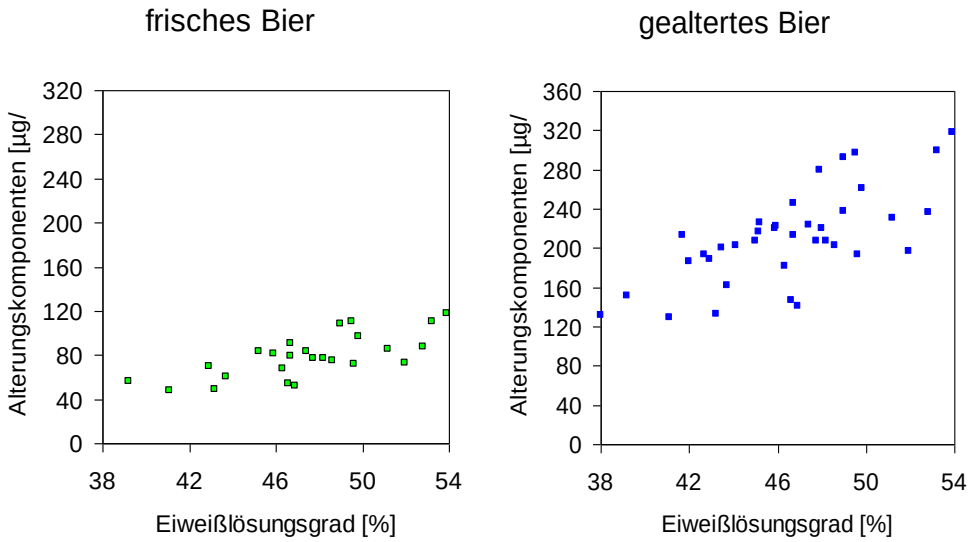


Abbildung 4: Eiweißlösungsgrad des Malzes und Alterungskomponenten im Bier

Tabelle 1 stellt eine Übersicht über alle Mälzungvariationen hinsichtlich der Proteolyse dar. Angestrebt war eine moderate Proteolyse im Sinne einer guten Geschmacksstabilität und ausreichenden Versorgung der Hefe mit assimilierbarem Stickstoff. Gleichzeitig sollten weder die Schaumstabilität noch die kolloidale Stabilität des Bieres leiden.

Eine Erhöhung des Weichgrades führte zu höheren Werten des Eiweißlösungsgrades, des Freien Aminostickstoffes (FAN), des löslichen Stickstoffes und der Kochfarbe. Die Keimzeit verhielt sich ähnlich, jedoch nicht so ausgeprägt. Eine erhöhte Keimtemperatur führte zu verminderten Werten an Stickstoff und Kochfarbe.

Tabelle 1: Proteolytische Lösung in Abhängigkeit von Keimzeit, Weichgrad und Keimtemperatur.

Keim-tage [d]	Keim-temp. [°C]	Weich-grad [%]	ELG [%]	FAN mg/100g MTrs.]	Lösl. N [mg/100 g MTrs.]	FAN [% des lösl. N]	Koch-farbe [EBC]
Standardverfahren :							
6	15	45	45,2	171	809	21	5,7
Versuche :							
6	15	41	38,4	134	693	19	4,8
6	15	49	52,3	211	911	23	7,3
6	12	45	45,8	180	818	22	6,1
6	18	45	39,0	142	722	20	4,9
4	15	45	42,0	150	733	20	4,8
8	15	45	46,3	170	818	21	6,4

Unabhängig von der Proteolyse sollen aber die Cytolyse (Filtrierbarkeit) möglichst hoch und die Amylolyse (Schwand) möglichst gering sein. Es gibt Gerstensorten oder Jahrgänge, in denen die Malzqualität nicht den Spezifikationen der Brauereien entspricht. Weichgrad, Keimzeit und das Verhältnis von CO_2 zu O_2 können das Problem meist nicht lösen, da sie mehr oder weniger parallel Proteolyse und Cytolyse fördern oder hemmen. Eine isotherme Haufenführung bei der erhöhten Temperatur von 18 °C führte zu einer guten cytolytischen Lösung und somit zu einer guten Filtrierbarkeit. Über das verstärkte Wachstum des Wurzelkeimes wurde niedermolekularer Stickstoff aus dem Korn entfernt. Hieraus resultierte ein moderater Eiweißlösungsgrad des Malzes, was zu einer besseren Geschmacksstabilität des Bieres führte. Die Keimzeit von 6 Tagen und der Weichgrad von 45 % waren bei der Vergleichsmälzung und der Versuchsmälzung gleich. Lediglich die Keimtemperatur war beim Vergleich 15 °C und beim Versuch 18 °C.

Die Alterungsindikatoren Benzaldehyd, 2-methyl-Butanal und 3-methyl-Butanal, bestimmt in Anstellwürze sowie in frischem und forciert gealtertem Bier, sind bei den erhöhten Keimtemperaturen reduziert, wie Abbildung 5 zeigt. Es werden die relativen Abnahmen der Aromastoffe im Vergleich zu den Standardsuden dargestellt.

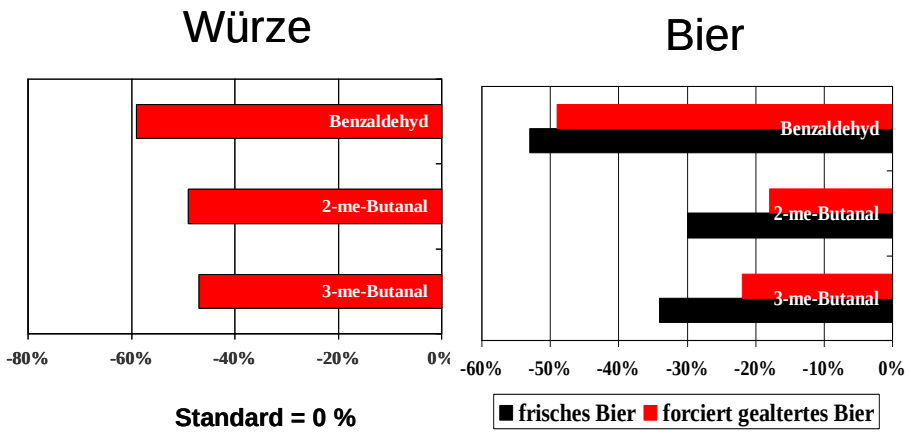


Abbildung 5: Relative Abnahme von Carbonylen in Würze und Bier durch erhöhte Keimtemperaturen; Standard: 6 d, 45 %, 15 °C; Versuch 6 d, 45 %, 18 °C.

Es ist nachvollziehbar, dass durch den geringeren Gehalt z.B. an Isoleucin weniger 2-methyl-Butanal über den Streckerabbau im Zuge der Maillard-Reaktion während des Darrens und der Würzeheißhaltung gebildet wird. Da die Würzearomastoffe mit dem Aromastoffspektrum der gealterten Biere korrelierten, kann daraus geschlossen werden, dass bereits bei der Mälzung hinsichtlich der Geschmacksstabilität eine Optimierung möglich ist.

Bei der Verkostung zeigte sich, dass die Biere aus dem Malz mit höherer Keimtemperatur etwas estriger waren und eine weichere Bittere als das Vergleichsbier zeigten. Die Vergleichssude hatten eine normale Bittere und waren malziger. Durch die stärkere Ausstattung mit niedermolekularem Stickstoff erfolgte eine stärkere Aromabildung über den Streckerabbau beim Standardbier.

Nachdem der Einfluss der Keimtechnologie untersucht war, sollte in einem weiteren Schritt die Darrtechnologie näher betrachtet werden.

Beim Darren werden die biochemischen Umsetzungen des Keimlings zu einem Abschluss gebracht und die Zusammensetzung des Malzes festgelegt. Außerdem wird der rohfruchtartige Geruch und Geschmack des Grünmalzes entfernt und dem Malz ein charakteristisches Aroma verliehen, abhängig vom Malztyp der hergestellt wird. Neben physikalischen Veränderungen wie Volumenverlust und Farbzunahme finden chemische Veränderungen statt, die auf ein weiteres Wachstum des Keimlings und enzymatische Reaktionen zurückzuführen sind. Dunkle Malze werden bei Temperaturen von 90 bis 108 °C abgedarrt, wobei hier die Farb- und Aromabildung im Vordergrund steht [239].

Die Aromastoffe des Malzes können entsprechend ihres Bildungsweges und ihrer Veränderung beim Darren in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden: Die Aromastoffe aus dem Lipidstoffwechsel, welche vorwiegend auf enzymatischem Wege bei der Keimung entstehen, sowie die Aromastoffe, die aus nicht-enzymatischen Reaktionen (insb. Maillardreaktion) hervorgehen.

Die Lipidabbauprodukte erfahren beim Schwelken eine starke Abnahme, die mit der Reduzierung des Wassergehaltes einhergeht. Gleichzeitig sind sowohl eine rasche Lipolyse als auch eine beschleunigte Lipidoxidation durch LOX festzustellen. In der Abdarrphase findet auf thermisch-oxidativem Weg eine beträchtliche Nachbildung der Fettabbauprodukte aus den entsprechenden Vorläufern statt [83]. Die LOX-Aktivität wird je nach Abdarrtemperatur deutlich reduziert [131, 273].

Bei der Maillardreaktion reagieren Zucker mit Eiweißabbauprodukten wie Aminosäuren, Di- und Tripeptiden. Dabei entstehen eine Vielzahl von Aromastoffen und färbende Substanzen wie Melanoidine, Streckeraldehyde, Furane und N-Heterocycle [218, 219]. Die Bildung dieser Substanzen ist vom Ausmaß der thermischen Belastung, gegeben durch Abdarrtemperatur und -zeit, abhängig [225].

Nach dem Darren des Malzes ist eine Abtrennung der Wurzelkeime notwendig, da diese hygroskopisch sind, zufärbend wirken und bitter schmeckende Substanzen enthalten, die den Biergeschmack nachteilig beeinflussen können. Wurzelkeime lassen sich in den entsprechenden Entkeimungsvorrichtungen leicht und restlos entfernt werden. Trotz der hohen Abdarrtemperaturen und der Entkeimung ist nur ein teilweiser Verlust der Lebensfähigkeit des Malzkornes festzustellen. Die Wiederkeimfähigkeit von hellem Gerstenmalz liegt häufig noch zwischen 50 und 90 % [308, 315].

Es wurde nach einer völlig neuen Anlagentechnik und -technologie gesucht, welche die Darrarbeit verbessern könnte. Ziel war es, nicht auf einer Ein- oder Zweihordendarre, sondern auf einer Wirbelschichtdarre die Trocknung durchzuführen. Bisher gibt es keine Mälzerei, die eine solche Technik kommerziell einsetzt. Die technischen Voraussetzungen und die technologische Verfahrensweise mussten erst entwickelt werden.

Quellen

Eigene Vorträge und Arbeiten mit Dr. Bertram Sacher [155].

3.1.2 Entwicklung einer Wirbelschichttrocknung zum Darren des Malzes

Unter Mälzen versteht man die Keimung von Braugerste unter künstlichen Bedingungen zur Gewinnung der erforderlichen Enzyme und zur Lösung des Mehlkörpers. Das Zwischenprodukt nach der Keimung wird Grünmalz genannt. Die Homogenität einer Malzcharge ist für den Brauer von entscheidender Bedeutung. Die neue Technologie der Wirbelschichttrocknung verspricht, genau diesen Aspekt entscheidend zu verbessern. Voraussetzung für einen industriellen Einsatz sind allerdings ein wirtschaftlicher Energieeinsatz und beherrschbare technologische Bedingungen.

Das Grünmalz mit einem Wassergehalt von annähernd 50 % ist leicht verderblich und muss deshalb durch Wasserentzug (Schwelken und Darren) in einen lagerfähigen Zustand überführt werden. Daneben entstehen durch das Darren das malzspezifische Aroma und die Farbe. Das Trocknen des Grünmalzes ist energieintensiv und zeitaufwändig. Der Vorgang der Trocknung geschieht meist auf sog. Malzdarren im Chargenbetrieb. Das Grünmalz wird ca. 1 m hoch auf geschlitzte Hordenbleche aufgeschüttet und mit Hilfe von Warmluft getrocknet. Der Wassergehalt des Malzes wird von 45-50 % bis auf 3,5-4,0 % bei hellen Darrmalzen verringert. Beim Darren werden zwei Vorgänge unterschieden:

- Das Schwelken, d.h. die schnelle Trocknung des Grünmalzes bei Temperaturen < 60 °C auf einen Wassergehalt von ca. 10 % bei hellen Malzen bzw. die definierte Trocknung bei bestimmten Wassergehalten und Temperaturen bei dunklen Malzen.
- Das Trocknen auf den Endwassergehalt, bei dem Temperaturen von ca. 85 °C bei hellen Malzen und ca. 105 °C bei dunklen Malzen zur Anwendung kommen. Durch höhere Temperaturen wird im Rahmen der Maillard-Reaktion z.B. das Aromaprofil maßgeblich geprägt.

Der Trocknungsvorgang beim Schwelken und Darren von hellen Malzen kann in drei Teilabschnitte eingeteilt werden.

- Trocknung bei Oberflächenverdunstung:
  Der erste Trocknungsabschnitt ist dadurch gekennzeichnet, dass sich das Gut wie eine freie Flüssigkeitsoberfläche verhält. Grünmalz mit einer Feuchte von annähernd 50 % gibt Wasser leicht und schnell ab, da es auf seiner Oberfläche den gleichen Dampfdruck wie eine offene Wasseroberfläche besitzt. Somit spielen die Gutseigenschaften in diesem Abschnitt keine Rolle. Limitierender Faktor der Trocknungsgeschwindigkeit ist ausschließlich die benötigte Luftmenge. Erst unterhalb einer gewissen Grenzfeuchte vollzieht sich die Abnahme der Kornfeuchte langsamer. Die Oberfläche ist bereits ausgetrocknet. Der zweite Trocknungsabschnitt beginnt.

- Trocknung aus dem Gutsinneren:
  Nach der Austrocknung der Oberfläche muss die Verdunstung des Wassers aus dem Inneren des Korns durch Kapillarkräfte fortgesetzt werden. Mit fortschreitender Trocknung ist das Wasser gezwungen, durch das Gut an die Oberfläche des Korns zu diffundieren. Die inneren Eigenschaften des Trocknungsgutes wie Wärmeleitfähigkeit, Diffusionswiderstand und kapillare Leitfähigkeit bestimmen in zunehmendem Maße die Trocknungsgeschwindigkeit.

- Annäherung der Gutsfeuchte an die Gleichgewichtsfeuchte:
  Bei einem Wassergehalt des Grünmalzes zwischen 4 und 6 % hat das Gut den hygroskopischen Bereich erreicht. Infolge der Hygroskopizität tritt eine immer stärkere Absenkung des Dampfdruckes an der Verdunstungsoberfläche gegenüber dem Sattdampfdruck auf. Der Trocknungsvorgang wird beim Erreichen des gewünschten Endwassergehaltes abgebrochen.

Die Wirbelschichttechnologie

Seit ca. 70 Jahren ist die Wirbelschichttechnologie bekannt. Heutzutage hat sie sich in den verschiedensten Gebieten wie Pharmazie, Chemie, Biotechnologie, Keramik- und Lebensmittelindustrie etabliert und gewinnt immer mehr an Bedeutung. Die Wirbelschichttechnologie wird dort zum Trocknen und Granulieren eingesetzt.

Wirbelschichtanlagen verwandeln Haufwerke aus körnigen Teilchen in ein „Fluidat“. Dies wird erreicht, indem Luft mit solcher Geschwindigkeit durch das Gut hindurchgeblasen wird, dass die Teilchen zwar voneinander getrennt werden und eine eigene Bewegbarkeit erhalten, aber nicht davonfliegen (Abbildung 6). Das Gut-Luft-Gemisch gleicht in seinen Eigenschaften einer Flüssigkeit beim Blasensieden, in der sich die Teilchen ständig bewegen und mischen.

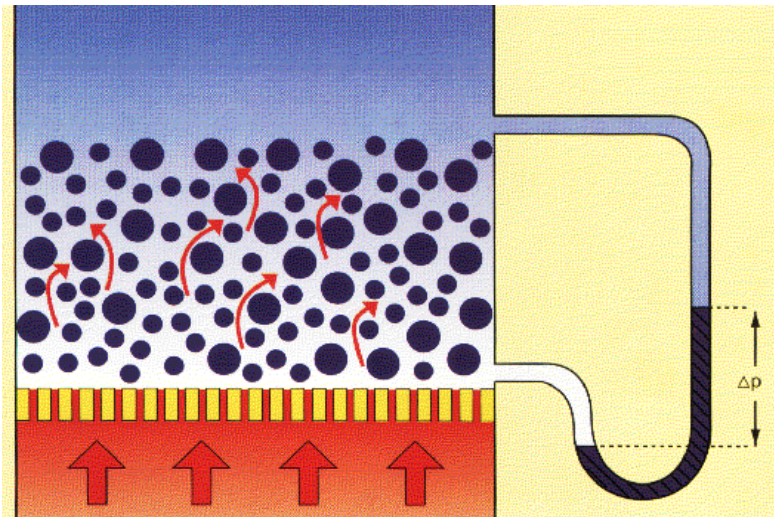


Abbildung 6: Prinzip der Wirbelschicht

Wird die Luftgeschwindigkeit, mit der eine homogene Schicht gleicher Teilchen auf einem durchlässigen Boden angeströmt wird, allmählich erhöht, so lassen sich drei Zustände unterscheiden.

- Beginnend beim ruhenden Schüttgutbett (Festbett) wird bei geringem Luftdurchsatz der Luftwiderstand der Schicht ansteigen, ohne dass die Schichthöhe zunimmt. Dieser Zustand wird beim klassischen Darrverfahren nicht überschritten.
- Im Wirbelbett überschreitet die Geschwindigkeit einen Grenzwert (Lockerungspunkt) und das Festbett geht in die homogene Wirbelschicht über. Dieser Grenzwert der Geschwindigkeit wird als minimale Fluidisationsgeschwindigkeit bezeichnet. Hier ist der Zustand erreicht, bei dem die Luftgeschwindigkeit den gleichen Betrag aufweist wie die Sinkgeschwindigkeit, d.h. die Partikel schweben.
- Wird die Luftgeschwindigkeit darüber hinaus erhöht, trägt der Luftstrom die Partikel fort. Die pneumatische Förderung setzt ein.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen wurde ein Wirbelschicht-Chargentrockner verwendet. Die Anlage bestand aus dem Wirbelschichttrockner mit vorgeschaltetem Ventilator wie Abbildung 7 zeigt. Die Lufterwärmung erfolgte durch ein Heizregister zwischen Ventilator und Trockner. Nach dem Trockner wurde die Trocknungsluft mittels Zyklon entstaubt.

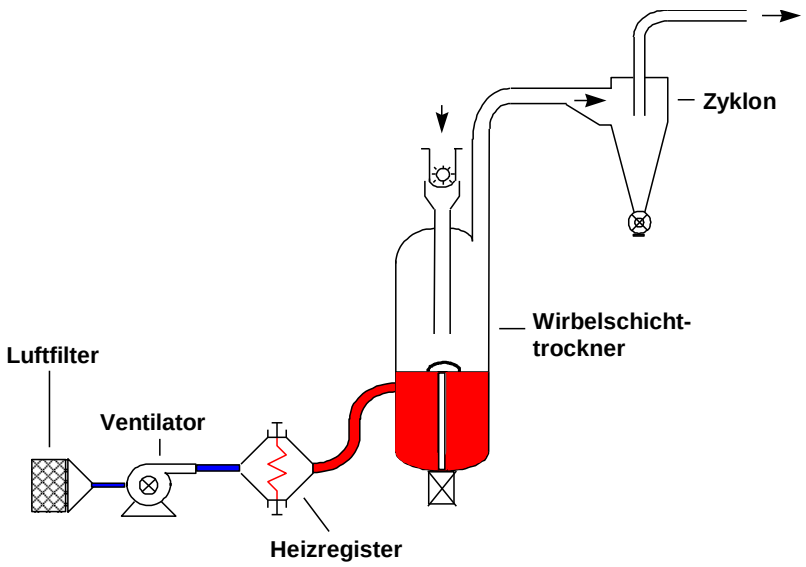


Abbildung 7: Schema eines Wirbelschichttrockners

Theoretisch sprechen viele Eigenschaften des Grünmalzes gegen eine zufrieden stellende Fluidisierung der Schicht in einem wirtschaftlich sinnvollen Bereich. Die relativ hohe Dichte des Korns, dessen nicht-kugelige Form, die klebrige Oberfläche der feuchten Spelzen und vor allem die Wurzelkeime, die zu Verzahnungen der Körner untereinander führen, sind hierbei zu nennen.

Beobachtungen bei der Wirbelschichttrocknung von Grünmalz

Wird Grünmalz in einem Wirbelschichttrockner mit Luft beaufschlagt, so entsteht bei höheren Schichten (ab 35 - 40 cm) innerhalb von etwa fünf Minuten eine kanaldurchbrochene Schüttschicht. Durch diese Kanäle kann der größte Teil der Luft ungenutzt entweichen. Die restliche Schüttschicht wird nicht fluidisiert.

Zur Vermeidung der Kanalbildung wurde das Anfahren der Wirbelschicht mit einer pulsierenden Luftströmung untersucht. Durch das schlagartige Öffnen eines Scheibenventils

in der Zuluftleitung kam es in der Wirbelschicht zu einem kurzzeitigen Anstieg von Druck und Strömungsgeschwindigkeit. Die Schicht wurde für einige Sekunden nach oben geschoben und fiel wieder in sich zusammen. Bei Schichthöhen bis 40 cm unterdrückte diese ständige Bewegung die Kanalbildung wirkungsvoll. Innerhalb von maximal 20 Minuten entstand eine stabile Wirbelschicht und die Pulsation konnte beendet werden. Bei einer Schichthöhe von 90 cm verschlechterte sich der Effekt der Pulsation. Ein hier frei geblasener Kanal wurde nur schwer wieder zugeschüttet. Auch die Abtrennung der Malzkeime war unvollständig. Mit Hilfe eines Balkenrührers konnte das Anfahrverhalten der Wirbelschicht verbessert werden, jedoch gab es Zonen ungenügender Durchmischung (Zarge, Konusboden).

Durch die zunehmende Trocknung veränderten sich die Eigenschaften der Körner. Die Oberfläche verlor ihre Klebrigkeit. Die ständige Mischung der Schicht bewirkte einen Abrieb der Malzkeime, die zum großen Teil mit der Abluft aus dem Trockner ausgetragen wurden. Je nach Schichthöhe konnte der Rührer nach 20-30 Minuten abgestellt werden. Zu diesem Zeitpunkt lag der Wassergehalt bei etwa 37-38 %. Die Malzkeime waren fast vollständig entfernt. Die Wirbelschicht blieb ohne unterstützende Maßnahmen stabil. Wichtig war, dass der Rührer keine zu große Fläche des Siebbodens abdeckte, da er sonst im weiteren Prozessverlauf die Fluidisierung negativ beeinflusste. Aus energetischer Sicht und im Hinblick auf den apparativen Aufwand stellt der Einsatz eines Rührers eine sehr günstigste Lösung dar.

Es wurden auch Weizen- und Roggenmalze hergestellt. Beide Getreidesorten unterscheiden sich grundsätzlich von Gerste: Sie sind spelzenlos, und besonders Weizenkörner haben eine annähernd kugelige Form. Bei der Keimung werden schwächere Wurzelkeime gebildet. Somit haben beide Getreidearten wesentlich bessere Voraussetzungen zur Fluidisierung. Das Anfahren war in beiden Fällen bei Anfangsschichthöhen von 50 bzw. 60 cm ohne Rührer möglich, jedoch waren die zur Fluidisierung benötigten Luftvolumenströme beim Anfahren höher als bei Gerstenmalz.

Interessant ist der Zusammenhang zwischen Schichthöhe, Druckverlauf und Entfernung der Wurzelkeime. Für den in Abbildung 8 dargestellten Versuch wurde die Wirbelschicht beladen, anschließend der Rührer eingeschaltet und der zur Fluidisierung notwendige Volumenstrom eingestellt.

Im selben Maße, wie die Schichthöhe abnahm, stieg der Druckverlust bis zu einem bestimmten Punkt an. Ab diesem Punkt waren die Wurzelkeime fast völlig abgeschlagen. Der Lückenraumanteil war minimal und die Schichthöhe reduzierte sich nur noch sehr langsam. Schichthöhe und Druckverlust verhielten sich proportional.

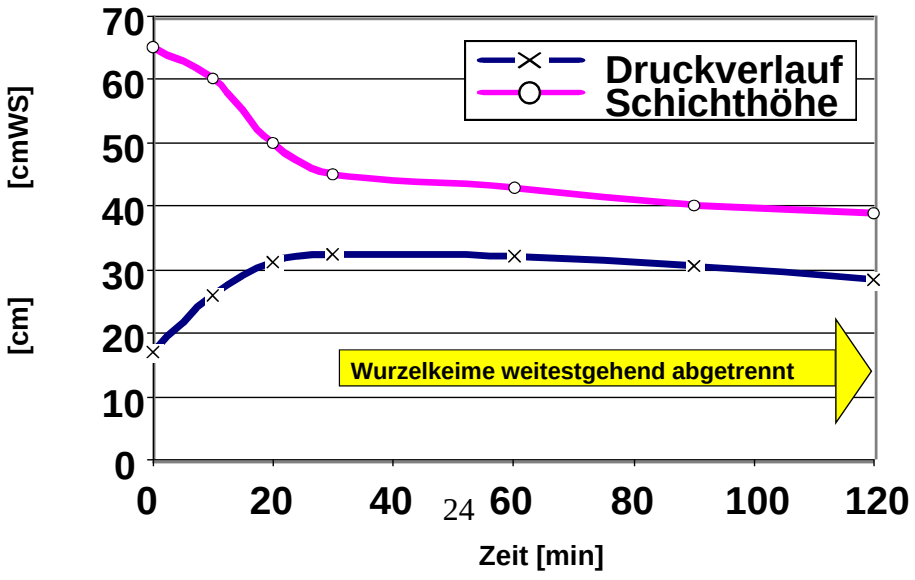


Abbildung 8: Schichthöhe und Druckverlauf in einer Wirbelschicht mit Malz

Unabhängig vom Darrsystem gibt es für die Trocknungsgeschwindigkeit, besonders während der Schwelkphase, folgende Einflussparameter:

- Luftdurchsatz
- Schichthöhe
- Temperatur der Einströmluft

Nach dem Stand der Technik wird immer bei der minimalen Fluidisierungsgeschwindigkeit getrocknet, um Energie zu sparen. Unabhängig von der Wirtschaftlichkeit wurde versucht, durch einen höheren Luftdurchsatz die Darrzeit zu verringern. Nur in der Anfangsphase erhöht ein gesteigerter Volumenstrom die Trocknungsgeschwindigkeit merklich. Der Einfluss des Luftdurchsatzes wird im weiteren Verlauf der Trocknung vom Temperatureinfluss immer stärker zurückgedrängt. Dass der Luftdurchsatz keinen entscheidenden Einfluss auf die Trocknungsgeschwindigkeit hat, ist auch an der Feuchte der Abluft zu erkennen, da die Abluft nur für eine kurze Zeitspanne am Anfang des Trocknungsvorganges vollständig gesättigt ist.

Der Sättigungsgrad an Feuchtigkeit der Abluft sollte möglichst lange auf hohem Niveau bleiben, um einen großen Wirkungsgrad der Trocknung zu erzielen. Mit steigender Grünmalzmasse bzw. größeren Schichthöhen steigt auch die Abluftfeuchte. Dies erklärt sich dadurch, dass durch den längeren Weg die vorbei streichende Luft mehr Zeit hat, Feuchte aus dem Gut aufzunehmen (Kontaktzeit). Einer steigenden Schichthöhe sind durch den starken Druckverlust aber Grenzen gesetzt.

Abbildung 9 zeigt den Einfluss der Anfangstemperatur auf die Schwelkzeit (bis 15°% Feuchte). Die Steigungen der Trocknungsgeschwindigkeitskurven waren bei einer Anfangstemperatur von 50 und 60 °C während der ersten 30 min fast gleich. Nach dieser Zeit wirkte sich das kleinere Dampfdruckgefälle vom Korn zur umgebenden Luft bei 50 °C stärker aus. Die Folge ist eine deutliche Abflachung der Trocknungsgeschwindigkeitskurve. Wird nach 60 min die Temperatur der einströmenden Luft auf 60 °C erhöht, gleicht sich die Steigung sofort an die der 60 °C Kurve wieder an. Insgesamt führt eine höhere Trocknungstemperatur zu einem schnelleren Wasserentzug. Der kapillare Wassertransport aus dem Korninneren scheint hier nicht der limitierende Faktor zu sein.

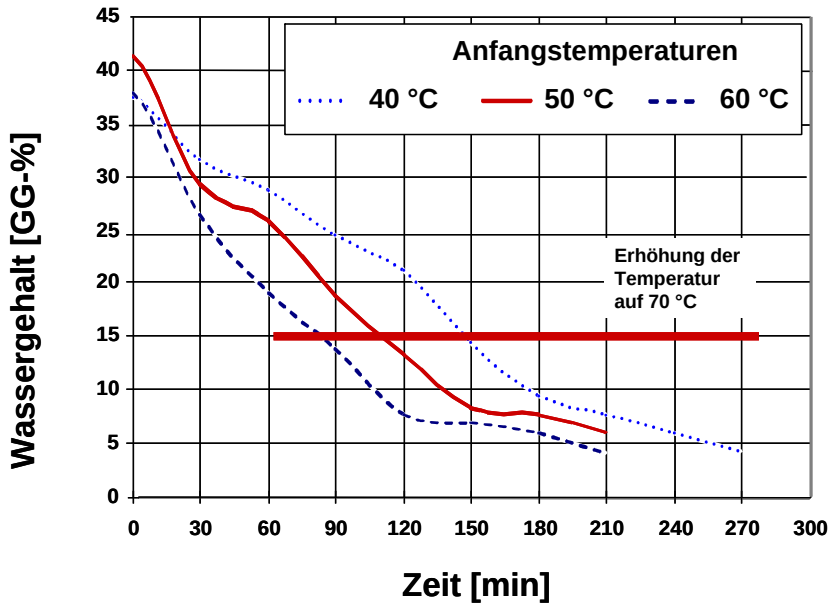


Abbildung 9: Trocknungsgeschwindigkeit von Malz bei verschiedenen Anfangstemperaturen

Unabhängig von energetischen und technischen Gesichtspunkten muss die Malzqualität analysiert werden, um die von der Brauerei geforderten Spezifikationen für den Malzeinkauf zu erfüllen. Von den Brauereien wird ein problemlos zu verarbeitendes Malz gefordert. Der Filtrierbarkeit im Sudhaus und am Bierfilter kommt hier besondere Bedeutung zu. Es gibt einen direkten Zusammenhang zwischen der cytolytischen Lösung des Malzes und der Filtrierbarkeit.

Die Cytolyse reagiert am empfindlichsten auf technologische Umstellungen des Darrprozesses. Es hat sich gezeigt, dass die einfach und schnell durchzuführende Friabilimeter-Analyse hierbei genügend präzise Aussagen liefert. Bevor negative Veränderungen der Viskosität, des Extraktgehaltes oder des Eiweißlösungsgrades festgestellt wurden, konnte bereits ein zu niedriger Friabilimeterwert eine Fehlentwicklung der eingestellten Parameter aufzeigen.

Anfangstemperaturen der Einströmluft über 60 °C (Normwert für die maximale Schwelk-temperatur) führten zu schlechten Friabilimeterwerten und wurden nicht weiter verfolgt. Die Temperatur der Kornoberfläche, dargestellt in Abbildung 10, glich sich innerhalb von wenigen Minuten an den Verlauf der Ablufttemperatur an. Im Gegensatz zur klassischen Darre, wo man davon ausgeht, dass während der Schwelkphase an der Kornoberfläche die Kühlgrenztemperatur herrscht und die Verdampfung von Wasser eine stärkere Erwärmung verhindert, erreicht die Korntemperatur (Messung mittels Infrarotsensor) in der Wirbelschichtdarre Werte, die etwa 3 Kelvin über der entsprechenden Ablufttemperatur liegen.

In einer Wirbelschichtdarre ist die „klassische“ Schwelkphase extrem kurz. Durch die guten Wärme- und Stoffübergangsbedingungen trocknet die Oberfläche der Körner schnell ab. Der Transport von Feuchtigkeit an die Kornoberfläche verlangsamt sich. Durch die niedrigere Wassermenge, die dann noch verdampfen kann, tritt nur noch ein geringer Kühleffekt auf. Die Abluftfeuchte sinkt entsprechend ab. Die Malzkörner werden bereits bei einem hohen Wassergehalt einer hohen Temperatur ausgesetzt. So liegt bei dem in Abbildung 10 gezeigten Versuch die Kühlgrenztemperatur in der ersten Phase des Schwelkens bei etwa 25 °C. Die

Temperatur der Kornoberfläche überschreitet diesen Wert bereits nach einer halben Stunde. Das Malz hat zu diesem Zeitpunkt einen Wassergehalt von 38 %. Die schnelle Entfeuchtung der Randschichten der Körner und die hohe thermische Belastung führen bei nicht entsprechender Temperaturführung zu Darrglasigkeit und schlechten Friabilimeterwerten bei Malz aus einer Wirbelschichtanlage. Die Enzyminaktivierung ist vergleichbar mit dem Prozess des „Blanchierens“.

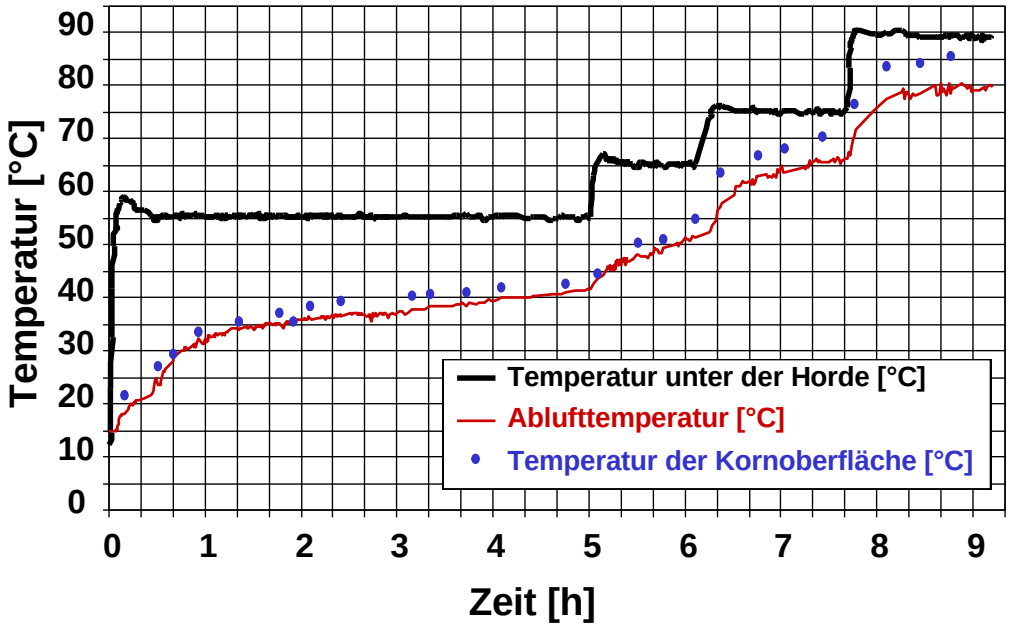


Abbildung 10: Thermische Kenndaten eines Darrprozesses in der Wirbelschicht

Die Temperaturführung im Zusammenhang mit dem jeweiligen Wassergehalt des Grünmalzes hat entscheidenden Einfluss auf die Malzeigenschalten bei der Trocknung. Das Optimum des Friabilimeterwertes steht in einem direkten Zusammenhang mit der Temperaturerhöhung über 60°C und dem Wassergehalt des Malzes.

Abbildung 11 zeigt vier verschiedene Darrversuche. Als Anfangstemperatur wurde zur schnellen Trocknung 60 °C gewählt. Diese Temperatur wurde solange beibehalten, bis Wassergehalte von 25, 20, 15 bzw. 10 GG-% erreicht wurden. Dann erst wurde die Temperatur der Einströmluft auf 70 °C erhöht. Anschließend wurden alle vier Malze nach dem gleichen Darrschema weiterbehandelt.

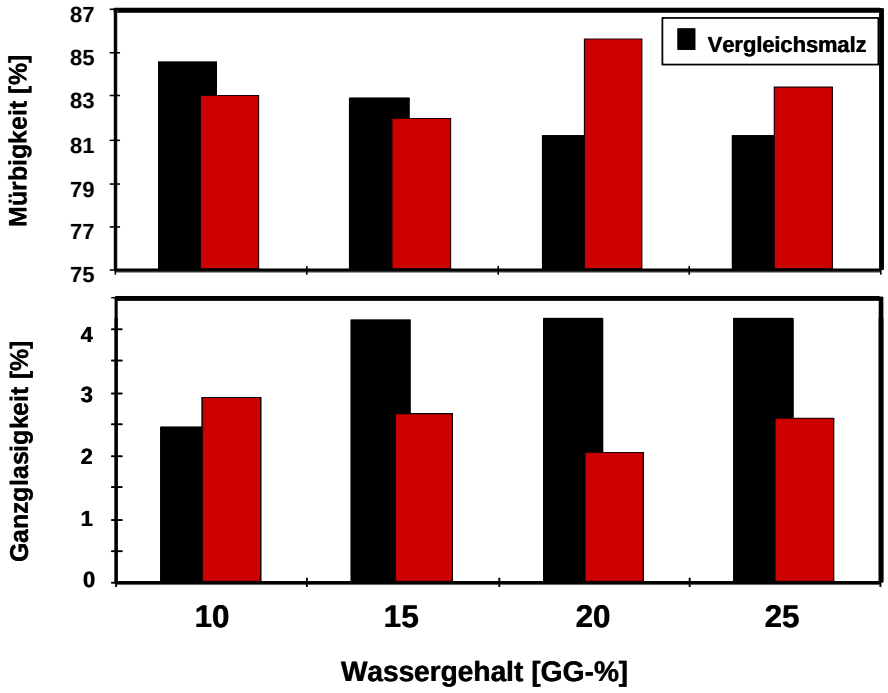


Abbildung 11: Einfluss des Wassergehaltes beim Überschreiten von 60 °C auf den Friabilimeterwert

Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn vor der Temperaturerhöhung auf 70 °C ein Wassergehalt von 20 GG-% abgewartet wird. Sowohl die Ganzglasigkeit als auch die Mürbigkeit werden unter diesen Umständen verbessert. Die Werte sind hier auch weitaus besser als die des Vergleichsmalzes. Hohe Temperaturen im Zusammenspiel mit hohen Wassergehalten schädigen Enzyme stärker als hohe Temperaturen bei niederen Wassergehalten. Dies erklärt die Verschlechterung der Qualität der Malzprobe mit einem Wassergehalt von 25 GG-% bei der Temperaturerhöhung auf 70 °C. Unterhalb eines Wassergehaltes von 20 GG-% verschlechtern sich die Friabilimeterwerte gegenüber dem Vergleichsmalz. Diese Malzchargen sind deutlich längeren Schwelkzeiten ausgesetzt, als dies bei einem Wassergehalt von 20 GG-% der Fall ist. D. h. Schwelktemperaturen von 60 °C sind im Sinne einer optimalen Darrführung zu hoch. Längere Verweilzeiten des Malzes bei Temperaturen von 60 °C wirken sich noch ungünstiger auf die Friabilimeterwerte aus, als eine frühe Temperaturerhöhung bei höheren Wassergehalten.

Ist das Schwelken bzw. Trocknen weitgehend erfolgt, werden in der Abdarrphase thermische Prozesse angestrebt. *Forster* [83] hat hierzu ausführliche Untersuchungen angestellt. Die im Sinne einer Verkürzung der Schwelkzeit angestellten Versuche erreichten Malzqualitäten, welche hinsichtlich Wassergehalt und DMS-P-Wert unbefriedigend waren. Die nachfolgend beschriebenen Versuche dienten nicht der Optimierung des gesamtem Darrprozesses, sondern sollten nur eine Aussage ergeben, ob es möglich ist, eine Senkung des Malzwassergehaltes unter 4,5 % und des DMS-P-Wertes unter 5 ppm zu erreichen. Diese Werte werden üblicherweise in Malzspezifikationen gefordert.

Der Abbau des Dimethylsulfid-Precursors (DMS-P) S-methyl-Methionin (SMM) kann durch eine Erhöhung der Abdarrtemperatur oder eine Verlängerung der Abdarrzeit forciert werden. Diese Maßnahme führt z. B. zu höheren Würze- und Bierfarben, einer Erhöhung der alterungsrelevanten Carbonyle aus dem Strecker-Abbau und der Thiobarbitursäurezahl, einer Erhöhung des Reduktionsvermögens [284] und einer stärkeren Enzyminaktivierung.

Abbildung 12 zeigt die Entwicklung des DMS-P-Gehaltes bei verschiedenen Abdarrzeiten und Abdarrtemperaturen.

Bei konstanter Abdarrtemperatur sinkt der DMS-P-Gehalt mit der Zeit ab. Je höher die gewählte Temperatur liegt, umso stärker ist diese Abnahme. Bei 90 °C und 95 °C konnte der Gehalt an DMS-P nach einer Abdarrzeit von 50 Minuten unter die geforderte Grenze von 5 ppm gesenkt werden.

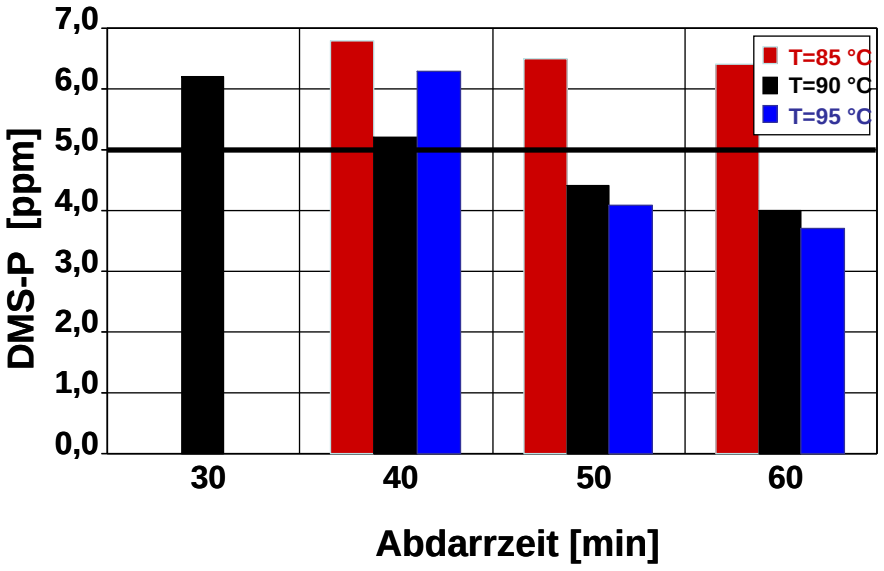


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen DMS-P-Gehalt und Abdarrzeit bei verschiedenen Temperaturen

Die bisherigen Versuche dienten noch nicht der Optimierung des Energiebedarfes. Der Bedarf an elektrischer Leistung ist aufgrund der höheren Strömungsgeschwindigkeiten höher als bei herkömmlichen Hordendarren. Der Wärmebedarf wurde über den Temperaturverlauf und den Volumenstrom über die Zeit für einen Darrprozess berechnet. Er ist während der Schwelkphase niedriger als bei der Vergleichsdarre und liegt in der Aufheiz- und Abdarrphase wegen des höheren Luftdurchsatzes höher. Der Gesamtenergiebedarf, also Strom und Wärme ist um 5 % niedriger. Dabei sind jedoch die Aufheiz- und Abdarrphase noch nicht optimiert. Die Untersuchungen und Berechnungen des *Institut Francais des Boissons de la Brasserie Malterie* (IFBM) zur Wirbelschichtdarre ergaben eine Energieeinsparung von 15 % für den Gesamtenergiebedarf bei der Malztrocknung.

Während des Schwelkprozesses wird die Abluft nicht vollständig mit Wasserdampf gesättigt. Durch Erhöhung der Hordenbeladung kann die Luft stärker gesättigt werden, da sie eine höhere Malzschicht durchströmt. Dabei ist zwar ein erhöhter Volumenstrom an Trocknungsluft zur Fluidisierung notwendig, dieser steigt jedoch mit der Beladung nur unterproportional an. Auch die für die Trocknung benötigte Wärme nimmt mit der Schichthöhe nur unterproportional zu. Eine weitere Möglichkeit zur energetischen Optimierung ist eine Kreislaufführung der Prozessluft in dem kontinuierlichen Prozess der Fließbetttrocknung. Praktische Probleme ergeben sich noch beim Übergang von einem Chargenprozess der Keimung zu einer kontinuierlichen Darre. Die Verweilzeit vor der Darre wäre durch die kontinuierliche Beladung derart lange, dass eine weitere Keimtätigkeit zu einer Überlösung des Malzes führen könnte. Außerdem ist es schwierig, die Wurzelkeime aus dem Luftführungssystem abzuführen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich die Wirbelschichttechnologie in der Schwelkphase sehr von den klassischen Einhordendarren unterscheidet. In der Abdarrphase können die Vorgänge identisch geführt werden. Wegen technischer und logistischer Probleme hat sich die Wirbelschichtdarre bisher in Mälzereien nicht durchgesetzt.

Neben den Möglichkeiten der Einflussnahme in der Mälzerei kann über den Einkauf der Rohstoffe die Malz- und Bierqualität beeinflusst werden. Es besteht aber eine Abhängigkeit vom Rohstoffmarkt und vom Jahrgang. Das klassische Malzgetreide in Deutschland ist die zweizeilige Sommergerste. Im Ausland werden schon immer enzymreichere, zum Teil mehrzeilige Winterbraugersten eingesetzt. Deren, im Verhältnis zum Extraktgehalt, größerer Spelzenanteil ist besonders dann erwünscht, wenn Malzersatzstoffe eingesetzt werden, die keine Spelzen besitzen, und ein Läuterbottich verwendet wird. Besonders Wintergersten können für den Landwirt lukrativ sein. Wirtschaftlich interessant sind die höheren Erträge. Umweltpolitisch haben Winterfeldfrüchte den Vorteil, dass sie die Nitratausschwemmung in das Grundwasser und die Bodenerosion reduzieren. Durch die Aussaat im Herbst ist im Frühjahr bereits eine Pflanzendecke vorhanden, welche auch schon während der Schneeschmelze Nährstoffe aus dem Boden aufnimmt. Vor diesem Hintergrund wurde versucht den Unterschied zwischen Sommer- und Wintergerste, sowie die Brautauglichkeit unterschiedliche Sorten zu evaluieren.

Quellen

Dissertation von Elmar Spieleder [284] sowie die Diplomarbeiten von Ute Zeidler, Markus Wanke und eigene Veröffentlichungen in Zusammenarbeit mit PD Dr. Winfried Ruß [248]

3.2 Einfluss der Gerstensorte und des Gerstentyps

Im Gegensatz zur Sommerbraugerste gilt Wintergerste als klassisches Futtermittel zur Tierernährung, weswegen wenige Züchtungen auf Brauqualität getätigt wurden. Der Züchtungsfortschritt der Sommerbraugerste gegenüber der Wintergerste wurde in den letzten Jahrzehnten stark reduziert. Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verarbeitbarkeit und die Bierqualität waren aber noch systematische Untersuchungen notwendig, um die Braueignung von Wintergersten zu beweisen. Besonders die sensorischen Eigenschaften sollten in Brauversuchen untersucht werden.

3.2.1 Einfluss der Gerstensorte auf den Biergeschmack

Es ist seit je her ein Anliegen der Brauer und Mälzer, den Geschmack von Bier den Rohstoffen Gerste bzw. Malz zuordnen zu können. Klassische Malzanalysen erlauben aber keine Rückschlüsse auf die Geschmackseigenschaften von Bieren. Es wurden daher Mälzungs- und Brauversuche vom Mikromaßstab (10 g) bis zum Praxismaßstab (10 t) durchgeführt [220]. Die Malz-, Würze- und Bierproben wurden nach klassischen Methoden sowie auf mehr als 300 Aromastoffe untersucht. Es zeigte sich, dass weniger als 10 Analysenmerkmale ausreichend sind, um eine Vorhersage über den zu erwartenden Biergeschmack zu liefern. Verkostungen haben dies bestätigt. Somit ist ein Scale-up von 10 g auf 10 t möglich [221].

Abbildung 13 zeigt die Hauptkomponentenanalyse aus den Analysenwerten Diastatische Kraft (Malz), 2-Acetyl-Furan (Würze), Diacetyl am 3. Gärtag, γ-Dodecalacton, γ-Octalacton, Essigsäure-hexyl-ester und Filtrierbarkeit nach Esser (Bier). Jeder Punkt steht für eine Gerstensorte, welche standardisiert vermälzt und verbraut wurde.

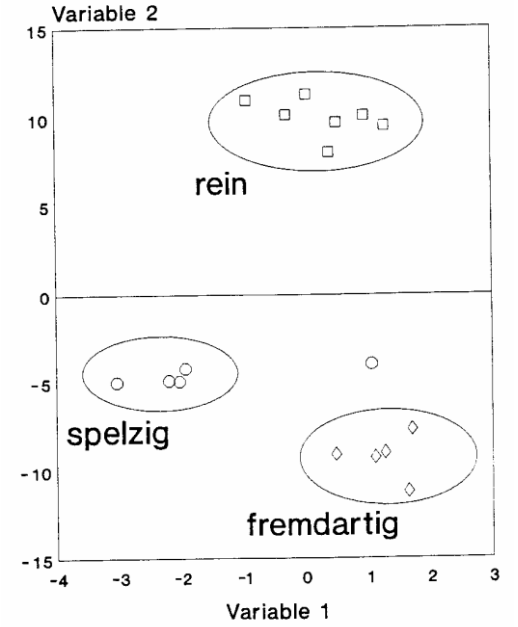


Abbildung 13: Hauptkomponentenanalyse sensorisch unterschiedlicher Biere

Die von den Verkostern als rein bezeichneten Biere liessen sich von den Bieren mit off-flavour (spelzig, fremdartig) eindeutig trennen. Wie komplex die Ursachen für die Bildung eines bestimmten Biergeschmackes sind, zeigen die verwendeten Analyten. Die enzymatische Ausstattung der Gerste bzw. des Malzes in Form der Diastatischen Kraft hat ebenso einen Einfluss wie das 2-Acetyl-Furan der Würze, welches thermisch über die Maillard-Reaktion besonders beim Darren des Malzes entsteht. Der physiologische Zustand der Hefe und somit deren Diacetylproduktion während der Gärung geben ebenso einen Hinweis auf den zu erwartenden Biergeschmack wie die letztendlich im Bier gefundenen Indikator- und Leitsubstanzen wie z. B. Ester, welche das Aromaprofil des Bieres maßgeblich prägen und vom Verkoster sensorisch wahrgenommen werden können.

Es war bewiesen, dass aus einer kleinen Zahl von Analysen im Laborversuch der zu erwartende Biergeschmack mittels statistischer Verrechnung vorausgesagt werden kann. Interessant wäre aber, ohne statistische Verrechnung bereits über die Konzentrationen einzelner Substanzen in Malz oder Würze einen Hinweis auf den zu erwartenden Biergeschmack zu erhalten.

Um die Aussagekraft einzelner Analyten bezüglich der Vorhersage des Biergeschmackes zu ermitteln, wurden ca. 9.000 Einzeldaten aus Mikrobrauversuchen (1 l Bier) varianzanalytisch verrechnet, wie Tabelle 2 zeigt. Diese analytischen Daten wurden mit den Verkostungs-ergebnissen aus Kleinsuden (10 l Bier) in einer Datenmatrix zusammengeführt. Grundlage war, dass 24 Malze aus Sommer- und Winterbraugersten sowohl im Mikro- als auch im Kleinmaßstab verarbeitet waren. Es sollte dabei herausgefunden werden, ob die geschmacklichen Eigenschaften des Endproduktes Bier bereits am Verlauf der Mikro-

Gärungen erkannt werden können. Die Biere der Mikrogärungen konnten nur analytisch beurteilt werden, da zu wenig Probematerial für die Verkostung vorhanden war. Die Kleingärungen aus denselben Malzen führten zu Bieren, welche verkostet wurden.

Betrachtet man die F-Werte der Schrittweisen Diskriminanzanalyse und deren Signifikanzniveau, so fällt auf, dass Würzearomastoffe aus dem Lipidabbau, wie z. B. das 1-Hexanol und das 1-Penten-3-ol hochsignifikant zur Vorhersage des Biergeschmackes geeignet sind [221]. Diese Stoffe können durch die Gerste, das Mälzungsverfahren und den Maischprozess in größeren oder kleineren Konzentrationen in die Würze eingebracht werden. Bei der Würzekochung werden sie wieder weitgehend ausgedampft, weshalb sie auch als „Ausdampfindikatoren“ zur Ermittlung der Ausdampfeffizienz eines Kochsystems herangezogen werden. Dies zeigt, dass durch die Würzebehandlung negative Eigenschaften aus vorherigen Schritten (Mälzen, Schroten, Maischen) teilweise egalisiert werden können.

Tabelle 2: Einfluss von Inhaltsstoffen auf den Biergeschmack

Analysenwerte, durch welche Biere mit guten Verkostungsergebnissen (dem Biertyp entsprechend) von Bieren mit schlechten Verkostungsergebnissen (fremdartiger Biergeschmack) unterschieden werden können. Dargestellt sind Daten der Schrittweisen Diskriminanzanalyse:			
Variable	F-Wert	Probe	Signifikanzniveau
1-Hexanol	44,90	Würze	***
2-Acetyl-Thiazol	23,96	Würze	***
pH Anstellen	34,51	Würze	***
5-formyl-6-methyl- 2,3-Pyrrolizin	24,41	Würze	**
1-Penten-3-ol	11,35	Würze	**
γ-Nonalacton	13,29	Würze	**
Bitterstoffe EBC	17,88	Würze	**
Essigsäure	36,95	Bier	**
γ-dodeca-Lacton	14,38	Bier	**
2-Phenylethanal	11,53	Bier	**
3-me-Butanal	10,89	Bier	**
2-Acetyl-Pyrrol	10,71	Bier	**
Diacetyl 4. Gärtag	767,7	Bier	***
Extrakt 4. Gärtag	71,31	Bier	***
Hefezellzahl 3. Gärtag	25,46	Bier	***
Vergärungsgrad 4. GT	30,93	Bier	***
Vergärungsgrad 6. GT	25,90	Bier	**
Vergärungsgrad 5,GT	23,49	Bier	**
Extrakt 5.Gärtag	19,20	Bier	**
Extrakt 6.Gärtag	18,92	Bier	**
Acetoin 4.Gärtag	18,33	Bier	**
Hefezellzahl 4.GT	20,76	Bier	**
Hefezellzahl 5.GT	18,23	Bier	**
Hefezellzahl 6.GT	15,60	Bier	**

Durch eine zügige und weitgehende Gärung wird der Biergeschmack positiv beeinflusst. Eine schleppende Gärung kann zu Fehlaromen im Bier führen. Die Hefe ist eine Art „Bioindikator“. Bei optimaler Würzezusammensetzung wird der physiologische Zustand der

Hefe verbessert. Dies äußert sich in einer starken Hefevermehrung, welche über die Hefezellzahl verfolgt werden kann. Reproduzierbarkeitsversuche haben gezeigt, dass die geringste Streuung und somit die beste Aussage am 3. Gärtag während der Vermehrungsphase (log-Phase) erzielt werden kann, wie Abbildung 14 zeigt. Der Probenahmezeitpunkt hat hier einen entscheidenden Einfluss [220].

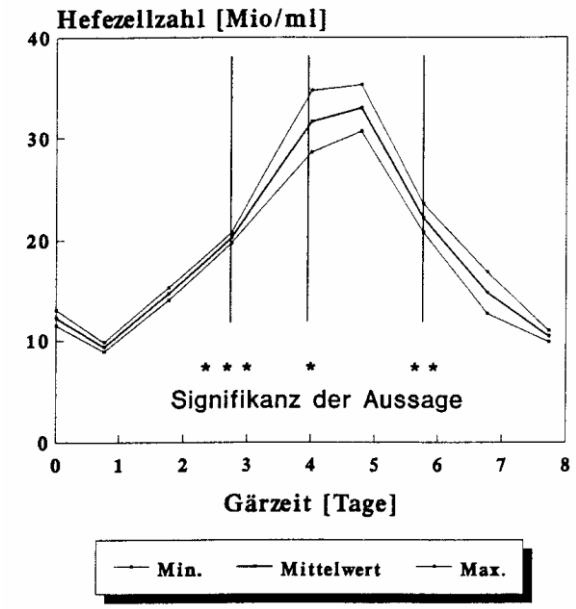


Abbildung 14: Reproduzierbarkeit des Hefezellzahlverlaufes bei Mikrogärungen

Dieses Ergebnis deckt sich mit den Angaben von *Kruger et. al*. [159], welcher durch Mikrogärungen die Verarbeitbarkeit in der Großbrauerei erfolgreich vorhersagen konnte. Er zieht unter anderem auch die Hefezellzahl des 3. Gärtages zur Vorhersage der Vergärbarkeit von Würzen heran.

Parallel zur Hefezellzahl ist der Verlauf des vicinalen Diketones Diacetyls von Bedeutung, da dies in einer Konzentration von mehr als 0,1 mg/l zu einem Fehlgeschmack (off-flavour) im Bier führen kann. Gewünscht ist eine Reduktion des 2,3-Butandions (Diacetyl) zu 3-Hydroxy-2-Butanon, dem sog. Acetoin, weswegen in der Brauerei eine Reifungsphase eingehalten wird. Die Reifung kann über die Dosage von Kräusen (Jungbier in der Angärphase) beim Umpumpen in den Reifungs- oder Lagertank beschleunigt werden. Kontinuierlich arbeitende Bioreaktoren mit immobilisierter Hefe sind ebenfalls möglich (vgl. Kapitel 5.8, S.96). Bei einer aktiven Hefe kann der Diacetylabbau bereits gegen Ende der Hauptgärung im Gärtank erfolgen. Eine Unterbilanzierung an Aminosäuren führt zu einer Eigensynthese dieser Aminosäuren durch die Hefezelle, wobei Diacetyl im vermehrten Maße entsteht. Durch eine der Hefephysiologie angemessene Ausstattung der Würze mit Aminosäuren, kann dieser klassische Fehler vermieden werden.

Besonders bei der Züchtung neuer Gerstensorten wäre es von Vorteil frühzeitig zu erkennen, ob eine neue Sorte Aromafehler im Bier erwarten lässt. Hierzu wären Analysenmerkmale geeignet, welche einerseits von der Gerstensorte abhängig und gleichzeitig aromarelevant sind. Die Malzanalysen von standardisiert vermälzten Winter- und Sommergersten aus 3 Jahrgängen wurden statistisch verrechnet. Hochsignifikant sortenabhängig ($\alpha = 0{,}01$) sind Extrakt, Endvergärungsgrad, VZ 45 °C, Eiweißlösungsgrad und der Friabilimeterwert.

Hochsignifikant anbauortabhängig sind der Rohproteingehalt und der Friabilimeterwert. [219]. Der Friabilimeterwert, als Maßzahl für die cytolytische Lösung des Malzes, ist gleichermaßen abhängig von Sorte und Provenienz. Genotypisch und gleichzeitig auch aromarelevant ist der Endvergärungsgrad. Der Eiweißlösungsgrad, welcher eine Aussage über die proteolytische Lösung des Malzes gibt und die VZ 45°C, welche von der Stärkezusammensetzung abhängig ist, sind ebenfalls genotypisch und beeinflussen über die Aminosäureausstattung der Würze den Endvergärungsgrad indirekt. Die Verrechnung aller Aromastoffe über eine Cluster-Analyse führte zu genotypischen Clustern, wie *Ditschmann* [51] zeigen konnte. Zu beachten bleibt, dass alle unter standardisierten Bedingungen signifikant sortentypischen Analysenparameter durch die Variation der Mälzungstechnologie ebenfalls beeinflusst werden können (vgl. Abbildung 2). Dennoch ist es für den Mälzer von Vorteil, wenn er durch eine geeignete Sortenwahl die Wirtschaftlichkeit der Mälzung und die Qualität der Malze positiv beeinflussen kann.

Um aufwendige Kleinmälzungen und Kleinsude zu vermeiden, wurde nach einer analytischen Methode gesucht, welche es erlaubt, bereits aus einer geringen Menge Malz eine Aussage über den Biergeschmack zu geben, ohne dass eine Verkostung durchgeführt wird.

Im Sinne einer Früherkennung des zu erwartenden Biergeschmackes aus einem Malz ist eine gaschromatographische Analyse aus einem Kaltauszug von 30 g Malz geeignet [222]. Es hat sich gezeigt, dass die Aromanoten „spelzig“ und „malzig“ konträr sind. Biere mit einem malzigen Geschmack zeigen hohe Werte an 2-Nonanon, 2-acetyl-Thiazol, trans-2-Hexenal und γ-Nonalacton, wobei 4,4-dimethyl-Butan-1,4-olid in geringen Konzentrationen zu finden ist. Die spelzige Note in einem Bier ist umso ausgeprägter, umso weniger 2-Phenylethanal und Octanol gefunden wird. Dies ist nachvollziehbar, da 2-Phenylethanal als Standard für einen „honigartigen“ Aromaeindruck zur Verkosterschulung eingesetzt wird. Hohe Viskositäten der Kongresswürzen, was auf eine knappe Cytolyse und meist auch auf eine knappe Proteolyse hindeutet, gehen mit einem spelzigen Geschmack im Bier einher. Auch dies ist nachvollziehbar, da bei Abwesenheit niedermolekularer Substanzen weinger aromawirksame Folgeprodukte entstehen können, wie man aus dem Bildungsmechanismus der Streckeraldehyde weiß.

Es wurden Praxisversuche mit 2.000 hl Gärchargen (3 Sude) durchgeführt, um die Ergebnisse der Laborversuche (30 g Malz) zu verifizieren. Verglichen wurden Sude aus Wintergerstenmalz der Sorte Astrid mit Suden aus Sommergerstenmalz der üblichen Produktion einer Brauerei. Die Verkostungsergebnisse der Großversuche deckten sich mit den aus den Malz- und Bieranalysen vorausgesagten Geschmacksvorhersagen. Somit ist der scale-up von der analytischen Bewertung des Malzkaltauszuges (30 g) auf den Industriemaßstab (10.000 kg) gelungen. Dies bestätigt den großen Einfluss der Malzqualität auf die Bierqualität.

Quellen

Dissertation von Jörg Dietschmann [51] und die Diplomarbeit von Matthias Haaben sowie eigene Veröffentlichungen [154, 220-222]

3.2.2 Praxistauglichkeit von Wintergerstenmalz

Die Landessortenversuche wie auch die Wertprüfung III des Bundessortenamtes zeigten eine Reihe von vielversprechenden Wintergerstensorten. Darunter war die Sorte Astrid, welche im Klein- und Industriemaßstab vermälzt und verbraut wurde [23]. Als Sommergerstenstandard wurde die Sorte Cheri parallel verarbeitet, wobei zwei Jahrgänge untersucht wurden.

Die Industriemälzung wurde identisch für Sommer- und Wintergersten mit einer fallenden Keimung durchgeführt. Die „Vegetationszeit“ war also bei beiden Mälzungsarten dieselbe. Tabelle 3 zeigt die Malz-, Würze- und Bieranalysedaten aus dem Großversuch mit 3.000 hl Bier pro Gärcharge. Wenn die gleiche Analyse in der Praxiswürze, in der Kongresswürze oder im Bier gemacht wurde, ist dies vermerkt und aus Gründen der Übersichtlichkeit in einem Feld angeordnet.

Die Vermälzung der Wintergerste war in der Praxis bei beiden Jahrgängen zu knapp, wie der Eiweißlösungsgrad erkennen lässt. Der Jahrgang 1992 (heißer Aufwuchs) vermittelte eine etwas knappere enzymatische Lösung bei Astrid, wie die Viskosität und der Friabilimeterwert zeigen.

Tabelle 3: Malz- und Würzeanalysen von Sommer- und Winterbraugersten im Industriemaßstab

Jahrgang	1991		1992	
Gerstensorte	Cheri	Astrid	Cheri	Astrid
Extrakt [%-wfr.] / Malz	81,2	80,8	81,0	80,0
Viskosität [mPas] bez. 8,6 % / Malz Viskosität [mPas] bez. 12 % / Praxiswürze Viskosität [mPas] bez. 12 % / Bier	1,49 1,76 1,75	1,49 1,72 1,73	1,52 1,74 --	1,55 1,82 --
Friabilimeterwert [%] / Malz	94,4	87,8	84,8	76,6
Friabilimeter ganzglasig [%] / Malz	0,6	0,0	2,4	0,4
Friabilimeter teilglasig [%] / Malz	5,0	12,2	12,8	22,7
Endvergärungsgrad [%] / Kongresswürze Endvergärungsgrad [%] / Praxiswürze	80,2 83,5	81,6 86,4	79,8 83,4	80,1 85,3
Farbe photom. [EBC] / Kongresswürze	3,7	2,7	3,0	2,2
Kochfarbe photom. [EBC] / Kongresswürze Farbe photom. [EBC] / Praxiswürze Farbe photom. [EBC] / Bier	5,4 9,6 10,9	4,3 7,1 9,6	4,3 8,2 10,0	3,8 8,1 8,9
Eiweiß [%-wfr.]	10,6	10,5	11,7	11,2
löslicher Stickstoff [mg/100 g MTrS] / Kongresswürze Gesamt-Stickstoff [mg/100 ml] bez. 12 % / Praxiswürze	750 115	635 101	697 114	615 98
Eiweißlösungsgrad [%]	44,3	37,7	37,3	34,4
freier Aminostickstoff [mg/100 g MTrS] / Kongreßwürze freier Aminostickstoff [mg/100 ml] bez. 12 % / Praxiswürze	161 25,3	133 22,2	138 24,7	111 19,2
VZ 45°C [%] / Malz	38,7	36,2	33,5	33,5
Diastatische Kraft [°WK] / Malz	294	399	288	448
α-Amylase [ASBC] / Malz	36	31	40	40
DMS-P [ppm] / Malz	4,0	9,5	9,2	8,6
Summe der Alterungskomponenten [ppm] im frischen Bier im forciert gealterten Bier	 108 229	 80 187	 86 206	 64 184

Trotz der schwachen Cytolyse der Astrid-Malze verliefen die Läuterarbeit und die Bierfiltration ohne Probleme. Bemerkenswert ist, dass trotz der schwachen Ausstattung mit assimilierbarem Stickstoff bei der Sorte Astrid die Gärung gleich gut war wie bei der Vergleichssorte Cheri. Die Nachgärung war sogar besser, wie bereits aus den Werten zur Endvergärung und aus den Werten der Diastatischen Kraft eindeutig zu erkennen ist. Die

geringere Proteolyse führte in frischen und gealterten Bieren zu einem geringeren Gehalt an Alterungsindikatoren. Die Astrid-Biere waren im Vergleich zur Sommergerste entschieden besser in der Geschmacksstabilität. Dem höheren Gehalt an DMS-Precursor muss in der Abdarrphase oder im Sudhaus (vgl. Kap. 7, S. 122) begegnet werden.

Bei Verkostungen nach dem DLG-Schema [54] schnitten Biere, die ausschließlich aus Wintergerstenmalz neuerer Sorten bereitet wurden, ebenso gut ab wie reine Sommerbraugerstenbiere. Geschmacklich wurden die Biere meist als unterschiedlich erkannt, wobei die Präferenzen einmal bei den Sommergersten- und einmal bei den Wintergerstenbieren lagen.

Aus geschmacklicher Sicht stellt die Wintergerste somit eine Rohstoffalternative dar. Die Wintergerstenbiere zeichnen sich durch einen etwas „trockener‘ empfundenen Geschmacks-eindruck aus, vergleichbar mit „dry-beer“. Die Empfindung der Vollmundigkeit war etwas weniger weich, die Bittere geringfügig stärker als bei Sommergerstenbieren ausgeprägt. Erwähnenswert ist die ungewöhnlich hohe Geschmacksstabilität der Wintergerstenbiere, die bei einigen Sorten bereits mehrfach reproduziert werden konnte.

Moderne Winterbraugersten können prinzipiell Malzqualitätsdaten erbringen, die denen moderner Sommerbraugersten in nichts nachstehen [143]. Der Angleich an Sommer-gerstensorten ist bereits soweit gediehen, dass Varietäten mit genotypisch ausgeprägt starker Proteolyse, starker Cytolyse bei hoher Endvergärung oder selbst bei reduzierter Lösung mit hoher Diastatischer Kraft als entsprechende Analoga existieren. Winterbraugersten sind „eiweißempfindlicher“ als Sommerbraugersten, d.h. sie erleiden hinsichtlich ihrer Malz- und Bierqualitätsdaten bei angehobenen Rohproteingehalten (> 10,5 %) merklich höhere Einbußen als Sommerbraugersten. Betroffen sind nicht nur die Extraktausbeute, sondern insbesondere die cytolytischen Kennzahlen (Viskosität und Friabilimeterwert). In diesem problematischen Tatbestand zeichnet sich jedoch durch intensive züchterische Arbeit eine fortlaufende Entschärfung ab. Für ältere Wintergerstenvarietäten ist jedoch beim Gersten- oder Malzeinkauf ein um ca. 1 Prozent niedrigerer Eiweißgehalt zu fordern, gemessen an der jeweiligen für Sommerbraugersten gesetzten Spezifikation. Unter diesen Voraussetzungen können Probleme bei der Filtrierbarkeit weitgehend vermieden werden. Um den Eiweißgehalt gering zu halten, kann der Landwirt auf eine späte Düngung verzichten. Leider kann durch späten Regen vor der Ernte, wegen der plötzlichen Stickstoffnachlieferung in den Wurzelbestand, der Stickstoffgehalt des Kornes steigen. Dieser Tatbestand erhöht das Risiko für den Landwirt, dass die für Braugerste geforderten Werte überschritten werden. Alternativ muss das Getreide mit einem Preisabschlag als Futtergetreide vermarktet werden.

Einerseits ist bekannt, dass die Bierqualität durch die Gersten- und Malzqualität beeinflussbar ist. Andererseits ist es nur noch selten der Fall, dass Brauerei und Mälzerei in einer Hand sind. Für den Brauer ist es von Interesse, welche Möglichkeiten er innerhalb der Brauerei hat, auf die schwankenden Rohstoffqualitäten zu reagieren. Dabei sollen die Wirtschaftlichkeit und die Bierqualität möglichst optimal gestaltet werden. Der erste Schritt in der Brauerei ist die mechanische Zerkleinerung des Malzes über die Schrotung. Im folgenden Kapitel wird am Beispiel einer Nassschrotung über eine 2-Walzenmühle beschrieben, wo die technischen Grenzen dieses Schrotsystems liegen. Wenn man das Bruchverhalten des Malzes kennt und die technischen Möglichkeiten der Schrotung überblickt, können neue Schrotungskonzepte entwickelt werden. Einige werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

Quellen

Praxisversuche während der Industrietätigkeit und eine eigene Veröffentlichung [23]

4 Schroten

Die Herstellung von Bier erfordert eine Reihe verfahrenstechnischer Arbeitsschritte, die heute mit modernster Anlagentechnik durchgeführt werden. Wesentliche Bedeutung kommt dabei der optimalen Zerkleinerung der stärkehaltigen Cerealien (z.B. Gerste, Weizen, Hafer, Dinkel, Roggen als Malz oder Rohfrucht sowie Reis und Mais) zu Beginn des Brauprozesses zu.

Die Zerkleinerung von Malz ist mit einem Erhöhen des Dispersitätszustandes verbunden, was zu einer Vergrößerung der Oberfläche des Körnerkollektivs, einer Verkleinerung der Weglänge der erforderlichen Stofftransportvorgänge und einer Freilegung des Substrates für den enzymatischen Abbau beim Maischen führt. Da die Schrotzusammensetzung die Läutereigenschaften des Treberkuchens beeinflusst, sind Mühlentyp und Mühleneinstellung auf das Würzetrennsystem abzustimmen [21, 106],

Hinsichtlich der Zerkleinerung kommt es zum einen darauf an, das Innere der Malz- oder Getreidekörner so gut wie möglich aus den Kornhüllen auszumahlen, um die nachfolgenden Extraktions- und Lösungsvorgänge zu erleichtern. Zum anderen soll aber die überwiegend aus Cellulose bestehende Kornhülle , besonders beim Läuterbottich, weitestgehend in ihrer Struktur erhalten bleiben.

Bei zu weitgehender Zerkleinerung verstopfen die Poren des Filterkuchens beim Läutern sehr rasch, so dass wegen der geringeren Porosität auch die Permeabilität abnimmt. Die Folge sind längere Ablaufzeiten des Filtrats und die Notwendigkeit der mechanischen Auflockerung des Filterkuchens. Im Fall zu geringer Ausmahlung kommt es zu Ausbeuteverlusten, da die an den Kornschalen haftende Stärke zusammen mit diesen verworfen wird. Um nun hinsichtlich der genannten Kriterien geeignete Zerkleinerungsqualitäten zu erhalten, setzt man verschiedenste Mühlenarten ein. Derzeit werden meist Hammermühlen und Walzenstühle eingesetzt. Es wird außerdem zwischen einer Nass- und Trockenschrotung unterschieden. Am weitesten verbreitet ist die Verarbeitung mittels eines Walzenstuhls, in dem das trockene Malz durch gegenläufig rotierende Walzenpaare zerkleinert wird. Je nachdem, ob die Mahlwalzen gleich schnell oder mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten rotieren, erfolgt die Kornzerkleinerung bei der Trockenschrotung durch Druck oder durch Druck und Scherung. Die Leistung der Mühle, d. h. wie viel Malz pro Zeiteinheit geschrotet werden kann, hängt von der Länge der Walzen, der Umdrehungszahl, der Riffelung und eventuell der Differentialgeschwindigkeit der Walzen ab. Je nach Anzahl der benötigten Mahlgänge enthalten Trockenschrotmühlen ein bis drei Walzenpaare, weshalb man zwischen Zwei-, Vier-, Fünf- und Sechswalzenmühlen unterscheidet. Dabei sind nach den einzelnen Mahlgängen Schüttel- oder Vibrationssiebe angeordnet mit dem Zweck, fertig ausgemahlene Anteile abzutrennen, so dass nur noch ungenügend aufbereitete Malzanteile weitere Mahlpassagen durchlaufen.

Da es bei dieser Trockenvermahlung leicht zum Bruch der spröden Kornhüllen kommen kann, ist man dazu übergegangen, das Schrotgut vor dem Mahlvorgang zu befeuchten oder gänzlich nass zu vermahlen. Dazu werden entweder Zahnscheibenmühlen, Dispergiermühlen oder Walzenstühle eingesetzt. Bei dem im folgenden Kapitel dargestellten Mühlentyp wird

das Mahlgut lediglich kurz befeuchtet, so dass das Korninnere trocken bleibt, wogegen die zu erhaltende Kornhülle zäh und unempfindlicher gegen Druckbelastungen wird. Durch ein Quetschwalzenpaar mit spezieller Riffelung wird dabei mittels reiner Druckbeanspruchung das Korninnere in einem Mahlgang aus den Schalen herausgelöst.

4.1 Ermittlung der Betriebsgrenzen einer Walzenschrotung mit Weichkonditionierung

Ziel der durchgeführten Experimente [63] war es festzustellen, durch welche Faktoren die Betriebsgrenzen einer Nassschrotmühle beeinflusst werden. Zu diesem Zweck wurde mit Mahlgutdurchsätzen über und unter der Nennschrotleitung von 10 t Malz pro h gearbeitet und dabei insbesondere der Einfluss der Malzförderung hinsichtlich des Mahlergebnisses betrachtet. Weiterhin wurden die Temperaturen des Wassers zur Befeuchtung des Schrotgutes variiert und eine Betrachtung zur Druckbelastung verschiedener Cerealien angestellt.

Für Vorversuche wurde eine Laborschachtweiche verwendet, auf die nicht näher eingegangen wird. Bei der für die Praxisversuche verwendeten Mühle handelt es sich um ein kontinuierliches System in dem das Schrotgut befeuchtet, zerkleinert, und mit Wasser zu einer Suspension vermengt wird (siehe Abbildung 15).

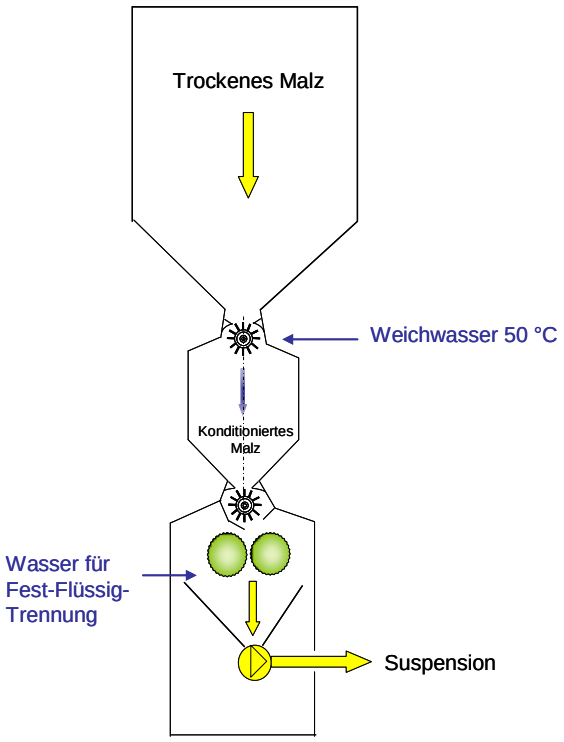


Abbildung 15: Zwei-Walzen-Nassschrotmühle zur Malzzerkleinerung

Speisewalze

Neben der Konditionierung des Schrotgutes spielt vor allem die richtige Speisung der Mahlwalzen eine entscheidende Rolle bei der Zerkleinerung. Diese Aufgabe übernimmt die untere Speisewalze, deren Drehzahl die Schrotleistung (t Malz / h) bestimmt. Im Prinzip

handelt es sich dabei um eine Dosierschleuse. Der Massenstrom zeigt nur bei geringer Drehzahl einen linearen Zusammenhang zu ihr, da der Befüllgrad mit zunehmender Drehzahl kleiner wird. Ab einer bestimmten Drehzahl $n_{kritisch}$ nimmt der tatsächlich geförderte Massenstrom wieder ab, wie Abbildung 16 zeigt. Die Ursache für den abnehmenden Fördermassenstrom bei höheren Drehzahlen liegt darin, dass bei einem rotierenden Austragsorgan die Zentrifugalkraft den Einfüllvorgang behindert. Bei Versuchen mit Zellenradschleusen konnte außerdem beobachtet werden, dass bei Überschreitung der kritischen Drehzahl die Zeit für die Befüllung der Zellenradkammern nicht ausreichte [249].

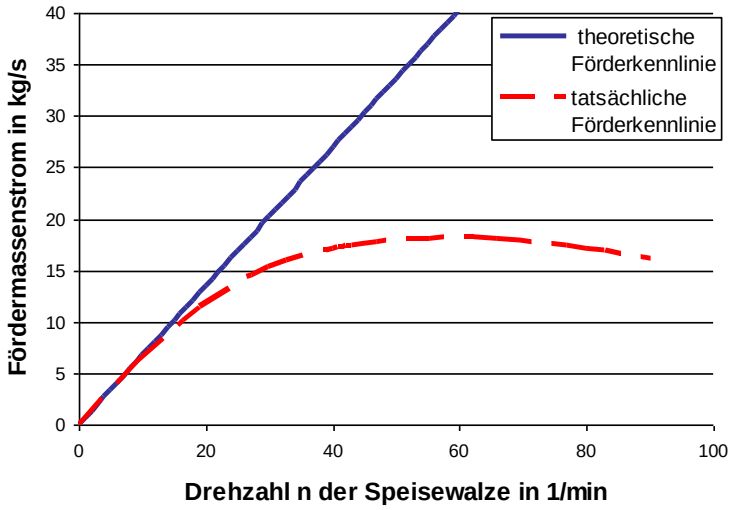


Abbildung 16: Förderkennlinie der unteren Speisewalze

Um eine Kontrolle bezüglich der Qualität der Zerkleinerung zu erhalten, wurden die ausgelaugten Schrotrückstände im Labor einer weiteren Extraktion unterzogen. Der so erhaltene aufschließbare Extrakt zeigt an, wie viel Stärke noch an den Kornhüllen haftete bzw. ob eine ausreichende Ausmahlung des Korninneren erfolgt ist. Je niedriger also die erhaltenen Restextraktwerte in den Feststoffrückständen (Treber) sind, desto besser war die Zerkleinerung. Des weiteren wurden auch Veränderungen des Mahlspaltes durch eine parallel zu den Mahlwalzen installierte Sonde erfasst und die dabei anfallenden Daten aufgezeichnet. Abbildung 17 zeigt den Verlauf der bei den Versuchen aufgetretenen Mahlspaltänderungen. Bereits kurz nach dem Anlaufen des Mahlvorganges weitet sich der Mahlspalt um 0,1 - 0,3 mm infolge der mechanischen Belastung. Die Walzen werden durch das Malz auseinandergedrückt. Die Summe aller mechanischen Toleranzen der Lagerung ist hierfür verantwortlich. Dies ist bei der gegebenen mechanischen Konstruktion unvermeidbar. Eine zusätzliche Informaton erhält man durch die Breite der Kurven. Je schwankender die Aufweitung des Mahlspaltes ist, desto schwankender sind die Beschickung und die mechanische Belastung der Mühle.

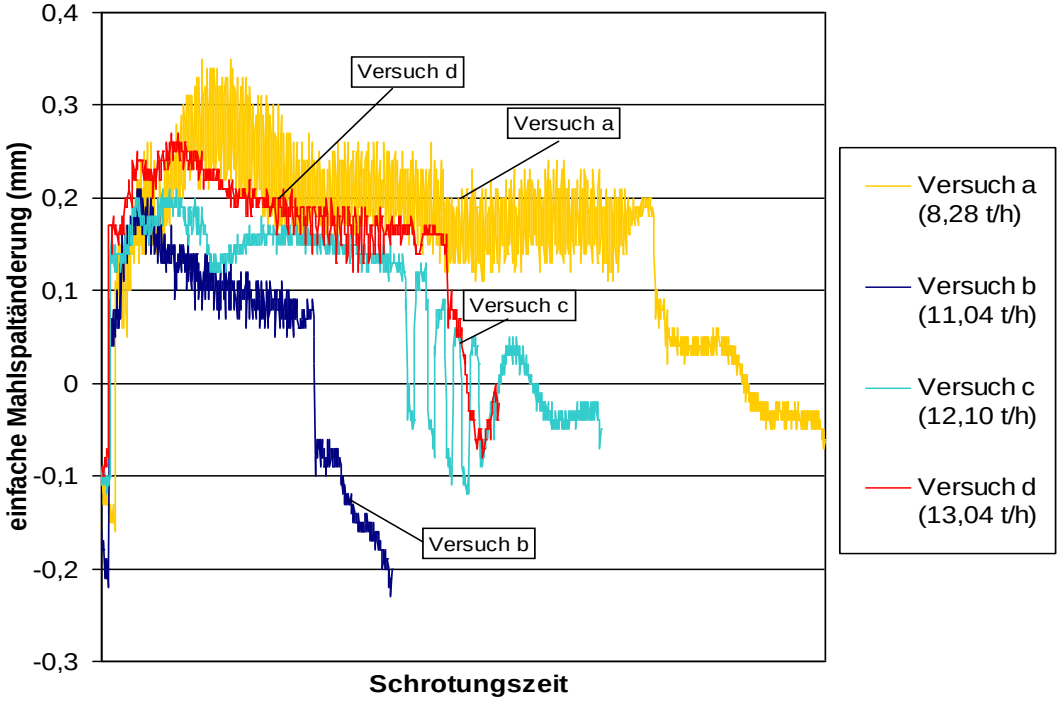


Abbildung 17: Mahlspaltänderungen während der Versuche mit variierten Schrotleistungen

Ursache für das stärkere Öffnen des Mahlspaltes bei Versuch a ist, dass infolge der sehr niedrigen Speisewalzendrehzahl das Malz pulsierend den Quetschwalzen zugeführt wird und somit eine Schwellbeanspruchung entsteht. Die Analyse des Aufschließbaren Extraktes zeigt, dass bei Versuch a mit der niedrigen Schrotleistung weit mehr ungelöste Stärke in den Kornhülsen haften bleibt und somit verloren ist. Das beste Ergebnis (= minimaler Restextrakt in den Trebern) korreliert dabei mit der niedrigsten Amplitude der Mahlspaltschwingung.

Damit ergibt sich für die Mühle ein definierter Arbeitsbereich in dem Speisung und Mahlarbeit optimal verlaufen. Die Auslegung der Speisewalze und somit die Größe der Kammern muss auf den Mahlgutdurchsatz abgestimmt werden. Dabei darf einerseits nicht mit zu geringen Speisewalzendrehzahlen gearbeitet werden, da es sonst zu einem stoßweisen Eintritt des Schrotguts in die Mahlzone kommt, zum anderen müssen zu hohe Malzdurchsätze vermieden werden, um auch bei Schwankungen der Rohstoffeigenschaften ein sicheres Betriebsverhalten garantieren zu können.

Weichwassertemperatur

Bei Konditionierung des Schrotgutes in der untersuchten Mühle ist man unabhängig von der Anfangsfeuchtigkeit des Mahlgutes, da durch Überschuss des Weichwassers und dessen Aufnahme bis zur Sättigung der Spelzenkapillaren der maximal mögliche Wassergehalt erreicht werden kann. Bei Konditionierung des Malzes für Trockenschrot ist man hierbei begrenzt (max. Wasseraufnahme 1,0-1,3 %), da ansonsten Probleme mit der Siebfraktionierung innerhalb der Mühle auftreten. Dennoch wird in der Literatur darauf hingewiesen, dass die Temperaturen des Konditionierwassers einen Einfluss auf die Feinheit der entstehenden

Schrotprodukte haben [335]. Um diesbezüglich weitere Anhaltspunkte zu erhalten wurden Versuche mit Weichwassertemperaturen von 50 - 65 - 75 °C durchgeführt.

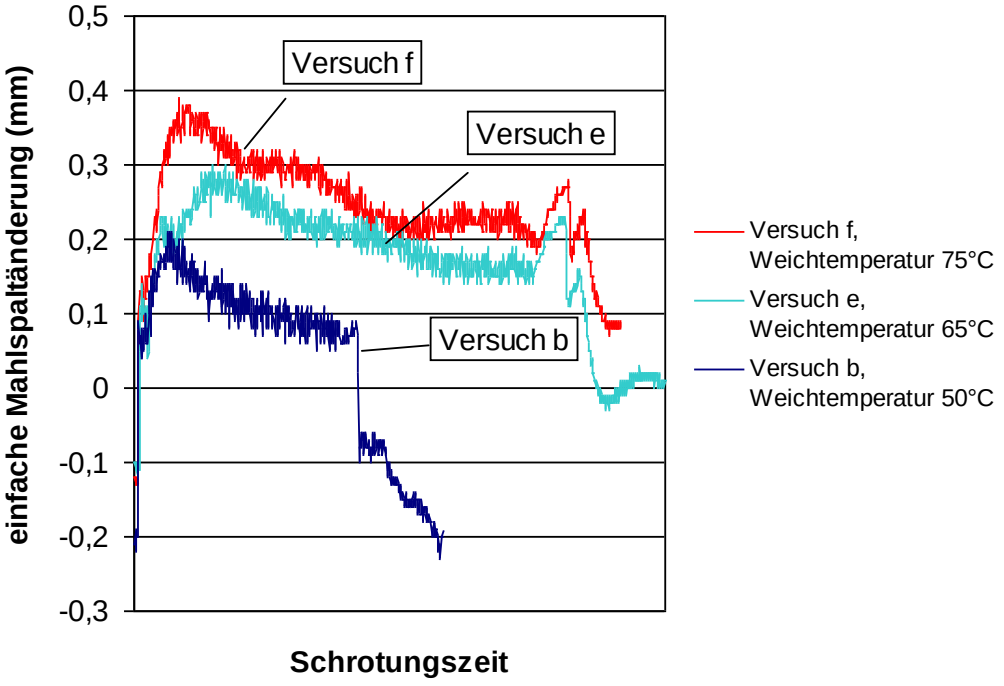


Abbildung 18: Mahlspaltänderung bei Variation der Weichwassertemperatur

Aus Abbildung 18 ist ersichtlich, dass sich der Mahlspalt umso stärker weitet, je höher die Weichwassertemperatur ist. Der Grund dafür könnte möglicherweise eine intensivere Wasseraufnahme in den Kapillaren der Körner sein. Eventuellbar ergeben sich also bei höheren Temperaturen Änderungen in der Bruchmechanik, die ein Aufweiten des Mahlspaltes bewirken. In Bezug auf die Ausbeute bzw. die Qualität der Ausmahlung waren keine bedeutenden Einflüsse der erhöhten Weichwassertemperaturen feststellbar. Bei 75°C trat allerdings erneut ein leichter Anstieg der Extraktwerte in den Trebern auf, der auf eine thermische Inaktivierung, der vorzugsweise in der Aleuronschicht lokalisierten, Enzyme hindeutet.

Druckversuche

Zur Einschätzung von Trends der auftretenden Mahlkräfte wurden Druckversuche mit verschiedenen und auch verschieden konditionierten Cerealien durchgeführt. Diese Versuche spiegeln nicht exakt die Bruchmechanik in den Mahlwalzen wieder. Durch den Synchronlauf der Walzen bei diesem besonderen Verfahren, ist die Beanspruchung des Kornes- sofern es durch Haftreibung eingezogen wird - eine reine Druckbeanspruchung. Somit lassen sich die bereits erwähnten Trends für die real auftretenden Kräfte ermitteln. Damit ein Partikel zerkleinert wird müssen zunächst Brüche entstehen, die sich schließlich durch das ganze Korn ausbreiten. Dazu ist unter anderem die Beanspruchung des Partikels durch das Zerkleinerungswerkzeug, die Verformung des Kornes und das Vorhandensein von Anrissen nötig [290]. Vor allem das Mahlgut selbst stellt den wichtigsten Faktor für die auftretenden Kräfte dar. Schwankungen der Leistungsfähigkeit einer Zerkleinerungsmaschine sind oft allein bei geringem Verändern des Aufgabeguts unvermeidlich [310].

Um eine Vorstellung zu erhalten, welche Druckkräfte auf eine Körnerschicht im Mahlspalt einwirken, wurden Versuche mit einer Druckprüfmaschine und verschiedenen stärkehaltigen Cerealien unternommen, wie sie weltweit in der Brau- und Lebensmittelindustrie zum Einsatz kommen. Der quasi-statische Druckversuch wurde in einer Universalprüfmaschine mit einer 50 kN Kraftmessdose durchgeführt. Dazu sind die verschiedenen Mahlgüter einzeln, der Reihe nach, einlagig und homogen auf einer ebenen Fläche ausgebreitet worden. Diese Körnerschicht belastete man mit einem planparallelen zylindrischen Metallstempel von 19,95 mm Durchmesser. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von 10 mm/min wurde der Stempel in die Körnerschicht gedrückt, bis zu einem Restspalt von 0,3 mm, was etwa dem üblichen Mahlspalt der eingesetzten Nassschrotmühlen mit konditionierter Weiche entspricht.

Aus den während der Druckprüfung, von einem xy-Schreiber aufgezeichneten Kraft-Weg-Diagrammen wurden schließlich die Druckbeanspruchungen berechnet. Dabei stellte sich heraus, dass für die nicht geweichten Schrotgüter die größten Druckkräfte aufgewandt werden müssen. Daran zeichnet sich die Tatsache ab, dass die Nassschrotung bzw. Nasszerkleinerung normalerweise mit einem geringeren spezifischen Energiebedarf auskommt als die Trockenvermahlung [338]. Trockenes Weizenmalz setzte der Druckbeanspruchung den größten Widerstand entgegen, was vermutlich auf die kugeligere, kompaktere Form des Kornes zurückzuführen ist. Ähnlich verhält es sich im Fall des Bruchreises. Auf Grund der geringen Größe der Körner sind auch weniger Anrisse vorhanden, die das Korn leichter brechen lassen würden. Eine Abnahme der benötigten Druckkräfte, wie sie bei zunehmender Weichzeit zu vermuten wäre, ergab sich nicht. Es zeigten sich hierbei nur geringfügige Abweichungen bei den Flächenpressungen. Auch bei den Gerstenpartien mit unterschiedlicher Mehlkörperbeschaffenheit wurden Messergebnisse erhalten, die in der Form nicht zu erwarten waren. Obwohl bei gut gelöstem Malz die Zellwände im Korninneren weitgehender abgebaut sind als bei schlechter gelöstem Malz, wurden dennoch bei ersterem die größeren Druckkräfte gemessen.

Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist der raschere Zerfall des besser gelösten Mehlkörpers in feinere Bestandteile, die einen größeren Druckwiderstand aufweisen als die groben Partikel eines schlechter gelösten Malzes. Ungewöhnlich ist auch, dass ungeweichtes Malz der Druckbeanspruchung offenbar einen höheren Widerstand entgegensetzte als unvermälzte Gerste. Der Grund dafür könnte das elastischere Verhalten des Gerstenkornes sein. Bei nachträglicher Dickenmessung der gedrückten Rohgerstenkörner fiel auf, dass nach der Druckentlastung eine Rückdehnung von 0,3 mm auf 1 mm erfolgte. Dies hat Folgen auf die Verarbeitbarkeit von unvermälzter Gerste, wie in Kapitel 5.3, S. 77 gezeigt wird.

Neben den technischen Aspekten einer Schrotung, welche entscheidend für das Mahlergebnis und die Ausbeute sind, müssen auch technologische Aspekte betrachtet werden. Das meist verbreiteste Braugetreide ist die bespelzte Gerste. Bei der Keimung schiebt sich der Blattkeim zwischen Endosperm und Spelze. Während der Wurzelkeim nach dem Darren entfernt wird, bleibt der Blattkeim im Malz erhalten. Dieser Aspekt wird im folgenden Kapitel näher betrachtet.

Quellen

Diplomarbeit von Friedrich Ferstl sowie eigene Veröffentlichungen [63, 64]

4.2 Einflüsse der Schrotung auf die Lipidoxidation

In der Gerste befinden sich Lipide in einer Menge von 2,2-2,5 % in der Trockensubstanz. Die Gerstenlipide setzen sich zusammen aus ca. 70 % Neutrallipiden (89-96 % Triacylglyceride), 20% Phospholipiden und 10% Glycolipiden. Bei den vorliegenden Triacylglycerinen 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°%). Bei der Vermälzung der Gerste sinkt der Rohfettgehalt durch die Atmungsvorgänge und die Ausbildung von Blatt- und Wurzelkeim um 20-27 %. Dabei verschiebt sich die Zusammensetzung der Triglyceride zu den mehrfach ungesättigten Fettsäuren Linolsäure und Linolensäure [89, 216].

Der enzymatische Lipidabbau erfolgt einerseits durch die Enzyme des Malzes (Lipasen, Lipoxygenasen etc.), andererseits werden die freien oder als Ester gebundenen Fettsäuren durch Autoxidation und Photooxidation zu Carbonylen abgebaut. In Abbildung 19 sind die möglichen Wege des Lipidabbaus schematisch dargestellt.

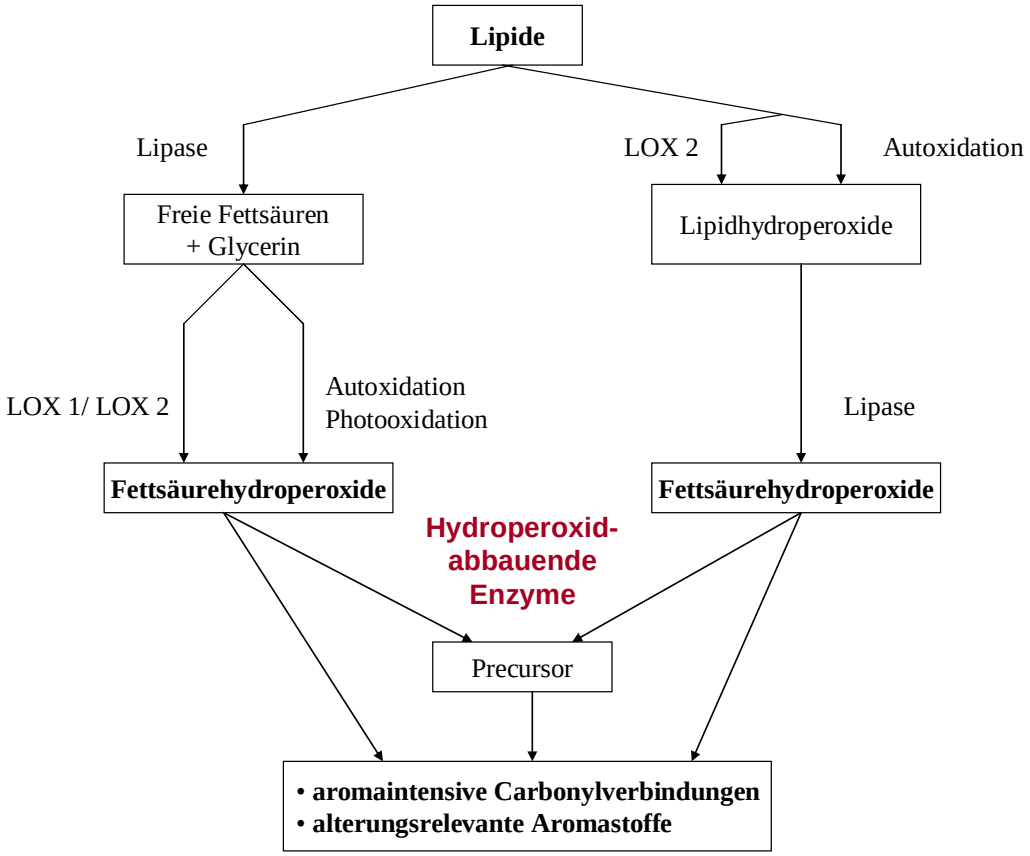


Abbildung 19: Wege des Lipidabbaus

Abbildung 20 zeigt Enzyme des Lipidabbaus und ihre Abbauprodukte [65].

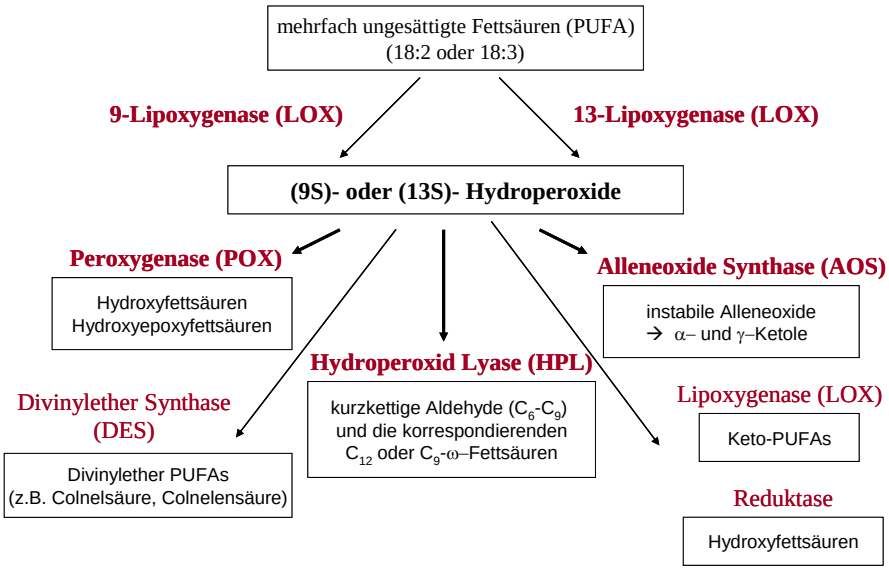


Abbildung 20: Enzyme des Lipidabbaus

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 sowie gebildete Zwischenprodukte bis ins abgefüllte Bier gelangen [34, 90, 136, 170, 181, 300].

Vor allem der Gehalt an Mono-, Di- und Trihydroxyfettsäuren in Würze und Bier war Thema zahlreicher Forschungsarbeiten hinsichtlich ihres Einflusses auf die Geschmacks- und Schaumstabilität des Bieres. Publikationen haben gezeigt, dass die Hefe beim Abbau von Fettsäuren und deren Oxidationsprodukten streng differenziert, insbesondere in Bezug auf die Stereochemie [301]. Damit konnte den Mono- und Dihydroxyfettsäuren eine große Bedeutung im Hefestoffwechsel nachgewiesen werden und es wäre von Vorteil, die enzymatischen Lipidabbauprodukte bereits im vorangehenden Prozessschritt, der Würzebereitung, beeinflussen zu können. Es wurden die Einflussfaktoren Sorte und Provenienz sowie die Malz- und Schrotbehandlung untersucht.

Untersuchung des Blattkeims von Gerstenmalz

Als Ausgangsmaterial des Aufbereitungsverfahrens diente der Siebdurchgang eines Steinauslesers einer Brauerei. Dieser bestand überwiegend aus Blattkeimen und anderem Feingut der Malzschüttung (Bruchkorn, Spelzenbestandteile, Schwergut und anderen Fremdkörper). Durch zweifache Siebung wurde die Fraktion 500 µm < x < 1250 µm abgetrennt, die sich hauptsächlich aus Blattkeimen, Grießen und Spelzenbestandteilen zusammensetzte. Zur Abtrennung von Bruchkorn und Grießen wurde die erhaltene Fraktion mit einem Trieur weiter aufgereinigt. Die am Ganzkornabgang austretenden Blattkeime wiesen bis auf einige Spelzensplitter keine nennenswerten Verunreinigungen mehr auf. Um auch diese abzutrennen, musste die Fraktion mit einer Feinschrotmühle zerkleinert werden. Das Schrot ließ eine weitgehende und selektive Zerkleinerung der mürben Blattkeime erkennen, während Spelzen nahezu unversehrt blieben. Durch anschließende Siebung des Schrotes bei 500 µm konnten die Spelzen nahezu vollständig entfernt werden

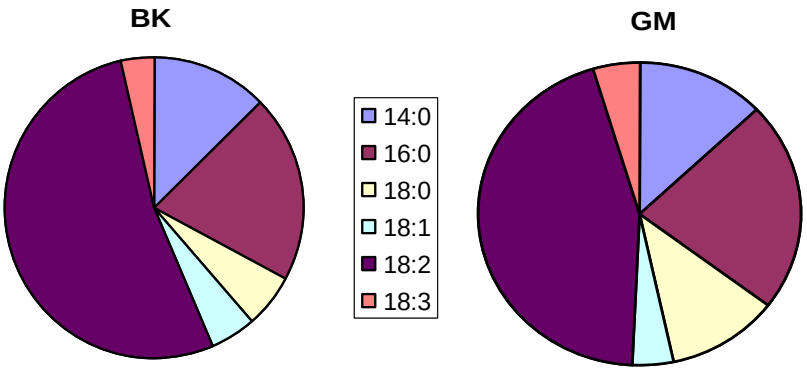
Die Zusammensetzung des gewonnenen Blattkeimmaterials sowie des Ausgangsmalzes sind in Tabelle 4 aufgeführt. Der Anteil des Blattkeims an der Gesamtmasse des normal gelösten Malzes betrug 4,8 %. Die Blattkeimfraktion zeigte im Vergleich zum Ausgangsmalz geringere Werte im Extrakt und in der Kolbachzahl, ein Maß für den löslichen Anteil am Gesamtstickstoff. Mindestens doppelt so hohe Werte in der Blattkeimfraktion zeigten der Eiweißgehalt, der lösliche Stickstoff sowie der Freie Aminostickstoff. Im Blattkeim angereichert sind auch Fette und Zink sowie DMS-P. Der DMS-Precursor S-methyl-Methionin entsteht im Zuge der Aminosäuresynthese während der Keimung und ist vorwiegend in den Keimlingen lokalisiert. Es ist bekannt, dass Weizenmalzwürzen und -biere einen geringeren Gehalt an DMS-P haben. Weizen ist unbespelzt, sodass bei der Malzentkeimung nach dem Darren nicht nur die Wurzelkeime, sondern auch die Blattkeime entfernt werden. Da in den Keimlingen der DMS-Precursor akkumuliert ist, erfolgt bei Weizenmalz eine stärkere Abreicherung von DMS-P als bei Gerstenmalz.

Tabelle 4: Zusammensetzung von Blattkeim und Ausgangsmalz

	Blattkeim	Malz
Extrakt [GG-% TrS.]	68,1	78,7
Wasser [GG-%]	6,8	5,1
Protein [% TrS.]	28,4	11,1
Lösl. N [mg/100 g TrS.]	1699	751
Kolbachzahl [%]	37	42
FAN [mg/100g TrS.]	303	164
Friabilimeter Mürbigkeit [%]	100	84,6
Rohfett [GG-%]	2,0	1,6
Rohfaser [GG-%]	3,6	3,3
DMS-P [mg/kg]	20,5	6,3
Zink [mg/100g TrS.]	5,03	1,31

Um über die Verteilung der LOX-Aktivität im Malzkorn eine Aussage treffen zu können, wurde die Nacktgerstensorte *Taiga* vermälzt. Dem unbespelzten Darrmalz konnten beim Malzpolieren neben den Wurzelkeimen nahezu alle Blattkeime abgetrennt werden. Die Verteilung der LOX auf die Fraktionen Blattkeim, Wurzelkeim und Restkorn zeigt, dass etwa ein Viertel der LOX-Aktivität des Darrmalzes in den Blattkeimen, ein Viertel in den Wurzelkeimen und die restlichen 50 % im Restkorn nachgewiesen werden können. Bezogen auf das geputzte Darrmalz, welches üblicherweise keine Wurzelkeime enthält, entfällt mehr als ein Drittel der LOX-Aktivität des gesamten Malzkornes auf den Blattkeim.

In einem Kaltwasserauszug aus Blattkeimen waren deutlich höhere Konzentrationen an freien Fettsäuren festzustellen als im Ausgangsmalz, wie Abbildung 21 zeigt. Dies gilt insbesondere für die ungesättigten Fettsäuren Ölsäure und Linolsäure.



	14:0	16:0	18:0	18:1	18:2	18:3	Summe
BK	1,50	2,42	0,70	0,58	6,32	0,44	**11,96**
GM	1,06	1,84	0,94	0,34	3,68	0,38	**8,24**

Abbildung 21: Prozentuale Verteilung der freien höheren Fettsäuren in einem Kaltwasserextrakt aus Blattkeimen (BK) und Gerstenmalz (GM); Tabellenangaben in mg/l

Einfluss von Sorte und Provenienz auf die LOX-Aktivität

Die LOX-Aktivität und das LOX-Potenzial von Braumalz variieren in einem weiten Bereich. Es wurde eine Untersuchung der LOX-Aktivität von sechs verschiedenen Gerstensorten aus sieben unterschiedlichen Anbaugebieten, die unter standardisierten Mälzungsbedingungen zu hellem Gerstenmalz verarbeitet wurden, durchgeführt.

Aus dem Verhältnis der Mittelwerte der LOX-Aktivität der gelpermeationschromatographisch abgetrennten LOX-Fraktion zur LOX-Aktivität des Rohextraktes wurde zusätzlich das LOX-Potenzial ermittelt. Für die Sorte konnte mittels Varianzanalyse ein hochsignifikanter Einfluss ($\alpha = 0{,}01$) auf die LOX-Aktivität des Rohextraktes gefunden werden und für das Anbaugebiet ein signifikanter Einfluss ($\alpha = 0{,}05$) auf die LOX-Aktivität der aufgereinigten LOX-Fraktion.

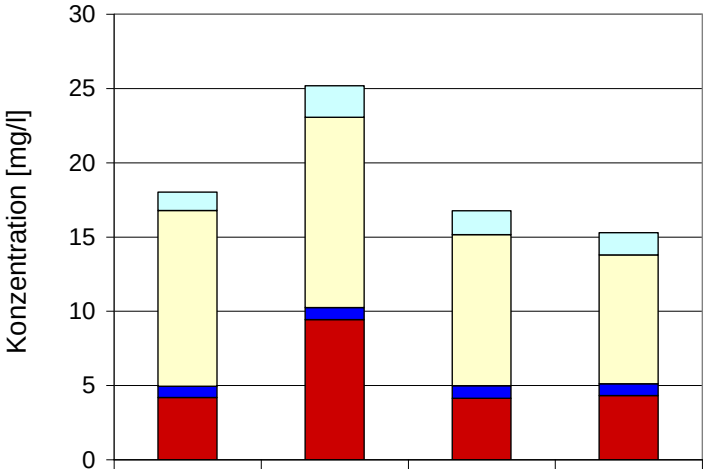
Einfluss der Malzlagerung auf die LOX Aktivität

Der Einfluss der Lagerzeit und der Lagerbedingungen auf die LOX-Aktivität von Malz wurden an einem frisch abgedarrten hellen Gerstenmalz der Sorte *Alexis* untersucht. Die Lagerung des Malzes über einen Zeitraum von zwei Monaten bei Raumtemperatur war mit einer Abnahme der LOX-Aktivität um etwa 30 % verbunden. Dabei konnte kein Unterschied zwischen einer Lagerung unter CO_2-Atmosphäre gegenüber einer Lagerung unter Luftsauerstoff festgestellt werden. Durch Einfrieren des Malzes (-18 °C) blieb die LOX-Aktivität innerhalb des Untersuchungszeitraums nahezu unverändert.

Einfluss der Schrotlagerung auf die LOX-Aktivität

Um den Einfluss der Schrotaufbewahrung auf die Lipidoxidationsvorgänge im Schrot zu untersuchen, wurde Malz einer Malzcharge zu verschiedenen Zeitpunkten geschrotet und nach einer Aufbewahrungszeit von bis zu zehn Tagen eingemaischt. Die Aufbewahrung der Laborfeinschrote erfolgte trocken und dunkel bei Raumtemperatur. In der Maischeprobe, die am Ende der 72 °C-Rast eines Standardmaischverfahrens genommen wurde, zeigten sich auffällige Veränderungen der höheren ungesättigten Fettsäuren sowie deren Hydroperoxide. In den ersten sechs Stunden der Schrotlagerung konnten in den Würzen Zunahmen bei den Fettsäuren, insbesondere bei der Linolsäure und den Fettsäurehydroperoxiden festgestellt werden. Nach einer Schrotlagerdauer von 60 Stunden lagen die Konzentrationen in der

Maische wieder nahe beim Ausgangsniveau. Lediglich bei den Fettsäurehydroperoxiden sanken die Werte mit längeren Schrotlagerungszeiten weiter. Aus der Linolsäure entsteht das Linolsäurehydroperoxid (HPOD), aus Linolensäure das Linolensäurehydroperoxid (HPOT).



	0 h	6 h	60 h	240 h
HPOT	1,2	2,1	1,6	1,5
HPOD	11,8	12,8	10,2	8,7
18:3	0,8	0,8	0,8	0,8
18:2	4,2	9,4	4,1	4,3

Abbildung 22: Konzentration der höheren ungesättigten Fettsäuren sowie deren Hydroperoxide in Maische in Abhängigkeit der Schrotlagerdauer, Linolsäurehydroperoxide (HPOD) und Linolensäurehydroperoxide (HPOT), Linolsäure (18:2) und Linolensäure (18:3)

Einfluss der Schrotungstemperatur auf die LOX-Aktivität

Von Bedeutung für die Oxidation der Malzlipide bei der Schrotlagerung ist auch die Temperatur des Schrotes bei der Zerkleinerung, wie im Folgenden gezeigt werden soll. Verglichen wurde das Schrot einer Fächerschlägermühle (FM), welches unmittelbar nach der Zerkleinerung eine Schrottemperatur von über 50 °C aufwies, mit dem Schrot einer wassergekühlten Analysenmühle (AM), welches eine Schrottemperatur von unter 20 °C aufwies. In Abhängigkeit von der Schrotlagerungszeit beider Schrote vor dem Einmaischen wurden in der Maische nach 5 Minuten die HPOD-Konzentrationen gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 grafisch dargestellt.

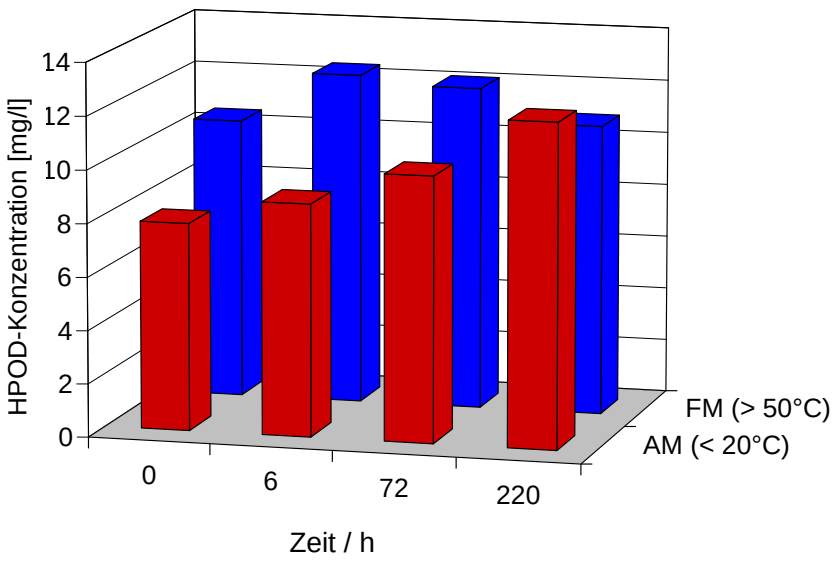


Abbildung 23: Konzentration der Linolsäurehydroperoxide (HPOD) in Maische in Abhängigkeit von der Temperatur des Schrotes und der Schrotlagerdauer (Maischdauer 5 min, Maischtemperatur 50 °C); FM: Fächerschlägermühle, AM: Analysenmühle

Eine höhere Schrotungstemperatur führte zu höheren Hydroperoxidkonzentrationen beim Einmaischen. Während das warm geschrotete Malz bereits nach 6 Stunden Schrotlagerzeit sein Maximum an Hydroperoxiden erreichte, konnte bei dem kalt geschroteten Malz noch nach 9 Tagen eine Zunahme der Hydroperoxide gefunden werden.

Einfluss der Schrotfeinheit auf die LOX-Aktivität

Der Einfluss der Schrotfeinheit auf die Lösung von LOX beim Maischen wurde in isothermen 50 °C-Maischen untersucht. Dabei konnte eine deutliche Zunahme der LOX-Aktivität mit steigender Schrotfeinheit festgestellt werden, wie aus Abbildung 24 ersichtlich ist. Ein Pulverschrot (Feinprallmühlenschrot) mit einem Feingutanteil von 64 % < 125 µm zeigte 15 Minuten nach dem Einmaischen die höchste LOX-Aktivität. Das etwas gröbere Maischefilterschrot (Hammermühlenschrot) zeigte zu diesem Zeitpunkt nur 84 % und das noch gröbere Läuterbottichschrot (Walzenmühlenschrot) sogar nur 64 % der LOX-Aktivität der Pulverschrotmaische.

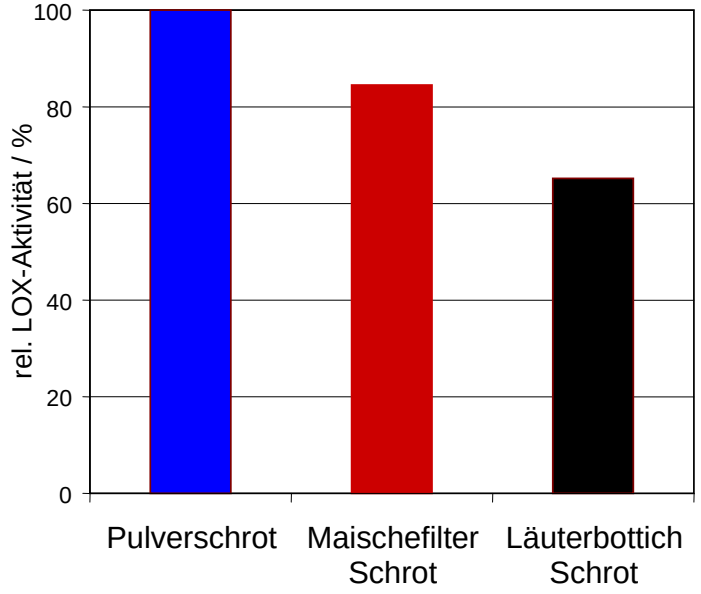


Abbildung 24: LOX-Aktivität beim Maischen in Abhängigkeit der Schrotfeinheit. Aktivitäten (%) bezogen auf die LOX-Aktivität der Pulverschrotmaische; Probenahme 15 min nach Einmaischen (50 °C)

Einfluss der Wassertemperatur bei der Malzkonditionierung auf die LOX-Aktivität

Der Einfluss der Malzkonditionierung mit heißem Wasser (Weichkonditionierung) auf die LOX-Aktivität von Malz wurde für verschiedene Weichwassertemperaturen und Konditionierzeiten untersucht. Eine wirksame Inaktivierung der LOX wurde erst bei einer Temperatur von 80 °C erreicht, wie Abbildung 25 zeigt. Diese Temperatur führte in weniger als 30 Sekunden zu einer Halbierung der Ausgangsaktivität; nach einer Minute betrug die Inaktivierungsrate sogar annähernd 70 %. Weichwassertemperaturen von 50 °C und 65 °C ließen eine vergleichsweise langsame Inaktivierung der LOX erkennen.

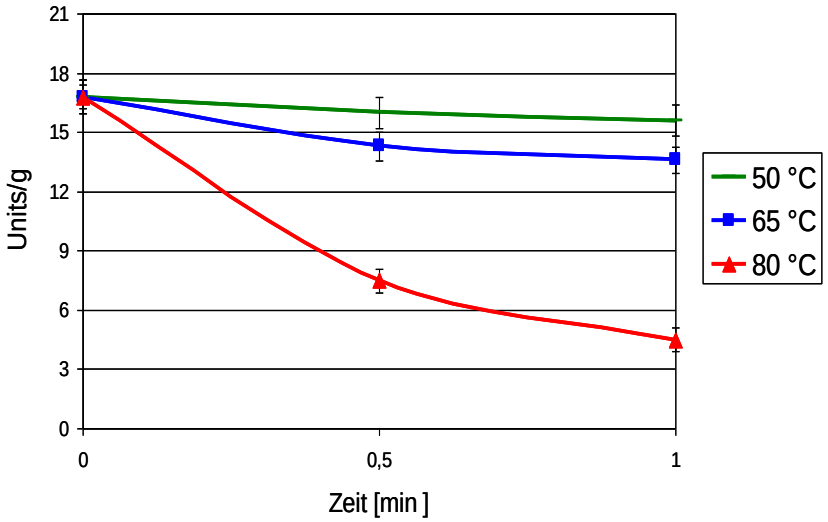


Abbildung 25: Verlauf der LOX-Aktivität von Malz bei der Weichkonditionierung mit unterschiedlichen Weichwassertemperaturen (Gußverhältnis Malz:Wasser = 1:4)

Der Einfluss der Weichkonditionierung bei 80 °C (Heißkonditionierung) auf die Qualitätskriterien von Malz ist in Tabelle 5 zusammengefasst. Auffällige Unterschiede zum Ausgangsmalz zeigten sich lediglich beim β-Glucangehalt der Kongresswürze, was mit einer teilweisen Inaktivierung von Enzymen erklärt werden kann. Der β-Glucangehalt der VZ 65 °C-Würzen, der die zytolytischen Lösungs- und Abbauvorgänge der Praxis besser wiedergibt, zeigte sich dagegen wenig verändert. Die amylolytischen Enzyme des heißkonditionierten Malzes wurden nur wenig geschädigt, so z. B. die Diastatische Kraft, deren Aktivität durch 30 Sekunden „Heißkonditionieren" nur um etwa 7 % abnahm. Auch der Gehalt an löslichem Stickstoff und FAN erfuhr innerhalb dieser Zeit nur eine geringfügige Abnahme von etwa 5 %. Nahezu unverändert zeigten sich Extraktgehalt, pH-Wert, Farbe, Polyphenolgehalt und die Aktivität der α-Amylase.

Tabelle 5: Analysenergebnisse der Malze nach Heißkonditionierung (Dauer der Wasserweiche: 0 bis 60 s; Temperatur des Weichwassers: 80 °C)

	0 s	15 s	30 s	45 s	60 s
Extrakt / % wfr.	81,7	81,9	81,5	81,6	81,7
Wasseraufnahme / %	0	20,1	22,5	23,2	24,2
pH	5,75	5,79	5,79	5,79	5,80
Farbe / EBC	3,5	3,5	3,0	3,5	3,0
lösl. N / mg/l	795	767	750	739	739
FAN / mg/100g MTrS	164	158	156	156	157
β-Glucan (KW) / mg/l	241	310	333	320	329
β-Glucan (65°C-Maische) / mg/l	436	430	455	414	427
Polyphenole / mg/l	178	170	172	169	167
DK / WK	251	237	233	232	224
α-Amylase / ASBC	36	39	37	36	35

Quellen

Doktorarbeiten von Martina Schütz [272] und Joachim Zürcher [339] sowie Diplomarbeit von Mark Schneeberger und eigene Veröffentlichungen [340-342]

4.3 Entwicklung neuer Schrotungstechnologien

Nachdem die Einflüsse der verschiedenen Schrotparameter technisch und technologisch untersucht waren, wurde im Sinne eines „Technologie-Transfers" versucht, neue Schrotungssysteme zu entwickeln und diese im Praxismaßstab zu evaluieren. Da in den Labor- oder Technikumsversuchen nur Teilaspekte systematisch untersucht waren, war es nun interessant zu erforschen, ob sich signifikante Auswirkungen bis zum fertigen Bier ergeben. Ziel war es die Qualität (z. B. Geschmacksstabilität des Bieres und Filtrierbarkeit) oder die Quantität (Ausbeute) zu erhöhen.

4.3.1 Untersuchung neuer Schrotungs- und Einmaischtechniken im industriellen Maßstab

In ausgewählten Brauereien, in denen verschiedene Schrotungs- und Einmaischsysteme unter nahezu identischen Maischbedingungen anzutreffen waren, wurden vergleichende

Brauversuche durchgeführt. Außerdem wurde der Einfluss der Schrotlagerung und der Weichkonditionierung von Malz mit 80-grädigem Wasser auf die Würze- und Bierqualität in Praxisversuchen untersucht. In einer Altbierbrauerei wurde schließlich der Einfluss der Maischparameter auf die Geschmacksstabilität von Altbier betrachtet.

Vergleich einer Malzzerkleinerung mittels Nassschrotung (Dispergiermühle) und einer Trockenschrotung (Hammermühle)

Die Untersuchung wurde in einer Brauerei durchgeführt, die über einen Maischefilter verfügte und für die Malzzerkleinerung einerseits eine Hammermühle (HM) sowie alternativ eine Dispergiermühle (DP) verwendete. Dabei wurden jeweils drei Sude eines Schrotungssystems zu einer Sudgruppe zusammengefasst und nach einem einheitlichen Brauverfahren bis zum fertigen Bier verarbeitet.

Die beiden Schrotungssysteme zeigten auffällige Unterschiede beim Lösen der LOX während des Einmaischvorganges, wie aus Abbildung 26 zu ersehen ist. Während in den Maischen der Hammermühlenschrote schon zu Beginn des Einmaischvorganges die höchste LOX-Aktivität festgestellt wurde, erreichten die Dispergiermaischen ihr Maximum erst am Ende des Einmaischens.

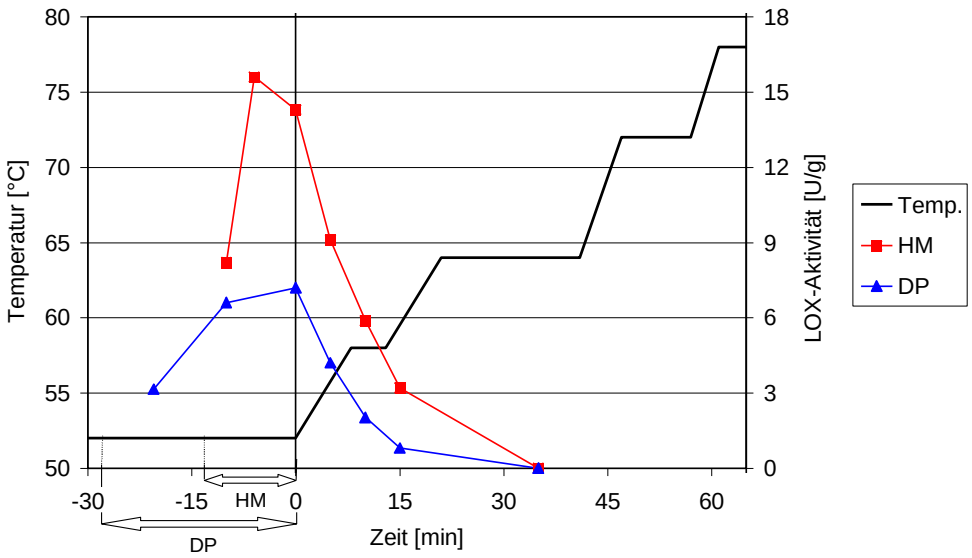


Abbildung 26: Temperaturverlauf und Verlauf der LOX-Aktivität beim Maischen; Mittelwerte (n = 6); HM = Hammermühlenmaische, DP = Dispergiermaische, (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges

Eine Untersuchung der unlöslichen Maischebestandteile zum Ende des Einmaischens (t = 0) zeigte, dass in den Grießen der Dispergiermaischen noch ein hoher Anteil der LOX-Aktivität in ungelöster Form vorhanden war. Bezogen auf die Gesamt-LOX-Aktivität der Maische, als Summe der LOX-Aktivität von flüssiger und fester Phase, betrug der Anteil ungelöster LOX in der Dispergiermaische etwa 42 %, in den Grießen der Hammermühlenmaische lag er dagegen bei etwa 10 %. Die gröbere Schrotung erbrachte somit eine verzögerte Lösung der LOX.
Allein durch eine optische Beurteilung der Maische konnte eine gröbere Zusammensetzung der Dispergiermaische festgestellt werden. In den Trebern der Dispergiersude lag der

aufschließbare Extrakt durchschnittlich bei 0,9 GG-% bez. 80 % Wassergehalt weit über dem Wert der Hammermühle mit 0,5 GG-%. Normwert nach MEBAK ist 0,8 GG-% [3].

Die Biere der beiden Schrotungssysteme unterschieden sich kaum in den Analysenmerkmalen Farbe, pH-Wert, Vergärungsgrad, Konzentrationen an löslichem Stickstoff, Diacetyl-Gehalt, Lag-Time, Alterungskomponenten, Schaumhaltbarkeit und chemisch-physikalische Stabilität. Das Bier des Dispergierverfahrens zeigte, wie bereits die entsprechenden Würzen, einen höheren photometrischen Jodwert, was sich mit der gröberen Schrotung und der höheren LOX-Aktivität in den Grießen deckt. Bei einer Verkostung der Biere nach DLG-Schema wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt, obwohl die Biere der Hammermühlensude als etwas runder und ausgewogener beschrieben wurden. Die Alterungsverkostung zeigte eine geringfügig bessere Geschmacksstabilität des Dispergierbieres, die sich auch in einer etwas besseren Alterungsakzeptanz dokumentierte.

Die Bierqualität betreffend konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schrotsystemen festgestellt werden.

Vergleich einer Malzzerkleinerung mittels Hammermühle und einer kombinierten Walzen- und Hammermühlenzerkleinerung

Der Vergleich konnte in einer Brauerei durchgeführt werden, welche zur Herstellung des Maischefiltertrockenschrots sowohl eine Hammermühle (HM) als auch eine Sechswalzenmühle (6-WM) einsetzt. Bei dem Schrotsystem mit der 6-WM wurden die über eine Zentrifugal-Siebmaschine abgetrennten Spelzen in einer Hammermühle nachzerkleinert. Die Schrotsortierung ließ eine etwas höhere Feinheit der Hammermühlenschrote gegenüber dem Gesamtschrot der kombinierten Zerkleinerung erkennen.

Der aus jeweils drei Suden ermittelte Verlauf der LOX-Aktivität in Maische ist in Abbildung 27 dargestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass die LOX während des Einmaischens bei 58 °C und zu Beginn des Maischprozesses in der Maische des Hammermühlenschrotes rascher in Lösung gegangen ist, dass aber auch die Inaktivierung der LOX anfangs deutlich schneller verlief als in der Maische des 6-WM + HM-Schrotes.

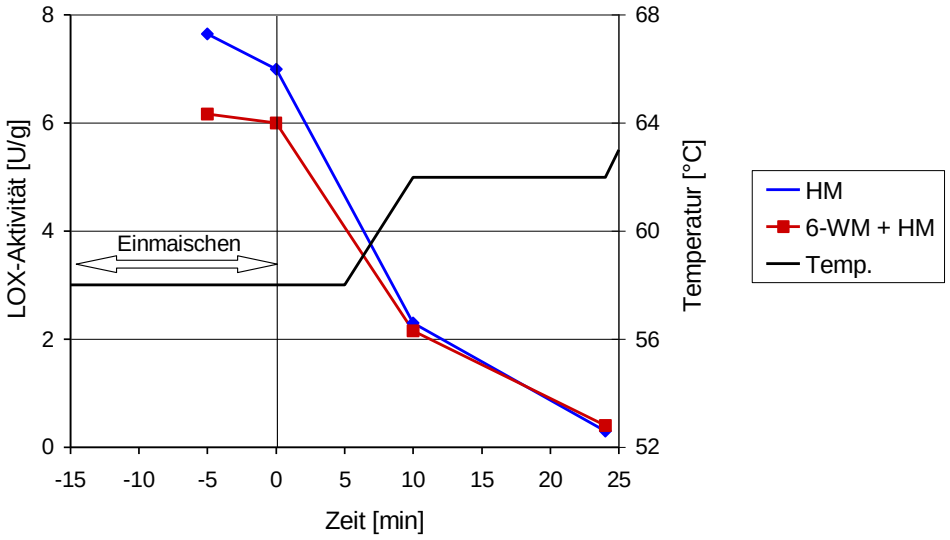


Abbildung 27: LOX-Aktivität beim Maischen, Mittelwerte (n = 3); HM = Hammermühle, 6-WM = Sechswalzenmühle, (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges

Einfluss der Heißkonditionierung von Malz auf die Bierqualität

Versuche mit einer Heißkonditionierung von Malz wurden in einer Brauerei durchgeführt, die über eine Nassschrotmühle mit Weichkonditionierung verfügte. Bei einer Gesamtschüttung von 7,7 Tonnen betrug die Dauer des Zerkleinerungs- und Einmaischvorgangs durchschnittlich 22 Minuten. Für die Untersuchungen wurden sieben Sude mit einer Weichwassertemperatur von 80 °C und sieben Sude konventionell mit einer Weichwassertemperatur von 65 °C eingebraut. Die Temperatur der restlichen Hauptgussmenge wurde so angepasst, dass bei allen 14 Suden nach der Wasserzugabe eine einheitliche Einmaischtemperatur von 58 °C erreicht wurde. Die sieben Würzen der Versuchs- und der Vergleichssude wurden in je einem Gärtank mit Erntehefe angestellt und separat bis zum fertigen Bier weitergeführt.

Innerhalb von 15 Minuten bei 58 °C war eine deutliche Reduzierung der LOX-Aktivität der Maische festzustellen, wie aus Abbildung 28 zu ersehen ist. Die LOX-Aktivität der aus den heißkonditionierten Malzen hergestellten Maischen lag von Anfang an niedriger als in den Vergleichsmaischen, und zwar um 22 % nach 5 Minuten bzw. um fast 30 % nach 15 Minuten.

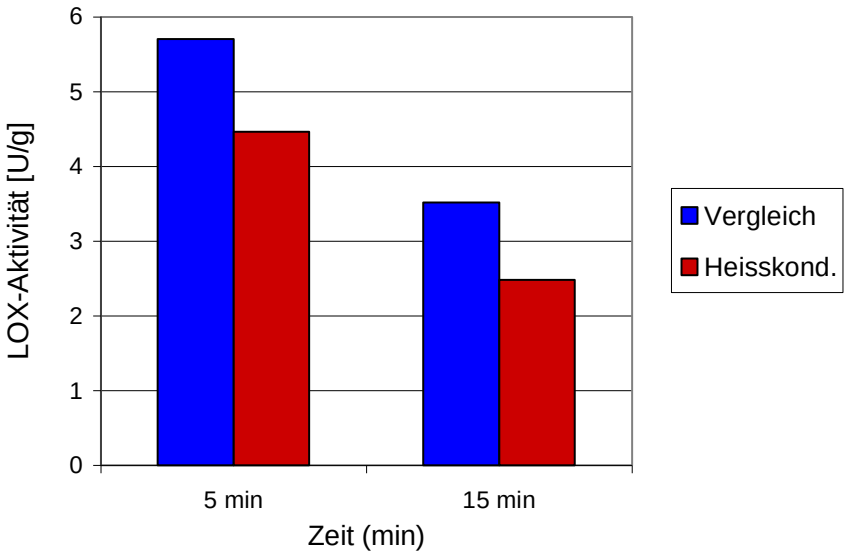


Abbildung 28: LOX-Aktivität in Maische nach Weichkonditionierung bei 65 °C bzw. 80 °C (Heißkonditionierung); Mittelwerte (n = 7)

Negative Folgen im Sudprozess aufgrund der geänderten Einmaischtechnologie, wie ungenügende Jodnormalität der Maische, verlängerte Läuterzeiten, Ausbeuteverluste oder andere Besonderheiten, wurden nicht beobachtet.

Bei den Würze- und Bieranalysen sowie der Verkostung der frischen Biere nach DLG-Schema wurden keine signifikanten Unterschiede gefunden. Ein Dreieckstest (n = 10) ergab keinen statistisch abgesicherten Unterschied. Die Analysenergebnisse der Bieraromastoffe sowie der Alterungskomponenten der frischen und forciert gealterten Biere zeigten ebenfalls nur Unterschiede innerhalb der Proben- und Analysentoleranz.

Einfluss der Schrotlagerung auf den Geschmack und die Geschmacksstabilität von Bier

In einer Brauerei kam es aufgrund einer produktionstechnischen Störung zu einer überlangen Lagerung des Malzschrotes im Schrotrumpf von 10 Tagen. Sude aus diesem Schrot wurden im Vergleich zu unmittelbar nach der Schrotung eingemaischten Suden hinsichtlich der Würze- und Bierqualität untersucht.

Die Lag-Time-Werte wiesen keinen signifikanten Unterschied auf. Eine Auswertung der Ergebnisse der Bieraromastoffe und der Alterungskomponenten ließ nur tendenziell einen Unterschied erkennen. Die sensorischen Untersuchungsergebnisse waren jedoch eindeutig: So zeigte das Bier des gelagerten Schrotes einen sehr viel rascheren Qualitätsabfall bei der Alterung als das Bier des frischen Schrotes, wieTabelle 6 zeigt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Untersuchung von Geschmack und Geschmacksstabilität des Bieres in Abhängigkeit der Schrotlagerzeit

		Schrot, 1 h gelagert		Schrot, 240 h gelagert	
		frisch	forciert	frisch	forciert
Lag-Time	min	42	-	36	-
Wärmeindikatoren	µg/l	73	146	85	143
Sauerstoffindikatoren	µg/l	27	39	23	34
Alterungskomponenten	µg/l	133	226	139	209
DLG-Verkostung		4,4	4,1	4,5	3,8
Alterungsverkostung		1,0	1,5	1,0	1,8
Akzeptanz	%	100	80	100	64

Aufgrund kinetischer Überlegungen ist die Geschwindigkeit der enzymatischen Peroxidation durch LOX unmittelbar nach dem Einmaischen am höchsten [25]. Daher erscheint es sinnvoll, die Reaktionsbedingungen für LOX bereits beim ersten Kontakt des Malzes bzw. Schrotes mit Wasser technologisch zu beeinflussen wie in Kapitel 5.5., S. 88 dargestellt wird.

Lipide und lipidabbauende Enzyme sind vornehmlich im Keimling des Malzkorns (embryonale Axis, Schildchen, Wurzelkeim- und Blattkeimanlage) lokalisiert sind [22], besteht die Herausforderung an die Maschinentechnik, den Blattkeim abzutrennen bzw. ihn bei der Malzzerkleinerung zu schonen (protektive Schrotung). Während Wurzelkeime relativ einfach in Entkeimungsmaschinen der Mälzerei abgetrennt werden, erwiesen sich alle bisherigen Malzaufbereitungsversuche, mit denen eine Abtrennung des Blattkeims erreicht wird, als nicht praxistauglich [274]. Spezielle Schrotungssysteme, mit denen eine Schonung des Blattkeims bei der Malzzerkleinerung erreicht wurde, zeigten eine abgeschwächte Entstehung von Alterungscarbonylen. Hierbei wurde konsequent die gesamte Prozesstechnologie auf die bekannten Einflussfaktoren der Geschmacksstabilität abgestimmt [182, 309]. Diese Verfahren gestalten sich jedoch relativ aufwändig und erfordern höhere Investitionen.

Da Lipide und lipidabbauende Enzyme vornehmlich im Keimling des Malzkorns lokalisiert sind wurde nach Möglichkeiten gesucht, den Blattkeim zu entfernen bzw. den Blattkeim bei der Schrotung zu schonen.

Quellen

Dissertation von Joachim Zürcher [339] sowie eine eigene Veröffentlichung [341]

4.3.2 Ein Schrotungskonzept zur Schonung der Blattkeime (Protektive Schrotung)

Neben einer geringen mechanischen, thermischen und oxidativen Belastung sollte das Schrotungssystem die Blattkeime weitestgehend „protegieren“, d. h. unversehrt lassen.

Nach dem in Abbildung 29 dargestellten Anlagenschema wurden aus dem Malz nach einem gezielten Vorbruch große Anteile der Blattkeime und Grieße in einem Plansichter abgetrennt. Lediglich die Grobgrieße und Spelzen wurden in einer nachgeschalteten Grieß- und Spelzenmühle weiter zerkleinert. Bei diesem Schrotungskonzept wurden der Grießkasten sowie die Anteigschnecke mit CO_2 begast.

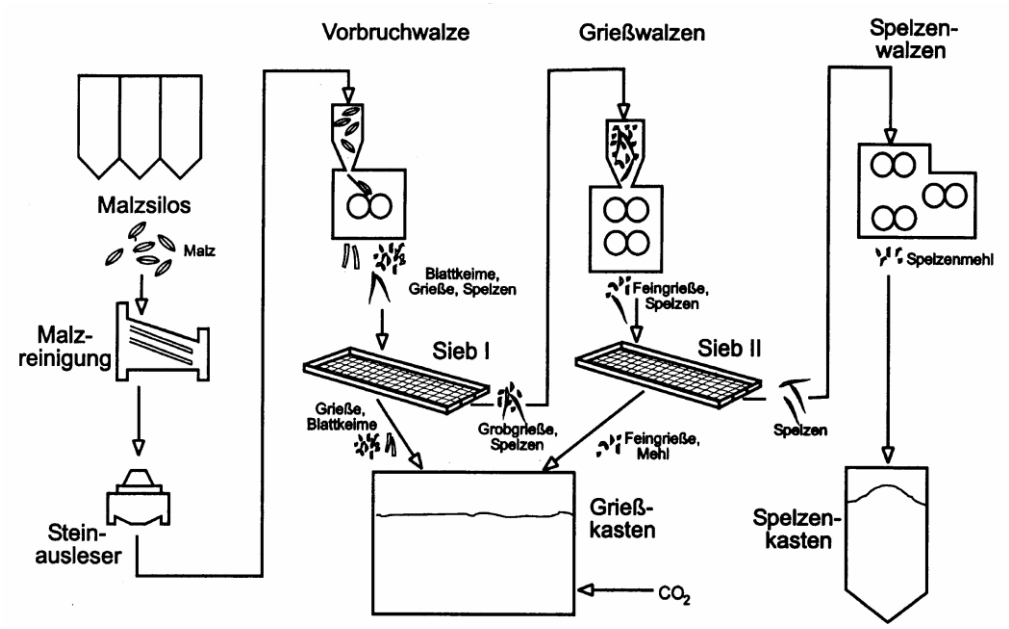


Abbildung 29: Anlagenschema eines Systems zur „Protektiven Schrotung“

Die LOX-Aktivität in der aus CO_2-begasten Feinschrot hergestellten Maische lag von Anfang an deutlich niedriger als der Vergleich ohne Schrotbegasung wie Abbildung 30 zeigt. Die Geschwindigkeit, mit der die LOX-Aktivität während der Maischerast von 65 °C abnahm, war jedoch unabhängig davon, ob das Schrot begast wurde oder nicht. Das belegen die steil abfallenden, parallel zueinander verlaufenden Aktivitätskurven. Folglich war die Zeit bis zur vollständigen Inaktivierung der LOX in der aus CO_2-begastem Schrot hergestellten Maische auch fast 5 Minuten kürzer als in der Vergleichsmaische.

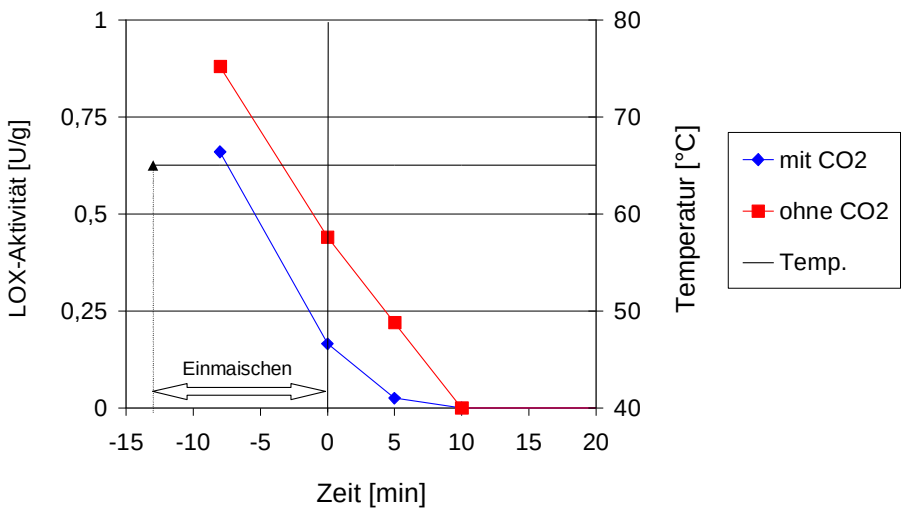


Abbildung 30: Verlauf der LOX-Aktivität beim Maischen mit und ohne CO_2-Begasung des Schrotbunkers; Mittelwerte (n = 3), (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges

Ein signifikanter Einfluss der Begasung auf den Fettsäurengehalt der Maische konnte nicht festgestellt werden, wie aus Abbildung 31 ersichtlich ist. Die Fettsäurehydroperoxide nahmen während der 20-minütigen Rast bei 65 °C ab, während die höheren ungesättigten Fettsäuren zunahmen. Die Maischen, die mit begastem Schrot hergestellt wurden, zeigten dabei tendentiell höhere Hydroperoxidgehalte als die Maischen ohne Schrotbegasung.

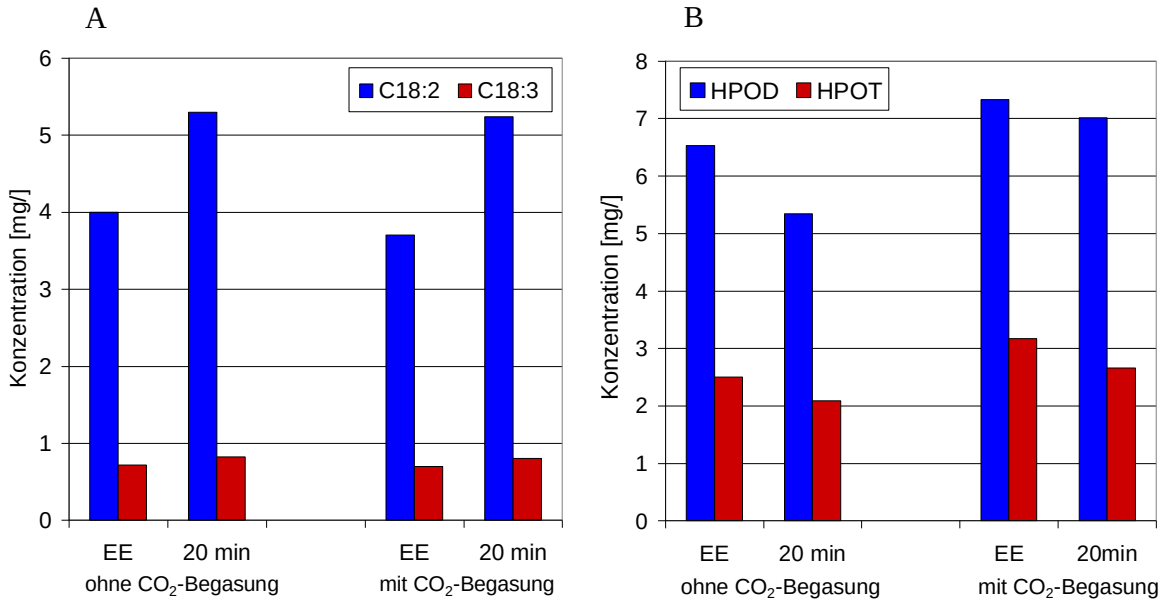


Abbildung 31: Höhere ungesättigte Fettsäuren und deren Hydroperoxide in Maische: (A) Linolsäure (18:2) und Linolensäure (18:3); (B) Linolsäurehydroperoxide (HPOD) und Linolensäure-hydroperoxide (HPOT), EE = Ende Einmaischen, 20 min = 20 min nach EE

Nachdem der Einfluss einer protektiven Schrotung auf die Qualität von Würze- und Bier untersucht war, sollte die Verarbeitbarkeit von Malz mit schlechter Qualität durch die Schrotung verbessert werden.

Quellen

Dissertation von Joachim Zürcher [339].

4.3.3 Ein Schrotungskonzept zur Verbesserung des β-Glucanabbaus (Fraktionierte Schrotung)

Bei der Analyse der Mürbigkeit mittels Friabilimeter wird das Malz einem moderaten Schrotprozess unterzogen. Die cytolytisch unterlösten Kornpartien werden dabei in der Siebtrommel zurückgehalten. Diese Fraktion wird auf Grund seines erhöhten β-Glucangehaltes bzw. β-Glucangel-Bildungsvermögens für Filtrationsstörungen von Gerstenmalzbieren verantwortlich gemacht [175, 316]. Es sollte ein Weg gefunden werden, die bewährte Analysenmethode des Friabilimeters auf den Praxismaßstab zu übertragen, um die schlecht gelösten Kornpartien von den gut gelösten zu trennen. Es wurde eine neue Methode der Malzzerkleinerung mit angepasster Maischarbeit entwickelt, mit der sich durch schlecht gelöste Malze verursachten Läuter- und Filtrationsprobleme vermeiden lassen.

Eine Reduzierung des β-Glucangehaltes der Würzen konnte bei Feinstvermahlung des Malzes über eine Prallmühle in Verbindung mit einer höheren Maischekonzentration festgestellt werden [157]. Dies deckt sich mit den Erfahrungen von Läuterbottich- und Maischefilterschroten [58, 166, 243].

In einem weiteren Schritt konnte durch eine Schrotung mittels Prallmühle und eine Siebung eine deutlich mit β-Glucan angereicherte Grobgutfraktion sowie eine Restfraktion gewonnen werden. Bei der Vermahlung des Malzes wurde eine Umfangsgeschwindigkeit des Rotors am äußeren Ende von 34 m/s eingestellt. Üblich für solche Mühlentypen sind Umfangsgeschwindigkeiten von 100-120 m/s. Es handelte sich somit um eine sanfte Mahlbeanspruchung, welche vergleichbar mit dem des Friabilimeters ist. Durch eine Siebung über ein Drahtsieb (Maschenweite 1600 µm) wurden 20,9 % Grobfraktion abgereichert. Die Partikelgrößenverteilung der Grobfraktion im Vergleich zu klassischen Vermahlungen ist in Abbildung 32 dargestellt.

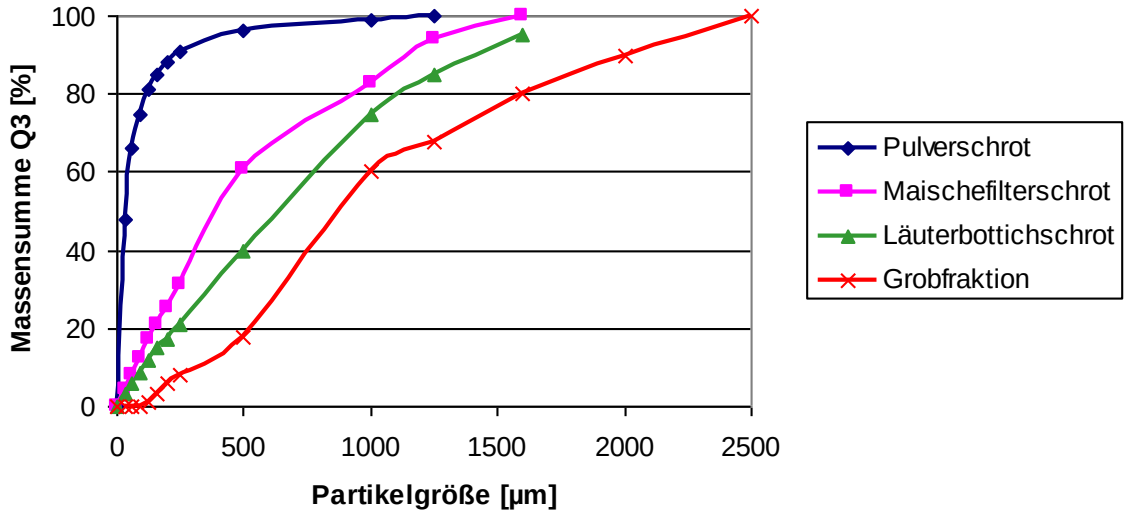


Abbildung 32: Q_3-Verteilung einer speziellen Grobfraktion und von Schroten für verschiedene Läutersysteme

Die Werte der Malzanalysen sowohl des Originalmalzes als auch der beiden Schrotfraktionen zeigt Tabelle 7.

Tabelle 7: Einfluss der Schrotfraktionierung auf die Malzanalytik

Analyse	Malz	Feinfraktion	Grobfraktion
Ausbeute [GG-%]	100	79.1	20.9
Extrakt [GG-% Trs.]	83.0	82.8	83.5
Wassergehalt [GG-%]	4.6	4.7	4.4
Verzuckerungszeit [min]	10	10	55-60
Farbe [EBC]	3.6	3.7	2.2
pH	6.03	6.02	6.03
Lösl. N [mg/100 g MTrS.]	674	692	407
FAN [mg/l]	134	143	77
β-Glucan [mg/l]	248	209	963
Viskosität . [mPas] bez. 8,6 %	1.62	1.55	2.21
Ges.-N [% MTrS]	11.4	---	---
Eiweißlösungsgrad [%]	37.0	---	---
Friabilimeterwert [%]	62.6	---	---

Für die Labormaischen wurden die Malzfraktionen jeweils zu EBC-Feinschrot vermahlen, bevor sie im Gußverhältnis 1:4 eingemaischt wurden. Nach einem getrennten Einmaischen der Grob- und Restfraktion bei unterschiedlichen Temperaturen und Zusammenführen der Maischen auf 45 °C schloss sich ein Infusionsmaischverfahren an, wie in Abbildung 33 zu sehen ist.

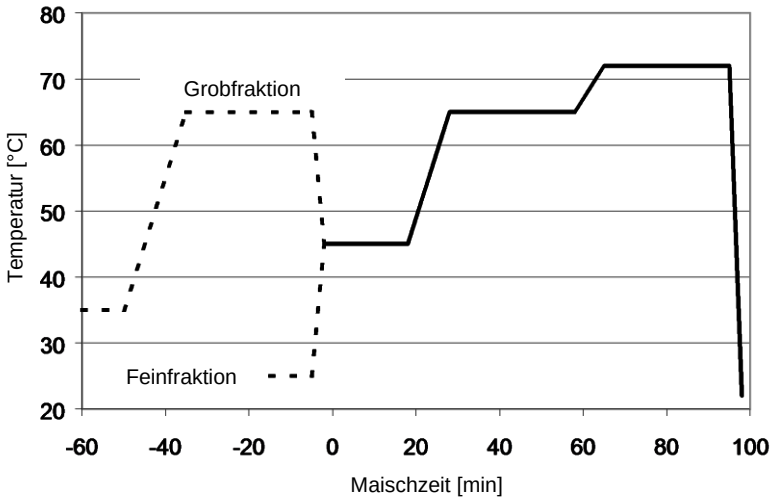


Abbildung 33: Maischprogramm für das Fraktionierte Einmaischen

Durch die Verkleisterung der Grobfraktion und die Aktivität der β-Glucan-Solubilase in der ersten Maische wird nahezu das komplette β-Glucan aus den Grießen der Grobfraktion gelöst, wobei jedoch β-Glucan abbauende Enzyme, wie z.B. die endo-β-1,4-Glucanase thermisch inaktiviert werden (vgl. Kapitel 5.1, S. 62). Das Zumaischen der kalten Maische aus der Feinfraktion führt u.a. die endo-β-1,4-Glucanase wieder zu und erbringt eine Abkühlung auf

die Optimaltemperatur dieses Enzymes von 45 °C. Somit kann das im gesamten Malz vorhandene β-Glucan abgebaut werden.

Die so erzeugten Würzen zeigten niedrigere Viskositäts- und nahezu halbierte β-Glucanwerte im Vergleich zu Kongressmaischen desselben Malzes. Somit wurde die Filtrierbarkeit entschieden verbessert, ohne den Rohstoff zu wechseln.

Interessant ist außerdem, dass bei den Untersuchungen zur Esterbildung ein ähnliches Maischverfahren entwickelt wurde. Dort waren nicht die Schrotfraktionierung und der β-Glucanabbau von Interesse, sondern die Zuckerzusammensetzung, welche Auswirkungen auf die Bildung von Gärungsnebenprodukten und somit auf das Aromaspektrum des Bieres hat (vgl. Kap. 5.7, ,S. 92).

Die Schrotung ist nur die mechanische Zerkleinerung des Malzes. Um die wertgebenden Substanzen des Malzes in Lösung zu bringen, ist die enzymatische Lösung, d. h. das Maischen von elementarer Bedeutung. Um den Produktionsschritt des Maischens näher zu erforschen, wurden Maischversuche unter Variation der Maischparameter durchgeführt.

Quellen

Diplomarbeit und Doktorarbeit von Joachim Zürcher [339] sowie die Diplomarbeiten von Joachim Nieroda, Marko Falatik, Harald Kube, Britta Jek, Tobias Voigt und eine eigene Veröffentlichung [157]

5 Maischen

Maischen ist der erste biochemische Prozessschritt in der Brauerei, welcher den enzymatischen Abbau weiterführt, der in der Mälzerei begonnen hat. Ziel ist es einerseits, möglichst viel Extrakt aus dem Malz zu lösen, um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen, andererseits, die Würzezusammensetzung bzw. Würzequalität in der Weise zu beeinflussen, so dass eine möglichst gute Bierqualität resultiert.

Fast jede Brauerei bereitet ihr Wasser auf. Die Wasserqualität hat über die Karbonathärte einen direkten Einfluss auf den pH-Wert der Maische. Phosphorolytische Enzyme können den pH-Wert beeinflussen, indem sie puffernde Phosphate aus dem Malz in die Würze überführen. Die Folge ist ein schwächerer pH-Sturz bei der Gärung. Die Beeinflussung des pH-Wertes der Maische kann aber auch über die Gabe von Säure (biologische Milchsäure, technische Säuren) erfolgen. Wird eine Maischesäuerung durchgeführt, beeinflusst dies die enzymatischen Tätigkeiten (Proteolyse, Cytolyse, Amylolyse, Phosphorolyse) und Lösungsvorgänge beim Maischen. Die Maischesäuerung hat keinen Einfluss auf den pH-Wert des Bieres. Erst wenn jegliche enzymatische Tätigkeit in Folge hoher Temperaturen eingestellt ist, kann eine Würzesäuerung den Bier-pH direkt beeinflussen.

Für den Brauer sind vor allem die cytolytischen, proteolytischen und amylolytischen Abbauvorgänge von Interesse, welche näher betrachtet werden sollen.

5.1 Variation der Maischparameter und deren Einfluss auf den Gehalt an β-Glucan, Extrakt und Freien Aminostickstoff

Die Cytolyse beschreibt den Abbau von Stütz- und Gerüstsubstanzen und ist von entscheidender Bedeutung für die Filtrierbarkeit des Bieres. Während der Proteolyse werden Eiweißstoffe abgebaut, wobei die Menge und Zusammensetzung der Aminosäuren in Würze einen entscheidenden Einfluss auf den Hefestoffwechsel und somit auf das Gärungsnebenproduktspektrum hat. Die Amylolyse bestimmt die Extraktausbeute und Wirtschaftlichkeit der Würzegewinnung. Die Phosporolyse beeinflusst das Pufferungsvermögen und somit den pH-Wert von Würze und Bier.

Im Pilotsudwerk des Lehrstuhls für Technologie der Brauerei I wurden 28 Maischversuche durchgeführt und eine Auswahl der Maischen nach einem standardisierten Verfahren zu Bier weiterverarbeitet. Der überwiegenden Anzahl von Versuchen lag das Eyben-Maischverfahren mit den Rastemperaturen 45/62/70 °C (je 30°min) und einer Abmaischtemperatur von 78 °C zu Grunde. Als Malze kamen ein gut gelöstes Pilsener Malz (Gerstensorte Scarlett) und ein knapp gelöstes Spitzmalz (Gerstensorte Scarlett) zum Einsatz, wobei letzteres eine gute amylolytische, aber vergleichsweise niedrige cytolytische und proteolytische Lösung aufwies, wie Tabelle 8 zeigt.

Tabelle 8: Analysendaten der verwendeten Malze

	Pilsener Malz gut gelöst	Spitzmalz schwach gelöst	MEBAK [3] Analysennummer
Wassergehalt	4,0 %	7,0 %	4.1.4.1
Extrakt lufttrocken	79,2 %	76,1 %	4.1.4.2.2
Extrakt wasserfrei	82,6 %	81,9 %	4.1.4.2.2
MS-Differenz	1,4 %	5,6 %	4.1.4.2.10
Friabilität	84,3 %	73,9 %	4.1.3.6
Ganzglasige	1,9 %	5,0 %	4.1.3.5.1
pH	5,89	6,12	4.1.4.2.7
VZ 45°C	38,2 %	28,2 %	4.1.4.11
Verzuckerungszeit	10-15 min	10-15 min	4.1.4.2.4
Eiweiß wasserfrei	10,6 %	11,6 %	4.1.4.5.1.1
löslicher N	698 mg/l	579 mg/l	4.1.4.5.2.1
ELG	41,0 %	31,2 %	4.1.4.5.3
Viskosität (12 %GG)	1,77 mPa*s	2,72 mPa*s	4.1.4.4.3
Viskosität (8,6 %GG)	1,49 mPa*s	2,00 mPa*s	4.1.4.4.3

Die Maischversuche wurden unter Variation folgender Maischparameter durchgeführt:

- Maischprogramm (Standard Infusion, Eyben / isothermes Maischen)
- Schrotung
  (Zwei-Walzenmühle, 0,8 mm Spaltweite = grob / Hammermühle, 4 mm Sieb = fein)
- Gußverhältnis Malz : Wasser (1:4 / 1:5)
- Zeit der jeweiligen Rasten (20 / 30 / 40 min)
- Malzmischung (0 / 30 / 50 / 70 / 100 % schwach gelöstes Malz, Rest gut gelöst)

Vor der Variation der Maischparameter wurden mindestens sechs Maischversuche zur Reproduzierbarkeit durchgeführt, bei denen die Versuchsbedingungen konstant gehalten wurden. Die Versuchsanstellung ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Versuchsplan der Maischversuche

Maisch-Nr. / Variation	Schro-tung	Malzlösung [Anteile gut bzw. schwach gelöst]	Rast-temperatur [°C]	Rastzeit [jeweils in min]	Gesamt-maischzeit [min]	Guß-verhältnis [kg:Liter]
1 / Standard	grob	30:70	45/62/70	30	115	1:4
2 / sotherm 60°C	grob	30:70	60	90	90	1:4
3 / isotherm 20°C	grob	30:70	20	60	60	1:4
4 / Schrotung	grob	100:0	45/62/70	30	115	1:4
5 / Schrotung	fein	100:0	45/62/70	30	115	1:4
6 / Gußverhältnis	grob	30:70	45/62/70	30	115	1:4
7 / Gußverhältnis	grob	30:70	45/62/70	30	115	1:5
8 /Rastzeit	grob	100:0	45/62/70	20	85	1:4
9 / Rastzeit	grob	100:0	45/62/70	30	115	1:4
10 / Rastzeit	grob	100:0	45/62/70	40	145	1:4
11 / Rastzeit	grob	0:100	45/62/70	20	85	1:4
12 / Rastzeit	grob	0:100	45/62/70	30	115	1:4
13 / Rastzeit	grob	0:100	45/62/70	40	145	1:4
14 / Malzmischung	grob	0:100	45/62/70	30	115	1:4
15 / Malzmischung	grob	30:70	45/62/70	30	115	1:4
16 / Malzmischung	grob	50:50	45/62/70	30	115	1:4
17 / Malzmischung	grob	70:30	45/62/70	30	115	1:4
18 / Malzmischung	grob	100:0	45/62/70	30	115	1:4

Während des Maischens wurden in festgelegten Zeitabständen Maischproben entnommen und auf folgende Leitsubstanzen überprüft:

- Leitsubstanz der Cytolyse: β-Glucangehalt
- Leitsubstanz der Proteolyse: Freier Aminostickstoff (FAN)
- Leitsubstanz der Amylolyse: Extraktgehalt

5.1.1 Variaton des Maischprogramms

Beim isothermen Maischverfahren mit 20 °C bleibt der β-Glucangehalt konstant niedrig. Erst bei Überschreiten einer Temperatur von 57 °C steigt der β-Glucangehalt signifikant an. Die isotherme Maische mit 60 °C zeigt ab Maischbeginn einen Anstieg des β-Glucans. Dies ist auf die Verkleisterung und Verzuckerung der Stärke sowie auf die enzymatische Freisetzung hochmolekularen β-Glucans durch die β-Glucansolubilase ab einer Temperatur von 57 °C zurückzuführen. In diesem Bereich vergrößert sich auch das Konfidenzintervall (Irrtumswahrscheinlichkeit α = 0,05).

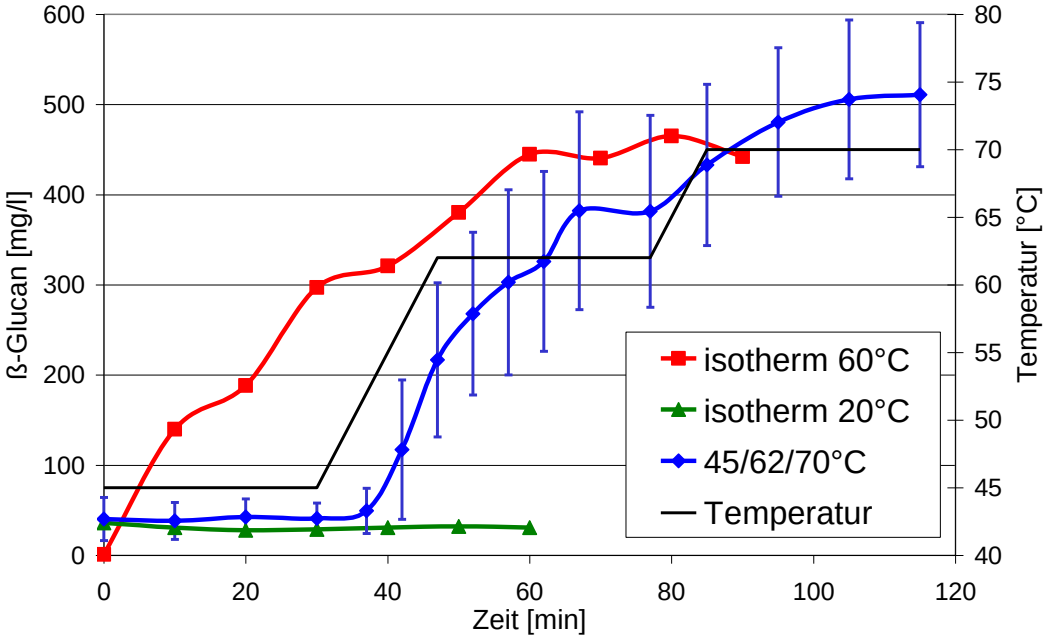


Abbildung 34: β-Gucankonzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis

Hinsichtlich der Proteolyse kann eine relativ hohe Anfangskonzentration bereits ab dem Einmaischen beobachtet werden, die sich bis zu einer Temperatur von ca. 55 °C noch steigern lässt. Im weiteren Verlauf bleibt die FAN-Konzentration konstant, wie Abbildung 35 zeigt.

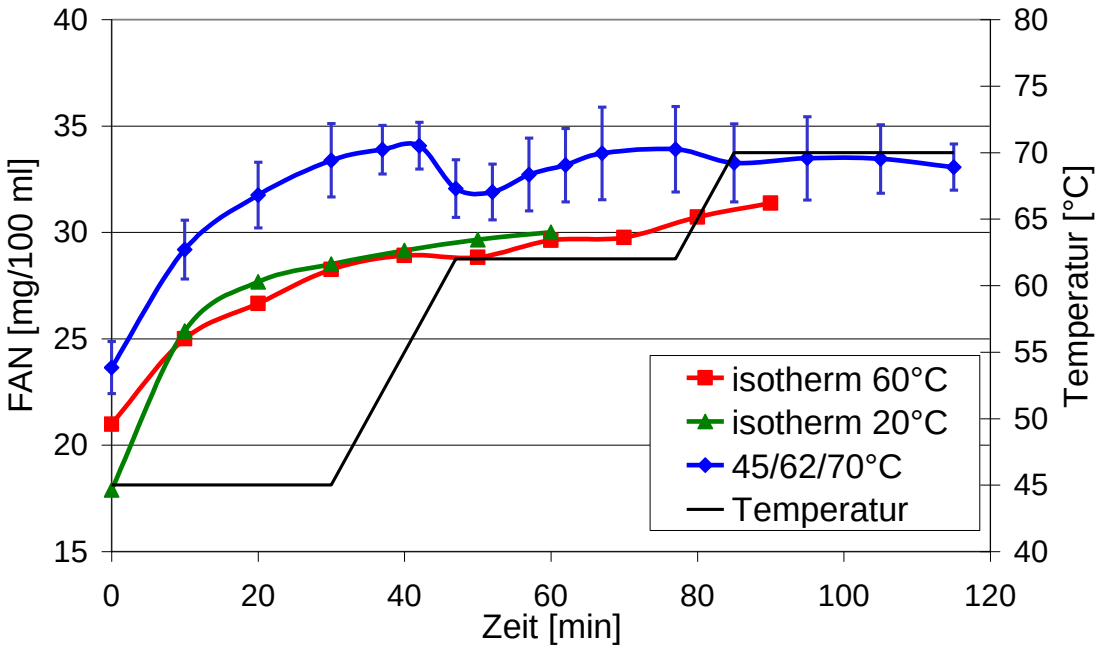


Abbildung 35: FAN-Konzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis

Diese Ergebnisse decken sich mit Aussagen aus der Literatur [59, 245]. Isothermes Maischen bei 20 und 60 °C führte zu anfänglich geringeren FAN-Konzentrationen als beim Infusionsmaischverfahren. Dennoch gleichen sich die Werte bis zum Ende des Maischprozesses an, wenn man einen Variationskoeffizienten von ca. 10 % veranschlagt. Dies deutet auf einen dominanten Einfluss der Malzlösung hin.

Der Extraktverlauf ist sehr charakteristisch, wie Abbildung 36 zeigt. Beim Überschreiten einer Temperatur von 57 °C steigt der Extrakt in Folge der Verkleisterung und Verflüssigung. Dies deckt sich mit Angaben aus der Literatur [60, 217]. Das Konfidenzintervall für die Extraktbestimmung ist sehr klein, was die Aussage noch erhärtet. Es ist zu beachten, dass die Verkleisterungstemperatur von der Gerstensorte, den Anbaubedingungen und dem Jahrgang abhängig ist [132].

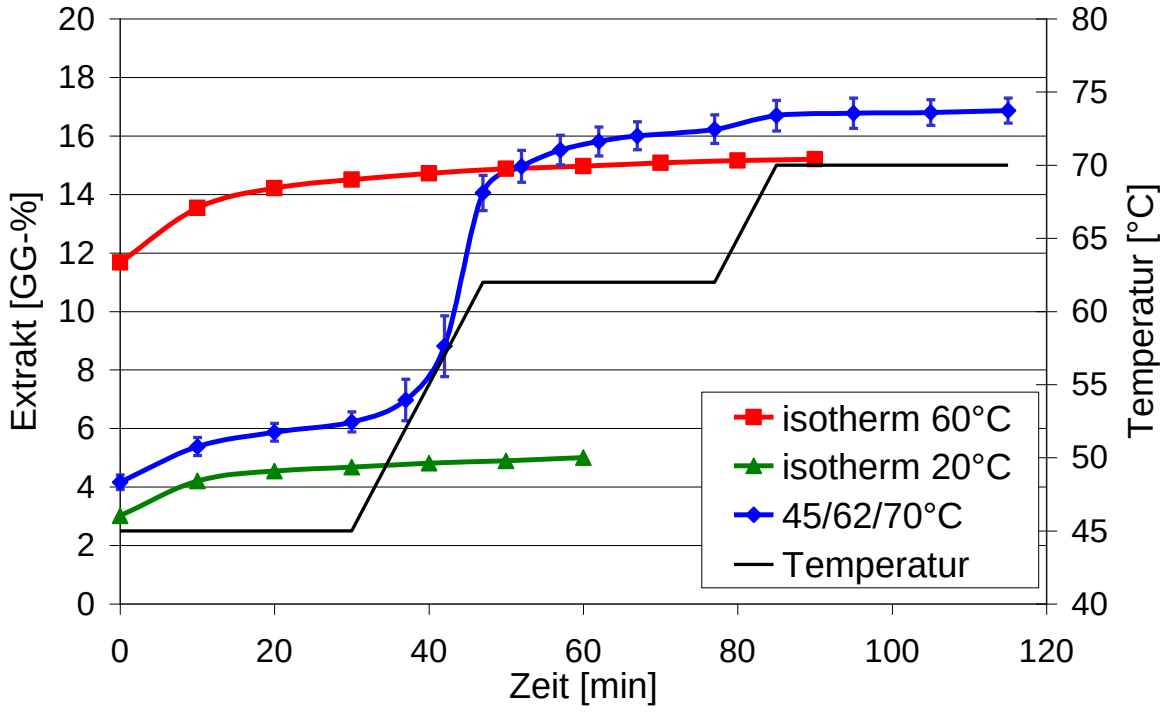


Abbildung 36: Extrakt-Konzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis

Während bei einer isothermen Maischtemperatur von 60 °C bereits innerhalb 40 min der Extrakt fast vollständig gelöst wird, bleibt der Extraktgehalt in der 20 °C-Maische auf einem sehr geringen Niveau. Dies zeigt eindrucksvoll, dass die Amylolyse in der Brauerei beim Maischen und weniger in der Mälzerei erfolgt. Dort würde sie nur den Mälzungsschwand erhöhen. Maischtemperaturen von mindestens ca. 55 °C sind erforderlich, um eine akzeptable Wirtschaftlichkeit bzw. Extraktausbeute zu gewährleisten. Wie wichtig es ist, dass die Verkleisterungstemperatur überschritten werden muss, bevor die Verzuckerung einsetzen kann, zeigt sich an den Brauverfahren zur Verarbeitung unvermälzter Rohstoffe. Reis wird z. B. in einem Druckgefäß mit einem Anteil Malz (ca. 15 %) oder mit Enzymen auf Verkleisterungstemperatur erhitzt, bevor er der Malzmaische wieder zugebrüht wird. Die Enzyme aus der Malzmaische vervollständigen dann die Verzuckerung. Bei hohen Rohfruchtanteilen wird gerne ein enzymstarkes Malz eingesetzt. Selbst sechszeilige Wintergersten, welche nur eine eingeschränkte Brautauglichkeit haben, werden wegen ihrer hohen Enzymkraft als Malz auf dem Markt angeboten.

5.1.2 Variaton der Schrotfeinheit

Um den unterschiedlichen Läutergeräten Rechnung zu tragen, wurden eine Zwei-Walzenmühle (Läuterbottich) und eine Hammermühle (Maischefilter) zur Schrotung eingesetzt. Walzenmühlenschrote enthalten weitgehend intakte Spelzen und sind weniger fein vermahlen als Hammermühlenschrote. Deshalb sind sie für den Läuterbottich geeignet, welcher die Spelzen zum Aufbau eines Filterkuchens benötigt.

Das feiner vermahlene Hammermühlenschrot führte zu tendenziell höheren Werten am Ende der 45 °C Rast, wie Abbildung 37 zeigt. Im weiteren Verlauf dreht sich die Tendenz um: Es resultieren geringere β-Glucanwerte zum Ende des Maischprozesses beim Hammermühlen-schrot.

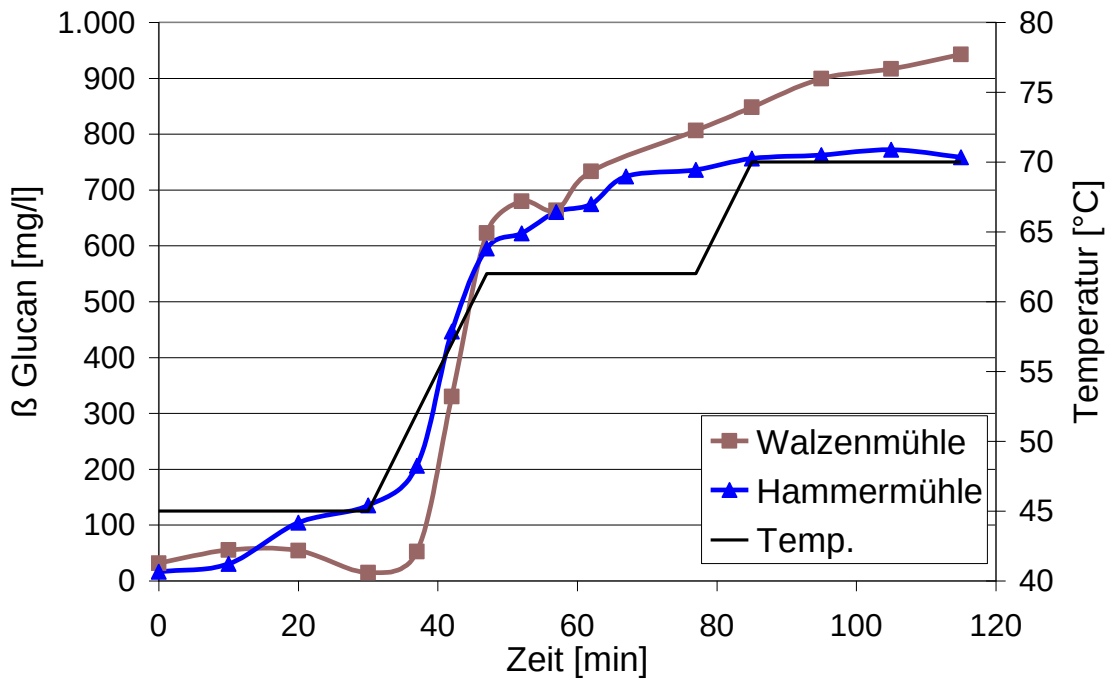


Abbildung 37: β-Gucankonzentration in Maische: Variation der Schrotfeinheit. Bedingungen: 2-Walzenmühle / Hammermühle, 100 % schwach gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)

Wenn man auch nur von einer Tendenz sprechen kann, so wurden doch bereits ähnliche Beobachtungen gemacht [61]. Es ist bekannt, dass hochmolekulares β-Glucan durch endo-β-Glucanasen (endo-β-1,3-Glucanase und besonders endo-β-1,4-Glucanase) abgebaut werden kann, womit es sich der oben dargestellten Analyse der β-Glucane entzieht. Die Inaktivierungstemperatur dieser Enzyme liegt bei 50-55 °C. Bei Überschreiten dieser Temperatur wird durch die β-Glucansolubilase bis zu einer Temperatur von 73 °C weiteres hochmolekulares β-Glucan aus der Malzmatrix gelöst, aber nicht mehr abgebaut [18, 20, 295].

Da die β-Glucankonzentration in einem messbaren Bereich steigt, kann davon ausgegangen werden, dass durch den mechanischen Aufschluss der Hammermühle die β-Glucanlösung verstärkt wird. Anscheinend ist nicht die Enzymmenge, sondern die Eduktkonzentration der limitierende Faktor beim β-Glucanabbau. Dennoch ist bei der Feinvermahlung mehr β-Glucan

in der 45 °C Rast abgebaut worden, da die Endkonzentration nach der Verkleisterung und Verzuckerung geringer ausfällt als beim gröber vermahlenen Läuterbottichschrot.

Analog zur Lösung von β-Glucan wurden bei der Lösung des FAN durch die Feinvermahlung höhere Werte beim Maischbeginn beobachtet. Dies deckt sich mit Aussagen, dass eine feinere Vermahlung zu einer verstärkten Proteolyse führt [59, 261]. Somit kann durch eine stärkere mechanische Modifikation eine enzymatische Modifikation teilweise kompensiert werden. Bis zum Ende des Maischprozesses gleichen sich jedoch die Konzentrationen wieder an, so dass eine praktische Relevanz hinsichtlich der Proteolyse nicht mehr zu erkennen ist.

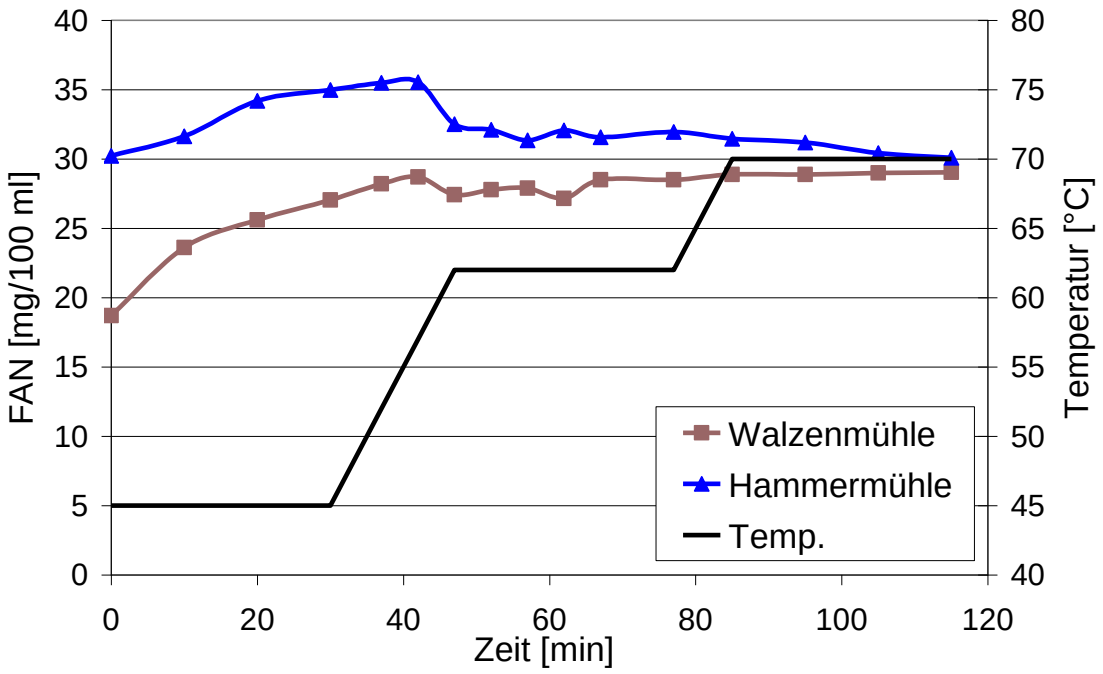


Abbildung 38: FAN-Konzentration in Maische: Variation der Schrotfeinheit. Bedingungen: 2-Walzenmühle / Hammermühle, 100 % schwach gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)

Interessant ist, dass die Extraktverläufe unabhängig von der Schrotfeinheit waren. Dies ist in der guten amylolytischen Lösung des schwach gelösten Malzes begründet, was bereits aus der Malzanalyse ersichtlich war, wie Tabelle 8 zeigt. Bei amylolytisch schlecht gelösten Malzen [261] und bei Verwendung unvermälzter Gerste (siehe Kapitel 5.2) konnte durch eine feinere Vermahlung die Extraktausbeute gesteigert werden. Dies bestätigt auch die allgemeine Ansicht, dass bei Verwendung eines Maischefilters etwas schwächer gelöste Malze problemlos verarbeitet werden können.

5.1.3 Variaton der Gussführung

Die β-Glucankonzentrationen während des Maischens sind bei einem Gussverhältnis von 1:4 und 1:5 vergleichbar, obwohl die Hauptgussmenge und somit auch die Maischekonzentration unterschiedlich sind. Dies resultiert aus den relativ hohen Werten der statistischen Vergleichbarkeit für die Analyse des β-Glucans. In Abbildung 39 ist der Extraktverlauf dargestellt. Durch die höhere Hauptgussmenge resultieren niedrigere Extraktwerte beim Gussverhältnis 1:5. Eine Umrechnung der Extraktkurve 1:5 auf ein Gussverhältnis 1:4 gleicht diesen Verdünnungseffekt aus. Es zeigt sich, dass kein signifikanter Unterschied im Extraktverlauf bei der Variation des Gussverhältnisses von 1:4 auf 1:5 besteht. Die Aussage, dass dünnere Maischkonzentrationen die amylolytische Aktivität erhöht, konnte hier nicht bestätigt werden.

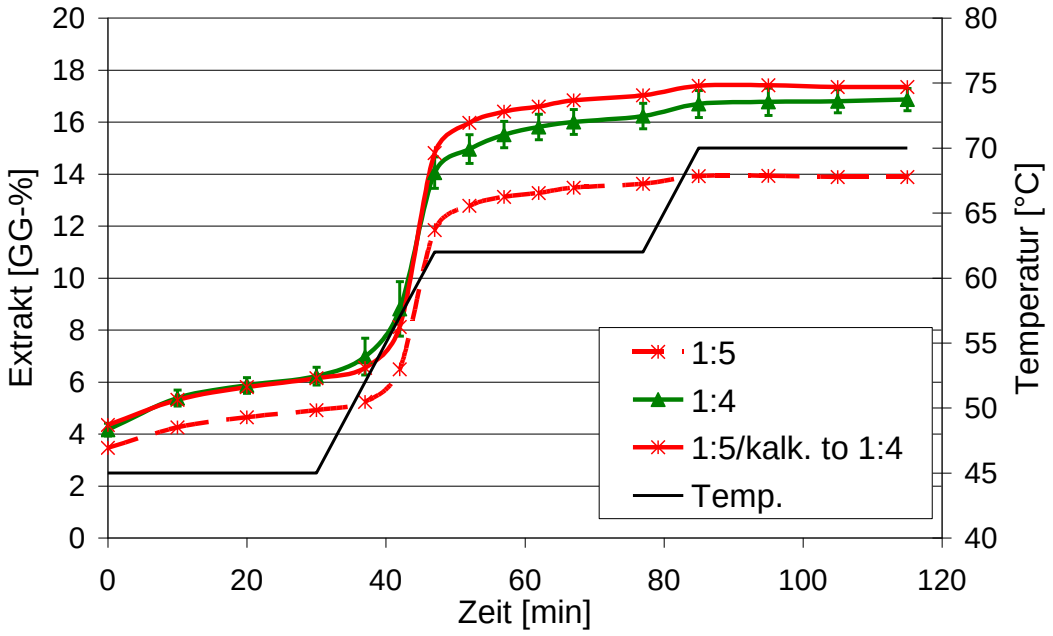


Abbildung 39: Extrakt-Konzentration in Maische: Variation der Gussführung. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz, 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 / 1:5 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)

Ebenso wie der Extrakt verhalten sich die FAN-Gehalte. Nach einer Umrechnung auf gleiche Maischekonzentrationen ist kein signifikanter Unterschied feststellbar.

5.1.4 Variaton der Rastdauer

Alle Maischversuche hatten Rasten bei bestimmten Temperaturen. Bei der Variation der Rastdauer wurde, unabhängig von der Temperatur, jede Rast eine vorgegebene Zeit gehalten. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde eine neue Art der Darstellung gewählt. In Abbildung 40 sind die β-Glucankonzentrationen bezogen auf die Rasttemperaturen dargestellt.

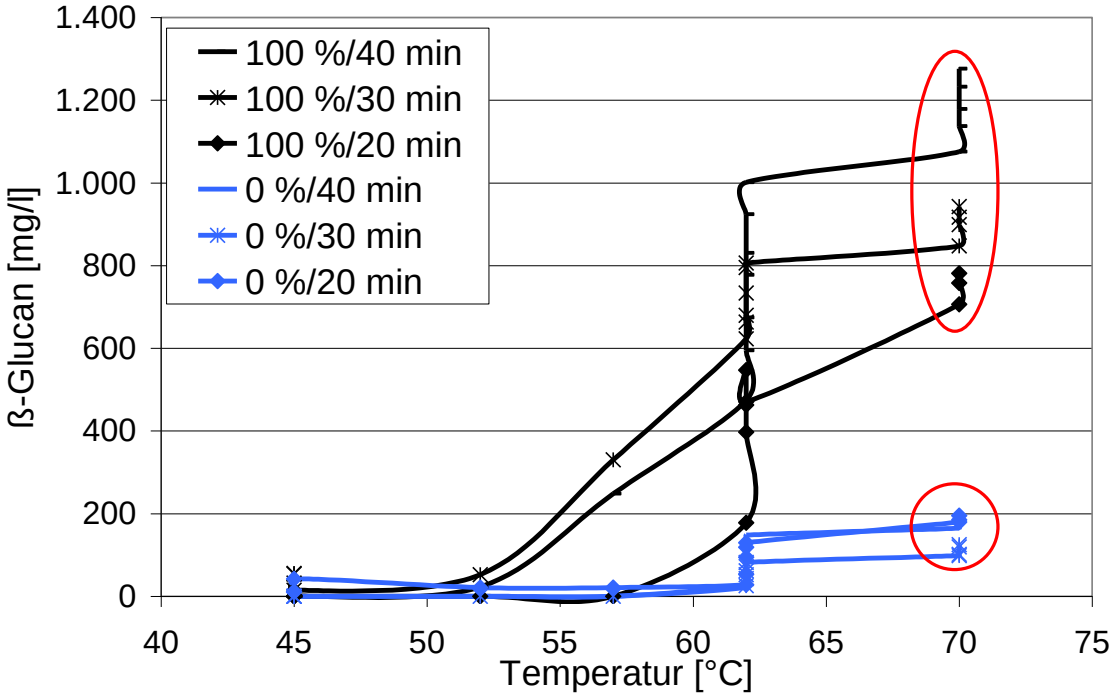


Abbildung 40: Temperaturbezogene β-Glucankonzentration: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 0/100 % schwach gelöstes Malz, 20/30/40 min Rastzeit, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)

Die stärkste Zunahme an β-Glucan findet ab einer Temperatur von ca. 57 °C statt. Verlängerte Rastzeiten führen nur bei schwach gelösten Malzen zu höheren β-Glucanwerten. Gut gelöste Malze besitzen unkritische β-Glucanmengen, so dass der β-Glucangehalt in diesen Würzen unabhängig von der Maischintensität ist. Bei schlecht gelösten Malzen wird durch eine verlängerte Rastzeit weiteres β-Glucan gelöst, was kontraproduktiv hinsichtlich der Filtrierbarkeit des Bieres ist.

Bezüglich des Gehaltes an FAN wirken sich längere Rastzeiten tendenziell positiv aus, wobei kein signifikanter Unterschied besteht, wie Abbildung 41 zeigt. Bei dem hier vorgestellten gut gelösten Malz ist ausreichend FAN für eine gute Hefeernährung vorhanden, unabhängig davon welche Rastzeiten eingehalten wurden. Bei Verwendung von 100 % schlecht gelöstem Malz konnte auch mit der längsten Rastzeit nicht genügend FAN mobilisiert werden. Dies zeigt, dass eine proteolytische Unterlösung des Malzes nicht vollständig durch die Maischarbeit kompensiert werden kann. Diese Aussage deckt sich mit den Erkenntnissen von *Einsiedler* [59] und *Rijs* [245] und *Narziss* [215].

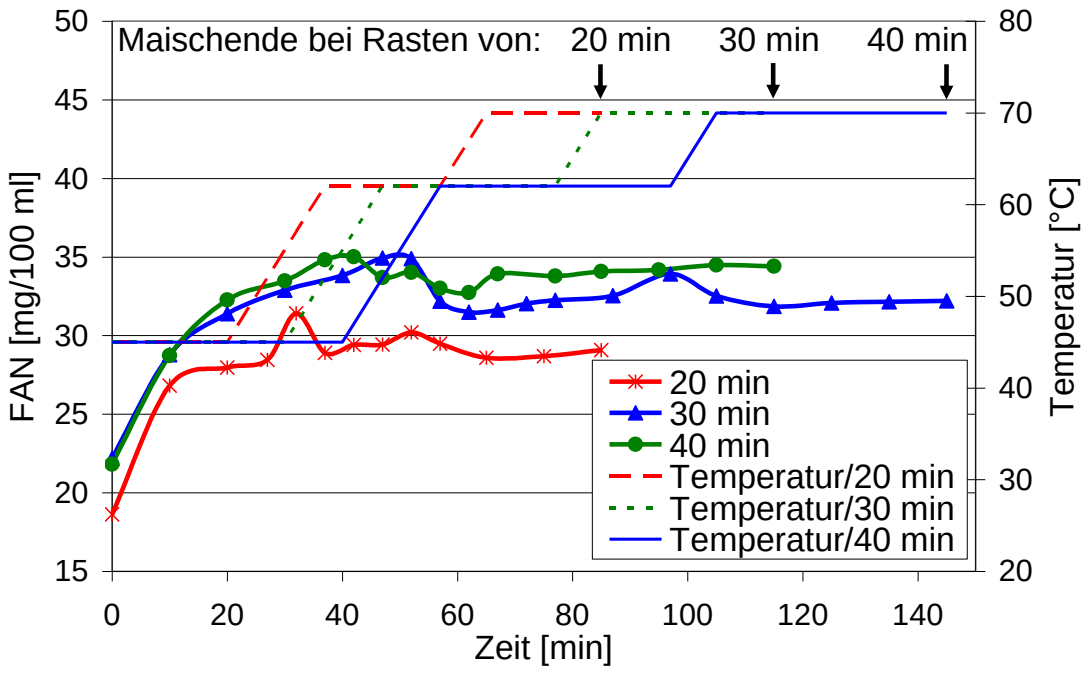


Abbildung 41: FAN-Konzentration beim Maischen: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 0 % schwach gelöstes Malz, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C), 20/30/40 min Rastzeit

Der Extraktgehalt steigt in Würze bei Überschreiten von ca. 57 °C, wie bereits beschrieben. In Abbildung 42 sind die Kurven um 10 min verschoben, da die Maischzeiten unterschiedlich lang waren. Auch bei 100 % schwach gelöstem Malz wird bereits mit einer Rastzeit von jeweils 20 min ein vergleichbar hoher Extratkgehalt wie bei längeren Maischzeiten erreicht. Die Maischzeit hat somit keinen signifikanten Einfluss auf die Extraktausbeute.

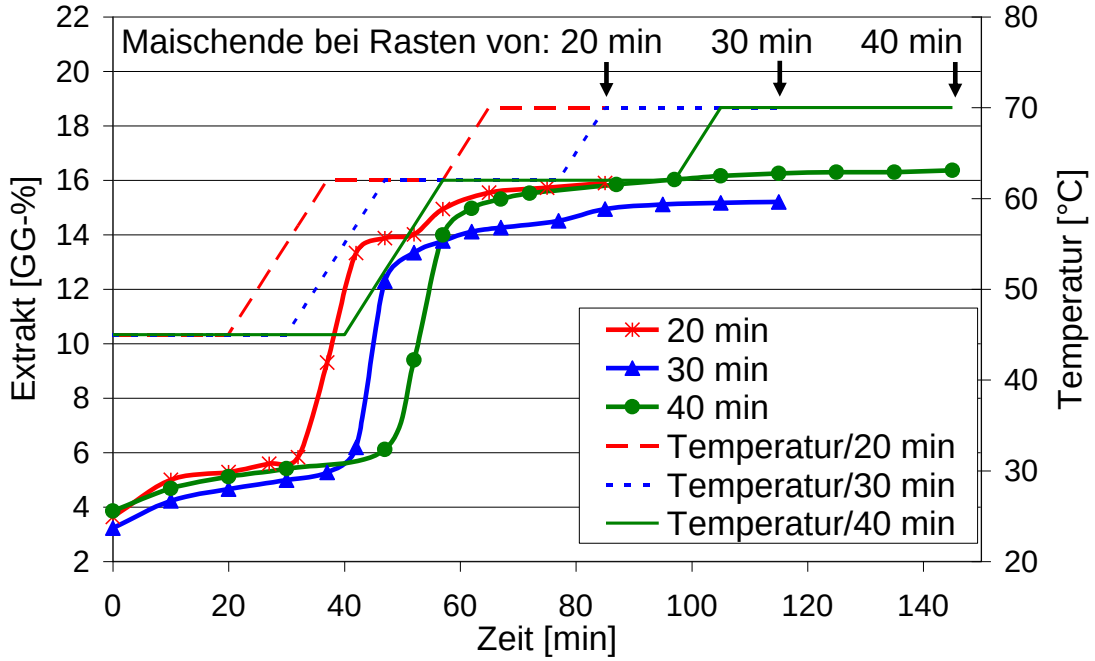


Abbildung 42: Extrakt-Konzentration beim Maischen: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 100 % schwach gelöstes Malz, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C), 20/30/40 min Rastzeit

5.1.5 Variaton der Malzqualität

Um unterschiedliche Malzqualitäten zu simulieren, wurden Teile des gut gelösten Malzes durch schlecht gelöstes Malz ersetzt. Wie Abbildung 43 zeigt, wird durch steigende Anteile an schlecht gelöstem Malz der β-Glucangehalt signifikant erhöht. Wie stark die Unterschiede in der Cytolyse sind, lässt sich auch am Vergleich der Kurven mit 0 % und 100 % schwach gelöstem Malz erkennen. Dies zeigt, wie wichtig die cytolytische Lösung des Malzes ist, zumal Gerste natürlichen Schwankungen unterliegt und nicht immer einfach zu vermälzen ist. Um Probleme erkennen zu können, ist eine eindeutige cytolytische Beschreibung der Malze notwendig. Geeignete Malzanalysen werden in den Methodensammlungen der MEBAK [2], der EBC [1] und in der Literatur [11] vorgestellt.

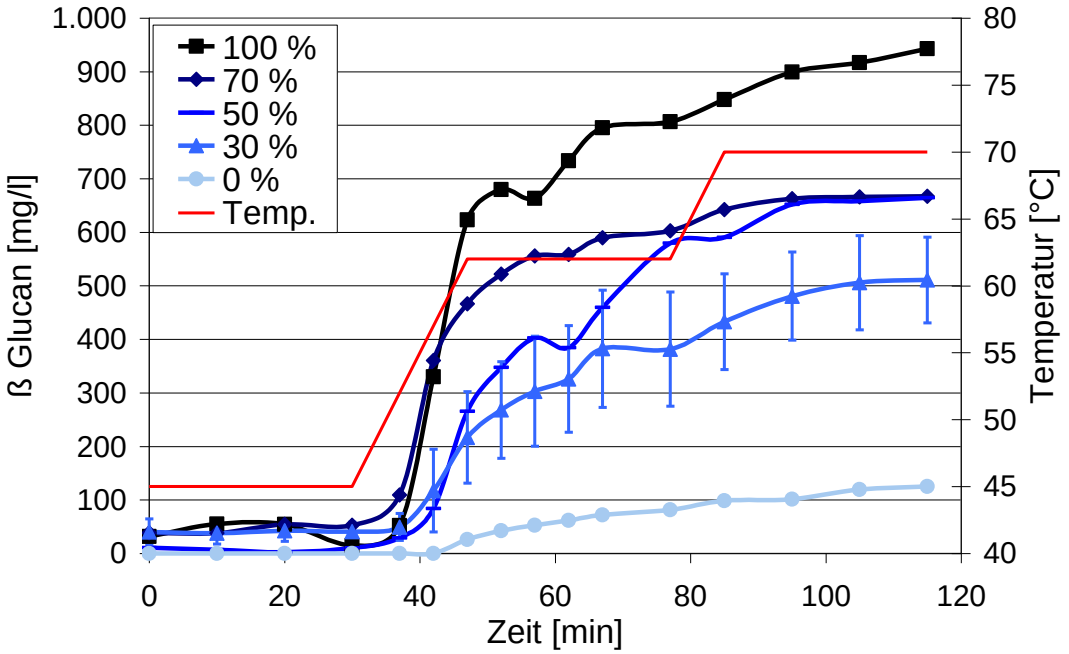


Abbildung 43: β-Glucan-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren 45/62/70 °C jeweils 30 min Rastzeit.

Steigende Anteile schwach gelösten Malzes führen auch zu sinkenden Anteilen an FAN in der Maische. Die Kurven verlaufen nahezu parallel. Als Grund wird eine schwächere cytolytische und proteolytische Enzymtätigkeit beim Maischen vermutet. Somit ist der FAN-Gehalt in Maische und Würze primär von der Malzlösung abhängig und kann durch die Maischarbeit kaum mehr beeinflusst werden.

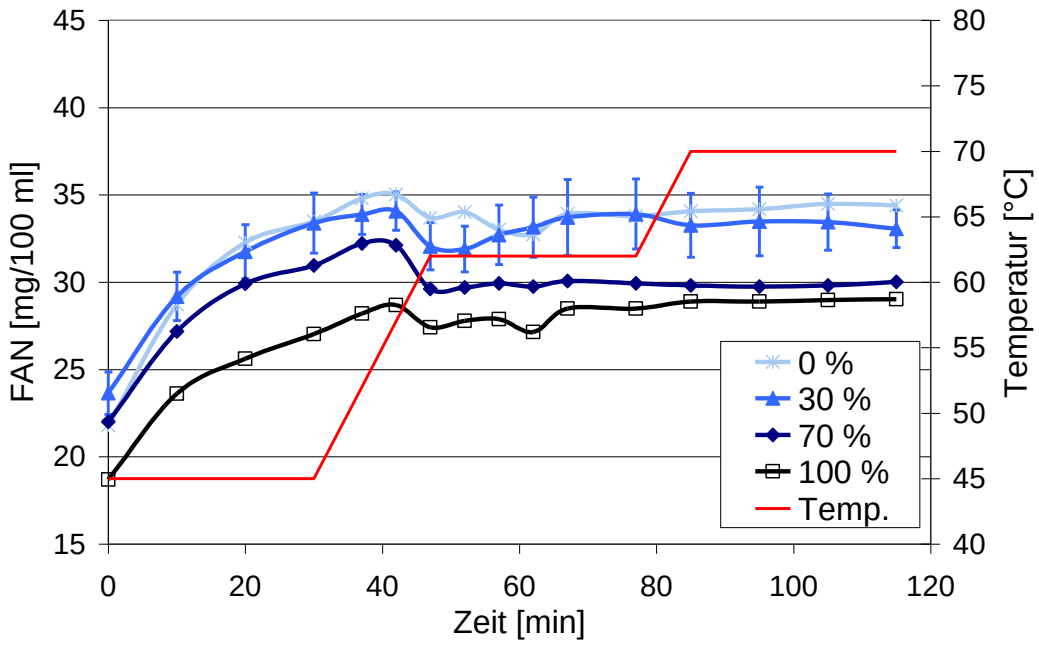


Abbildung 44: FAN-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren 45/62/70 °C, jeweils 30 min Rastzeit.

Die Extraktverläufe bei unterschiedlichen Malzqualitäten sind fast identisch, wie Abbildung 45 zeigt. Dass die Extraktausbeute des schwach und des gut gelösten Malzes fast identisch ist, konnte bereits in der Malzanalyse erkannt werden (siehe Tabelle 8, S. 62) Dies ist aber nicht auf alle Malze zu verallgemeinern. Durch die temperaturbezogene Auftragung lässt sich erkennen, dass - unabhängig von der Malzqualität - die größte Extraktzunahme zwischen 55 und 62 °C erfolgt, wie auch von anderen Autoren berichtet wird [60, 217]. Obwohl die α-Amylase ihr Temperaturoptimum in Maische erst bei 70 - 75 °C [215] hat, wird bereits ab der Verkleisterungstemperatur Extrakt in nennenswerten Mengen freigesetzt.

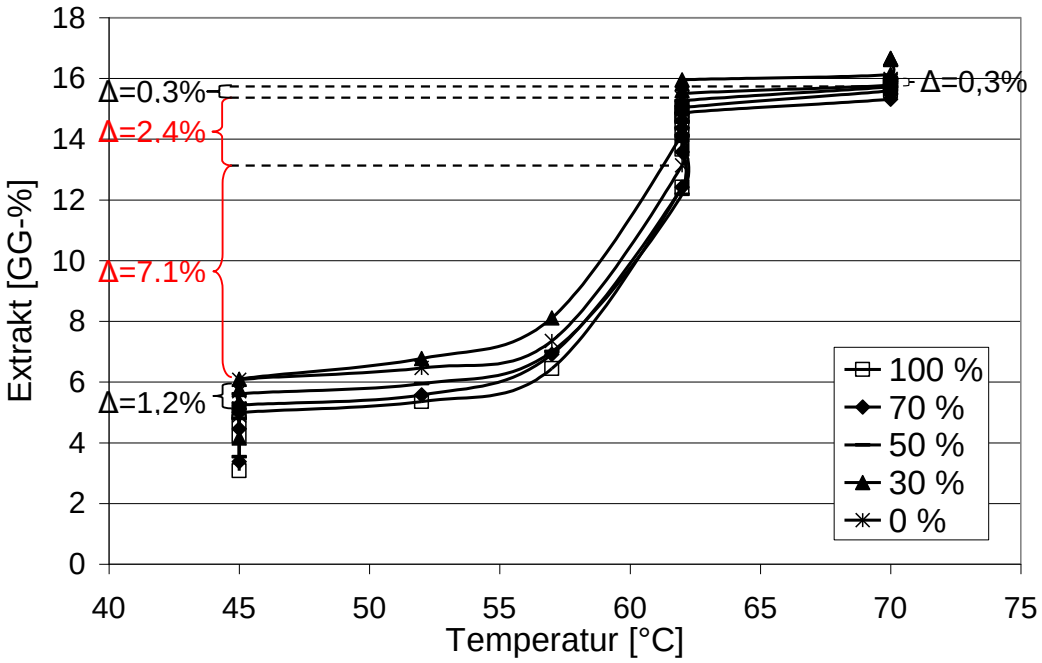


Abbildung 45: Extrakt-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard Maischverfahren 45/62/70 °C jeweils 30 min Rastzeit

Abschließend kann festgestellt werden, dass beim Verbrauen gut gelöster Malze durch die Maischarbeit nur noch geringe Korrekturen vorgenommen werden können. Durch die Malzlösung werden die cytolytischen, proteolytischen und amylolytischen Werte der Maische und Würze festgelegt. Diese sind, bei Verwendung gut gelöster Malze ausreichend, so dass hier kurze Maischverfahren geeignet sind. Es resultieren niedrige β-Glucanwerte sowie hohe Extrakt- und FAN-Werte.

Der Erfolg des Maischprozesses wurde vorwiegend an der Würze- und Bierqualität beurteilt. Es war aber der Wunsch vorhanden, bereits während des Maischprozesses Kriterien zu erfassen, welche es erlauben noch während des Prozesses lenkend eingreifen zu können.

Quellen

Dissertationen von Torsten Dickel [47], Gunther Fischer [67] und Martin Mitzscherling [206] sowie eigene Veröffentlichungen [68, 162]

5.2 Online-Verfolgung des Maischprozesses

Das Maischen stellt im Rahmen der Bierherstellung einen Schlüsselprozess dar. Der Prozess ist durch weit reichende Verflechtungen zu vorgeschalteten und nachgeschalteten Teilschritten gekennzeichnet. Mangels geeigneter Systeme zur Informationsgewinnung ist es bisher nicht möglich, die drei Abbauvorgänge Cytolyse, Amylolyse und Proteolyse prozesstechnisch so zu beobachten, dass Rohstoffschwankungen erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können. Das Potenzial regelungstechnischer Optimierungsstrategien aus technologischer und ökonomischer Sicht bleibt damit ungenutzt. In einer Zusammenarbeit des Lehrstuhls für Fluidmechanik und Prozessautomation mit dem Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I wurde daher ein System entwickelt, mit dem die Abbauvorgänge beim Maischen verfolgt werden können. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sollen als Grundlage für eine rückgekoppelte Prozessführung dienen. Es wurde dabei nicht versucht, die Abbauprodukte in der Maische direkt zu messen. Vielmehr sollte die Beobachtbarkeit der Teilprozesse mit Hilfe verschiedener unspezifischer und onlinefähiger Sensoren und einer Kalibrierung mit multivariaten Verfahren sichergestellt werden.

Abbildung 46 zeigt eine Probenahmestrecke, welche die Erfassung der Größen Dichte, Schallgeschwindigkeit, Leitwert, pH-Wert, Viskosität, Temperatur und Jodwert erlaubt. Die Maische wurde über eine Bypassstrecke mittels einer Exzenterschneckenpumpe einem modifizierten Hydrozyklon (Filterhydrozyklon) zugeführt, welcher die Feststoffe entfernt. Ein Teil des Konus war als Filterfläche ausgebildet. Das verwendete Drahtgewebe hatte eine Maschenweite von 60 µm, welche den Grenzdurchmesser der in der Würze verbleibenden Partikel darstellt. Oberlauf und Unterlauf des Zyklons wurden direkt in den Maischebehälter zurückgeleitet. Das Filtrat durchlief die Messstrecke mit den Sensoren.

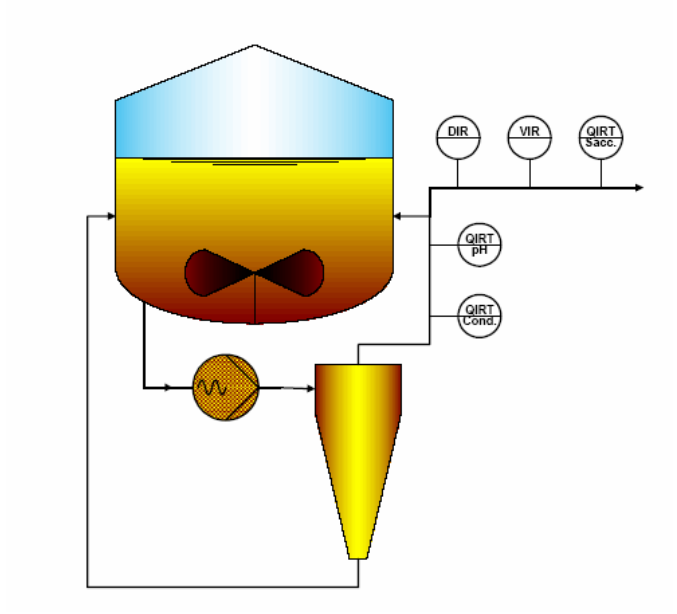


Abbildung 46: R & I Schema einer Messanlage zur Beobachtung des Maischvorganges

Neben den online erfassten Daten wurden in regelmäßigen Abständen Proben genommen, um diese mittels Referenzanalytik hinsichtlich ihrer cytolytischen, amylolytischen und proteolytischen Abbauvorgänge zu beschreiben.

Leitwert

Der Leitwert ist durch den Ionengehalt des verwendeten Brauwassers und die aus dem Malz gelösten Bestandteile beeinflusst. Bei Erreichen der Verkleisterungstemperatur für Stärke wird durch die Verzuckerung die Stärke gelöst, wodurch sich die Leitfähigkeit stark erhöht. Unterhalb der Stärkeverkleisterung zeigen die Proteolyse und parallel ablaufende Phosphorolyse den größten Einfluss auf die Leitfähigkeit, wie Abbildung 47 zeigt. Für diesen Bereich des Maischprogramms ergibt sich eine gute Korrelation zwischen Stickstofflösung und Leitwert.

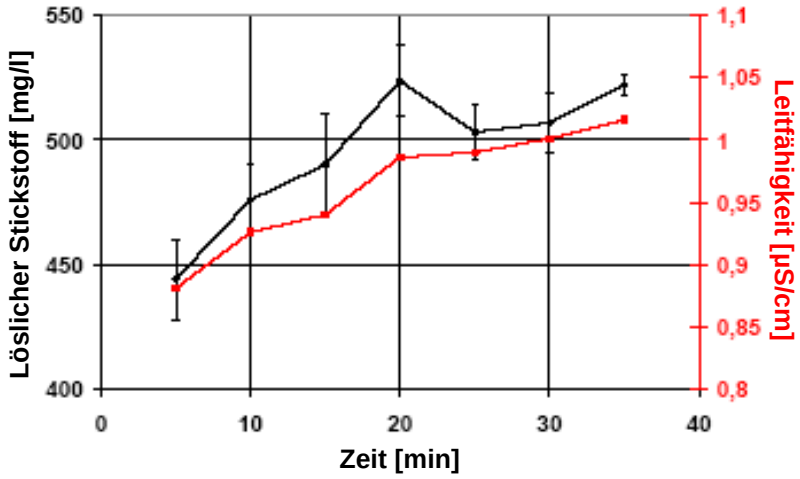


Abbildung 47: Verlauf des löslichen Stickstoffes und der Leitfähigkeit bei einer Maischtemperatur von 45 °C

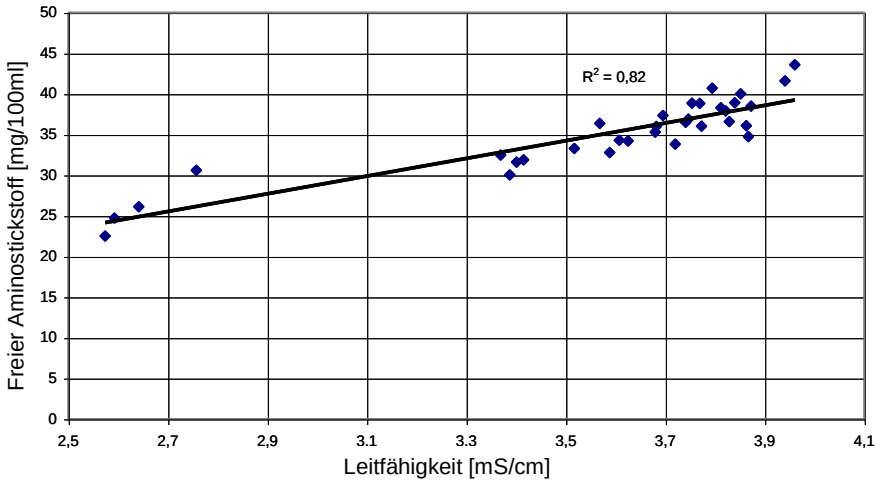


Abbildung 48: Korrelation zwischen FAN und Leitfähigkeit unterhalb der Verkleisterungstemperatur für Stärke

Viskosität

Die Viskosität der Maische steigt mit Erreichen der Verkleisterungstemperatur von ca. 57 °C bei Gerstenmalzmaischen. Gleichzeitig wechselt die Maische das rheologische Verhalten von einem newtonschen zu einem nicht-newtonschen Fluid [68].

Dichte

Die Messung der Dichte bzw. des Extraktes eignet sich für die Verfolgung der Verzuckerung und somit der Ausbeute. Sie korreliert mit dem Verlauf der Maltosebildung in Würze, welche wiederum mit dem Endvergärungsgrad korreliert.

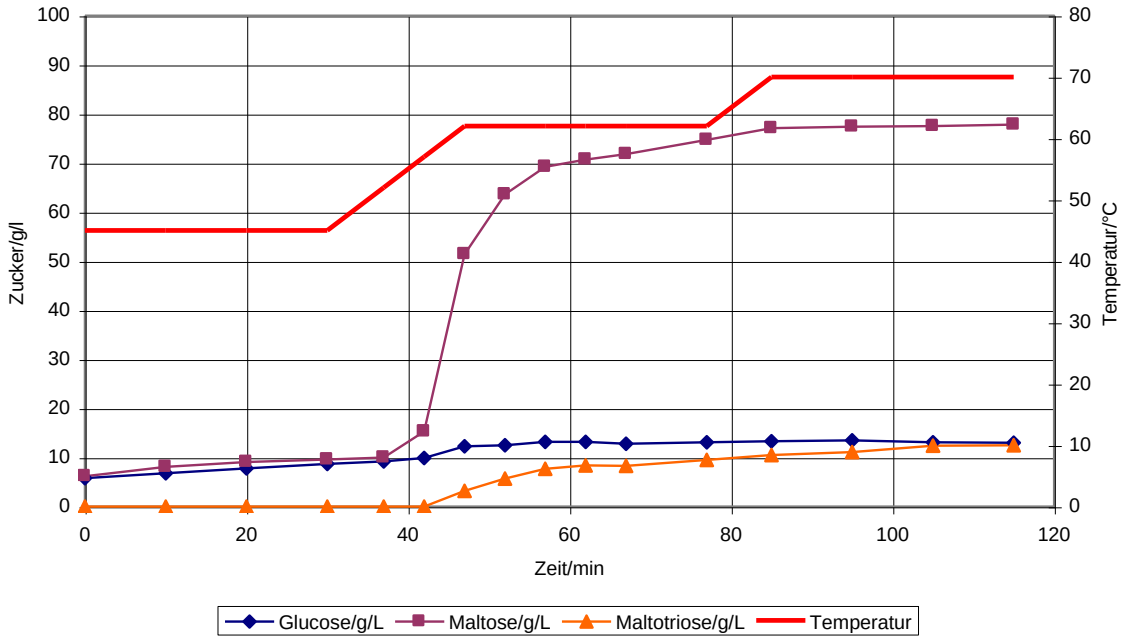


Abbildung 49: Verlauf der Gärungszucker bei einem Eyben-Maischverfahren

Besonders bei Verwendung schwach gelöster Malze zeigte sich eine deutlichere Einflussnahme durch die Maischarbeit. Um Grenzbereiche zu erforschen, wurden weitere Versuche angestellt, in welchen unvermälzte Gerste zum Einsatz kommen sollte.

Quellen

Dissertationen von Torsten Dickel [47], Gunther Fischer [67], Martin Mitzscherling, Florian Kühbeck [163] sowie eigene Veröffentlichungen [68, 166, 207]

5.3 Verwendung von Gerste als Malzersatzstoff

Wie sich in Kapitel 5.1 gezeigt hat, haben die Maischparameter einen mehr oder weniger großen Einfluss auf die Würzequalität. Aus der Erkenntnis, dass die Zumischung schlecht gelöster Malze die Extraktausbeute nur geringfügig beeinflusst, wurde die Forschung auf die Verwendung unvermälzter Gerste gerichtet. Aus Kostengründen würde sich das Verbrauen unvermälzter Rohstoffe anbieten. Neben Reis, Mais, Sorghum und anderen natürlichen Rohstoffen wird auch vereinzelt unvermälzte Braugerste eingesetzt. Besonders in Ostgebieten wie z. B. Russland, wo Gerste angebaut wird und die Mälzereikapazitäten derzeit erst im Aufbau sind, wird vereinzelt unvermälzte Gerste mit eingemaischt. Man weiß, dass bei Substitution eines Teils des Malzes durch Gerste, die Ausbeute sinkt und die Würzezusammensetzung sich ändert. Um hier Optimierungsvorschläge zu erarbeiten, wurden systematische Laborversuche bis zur Würze und Brauversuche bis zum Bier durchgeführt.

Von folgenden Vorteilen bei der Verwendung von Rohfrucht wird in der Literatur bereits berichtet:

- Geringere Kosten pro kg Extrakt, damit geringere Rohstoffkosten pro hl Bier, wobei die Kosten von Enzymen beachtet werden müssen;
- gleichmäßigere Würzen und Biere durch die Variation des Verhältnisses Malz : Rohfrucht. Dies ist von Bedeutung für große Brauereigruppen, welche in verschiedenen Braustätten identische Biere erzeugen wollen;
- die Biere lassen sich durch die geringere Stickstoffbelastung leichter stabilisieren;
- aus demselben Grund ist die Geschmacksstabilität der Biere besser.

Folgende Befürchtungen von Allmalz-Brauern sind bekannt:

- Die Biere sollen eine geringere Vollmundigkeit durch den geringeren Gehalt an Stickstoff und Polyphenolen aufweisen;
- unter Umständen haben die Biere schwächere Schaumeigenschaften;
- die Bitterstoffausbeute steigt, aber die Vollmundigkeit und der Biercharakters werden negativ beeinflusst;
- die Gärung ist langsamer infolge der Reduzierung des assimilierbaren Stickstoffes, wobei eine Veränderung des Spektrums der Gärungsnebenprodukte nicht auszuschließen ist.

Diese Aussagen beziehen sich vor allem auf den Einsatz von Mais und Reis, da dies die am häufigsten eingesetzten und in der Literatur beschriebenen Rohfruchtzusätze sind. Gerste verfügt über dieselben Stoffgruppen wie das Malz und unterscheidet sich somit von Reis und

Mais. Eine Brautauglichkeit ist zu erwarten. Das Problem der Gerste besteht aber darin, wie die wertgebenden Bestandteile aus dem Korn in die Würze überführt werden können.

Um zu ermitteln, wie groß der Rohgerstenanteil in den Suden sein darf, wenn keine Enzyme eingesetzt werden, wurde ein Screening im Kongreßmaisch-Maßstab durchgeführt. Dabei wurde ein Teil der üblichen 50 g Malzschrot (Feinschrot über DLFU-Mühle) durch einen entsprechenden Anteil, 10 %, 20 %, 30 %, 60 %, 90 %, Gerstenschrot (Feinschrot über Labor-Hammermühle) ersetzt. Die Qualität der verwendeten Gerste ist in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Analyse der verbrauten Gerste

Sorte Pasadena Ernte 2004	Einheit	
Wassergehalt der Gerste	%	11,9
Rohprotein Gerste	%, wfr.	11,0
Keimenergie 3. Tag	%	99,0
Keimenergie 5. Tag	%	100,0
Wasserempfindlichkeit	%	30,0
Sortierung > 2,8 mm	%	69,3
Sortierung 2,5 – 2,8 mm	%	21,1
Sortierung 2,2 – 2,5 mm	%	4,8
Abputz	%	4,8
1. Sorte	%	90,4
Anteil > 2,8 mm an 1. Sorte	%	76,7
Wärmebehandlung	Wochen	0
Auswuchs	%	0

Um den Einfluss der Maischparameter Zeit und Temperatur zu ermitteln, wurden zwei in der Praxis übliche Maischverfahren untersucht, welche Abbildung 50 zeigt.

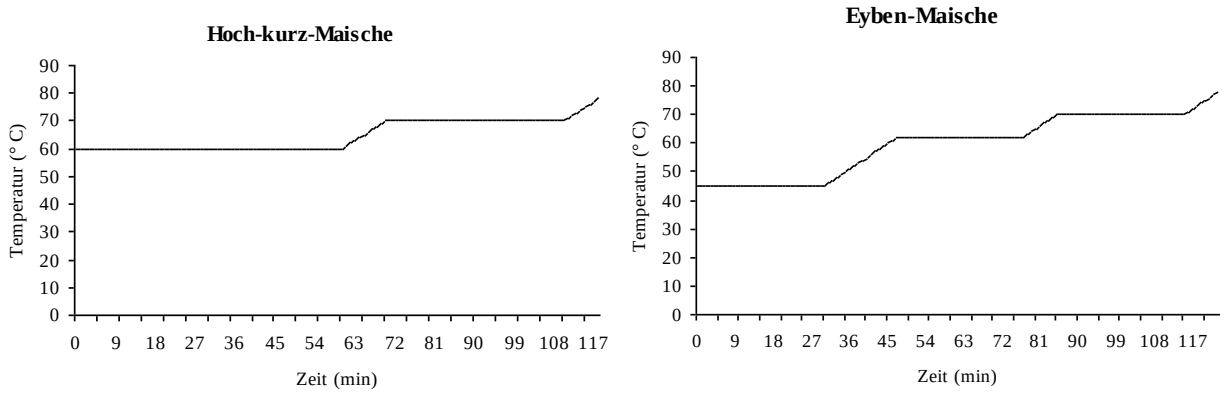


Abbildung 50: Maischverfahren bei der Verwendung unvermälzter Gerste

In Anlehnung an das Kapitel 5.1 werden die cytolytischen, proteolytischen und amylolytischen Eigenschaften der Maischen bzw. Würzen betrachtet.

Maischversuche mit unterschiedlichen Gerstenanteilen im Labormaßstab

Steigende Gerstenanteile führten zu höheren β-Glucangehalten, wie Abbildung 51 zeigt. Durch das Einmaischen bei 45 °C (Eyben-Maische) wurde β-Glucan teilweise abgebaut. Dennoch war der Einfluss der Malzqualität bzw. der Anteil ungelöster Gerste dominant. Soll ein Grenzwert von 200 mg/l in der Kongresswürze nicht überschritten werden [11], dann dürften nicht mehr als 5 % Gerste ohne Enzymezusatz nach dem Eyben-Maischverfahren verbraut werden. Das Kongressmaischverfahren ähnelt dem Maischdiagramm nach Eyben, besonders hinsichtlich der Einmaischtemperatur. Nach dem Hoch-Kurz-Maischverfahren wäre der erlaubte Anteil noch geringer. Dies bestätigt Aussagen aus der Praxis, welche bei Zumischungen von ca. 5 % unterlöster Malze schon Filtrationsstörungen beobachten konnten. Aus diesem Grund wird oftmals die Homogenität nach dem Calsberg-Calcofluor-Test ermittelt, welche nach *Back* [11] mindestens 75 % betragen soll.

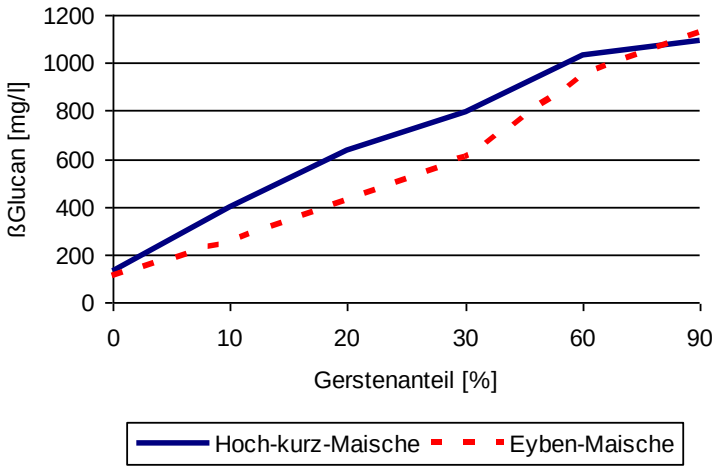


Abbildung 51: β-Glucangehalt in Labormaischen bei unterschiedlichen Anteilen unvermälzter Gerste

In Abbildung 52 bestätigt sich die Erkenntnis, dass mit sinkender Malzlösung bzw. mit steigenden Anteilen unvermälzter Gerste die Stickstoffausstattung der Würzen sinkt.

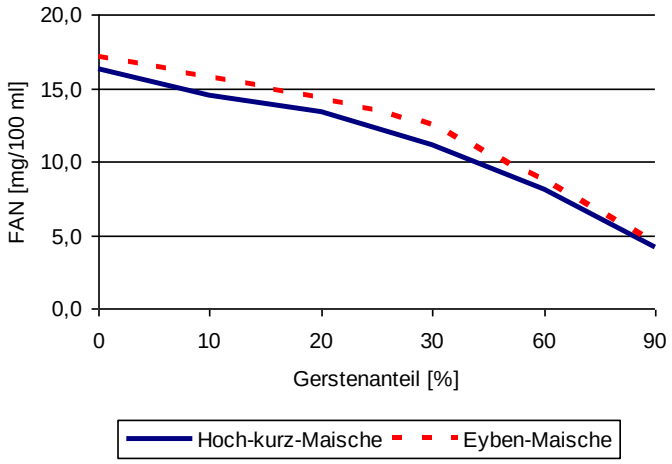


Abbildung 52: Gehalt an Freiem Aminostickstoff (FAN) in Labormaischen bei unterschiedlichen Anteilen unvermälzter Gerste

Narziß [216] geht davon aus, dass der FAN-Gehalt 22 % des löslichen Stickstoffes betragen soll, um eine gute Hefeernährung zu gewährleisten. Dieser Grenzwert würde bei den vorliegenden Versuchssuden einen Gerstenanteil von 20 % zulassen. Zusätzlich ist zu beachten, dass bei einem optimalen Hefemanagement die Menge an FAN deutlich reduziert werden kann, ohne dass Gärstörungen auftreten. Eine gute Hefevitalität kann eine mangelhafte Würzequalität teilweise kompensieren, ohne dass die Gärung und letztendlich auch die Bierqualität darunter leiden.

Da die Wassergehalte von Gerste und Malz sehr unterschiedlich waren, sind vor allem die Extraktgehalte differenziert zu betrachten. Um die Wassermenge, die das verwendete Schrot hatte, zu ermitteln, war es notwendig, für jedes Mischungsverhältnis Gerste:Malz (0:100, 10:90, 20:80, 30:70, 60:40 und 90:10) den Wasseranteil zu berechnen. Dazu wurde folgende Formel verwendet:

$$\frac{\%\,Gerste \cdot Gerstenwassergehalt\ \%}{100} + \frac{\%\,Malz \cdot Malzwassergehalt\ \%}{100} = Schrotwassergehalt$$

Wassergehalt Gerste: 11,9 %
Wassergehalt Malz: 5 %

Tabelle 11 zeigt die Extraktgehalte der Laborwürzen. Es ist auffällig, dass die Extraktgehalte auch bei hohen Gerstenanteilen auf sehr hohem Niveau bleiben. Es wird vermutet, dass durch die Feinvermahlung des Gerstenanteiles mittels Hammermühle ein Teil der enzymatischen Modifikation durch die mechanische Zerkleinerung kompensiert wurde. Dies deckt sich mit den Erfahrungen aus der Alkoholherstellung. In dem von *Klisch* [135] vorgestellten kontinuierlichen zweistufigen Mahlmaischverfahren (Druckloser Stärkeaufschluss, DSA) wird der Rohstoff mittels Hammermühle zerkleinert, um möglichst hohe Ausbeuten zu erzielen. Zusätzlich wird die verzuckerte Maische über eine mit Zahnscheiben besetzte Scheibenmühle gefahren, wobei sich der Anteil an Partikeln > 0,71 µm halbiert. In einem Zwischengefäß wird nachverzuckert, so dass sich die Alkohol- bzw. Extraktausbeute noch einmal steigern ließ. Eine derartige Nachbehandlung wäre bei kontinuierlichen Maisch- bzw. Brauverfahren denkbar.

Das Maischverfahren nach Eyben zeigte tendenziell höhere Extraktwerte als das Hoch-Kurz-Maischverfahren. Der Extraktwert des Hoch-Kurz-Maischverfahrens bei 30 % Gerstenanteil wird als Ausreisser betrachtet.

Tabelle 11: Extraktgehalt von Laborwürzen bei unterschiedlichen Anteilen an Gerste

Gerstenanteil [%]	0	10	20	30	60	90
Hoch-kurz-Maischverfahren						
Extrakt [% wfr.]	80,9	81,2	81,3	(76,3)	80,5	79,0
Eyben-Maischverfahren						
Extrakt [% wfr.]	81,7	81,8	81,4	81,0	80,9	79,4

Um ein Vorstellung davon zu bekommen, welcher Teil des Extraktes aus dem Malz und welcher aus der Gerste gelöst wurde, sind in Abbildung 53 die prozentualen Anteile der wasserfreien Extrakte beim Maischverfahren nach Eyben kumulativ dargestellt. Als Grundlage der Malzausbeute sind die Versuche ohne Gerstenzusatz benutzt worden.

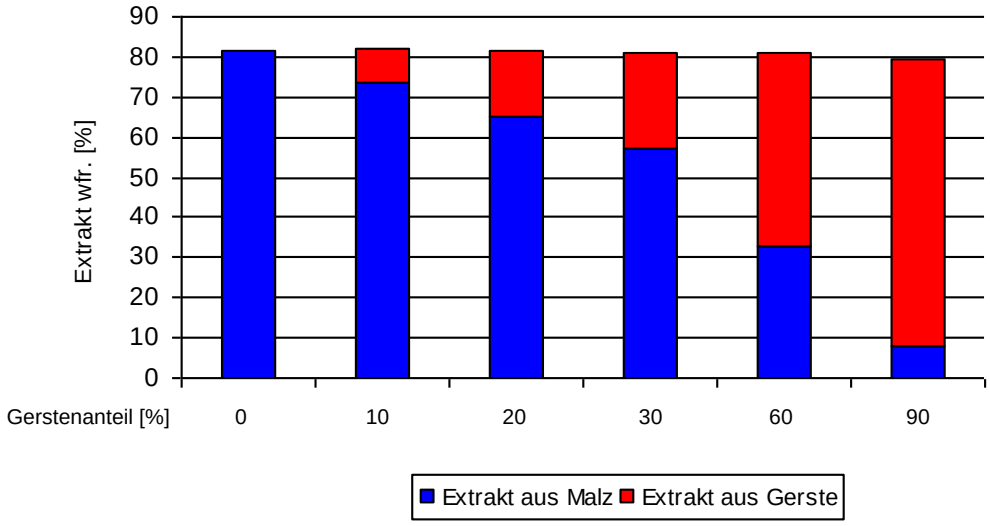


Abbildung 53: Prozentuale Anteile des wasserfreien Extraktes der Würze bei Anwendung eines Eyben-Maischverfahrens unter Variation der Gerstenanteile

Sudversuche mit unterschiedlichen Gerstenanteilen im Pilotmaßstab

Nachdem die systematischen Voruntersuchungen gezeigt haben, dass cytolytisch ein Gerstenzusatz bis 5 % und proteolytisch ein Anteil von 20 % ohne Enzyme möglich wäre, fiel die Wahl auf einen Anteil von 20 %. Es ist bekannt, dass Gerstenzusätze von 10 % in der Praxis ohne Enzymzusätze verarbeitet werden. Es sollte jedoch untersucht werden, ob auch 20 % Gerste noch zu verarbeiten sind. Als Variation wurden die Schrotung (Zwei-Walzenmühle mit einer Spaltweite von 0,8 mm / Hammermühle mit einer Siebweite von 4 mm) und das Maischverfahren (Eyben, Hoch-Kurz) variiert. Der Malzanteil wurde immer über eine Zwei-Walzenmühle gefahren, da das Sudwerk mit einem Läuterbottich ausgestattet war. Nur der Gerstenanteil wurde unterschiedlich vermahlen Die Sude fanden im Pilotsudwerk des Lehrstuhles für Technologie der Brauerei I in Weihenstephan mit einer Ausschlagmenge von 50 l statt. Die Würzen wurden bis zu den abgefüllten Bieren verarbeitet.

Tabelle 12 zeigt den Versuchsplan, der insgesamt 6 Sude umfasste. Es handelte sich dabei um Einzelsude.

Tabelle 12: Versuchsplanung für die Pilotsude mit unterschiedlichen Anteilen an Gerste

Bezeichnung der Sude	Gerstenanteil	Schrotung der Gerste	Schrotung des Malzes	Maischverfahren
Sud 1	0 %	----------	2-Walzenmühle	Hoch-kurz-Maische
Sud 2	0 %	----------	2-Walzenmühle	Eyben-Maische
Sud 3	20 %	2-Walzenmühle	2-Walzenmühle	Hoch-kurz-Maische
Sud 4	20 %	2-Walzenmühle	2-Walzenmühle	Eyben-Maische
Sud 5	20 %	Hammermühle	2-Walzenmühle	Hoch-kurz-Maische
Sud 6	20 %	Hammermühle	2-Walzenmühle	Eyben-Maische

Bereits während des Vorderwürzelaufes fiel auf, dass nur bei den Suden, bei denen die Gerste über die Hammermühle geschrotet wurde, die Läuterzeit verlängert war. Als Grund wird die feinere Vermahlung der Gerste und der daraus resultierende dichtere Treberkuchen vermutet.

Bei den Suden aus Walzenschrot hatte die Gerstenschüttung keinen Einfluss auf die Läuterzeit.

Bei den β-Glucanen zeigten die Würzen, welche mit Rohgerste hergestellt wurden, erwartungsgemäß höhere Werte als die reinen Malzwürzen, wie Abbildung 54 zeigt.

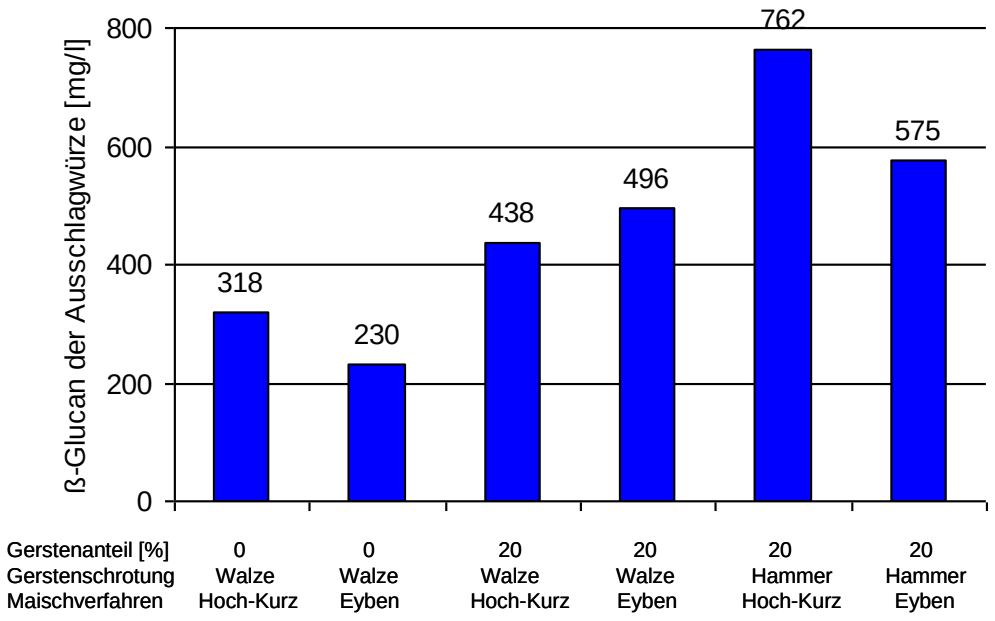


Abbildung 54: β-Glucankonzentrationen in Ausschlagwürze bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren

Wieder zeigt sich, dass durch das Einmaischen bei 45 °C (Eyben-Maische) β-Glucan abgebaut werden kann. Dass dies bei der Vermahlung der Gerste über den Walzenstuhl nicht so zu erkennen ist, liegt daran, dass die Nachlösung bei höheren Temperaturen stärker ist, als der enzymatische Abbau bei tiefen Temperaturen. Dies wurde in Abbildung 40, S. 70 bereits diskutiert. Es lässt sich daraus ableiten, dass bei der Verwendung von Gerste eine schwache Schrotung nicht durch eine intensive Maischarbeit vollkommen kompensiert werden kann.

Insgesamt wird durch eine intensive Schrotung (Hammermühle) mehr β-Glucan freigesetzt als durch eine Walzenschrotung. Um Filtrationsstörungen zu vermeiden, sollten exogene Enzyme zugegeben werden. Eine Dosage thermostabiler Glucanasen und Xylanasen beim Maischen ist in der Praxis üblich.

Ähnlich verhält es sich auch beim löslichen Stickstoff der Ausschlagwürzen, wenn Gerste verwendet wird, wie aus Abbildung 55 ersichtlich ist. Durch die feinere Vermahlung der Hammermühle wird tendenziell mehr Stickstoff freigesetzt, als beim Walzenstuhl. Parallel zur mechanischen Modifikation beim Schroten kann man sehen, dass auch die enzymatische Modifikation beim Mälzen mehr Stickstoff mobilisiert. Die Mälzung ist aber dominant.

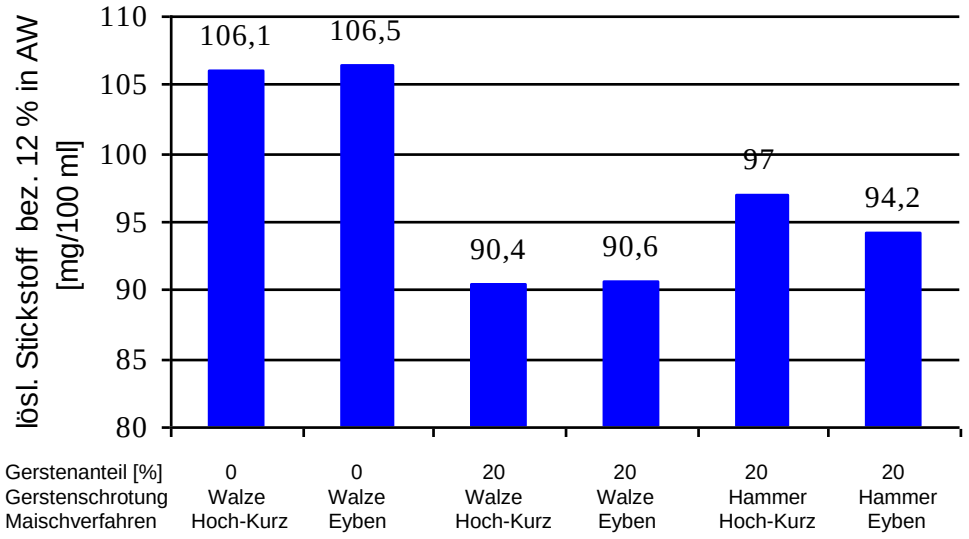


Abbildung 55: Löslicher Stickstoff der Ausschlagwürze bezogen auf 12 % Stw. bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren

Die Werte des Freien Aminostickstoffes (FAN) verhalten sich wie der Gesamtstickstoff und liegen auf einem hohem Niveau, wie Abbildung 56 zeigt. Auch bei 20 % Gerstenanteil beträgt der FAN ca. 20 % des Gesamtstickstoffes der Würze. Dies bestätigt die Ergebnisse der Vorversuche.

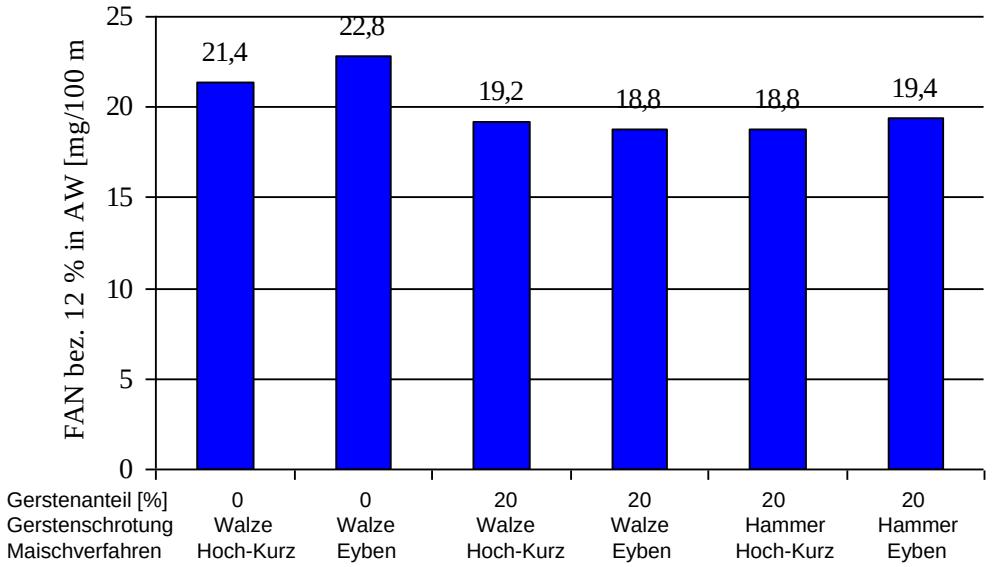


Abbildung 56: Freier Aminostickstoff (FAN) der Ausschlagwürze bezogen auf 12 % Stw. bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren.

Bei Sudhausabnahmen werden meist die Deutsche Industrie Norm (DIN) 8777 und die Analysenvorschriften zur Sudwerkskontrolle nach MEBAK [200] benutzt. Dort wird die Extraktausbeute über die Treberverluste ermittelt. Da der Auswaschbare Extrakt der Treber primär durch die Läuterarbeit beeinflusst werden kann, soll er nicht näher betrachtet werden. Bezüglich des Aufschließbaren Extraktes gilt ein Grenzwert von 0,8 % Extrakt bezogen auf

einen Treberwassergehalt von 80 %. Der Aufschließbare Extrakt wird durch die Malzqualität, sowie durch die Schrot- und Maischarbeit beeinflusst. Aus Abbildung 57 ist ersichtlich, dass bei Verwendung unvermälzter Gerste die Treberverluste steigen. Durch das Eyben-Maischverfahren kann die Ausbeute verbessert werden. Den stärksten Einfluss hat eine feinere Schrotung durch die Hammermühle, wobei hier jedoch auch die β-Glucangehalte und somit das Filtrationsrisiko gestiegen sind. Dennoch können die Extraktverluste in einem Rahmen liegen, welche sich durch die Kosteneinsparungen beim Einkauf kompensieren. Besonders in jenen Ländern, die Malz teuer importieren müssen, während Gerste im Land vorhanden ist, ist die Verwendung von Gerste anstatt von Malz rentabel.

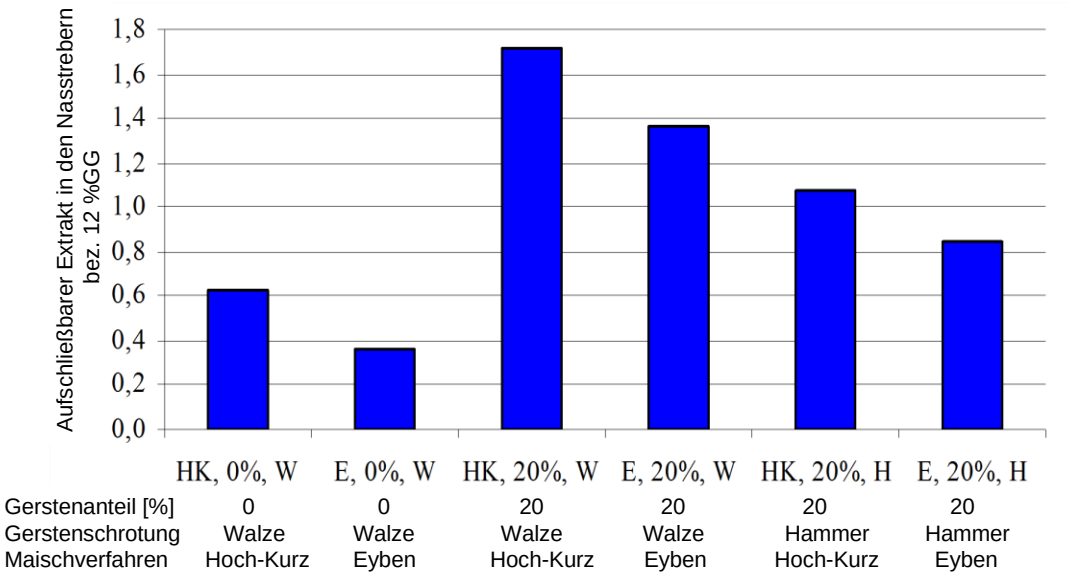


Abbildung 57: Aufschließbarer Extrakt der Naßtreber in GG-% (bez. 80 % Wassergehalt) bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren

Abgesehen von der Rohstoffqualität und der Schrotfeinheit sowie den in vorigen Kapiteln beschriebenen Maischparametern gibt es noch die Möglichkeit die Maische zu kochen, um einen thermischen Aufschluss der Stärke zu erzielen. Es sollte nun ermittelt werden, welcher Unterschied zwischen einem Infusions- und einem Dekoktionsverfahren bestehen.

Quellen

Diplomarbeit von Karl Peter Müller sowie eigene Untersuchungen

5.4 Vergleich von Infusion und Dekoktion

Neben den Maischparametern Zeit, Temperatur, Gussverhältnis und pH-Wert gibt es noch die Möglichkeit, durch eine Maischekochung einen thermischen bzw. physikalischen Aufschluss der Maischepartikel mittels Teilmaischekochung durchzuführen.

Immer wieder stellt sich die Frage, ob ein Infusions- oder Dekoktionsmaischverfahren benutzt werden soll. Technisch betrachtet ist das Dekoktionsverfahren aufwändiger, weshalb heutzutage das Infusionsverfahren die meiste Verbreitung erfährt. Um Energieverluste

(Brüden über Dach) sowie auch Geruchsemissionen zu vermeiden, wird die Maische meist nicht mehr gekocht, sondern nur noch knapp unter Kochtemperatur heißgehalten. Seit den 60er Jahren wurden eine Vielzahl von Untersuchungen veröffentlicht [117, 212, 226, 247, 283, 313], die den Unterschied zwischen Infusions- und Dekoktionsverfahren technologisch betrachten. Dabei wurden verschiedene Einmaischtemperaturen, oft nicht standardisierte Hefevitalitäten und die derzeit verfügbaren Malzqualitäten eingesetzt. Versuche im Pilotmaßstab (60 l Bier) wurden durchgeführt, um unter aktuellen und standardisierten Bedingungen systematisch den Unterschied zu erforschen. Die verwendeten Maischverfahren zeigt Abbildung 58.

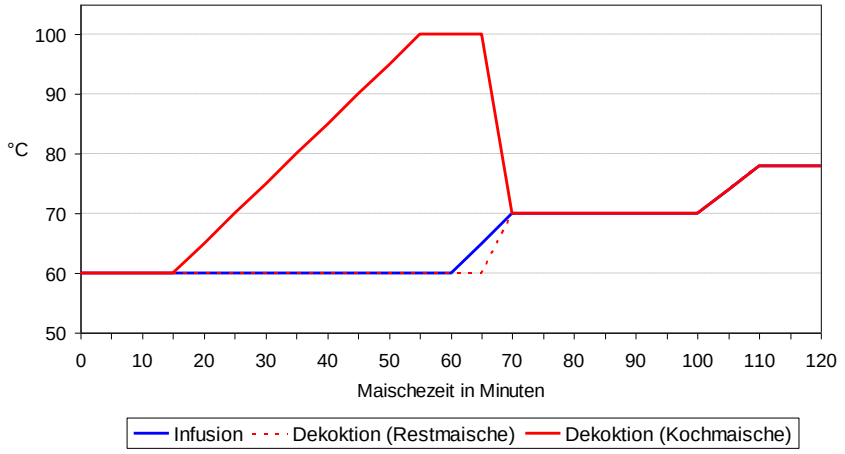


Abbildung 58: Schema der Infusions- und Dekoktionsmaischen

Im Zusammenhang mit der Geschmacksstabilität des Bieres und Alterungserscheinungen werden häufig Lipidabbauprodukte, wie z.B. langkettige Fettsäuren als Vorläufersubstanzen für Alterungscarbonyle genannt. Nach Abbildung 59 dominieren sowohl bei der Dekoktion wie auch bei der Infusion die Fettsäuren Linolsäure (C 18:2) und Palmitinsäure (C 16), während die Linolen- (C 18:3) und Stearinsäure (C 18) in deutlich geringeren Konzentrationen auftreten. Myristin- (C 14) und Ölsäure (C 18:1) kommen praktisch nicht in der Pfanne-voll Würze vor. Die gefundenen Ergebnisse bestätigen die Erkenntnisse von *Mück* [212]. Anhand der durchgeführten Versuche konnte im Bezug auf die langkettigen Fettsäuren kein signifikanter Unterschied zwischen Infusions- und Dekoktionsverfahren festgestellt werden.

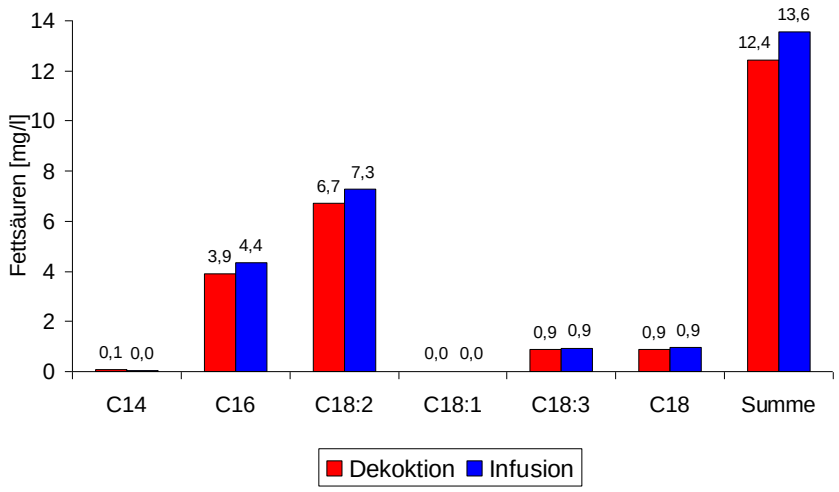


Abbildung 59: Fettsäuregehalte in Pfanne-voll-Würzen nach Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren

Die Dextrine wurden mittels Hochleistungsionenaustauscherchromatographie und gepulster amperometrischer Detektion (HPAEC-PAD) bestimmt. Die Identifizierung der linearen Dextrine erfolgte über einen externen Standard, der aus linearen Maltooligosacchariden (G4-G10) bestand. Die verzweigten Dextrine (I4 bis I10) wurden ebenfalls detektiert. Signifikant war der Unterschied in der Dextrinzusammensetzung während des Maischens, wie Abbildung 60 zeigt. Durch das Kochen der Maische werden nur lineare Dextrine weiter in der Maische gelöst. Nach dem Zubrühen zur Restmaische bzw. spätestens im Verlauf des Vorderwürzelaufes gleichen sich die Unterschiede zwischen Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren wieder an. Dies bestätigt, dass der enzymatische Aufschluss weit effektiver ist als der thermische Aufschluss.

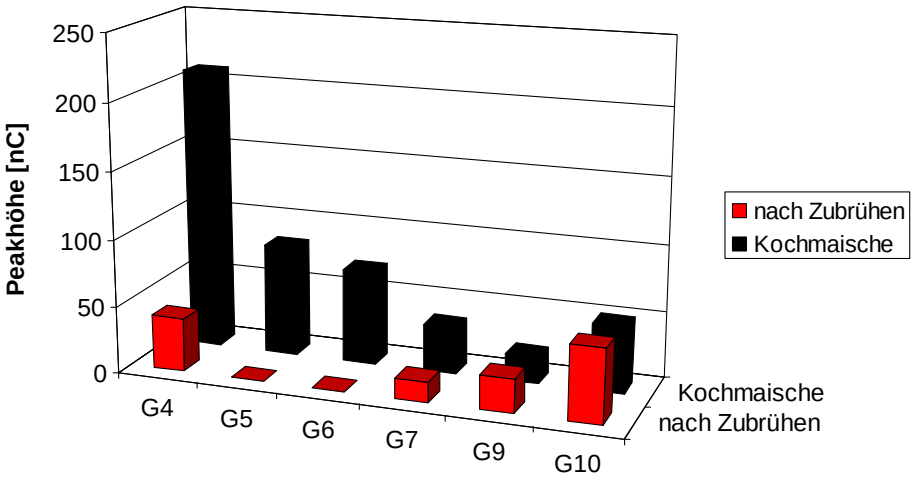


Abbildung 60: Dextrinspektrum der Kochmaische nach dem Kochen und nach dem Zubrühen zur Restmaische

Durch das Malz wirde eine Vielzahl von Substanzen in die Würze eingebracht, welche den Geruch, den Geschmack und das Aroma des Bieres beeinflussen können. Während beim Maischen die Lösungsvorgänge des Malzes sowie enzymatische Reaktionen dominieren, überwiegen bei höheren Temperaturen chemische Reaktionen. Dies trifft auf das Kochen der Maische, das Aufheizen in der Würzepfanne, den Würzekochprozess und die Heißhaltezeit zu. Bei den hohen Temperaturen der Maische- und Würzekochung werden einerseits flüchtige Aromastoffe ausgetrieben, andererseits werden neue gebildet. Wird ein Stoff gebildet und gleichzeitig verdampft, so bildet sich ein Gleichgewicht und die Aromastoffkonzentration in der Würze bleibt konstant.

Nach dem Abläutern wiesen die Pfanne-voll-Würzen des Infusionsverfahrens zunächst leicht höhere Gehalte an Streckeraldehyden auf, was auf die Ausdampfung der Streckeraldehyde während des Maischekochens beim Dekoktionsverfahren zurückzuführen ist (vgl. Abbildung 61). Nach 50-minütiger atmosphärischer Kochung waren die Würzen im Gehalt an Streckeraldehyden jedoch analytisch nahezu identisch. Bei der Maischekochung werden auch Würzearomastoffe verdampft. Dieser Unterschied ist nach der Würzekochung nicht mehr feststellbar. Somit bestätigt sich, dass die Würzekochung im Vergleich zur Maischekochung einen weit größeren Einfluss auf die Aromastoffzusammensetzung der Würze hat und Unterschiede in der Pfanne-voll-Würze egalisieren kann.

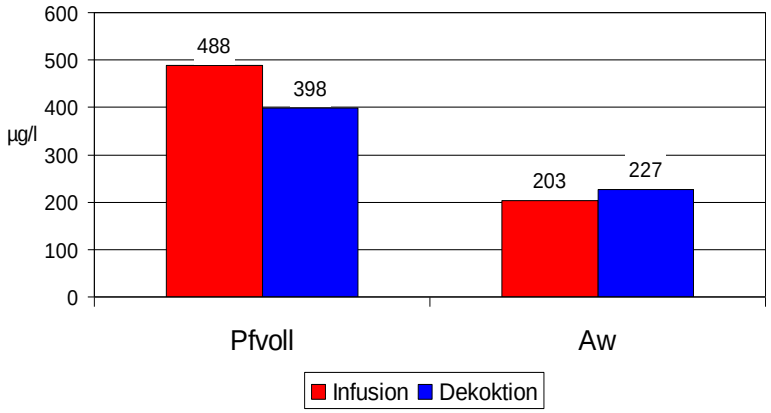


Abbildung 61: Summe der Streckeraldehyde von Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren in Pfanne-voll- und Ausschlagwürze

Die Detaildarstellung der Würzearomastoffe zeigt Abbildung 62. Besonders anschaulich wurden die Lipidabbauprodukte Hexanal und Heptanal ausgedampft. Sie werden nicht nachgebildet, weswegen sie als „Ausdampfindikatoren“ zur Beurteilung der „Ausdampfeffizienz“ eines Kochsystems herangezogen werden. Nur Furfural und 2-acetyl-Furan nahmen im Zuge der Maillardreaktion stetig zu und wurden nur wenig ausgedampft.

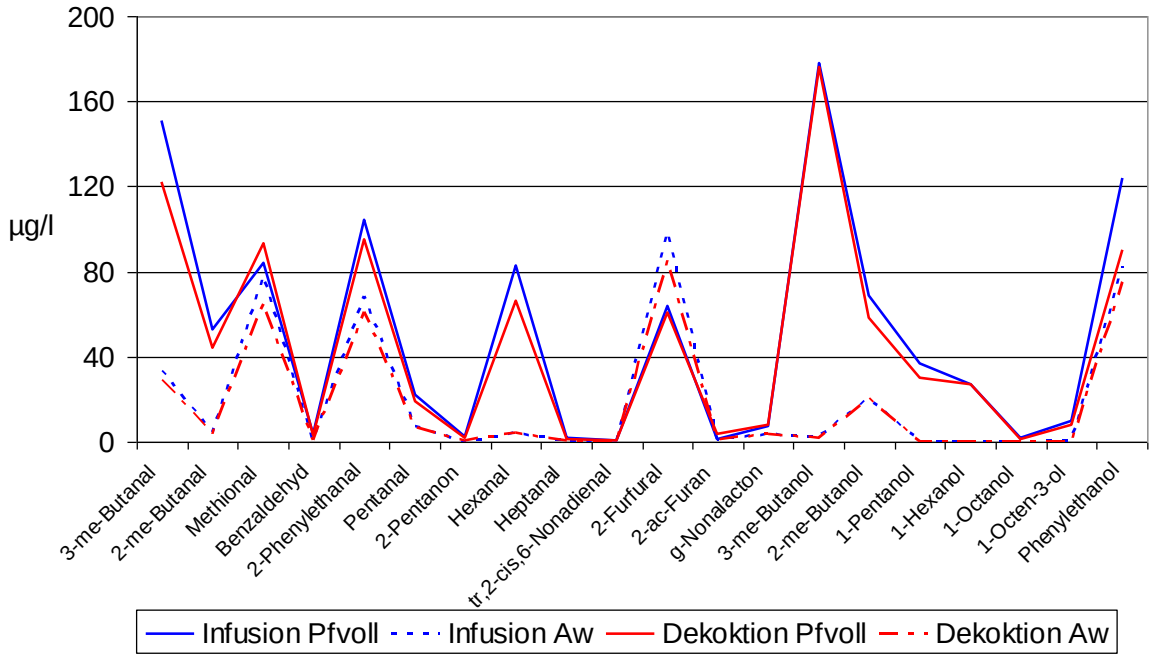


Abbildung 62: Aromastoffspektrum von Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren in Pfanne-voll- und Ausschlagwürze

Zwischen Infusions- und Dekoktionsverfahren bestehen im Bereich der chemisch-technischen Analysenwerte nur geringe bis gar keine Unterschiede. Statistisch signifikant ist, dass der noch koagulierbare Stickstoff der Anstellwürzen beim Dekoktionsverfahren geringer ausfällt, ohne jedoch negativ auf die Schaumstabilität durchzuschlagen. Dies deckt sich mit den Aussagen aus der Literatur. Die Eiweißausfällung beim Maischekochen ist meist im Whirlpool sichtbar, der dadurch einen kleineren Trubkegel ausbildet. In Folge der stärkeren

Eiweißausscheidung ergibt sich wohl auch die etwas bessere chemisch-physikalische Stabilität der Dekoktionsbiere gegenüber den Infusionsbieren.

Auswirkungen des Dextrinaufschlusses auf das Spektrum der vergärbaren Zucker wurden nicht gefunden. Glucose, Maltose und Maltotriose waren absolut identisch in Infusions- und Dekoktionswürzen. Das Stickstoffspektrum war gleich. Die Analysen der Biere zeigten keine signifikanten Unterschiede. Folglich waren die Bieraromastoffe absolut identisch.

Bei der Verkostung der frischen und forciert gealterten Biere mittels Dreiecksprobe wurde kein statistisch signifikanter Unterschied festgestellt, wenngleich einige Verkoster die Biere aus Infusions- und Dekoktionsverfahren über mehrere Verkostungsreihen unterscheiden konnten. Ein statistischer Test auf Gleichheit der Biere zeigte, dass nicht ausreichend falsche Antworten vorliegen, um von einer Gleichheit zu sprechen. Somit konnte weder die Gleichheit noch der Unterschied der Verkostungsergebnisse statistisch bewiesen werden.

Da die Maischverfahren bei unseren Versuchen ähnliche Rasten hatten, ergaben sich kaum Unterschiede in den Würze- und Bieranalysen. Der Vergleich mit der Literatur zeigt, dass dort oft mit unterschiedlichen Einmaischtemperaturen und Rastzeiten unterhalb 60 °C gearbeitet wurde. Durch die unterschiedlichen cytolytischen und proteolytischen Rasten ergaben sich dort Auswirkungen auf z.B. die Stickstoffzusammensetzung. Dies schlägt sich in Farbe, TBZ, Würzearomastoffspektrum bis hin zum Gärungsnebenproduktspektrum und der Alterungsstabilität nieder, welche nicht immer untersucht wurden.
Ein weiterer Grund für die geringen Unterschiede im Bier liegt in der Malzqualität. Die Versuche wurden mit einem gut gelösten Gersten- bzw. Weizenmalz durchgeführt. Knapp gelöste Malze reagieren deutlicher auf die Maischintensität und somit auch auf den thermischen Aufschluss beim Würzekochen. Dies zeigt sich dann z.B. in einer vermehrten Lösung von Polyphenolen, Fettsäuren, β-Glucan und hochmolekularem Stickstoff.

Dass der Wechsel zwischen Infusions- und Dekoktionsverfahren möglich ist, ohne den Biercharakter analytisch und sensorisch zu verändern, wird seit Jahren durch die Praxis bestätigt. Dennoch sollten beim Umschreiben des Maischprogramms die Temperaturen und Zeiten der einzelnen enzymatischen Rasten ähnlich sein. Man kann sich mit dem Infusionsverfahren am Verlauf der Restmaische orientieren.

Die Maischarbeit hat Einfluss auf die Geschmacksstabilität des Bieres. Im Zuge stetig wachsender Anforderungen an die Mindesthaltbarkeit von Seiten der Logistik- und Marketingabteilungen wurde dieser Punkt verstärkt untersucht.

Quellen

Dissertation von Markus Herrmann [108] und Diplomarbeit von Peter Köhler sowie eigene Veröffentlichungen [137, 138]

5.5 Einfluss der Maischtemperatur auf die Lipidoxidation

Der Zusammenhang von Geschmacksstabilität und dem Gehalt der Biere an Carbonylen war in der Vergangenheit immer wieder Forschungsgegenstand verschiedener Arbeitsgruppen. Besonderes Interesse galt dabei dem Abbau der Lipide und deren Oxidationsprodukten, die

als Precursoren des Alterungsgeschmacks angesehen werden. Die Bildung der Aromastoffe aus den ungesättigten Fettsäuren des Malzes erfolgt einerseits durch enzymatische Oxidation beim Maischen durch Lipoxygenasen und andererseits durch Autoxidation wie in Kapitel 4.2, S. 44 beschrieben wurde. Die gebildeten Fettsäurehydroperoxide sind instabil und werden zu kurzkettigen Carbonylen und Säuren abgebaut. Es konnte gezeigt werden, dass einige dieser Abbauprodukte für die Entstehung des Alterungsgeschmacks im Bier verantwortlich sind. Besonders aromaintensive Carbonyle, wie z. B. das trans-2-Nonenal, können bereits im Sub-ppb-Bereich einen „off-flavour“ des Bieres hervorrufen.

Nachfolgende Ergebnisse wurden in einer systematischen Untersuchung über den Einfluss des Blattkeims auf die Bierqualität erarbeitet. Grund hierfür ist, dass im Blattkeim die Konzentration an Fettsäuren und deren Abbauprodukte sehr hoch ist, wie in Abbildung 21, S. 47 gezeigt wurde.

Maischversuche mit steigendem Blattkeimgehalt im Labormaßstab

Der Einfluss des Blattkeims auf die Würzezusammensetzung wurde in Labormaischversuchen analysiert, bei denen der Malzschüttung aufgereinigtes, zerkleinertes Blattkeimmaterial in steigenden Anteilen zugegeben wurde. Die Würzen wurden nach dem Kongressmaischverfahren [3] hergestellt.

In einer ersten Versuchsreihe betrug die Blattkeimzugabe 0 %, 20 %, 40 % und 100 %. In Tabelle 13 sind die Analysenergebnisse der Würzen mit steigendem Blattkeimanteil zusammengestellt. Die Versuche wurden jeweils in Dreifachbestimmung durchgeführt.

Tabelle 13: Würzeanalyse der Laborwürzen mit steigendem Blattkeimanteil; GM = Gerstenmalz, BK = Blattkeime (n = 3)

	100 % GM	80 % GM 20 % BK	60 % GM 40 % BK	100 % BK
Extrakt wfr. (%)	80,9	78,9	76,2	66,1
Verzuckerungszeit (min)	10	10-15	15-20	> 60
pH	5,86	5,92	5,99	6,19
Farbe (EBC)	5,0	5,0	5,5	6,5
FAN (mg/100g MTrS)	161	203	235	408
lösl-N (mg/l)	733	1025	1324	2043
Zink (mg/l)	0,19	0,46	0,95	2,20
β-Glucan (mg/l)	180	165	119	< 10
Polyphenole (mg/l)	59	44	35	24
Anthozyanogene (mg/l)	28	21	16	5
Tannoide (mg/l)	30	28	14	8

Einfluss der Maischtemperatur auf die LOX-Aktivität

Zur Untersuchung der Hitzestabilität von LOX wurde Malzfeinschrot bei verschiedenen Temperaturen eingemaischt und der Maische nach definierten Zeiten eine Probe zur Bestimmung der LOX-Aktivität entnommen. Den zeitlichen Verlauf der LOX-Aktivität gibt Abbildung 63 wieder. Dabei zeigte sich die LOX von Malz als relativ hitzeempfindlich gegenüber höheren Maischtemperaturen. Während die LOX-Aktivität in der isothermen 45 °C-Maische nach 60 Minuten noch 40 % der Ausgangsaktivität betrug, konnte in der 55 °C-Maische nach dieser Zeit bereits keine Aktivität mehr nachgewiesen werden. Bei einer

Maischtemperatur von 60 °C war schon nach 30 Minuten keine LOX-Aktivität mehr festzustellen. Mit einer Maischtemperatur von 65 °C ließ sich die Inaktivierungsrate der LOX nochmals steigern, eine vollständige Inaktivierung wurde jedoch auch bei dieser Temperatur erst nach über 20 Minuten erreicht.

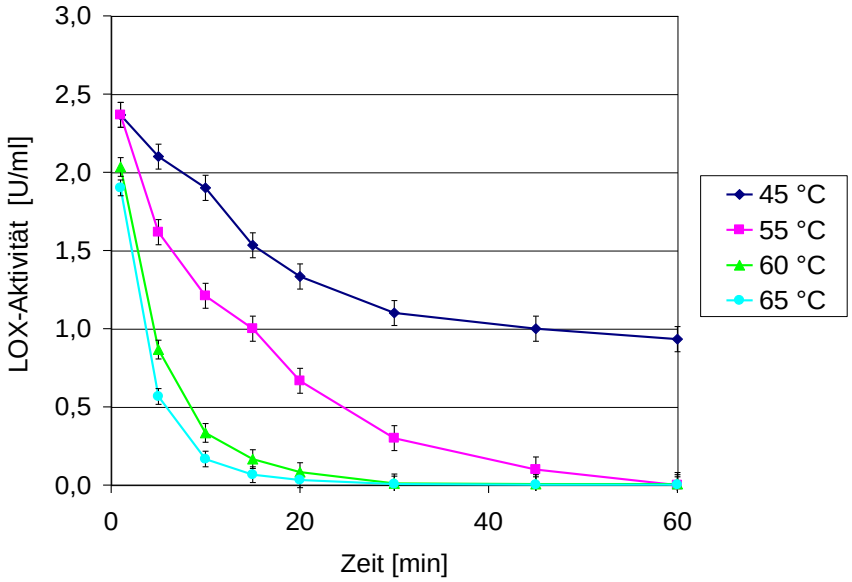


Abbildung 63: LOX-Aktivität in isothermen Maischen

Es zeigt sich, dass hohe Einmaischtemperaturen sehr effektiv die Lipidperoxidation hemmen können.

Neben dem Einfluss der Maischarbeit auf die Würze- und Bierqualität wurde der Energieverbrauch, also die Wirtschaftlichkeit des Maischprozesses untersucht. Da das Sudhaus neben dem Flaschenkeller der größte Verbraucher an thermischer Energie ist, sollte ermittelt werden, welche Wärmeverluste beim Maischen auftreten.

Quellen

Dissertation von Joachim Zürcher [339]

5.6 Energiebedarf beim Maischen

Es ist ein Rechenmodell entwickelt worden, welches auf der Basis eines großtechnischen Sudwerks (Staatsbrauerei Weihenstephan, Ausschlagmenge: 330 hl) den Energiebedarf für den Maischprozess ermittelt. Das Rechenmodell beruhte auf folgenden Annahmen und ist experimentell nicht verifiziert worden:

- Modellmedium: Wasser
- Energiebedarf ab Wassertemperatur 15 °C/Einmaischtemperatur
- Aufheizen (wärmewirtschaftlicher Wirkungsgrad: 0,9)

- Abstrahlfläche: flüssigkeitsbedeckte Flächen
- Abstrahlung beim Aufheizen (Teil-/Gesamtmaischen)
- Abstrahlung der Gesamt-, Rest- und Teilmaischen (T = konst.)
- Verdampfungsenthalpie bei Teilmaischekochen
- Umgebungstemperatur: 25 °C
- kein Aufheizen der Gefäße/Rohrleitungen

Wird das großtechnische Modell als mit Steinwolle gedämmtes System betrachtet (Abbildung 64), macht der rechnerische Verlust durch Abstrahlung während des gesamten Maischvorgangs nur ca. 0,3 % aus. Unabhängig von der Biersorte und vom Maischverfahren umfasst das Aufheizen bis zur Einmaischtemperatur und weiter bis zur Abmaischtemperatur mehr als 99,6 % des Energiebedarfs.

Erwiesen ist, dass der Energieverlust durch Wärmeabstrahlung insbesondere bei Vorhandensein einer geeigneten Wärmedämmung während des Maischens nahezu vernachlässigbar ist im Vergleich zur Energiemenge, die für das Aufheizen der Wasser-/Maischemenge erforderlich ist. Aus diesem Grund führt auch eine Änderung der Rastdauern zu einer kaum wahrnehmbaren Veränderung des Energiebedarfs während des Maischens.

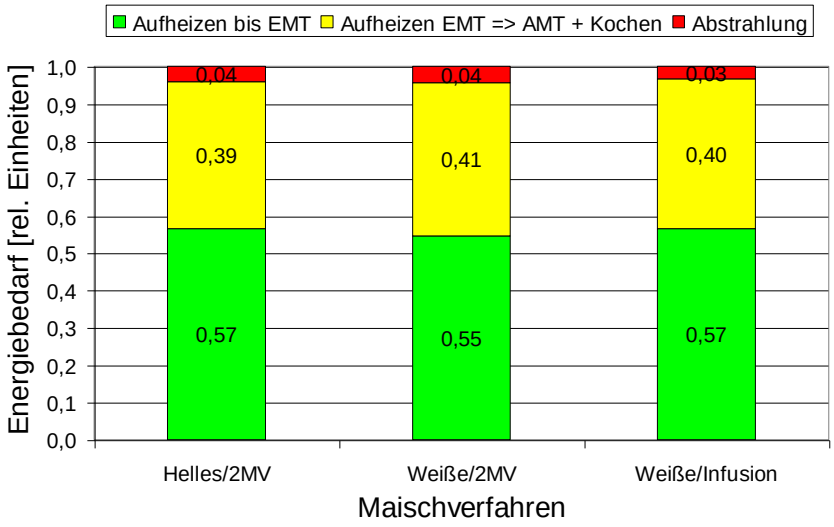


Abbildung 64: Relativer Energiebedarf beim Maischen in Abhängigkeit von Biersorte und Maischverfahren, Bedingungen: s. Annahmen Rechenmodell; Sudwerk Staatsbrauerei Weihenstephan (Ausschlagmenge 330 hl); Wärmedämmung: Steinwolle (Stärke Dämmaterial: 2 mm); EMT = Einmaischtemperatur; AMT = Abmaischtemperatur; 2MV = Zweimaischverfahren

Bisher wurden im Kapitel Maischen diejenigen Themen behandelt, welche sich auf die Wirtschaftlichkeit der Bierherstellung auswirken. In den folgenden zwei Kapiteln soll auf Sonderfälle eingegangen werden, bei welchen die qualitativen Aspekte der Würze im Vordergrund stehen.

Quellen

Dissertation von Torsten Dickel [47] und die Diplomarbeit von Thomas Eisler

5.7 Beeinflussung der Gärungsnebenprodukte durch das Zuckerspektrum (Maltaseverfahren)

In Kapitel 4.3.3, S. 59 wurde das Konzept der „Fraktionierten Schrotung“ vorgestellt, welches den ß-Glucanabbau forciert und somit die Filtrierbarkeit des Bieres erhöht. Hierbei wurde während des Maischprozesses die Maischtemperatur abgesenkt, um bestimmte Enzyme in ihrer Aktivität zu fördern. Dies geschah, indem nur ein Teil des Schrotes eingemaischt wurde und der der Rest des Schrotes später zugemaischt wurde. Ähnlich verhält es sich mit dem von *Herrmann* [108] entwickelten „Maltasemaischverfahren“. Durch das Maischverfahren wird das Enzym Maltase gefördert, wodurch sich das Verhältnis zwischen Glucose und Maltose verändert. Dies hat Auswirkungen auf das Spektrum an Gärungsnebenprodukten. Durch das genannte Maischverfahrens kann innerhalb des bayerischen Reinheitsgebotes der Estergehalt von Bieren gezielt beeinflusst werden. Dieses Verfahren ist besonders für Weizenbiere von Interesse, da dort ein hoher Estergehalt meist erwünscht ist.

Esterbildung

Die Ester in Bier sind von besonderem Interesse. Ihre sensorischen Schwellenwerte liegen sehr niedrig, sie sind schon in sehr geringen Mengen aromatisch zu charakterisieren. Bis heute wurden über 90 verschiedene Ester im Bier identifiziert [289], von denen 6 eine entscheidende Rolle für das Bieraroma spielen:

- Ethylacetat (lösungsmittelartiges Aroma)
- Isoamylacetat (bananenartiges Aroma)
- Isobutylacetat (ananasartiges Aroma)
- Phenyl-ethyl-acetat (rosenartiges Aroma)
- Ethylcaproat = Ethylhexanoat (apfelartiges Aroma)
- Ethylcaprylat = Ethyloctanoat (apfelartiges Aroma)

In den meisten untergärigen Vollbieren liegt der Gesamtestergehalt im Bereich von 15-30 mg/l [92], gelegentlich bei bis zu 60 mg/l. Daran weist Ethylacetat mit durchschnittlich 19 mg/l (8-48 mg/l) den größten Anteil auf, Isoamylacetat liegt im Durchschnitt in Konzentrationen von 1,9 mg/l (0,5–6,6 mg/l) vor [241, 326], alle anderen Ester sind in Mengen von weniger als 1 mg/l vorhanden. Bei obergärigen Bieren werden Konzentrationen von bis zu 70 mg/l erreicht [92, 214, 216, 224, 230].

Der Estergehalt im Bier ist zum einen von den verwendeten Rohstoffen, zum anderen von zahlreichen technologischen Faktoren abhängig, bzw. durch sie beeinflussbar. Diese sind im Einzelnen:

- Würzezusammensetzung:
  in Abhängigkeit von den verwendeten Rohstoffen und der Sudhausarbeit – Zuckerspektrum, Lipide, Aminosäuren, Vitamine, Trubgehalt, anorganische Verbindungen, Dichte, pH-Wert
- Hefeeigenschaften:
  Hefestamm, physiologischer Zustand, Hefezellzahl

- Gärungsbedingungen:
  Würzebelüftung, Anstelltechnik, Gärverfahren, Temperaturführung, CO_2-Druck, Behältergeometrie, Hefezellzahl und Hefevermehrung

Die Herstellung estriger Weißbiere erweist sich bei der Verwendung zylindrokonischer Gärtanks als schwierig, da vor allem der hohe Kohlendioxidpartialdruck die Esterbildung stark hemmt. High-Gravity-Verfahren konnten sich auf Grund von Läuterschwierigkeiten bei der Weißbierherstellung noch nicht durchsetzen.

Würzezusammensetzung

Die Zuckerzusammensetzung der Würze hat eindeutig einen Einfluss auf die Esterbildung. Je höher der Maltoseanteil am Gesamtzuckergehalt ist, desto geringer fällt die Esterbildung aus [279, 289]. Des Weiteren resultieren aus zunehmenden Konzentrationen an Glucose und Fructose höhere Estergehalte [326]. Durch *Pajunen* [236] wurde festgestellt, dass auch höhere Saccharosegehalte zu vermehrter Esterbildung führen. Laut *Narziss* werden bei zylindrokonischen Gärtanks mit einem Verhältnis von Durchmesser : Höhe von 1 : >6 die Estergehalte der Biere erhöht.

Laut Literatur [171, 240, 306] enthalten Biere mit großen Mengen an höheren Alkoholen auch größere Mengen an Estern. Da die Bildung der höheren Alkohole mit der Aminosäureausstattung der Würze zusammenhängt, wird geschlossen, dass hohe Aminosäuregehalte zu entsprechend hohen Gehalten an Estern führen. *Miedaner* [199] fand jedoch erhöhte Estergehalte bei Werten oberhalb und unterhalb von 19-20 mg FAN/l. Da Weißbierwürzen in der Praxis selten Gehalte über 20 mg FAN/l aufweisen, sind daher mit erhöhter proteolytischer Lösung geringere Estergehalte zu erwarten [9].

Auch der Gehalt an Fettsäuren, besonders an ungesättigten, übt einen deutlichen Einfluss aus [46]. Aus höheren natürlichen Gehalten oder künstlich zugegebenen ungesättigten Fettsäuren resultieren niedrige Estergehalte im Bier [19, 62, 210, 216, 279, 296].

Die Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe durch die Rohstoffe

Die Malzqualität hat einen großen Einfluss auf die Aromastoffbildung und ist primär durch die Mälzungstechnologie geprägt (vgl. Abbildung 2, S.17). Abhängigkeiten vom Getreide entstehen vor allem durch das Anbaugebiet und damit den entsprechenden Umwelteinflüssen und weniger durch die Sorte. So konnte für die aromarelevanten Ester 3-Methylbutylacetat bzw. 2-Methylbutylacetat ein direkter Zusammenhang mit den Anteilen an den korrespondierenden Aminosäuren, dem Leucin bzw. dem Isoleucin, an der Summe der Aminosäuren nachgewiesen werden. Die Aminosäuren wiederum sind, wie in der Literatur beschrieben, direkt von den agronomischen Bedingungen und Umwelteinflüssen abhängig.

Die Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe durch das Zuckerspektrum

Eine Erhöhung des Glucoseanteils führt auch bei obergärigen Hefen zu einer verstärkten Esterbildung. Als besonders positiv ist die größere Steigerung des 3-Methylbutylacetats gegenüber dem Ethylacetat zu werten. Negative Effekte konnten nicht beobachtet werden. Sowohl die höheren Alkohole als auch die vicinalen Diketone bleiben durch eine Veränderung des Zuckerspektrums weitgehend unberührt, die Gärgeschwindigkeit bleibt gleich oder ist sogar bei höheren Glucosekonzentrationen tendenziell beschleunigt.

Die relativen Steigerungen der Ester durch die Glucose stehen in Abhängigkeit zu dem GrundPotenzial der Esterbildung. Die hierbei untersuchten Parameter waren Hefestamm und Stammwürze: Bei High-Gravity Würzen wurden grundsätzlich niedrigere Steigerungen der 3-Methylbutylacetatkonzentration gemessen, vermutlich da durch High-Gravity Verfahren die Esterbildung bereits gesteigert ist.

Aus der Summe der Versuche wurde geschlossen, dass die Steigerung der Esterbildung durch die Verschiebung des diauxischen Punktes auf Grund unterschiedlicher Glucose-konzentrationen zurückzuführen sei. Der diauxische Punkt induziert die Bildung der Acetyl-Alkoholtransferasen, durch unterschiedliche Glucosekonzentrationen erfolgt die Induzierung bei unterschiedlichen Zellzahlen.

Beeinflussung des Aromaprofiles des Bieres durch die Maischesäuerung

Sowohl maische- als auch würzegesäuerte helle Weizenbiere weisen zwar höhere Gehalte an Estern auf, werden aber in der Intensität und Qualität der estrigen Note geringer bewertet. Der Grund für die verstärkte Esterbildung ist vermutlich in der Zuführung von Wuchsstoffen, wie beispielsweise Zink und verschiedenen Vitaminen, zu sehen. Die Reduzierung der Intensität und Qualität der estrigen Note kann mit der parallel erfolgenden Zunahme negativ bewerteter Substanzen erklärt werden. So lagen alle gesäuerten Biere einer Versuchsreihe bei der Ethylacetat-Konzentration im kritischen Bereich von 40 mg/l und darüber. Auch bei der 3-Methylbutylacetat-Konzentration erreichten die gesäuerten Biere Werte, die an den kritischen Bereich von 4-6 mg/l heranreichen. Als dritter Punkt sind noch die höheren Alkohole zu nennen, die in ihrer Summe den kritischen Wert von 100 mg/l überschritten. Diese negative Beeinflussung der estrigen Note konnte auch in Zumischversuchen bestätigt werden. Für eine angenehme estrige Note sind Gehalte des 3-Methylbutylacetats bis zu 4,5 mg/l und Ethylacetatkonzentrationen unter 45 mg/l bei gleichzeitig niederen Konzentrationen an höheren Alkoholen zu empfehlen. Die neuen Kenntnisse zur Maische- und Würzesäuerung sollten es erlauben, die Vorteile dieser Technologie auch bei der Herstellung bayerischer Weizenbiere besser zu nutzen.

Die Entwicklung des Maltaseverfahrens, das die gezielte Einstellung der Glucosekonzentration erlaubt, stellt für den Technologen ein weiteres Werkzeug dar, um die Esterbildung zu steuern. Nachteile des Verfahrens können die erhöhte Freisetzung der Ferulasäure durch die 45 °C-Rast sein, wodurch 4-Vinyl-Guajakol in höheren Konzentrationen im Bier zu erwarten ist, welches einen phenolischer Aromabeitrag gibt. Auch eine Beeinträchtigung der Schaumwerte durch die verstärkte Proteolyse kann gegeben sein. Bei den Nachteilen kann durch eine geeignete Rohstoffauswahl bis zu einem gewissen Grade entgegengesteuert werden.

Für Brauereien die noch mit klassischen, offenen Gärbottichen arbeiten, ist eine Verwendung dieses Verfahrens nicht notwendig, da Gärparameter wie Hefestamm, Temperaturführung u.a. ausreichend sind, um esterreiche Biere herzustellen.

Maltasemaischverfahren

Bei dem in Abbildung 65 dargestellten Maischverfahren wird nur ein Teil des Malzschrotes eingemaischt und auf Verzuckerungstemperatur erhitzt. Durch das Zumaischen des restlichen Malzschrotes wird die Temperatur der Gesamtmaische gesenkt. Dabei muss mit Kaltwasser zugemaischt werden. Bei der Mischtemperatur kann das aus dem Malz stammende Enzym Maltase die Maltose zu zwei Molekülen Glucose spalten. Anschließend wird ein Infusionsmaischverfahren durchgeführt, um die Gesamtmaische zu verzuckern.

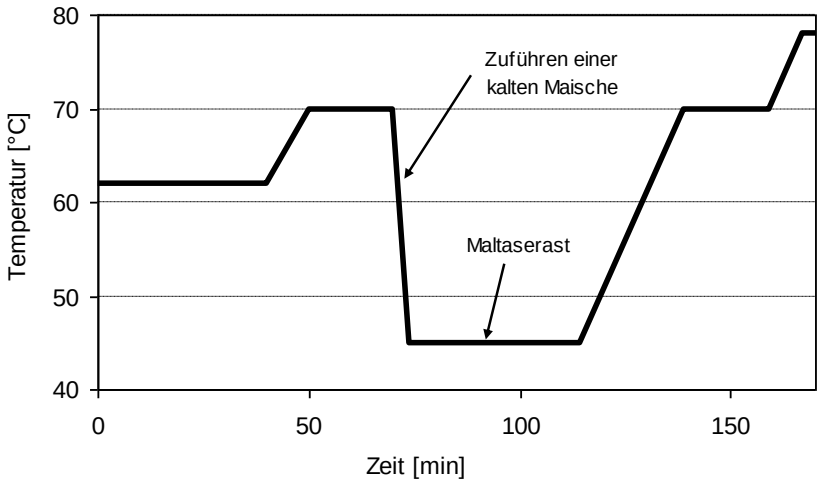


Abbildung 65: Maischdiagramm des „Maltasemaischverfahrens“

Die für die Reaktion notwendige Maltose wird durch die 1. Maische erzeugt, welche verzuckert ist. Das Enzym Maltase ist in dieser Maische bereits inaktiviert. Durch das Zumaischen wird Maltase zugeführt und infolge der Abkühlung der Gesamtmaische kann die Maltasereaktion stattfinden. Hierdurch verschiebt sich das Verhältnis der Zucker Maltose:Glucose hin zur Glucose, wie aus Abbildung 66 ersichtlich ist.

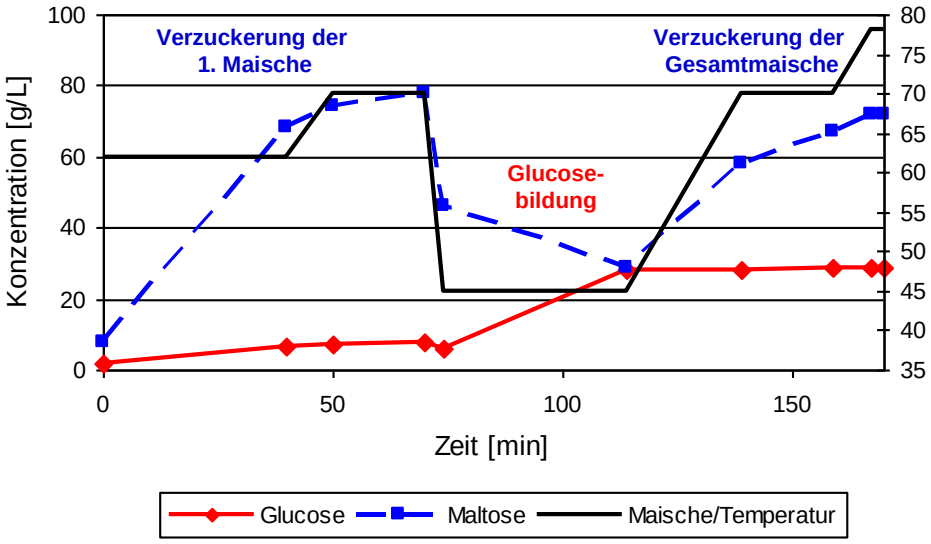


Abbildung 66: Konzentration von Glucose und Maltose während des „Maltasemaischverfahrens“

Den Einfluss des Zuckerverhältnisses Maltose:Glucose auf die Gärungsnebenprodukte zeigt Abbildung 67. In Laborgärungen mit synthetischer Würze wurde das Zuckerverhälnis definiert eingestellt. Am Modellversuch ist erkennbar, dass es ein Optimum für die Bildung der Essigsäureester Ethylacetat und Isoamylacetat besteht. Positiv dabei ist, dass der unerwünschte Jungbieraromastoff Acetaldehyd sich gegenläufig verhält.

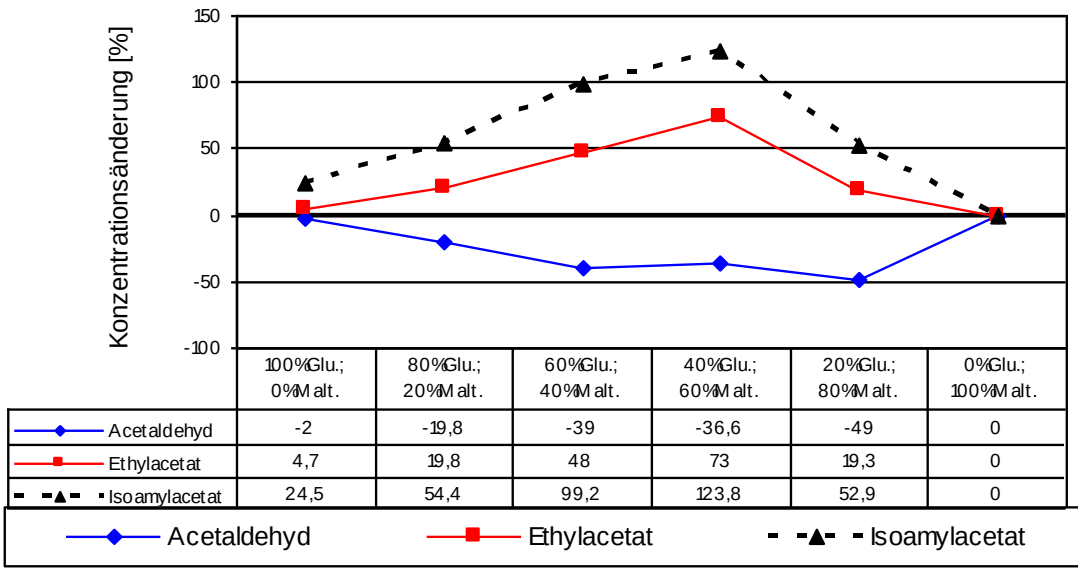


Abbildung 67: Änderung der Konzentration des Acetaldehyds, Ethylacetats und Isoamylacetats nach 96 Stunden Gärzeit bezogen auf 100 % Maltose

Brauversuche im Praxismaßstab haben gezeigt, dass die in Labor- und Pilotversuchen gewonnenen Erkenntnisse vollständig auf den Industriemaßstab übertragbar sind. Der Scale-up war erfolgreich.

Nachdem bewiesen wurde, dass die Zuckerzusammensetzung einen signifikanten Einfluss auf das Spektrum an Gärungsnebenprodukten hat wurde untersucht, welchen Einfluss die Würzezusammensetzung bei der kontinuierlichen Reifung hat.

Quellen

Dissertation von Markus Herrmann [108] sowie eine eigene Veröffentlichung [109]

5.8 Anforderungen an die Würzezusammensetzung bei der kontinuierlichen Reifung

Die Nachgärung bzw. die Reifung des Bieres ist bei der klassischen Arbeitsweise mit Kräusen der längste Produktionsschritt innerhalb der Bierherstellung, Bedingt durch die große Zeitspanne der Reifung und Lagerung sind eine große Anzahl von Tanks notwendig. Um die Anzahl an Tanks zu reduzieren und um Kosten zu senken, wurde schon immer ein kontinuierlicher Brauprozess angestrebt. Da es bei einer gesamten kontinuierlichen Arbeitsweise insbesondere wegen der zeitlichen Verfügbarkeit der Würzen noch Probleme gibt, wurde versucht, wenigstens Teilschritte des Prozesses kontinuierlich zu gestalten. Der Abschnitt der kontinuierlichen Bierreifung ist technisch wenig kompliziert [314] und wirtschaftlich vorteilhaft [52]. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, dass die kontinuierlich hergestellten Biere den konventionell produzierten Bieren entsprechen. Dabei spielt die Würzequalität eine entscheidende Rolle, da sich die Hefe bei kontinuierlichen Verfahren anders verhält als bei den bekannten klassischen Chargenverfahren. Es wurde der Teilprozess der kontinuierlichen Bierreifung untersucht.

Zum Einsatz kam eine Immobilisierungstechnik, bei der die Bierhefen auf Siran® Carriern angelagert wurden. Die Anlage wurde von der Firma Alfa Laval GmbH, Glinde bei Hamburg, in der Brauerei Schäff/Treuchtlingen installiert und in den üblichen Produktionsprozess einbezogen.

Die Anlage zur kontinuierlichen Bierreifung bestand aus drei Modulen:

- Separatormodul,
- Kurzzeiterhitzer und Heißhaltestrecke sowie
- Fermenter, ausgeführt als Festbettreaktor

Die Anordnung der einzelnen Module und damit das Fließschema zeigt
Abbildung 68. Wie aus dem Fließschema hervorgeht, verlaufen die Produktionsschritte bis zum Ende der Hauptgärung analog dem konventionellen Herstellungsverfahren untergäriger Biere.

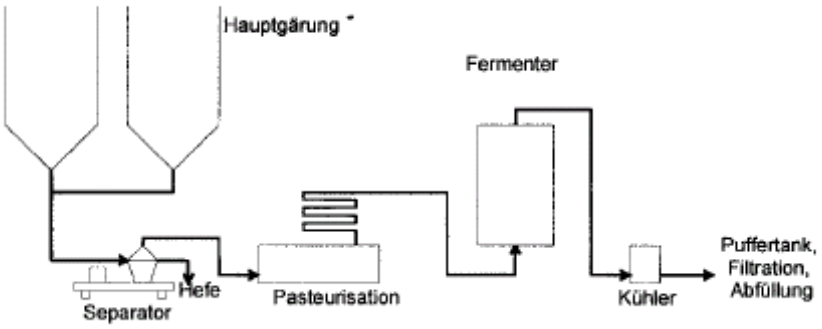


Abbildung 68: Fließschema einer Anlage zur kontinuierlichen Bierreifung

Nach einer Hauptgärung bei 12 °C und 0,9 bar begann die kontinuierliche Bierreifung. Als erstes Modul kam der Separator zum Einsatz. Er hatte die Aufgabe, die Hefezellen aus dem Jungbier zu entfernen. Dies war notwendig, um autolytische Prozesse während der anschließenden Erhitzung im Kurzzeiterhitzer (KZE) zu vermeiden [180]. Über die Menge der zu entfernenden Hefen bestehen verschiedene Meinungen [235, 314]. Bei dieser Anlage wurde ein Wert von weniger als 40.000 Hefezellen pro ml angestrebt und auch erreicht.
Der Kurzzeiterhitzer und die Heißhaltestrecke hatten zwei wichtige Aufgaben zu erfüllen: Der KZE sollte den Fermenter vor mikrobiologischen Kontaminationen schützen und die Umwandlung von α-Acetolactat zu Diacetyl beschleunigen. Dieser Reaktionsschritt, der stark temperatur- und pH-abhängig ist, stellt den limitierenden Faktor beim Diacetylabbau dar [201]. Zu diesem Reaktionsschritt gibt es viele Versuchsreihen verschiedener Autoren [97, 234, 331], die als geeignete Temperatur 90 °C bei 7 Minuten Verweilzeit feststellten. Bei dieser Anlage wurde mit 80 °C und 10 Minuten gearbeitet. Nach einer Rückkühlung und betriebsbedingten Zwischenlagerung (1-2 Tage, 3 °C) wurde das Bier dem Fermenter zugeführt.

Im Reifungsfermenter fand nach der Umwandlung des α-Acetolactats die Reduktion von Diacetyl zu Acetoin und 2,3-Butandiol statt. Diese Umwandlung erfolgte in einer Zeitspanne, je nach eingestellter Durchflussgeschwindigkeit (max. 2,5 hl/h bei dieser Anlage), von zwei

bis vier Stunden durch die immobilisierte Hefe. Weiterhin sollte der Restextrakt auf den biertypischen Wert abgebaut werden.

Nach dem Fermenter wurde das Bier auf die gewünschte Kellertemperatur gekühlt, es stand danach zur Filtration und anschließender Abfüllung bereit.

Das Referenzbier durchlief den Brauprozess, wie in der Brauerei üblich mit kalter Hauptgärung und einer längeren Lagerzeit bei 0 °C. Die beiden zu vergleichenden Biere wurden hinsichtlich ihrer Stabilisierung (Kieselgel 80-100 g/hl; PVPP max. 12 g/hl) gleich behandelt.

Die klassischen Bieranalysen der Fermenterbiere und der jeweiligen Referenzbiere lagen im Normalbereich. Dieses Ergebnis wird in der Literatur ebenfalls mehrmals bestätigt [97, 120, 234]. Dennoch soll auf einige Analysenparameter eingegangen werden, welche sich bei der kontinuierlichen Reifung besonders verhalten.

Extraktabbau

Der Extraktabbau bei voller Leistung von 2,5 hl/h lag bei maximal 0,3 % Es. Dieser Wert deckt sich mit Angaben aus der Literatur [233]. Dabei ist es wichtig, dass der vergärbare Extrakt vor dem Fermenter entsprechend dem gewünschten Restextrakt angepasst wird. Bei weiteren Versuchen wurden Biere mit höheren Extraktgehalten über die Anlage gefahren. Dabei konnte der Extraktabbau auf maximal 0,6 % Es gesteigert werden, indem die Fließgeschwindigkeit reduziert wurde. Eine Halbierung der Fließgeschwindigkeit führte zu einer Verdoppelung des Extraktabbaues. Ein höherer Restextraktgehalt infolge unvollständiger Hauptgärung sollte aus wirtschaftlichen Gründen vermieden werden, da der Fermenter mit seiner Verweilzeit auf die Reifung des Bieres ausgelegt war. Aus der Literatur [233] ist bekannt, dass bei zu hohem Restextraktgehalt und längerer Verweilzeit im Fermenter unerwünschte Geschmacks- und Flavourveränderungen im Bier auftreten. Bei einem weiteren Versuch wurde endvergorenes Bier über die Anlage gefahren. Dabei zeigte sich keine Beeinträchtigung des Fermenters für die nachfolgenden Chargen. Die Hefe im Fermenter überstand also diesen unüblichen Vorgang während einer Laufzeit von 7 Tagen ohne weitere Schwierigkeiten.

Hefezellen

Kurz nach dem Immobilisieren war die Anzahl der Hefezellen nach dem Fermenter sehr hoch (bis 200 Mio. Hefezellen pro ml). Dies beruhte auf der Ausschwemmung überschüssiger Hefe, welche sich nicht auf oder in den Carriern festsetzen konnte.
Nach einigen Stunden stellte sich bei dem untersuchten Fermenter ein Gleichgewicht zwischen den eingetragenen und den ausgetragenen Zellen ein (ca. 40.000 Hefezellen pro ml). Einerseits wurden nicht separierte Hefezellen eingebracht, andererseits kam es im Fermenter noch zu einer geringen Hefevermehrung [168, 228]. Ein weiterer wichtiger Punkt ist der Anteil der toten Zellen nach dem Fermenter. Im Verlauf des Betriebes pendelte sich dieser auf etwa 30-40 % ein, Dabei muss man allerdings berücksichtigen, dass 100 % tote Zellen durch die Kurzzeiterhitzung eingeschleppt wurden.

pH-Werte

Die pH-Werte lagen im Normbereich für untergärige Biere. Es wurde aber ein Anstieg des pH um bis zu 0,1 Einheiten im fertigen Bier festgestellt. Ein pH-Anstieg kann ein Hinweis auf eine Hefeautolyse sein. Während der Betriebszeit der Anlage lagen die pH-Werte nach dem Fermenter zwischen 4,3 und 4,4. Lediglich in der Anlaufphase wurde ein Anstieg auf 4,8 festgestellt. Dieser Wert fiel jedoch nach einer Zeit von etwa zwei Stunden wieder auf die normale Größenordnung ab.

Schaum

In der Literatur wird von besseren Schaumwerten für das Fermenterbier berichtet [228, 233]. Dies wird mit der relativ kurzen Kontaktzeit des Bieres mit den Hefen im Fermenter begründet. Im Allgemeinen zeigten die Schaumwerte ein gleichmäßig gutes Verhalten (Nibem 270 – 280 sec). Dies wurde bei der Versuchsanlage, die zuvor in einer anderen deutschen Brauerei aufgestellt war, ebenfalls beobachtet [96]. Bei der Methode nach Nibem schnitten die Fermenterbiere besser ab, bei Ross & Clark lagen die Referenzbiere geringfügig höher. Dies zeigt wieder einmal, dass die Schaumbestimmungen nach Nibem und Ross & Clark nicht miteinander korrelieren. Dass die in der Literatur genannte Schaumverbesserung nicht bestätigt werden konnte, ist wahrscheinlich im physiologischen Zustand der Hefe begründet, wie die Werte des Acetaldehyds andeuten.

Bittereinheiten

Die Bittereinheiten, gemessen in EBC-BU, lagen bei den Fermenterbieren im Mittel um 3 BU niedriger. Dieser Bitterstoffverlust wird durch die sehr große Hefeoberfläche im Fermenter bewirkt [327]. Dieses Problem lässt sich durch eine angepasste Hopfendosierung im Sudhaus lösen.

Bierfarbe

Die Bierfarben waren bei den Fermenterbieren im Vergleich zu den Referenzbieren heller. Über die Veränderung der Bierfarbe während des kontinuierlichen Reifungsprozesses liegen in der Literatur unterschiedliche Ergebnisse vor [120, 228, 235]. Bei *Nothaft* und *Pajunen* bleibt die Bierfarbe konstant, *Hyttinen* beobachtet eine Zunahme der Bierfarbe. Bei dieser Anlage hellte sich das Bier beim Durchlauf durch den Fermenter noch etwas auf. Da die Biertypen, die Anlagen sowie die Hefepopulationen und deren Zustand nicht bei allen Versuchen identisch waren, kann keine eindeutige Aussage getroffen werden.

Forciertest

Um eine Information über die kolloidale Stabilität des Bieres zu bekommen, wurde der Forciertest (0/40/0 °C) durchgeführt. Dabei zeigte sich, dass die Fermenterbiere immer die gleiche Anzahl an Warmtagen erreichten wie die Referenzbiere.

Gaschromatographische Auswertung der fertigen Biere

Die Ergebnisse der GC-Analysen dreier Versuchsreihen sind in Tabelle 14 aufgeführt.

Tabelle 14: Gärungsnebenprodukte bei der kontinuierlichen Bierreifung. F = Fermenterbier, R = Referenzbier

	Bier 1		Bier 2		Bier 3		Normwerte
	F	R	F	R	F	R	
Diacetyl [mg/l]	0,047	0,022	0,050	0,055	0,058	0,063	< 0,10
2,3-Pentandion [mg/l]	0,019	0,035	0,019	0,030	0,021	0,023	< 0,05
Acetoin [mg/l]	5,2	2,8	4,6	12	3,6	3,5	< 5
Acetaldehyd [mg/l]	11,0	7,3	9,4	6,5	12,7	4,3	< 10
Ester [mg/l]	9,7	21,7	24,0	14,9	14,6	22,6	20-40
Höhere Alkohole [mg/l]	67,0	72,5	78,0	71,0	72,0	83,0	60-90
Mittelkettige Fettsäuren [mg/l]	4,89	8,12	6,33	6,61	6,08	6,39	< 6,5

Reifungsparameter

Als Reifungsparameter werden im allgemeinen Diacetyl, 2,3-Pentandion und teilweise auch Acetoin angesehen [201, 216]. Bei der hier verwendeten Anlage wurden diese Stoffe unter die jeweiligen Schwellenwerte bzw. Normwerte für untergärige Biere reduziert. Bei dem Verlauf des Diacetyls wurde festgestellt, dass bereits nach dem Kurzzeiterhitzer die Werte manchmal unterhalb von 0,1 mg/l lagen. Dieses Ergebnis wird von *Hyttinen* [120] bestätigt.

Höhere Alkohole und Ester

Neben den Hauptprodukten der Gärung, Ethanol und CO_2, entstehen auf den unterschiedlichsten Stoffwechselwegen die sog. Gärungsnebenprodukte. Zwei wesentliche Gruppen sind hierbei die höheren Alkohole und die Ester. Die Esterkonzentrationen lagen teilweise unterhalb der Normwerte für untergärige Biere. Dieser Umstand wurde bei anderen Autoren, die ebenfalls eine kontinuierliche Reifung untersuchten, in gleicher Weise festgestellt [234].

Mittelkettige Fettsäuren

Um mögliche Auswirkungen der Hefevitalität auf die Bierqualität festzustellen, wurden die mittelkettigen Fettsäuren nach dem Fermenter analysiert. Dabei zeigte sich ein recht uneinheitliches Verhalten. Während *Pajunen* eine geringfügige Abnahme der Fettsäuren beobachtete [233], gab es bei der untersuchten Anlage sowohl eine Zunahme als auch eine Abnahme der Fettsäuren. Selbst bei dem Fall der Zunahme wurde jedoch der Normwert für untergärige Biere nicht überschritten. Im Durchschnitt enthielten die untersuchten Biere nach dem Fermenter 6 mg/l mittelkettige Fettsäuren (C6, C8, C9 - C12).

Acetaldehyd

Die Konzentration des Acetaldehyds liegt im oberen Normbereich, teilweise sogar etwas darüber. Erhöhte Werte deuten auf einen schlechten physiologischen Zustand der Hefe hin. Da auch die Were der mittelkettigen Fettsäuren und die pH-Werte im oberen Normbereich lagen, kann davon ausgegangen werden, dass die Hefe unter Stress stand. Bei der

untersuchten Anlage war es nicht möglich Hefe direkt aus dem Fermenter zu entnehmen und zu analysieren, um diese Aussage zu überprüfen.

Verkostung und Alterungsstabilität

Neben der Vielzahl der analytischen Werte stellt die Verkostung ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der Biere dar. Bei den Verkostungen wurde kein signifikanter Unterschied zwischen den Versuchsbieren und den Vergleichsbieren gefunden.

Bei der Analyse der Alterungskomponenten [57, 181] zeigte sich kein Unterschiede zwischen den konventionellen und kontinuierlich gereiften Bieren. Auffällig war, dass es durch die Kurzzeiterhitzung bei den Fermenterbieren zu keiner erhöhten Konzentration an Alterungskomponenten kam. Eine deutliche Verschlechterung der Geschmacksstabilität konnte jedoch nur festgestellt werden, wenn der Sauerstoffgehalt vor der Kurzzeiterhitzung hoch war.

Quellen

Diplomarbeit Thomas Braun sowie eigene Veröffentlichungen [12, 13]

6 Läutern

6.1 Möglichkeiten des Einsatzes von Membranen für den Prozess der Läuterung und Bierfiltration

Läuterbottich und Maischefilter separieren mit einer natürlichen Filterschicht aus Spelzen. Deshalb kann das Malzkorn nicht beliebig fein vermahlen und auf die Spelzen verzichtet werden. Um die Vorteile einer Malzfeinvermahlung und Spelzentrennung auszuschöpfen, wurde eine neue Scherspaltfiltrationstechnik für die Maischefiltration angepasst. Die Malzfeinvermahlung in Verbindung mit der neuen Filtrationstechnik erlaubt kürzere Maisch- und Filtrationszeiten. Dabei ist die Filterleistung mit der des Maischefilters vergleichbar. Die Würzeklärung erfolgt durch eine Membran. Die Membranfiltration wurde neben anderen Verfahren der fest-flüssig Trennung wie z. B. der Zentrifugation schon mehrfach untersucht [36, 39, 44, 45, 176, 179, 242]. In den 80er Jahren arbeiteten *Daoud* [44, 45] und *Bühler* [36, 39] an der Crossflow-Filtration von Maische.

6.1.1 Entwicklung eines Membran-Läutersystems

Die ersten Membranläuteranlagen bestanden aus einem Scherspaltfilter wie Abbildung 69 zeigt. Hierbei ist eine rotierende Scheibe über der Filtrationsmembrane angebracht, wodurch ein Scherspalt entsteht. Durch die hohen Scherkräfte werden Ablagerungen auf der Membrane weitgehend verhindert. Diese Methode erlaubt, im Gegensatz zur Crossflow Filtration, eine Regulierung der Überströmgeschwindigkeit unabhängig vom Filtrationsdruck. Aus diesem Grund kann das Retentat stärker eingedickt werden, was zu besseren Ausbeuten und längeren Standzeiten führt.

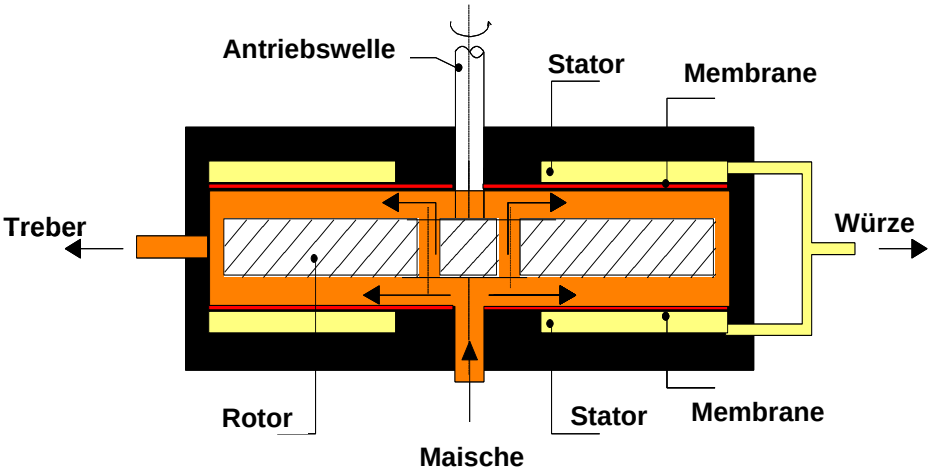


Abbildung 69: Scherspaltfilter für die Maischefiltration

Einen für die Versuchsanlage typischen Filtrationsverlauf zeigt Abbildung 70. Jede Stufe des Extraktabfalles beruht auf der Zugabe von Nachgusswasser zum Retentat, welches im Kreislauf gepumpt wurde. Die Anzahl der Anschwänzschritte wurde sehr hoch gewählt, um sich möglichst an ein kontinuierliches Anschwänzen anzunähern.

Es wurde eine Polytetrafluorethylen-Membrane (PTFE) benutzt, die eine durchschnittliche Porenweite von 0,1 µm hatte. Der Transmembrandruck wurde bei 1,2 bar konstant gehalten, wobei für ein gut gelöstes Malz eine Fluxrate von 160-180 l/(m^2h) resultierte. Bei Verwendung schlecht gelöster Malze sank die Fluxrate auf minimal 100 l/(m^2h).

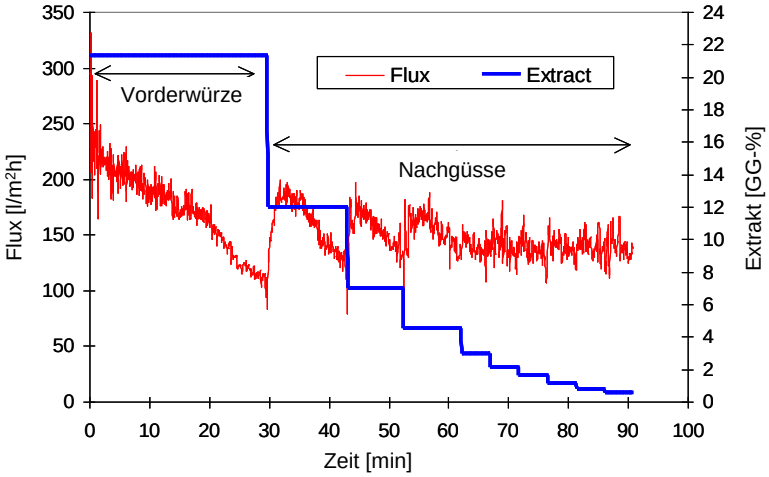


Abbildung 70: Läuterdiagramm eines Scherspaltfilters

Den Einfluss der im Retentat gemessenen β-Glucankonzentration auf den Flux zeigt Abbildung 71. Somit hat eine cytolytische Unterlösung des Malzes einen entscheidend negativen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Maischefiltration mittels Membranen.

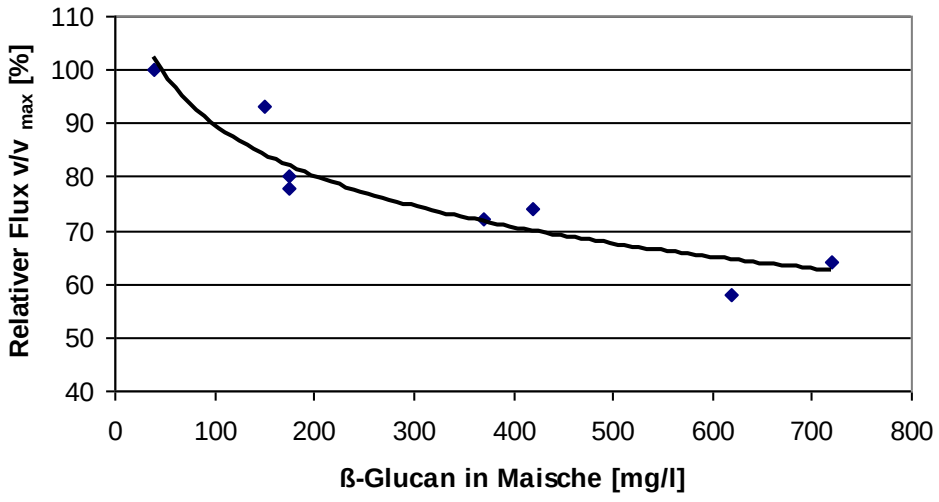


Abbildung 71: Einfluss des β-Glucangehaltes auf den Filtrationsfluss eines Scherspaltfilters

Da einerseits der konstruktive Aufwand, besonders für größere Membranflächen, und anderseits der Energieeintrag beim Scherspaltfilter sehr hoch war, wurde nach einer neuen konstruktiven Lösung gesucht.

Eine neue Membranfiltrationstechnik, die Vibrating Membrane Filtration (VMF), wurde mit dem Ziel, feinstvermahlenes Schrot einsetzen zu können, untersucht. Die Technik basiert auf der Oszillation des gesamten Filtermoduls, die das Abtragen der Feststoffe von der Membran bewirkt wie
Abbildung 72 zeigt. Die Peripherieausstattung der VMF entspricht dabei dem einer herkömmlichen Crossflow Filtrationsanlage. Die VMF ermöglicht bis zu einer kritischen Suspensionsviskosität einen konstanten Transmembrandruck und Permeatfluss.

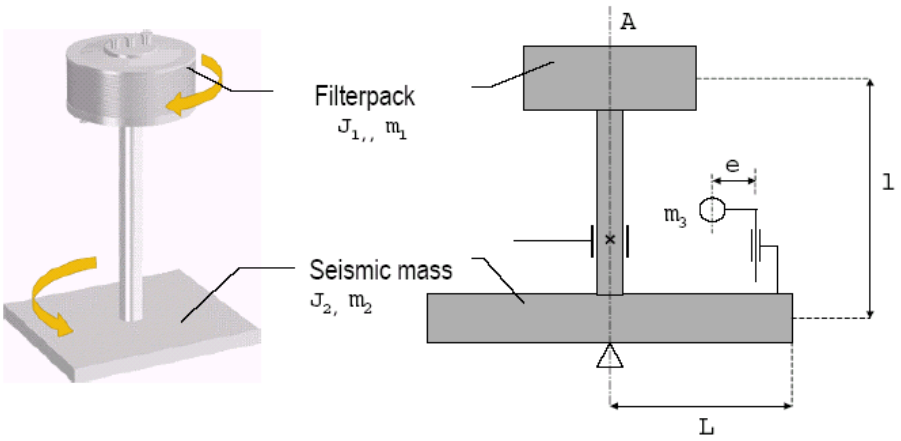


Abbildung 72: Vibrations-Membran-Filtration (VMF)

Das oszillierende Filterpaket ist über einen Torsionsstab mit einer Gegenmasse verbunden. Da das System nahe der Resonanzfrequenz gehalten wird, ist die Energieaufnahme sehr gering. Filterpakete mit bis zu 100 beidseitig bespannten PTFE-Membranen können eine maximale

Filterfläche von 40 m^2 erzeugen. Der Zufluss erfolgt radial von außen, wobei das Permeat und das Retentat mittig abgeführt werden, wie aus Abbildung 73 ersichtlich ist.

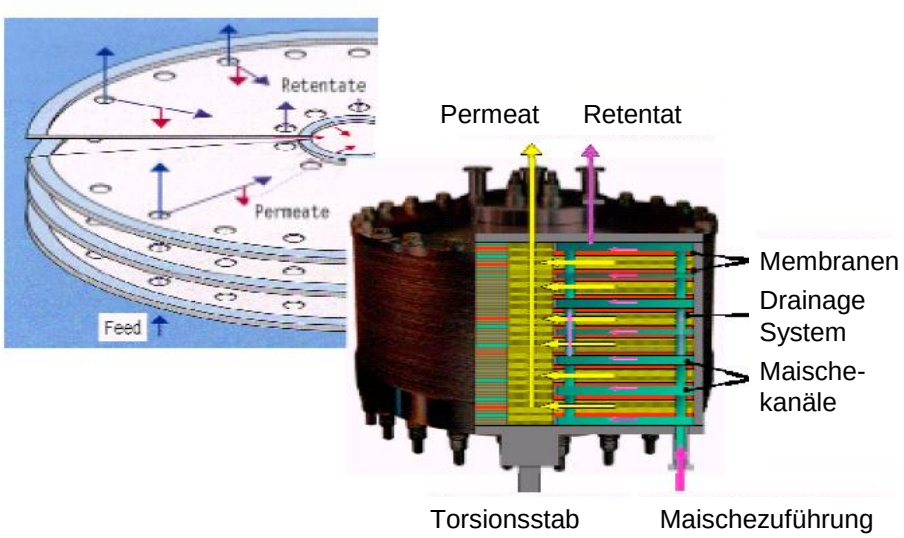


Abbildung 73: Filterpaket einer Vibrations-Membran-Filtration (VMF)

In Abbildung 74 und Tabelle 15 ist der Unterschied zwischen der VMF und einer konventionellen Crossflow Filtration dargestellt.

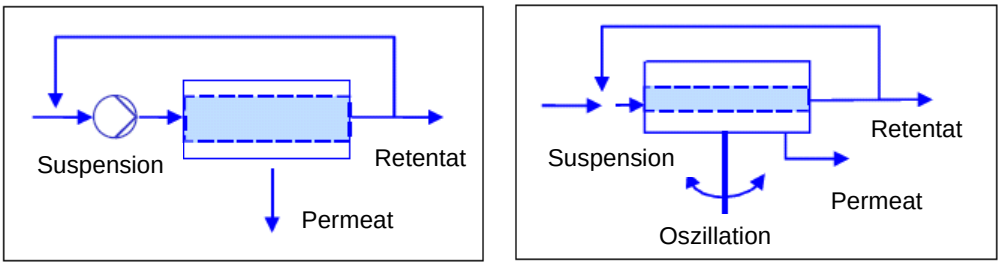


Abbildung 74: Vergleich einer konventionellen Crossflow Filtration mit der Vibrations-Membran-Filtration (VMF)

Tabelle 15: Vergleich einer konventionellen Crossflow Filtration mit der Vibrations-Membran-Filtration (VMF)

	Crossflow Filtration	Vibrations Membran Filtration
Scherrate	abhängig vom Förderdruck	unabhängig vom Förderdruck
Transmembrandruck	1,5 - 2 bar	0,4 - 0,8 bar
Überströmgeschwindigkeit	3 - 5 m/s	ca. 0,01 m/s
Energieaufnahme	hoch	niedrig

Um den Filtrationsverlauf näher beschreiben zu können, wurde der Filterwiderstand (R) berechnet.

$$R = \frac{\Delta p_{TM}}{\left(\eta_{Matrix} \cdot Flux\right)}$$

Δp_{TM} : Transmembrandruck in bar
η_{Matrix} : Viskosität der Maische in mPas
Flux . Volumenstrom in l/m^2

Einfluss des Membranmaterials und der Porenweite

Die Güte einer Filtration wurde über die Filtrationsleistung und die Rückhaltung von Trübungen beurteilt. In Laborversuchen zeigte eine hydrophobe PTFE-Membrane einen größeren Flux als eine hydrophile Polyamid-Membrane (PA), wie aus Abbildung 75 ersichtlich ist.

Da im Bier vorrangig hydrophile Substanzen vorhanden sind, ist deren Anlagerung an eine hydrophobe Membrane erschwert. Membranen mit einer Porenweite < 0,5 µm führten zu einem Permeat mit einer Trübung < 10 EBC (25 ° Messung). Dieser Wert ist für eine Würzefiltration ausreichend. Geringere Porenweiten müssen den Flux nicht erniedrigen, sondern können ihn sogar erhöhen, wenn dadurch die Porenweite kleiner als die Größe der verblockenden Partikel wird.. Dieses Phänomen ist in der Membranfiltration bekannt und wird damit erklärt, dass bei Übereinstimmung der Partikelgröße und Porenweite eine Verblockung der Membrane begünstigt wird.Für die Versuche im Pilotmaßstab wurde eine PTFE-Membrane mit einer Porenweite von 0,45 µm verwendet.

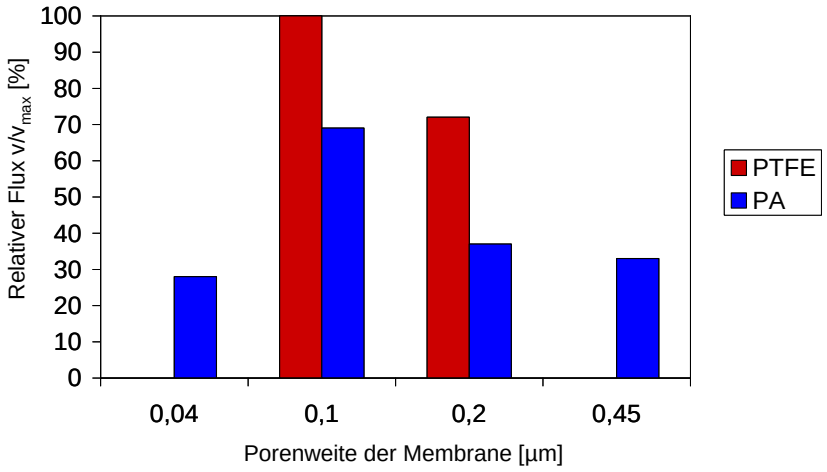


Abbildung 75: Filtrationsleistung einer PTFE- und einer PA-Membrane im Laborversuch

Einfluss der Feststoffkonzentration

Während der Maischefiltration ändert sich die Feststoffkonzentration und Viskosität im Retentat, sofern nicht angeschwänzt wird. Um den optimalen Arbeitspunkt zu finden, wurde der Filterwiderstand über verschiedene Feststoffkonzentrationen ermittelt, wie Abbildung 76 zeigt.

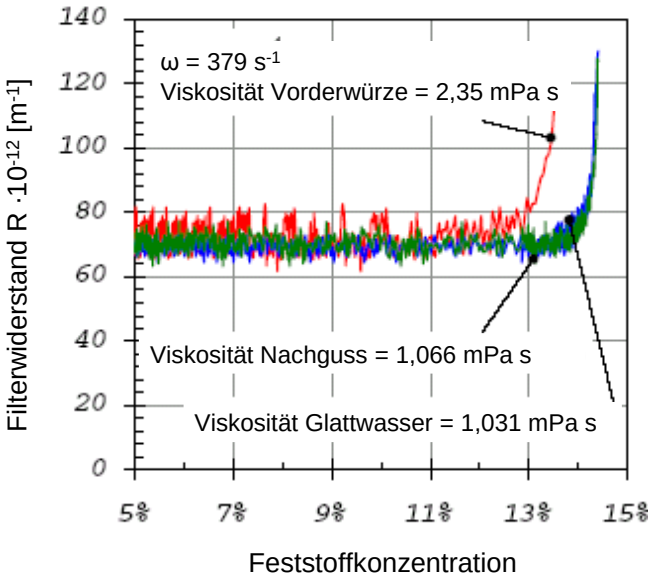


Abbildung 76: Filterwiderstand in Abhängigkeit der Feststoffkonzentration und der Maischeviskosität (Messung der Maischeviskosität mit einem Plattenrheometer Rheometrics SR 5000)

Trotz steigender Feststoffkonzentration nimmt der Filterwiderstand nicht zu, bis ein kritischer Wert erreicht wird. Da die Vorderwürze eine höhere Stammwürze besitzt, steigt hier der Filterwiderstand früher als bei den Nachgüssen. Durch die Oszillationsfrequenz und -amplitude kann die kritische Feststoffkonzentration beeinflusst werden. Die Feststoffkonzentration bleibt jedoch der dominante Parameter.

Einfluss des Foulings der Membrane

In Abbildung 71 wurde gezeigt, dass mit steigender β-Glucankonzentration der relative Flux sinkt. Betrachtet man einen Filtrationsverlauf von Anfang an, so ist erkennbar, dass auch das Fouling der Membrane einen Einfluss auf den Filterwiderstand R hat, wie Abbildung 77 zeigt.

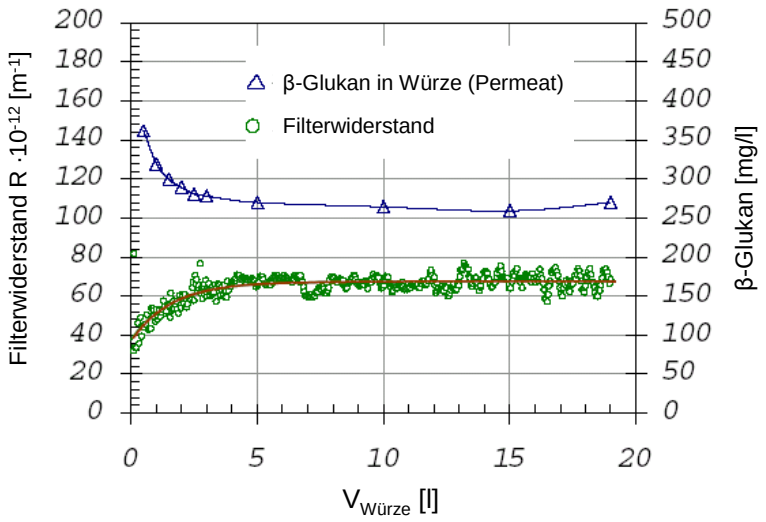


Abbildung 77: Zusammenhang zwischen dem Filterwiderstand und der β-Glucankonzentration während des Vorderwürzelaufes

Mit fortschreitender Filtrationsdauer bildet sich eine Deckschicht auf der Membrane (Fouling), wodurch der Filterwiderstand steigt und somit der Flux und die Wirtschaftlichkeit sinken. Größere Moleküle, welche zu Filtrationsbeginn die Membrane passieren können, werden durch die Deckschicht teilweise zurückgehalten. Dies konnte beim β-Glucan und beim Proteingehalt in der Vorderwürze beobachtet werden. Während im Permeat eine Abreicherung erfolgte, waren steigende Werte im Retentat zu beobachten.

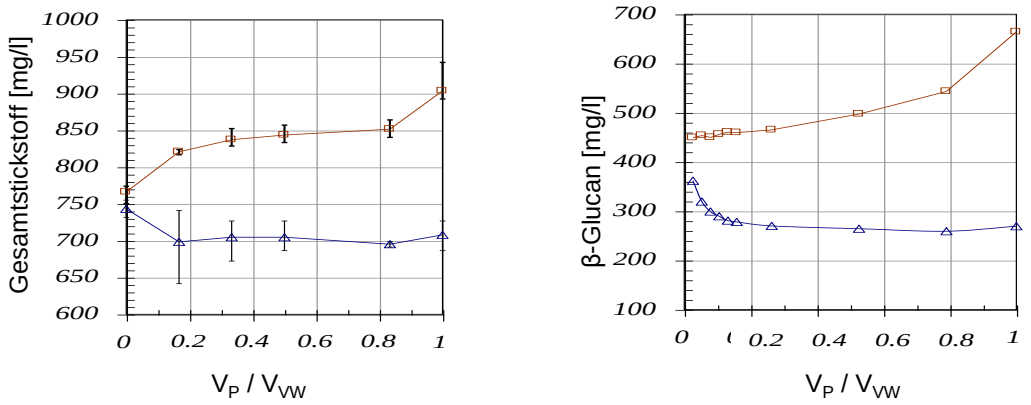


Abbildung 78: Protein- und β-Glucankonzentrationen von Maische bzw. Unfiltrat (Quadrate) und Permeat (Dreiecke) während der Vorderwürzefiltration. Die Auftragung erfolgte gegen das relative Filtratvolumen (V_P : Permeatvolumen, V_{VW}: Gesamtvolumen des Permeates nach der Vorderwürze)

Technologisch betrachtet gibt es Auswirkungen auf die Würzezusammensetzung und somit auch auf die Würze- und Bierqualität. Durch das Zurückhalten von β-Glucan sinkt die dynamische Viskosität, wie Abbildung 79 zeigt. Dies sollte zu einer Verbesserung der Bierfiltrierbarkeit führen.

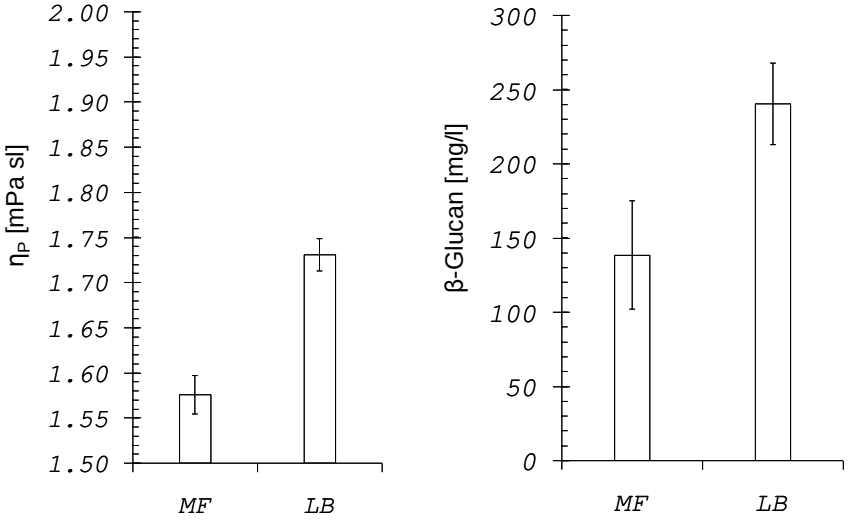


Abbildung 79: Dynamische Viskosität η_P (links) und β-Glucankonzentration (rechts) der Ausschlagwürze. MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall α = 0,05

Zur Bestimmung der Filtrierbarkeit wurde die Laborfiltration nach Kreisz [140] sowie eine Pilotfiltration (Zürcher-Filter) durchgeführt, bei welcher der Differenzdruck kontinuierlich

aufgenommen wurde. Erstere erbrachte einen signifikanten Unterschied, sofern unterlöstes Malz verwendet wurde. Bei den dargestellten Versuchen wurde ein nur vier Tage gekeimtes Malz mit einem Friabilimeterwert von 61 % eingesetzt. Die Pilotfiltration bestätigte die Aussage des Labortests. Bei normal gelösten Malzen konnte kein Unterschied im Filtrationsverhalten festgestellt werden.

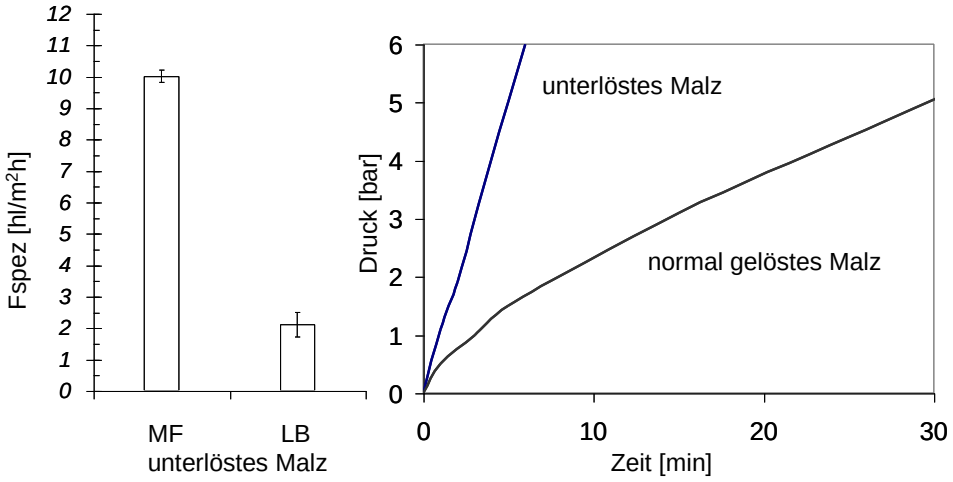


Abbildung 80: Filtrierbarkeit des unfiltrierten Bieres hergestellt mit unterlöstem Malz und Druckdifferenz einer Pilotfiltration (Zürcher-Filter). MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall α = 0,05

Positiv ist, dass schlecht gelöste Malze mit hohen β-Glucankonzentrationen durch die Membranfiltration der Maische in ihrer Filtrierbarkeit beim späteren Bier verbessert werden können. Andererseits werden auch größere Moleküle wie z. B. Proteine durch die Membrane zurückgehalten. Es wurde ein normal gelöstes Malz zu Bier verarbeitet und der Schaum nach NIBEM gemessen. Die membranfiltrierten Biere hatten eine signifikant schlechtere Schaumstabilität, wie Abbildung 81 zeigt. Somit wird die Qualität negativ beeinflusst. Im Ausland, also ohne den Rahmen des deutschen Vorläufigen Biergesetzes, können schaumfördernde Additive das Problem lösen.

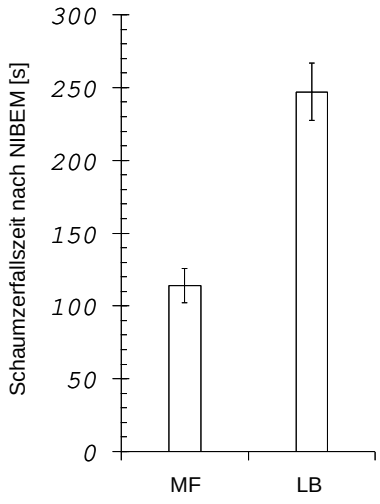


Abbildung 81: Schaumstabilität nach Nibem, gemessen von Bieren aus normal gelöstem Malz. MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall α = 0,05

Nachweis des Membran-Foulings

Wie in Abbildung 77 und Abbildung 78 gezeigt, verändert sich die Selektivität und die Rückhalterate der Membrane während der Filtration. Membranen unterschiedlicher Stadien wurden chemisch und elektronenmikroskopisch untersucht. Es wurden Proteine und β-Glucan chemisch nachgewiesen. Abbildung 82 zeigt die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen (REM) neuer, benutzter und gereinigter Membranen. Die Deckschicht bzw. das Fouling sind bei der benutzten Membrane gut sichtbar.

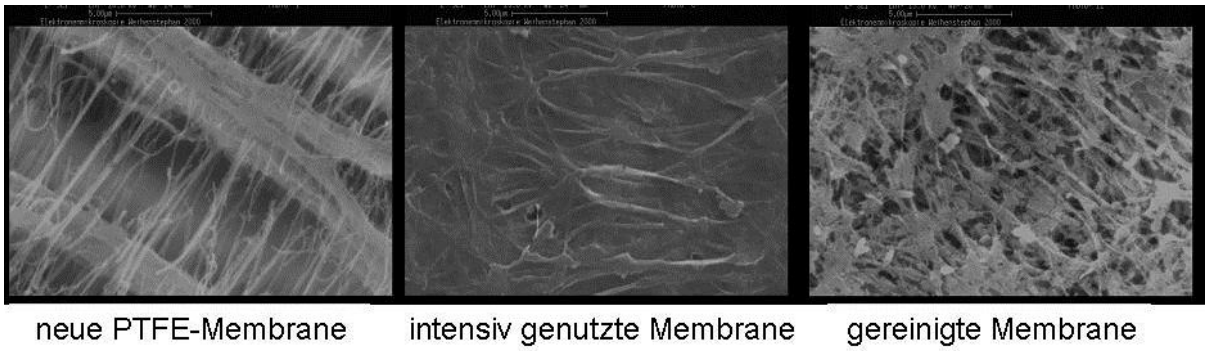


Abbildung 82: Raster-Elektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen einer PTFE-Membrane in verschiedenen Stadien (0,45 µm Porenweite)

Durch die Läuterversuche mit klassischen Scherspaltfiltern und der Vibrationsmembranfiltration (VMF) konnte aufgezeigt werden, welche Würzeparameter und welche Membran-Eigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf das Filtrationsverhalten und die resultierende Würze- und Bierqualität haben. In der Praxis müssen die wirtschaftlich interessanten Größen, wie z. B. die Durchflussleistung und die Standzeit, sowie auch die qualitativen Eigenschaften, also die Würze- und Bierqualität, aufeinander optimal abgestimmt werden.

Nachdem sich gezeigt hat, dass die Bildung einer Deckschicht auf der Membrane maßgeblich den Filtrationsverlauf hinsichtlich Qualität und Wirtschaftlichkeit beeinflusst, wurde beschlossen, in einem nächsten Schritt die Deckschichtbildung auch bei der Membran-Bierfiltration zu untersuchen.

Quellen

Dissertationen von Markus Lotz [176] und Jan Schneider [261] sowie eigene Veröffentlichungen [179, 262-266] und Patente [177, 178]

6.1.2 Untersuchungen zur Deckschichtbildung bei der Membran-Bierfiltration

Bier muss zur Erzielung hoher Lagerfähigkeit (partikelfrei) blankfiltriert und entkeimt werden. Dies geschieht traditionsgemäß durch Pasteurisation. 80 % der Biere werden so behandelt. Diese Verfahren gelten als sicher, haben aber einige Nachteile. Durch die thermische Behandlung kann eine zumeist negative Geschmacksveränderung - der sogenannte

„Pasteur-Geschmack“ - hervorgerufen werden. Diese Verfahren können qualitätsmindernd sein, wodurch sie dem Konsumentenwunsch nach frischen, ursprünglichen und sanft konservierten Nahrungs- und Genussmitteln nicht entsprechen. Eine gesteigerte Verkaufsfähigkeit des Produktes durch Frische-Erhaltung ist ein klares Wettbewerbsargument. Bier, das ohne eine thermische Behandlung haltbar gemacht wird, ist unter dem Namen „draft beer“ bekannt und verzeichnet in einigen Regionen der Welt große Zuwachsraten. Marktanalysen zeigen, dass die Konsumenten sich entweder für ein teures Produkt mit hohem Image oder für ein billiges Produkt entscheiden.

Eine alternative Methode zur Kurzzeiterhitung oder Flaschenpasteurisation ist die Kaltentkeimung des Bieres mittels Membranfiltration. Nach einer Vorfiltration mittels Kieselgur und/oder Tiefenfilterschicht kann eine Entkeimungsfiltration mit Membranen direkt vor dem Abfüllvorgang durchgeführt werden.

Allerdings sind geeignete Membranen teuer und daher nur bei hohen Standzeiten wirtschaftlich vertretbar. In der Vergangenheit haben sich mehrere kritische Punkte bei der Entkeimungsfiltration herauskristallisiert:

- Die Hygiene im Füllerumfeld und das Auftreten von Sekundärinfektionen beim Abfüllvorgang,
- die Abhängigkeit von Rohstoffqualität, Brauverfahren und Vorfiltration,
- die spontane Verblockung der Membrane,
- die irreversible Verblockung der Membrane, welche nicht abgereinigt werden konnte,
- das Fehlen von Membranen, mit hohen Fluxraten bei gleichzeitiger mikrobiologischer Sicherheit und
- das Fehlen eines Tests (Integritätstest), welcher die mikrobiologische Sicherheit der Filtrationsanlage garantiert.

Aus den genannten Gründen wurde ein Forschungsprogramm initiiert, welches die Wirtschaftlichkeit (economics) und Zuverlässigkeit (reliability) von Membranfiltrationen erhöhen sollte. Das Vorhaben untergliederte sich in folgende Schritte:

- Identifikation der für die Verblockung verantwortlichen Stoffe,
- Entwicklung einer online-Messmethode zur Erkennung des Verblockungsgrades,
- Entwicklung einer Reinigungstechnologie und
- Scale-up in den Industriemaßstab.

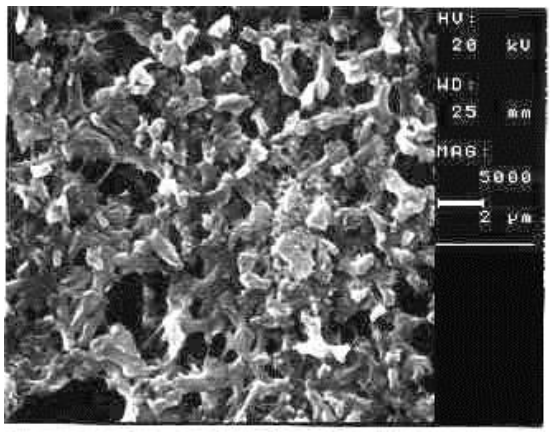
Die Versuche im Industriemaßstab erfolgten an einer vollautomatischen Membranfilteranlage der Firma Pall in einer Brauerei der Brau Union Österreich. Die mittlere Porengröße der Nylon-Membranen betrug 0,45 µm. Die Anlage hatte eine Kapazität von 400 hl/h und eine Membranfläche von 320 m^2. Es erfolgte eine Vorfiltration mittels Kieselgurfilter und eine Stabilisierung durch einen Polyvinylpolypyrrolidon (PVPP)-Filter.

Membranfläche 320 m^2, 400 hl/h $\Rightarrow$ 320 m^2 : 40 m^3/h = 8 m^3/m^2 h (Flux)

Für die Laborversuche waren spezielle Filterstände zur Verfügung. Die Untersuchungen erfolgten in unterschiedlichen Universitäts- und Betriebslabors in Deutschland und Österreich.

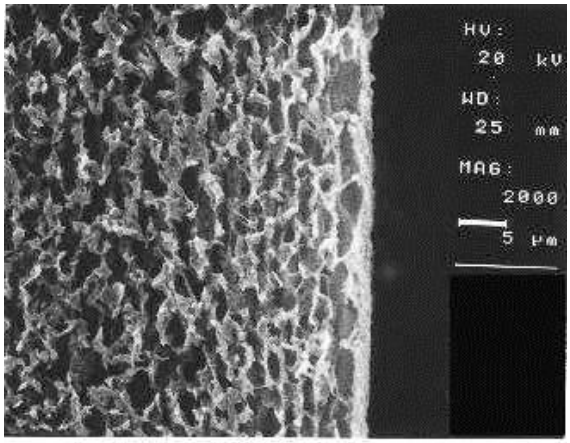
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen von neuen und verblockten Membranen.

Um die Ursache der Membranverblockung optisch zu erforschen, wurden Aufnahmen mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM) erstellt. Alle Bilder wurden mit einer 5.000-fachen Vergrößerung aufgenommen.



Filtersatz, neu (Referenz)
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: unbehandelt
Vergrößerung: 5.000-fach

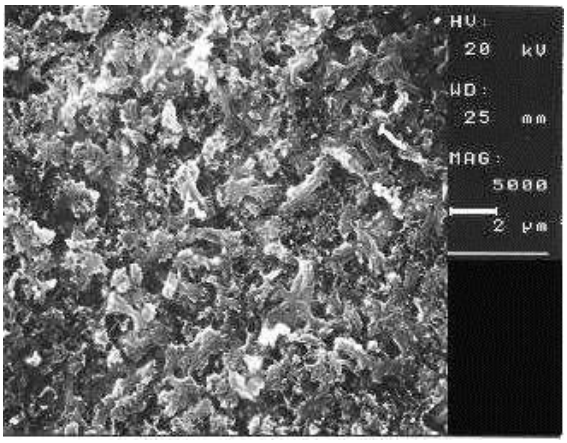
Abbildung 83: REM-Aufnahme (Oberfläche) eines neuen Membranfiltersatzes



Filtersatz, neu
Seite: anströmseitig
Sicht: Schrägschnitt - Aufbau
Behandlung: unbehandelt
Vergrößerung: 5.000-fach

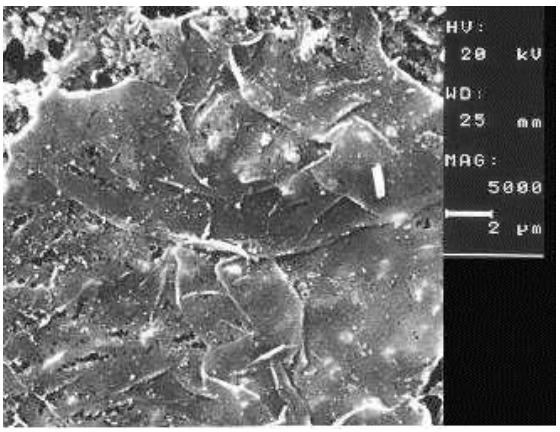
Abbildung 84: REM-Aufnahme (Schrägschnitt) eines neuen Membranfiltersatzes

Die Verblockung trat an der anströmseitigen Membranoberfläche in Form dünner, flächenartiger Ablagerungen auf. Schnittbetrachtungen belegen, dass diese Deckschicht nur ca. 100 nm dick war.



Filtersatz, nach 50.000 hl,
teilweise verblockt
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer
Wasserspülung
Vergrößerung: 5.000-fach

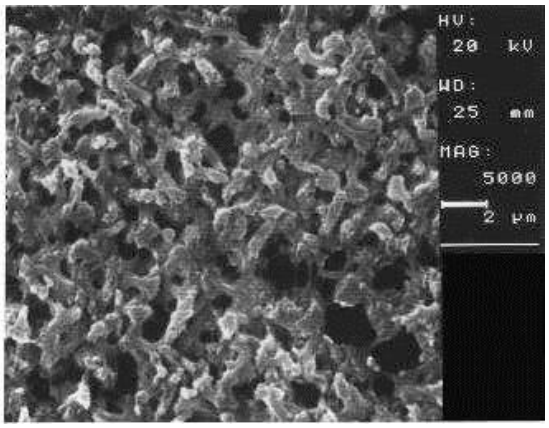
Abbildung 85: REM-Aufnahme eines teilweise verblockten Filtersatzes



Filtersatz, verblockt
nach 138.000 hl
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer
Wasserspülung
Vergrößerung: 5.000-fach

Abbildung 86: REM-Aufnahme (Anströmseite) eines verblockten Membranfiltersatzes

An der Filtratseite zugewandten Oberfläche (Innenseite) waren auch bei stark verblockten Membranen keine nennenswerten Ablagerungen erkennbar.



Filtersatz verblockt nach 138.000 hl
Seite: innen (filtratseitig)
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer Wasserspülung
Vergrößerung: 5.000-fach

Abbildung 87: REM-Aufnahme (Filtratseite) eines verblockten Membranfiltersatzes

Mit zunehmender Anzahl der Reinigungsschritte tritt eine Zerfaserung der Membranstruktur auf, was zu einer beschleunigten Verblockung und einer schlechteren Reinigbarkeit der Membrane führt. Eine intensive Reinigung mit alkalischen und oxidativen Medien schädigt die Membrane ebenfalls. Es muss somit nach einer schonenden Methode der Reinigung gesucht werden, um die Alterung der Membrane möglichst gering zu halten.

Bieranalysen vor und nach der Membranfiltration

Die Membrane hatte keinen Einfluss auf die Konzentration der anorganischen Ionen Chlorid, Nitrat, Sulfat, Phosphat und Oxalat. Eine eindeutige ladungsabhängige Adsorption von Calciumionen aus dem Spülwasser der Reinigung auf die Membrane konnte pH-abhängig festgestellt werden. Nach einer Reinigung fand eine Desorption von Calciumionen aus der Filtermatrix durch das „saure“ Eluat Bier statt, wie Abbildung 88 zeigt. Durch eine Konditionierung der Membrane mit sauren Medien im letzten Spülschritt kann dies verhindert werden.

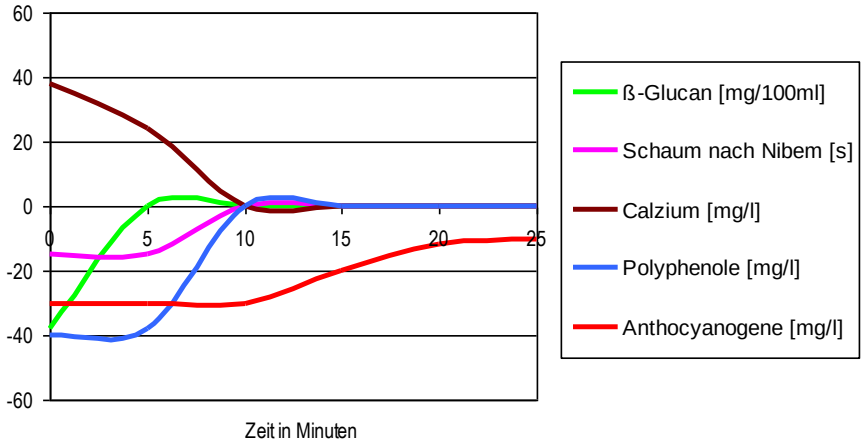


Abbildung 88: Konzentrationsänderung über die Zeit bei einer Membranfiltration mit 400 hl/h

Zu Beginn der Filtration kann eine Abreicherung von Polyphenolen bzw. Anthocyanogenen aus dem Bier festgestellt werden. Die chemischen Analysen der Rückstände (fouling) auf der Membrane bestätigen dies. Bei der Reinigung können durch eine Laugenbehandlung die

Gerbstoffe von der Membrane gelöst werden. Eine sauer konditionierte Spülung erbringt zusätzlich den Vorteil, dass die Adsorptionsneigung der Membrane verringert wird.

Obwohl β-Glucane bzw. β-Glucan-Gele als Verblocker bekannt sind [140, 141], konnte nur in den ersten Minuten der Filtration eine Reduzierung des Gesamt-β-Glucan-Gehaltes beobachtet werden. Die Analyse des Schaumwertes nach Nibem zeigte einige Minuten zu Beginn der Filtration nach dem Filter geringere Werte. Dies gibt einen Hinweis darauf, dass auch bei der Bierfiltration höhermolekulare Substanzen an der Membrane zurückgehalten werden. Nachhaltige Auswirkungen auf die Schaumhalbarkeit des Bieres, wie in Abbildung 81 bei der Würzfiltration beschrieben, konnten nicht festgestellt werden.

Die Werte des α-Amino-Stickstoffes, des koagulierbaren Stickstoffes und des Gesamtstickstoffes sowie der Jodwert, niedermolekulare Zucker und Gärungsnebenprodukte wurden durch die Membranfiltration nicht beeinflusst.

Insgesamt gesehen ist nur während der ersten Minuten der Filtration eine Reduzierung von wenigen Bierinhaltsstoffen festzustellen. Innerhalb einer Filtrationscharge bzw. Drucktankcharge war dieser Einfluss zu vernachlässigen.

Infrarot Spektroskopie

Die Infrarot-Spektroskopie verblockter Membranen dient der Identifizierung chemischer Verbindungen. Vergleichende Untersuchungen haben eine gute Übereinstimmung mit Lignin-Cellulose gezeigt. Dies deutet darauf hin, dass in der Deckschicht ß-glycosidische Bindungen vorhanden sind.

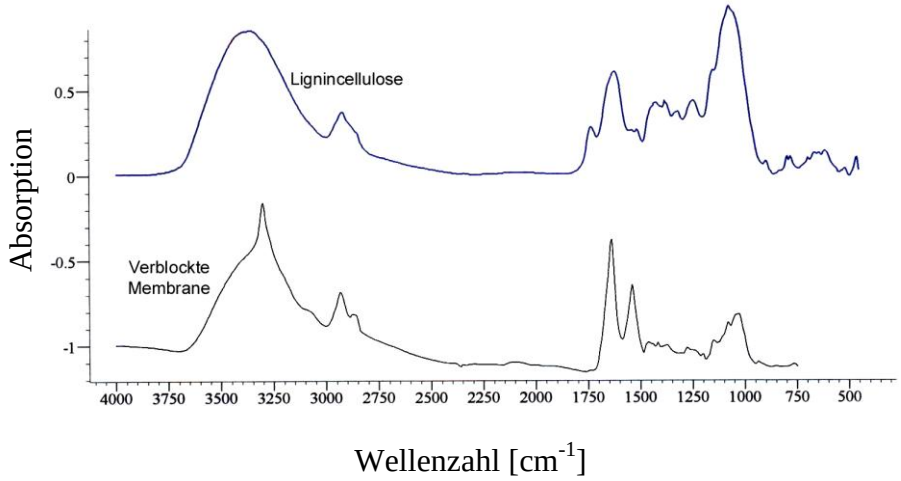


Abbildung 89: Infrarotspektroskopie einer verblockten Membrane

Enzymatische Reinigung

Mit Hilfe der analytischen Daten der Deckschichtuntersuchungen wurden Enzyme mit entsprechenden Substratspezifikationen (Hydrolasen) für die Reinigung im Labormaßstab ausgewählt. Die Ergebnisse sollten zur Auswahl geeigneter Enzyme und zur Entwicklung neuer Reinigungsverfahren dienen.

Nach Reinigung von Membranen mit verschiedenen Enzymen wurden diese in eine Filtrationsapparatur eingespannt. Gemäß den Vorschriften des Esser-Tests wurde eine

Laborfiltration mit Standardbier durchgeführt. Die Filtratablaufmengen in g wurden über die Zeit mit einer Waage und einem angeschlossenen PC aufgenommen.

Es zeigt sich, dass der Einsatz von α-Amylasen und Glucanasen die Deckschicht reduzierte und zu ähnlichen Flux-Raten führte. Den besten Reinigungserfolg erbrachten Cellulasen, wie Abbildung 90 zeigt. Dies bestätigt die Ergebnisse aus den Forschungen zur Deckschicht-Identifikation.

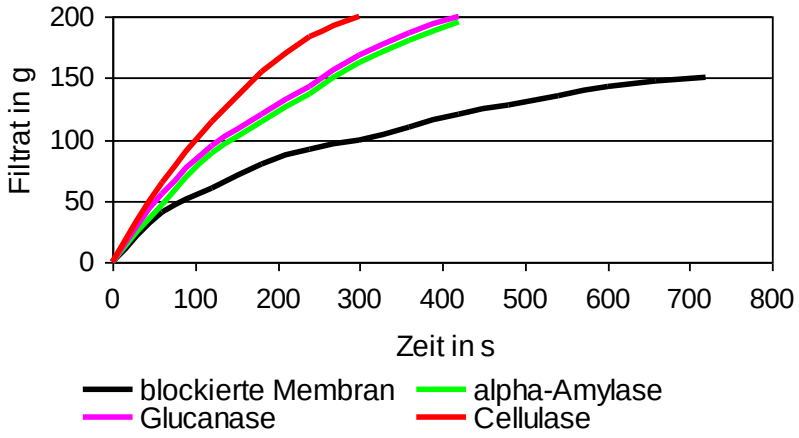


Abbildung 90: Esser-Test nach einer enzymatischen Reinigung von Membranen

Partikelgrößenverteilung

Die Untersuchungen der Partikelgrößenverteilung erfolgten mit der Methode der Photonen-Korrelationsspektroskopie. Die Konzentration der Partikel im Größenbereich von 0,02-2,00 µm liegt unter 0,5 ppm und ist somit an der Nachweisgrenze der Methode. Dies bedeutet, dass die Verblockung der Membrane nicht partikulärer Natur sein kann. Es sind zu wenig Partikel im Bier vorhanden, als dass sie die Ursache für eine Verblockung sein könnten.

Molekulargewichtsverteilung

Es wurde eine Größenausschlusschromatographie zur Auftrennung der unterschiedlichen Molekülgrößen eingesetzt. Es erfolgte eine universelle Massendetektion mittels Brechungsindex-Detektor „Differential-Refractive-Index“ (DRI) in Kombination mit einem Kleinwinkellichtstreuinstrument „Low-Angle Laser-Light Scattering“ (LALLS). Daraus wurde das Molekulargewicht errechnet.

Dabei hat sich gezeigt, dass die Membranfiltration von Kieselgur-filtriertem Bier keine signifikanten Änderungen in der Molekulargewichtsverteilung herbeiführt.

Zeta-Potenzial

Die Oberflächenladung der Membranfilter ändert sich während der Filtration. Blockierte Filter zeigen eine ungeladene Oberfläche. Durch Reinigungsmaßnahmen kann der ursprüngliche Ladungszustand wieder hergestellt werden. Die Messungsergebnisse des Zeta-Potenzials korrelieren mit den REM-Aufnahmen und eignen sich somit zur online-Kontrolle des Filterzustandes sowie des Reinigungserfolges, wie Abbildung 91 zeigt.

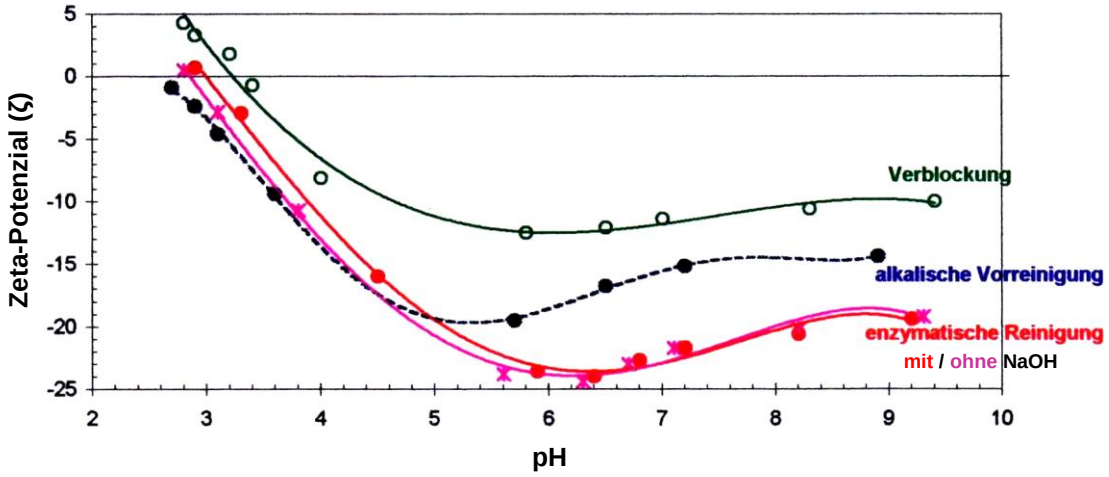
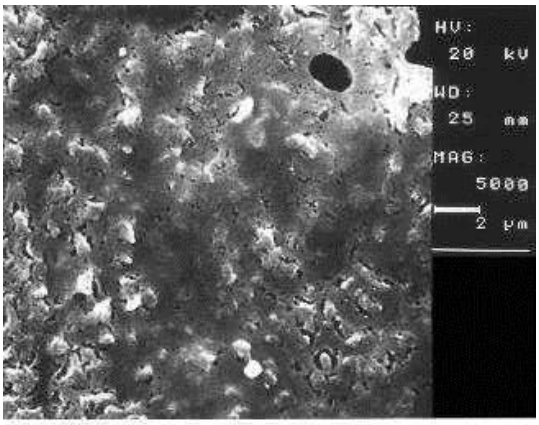


Abbildung 91: Zeta-Potenzial vs. pH einer verblockten Membrane aus Nylon $_{66}$ nach der Reinigung

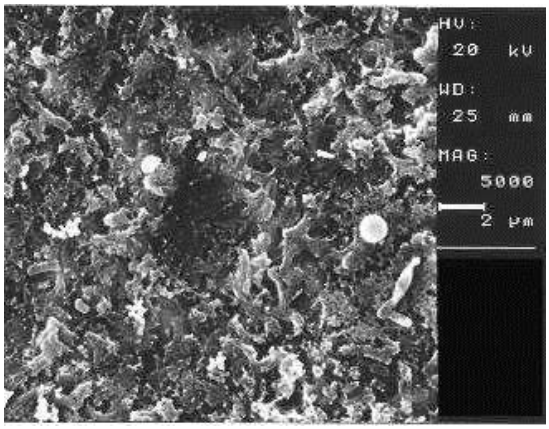
Rasterelektronische Aufnahmen von verblockten und gereinigten Membranen

Die unterschiedliche Reinigungswirkung, wie sie bereits beim Zeta-Potenzial festgestellt wurde, zeigen die folgenden Abbildungen.



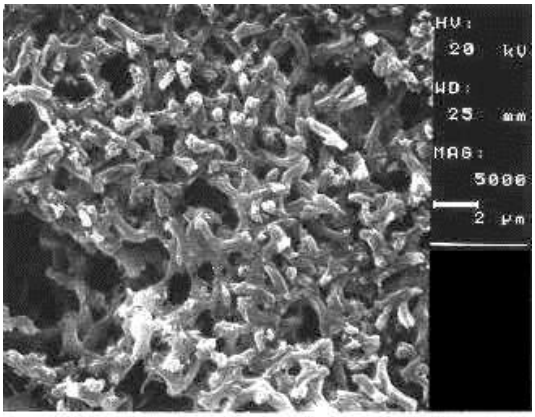
Filtersatz, verblockt nach 138.000 hl
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer Wasserspülung
Vergrößerung: 5.000-fach

Abbildung 92: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane



Filtersatz, verblockt nach 138.000 hl
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer alkalischen Reinigung
Vergrößerung: 5.000-fach

Abbildung 93: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane nach einer alkalischen Reinigung



Filtersatz, verblockt
Seite: anströmseitig
Sicht: Oberfläche
Behandlung: nach einer enzymatischen Reinigung
Vergrößerung: 5.000-fach

Abbildung 94: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane nach einer enzymatischen Reinigung

Mit diesen Arbeiten wurde die Grundlage geschaffen, die zur Entwicklung eines neuen Reinigungskonzeptes mit den folgenden Eigenschaften geführt hat:

- Die Kombination einer alkalischen und enzymatischen Reinigung ermöglicht die Regeneration verblockter Membranen,
- Membranen, die bisher als irreversibel verblockt galten, können regeneriert werden,
- präventive enzymatische Reinigungen sind zu empfehlen,
- die beste Effizienz zeigt die endo-ß-Cellulase,
- die Lebenszeit der Membranen ist begrenzt durch deren mechanische Eigenschaften,
- das patentierte Reinigungsverfahren wird im industriellen Maßstab eingesetzt.

Durch die Weiterentwicklung der Membranmaterialien, Reinigungsverfahren und Filtrationstechnologien konnten die Flux-Raten von ca. 300 hl pro 10-Zoll-Modul in 1997 bis auf ca. 700 hl pro Modul im Jahre 2002 gesteigert werden. Zurzeit ist die Membranfiltration noch teurer als die Kieselgur- oder Schichtenfiltration. Treten gesetzliche Forderungen in Kraft, die die Entsorgungsproblematik verschärfen und wird der Druck durch die öffentliche Meinung stärker, so muss auf die Kieselgur- und Schichtenfiltration im herkömmlichen Sinne verzichtet werden.

Auswirkungen auf Vitamine und Aminosäuren

Den Einfluss einer thermischen Behandlung auf den Aminosäuren- und Vitamingehalt zeigt Tabelle 16.

Tabelle 16 : Einfluss der thermischen Behandlung auf den Vitamin- und Aminosäuregehalt

	Kurzzeiterhitzung	Membranfiltration
Vitamine in mg/l		
Thiamin (B1)	0,065	0,097
Riboflavin (B2)	0,133	0,143
Aminosäuren in mg/l		
Glutamin	8,6	9,5

Durch eine Kurzzeiterhitzung des Bieres auf 30 Pasteurisationseinheiten wurden die Vitamine B1 signifikant und B2 tendentiell geschädigt. Der negative Einfluss einer thermischen Behandlung zeigte sich auch in der Reduzierung des Glutamingehaltes. Weitere Arbeiten im Rahmen der Würzekochung konnten bestätigen, dass sich Glutamin als Indikatorsubstanz für eine thermische Behandlung eignet [187]. Im Sinne einer schonenden Konservierung sollte auf eine thermische Behandlung verzichtet werden.

Quellen

Dissertation von Gerald Zanker [333] sowie eine eigene Veröffentlichung [156]

6.2 Optimierung des Läuterprozesses mittels Fuzzy-Logic

Die Automatisierungstechnik ist heute das Haupteinsatzgebiet der Fuzzy-Logik. Industrielle Prozesse in Zement- oder Hochöfen werden genauso unscharf (= fuzzy) (oder weiß man das) geregelt wie Antiblockiersysteme in der Fahrzeugtechnik oder auch Waschmaschinen [297] . Durch die Neuentwicklung eines großen deutschen Brauereianlagenherstellers kam diese Methode im Sudhaus bei der Abläuterung mit dem Läuterbottich zum Einsatz.

In der modernen Sudhaustechnik wird angestrebt, sowohl die Geräte als auch die Verfahrensschritte der Würzebereitung im Hinblick auf quantitative und qualitative Gesichtspunkte stetig zu optimieren. Daneben ist es ein wichtiges Ziel, die Wirtschaftlichkeit der Herstellung zu steigern und die Gleichmäßigkeit des Produktes zu gewährleisten. Hierbei leistet die Prozessautomation einen wichtigen Beitrag.

Die heute möglichen hohen täglichen Sudzahlen führen zu parallel ablaufenden Vorgängen, die vom Personal (oft nur eine Person) beherrscht werden müssen. Nur mit Automatsierungsmaßnahmen kann ein sicherer Produktionsablauf ohne Qualitätsschwankungen und Substanzverluste erreicht werden. Verkürzungen der automatisch kontrollierten Prozesse bedingen eine Steigerung der Produktivität. Durch Einsparungen von Energie, Rohstoffen und Personal können die laufenden Produktionskosten gesenkt werden [215].

Fuzzy Logic – unscharfe Mathematik

Durch die unscharfe Logik (engl. Fuzzy Logic) wird dem Menschen ermöglicht, Alltagserfahrungen und Begriffe wie ”wenig”, ”viel”. ”alt”, ”jung”, ”hoch” ” oder tief” mathematisch exakt zu verarbeiten und einem Computer verständlich zu machen. Nach der klassischen, scharfen Mengenlehre der Schulmathematik kann ein Element aus einem Wertevorrat X einer Menge entweder vollständig zugehören oder nicht in ihr enthalten sein. Die unscharfe Menge (engl. Fuzzy Set) erlaubt neben der vollständigen auch die teilweise Zugehörigkeit eines Elementes zu ihr. Sie besitzt keine klar definierte Grenze, sondern einen „unscharfen” Übergangsbereich an ihren Rändern. Elemente, die sich in diesem Übergangsbereich befinden, gehören ihr nur zu einem gewissen Grad an. Dieser wird in der Fuzzy-Logik als Zugehörigkeitsgrad μ bezeichnet, dessen Wert im Bereich von Null (keine Zugehörigkeit) bis einschließlich eins (vollständige Zugehörigkeit) liegen kann [298].

Fuzzy Control – Mit der Erfahrung regeln

Den Einsatz der Fuzzy-Logik bei der Prozessregelung bezeichnet man als Fuzzy-Control (unscharfe Regelung). Fuzzy-Control kann komplexe Vorgänge, die nur schwer mit physikalisch-analytischen Modellen beschrieben werden können, in genial einfacher Weise

beherrschen. Ein unscharfer Regler kann zahlreiche Eingangsgrößen verarbeiten und aus diesen Ausgangswerte ermitteln. Um dem Regler einen Prozess verständlich zu machen, müssen für alle Ein- und Ausgangsgrößen linguistische Variablen definiert werden. Hierbei werden unscharfe Mengen über dem Wertebereich der Ein- und Ausgangsgrößen festgelegt. Anschaulich erfolgt dies in Form von Zugehörigkeitsfunktionen, wie in
Abbildung 95 anhand des Beispiels Trübung graphisch dargestellt. Diese Variable mit den unscharfen Mengen ”klar”, ”ausreichend” und ”zu trüb” könnte bei einem Fuzzy-Regler Verwendung finden, der an eine Online-Trübungsmessung angeschlossen ist. Ein Trübungswert von 17 EBC würde danach mit Zugehörigkeitsgraden von 0 als ”klar”, von 0,8 als ”ausreichend” und von 0,2 als ”zu trüb” interpretiert.

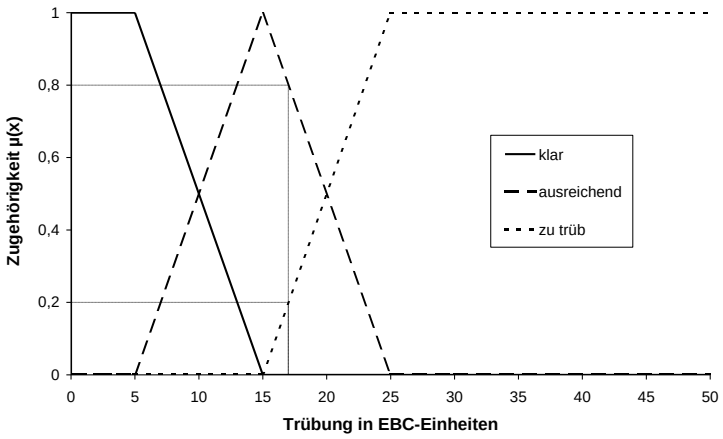


Abbildung 95: Beispiel für eine linguistische Variable (Fuzzy-Logik)

Die Charakteristik eines Fuzzy-Reglers wird durch das Aufstellen logischer Regeln aufgrund von Erfahrungen und Expertenwissen bestimmt. Sie bestehen aus Bedingung und Schlussfolgerung und sehen beispielsweise wie folgt aus:

WENN	*Trübung*	zu trüb
UND	*Würzedurchfluss*	groß
DANN	*Hackwerk*	hoch

Anhand einer Basis aus derartigen Regeln werden aus den Eingangswerten nach den Rechenregeln der Fuzzy-Logik die Zugehörigkeitsgrade der Ausgangsgrößen zu ihren unscharfen Mengen und daraus konkrete Ausgangswerte ermittelt. Diese dienen als Stellgrößen im Prozess.

Funktionsweise des neuen Läuterreglers

Die Fuzzy-Regelung soll es ermöglichen, den Läutervorgang besser und flexibler an die Gegebenheiten im Treberkuchen anpassen zu können. Hierbei kommen die in Abbildung 96 dargestellten Ein- und Ausgangsgrößen zur Anwendung.

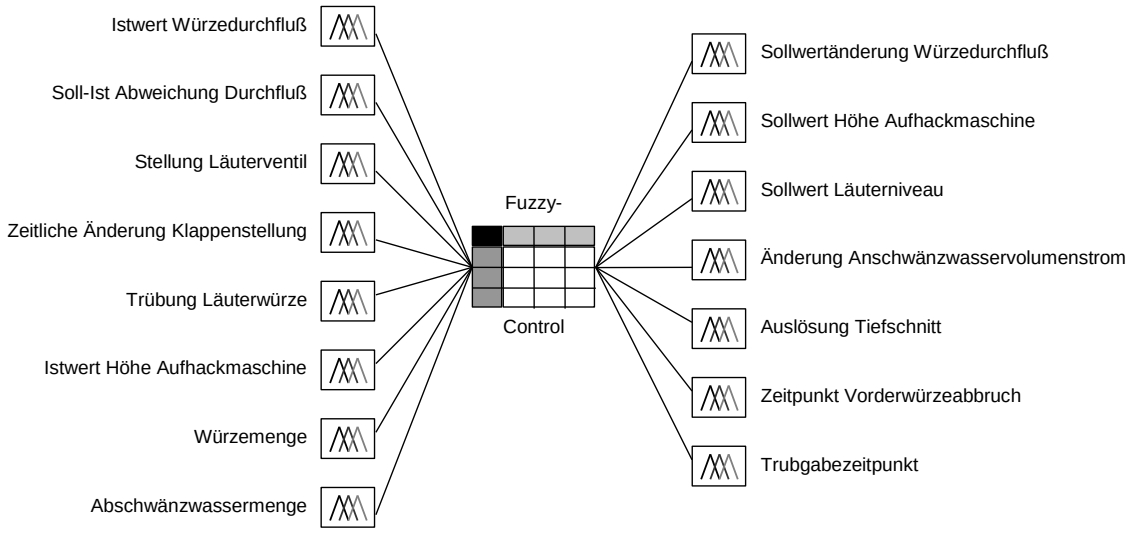


Abbildung 96: Ein- und Ausgänge der Fuzzy-Regelung für die Läuterung

Der Regler bewirkt einen stetig ansteigenden, der Durchlässigkeit des Treberkuchens angepassten Würzedurchfluss. Dieser wird bei geringer Öffnung der Läuterklappe erreicht und durch eine Absenkung des Läuterniveaus in der Nachgussphase unterstützt. Die Höhe des Hackwerks reagiert schnell und sehr variabel auf Änderungen der Läuterventilöffnung, orientiert sich aber auch stark an der Würzetrübung. Tiefschnitte waren in der Regel nicht notwendig.

Bewertung des Systems

Die Vergleiche der unscharf abgeläuterten Würzen mit den konventionell abgeläuterten ergaben keine wesentlichen Unterschiede in der Zusammensetzung. Auch ohne Verschnitt bis zur Abfüllung geführte Biere hatten sehr ähnliche qualitative Eigenschaften.

Positive Effekte der Neuentwicklung zeigten sich vor allem in der technischen Leistungsfähigkeit des Systems. Hier ist vor allem eine Verkürzung der Läuterzeit zu nennen. Diese kann einer Brauerei mit Kapazitätsengpässen die Abläuterung eines zusätzlichen Sudes am Tag ermöglichen. Eine Läuterzeitverkürzung ist insbesondere auch für Weißbierbrauer von Interesse, da durch den Weizenanteil keine Spelzen für den Filterkuchen eingetragen werden, wodurch die Filtration erschwert wird. Eine Verringerung der Hubspiele der Aufhackmaschine führte zu einer Materialentlastung. Im Mittel ergaben sich bessere Sudhausausbeuten und ein geringerer Anteil an Feststoffen, wie Abbildung 97 zeigt.

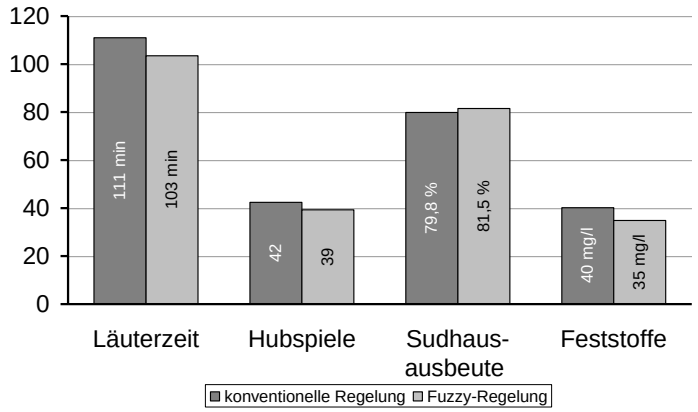


Abbildung 97: Vorteile der Fuzzy-Regelung gegenüber der konventionellen Methode, Mittelwerte aus 7 Versuchen

Weitere Vorteile stellen die Eingriffsmöglichkeiten auf Anschwänzwassermenge und -volumenstrom sowie die variablen Zeitpunkte für den Beginn der Nachgüsse und die Trubgabe dar. Dem Inbetriebnehmer ermöglicht das neue Regelkonzept schnelle und unkomplizierte Änderungen der Regelcharakteristik und das Einbringen seiner Erfahrungen, wodurch die Inbetriebnahmezeiten deutlich reduziert werden können. Da der unscharfe Regler Sude verschiedener Biersorten ohne veränderte Parametrierung abläutert, bietet er Sicherheit bei Problemsuden und Flexibilität beim Einfahren neuer Anlagen. Auch Brauereien mit großem, häufig wechselndem Sortiment können hiervon profitieren.

Negativ ergab sich ein etwas höheres Trübungsminimum. Starke Trübungspeaks, welche die konventionelle Regelung aufwies, traten bei der unscharfen Regelung jedoch nicht auf. Bei einigen Versuchsuden bewirkte der Fuzzy-Regler Schwingungen im Würzevolumenstrom. Derartige Instabilitäten sollten durch Signalglättungen und optimale Einstellung der PID-Regler der Peripherie behoben werden.

Die Läuterwürze hat nur indirekt einen Einfluss auf die Bierqualität, da noch einige Prozessschritte bis zum abgefüllten Bier durchlaufen werden. Bei beschleunigter Abläuterung resultiert eine erhöhte Trübung in der Läuterwürze. Durch die Kochung und die einhergehende Eiweißkoagulation werden die Trübungbestandteile noch einmal entschieden beeinflusst. An diesem Beispiel kann erkannt werden, welchen Stellenwert die Würzekochung hat. Im folgenden Kapitel wird der Prozessschritt der Würzekochung und –behandlung beschrieben und es werden neue Kochtechnologien vorgestellt.

Quellen

Diplomarbeit von Tobias Voigt sowie Veröffentlichungen zu diesem Thema [15, 16]

7 Würzekochen und Würzebehandlung

7.1 Vorgänge bei der Würzekochung

Bis zur Energiekrise in den 70er Jahren des letzten Jahrhunderts waren die Gesamtverdampfungen und auch die Kochzeiten nicht optimiert und dementsprechend ca. doppelt so hoch bzw. lange wie heute. In den letzten 5-10 Jahren haben sich als Standard für die Gesamtverdampfung mit modernen Würzekochsystemen Werte von 4-6 % etabliert. Geringe Verdampfungen bewirken eine Schonung der Würze hinsichtlich der thermischen Belastung, was zu deutlich weniger für die Alterung relevanten Maillardprodukten führt. Es besteht heute die Möglichkeit, mit den modernen Würzekochsystemen gezielter auf die verschiedenen notwendigen Abläufe bei der Würzebehandlung einzuwirken. Um neue Kochsysteme evaluieren oder entwickeln zu können, müssen erst die Vorgänge bei der klassischen Würzekochung näher betrachtet werden. Diese lassen sich grob in zwei Prozesse einteilen: Die Heißhaltung und die Verdampfung.

Heißhaltung

Durch die Heißhaltung oder Kochung finden chemische Reaktionen wie beispielsweise die Hopfenisomerisierung, Aromastoffbildung, Farbbildung und Lösungsvorgänge sowie Enzyminaktivierung statt. Es muss eine Inaktivierung der Malzenzyme erfolgen, da sonst unkontrolliert übervergärende Biere (Diätbiere) mit einem einseitigen Geschmacksprofil die Folge wären. Neben hydrolytischen Enzymen, welche den Endvergärungsgrad des Bieres beeinflussen, sollen auch weitere Enzyme, wie zum Beispiel die Phenoloxidasen inaktiviert werden. Diese führen zu einer weiteren Zufärbung und geschmacklichen Verschlechterung durch Oxidationsreaktionen. Darüber hinaus müssen während der Kochung oder Heißhaltung Eiweißverbindungen bzw. Eiweiß-Gerbstoffkomplexe ausgeschieden werden. Die hierfür nötige Eiweißkoagulation führt zu glanzfeinen Würzen, in welchen sich Trubflocken bilden. Durch eine zu starke Eiweißkoagulation werden schaumpositive hochmolekulare Proteine (10 bzw. 40 kDA) ausgefällt, wodurch sich der Bierschaum verschlechtert. Im Rahmen des bayrischen Reinheitsgebotes, in welchem kein Zusatz von schaumfördernden Additiven erlaubt ist, stellt dies einen kritischen Punkt dar. Eine mangelhafte Eiweißkoagulation führt zu kolloidal instabilen Bieren. Für den Kunden ist ein trübes Bier ein Reklamationsgrund. Trübungsverursachende Substanzen können jedoch vor oder während der Bierfiltration durch Einsatz von Filterhilfsmitteln partiell adsorptiv entfernt werden. Üblich sind Kieselgele zur Reduzierung von proteinischen Substanzen und Polyvinylpolypyrrollidon (PVPP) zur Reduzierung phenolischer Substanzen. Beide Substanzgruppen beeinflussen die chemisch-physikalische Stabilität des abgefüllten Bieres.

Die ab ca. 80 °C ablaufenden Maillard-Reaktionen führen zur Neubildung von Aromastoffen. Über den Streckerabbau entstehen aus Aminosäuren deren, um ein C-Atom kürzere, korrespondierende Streckeraldehyde. Diese beeinflussen die Geschmacksstabilität der Biere negativ. Aus diesem Grund werden sie als Alterungsindikatoren bestimmt. Abhängig von Flüchtigkeit und Kochsystem werden diese Aromastoffe durch Verdampfung entfernt, wobei sich ein Gleichgewicht zwischen Entstehung und Ausdampfung einstellt. Andere Aromastoffe, vorzugsweise aus dem Lipidstoffwechsel, werden bei der Würzekochung nicht nachgebildet, sondern nur durch Verdampfung reduziert. Diese Substanzen können als analytische Indikatoren der Ausdampfeffizienz eines Kochprozesses verfolgt werden. Bei der Kochung verändert sich das Aromaprofil, wodurch die sensorischen Eigenschaften des frischen und gealterten Bieres beeinflusst werden.

Verdampfung

Die Verdampfung dient der Austreibung unerwünschter Aromastoffe (z. B. Myrcen aus dem Hopfen), verschiedener Carbonyle sowie Schwefelverbindungen (z. B. Dimethylsulfid (DMS)). Außerdem kann der Stammwürzegehalt eingestellt werden. Eine definierte Stammwürzeeinstellung ist notwendig, um die Produktkonstanz zu gewährleisten und gesetzliche Anforderungen beim Inverkehrbringen des Bieres zu erfüllen. Hierbei sind die Wirtschaftlichkeit und die Würzequalität zu beachten. Eine hohe Verdampfung ermöglicht eine größere Nachgussmenge und somit ein effektiveres Auslaugen der Treber, sodass der Malzeinsatz reduziert wird. Gleichzeitig muss mehr Energie für die Verdampfung eingesetzt werden, damit steigt die thermische Belastung der Würze, die negative Folgen für die Geschmacksstabilität des Bieres mit sich bringt.

Bei klassischen Würzekochsystemen (Abbildung 98), wie beispielsweise dem Innenkocher oder dem Aussenkocher läuft die Heißhaltung und Verdampfung gleichzeitig während dem Kochen ab. Nach der Kochphase erfolgt die Heißtrubabtrennung z. B. im Whirlpool.

Unter der Bezeichnung Kochbeginn versteht man die Pfanne-voll-Würze zum Probenahmezeitpunkt Kochbeginn, welchen man z. B. auf 96 °C definieren kann, um die Probenahme bei unterschiedlichen Suden reproduzierbar zu gestalten. Kochende ist der Zeitpunkt, wenn die Würze in den Whirlpool ausgeschlagen, d. h. in den Whirlpool umgepumpt wird. Die Probenahme nach dem Whirlpool muss zeitlich genau fixiert werden, da die Würzekühlzeit ca. eine Stunde benötigt und bei den hohen Temperaturen in der Würze die chemischen Reaktionen weiter ablaufen. Es ist plausibel und hat sich bewährt, dass bei halber Kühlzeit die Probenahme erfolgt. Der Zeitpunkt ist genau fixiert und die analytischen Werte liegen ungefähr im Mittel zwischen den Werten bei Kühlbeginn und Kühlende [276].

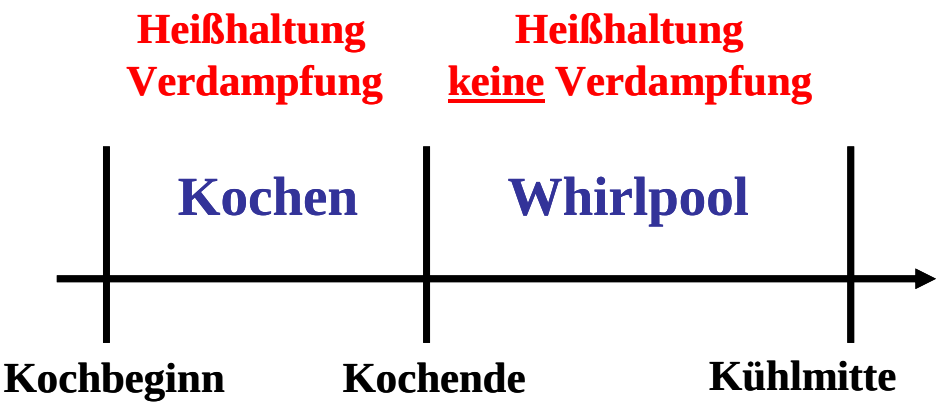


Abbildung 98: Verfahrensschritte einer klassischen Würzekochung

Heute ist es aufgrund moderner Kochsysteme möglich, die Verdampfung und die Heißhaltung bei der Würzekochung gleichzeitig oder zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchzuführen, wie Abbildung 99 zeigt.

Die Kochung kann nicht nur atmosphärisch oder überbarometrisch erfolgen, sondern wird auch unterbarometrisch durchgeführt [187]. Andere Systeme führen keine aktive Kochung, sondern nur ein Heißhalten bei verschiedenen Temperaturen durch. Zum Zeitpunkt Kochende kann eine Temperaturabsenkung erfolgen, welche als Vorkühlung bezeichnet wird, da sie vor der klassischen Würzekühlung stattfindet. Nach dem Whirlpool können verschiedene

Verdampfungssysteme eingesetzt werden. Diesen Verfahrensschritt nennt man Stripping oder Nachverdampfung, da er nach der klassischen Verdampfung beim Kochen stattfindet.

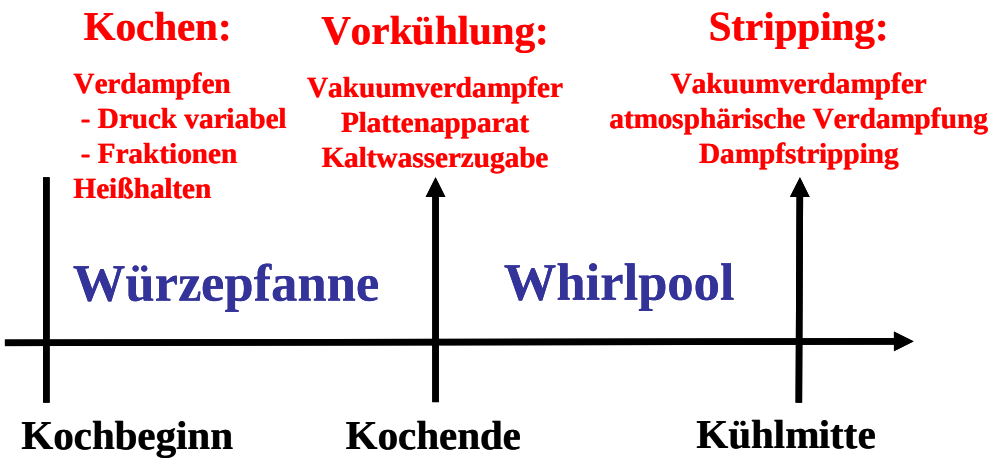


Abbildung 99: Verfahrensschritte einer moderner Würzekochung

Die neuen Kochsysteme erlauben eine optimierte Anwendung der Prozessschritte Verdampfung und Heißhaltung. Eine gute Ausdampfung und damit eine hohe Ausdampfeffizienz führen zu einer guten Würze- und Bierqualität, da die grundlegenden analytischen Eckwerte der Kochung, wie freies DMS, die Thiobarbitursäurezahl und der koagulierbare Stickstoff, ideal aufeinander abgestimmt werden können. Das gleiche gilt auch für die Heißhaltezeiten und -temperaturen. Insgesamt kann die Gesamtverdampfung reduziert werden, so dass der Wärme- und Zeitbedarf für den Kochvorgang reduziert wird.

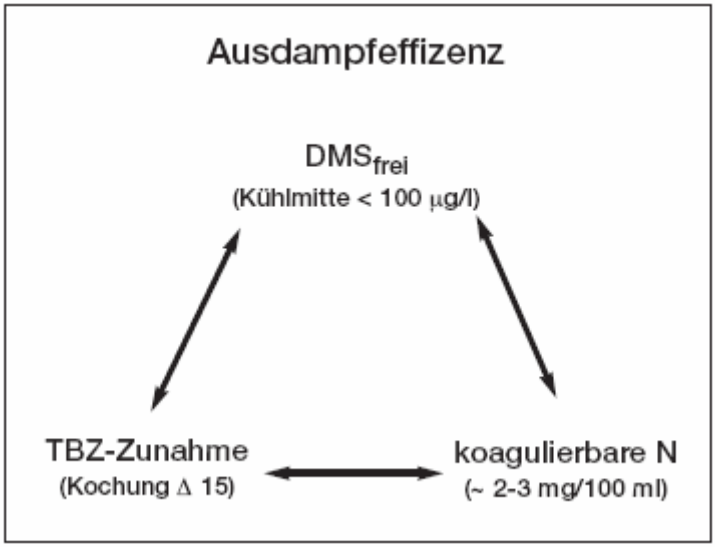


Abbildung 100: Analytische Eckwerte der Würzekochung

In Tabelle 17 werden die Eckwerte für freies Dimethylsulfid, die Thiobarbitursäurezahl und den koagulierbaren Stickstoff für helle Bierwürzen angegeben. Darüber hinaus spielen natürlich für die Geschmacksprofile der Biere weitere Kriterien eine Rolle. Beispielsweise resultieren bei geringer Kochtemperatur oder bei geringer Gesamtverdampfung oft charaktervollere und reichhaltigere Biere.

Tabelle 17: Eckwerte der Würzekochung [200]

	Thiobarbitursäurezahl	Dimethylsulfid [µg/l]	noch koagulierbarer Stickstoff bez. 12 GG-% [mg/l]
Ausschlagwürze	< 45	< 100	15-25
Whirlpoolwürze (Auslauf bei Kühlmitte)	< 60	< 100 (freies DMS)	---

Im Verlauf der Kochung koagulieren Eiweißstoffe in zwei Stufen. Während der ersten Stufe denaturieren die Proteine, in der zweiten Stufe findet die eigentliche Koagulation statt. Die Eiweißkoagulation wird verstärkt durch höhere Kochtemperaturen, stärkere Konvektion und Homogenität der Würze sowie durch längere Kochzeiten und tiefere pH-Werte in der Würze. Die Konzentration an noch koagulierbarem Stickstoff in der Kühlmittewürze hat Auswirkung auf die Schaumstabilität, die kolloidale Stabilität, den Geschmack und die Vollmundigkeit. Die Richtwerte für die Konzentration an noch koagulierbarem Stickstoff nach MEBAK liegen im Bereich von 15-25 mg/l. In der Praxis zeigte sich immer wieder, dass Gehalte bis 30 mg/l kein Problem darstellen, sondern von Vorteil für den Geschmack und auch für den Schaum des Bieres sind.

Die Thiobarbitursäurezahl ist eine dimensionslose Kennzahl und gibt Auskunft über die thermische Belastung der Würze. Es werden hierbei Maillardprodukte erfasst, die während der Kochung aus Aminosäuren und reduzierenden Zuckern entstehen. Bei Sudhausabnahmen dienen häufig Werte aus den Richtlinien für die Sudwerkskontrolle nach MEBAK [200] als Grundlage. Diese besagen, dass der Wert für Kühlmittewürzen < 60 sein soll. Eine geringe thermische Belastung äußert sich positiv hinsichtlich der Geschmacksstabilität der Biere, da weniger alterungsrelevante Carbonylverbindungen (Streckeraldehyde) gebildet werden [10]. Diese Werte gelten nicht für dunkle Würzen, da hier wegen des völlig anderen Geschmacksprofils Maillardprodukte und Streckeraldehyde für das Bieraroma sogar erwünscht sind. Außerdem ist zu beachten, dass die TBZ sehr stark durch das verwendete Malz bestimmt wird. Beim Abdarrprozess wird das TBZ-Niveau eingestellt. Somit darf nur die TBZ-Zunahme im Sudhaus bzw. in der Würze betrachtet werden, wenn man Kochsysteme vergleichen will. Diese ist systemtypisch und wird nicht durch das Absolutniveau der TBZ in der Pfanne-voll-Würze vor der Kochung beeinflusst.

Mezger [187] konnte zeigen, dass die Aminosäure L-Glutamin eine Konzentrationsabnahme in Abhängigkeit der Kochtemperatur und Kochdauer, also in Abhängigkeit der thermischen Belastung zeigte. Gleiches wurde bereits bei Untersuchungen zur Kurzzeiterhitzung von Bier gefunden [156]. Um vergleichbare Werte zu erhalten und eine Aufkonzentrierung durch die Verdampfung auszugleichen, müssen die gemessenen Konzentrationen auf einen gemeinsamen Stammwürzewert bezogen werden.

Aus Abbildung 101 ist ersichtlich, dass die Thiobarbitursäurezahl (TBZ) mit dem Gehalt an L-Glutamin korreliert und somit als ein weiterer thermischer Indikator neben der TBZ angesehen werden kann.

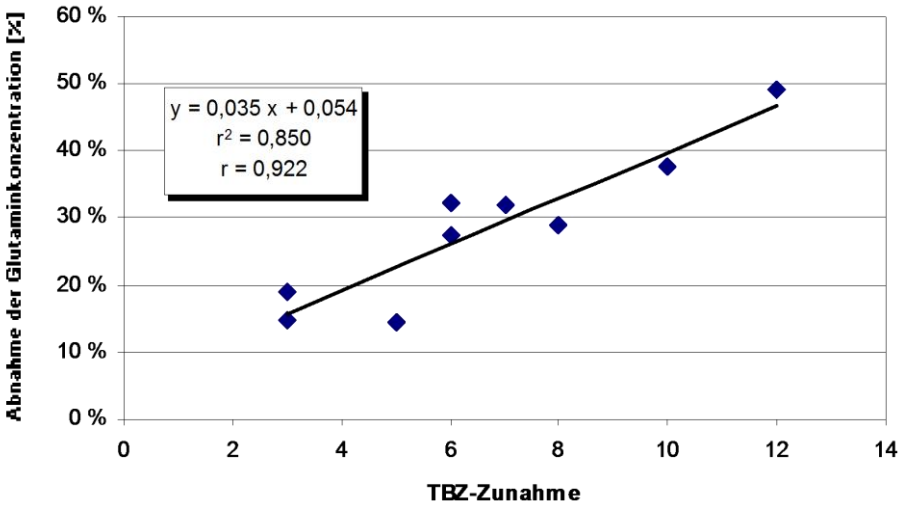


Abbildung 101: Zusammenhang zwischen der Zunahme der TBZ und der Abnahme von L-Glutamin bei der Würzekochung

Bisher war bekannt, dass die TBZ mit dem Maillard-Produkt Furfural korreliert. Den typischen Verlauf der Furfuralkonzentration in Würze von Pfanne-voll bis Kühlmitte zeigt Abbildung 102. Die Versuchsbedingungen dieser Untersuchungen im Praxismaßstab sind in Tabelle 18 beschrieben. Es zeigt sich, dass die Furfuralkonzentration während der Kochung linear zunimmt. Während der Heißhaltezeit der Würze im Whirlpool steigt die Konzentration weiter. Der starke Anstieg von Kochende bis Kühlmitte (Säulengraphik) ist durch die Zeitachse bedingt, welche nicht linear ist.

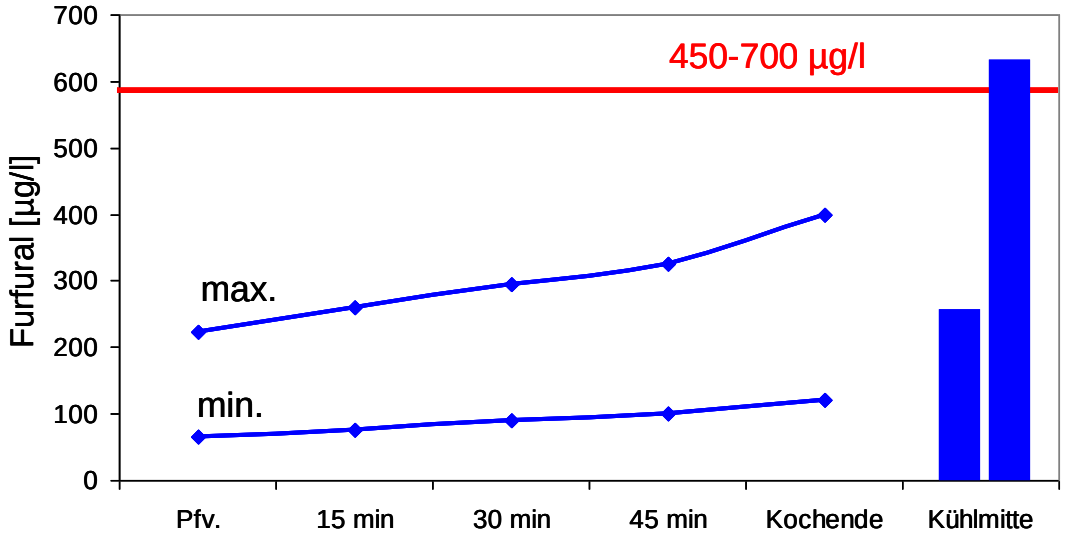


Abbildung 102: Verlauf von Furfural bei der Würzekochung

Am Beispiel des Dimethylsulfid soll erläutert werden, welche Vorzüge bei der Anwendung moderner Kochverfahren erzielt werden können.

Das S-Methyl-Methionin (SMM) bzw. der Dimethylsulfid-Precursor (DMS-P), die Vorläufersubstanz des freien Dimethylsulfid (DMS_{frei}), wird im Verlauf der Würzekochung in freies DMS umgewandelt und sollte, um eine geschmackliche Beeinträchtigung des Bieres zu vermeiden, auf Konzentrationen < 100 µg/l [4] ausgedampft werden. Verkostungen ergeben immer wieder, dass auch Konzentrationen an freiem DMS von bis zu 150 µg/l in der Würze, abhängig vom Biertyp und der Geschmacksmatrix des Bieres, keinen gemüseartigen Fehlgeschmack ergeben müssen. Grundsätzlich gilt, dass mit steigender Konzentration an Geruchs- und Geschmackstoffen im Bier auch die Schwellenwerte für die sensorische Erkennung von Substanzen steigen. So gelten meist bei Bieren, welche mit Rohfrucht gebraut wurden, geringere Schwellenwerte für das freie DMS als bei Allmalzbieren, die nach dem Reinheitsgebot gebraut wurden. Ebenso wird bei Weißbieren ein höherer Diacetylgehalt toleriert als bei untergärigen Bieren, da Weißbiere ein üppigeres Aromaprofil aufweisen. Durch die maskierenden Effekte der Geschmacks- und Aromakomponenten können Fehlaromen, wie z. B. DMS_{frei} oder Diacetyl, schwerer erkannt werden.

Wenn zu Kochende in der Ausschlagwürze der Gehalt an freiem DMS unter 100 µg/l reduziert wurde, dann kann immer noch ein Fehlaroma im Bier auftreten. Während der Heißtrubabtrennung im Whirlpool erfolgt weiterhin eine thermische Umwandlung des SMM in freies DMS, welches jedoch bei diesem Prozessschritt nicht ausgedampft werden kann. Als Konsequenz wurde in der Vergangenheit darauf geachtet, dass die Summe aus freiem DMS und DMS-Precursor nicht über 120 µ/l in der Ausschlagwürze lag. Besonders hohe Werte an DMS-P im Malz führen zu sehr langen Kochzeiten und dementsprechend wirtschaftlichen und qualitativen Nachteilen. Als Folge wurden Stripping-Systeme entwickelt, welche eine Nachverdampfung nach der Heißtrubabtrennung durchführen und eine endgültige Reduzierung auf Konzentrationen unter den Geschmacksschwellenwert in der kalten Anstellwürze erzielen. Alternativ kann über eine Würzevorkühlung vor dem Whirlpool die thermische Belastung reduziert werden, wie später noch beschrieben wird.

In Abbildung 103 ist der Konzentrationsverlauf des DMS-P und des freien DMS von der Pfanne-voll-Würze bis zur Anstellwürze vor dem Kühler dargestellt. Grundlage der Daten sind Kochversuche im Industriemaßstab, welche über eine Vielzahl von Diplomarbeiten ermittelt wurden. Nähere Beschreibungen sind in Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: Beschreibung der untersuchten Kochsysteme im Industriemaßstab

Kochsysteme	3 Innenkocher / 5 Außenkocher Würze- und Whirlpoolpfannen
Kochzeit	50 - 73 min
Heizmitteltemperatur	101 - 109 °C mit/ohne Brüdenverdichter
Gesamtverdampfung	2,6 - 8,5 %
Ausschlagwürzemenge	100 - 700 hl
Biersorte	vorwiegend helle untergärige Vollbier

Trotz sehr unterschiedlicher Anlagen und Versuchsparameter liegen die Maximal- und Minimalwerte kaum auseinander. Die Verläufe sind ähnlich.

Es ist erkennbar, dass der Gehalt an DMS-P über die Kochzeit sowie auch über die Whirlpoolstandzeit abnimmt. Das freie DMS der Pfanne-voll-Würze wird innerhalb der ersten 20-30 min Kochzeit weitgehend ausgedampft. Dies verwundert nicht, da freies DMS einen

Siedepunkt von 37 °C hat. Nach 30 min stellt sich ein Gleichgewicht zwischen der Neubildung aus dem Zerfall des DMS-Precursors und der Ausdampfung ein. Die Analyse des DMS_{frei} während der Kochung könnte auf einen stabilen Zustand schließen lassen. Nach dem Transfer in den Whirlpool kann die Konzentration des DMS_{frei} die kritische Geschmacksschwelle in der Anstellwürze jedoch überschreiten, sofern die Whirlpoolstandzeit zu lange oder der Wert des DMS-P nach der Kochung zu hoch war. Die Bandbreite der Minimal- und Maximalkurven gibt uns ein Bild, in welchen Bereichen die Brauereien in der Praxis liegen. Will eine Brauerei die Kochzeit verkürzen, so verschärft sich wieder das Problem eines zu hohen Gehaltes an DMS_{frei} im Bier. Durch eine Nachverdampfung nach dem Whirlpool bzw. vor der Würzekühlung kann das Problem gelöst und DMS_{frei} ausgetrieben werden.

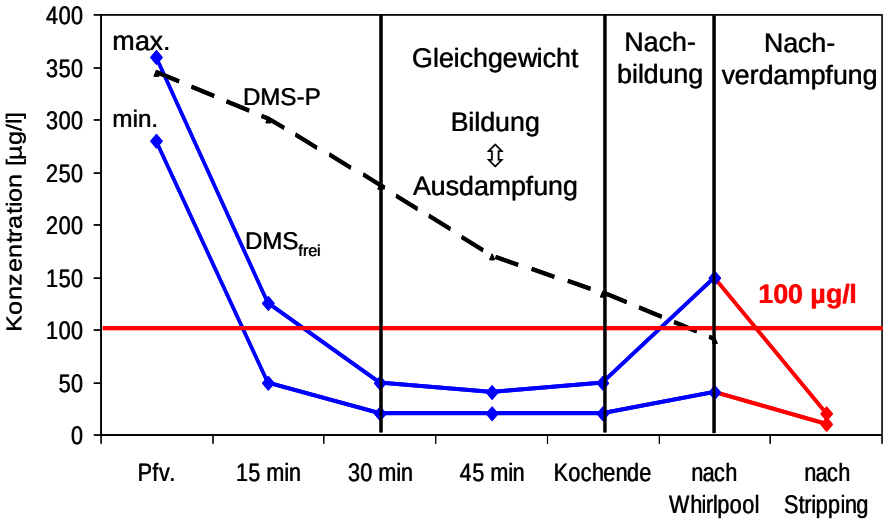


Abbildung 103: Verlauf von freiem DMS und DMS-Precursor bei der Würzekochung mit Nachverdampfung

Bei den Aromastoffen der Würze kann man zwei Hauptgruppen unterscheiden. Ebenso wie das DMS_{frei} verhalten sich die Streckeraldehyde aus der Maillard-Reaktion. Sie werden hauptsächlich beim Darrprozess während der Mälzung gebildet. Je höher der Malzlösungsgrad ist, umso mehr Edukte stehen für die Maillard-Reaktion zur Verfügung. Ein hoher Weichgrad beim Keimen oder eine intensive Schwelke mit Umluft führen zu einer stärkeren Proteolyse. Eine hohe Ausstattung der Würze mit Aminosäuren ist einerseits positiv für die Hefeversorgung, aber verschlechtert die Geschmacksstabilität bei hellen Bieren. Hohe Konzentrationen an Maillard-Produkten sind in hellen Lagerbieren nicht erwünscht, weshalb auf eine gute Ausdampfung geachtet werden sollte.

Abbildung 104 zeigt am Beispiel des 2-methyl-Butanals, das aus der Aminosäure Isoleucin entsteht, den Konzentrationsverlauf bei der Würzebereitung.

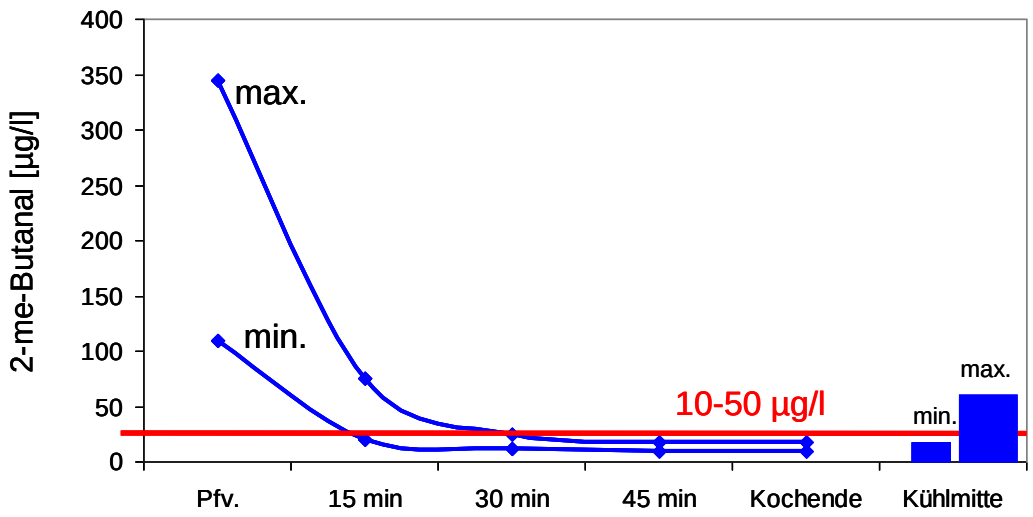


Abbildung 104: Verlauf von 2-methyl-Butanal bei der Würzekochung

40-100 % des im Malz vorhandenen 2-methyl-Butanals werden in der Läuterwürze wiedergefunden. Bei der Kochung erfolgt eine Ausdampfung auf Konzentrationen von 10-50 µg/l. Durch den Anstieg zwischen Kochende und Kühlmitte ist erkennbar, dass eine Nachbildung im Whirlpool stattfindet. Bei der Gärung werden die Streckeraldehyde durch die Hefe zu ihren korrespondierenden Alkoholen reduziert, wodurch sich ihr Aromabeitrag ändert. Während in den Brüden noch das malzige Aroma der Streckeraldehyde geruchlich wahrnehmbar ist, so tragen die korrespondierenden Alkohole positiv zum Bieraroma bei.

Dies deckt sich mit Verkostungsergebnissen aus Versuchen mit neuen Kochsystemen. Es hat sich gezeigt, dass Biere, welche mit einer vergleichsweise geringeren Kochtemperatur oder mit einer geringeren Gesamtverdampfung hergestellt wurden, oft ein reichhaltigeres Geschmacksprofil aufweisen. Bei den später dargestellten Versuchen zur Nachverdampfung wird an Hand von Spider-Plots dieser Effekt näher beschrieben.

Unter den Streckeraldehyden gibt es auch Aromastoffe wie das 2-Phenylacetaldehyd bzw. 2-Phenylethanal, welche schwerer flüchtig sind als das 2-methyl-Butanal. Phenylethanal wird aus der Aminosäure Phenylalanin gebildet und hat einen Siedepunkt von 195 °C. Bei höheren Konzentrationen in Würze wurde ein „malziger“ Geschmack im Bier festgestellt. Dies zeigt, dass Streckeraldehyde in Würze ein Indikator für den Biergeschmack sein können. Phenylethanal wird als Referenzsubstanz für einen „honigartigen“ Geschmack verwendet.

Ist eine möglichst hohe Ausdampfung dieses Aromastoffes erwünscht, um den Biergeschmack möglichst „neutral“ zu halten, so muss auf das Kochsystem und die Kochparameter geachtet werden.

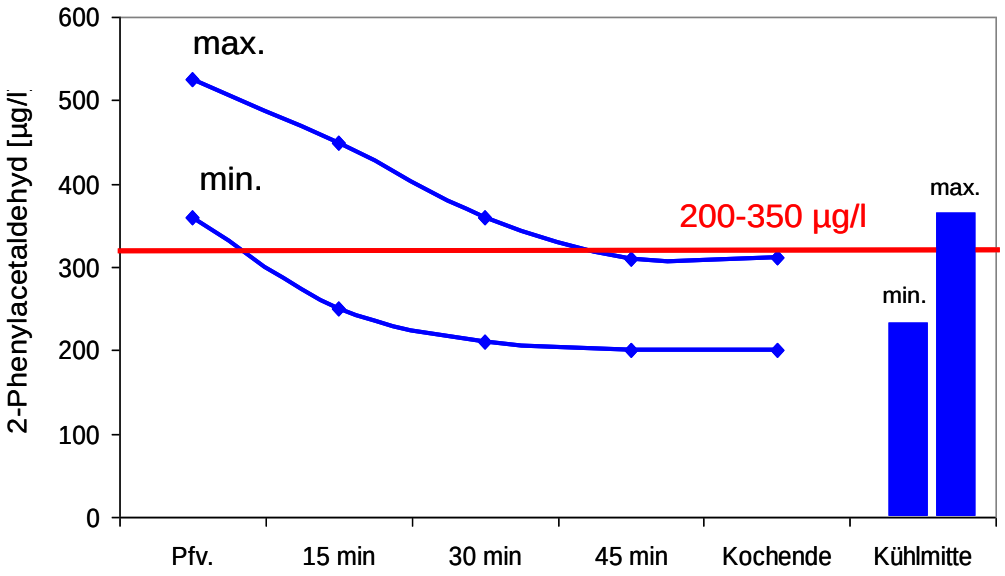


Abbildung 105: Verlauf von 2-Phenylacetaldehyd bei der Würzekochung

Für die Ausdampfung ebenfalls interessant ist die Gruppe der Lipidabbauprodukte (vgl. Kapitel 5.5, S. 88). Diese Aromastoffe werden bei der Würzekochung verdampft, aber nicht nachgebildet. *Narziss* und *Miedaner* haben deren Eignung als Ausdampfindikatoren erkannt und ihr Verhalten näher beschrieben [142, 181, 215, 260] Beispielhaft ist der Verlauf von Hexanal bei der Würzebereitung in Abbildung 106 dargestellt.

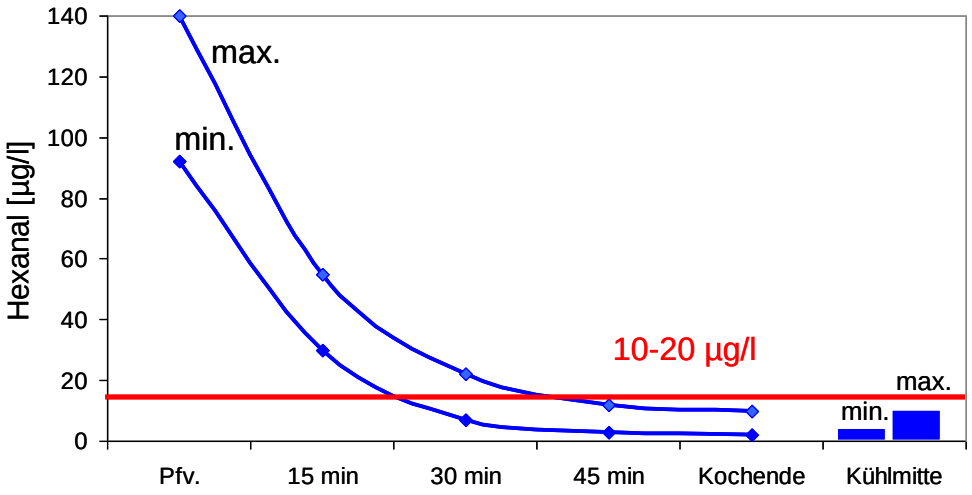


Abbildung 106: Verlauf von Hexanal während der Würzekochung

Hexanal ist ein Abbauprodukt der Linolsäure (C18:2) und hat einen Siedepunkt von 130 °C. Ähnlich wie bei den Streckeraldehyden erfolgt die stärkste Ausdampfung in den ersten 30 min der Kochung.

Hartmann [149] hat festgestellt, dass bei einer verringerten Würzetemperatur nach dem Außenkocher die Ausdampfeffizienz sinkt, wie Abbildung 107 zeigt. Bei einer Würzetemperatur von 103 °C verliefen die Kurven ähnlich, unabhängig ob die Kochzeit 50 oder 60 min betrug. Wurde die Heizmitteltemperatur gesenkt und die Würze nur auf 101 °C

erhitzt, so verlief die Ausdampfung langsamer. Eine Verlängerung der Kochzeit führte zu vergleichbaren Gesamtverdampfungen, konnte aber die Ausdampfung nur teilweise angleichen. Erst nach einer Vorkühlung mittels Nachverdampfung über einen Entspannungsverdampfer vor dem Whirlpool wurden die gleichen Hexanalkonzentrationen wie bei der Kochung mit 103 °C Würzetemperatur erreicht.

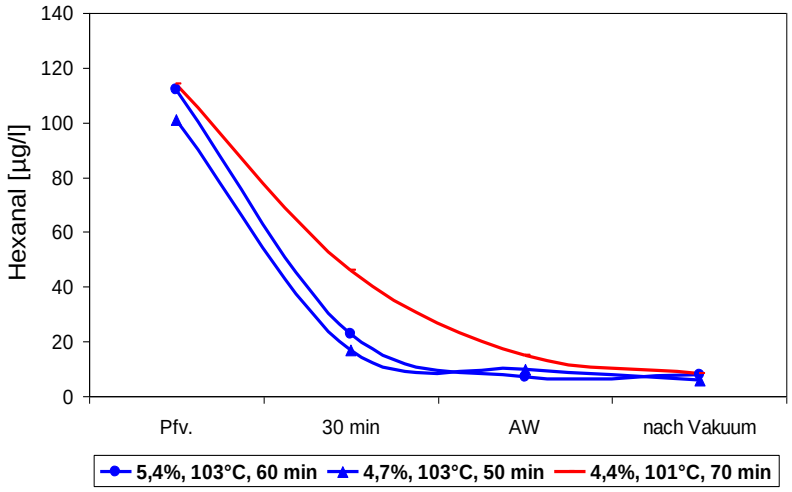


Abbildung 107: Verlauf von Hexanal bei einer Würzekochung mit unterschiedlicher Würzetemperatur am Außenkocher

Um sich ein Bild über den aktuellen Zustand der Kochung zu verschaffen, sollte eine Analyse der Würzearomastoffe bereits in der Pfanne-voll-Würze durchgeführt werden. Die Aromastoffkonzentrationen sind maßgeblich von der Malzmischung abhängig, wobei schon geringe Mengen an Spezialmalzen und Röstmalzbieren das Niveau beeinflussen können. Ähnlich wie bei einer Stufenkontrolle sollten die nachfolgenden Schritte verfolgt werden. Sinnvolle Probenahmestellen sind die Ausschlagwürze (Kochende), der Whirlpoolauslauf (Kühlmitte) sowie Probenahmen nach jedem Verfahrensschritt (wie z. B. Stripper). Über die relative Änderung der Konzentrationen zwischen den Prozessschritten können die einzelnen Schritte bewertet werden.

Besonders wenn der Wunsch besteht, die Kochzeit zu verkürzen, um Energie zu sparen, oder den Bierschaum zu verbessern, sollte der Ist-Zustand bekannt sein. Ausgehend vom *status quo* kann dann der Kochvorgang neu parametriert werden, oder man entscheidet sich für ein neues Kochsystem, indem neue Verfahrensschritte, wie z. B das Würzestripping, eingebaut werden, wie Abbildung 108 zeigt. Durch die Kochzeitverkürzung bleiben die Konzentrationen einiger Aromastoffe (z.B. DMS_{frei} oder Streckeraldehyde) in der Ausschlagwürze auf einem höhern Niveau und steigen noch weiter infolge der Nachbildung im Whirlpool. Durch eine Nachverdampfung vor dem Würzekühler werden die Aromastoffkonzentrationen auf den gewünschten Wert gesenkt. Die dafür in Frage kommenden Anlagen sind im nächsten Kapitel beschrieben. Einen ähnlichen Effekt kann man auch durch eine Würzevorkühlung erreichen.

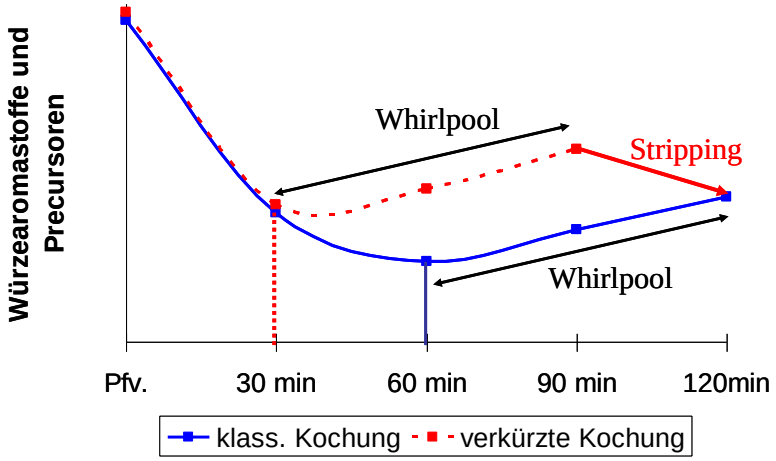


Abbildung 108: Veränderung des Aromaprofils bei verkürzter Würzekochung

Würzevorkühlung

Durch eine Würzevorkühlung wird die Würze vor der Heißtrubabtrennung von 98-99 °C auf Temperaturen kleiner 90 °C abgekühlt. Diese Abkühlung kann entweder durch einen Wärmetauscher (Abbildung 109) oder durch einen Vakuumverdampfer (Abbildung 126, S. 148) erreicht werden. Um Kosten für einen neuen Wärmeübertrager zu sparen, kann der vorhandene Würzekühler als Plattenwärmeübertrager für die Würzevorkühlung genutzt werden. Hierbei muss ein Teilstrom beim Ausschlagen von der Kochpfanne in den Whirlpool im Bypass über den Würzekühler gefahren werden. Dieser muss hinsichtlich Leistung und Temperatur nicht neu parametriert werden, wodurch der Programmieraufwand verringert wird. Die Bypassmenge bzw. Bypasszeit muss auf die erwünschte Mischtemperatur im Whirlpool eingestellt werden. Der Aufwand für Verrohrung und Ventile bleibt bestehen. Rückmeldungen aus der Praxis haben gezeigt, dass sich das Trubabsetzverhalten imWhirlpool nicht negativ verändert. Die Unterkühlung auf ca. 10 °C im Bypass und die Erwärmung auf ca. 90 °C Whirlpooltemperatur hatten keinen Einfluss auf die Trübungswerte nach dem Whirlpool.

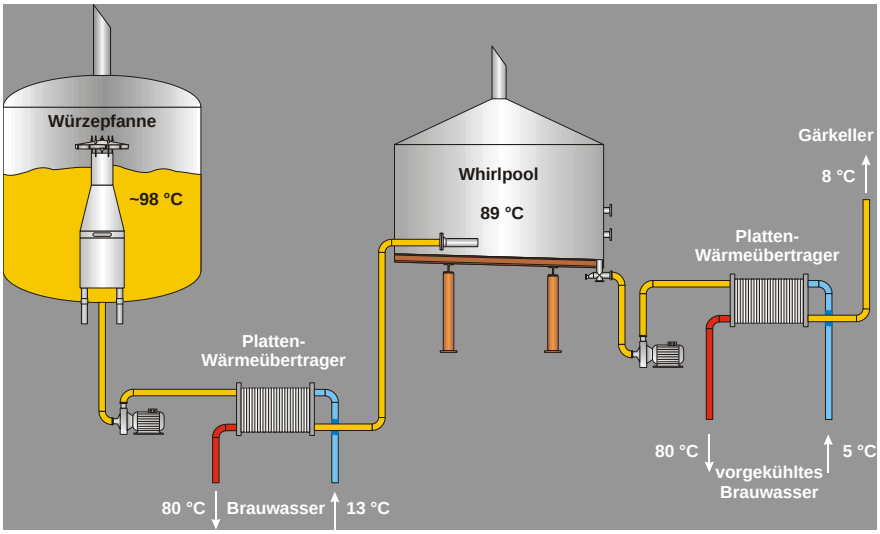


Abbildung 109: Würzevorkühlung durch einen Wärmeübertrager [119]

Durch die Würzevorkühlung wird die thermische Belastung der Würze geringer, wie Abbildung 110 zeigt. Dies hat einen positiven Einfluss auf die Geschmacksstabilität und führt zu einer geringeren Nachbildung von freiem DMS im Whirlpool, wie aus Abbildung 111 ersichtlich ist. Somit wurde das Ziel erreicht, durch eine Herabsetzung der Reaktionstemperatur im Whirlpool die Maillard-Reaktion sowie den thermischen Zerfall des DMS-Precursors zu reduzieren.

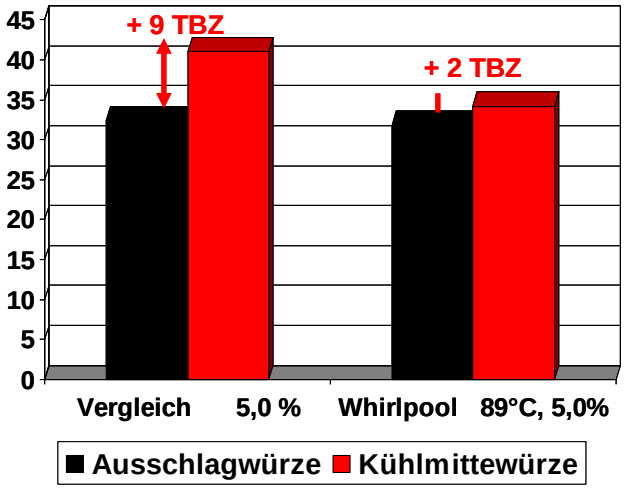


Abbildung 110: Thiobarbitursäurezahl (TBZ) von Würzen mit und ohne Würzevorkühlung vor dem Whirlpool auf 89 °C, Gesamtverdampfung jeweils 5,0 %

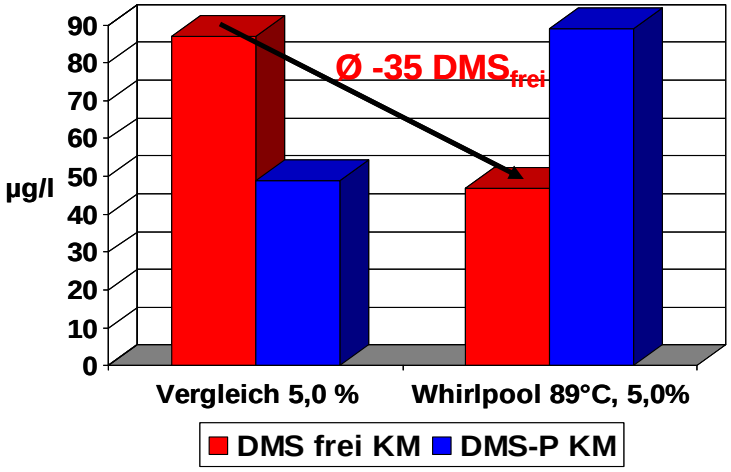


Abbildung 111: Dimethylsulfid (DMS) und Dimethylsulfid-Precursor (DMS-P) von Würzen mit und ohne Würzevorkühlung vor dem Whirlpool auf 89 °C, Gesamtverdampfung jeweils 5,0 %

Die Würzevorkühlung kann besonders bei hopfenbetonten Pilsbieren zur Erhöhung der Geschmacksstabilität eingesetzt werden. *Kaltner* [122] und *Herrmann* konnten zeigen, dass der Aromatransfer erhöht wurde und somit die „Hopfenblume“ eines Bieres länger erhalten blieb. Das persistente Hopfenaroma hatte einen maskierenden Effekt, so dass der über die Alterung zunehmende Oxidationsgeschmack erst später wahrnehmbar wurde.

Alternativ zum Wärmeübertrager kann durch eine Verdampfung im Vakuum die Würzetemperatur vor dem Whirlpool gesenkt werden. Bei der Vakuumverdampfung nach dem System „Varioboil“ (siehe Abbildung 126, S. 148) wird die Würze solange durch den

Entspannungsverdampfer im Kreislauf geleitet, bis sich die gewünschte Temperatur durch den entsprechend eingestellten Unterdruck im Vakuumverdampfer eingestellt hat. Dieser Prozessschritt unterscheidet sich von der Kochung nur dadurch, dass das Dampfventil für den Außenkocher geschlossen und ein Vakuum im Entspannungsgefäß aufrechterhalten wird.

Nachverdampfung bzw. Stripping

Die Nachverdampfung erfolgt nach der Heißtrubabtrennung direkt vor dem Würzekühler und kann auf mehrere Arten erfolgen. Es kann unter atmosphärischen Bedingungen eine Nachkochung durchgeführt werden. Hierfür werden Dünnschichtverdampfer oder mit Dampf beschickte Strippingkolonnen benutzt. Eine Nachverdampfung im Vakuum wird mittels Enspannungsverdampfern durchgeführt.

Der grundsätzliche Vorteil einer Nachverdampfung ergibt sich durch eine nach der Kochung und Heißtrubabtrennung stattfindende Ausdampfung unerwünschter und bis dahin gebildeter Würzearomastoffe, die im fertigen Bier zu einer negativen Geschmacksbeeinträchtigung führen können.

Entwicklung der dynamische Niederdruckkochung

Möchte man die Gesamtverdampfung senken, um Energiekosten zu sparen, kann auf die Installation zusätzlicher Anlagen verzichtet werden. Es wurde alternativ nach einer Möglichkeit gesucht, durch geschickte Parametrierung einer Sudanlage den Kochprozess derart zu optimieren, dass trotz sinkender Gesamtverdampfung die Qualitätswerte der Würze auf gleich hohem Niveau bleiben. Erste Arbeiten wurden im Rahmen von Diplomarbeiten von *Kurz* in einer Brauerei durchgeführt. *Spohr* hat in einer weiteren Brauerei mit 530 hl Ausschlagwürze pro Sud eine atmosphärische Kochung mit einer klassischen und dynamischen Niederdruckkochung verglichen, wobei genau in dieser Reihenfolge die Gesamtverdampfungen geringer wurden. Die dynamische Niederdruckkochung ist eine Weiterentwicklung der klassischen Niederdruckkochung. Voraussetzung für jede Druckkochung ist, dass die Kochpfanne auf Überdruck ausgelegt ist und alle nötigen Sicherheitsventile vorhanden sind. Insgesamt wurden ca. 25.000 hl Bier nach den verschiedenen Kochverfahren hergestellt und ohne Reklamation vertrieben. In Anlehnung an Abbildung 100 und Tabelle 17 werden die Analysen des koagulierbaren Stickstoffes, der TBZ und des freien Dimethylsulfids betrachtet.

Hinsichtlich des noch koagulierbaren Stickstoffes ergaben sich keine signifikanten Unterschiede bei den verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen wie Abbildung 112 zeigt. Ein weiterer Grund für mangelnde Signifikanz sind die großen Konfidenzintervalle dieser Analyse.

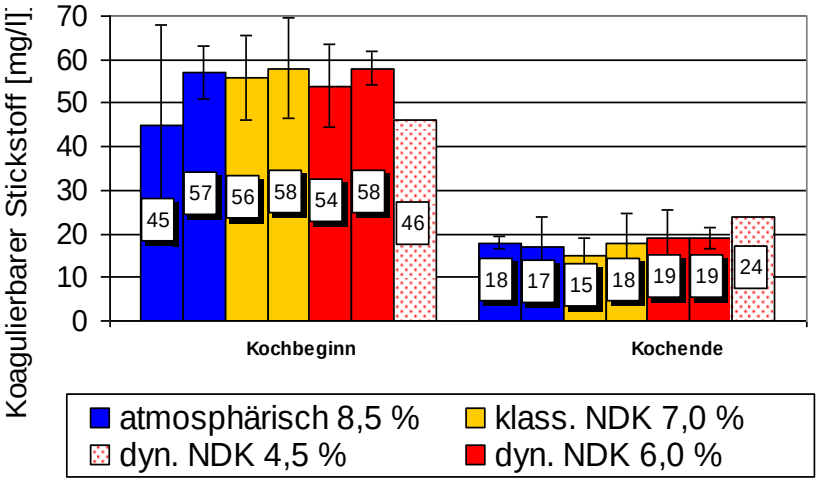


Abbildung 112: Noch koagulierbarer Stickstoff in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 3)

Die Thiobarbitursäurezahl in der Ausschlagwürze erhöhte sich bei Anwendung von Druck signifikant, wie aus den Konfidenzintervallen in Abbildung 113 zu erkennen ist. Bei Betrachtung der Absolutwerte ist festzuhalten, dass vergleichbare thermische Belastungen vorhanden waren. Die kürzere Kochzeit hatte den Einfluss der höheren Temperatur bei der Druckkochung kompensiert.

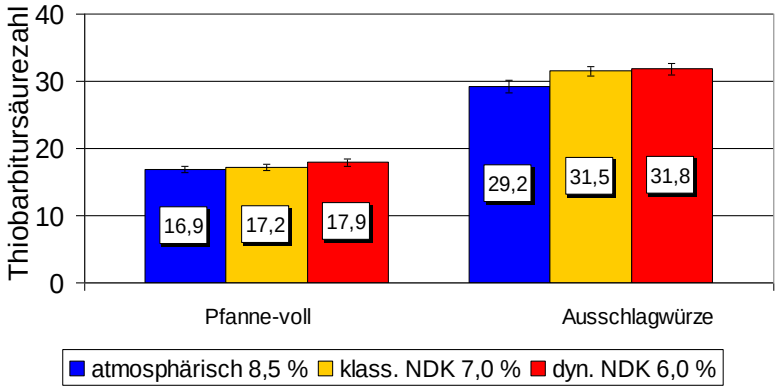


Abbildung 113: Thiobarbitursäurezahl in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 12)

Hinsichtlich der Spaltung des DMS-Precursors hat sich die Druckkochung erwartungsgemäß positiv ausgewirkt, wie Abbildung 114 zeigt. Die höchsten Werte in der Kühlmittewürze, also nachdem eine weitere Konzentrationssteigerung im Whirlpool stattgefunden hatte, wurden bei der atmosphärischen Kochung gefunden. Signifikante Unterschiede waren nicht zu beobachten.

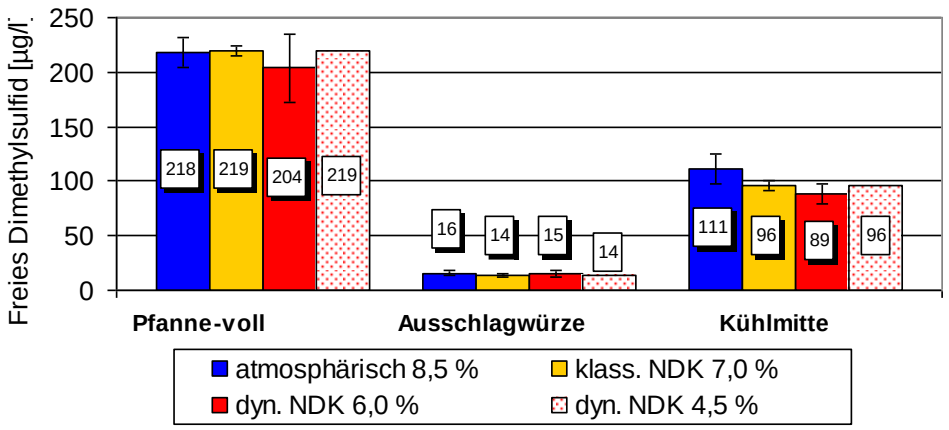


Abbildung 114: Freies Dimethylsulfid in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 4)

Insgesamt kann festgestellt werden, dass die Gesamtverdampfung von 8,5 auf 4,5 % gesenkt werden kann, wenn moderne Kochverfahren eingesetzt werden. Die in den letzten Jahren entwickelten Würzekochsysteme ermöglichen eine deutlich höhere Flexibilität bei der Kochparametrierung. Dadurch kann einfacher eine gewünschte Würzezusammensetzung erreicht werden. Außerdem ist es damit möglich, gezielter auf Qualitätsschwankungen bei den Rohstoffen zu reagieren.

Gesamtverdampfungen von momentan 4-5 % sind üblich und machbar. Die Sudhaushersteller gehen hier unterschiedliche Wege bezüglich der Anteile der Verdampfung durch Nachverdampfung an der Gesamtverdampfung. Einige verzichtet komplett auf eine Nachverdampfung, wohingegen andere nahezu die komplette Verdampfung im Vakuum durchführen. Nachdem die grundsätzlichen Verfahrensweisen im Rahmen der Würzekochung und -behandlung systematisch diskutiert wurden, sollen im nächsten Kapitel die einzelnen Anlagen zur Würzekochung näher beschrieben werden.

7.2 Entwicklung und Evaluierung moderner Kochsysteme

Tabelle 19 gibt einen kurzen Überblick über die grundsätzlichen Verfahrensparameter von Kochsystemen ab dem Zeitpunkt Pfanne-voll bis zum Beginn der Würzekühlung.

Tabelle 19: Verfahrensparameter von Würzekochverfahren

	Kochen		Nachver-dampfen vor Heißtrub-abscheidung	Nachver-dampfen nach Heißtrub-abscheidung
	Kochdauer	Kochtemp.		
Innenkocher, Außenkocher	beliebig	atmosph.	--	--
Ecotherm Stromboli	70 min 60 min	atmosph. atmosph.	-- --	-- --
Dynamische Niederdruckkochung	40-60 min	100 °C-103 °C	--	--
Hochtemperatur-würzekochung	bei Tmax, 2-3 min	128-135 °C	X	--
Vakuumverdampfung	40-50 min + Vakuum	atmosph.	--	X
Schonkochverfahren	40-60 min heißhalten	97 °C-99 °C	--	X
Varioboil	40 min + Vakuum	atmosph.	X	--
Wort stripping	ca. 40 min + Stripping	atmosph.	--	X
Merlin®	35-40 min + Stripping	atmosph.	--	X
Mikrowellenkochung	beliebig	atmosph.	--	--
Fraktionierte Kochung	beliebig	beliebig	--	--

Aus Tabelle 19 geht hervor, dass bei vielen modernen Systemen nach der Heißtrubabtrennung gestrippt wird. Dadurch kann das im Whirlpool nachgebildete freie DMS auf einen gewünschten Restgehalt reduziert werden.

Im Folgenden werden gängige Würzekochsysteme und Neuentwicklungen der letzten 7 Jahre vorgestellt. Ein Vergleich der üblichen analytischen Parameter bei den verschiedenen Systemen ist wenig sinnvoll, da mit jedem der genannten Kochsysteme nach neuesten Erkenntnissen gute Würzen hergestellt sowie die Richtlinien für die Sudwerkskontrolle nach MEBAK [200] eingehalten werden können. Diese Richtlinien, wie z. B. die DIN 8777 [53], dienen meist als Grundlagen für Garantievereinbarungen bei Sudhausabnahmen. Außerdem ist der Einfluss des Kochsystems auf den Biergeschmack schwer zu bewerten, da die Malzschüttung, die Abfüllung und besonders die Hefe maßgeblich zum Charakter eines Bieres beitragen. Es muss bei der Bewertung des Geschmackes bedacht werden, dass eine gezielt ablaufende Kochung eine notwendige Vorraussetzung, aber keine Garantie für ein gutes Bier darstellt. Wenn beispielsweise die Gärung nicht optimal verläuft, können die Anstrengungen im Sudhaus zunichte gemacht werden und ein gut funktionierendes Kochsystem wird zu Unrecht schlecht bewertet.

7.2.1 Innenkocher

Mitte bis Ende der siebziger Jahre wurden erstmals Innenkocher eingesetzt. Diese Kocher sind meist als senkrecht stehende Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt und funktionieren nach dem Naturumlauf-Prinzip. Das heißt, die Würze wird in den Rohrbündeln mit Dampf oder Heißwasser aufgeheizt. Zwischen Kochereinlauf und Kocherauslauf tritt eine Temperaturdifferenz auf, wie auch eine Verdampfung durch Blasenbildung in den Rohren. Aus dem resultierenden Temperatur- und Dichteunterschied ergibt sich ein Auftrieb, welcher den Naturumlauf gewährleistet. Ein Problem beim Innenkocher ist das beim Aufheizen auftretende Pulsieren. Durch die Überhitzung in den Kocherrohren wird die Würze thermisch geschädigt. Die Folge sind ein geringerer Bierschaum und eine schlechtere Geschmacksstabilität. Dieser Nachteil kann durch den Einsatz einer Umwälzpumpe reduziert oder sogar behoben werden [168]. Je kleiner die Temperaturdifferenz zwischen Innenkocherauslauf und Umgebungswürze beziehungsweise Kochereinlauf ist, desto geringer ist die Neigung zum Pulsieren des Innenkochers.

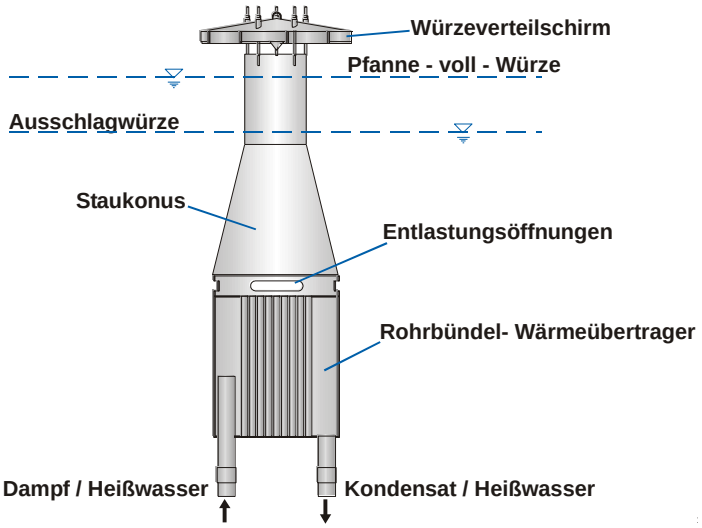


Abbildung 115: Prinzipieller Aufbau eines Innenkochers [119]

Zwangsangeströmter Innenkocher „Ecotherm“

Durch eine Anströmung des Innenkochers kann die Heizmitteltemperatur deutlich verringert und in Verbindung mit einer Variation der Pumpenleistung flexibel gestaltet werden. Besonders günstig ist die Auswirkung der Pumpe beim Aufheizen der Läuterwürze zum Kochen: Sie verhindert das Pulsieren und Temperaturschichtungen werden vermieden, wodurch sich homogenere Würzen ergeben. Das Kochen wird zweckmäßig in die folgenden Phasen eingeteilt: ca 20 min mit 135 °C Heizmitteltemperatur, wobei die Pumpenleistung auf 3- bis 4-fache Umwälzung des gesamten Pfanneninhalts je Stunde zurückgenommen werden kann. Anschließend erfolgt eine Phase von 20 min mit 130 °C Heizmitteltemperatur, wobei hier die Energiezufuhr zur „Schonung“ des koagulierbaren Stickstoffs unterbrochen werden kann. Die letzte Phase von 20 - 30 min verläuft mit 133 - 135 °C Heizmitteltemperatur. Die Verdampfung kann im Vergleich zu einer Anlage ohne Zwangsanströmung von beispielsweise 8 % Gesamtverdampfung auf 6 % verringert werden. Die Verlegung der Heizflächen wird unter den geschilderten Bedingungen verlangsamt, sodass eine Reinigung des Kochers erst nach 20 - 40 Suden erforderlich ist [291, 292].

Optimierter Innenkocher „Stromboli®“

Das Innenkochersystem Stromboli® stellt eine Weiterentwicklung und Optimierung des Kochsystems Ecotherm dar, wie aus Abbildung 116 ersichtlich ist. Durch eine frequenzgeregelte Pumpe wird ein Zentralrohr im Innenkocher mit Würze zwangsdurchströmt, wobei oberhalb der Rohrbündel ein Unterdruck entsteht. Durch diesen Unterdruck entsteht an der mit „Strahlpumpe“ gekennzeichneten Stelle ein Sog. Dadurch wird ein Teilstrom der Würze in den Innenkocherrohren nach oben gefördert und zusammen mit der durch das Zentralrohr gepumpten Würze auf der Würzeoberfläche verteilt.

Durch die Zwangsanströmung wird ein Pulsieren der Würze während der Aufheizphase verhindert. Außerdem kann man auch bei bestehender Umwälzung durch Reduktion der Heizmitteltemperatur die thermische Belastung reduzieren und eine Schonung des noch koagulierbaren Stickstoffes erreichen. Die Zwangsanströmung und die vermehrt angebrachten Anstiche im Pfannenboden gewährleisten eine gute Durchmischung des Pfanneninhaltes über die Aufheizphase und die gesamte Kochzeit. So wird trotz geringer Gesamtverdampfungen eine ausreichende Ausdampfung der unerwünschten Aromastoffe erreicht und zusätzlich eine günstige Energiebilanz erzielt [319].

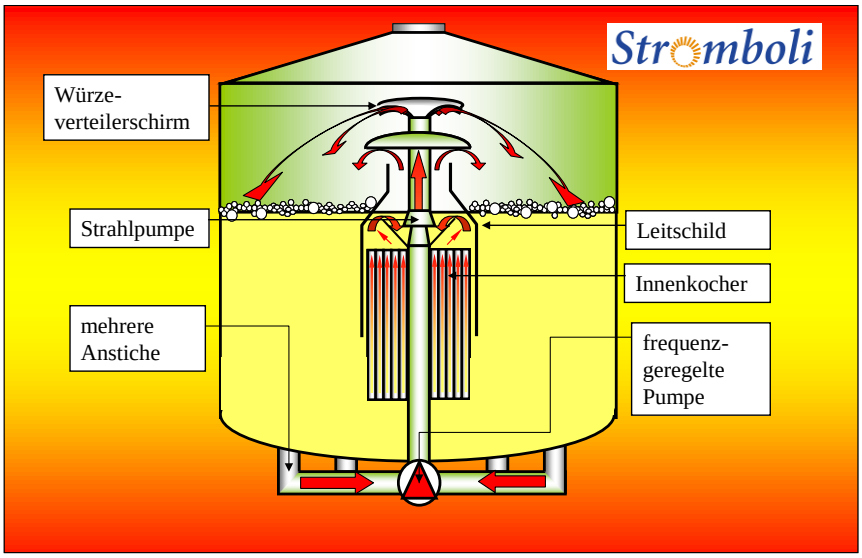


Abbildung 116: Kochsystem Stromboli [285]

Dynamische Niederdruckkochung

Die konventionelle Niederdruckkochung wird seit 1979 weltweit angeboten. Hierbei wird die Würze unter leichtem Überdruck gekocht, wodurch Kochtemperaturen von 102 ° - 105 °C erreicht werden. Eine Weiterentwicklung dieses Kochverfahrens stellt die dynamische Niederdruckkochung dar, bei der im Wechsel mehrmals ein Druckaufbau und Druckabbau stattfindet. Diese Systeme werden mit einem Innenkocher und einem Pfannendunstkondensator ausgeführt. Die Gesamtverdampfung kann hier auf Werte um 4,5 % (bezogen auf das Ausschlagwürzevolumen) und die Kochzeit auf 40 - 50 min reduziert werden [38, 100]. Eine effektive Aromastoffausdampfung wird hierbei durch mehrmalige Expansionsverdampfung erreicht, d. h. bei Druckentspannung zum Beispiel von 103 °C auf 101 °C ergibt sich eine heftige Siedebewegung, da sich schlagartig Dampfblasen im gesamten Würzevolumen bilden, vergleichbar mit dem Phänomen des Siedeverzuges. Die aufsteigenden Dampfblasen bewirken eine Homogenisierung der Würze und stellen mit ihren Phasengrenzflächen eine große reaktive Oberfläche dar. Der Druckabbau resultiert aus der Regelung des Kaltwasserstromes durch den Pfannendunst-Kondensator (PfaDuKo). Um ein

Überschäumen durch zu starke Dampfblasenbildung zu verhindern, sollte der Kaltwasserzulauf des PfaDuKo mit einem geeigneten Regelventil ausgerüstet sein. Für diese Art der Würzekochung, müssen die Würzepfannen auf einen Absolutdruck von 1,5 bar ausgelegt sein. Besonders die peripheren Anlagenteile, wie Ventile usw. erhöhen den Investitionsaufwand.

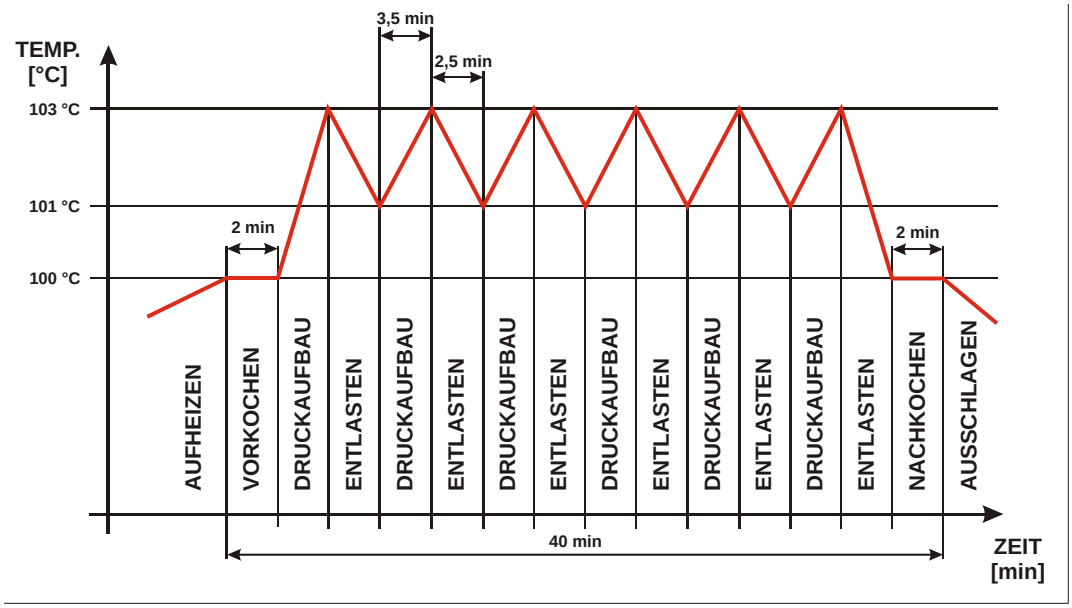


Abbildung 117: Dynamische Niederdruckkochung [119]

Kochversuche mit der Niederdruckkochung sind in Kapitel 7.1 vorgestellt.

7.2.2 Hochtemperaturwürzekochung (HTW)

Bei der Hochtemperaturwürzekochung (HTW) wird die Würze häufig durch drei Würzeerhitzer auf Temperaturen von 128 - 135 °C erhitzt. Anschließend findet in meist zwei Entspannungsstufen eine Absenkung der Würzetemperatur statt. Bei der HTW nutzt man druckstabile Entspannungsverdampfer. Vergleichbar in Bauart und Funktion, aber vakuumstabil sind die Entspannungsverdampfer der Würzevorkühlung (vgl. Abbildung 126) und Nachverdampfung (vgl. Abbildung 124 und Abbildung 119). Durch die Entspannung der Würze ergibt sich eine Wasser- und Aromastoffausdampfung. Bei der HTW wird die Energie der dabei anfallenden Schwaden zurückgewonnen und zur stufenweisen Würzeerhitzung genutzt.

Die Würze an den ersten zwei Würzeerhitzern wird über die bei der Entspannung anfallenden Brüden auf 87 °C bzw. 107 °C erhitzt. Das Aufheizen auf 130 °C erfolgt mit Primärenergie. Dieses Temperaturniveau wird für 2,5 - 3,0 min gehalten und anschließend in zwei Ausdampfgefäßen auf 117 °C und schließlich 100 °C durch Entspannung abgekühlt. Der Heißtrub kann in einem Whirlpool abgetrennt werden. Die Verdampfungsrate liegt hier bei 6 - 8 % [216]. Bei diesem Prozessablauf wird ein Großteil der Energie zurückgewonnen, sodass dieses Kochsystem zu den energiesparendsten Systemen gehört. Nach *Narziß* et al. [223, 260] ergaben sich bei 130 °C und einer Heißhaltezeit von 3 min die besten Biere, gefolgt von 140 °C für 2 min. Bei dunklen Bieren kann sich aufgrund der hohen Temperatur durch die vielfältig gebildeten Maillardprodukte eine unangenehme Kochnote ergeben. Anfangs hat sich im Betrieb frühzeitig im Laufe der Sudwoche Fouling an den Heizflächen der Erhitzerstufe 3

gebildet, wodurch sich eine ungleichmäßige thermische Belastung der Würze ergab. Dies konnte durch ein zweites, parallel geschaltetes Erhitzersystem, das eine Reinigung alle 3-6 Stunden – ohne Abstellen der Anlage – ermöglichte, behoben werden. Ein Zusatz von Wasserstoffperoxid zur Heißlauge erhöht den Reinigungseffekt bei der Kocherreinigung.

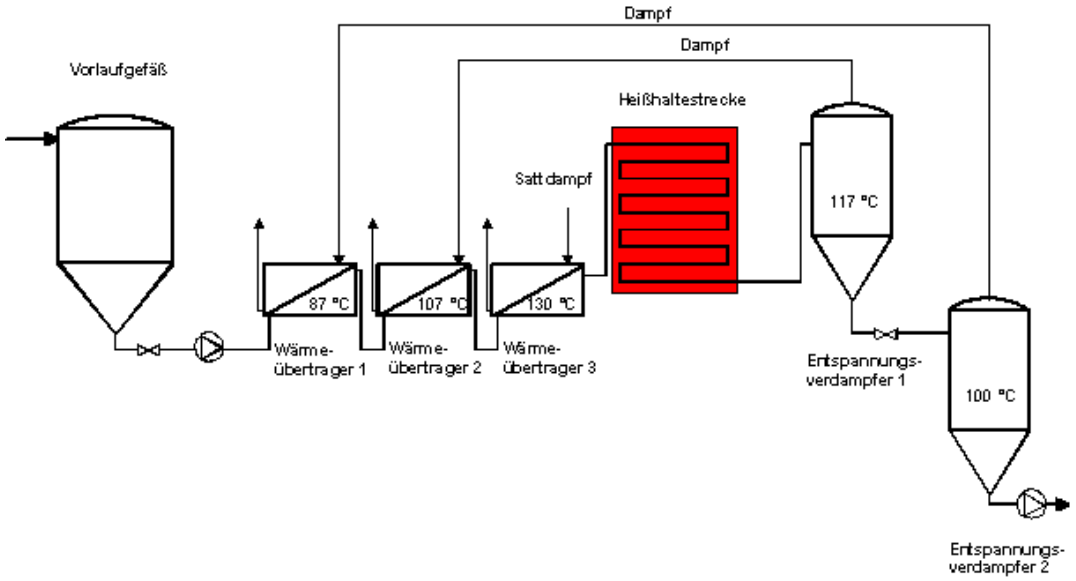


Abbildung 118: Aufbau einer Hochtemperatur-Würzekochung

7.2.3 Vakuumverdampfung

Die Verdampfung ist ein thermisches Trennverfahren, das zur Konzentrierung von Lösungen dient. Die Lösungen bestehen aus einem leichtflüchtigen Lösungsmittel und einem darin gelösten, schwerflüchtigen Stoff. Die Trennung einer Lösung durch Verdampfung beruht auf der Ungleichverteilung des Lösungsmittels und dem darin gelösten Stoff auf die Flüssig- und Gasphase bei eingestelltem thermodynamischem Gleichgewicht. Das thermodynamische Gleichgewicht zwischen dem reinen Lösungsmittel und seinem Dampf wird durch die Dampfdruckkurve wiedergegeben. Sättigungstemperatur bzw. Siedetemperatur T_S und Dampfdruck p_d eines Stoffes sind durch die Dampfdruckkurve verknüpft. Der Siedepunkt einer Lösung ist dabei druckabhängig und sinkt bei vermindertem Druck [94].

Es werden zwei Prinzipien des Verdampfens unterschieden. Zum einen die Oberflächenverdampfung und zum anderen die Entspannungsverdampfung. In Oberflächenverdampfern sind Heizraum und verdampfende Flüssigkeit durch eine Wand getrennt, durch welche die erforderliche Verdampfungswärme übertragen wird [325]. Im Gegensatz dazu wird bei der Entspannungsverdampfung (Flash-Verdampfung) ein flüssiger Stoffstrom auf einen niedrigeren Druck gedrosselt. Der Entspannungsverdampfer besteht aus einem leeren Gefäß ohne Wärmeübertragungsflächen. Die zur Verdampfung erforderliche Wärmemenge entsteht durch Abkühlung der Lösung. Die Ausdampfmenge ist daher im Allgemeinen klein im Vergleich zur eintretenden bzw. abzukühlenden Lösung [116]. Als Faustregel gilt, dass eine Temperaturabsenkung von ca. 5 °C einer Gesamtverdampfung von nahezu 1 % entspricht.

Eine Möglichkeit der Nachverdampfung nach dem Whirlpool bietet ein Entspannungsverdampfer, wie er in Abbildung 119 zu sehen ist. Dabei wird empfohlen, eine konventionelle Kochung mit reduzierter Gesamtverdampfung durchzuführen. Es folgt die

Heißtrubabtrennung im Whirlpool mit anschließender Nachverdampfung. Auch dieses System erlaubt eine flexible Parametrierung und ist einfach nachrüstbar bzw. kombinierbar [69, 152, 270].

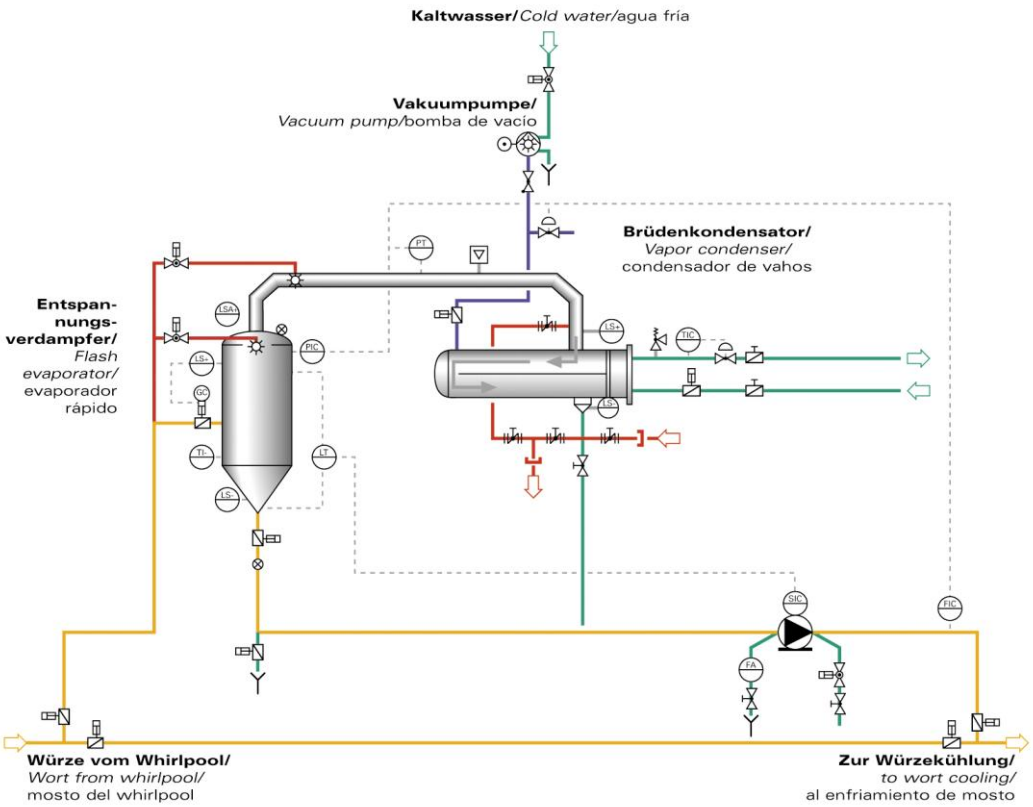


Abbildung 119: Vakuumverdampfung [336]

In einer Brauerei wurde ein derartiges System untersucht. Die Vakuumverdampfung wurde im Bypass zur Würzeleitung vom Whirlpool zum Würzekühler in das System eingebunden. Dies ermöglichte die Installation der Anlage während des laufenden Betriebes und eine höhere Produktionssicherheit bei eventuellen Störungen. Die Anlage war für eine Leistung von 700 hl/h ausgelegt und arbeitete bei einem absoluten Druck von 0,6 bar. Die Würze wurde tangential in ein ca. 1,2 m im Durchmesser großes Entspannungsgefäß eingepumpt. Durch das Vakuum wurde ein Ausdampfen der Würze erreicht, die freigesetzten Brüden kondensierten im nachgeschalteten Brüdenkondensator. Über eine Differenzdruckmessung wurde das Niveau im Entspannungsgefäß konstant gehalten.

Ziel der Vakuumverdampfung war die Verkürzung der Kochzeiten. Hierdurch sollte eine verringerte thermische Belastung der Würze erzielt werden, um eine bessere Geschmacksstabilität zu erzielen. Ferner sollte der noch koagulierbare Stickstoff geschont werden, um die Schaumstabilität der Biere zu verbessern. Durch die Reduzierung der damit verbundenen Gesamtverdampfung sollte der Energieverbrauch und der Warmwasserüberschuss durch den PfaDuKo reduziert werden. Außerdem versprach der Einsatz einer Vakuumverdampfung direkt vor der Würzekühlung eine Absicherung des Gehaltes an freiem DMS im Bier.

Die Kochzeit wurde von 70 min auf 45 min reduziert. Parallel wurde die Gesamtverdampfung von 10 % auf 7 % gesenkt. Eine Nachverdampfung nach dem Whirlpool erbrachte eine Verdampfung von 1.0-1,5 %.

Durch die Reduzierung der Kochzeit wurde der noch koagulierbare Stickstoff in der Anstellwürze um durchschnittlich 0,9 mg / 100 ml angehoben. Dies führte zu einer Verbesserung des Bierschaumes nach Nibem um zehn Sekunden. Verglichen wurden die Durchschnittswerte zehn Monate vor und fünf Monate nach der Umstellung. Eine signifikante Auswirkung auf Farbe, pH und Bitterstoffausbeute konnte nicht festgestellt werden.

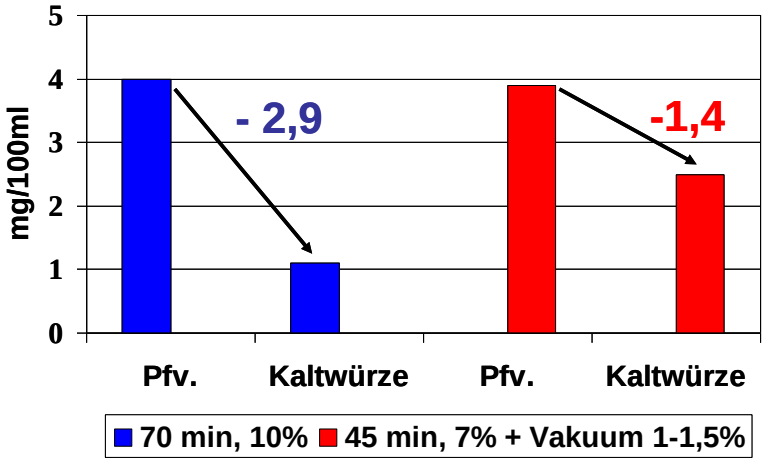


Abbildung 120: Noch Koagulierbarer Stickstoff in Pfanne-voll und Kaltwürze, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 45 min, 7 % Verdampfung und 1-1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool.

Die Ergebnisse zur Ausdampfung flüchtiger Würzearomastoffe zeigt Abbildung 121. Die Forderung, dass die Konzentration an freiem Dimethylsulfid (DMS_{frei}) nicht die Geschmacksschwelle von 100 µg/l überschreiten darf, wurde erfüllt. Freies DMS konnte um über 80 % reduziert werden. Die Ausdampfparameter Hexanal und Heptanal, welche aus dem Lipidstoffwechsel resultieren, konnten selbst bei der geringen Gesamtverdampfung um über 60 % reduziert werden (vgl. Abbildung 106, S. 130). Die Streckeraldehyde 3-methyl-Butanal, 2-methyl-Butanal, Methional und Benzaldehyd wurden weniger effektiv ausgetrieben. Das Streckeraldehyd Phenylethanal (vgl. Abbildung 105, S. 130) zeigte erwartungsgemäß eine sehr geringe Ausdampfung. Die Reduzierung der Alkohole 3-methyl-Butanol, 2-methyl-Butanol, 1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol, 1-Octen-3-ol und Phenylethanol lag innerhalb der statistischen Vergleichbarkeit von Probenahme und Analytik, so dass keine gesicherte Abnahme festgestellt werden konnte.

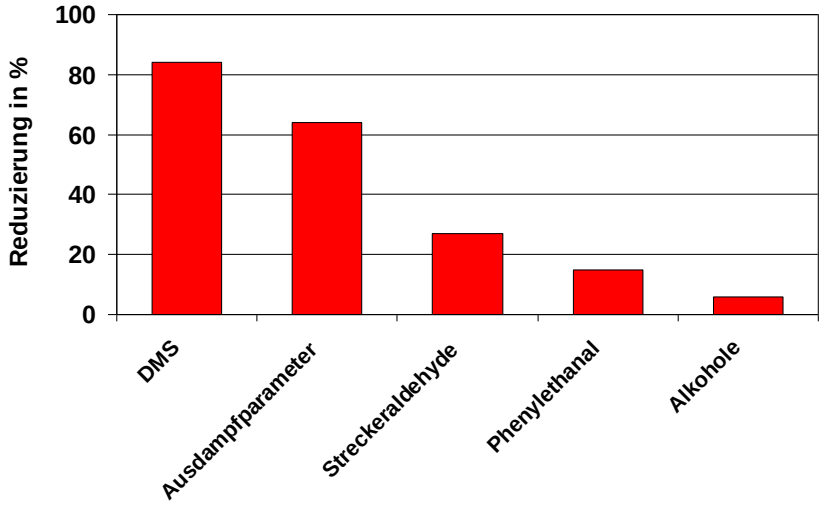


Abbildung 121: Prozentuale Reduzierung von Aromastoffen in Würze bei einer Vakuumverdampfung von 1,5 %

Die Verkostungsergebnisse nach den Richtlinien der DLG [54]zeigt Abbildung 122. Die Biere wurden frisch und nach einer forcierten Alterung (1 d schütteln, 4 d 40 °C) sensorisch bewertet [57, 181]. Die Biere mit verkürzter Kochung wurden in einem Dreieckstest mit Angabe der Präferenz (n = 21) mit 95 Prozent Sicherheitswahrscheinlichkeit ($\alpha = 0{,}05$) unterschieden. Dennoch bestand keine signifikante Bevorzugung einer Probe. Je nach eigenem, subjektivem Geschmacksempfinden haben die Verkoster dem einen oder dem anderen Bier den Vorzug gegeben. Die Bewertung nach DLG-Schema erbrachte jedoch bessere Noten bei der verkürzten Kochzeit. Diese Ergebnisse konnten beim forciert gealterten Bier nicht wiedergefunden werden. Hier ergaben sich gleiche Noten bei der Verkostung.

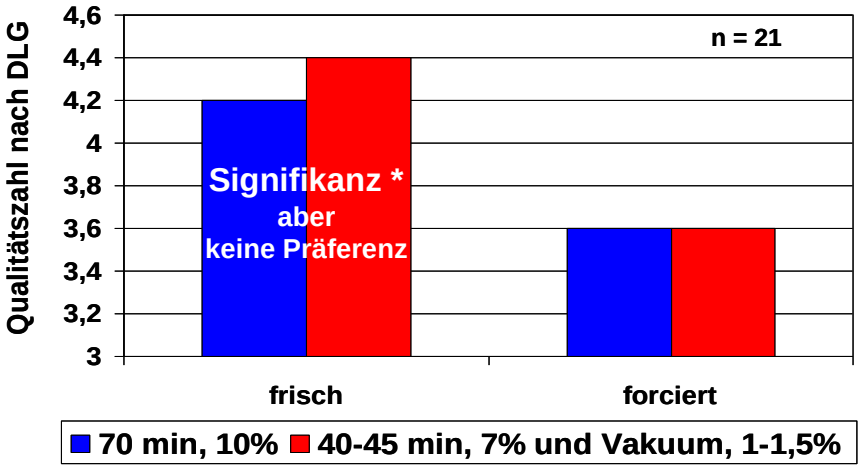


Abbildung 122: Qualitätszahl nach DLG von frischen und forciert gealterten Bieren, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 40 - 45 min, 7 % Verdampfung und 1 - 1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool

Da anscheinend das Geschmacksgefüge des Bieres durch die neue Technologie tangiert wurde, fand eine beschreibende Verkostung statt, die Abbildung 123 wiedergibt. Bei der beschreibenden Verkostung musste der Verkoster die Intensität (0 = gering, 5 = sehr stark) eines sensorischen Eindruckes angeben. Das frische Bier, welches mit 40 - 45 Minuten

Kochzeit und Nachverdampfung hergestellt wurde, zeichnete sich durch einen geringeren Bittereindruck und einen weicheren Geschmack aus. Nach einer forcierten Alterung haben sich, wie schon bereits bei der DLG-Verkostung, die Kurven angeglichen. In weiteren Versuchen wurde die Kochzeit auf 30 Minuten reduziert. Die Würze- und Bieranalysen haben gezeigt, dass eine Reduzierung der Kochzeit auf 30 Minuten analytisch ohne Probleme vertretbar ist, wenn eine Nachverdampfung durchgeführt wird. Die Verkostung zeigte jedoch, dass sich der Biercharakter verändert hatte. Dies war von der Brauerei nicht erwünscht, und es wurde für den Praxisbetrieb eine Kochzeit von 40 Minuten festgelegt.

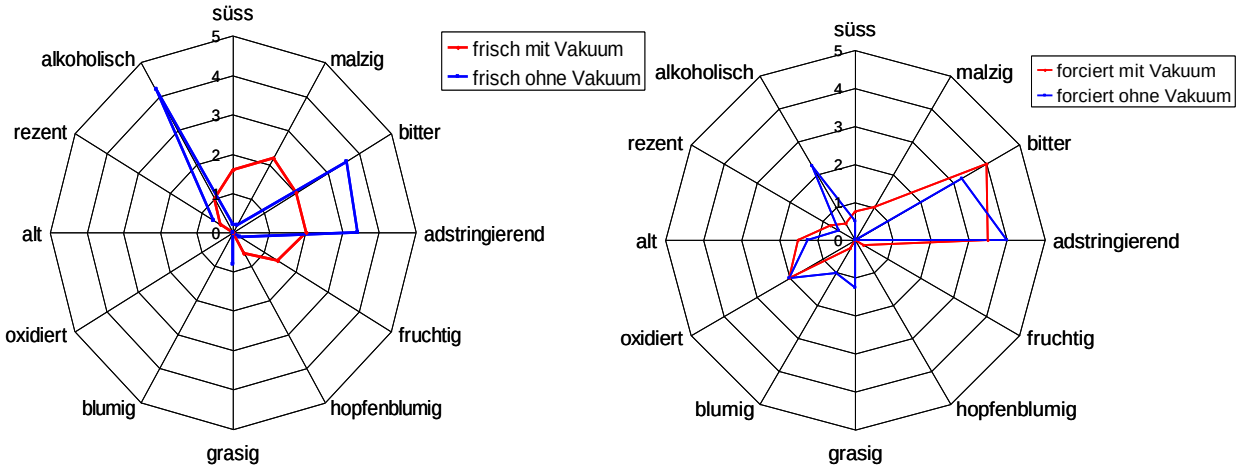


Abbildung 123: Spider-Plots sensorischer Analysen von frischen und forciert gealterten Bieren, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 45 min, 7 % Verdampfung und 1 - 1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bei einer Verkürzung der Kochzeit sich das Geschmacksprofil ändern kann. Ob dies vom Verbraucher erkannt wird, hängt vom Aromaprofil des Bieres ab. Weiterhin stellt sich die Frage, welchem Bier der Verbraucher den Vorzug geben wird. Diese Frage kann nur über Verkostungsstudien mit den Verbrauchern abschließend geklärt werden. Grundsätzlich gilt, dass eine reduzierte Ausdampfung zu einem reicheren Aromaprofil und somit zu einem volleren Biergeschmack führt. Phenylacetaldehyd ist hierfür ein Beispiel. Es dient als Referenzsubstanz für ein honigartiges Aroma und ist meist bei reduzierter Kochung in der Anstellwürze in höheren Konzentrationen zu finden.

Eine Weiterführung der Vakuumverdampung ist das System „SchoKo“. Bei diesem Kochverfahren wird auf eine konventionelle Kochung verzichtet und nur noch nach dem Whirlpool ausgedampft.

Schonkochverfahren „SchoKo“

Beim Schonkochverfahren (SchoKo) wird die Kochung in zwei Phasen unterteilt, erstens das Heißhalten der Würze und zweitens die Verdampfung zwischen Whirlpool und Plattenkühler. Die Würze wird während der ersten Phase bei 97 °-99 °C für 40 - 60 min nur noch heißgehalten und nicht mehr aktiv gekocht, wodurch sich in der Praxis eine Verdampfung von weniger als 1 % ergibt. Bei entsprechender Ausstattung des Heißhaltegefäßes, z. B. mit einem Innenkocher, könnte auch zeitweise konventionell gekocht werden. Während der Heißhaltezeit muss die Würze gerührt werden. Durch die Konvektion wird die Eiweißkoagulation erst ermöglicht. Während der zweiten Phase werden noch ungefähr 5 % in einem Entspannungsverdampfer bei einem Absolutdruck von ca. 400 mbar verdampft. Um

diese Vakuumverdampfung durchführen zu können, wird die Würze in ein „vorevakuiertes“, speziell konstruiertes und patentiertes Gefäß tangential eingeleitet, sodass eine Rotationsbewegung der Flüssigkeit sowie ein dünner Würzefilm an der Wandung resultieren. Infolgedessen wird eine große Oberfläche zur Aromastoff- und Wasserausdampfung geschaffen. Aufgrund des speziellen Systemaufbaus ergibt sich eine hohe Flexibilität hinsichtlich der Parametrierung und Gestaltung des Kochprozesses. Der Entspannungsverdampfer kann einfach nachgerüstet werden [31, 189, 270]. Wenn z. B. die Kochintensität der bestehenden Würzepfanne nicht ausreicht, kann auf eine Kochung verzichtet werden, wobei die Verdampfung erst nach dem Whirlpool stattfindet.

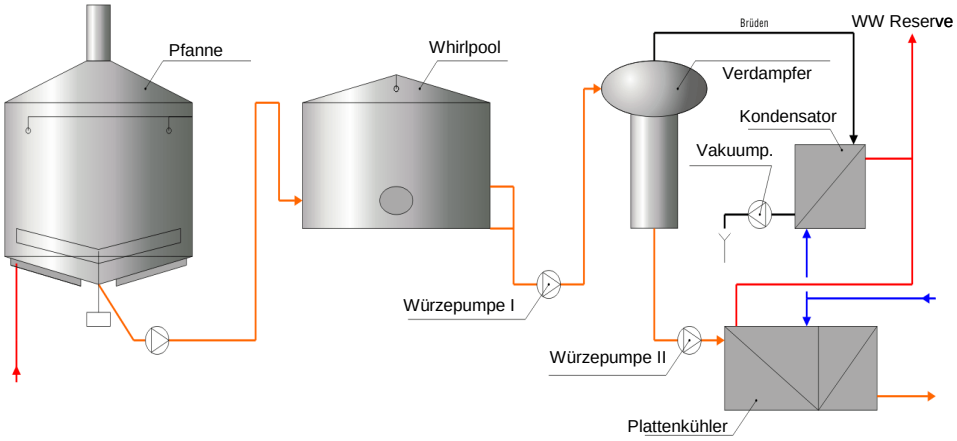


Abbildung 124: Schonkochverfahren zur Würzekochung [271]

Das Entspannunsgefäß kann nicht nur im Vakuum betrieben werden (vgl. Abbildung 119 und Abbildung 124), sondern ist auch als Ausdampfgefäß für eine überbarometrische Kochung (vgl. HTW, Abbildung 118) oder eine atmosphärische Kochung nutzbar, wie im nächsten Kapitel beschrieben wird.

7.2.4 Aussenkocher

Auch Außenkocher werden meist als Rohrbündelwärmetauscher ausgeführt. Hierbei wird die Würze ständig aus der Würzepfanne abgezogen und der Pfanneninhalt 6- bis 8-mal pro Stunde durch den Außenkocher gepumpt. Die Würzetemperatur im Kocher kann durch ein Drosselventil nach dem Außenkocher einstellbar sein. In der Pfanne prallt die eingepumpte Würze auf einen Verteilerschirm, durch den sich ein kegelförmiges Sprühbild ergibt und die Oberfläche zur Ausdampfung unerwünschter Aromastoffe und Wasser vergrößert wird. Ein Nachteil dieser Kocherausführung kann der größere Platzbedarf im Sudhausbereich sein sowie ein relativ großer anlagentechnischer Aufwand. Die technologischen Vorteile, wie eine gute Durchmischung des Pfanneninhalts, große Variabilität bei der Installation der Heizflächengröße sowie eine definierte Heißhaltezeit im Kocher durch Anpassen des Würzevolumenstroms über die Pumpenleistung, ermöglichen eine gezielte Würzebehandlung [168]. Die Rückströmung der Würze in die Pfanne kann in einem Winkel von 23 ° zum Radius erfolgen, was zu einer guten Durchmischung des Pfanneninhaltes und einer homogenen Würzeverteilung führt. Alternativ kann nur ein Teilstrom von z. B. 70 % derart zurückgeführt werden während der Rest über einen Verteilerschirm geführt wird. Auch können bis zu drei Würzepfannen mit einem Außenkocher betrieben werden.

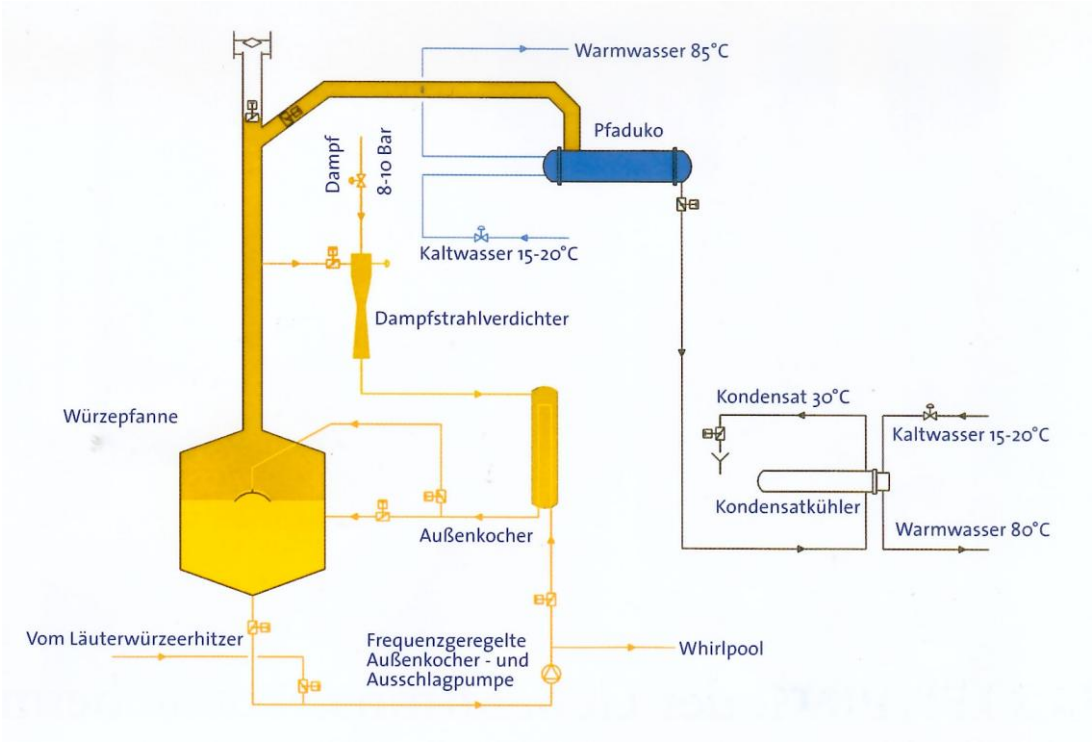


Abbildung 125: Außenkocher mit thermischer Brüdenverdichtung und Pfannendunst-Kondensator [285]

Entspannungsverdampfung „Varioboil“

Die Hauptkomponenten dieses Systems sind ein Außenkocher, ein Entspannungsverdampfer und ein Stapeltank. Der Unterschied zum klassischen Außenkocher ist, dass die Verdampfung nicht in der Würzepfanne erfolgt, sondern in ein externes Entspannungsgefäß ausgelagert ist.

Beim System Varioboil wird in der ersten Phase (Würzekochung) konventionell gekocht. Im Entspannungsverdampfer erfolgt die Verdampfung von Wasser und Aromastoffen. Die entstandenen Brüden werden über einen Pfannendunstkondensator niedergeschlagen. In der zweiten Phase wird der Entspannungsverdampfer unter Vakuum gesetzt, wodurch sich eine Verdampfung auf Temperaturen unter 100 °C und damit eine Abkühlung der Würze (Würzevorkühlung) ergibt. Nach diesen zwei Abschnitten der Kochung wird der Heißtrub konventionell über einen Whirlpool ausgeschieden. Bei der Vakuumverdampfung ist darauf zu achten, dass die Würze nicht unter 80 °C abgekühlt wird, da sonst ein Auseinanderlaufen des Trubkegels im Whirlpool resultieren kann. Außerdem besteht so die Möglichkeit, bei der Würzekühlung Brauwasser mit einer Temperatur von mindestens 80 °C herzustellen.

Auch mit diesem System ist eine Um- bzw. Aufrüstung relativ einfach möglich, d. h. vorhandene Gefäße können teilweise weiterverwendet werden. Zusätzlich kann, wie auch schon bei anderen Systemen, die Kochparametrierung flexibel variiert werden [149].

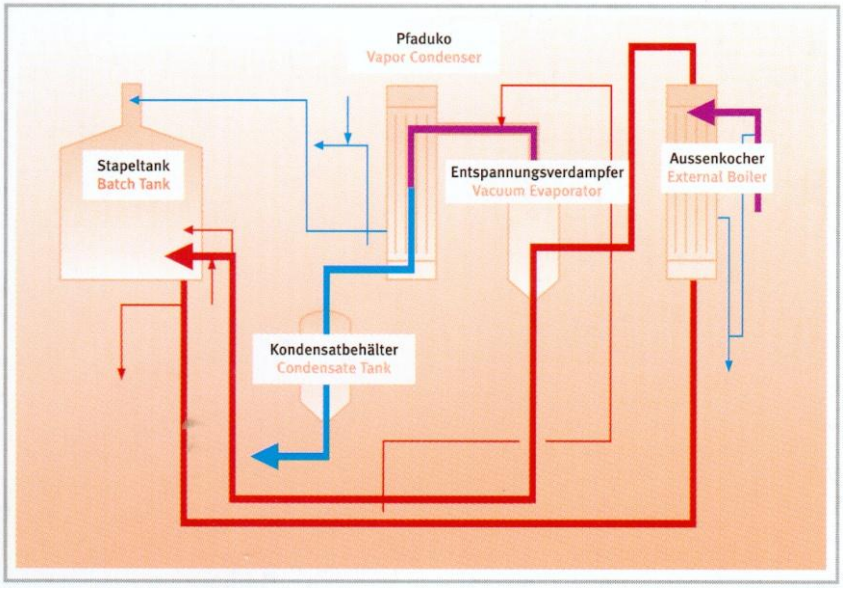


Abbildung 126: Kochsystem Varioboil [227]

Dünnfilmverdampfer „Merlin®“

Der Dünnfilmverdampfer Merlin ist die konstruktive Vereinigung eines Außenkochers und eines Ausdampfgefäßes. Das Kochsystem besteht aus einem Gefäß mit konischem Heizboden, welches meist über einem Whirlpool angeordnet ist. Der Whirlpool dient sowohl als Sammelgefäß für die Würze als auch im eigentlichen Sinn als Gefäß zur Heißtrubabtrennung. Die Würze wird in den Whirlpool abgeläutert und am Ende des Läuterns mittels einer Umwälzpumpe über die konische Heizfläche zum Aufheizen auf Kochtemperatur gebracht. Durch die vorliegende dünne und turbulente Schicht ergibt sich ein guter Wärmeübergang. Der gesamte Inhalt wird im Verlauf der 35 - 40 min dauernden Kochung 4 - 6 mal umgewälzt. Die Heißtrubabscheidung kann bereits beim Umlaufvorgang erfolgen, da tangential in den Whirlpool eingepumpt werden kann, wie bei einer klassischen Whirlpoolpfanne. Aufgrund des frühzeitigen Beginns der Heißtrubabtrennung kann die Whirlpoolrast auf ca. 10 min verkürzt werden. Anschließend wird die Würze vor dem Plattenkühler erneut über den beheizten Konus geleitet, um eine Nachverdampfung unter atmosphärischen Bedingungen zu erreichen [320, 322].

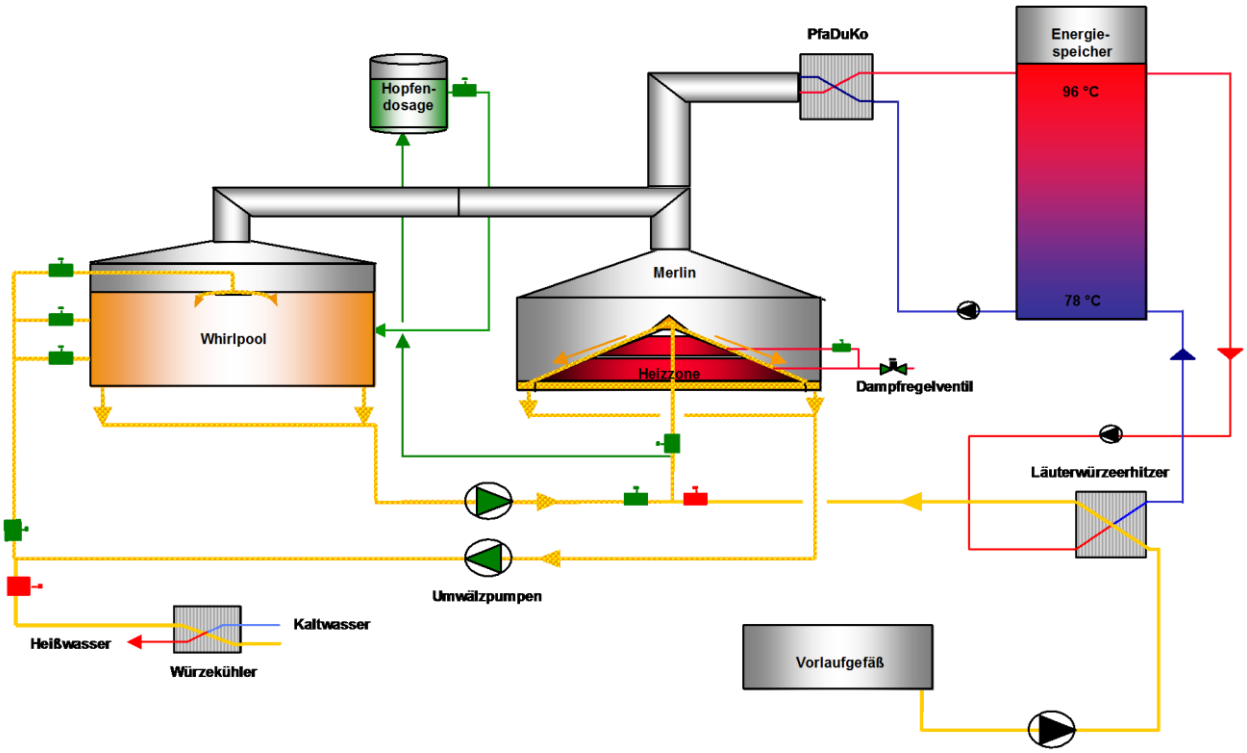


Abbildung 127: Dünnfilmverdampfung mit Pfannendunst-Kondensator und Wärmespeicher [285]

7.2.5 Wort Stripping

Es gibt ein System, mit welchem eine Nachverdampfung durch eine Stripping-Kolonne, die sich zwischen Heißtrubabscheidung und Würzekühlung befindet, ermöglicht wird. Die Anlage besteht aus einer Würzepfanne, einem Heißtrubabsetztank oder Whirlpool, der Strippingkolonne und im Anschluß daran einem Plattenkühler. Nach Erreichen der Kochtemperatur steht die Würze 30 - 50 min bei 100 °C unter leichtem Rühren. Danach wird der Pfanneninhalt in ein Absetzgefäß (Decantor) oder einen Whirlpool gepumpt. Sobald die Absetzzeit bzw. die Whirlpoolrast beendet ist, beginnt der Vorgang des Strippens. Dazu wird die Würze durch die gepackte Kolonne von oben nach unten geleitet und im Gegenstrom lebensmittelechter Dampf eingeblasen. Hierfür muss die Würze vor dem Strippen wieder auf Kochtemperatur gebracht werden. Das im oberen Bereich der Kolonne entstehende Kondensat wird über ein Seitenaggregat abgeführt [278].

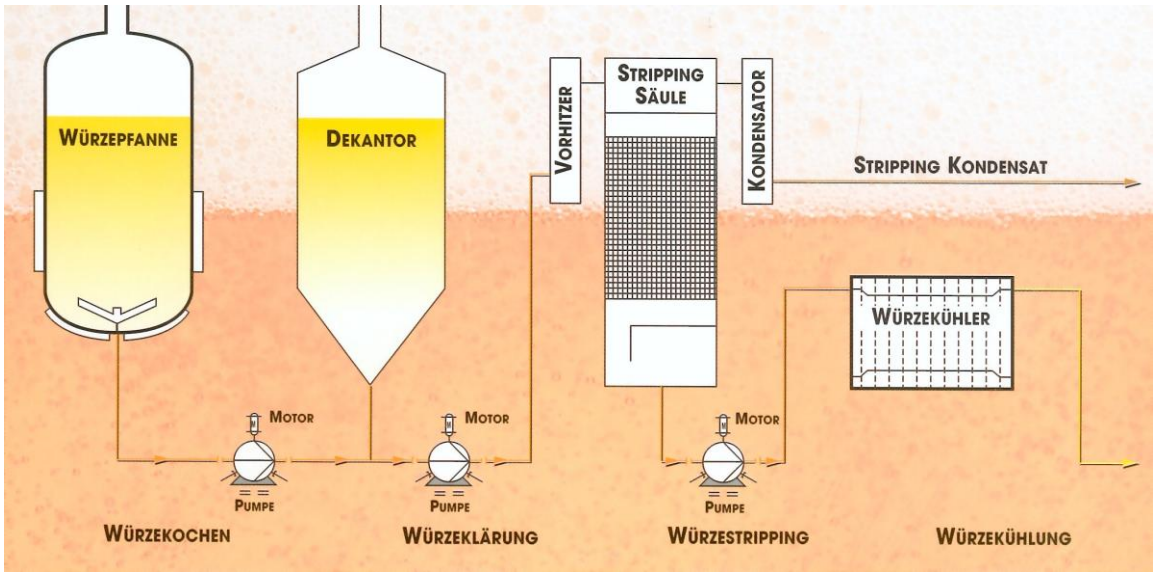


Abbildung 128: Kochsystem mit Stripping-Kolonne [186]

Alternativ zum Stripping mit Dampf kann mit Luft gestrippt werden. Die heiße Würze wird vor dem Würzekühler von oben in einen Tank geleitet. Durch eine Verteilerplatte entstehen dünne Würzeströme. Die nach unten fallende Würze wird im Gegenstrom mit heißer, steriler Luft beaufschlagt. Durch die große Oberfläche wird eine Ausdampfung von Aromastoffen begünstigt. Einer der Gründe warum dieses System keine weite Verbreitung erlangt hat, liegt wahrscheinlich darin, dass schon die Aufbereitung der Strippingluft sehr aufwändig ist.

7.2.6 Mikrowellenkochung

Die Mikrowelle zur Beheizung einer Würzekochung zu verwenden, kann in speziellen Fällen sinnvoll sein. In Regionen mit geringen Stromkosten, z. B. aus Wasserkraft, beträgt der Strompreis weniger als ein Drittel der derzeitigen deutschen Durchschnittspreise. Abhängig von den Energieströmen in der Brauerei und besonders bei wenigen Suden pro Woche kann die Mikrowelle sinnvoll eingesetzt werden. Bei größeren Mikrowellenanlagen sollte die Abwärme des Wellenerzeugers, welche 20 - 30% der eingespeisten elektrischen Energie beträgt, genutzt werden. Als Vorteil der Mikrowelle ist die Vermeidung von Emmissionen aus der Dampferzeugung zu nennen, was besonders im Stadtbereich von Vorteil ist. Bei der Dampferzeugung aus Strom entstehen variable Kosten für die Wasseraufbereitung, das Kondensatmangement sowie die Brennstoff- und Wartungskosten, welche mit den Strom- und Wartungskosten einer Mikrowellenheizung verglichen werden müssen. Ebenso muss bei den Investitionskosten verfahren werden.

In der Literatur gibt es keine Hinweise über eine Würzekochung mit Mikrowellen. Es sollte die Frage geklärt werden, ob sich Unterschiede zwischen einer konventionellen Kochung und einer Mikrowellenkochung finden lassen. Da bei der Mikrowellenkochung keine heißen Grenzflächen vorhanden sind, war sicher, dass es kein Fouling an der Heizzone gibt.

In einer Pilotbrauerei im Maßstab von 5,5 hl wurden vier Einzelsude durchgeführt, wobei die Würze- und Bierqualität begleitend untersucht wurde. Bei dem Sudwerk handelte es sich um das Pilotsudwerk der Doemens Academy, Gräfelfing, Deutschland.

In Anlehnung an Abbildung 100 aus dem vorangehenden Kapitel werden die Ausdampfung (DMS), die thermische Belastung (TBZ) und die Eiweißausfällung (koag. N) dargestellt. Auswirkungen auf die Bierqualität folgen.

Wie aus Abbildung 129 ersichtlich ist, schwanken die Werte des freien Dimethylsulfids in der Ausschlagwürze. Da alle Werte weit unter dem Grenzwert von 100 µg/l liegen, sind alle Kochungen akzeptabel. Mit sinkender Verdampfung steigt erwartungsgemäß die Konzentration des DMS-Precursors S-Methylmethionin in der Ausschlagwürze. Durch die weitere Spaltung im Whirlpool ergeben sich folglich steigende Werte des freien DMS im Bier. Auch unter Berücksichtigung eines Variationskoeffizienten von 5-10 % bei der Bestimmung des freien DMS können alle Biere akzeptiert werden.

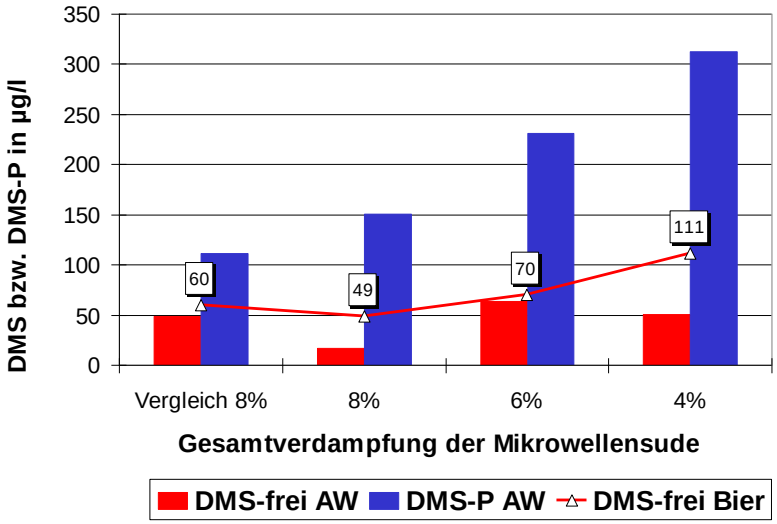


Abbildung 129: Freies Dimethylsulfid (DMS) und dessen Precursor S-Methylmethionin (DMS-P) in Ausschlagwürze (AW) und Bier bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung

Die Farbebildung verhält sich entgegengesetzt zur DMS-P-Spaltung und sinkt mit Einsatz der Mikrowelle und bei sinkenden Gesamtverdampfungen, wie aus Abbildung 130 ersichtlich ist.

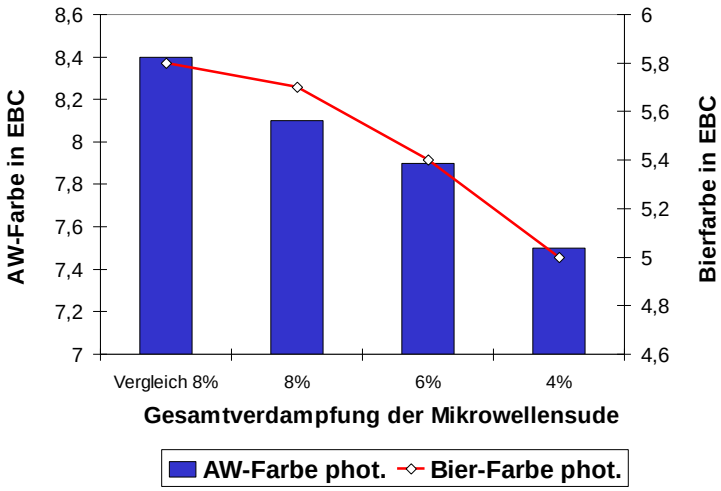


Abbildung 130: Photometrisch gemessene Farbe in Ausschlagwürze (AW) und Bier bei der Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung

Abbildung 131 gibt einen Überblick über die thermische Belastung der Würze. Hinsichtlich TBZ und koag. N ist die Mikrowellenkochung mit der konventionellen Vergleichskochung identisch. Sinkende Gesamtverdampfungen bzw. kürze Kochzeiten führen zu einer verminderten Eiweißkoagulation und zu einem höheren Gehalt an noch koagulierbarem Stickstoff, so wie es auch bei der konventioneller Kochung beobachtet wird. Es wäre zu erwarten, dass ein höherer Wert des koag. N zu einem besseren Bierschaum führt. Dies kann nur tendentiell bestätigt werden, wie Abbildung 132 zeigt.

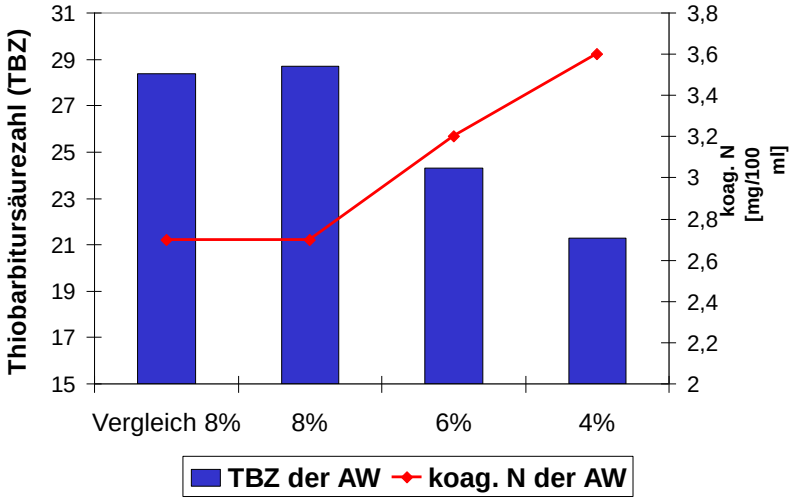


Abbildung 131: Thiobarbitursäurezahl (TBZ) und noch koagulierbarer Stickstoff (koag. N) in Ausschlagwürze (AW) bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung

Vergleicht man die Sude mit 8 % Gesamtverdampfung, so zeigen die Mikrowellensude eine tendentiell schlechtere kolloidale Stabiltät. Dies deckt sich mit der Beobachtung, dass der Heißtrub bei Mikrowellenbetrieb in der Konsistenz feinflockiger war und zu einem breiteren Trubkegel im Whirlpool geführt hat. Somit führt die Mikrowellenkochung zu einer tendentiell unterschiedlichen Eiweißkoagulation. In Anbetracht, dass die Mikrowelle primär Wasser erhitzt, da dieses den stärksten Dipolcharakter aufweist, ist es erklärlich, dass keine signifikanten Unterschiede bei der Eiweißdenaturierung gefunden wurden.

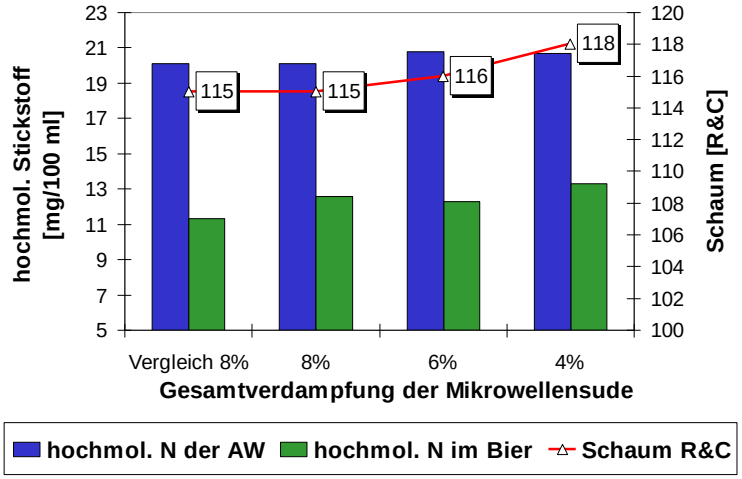


Abbildung 132: Hochmolekularer Stickstoff (hochmol. N) in Ausschlagwürze (AW) und Bier sowie Schaum nach Ross & Clark in Bier bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung

Um den Einfluss der Mikrowellenkochung auf die Sensorik zu untersuchen, wurden bei den frischen Bieren eine Verkostung nach DLG und eine Dreiecksprüfung nach MEBAK [200] durchgeführt. Nach DLG konnten keine signifikanten Unterschiede erkannt werden, nur die Dreiecksprüfung zwischen dem Vergleichsbier und dem Mikrowellenbier mit 4 % Gesamtverdampfung zeigte einen signifikanten Unterschied auf einem Niveau von 99 %. Dass sich das Aromaprofil und somit der Biergeschmack mit der Gesamtverdampfung ändert, wurde bei den Versuchen mit Vakuumverdampfern bereits bewiesen (siehe Abbildung 122, S. 144).

Die Ergebnisse der Bieralterung zeigt Abbildung 133. Bei der Bestimmung der Alterungskomponenten mittels Gaschromatographie ist das 2-Furfural die quantitativ größte Komponenente. Sie zeigt eine negative Korrelation mit der sensorisch wahrnehmbaren Alterung des Bieres. Die Verkostungsmethode wurde von Eichhorn [57] und Lustig [181] beschrieben.

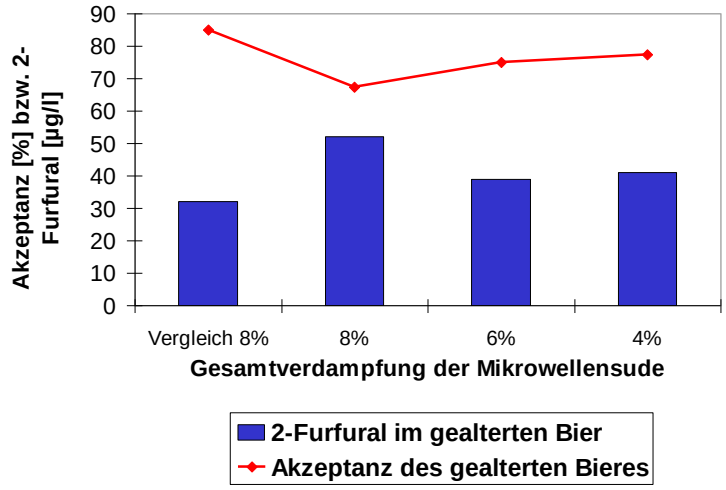


Abbildung 133: 2-Furfural in gealtertem Bier und Akzeptanz des gealterten Bieres bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung

Die Verkostungsergebnisse folgen nicht den in diesem Kapitel diskutierten analytischen Werten der Würzekochung. Warum die Mikrowellenkochung mit 8 % Gesamtverdampfung am schlechtesten abschnitt, kann nicht nachvollzogen werden. Da die Versuche nur ein Screening-Test der Mikrowellenkochung waren, handelte es sich um Einzelsude. Weitere Versuche mit Wiederholungen wären notwendig.

Tendenziell ist bei der Mikrowellenkochung die Eiweißkoagulation schwächer. Trotzdem kann festgehalten werden, dass sich weder analytisch noch sensorisch die Würzekochung mit Mikrowellen von der klassischen Würzekochung signifikant unterscheidet.

Bei allen bisher behandelten Kochsystemen wurde die Läuterwürze gesammelt und erst dann dem Kochprozess unterzogen. Um die Möglichkeiten der Kochung auszuweiten wurde nach Wegen gesucht die Würze gezielter beeinflussen zu können. Hierfür eignet sich die Kochung von Teilfraktionen der Würze (Fraktionierte Kochung), welche getrennt nach dem Läutern aufgefangen und gekocht werden können.

Quellen

Vortrag von Hans Herrmann [107], Dissertation von Ralf Mezger [187] und Diplomarbeiten von Klaus Hartmann, Henning Laubrock, Martin Schutzmaier, Ralf Mezger, Albert Dingeldein, René Groeger, Thomas Kurz, Volker Spohr, Axel Scholer, Jürgen Kraatz, F. Langfeld, René Mieth, Gerald Coors sowie eigene Veröffentlichungen [11, 41, 147, 149, 150, 152, 153, 188-194, 197, 275]

7.2.7 Getrennte Kochung von Teilfraktionen der Läuterwürze (Fraktionierte Kochung)

Viele Innovationen von Kochsystemen zeichnen sich durch eine moderate thermische Belastung aus, welche zu Energieeinsparungen sowie zu einer Verbesserung der Würzequalität und Bier-Geschmacksstabilität führt. Allen Systemen gemeinsam ist die Eigenschaft, dass die gesamte Läuterwürze einem Kochprozess unterzogen wird. Die verschiedenen Läuterfraktionen (z. B. Vorderwürze, Nachgüsse) unterscheiden sich aber in ihrer Würzezusammensetzung und in ihrer Sensitivität hinsichtlich thermischer Reaktionen. Um eine gezieltere Würzebehandlung durchführen zu können, wäre eine moderate Vorderwürzekochung (hoher Extraktgehalt) mit geringer thermischer Belastung und eine intensive Nachgusskochung (hoher Anteil an Lipidabbauprodukten) mit guter Ausdampfung wünschenswert. Durch die Fraktionierte Würzekochung kann dies erreicht werden.

Seit mehr als 50 Jahren wird das Thema Geschmacksstabilität erforscht, wobei es bis heute noch keine erschöpfenden Antworten auf alle Fragen gibt. Bereits vor 30 Jahren hat *Dalgliesh* [43] die Bieralterung beschrieben. Er stellte einen Rückgang der Bittere und einen Zuwachs süßer Geschmacksnoten fest. Über die Bieralterung konnte ein Zuwachs und anschließender Rückgang eines Beerenaromas sowie ein Zuwachs eines „Pappdeckel“-Geschmackes (erinnert an nasse Kartonagen) beobachtet werden. Diesem Alterungsgeschmack wurde das (E)-2-Nonenal, ein Lipidabbauprodukt, zugeordnet [56, 172, 174, 229], welches direkt oder als (E)-2-Nonenalpotenzial gemessen wird. Im Widerspruch dazu stehen jüngere Arbeiten von Schieberle [251, 252], welche zeigten, dass diese Substanz nicht während der

Bieralterung zunimmt. Es bleibt festzuhalten, dass von vielen Maßnahmen berichtet wird, welche den Lipidabbau reduzierten und so zu einer Verbesserung der Geschmacksstabilität des Bieres führen konnten. Zu nennen sind Hoch-Kurz-Maischverfahren mit hohen Einmaischtemperaturen (>62 °C) zur Unterdrückung der Lipoxygenasenaktivität [56, 307], die pH-Reduzierung des Anschwänzwassers [172], der Einfluss des Bier-pH [98], der Einfluss von Sulfiten auf (E)-2-Nonenal-Addukte [229], der Einfluss der Würzekochung auf das freie (E)-2-Nonenal [174] sowie auf das (E)-2-Nonenal-Potenzial [231] und der Einfluss eines schnellen Schwelkens mittels hoher Luftdurchsätze und reduzierter Luftfeuchten, welche das (E)-2-Nonenal-Potenzial senken konnten [302]. Bisher fehlt der Beweis, dass (E)-2-Nonenal für den Alterungsgeschmack im Bier haupsächlich verantwortlich ist. Bekannt ist eine Vielzahl anderer Substanzen, welche mit der Bieralterung einhergehen. Diese sind meist Carbonyle aus dem Streckerabbau, welche im Rahmen der Maillard-Reaktion entstehen oder auch Lipidabbauprodukte [237]. Die Aromawerte jener Aromastoffe wurden mittels Aromaextrakt-Verdünnungs-Analyse (AEDA) über Chromatographie-Olfaktometrie (GCO) [303, 304] ermittelt, oder man bediente sich multivariater Modellierungen, wie z. B. der „Projection to Latent Structures Algorithms“ (PLC) [84].

Folgende Aromastoffe wurden für die Bieralterung verantwortlich gemacht: 3-methyl-Butanal, 2-methyl-Butanal, methyl-Propanal [252], Phenylacetaldehyd [250, 281], (E,E) 2,4-Nonadienal [250], Methional [281], γ-Nonalacton und dihydro-5-pentyl-2(3H)-Furanon [84, 93, 293], 2-Furfural, 5-hydroxy-methyl-Furfural (HMF) [84, 198] und Heptanal [84]. Die Aromabeschreibung und die Schwellenwerte sind in Tabelle 21 aufgelistet.

Diese Würzecarbonyle stammen aus dem Malz [66] und können durch die Würzekochung unterschiedlich stark in ihrer Konzentration beeinflusst werden, wie in Kapitel 7.1, S. 122 bereits gezeigt wurde. Besonders die Aromastoffe aus der Maillard-Reaktion wie z. B. die Streckeraldehyde, werden nicht nur verdampft, sondern auch während der Würzekochung nachgebildet [216].

Nach *Back* [11] korreliert die Thiobarbitursäurezahl (TBZ) mit HMF [95, 294], wobei der TBZ-Zuwachs (Δ TBZ) während der Würzekochung und -heißhaltung nicht höher als 15 Einheiten sein soll, um negative Einflüsse auf die Geschmacksstabilität zu vermeiden. *Fritsch* [87] hat die sensorischen Eigenschaften ungehopfter gekochter sowie ungekochter Würze untersucht und festgestellt, dass malzige und getreideähnliche Aromanoten durch die Kochung reduziert werden, wobei er 3-methyl-Butanal, Hexanal und (Z)-4-Heptanal dafür verantwortlich macht. *Drost* [56] und *Narziß* [216] bestätigen die Ausdampfung von Carbonylen. *Liégeois* [174] behauptet, dass ca. 70 % des freien (E)-2-Nonenal in gealtertem Bier bereits nach der Würzekochung vorhanden war. *Morikawa* [211] berichtet, dass das Nonenalpotenzial in kalter Würze und Bier leicht reduziert ist, je länger die Würzekochung und je stärker die Ausdampfung war. Außerdem führt ein niedriger Würze-pH zu einer geringen TBZ. Nach *Ogane* [231] führt eine längere Kochung zu einer höheren thermischen Belastung und auch zu höheren Gehalten an Carbonylen im gealterten Bier.

Es zeigt sich, dass einerseits eine gute Ausdampfung von Lipidabbauprodukten erwünscht ist, andererseits aber die thermische Belastung und Bildung von Streckeraldehyden möglichst gering gehalten werden soll. Dies stellt einen Widerspruch dar, da bei der klassischen Kochung eine gute Ausdampfung nur durch eine starke Kochung gewährleistet werden kann.

Wie in Kapitel 7.2, S. 137 dargestellt, gibt es eine Vielzahl moderner Kochmethoden, die durch eine verbesserte Strömungsführung der Würze oder durch Zusatzeinrichtungen den oben genannten Widerspruch beherrschbar machen [11, 31, 32, 37, 38, 41, 42, 146, 147, 149,

150, 152, 153, 168, 169, 187-189, 191, 194, 196, 197, 216, 291, 292, 305, 318-320, 322, 323]. Dennoch stoßen diese Systeme an Grenzen, da sie auf die unterschiedlichen Würzezusammensetzungen der einzelnen Läuterfraktionen nicht speziell eingehen indem sie diese getrennt behandeln. *Narziß* und *Schneider* [223] haben im Rahmen der Untersuchungen zur Hochtemperaturwürzekochung (HTW) eine getrennte Kochung von Vorderwürze und drei Nachgüssen durchgeführt, bevor die Würze gemeinsam vergoren wurde. Die getrennt gekochten Würzen führten tendenziell zu besseren Bieren und zeichneten sich durch geringere Gehalte an 2-Furfural und Stickstoffheterocyclen aus. Sie schlossen daraus, dass sich die HTW für Würzen mit geringer Stammwürze besonders eignet.

Es sollte untersucht werden, welches Potenzial in der getrennten Kochung liegt. Hierfür wurden Versuchssude im Maßstab von 60 l an der Pilotsudanlage des Lehrstuhles für Technologie der Brauerei I durchgeführt. Es wurden die Vorderwürze und die Nachgüsse einer Maische nacheinander 120 min (Sud 1) bzw. 110 min (Sud 2) gekocht. Die Doppelversuche sollen eine Plausibilitätskontrolle der Ergebnisse ermöglichen. Es erfolgte eine periodische Probenahme der Würze um den Konzentrationsverlauf der Analyten während der Kochung verfolgen zu können.

Aus den Daten wurde eine Simulation erstellt, welche es erlaubt jede Kombination einer getrennten Vorderwürze- und Nachgusskochung hinsichtlich der Konzentration der Analyten zu untersuchen. Um Unterschiede im Verhalten von Vorderwürze und Nachgüssen feststellen zu können wurden alle Daten, außer dem pH-Wert, auf 12 % Stammwürze umgerechnet.

Im Folgenden sind die Würzeanalysen von Sudversuchen vorgestellt, bei welchen die Vorderwürze und die Nachgüsse getrennt ohne Hopfen gekocht wurden. Die Kochzeit betrug jeweils 120 min, wobei vereinzelt die Analysen der letzten Probe nicht durchgeführt wurden.

Extrakt

Die Vorderwürze hatte ca. 16 %, die Nachgüsse ca. 7 % Stammwürze. Da die Extraktkonzentration linear zunahm kann von einer konstanten Verdampfung ausgegangen werden.

pH-Wert

Abbildung 134 zeigt, dass der pH-Wert während der Würzekochung sinkt. Ursächlich können die Bildung von Maillardprodukten sowie die Fällung tertiärer Phosphate und Reaktionen mit Calcium und Magnesium sein [216]. Der Nachguss hat einen um ca. 0,1 - 0,2 Einheiten erhöhten Wert infolge des pH-Wertes des Anschwänzwassers. Der Unterschied des pH-Wertes zwischen Sud 1 und Sud 2 ist durch Schwankungen der Brauwasseraufbereitung begründet.

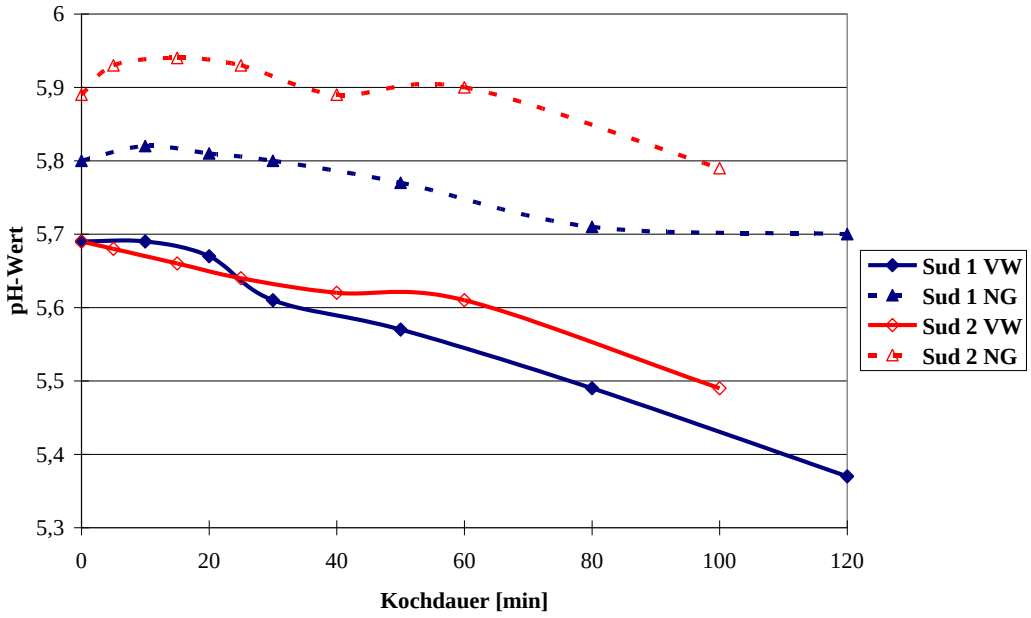


Abbildung 134: Verlauf des pH-Wertes von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Farbe bez. 12 % Stw.

Aus Abbildung 135 ist ersichtlich, dass die Extraktkonzentration keinen Einfluss auf den Verlauf der Farbe hat. Lediglich die Farbe der Nachgüsse ist, relativ gesehen, höher. Dies könnte eventuell auf den höheren Polyphenolgehalt der Nachgüsse zurückzuführen sein, wie Abbildung 136 zeigt.

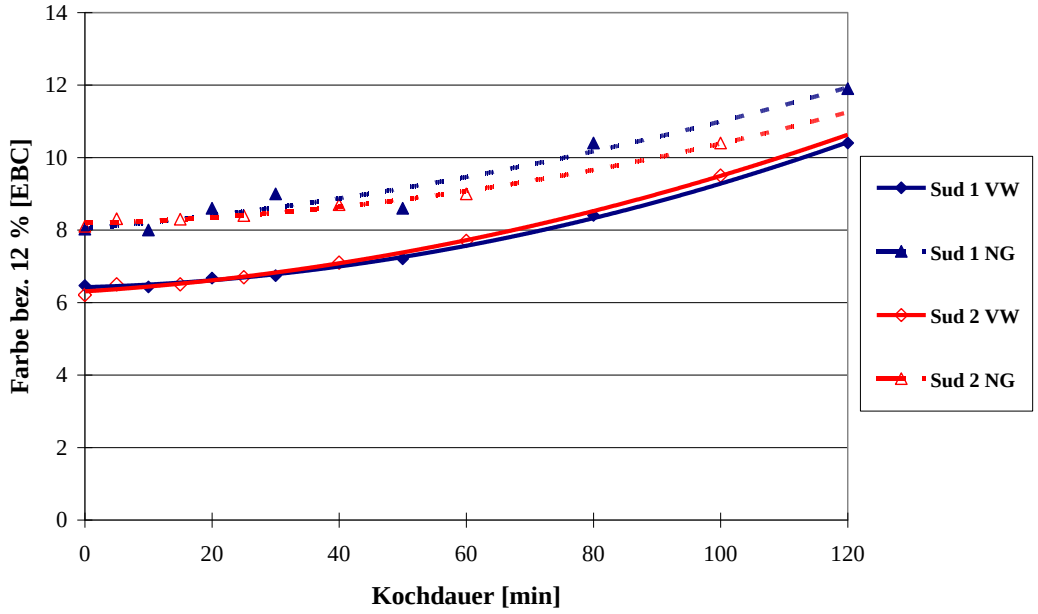


Abbildung 135: Farbe von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Polyphenole bez. 12 % Stw.

Erwartungsgemäß hatte hinsichtlich der Gesamtpolyphenole, Anthocyanogene und Tannoide der Nachguss, relativ gesehen, eine höhere Konzentration als die Vorderwürze [134, 216]. Während die Gesamtpolyphenole gleich blieben, nahmen die niedermolekularen Polyphenole wie Anthocyanogene und Tannoide während der Würzekochung ab.

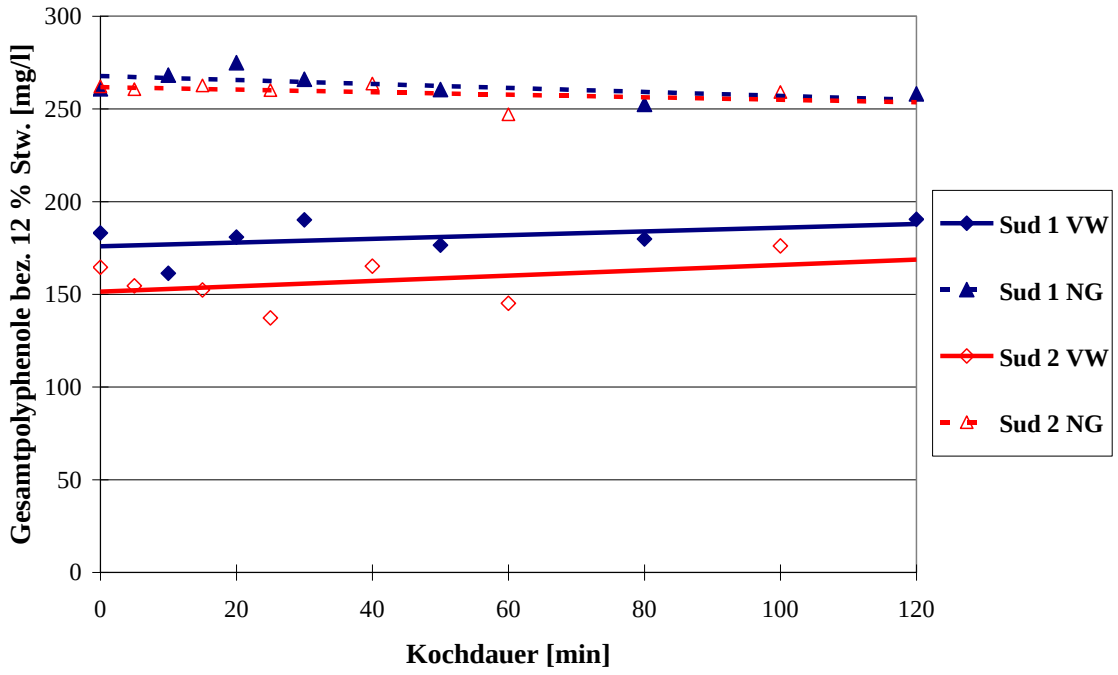


Abbildung 136: Polyphenolgehalt von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Aminosäuren, Freier Aminostickstoff und löslicher Stickstoff bez. 12 % Stw.

Die untersuchten Aminosäuren waren : Asparaginsäure (Asp), Glutaminsäure (Glu), Asparagin (Asn), Serin (Ser), Glutamin (Gln), Histidin (His), Glycin (Gly), Threonin (Thr), Arginin (Arg), Alanin (Ala), γ-Aminobuttersäure (GABS), Tyrosin (Tyr), Valin (Val), Methionin (Met), Tryptophan (Trp), Phenylalanin (Phe), Isoleucin (Ile), Leucin (Leu), Lysin (Lys)

Die Aminosäuren Lys, Leu, Phe, Met, Ser, Gly und Ile nahmen bei der Vorderwürze und den Nachgüssen während der Kochung leicht ab, wie auch der Gehalt an Freiem Aminostickstoff (FAN) und löslichem Gesamtstickstoff. Die Aminosäuren Asp, Trp, GABS, Ala, Asn, Glu, His, Thr, Arg, Tyr und Val nahmen bei der Vorderwürze leicht ab, blieben aber bei den Nachgüssen konstant. Auffällig ist die starke Reduzierung der Aminosäuren und des FAN-Gehaltes innerhalb der ersten 10 min Kochzeit. Dies deckt sich mit Beobachtungen von *Kühbeck* [163], welcher in der Aufheizphase und innerhalb der ersten 10 min Kochzeit eine Dispersitätsgradvergröberung festgestellt hat. Die Partikelgrößenverteilungen haben sich in dieser Zeit hin zu größeren Partikeln verschoben, blieben aber während einer anschließenden einstündigen Kochung unverändert. Dies ist ein weiterer Hinweis, dass der Aufheizphase besondere Beachtung geschenkt werden soll.

Der Abbau von Gln während der Würzekochung [11, 187], während der Kurzzeiterhitzung [156] und bei der Bieralterung [115] ist bekannt und verhält sich bei beiden Läuterfraktionen gleich wie Abbildung 137 zeigt.Die blauen Linien zeigen den Verlauf der Summe der Aminosäuren, die roten Linien den Verlauf der Aminosäure Glutamin.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Streckeraldehyde während der Würzekochung aus den korrespondierenden Aminosäuren und Kohlenhydraten gebildet werden [105]. *Schieberle* [252] berichtet, dass Sauerstoff und Licht bei der Bieralterung die Bildung von Streckeraldehyden forcieren. Außerdem sollen Lipidoxidationsprodukte auch zur Bildung von Streckeraldehyden beitragen [114, 332].

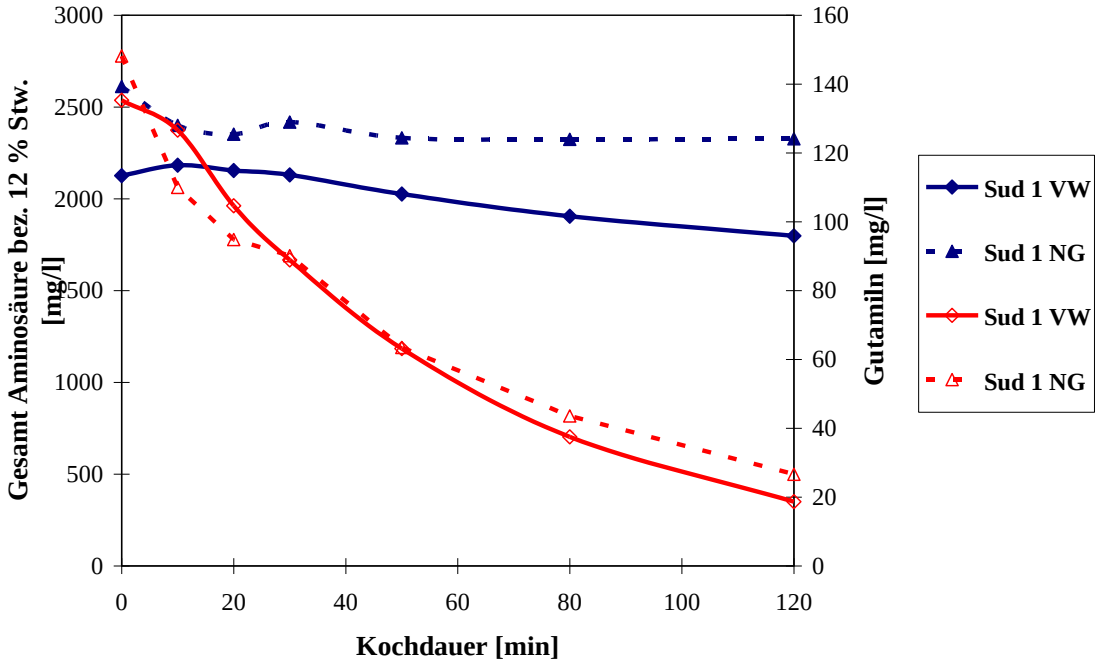


Abbildung 137: Gesamtaminosäuren und Glutamin von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während einer Kochung

Bei den Kochversuchen zeigte sich, dass die Aminosäurenkonzentrationen nach 10 – 20 min Kochzeit stagnierten, obwohl genügend Edukte vorhanden waren. Eine Bilanzierung des Strecker-Abbaus über die Konzentrationen an Aminosäuren und Strecker-Carbonylen ist nicht möglich, da sich die Konzentrationen um den Faktor 1000 unterscheiden. Eine Vorhersage der Carbonylkonzentration und somit der Geschmacksstabilität über den Abbau der Aminosäuren ist sinnlos.

Thiobarbitursäurezahl (TBZ) bez. 12 % Stw.

Die Zunahme der TBZ ist bei Vorderwürze und Nachgüssen gleich und erwartungsgemäß linear, da es sich um eine Reaktion nullter Ordnung handelt. Die Abnahme der Aminosäure Glutamin aus Abbildung 137 deckt sich mit der Zunahme der TBZ aus Abbildung 138.

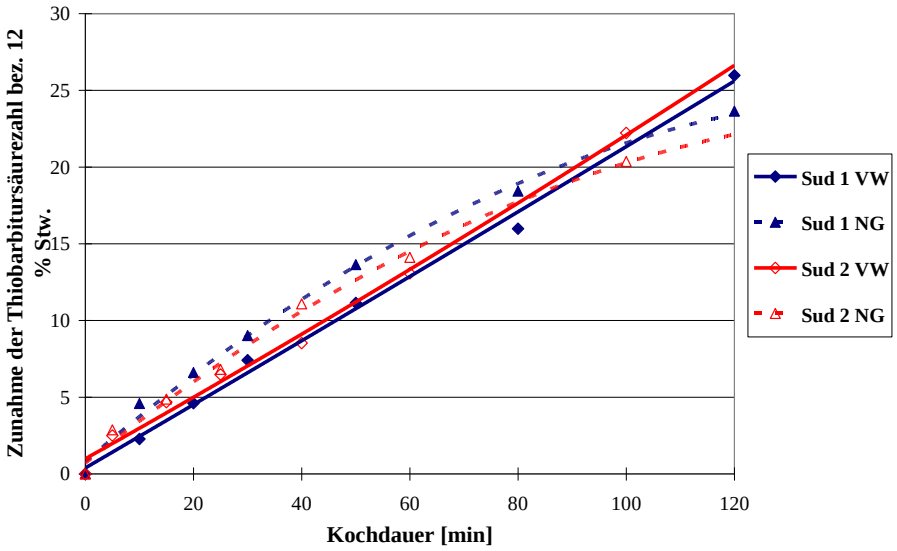


Abbildung 138: Zunahme der Thiobarbitursäurezahl (Δ TBZ) von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Vergärbare Zucker bez. 12 % Stw.

Vorderwürze und Nachgüsse haben die gleiche Zuckerzusammensetzung, welche sich während der Kochung nicht ändert. Eine Voraussage der Maillard-Reaktion (Geschmacks-stabilität) über die Abnahme der reduzierenden Zucker ist wegen der Konzentrations-unterschiede nicht möglich.

Phenolcarbonsäuren bez. 12 % Stw.

Es zeigte sich kein Unterschied zwischen Vorderwürze und Nachgüssen und die Werte blieben über die Kochung konstant.

Freies Dimethylsulfid (DMS) bez. 12 % Stw.

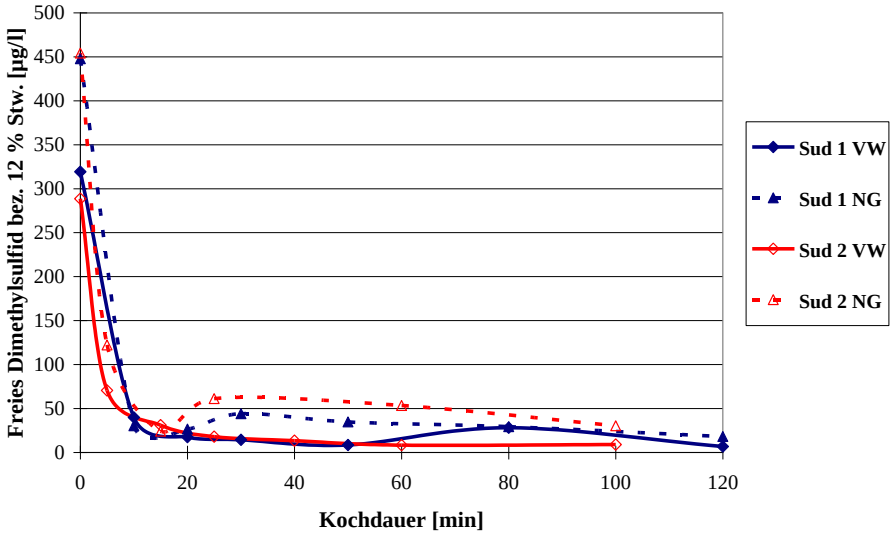


Abbildung 139: Freies Dimethylsulfid (DMS) von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Freies Dimethylsulfid (DMS_{frei}) verdampfte unter eine Konzentration von 50 ppb in Würze innerhalb 10 min wie Abbildung 139 zeigt. Es gab weder Unterschiede in der Spaltung des DMS-Precursors, noch hinsichtlich der Ausdampfung von DMS_{frei} zwischen Vorderwürze und Nachgüssen. Dies deckt sich mit Erfahrungen aus der Praxis, wie sie in Kapitel 7.1, S. 122 vorgestellt wurden. Gleichzeitig ist dies der Beweis, dass ein scale-up vom Pilotsudwerk (60 l) auf den Industriemaßstab zulässig ist. Zur Reduzierung von DMS_{frei} kommen unter den neuen Kochsystemen vor allem die Nachverdampfer- und Würzevorkühlsysteme in Frage.

Würzearomakomponenten bez. 12 % Stw.

In Tabelle 20 sind die Konzentrationen flüchtiger Würzeinhaltstoffe von Vorderwürze- und Nachguss-Suden aufgeführt. Bei Kochbeginn waren, bezogen auf 12 % Stammwürze, in den Nachgüssen weit mehr Aromastoffe als in der Vorderwürze, besonders bei den Lipidabbau-produkten.

Tabelle 20: Würzearomastoffe von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während einer Kochung (Sud 1)

Würzearomastoffe	Kochzeit [min)	0	10	20	30	50	80	120
3-Methylbutanal [µg/l]	Sud 1 VW	279.9	39.8	13.8	12.4	13.6	40.9	34.6
	Sud 1 NG	385.9	20.7	12.2	18.3	23.2	29.3	35.1
2-Methylbutanal [µg/l]	Sud 1 VW	95.6	13.3	5	4.5	4.7	12.1	11.1
	Sud 1 NG	144.9	8.8	5.6	7	7.8	9.2	10.9
Methional [µg/l]	Sud 1 VW	62.2	58.2	48	35	29.9	33.4	35.6
	Sud 1 NG	65.1	62.2	60.9	44.2	49.3	45.3	43.5
Benzaldehyd [µg/l]	Sud 1 VW	6.6	4.9	2.5	1.4	1	1.2	0.9
	Sud 1 NG	12.9	6.2	4.1	4	2.6	2.3	2.1
2-Phenylacetaldehyd [µg/l]	Sud 1 VW	110	95.8	72	54.9	40.2	57.6	55.8
	Sud 1 NG	125.4	106.8	96.9	94.4	79.7	74.6	73.8
Σ Streckeraldehyde [µg/l]	Sud 1 VW	554.3	212.1	141.4	108.3	89.4	145	138
	Sud 1 NG	734.2	204.6	179.7	167.8	162.6	160.6	165.4
Pentanal [µg/l]	Sud 1 VW	28.1	5.6	1.9	2.4	1.2	1.7	1.4
	Sud 1 NG	45.6	4.8	3.3	3.4	2.8	3.2	2.7
2-Pentanon [µg/l]	Sud 1 VW	8.3	7.1	6.3	6.3	5.6	5.5	4.4
	Sud 1 NG	16.3	15.1	15	13.7	12.6	12.7	11.1
Hexanal [µg/l]	Sud 1 VW	163.8	25.8	4.1	8.9	1.4	1.8	1
	Sud 1 NG	273.5	10.5	3.9	4.1	3.8	3.6	3.1
Heptanal [µg/l]	Sud 1 VW	7.4	2.4	1.4	1.6	1.4	1.7	1.4
	Sud 1 NG	16.3	3.2	2.8	3	2.8	3.2	3.4
trans 2-cis 6-Nonadienal [µg/l]	Sud 1 VW	1.1	0.8	0.8	0.8	0.6	0.4	0.4
	Sud 1 NG	2	1.9	1.3	1.1	1	1.1	0.8
2-Furfural [µg/l]	Sud 1 VW	130.5	132.7	124.4	110.5	106.4	116.8	111.6
	Sud 1 NG	154.7	143.4	143.8	132.5	139.1	131.9	125.8
2-Acetylfuran [µg/l]	Sud 1 VW	15.9	14	11.6	11.7	9.7	8.6	7.2
	Sud 1 NG	27.7	27.1	26.6	25.9	21.7	20	18.1
γ-Nonalacton [µg/l]	Sud 1 VW	8.3	8.1	7.3	5.9	4.7	3	1.4
	Sud 1 NG	16.3	14.8	15.6	13.6	10.7	7.9	6
3-Methylbutanol [µg/l]	Sud 1 VW	114.5	61.9	11.6	5.4	1.4	1.4	1.2
	Sud 1 NG	159.6	49.4	20.3	13.4	6.8	4.3	3.6
2-Methylbutanol [µg/l]	Sud 1 VW	27.3	3.1	2.2	1.4	0	0	0
	Sud 1 NG	40.7	12.1	3.9	3.2	4.6	3.5	1.7
1-Pentanol [µg/l]	Sud 1 VW	62.2	36.9	8	3.9	0.7	0.6	0.4
	Sud 1 NG	89.6	30.3	12.3	8.1	4.5	2.3	1.1
1-Hexanol [µg/l]	Sud 1 VW	72.8	31.7	4.1	1	0.3	0.2	0.1
	Sud 1 NG	131.9	25.5	7.3	4.6	2.3	1.1	0.5
1-Octanol [µg/l]	Sud 1 VW	1.9	1.5	0.7	0.3	0.3	0.3	0.2
	Sud 1 NG	3.7	1.6	2.7	1.2	2.3	1.1	0.5
1-Octen-3-ol [µg/l]	Sud 1 VW	2.5	1.3	0.7	0.5	0.4	0.3	0.3
	Sud 1 NG	4.7	1.8	1.1	0.8	0.7	0.7	0.6
Phenylethanol [µg/l]	Sud 1 VW	110	112	105.5	92	85	67.9	52.4
	Sud 1 NG	153.1	148.2	154.7	152.3	129	106.5	98

Die Verdampfung von 2-methyl-Butanal ist in
Abbildung 140 dargestellt. Nach einer guten Ausdampfung innerhalb der ersten 10 min Kochzeit kann ein Zuwachs nach ca. 50 min festgestellt werden. Der Aromastoff 3-methyl-Butanal verhält sich ähnlich. Dies bestätigt die Erfahrungen aus der Praxis, wie sie in Abbildung 104, S. 129 abgebildet sind.

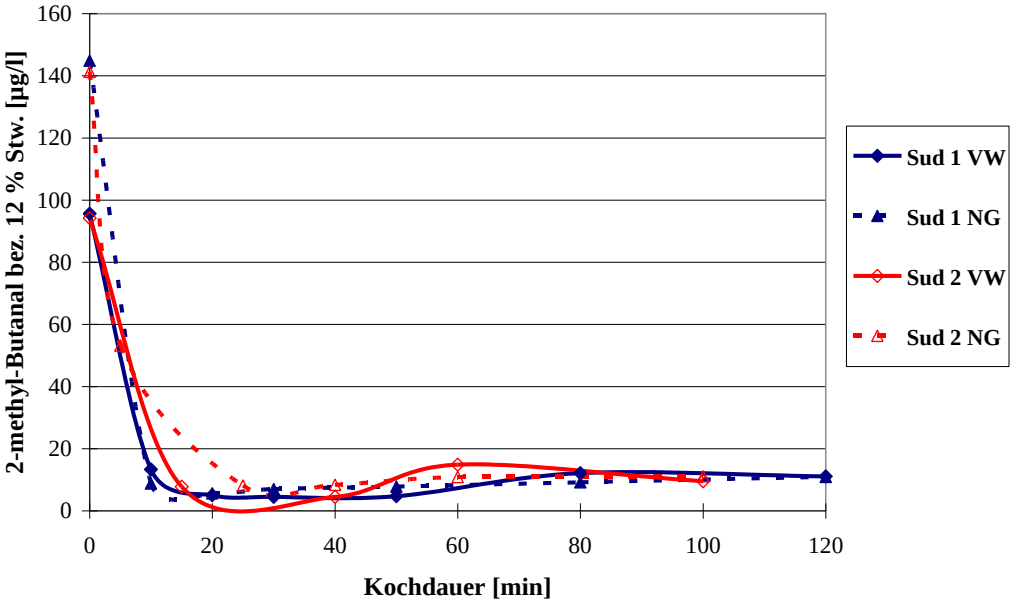


Abbildung 140: Konzentration von 2-methyl-Butanal von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Ähnlich wie das 2- und 3-methyl-Butanal verhalten sich Methional und Phenylacetaldehyd, wie Abbildung 141 zeigt. Die Ausdampfung verläuft langsamer, da die Siedepunkte unterschiedlich sind, wie aus Tabelle 21 ersichtlich ist. Auch hier folgt nach der Ausdampfung wieder eine Zunahme nach ca. 50 min Kochzeit.

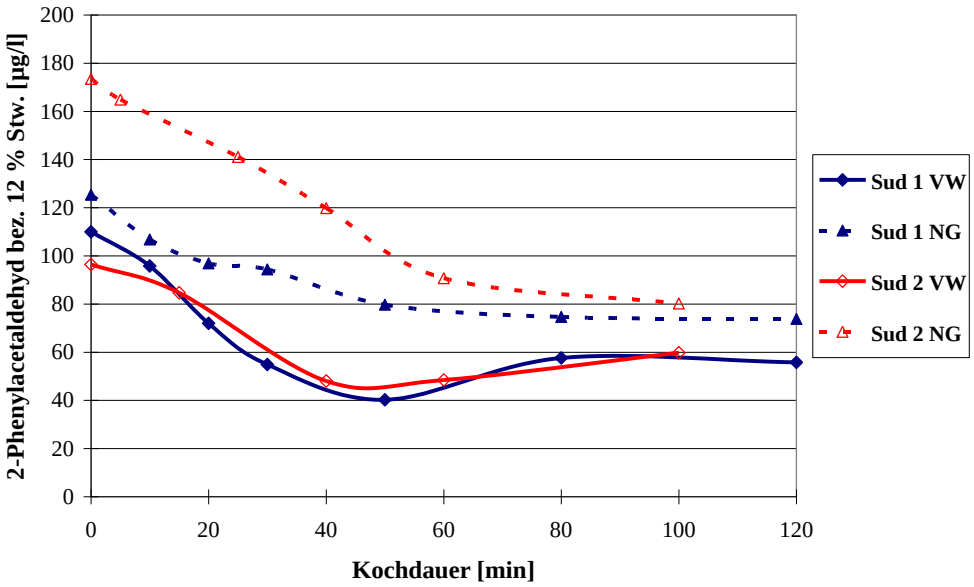


Abbildung 141: Konzentration von 2-Phenylacetaldehyd von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Die Lipidabbauprodukte Hexanal, Heptanal, Pentanal, 1-Pentanol und 1-Hexanol wurden ebenso schnell ausgedampft. Der Verlauf von Hexanal in Industriesudwerken ist in Abbildung

106, S. 130 dargestellt und deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Pilotsudwerk. 2-Pentanon und γ-Nonalacton sind schwerer ausdampfbar wie Abbildung 143 zeigt. Bemerkenswert ist die höhere Konzentration, bez. 12 % Stammwürze, bei den Nachgüssen. Dies verwundert nicht, da in den Nachgüssen erhöhte Konzentrationen an langkettigen Fettsäuren vorliegen wie Abbildung 142 zeigt. [163-165, 167].

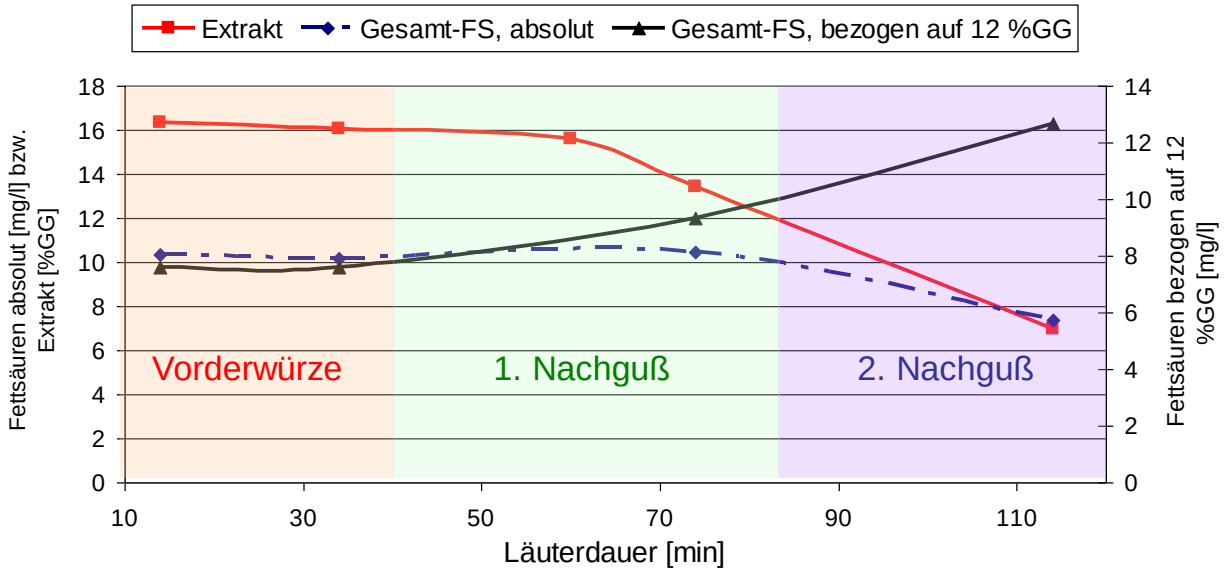


Abbildung 142: Verlauf langkettiger Fettsäuren (C 14 – C 18:3) während der Abläuterung

Besonders γ-Nonalacton sollte reduziert werden, da der Geschmacksschwellenwert in Bier mit 11,2 µg/l [293] sehr gering ist. *Hertel* [110] konnte bestätigen, dass Lipidabbauprodukte während der Würzekochung nicht nachgebildet werden. Dies eröffnet die Möglichkeit durch intensive Kochung diese unerwünschten Aromastoffe auszudampfen. Eine lange Kochung der Nachgüsse wäre somit von Vorteil.

Neben der Aromastoffbildung während der Würzekochung und der Bieralterung gibt es Substanzen, welche sich während der Gärung stark verändern. Als Beispiel kann das γ-Nonalacton genannt werden, dessen Konzentration bereits in den ersten zwei Gärtagen stark zunimmt [91, 293]. Dennoch ist noch ungeklärt, wie stark die Ausdampfung von Lipidabbauprodukten während der Würzekochung zur Vermeidung eines Alterungsgeschmackes im Bier beiträgt.

Besonders bei Rohfruchtbieren mit einer geringen Geschmacksmatrix können bereits geringe Konzentrationen unerwünschter Aromastoffe zu einem Fehlgeschmack beitragen. Für diese Fälle wäre eine besonders weitgehende Ausdampfung während der Würzekochung wünschenswert.

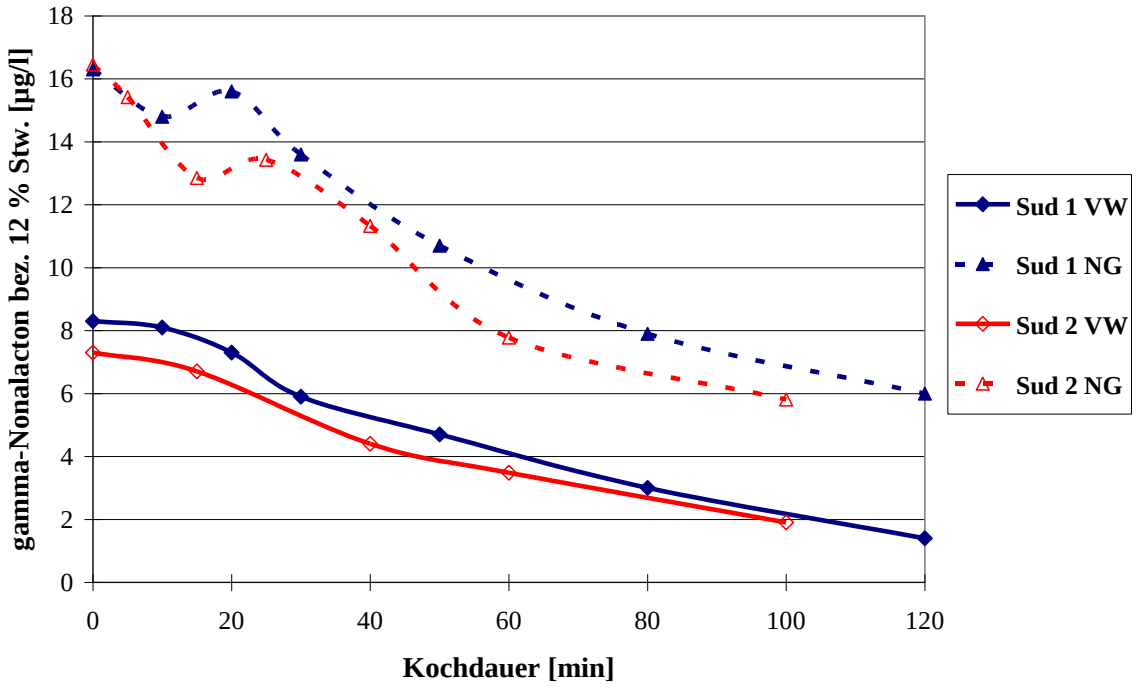


Abbildung 143: Konzentration von γ-Nonalacton von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)

Um die Kochung zu optimieren bedarf es Zielvorgaben hinsichtlich der Aromastoff-konzentrationen in Anstellwürze. Hierfür geben die Geschmacksschwellenwerte in Bier aus Tabelle 21 einen guten Hinweis. Es fällt auf, dass die Geschmacksschwellen-Konzentrationen meist sehr hoch sind, im Vergleich zu den Konzentrationen die in Würze gefunden werden. Ausnahmen sind 3-methyl-Butanal, Methional, 2-Phenylacetaldehyd, Heptanal, trans-2-cis-6-nonadienal und γ-Nonalacton. Zur besseren Vorstellung sind in Tabelle 21 die Siedepunkte, der Aromaeindruck und die Herkunft der Aromastoffe aufgeführt.

Tabelle 21: Geschmacksschwellenwerte von Würzearomastoffen [183-185, 281, 293, 311]

	Schwellenwert in Bier (ppb)	Siedepunkt (°C)	Aromaeindruck	Herkunft
3-Methylutanal	600	91-93	ungeschälte Banane, malzig	Leucin
2-MethylButanal	1250	70	grünes Gras	Isoleucin
Methional	<3*, 50-250	160-165	gekochte Kartoffeln	Methionin
Benzaldehyd	2000	179	Mandeln, fruchtig	Phenylglycin
2-Phenylethanal	<4*, 1600	195	Honig	Phenylalanin
Pentanal	500	102	Gras, Banane	Linolsäure C18:2
2-Pentanon	30000	101-103	Geranien	Linolsäure C18:2
Hexanal	350	129-131	bitter, weinähnlich	Linolsäure C18:2
Heptanal	75	153	bitter, weinähnlich	Ölsäure C18:1
trans 2-cis 6-Nonadienal	0.05	94-95	grüne Blätter, Gurke	Linolensäure C18:3
2-Furfural	150000	162	Mandel, fruchtig	cyclisierte Aminosäure
2-Acetylfuran	80000	67	verbrannt	1-Deoxyoson Weg
γ-Nonalacton	11.2, 80	121-122	fruchtig, Kokosnuss	Hydroxyfettsäure
3-Methylbutanol	70000	131-132	Banane	Leucin
2-Methylbutanol	65000	160-165	Banane	Isoleucin
1-Pentanol	80000	138	medizinisch	Linolsäure C18:2
1-Hexanol	4000	157	grün	Linolsäure C18:2
1-Octanol	900	188-198	Kokosnuss	Ölsäure C18:1
1-Octen-3-ol	200	173-175	grüne Blätter	Linolsäure C18:2
Phenylethanol	125000	218-220	Rose, Honig	Phenylalanin

*Der Schwellenwert wurde mittels eines Triangel-Tests festgestellt, bei welchem Proben mit Aromastoffen versetzt wurden. Die Verkoster erkannten einen Unterschied zwischen der dotierten Probe und dem Vergleich ohne Aromazusatz [281].

Interessant wäre zu erfahren, wie sich die relevanten Aromastoffe in der Vorderwürze und in den Nachgüssen verhalten. Um die Kochung zu optimieren muss geprüft werden, welche Kombination zwischen Vorderwürze- und Nachgusskochung optimal ist.

Simulation der Aromastoffkonzentration bei verschiedenen Kochzeiten von Vorderwürze und Nachgüssen

Bei der Simulation wurden die Daten aus den Kochversuchen auf 12 % Stammwürze bezogen und zur besseren Anschauung in 3-dimensionalen Graphiken dargestellt. Die 2-dimensionalen Graphiken wurden erstellt, da sie sich besser für die Auswertung hinsichtlich der Kochzeiten eignen.

Abbildung 144 zeigt die Konzentrationen von 3-methyl-Butanal bei unterschiedlichen Kochkombinationen als 3-D-Graphik. Abbildung 145 zeigt eine zweidimensionale Darstellung.

Folgende Aussagen können getroffen werden:

- Um die Ausdampfung des Streckeraldehyds 3-methyl-Butanal zu bewerkstelligen sollten die Vorderwürze (ca. 16 % Stw.) und die Nachgüsse (ca. 7 % Stw.) gekocht werden. Wird eine Fraktion nicht gekocht, so kann eine bestimmte Konzentration nicht unterschritten werden;
- Die Ausdampfung ist bei der Vorderwürze und den Nachgüssen gleich und somit unabhängig von der Stammwürzekonzentration;
- Der Geschmacksschwellenwert in Bier von 600 ppb wird weit unterschritten. Jedoch findet eine Nachbildung bei der Bieralterung statt, was darauf hindeutet, dass möglichst geringe Konzentrationen anzustreben sind;
- Ab einer Kochzeit von ca. 45 min kann eine Konzentrationszunahme bei der Vorderwürze- und Nachgusskochung beobachtet werden. Ob dies positiv oder negativ für die Bieralterung ist, muss erst durch Brauversuche gezeigt werden.

In weiteren Abbildungen werden 2-Phenylacetaldehyd und die Summe der Streckeraldehyde dargestellt.

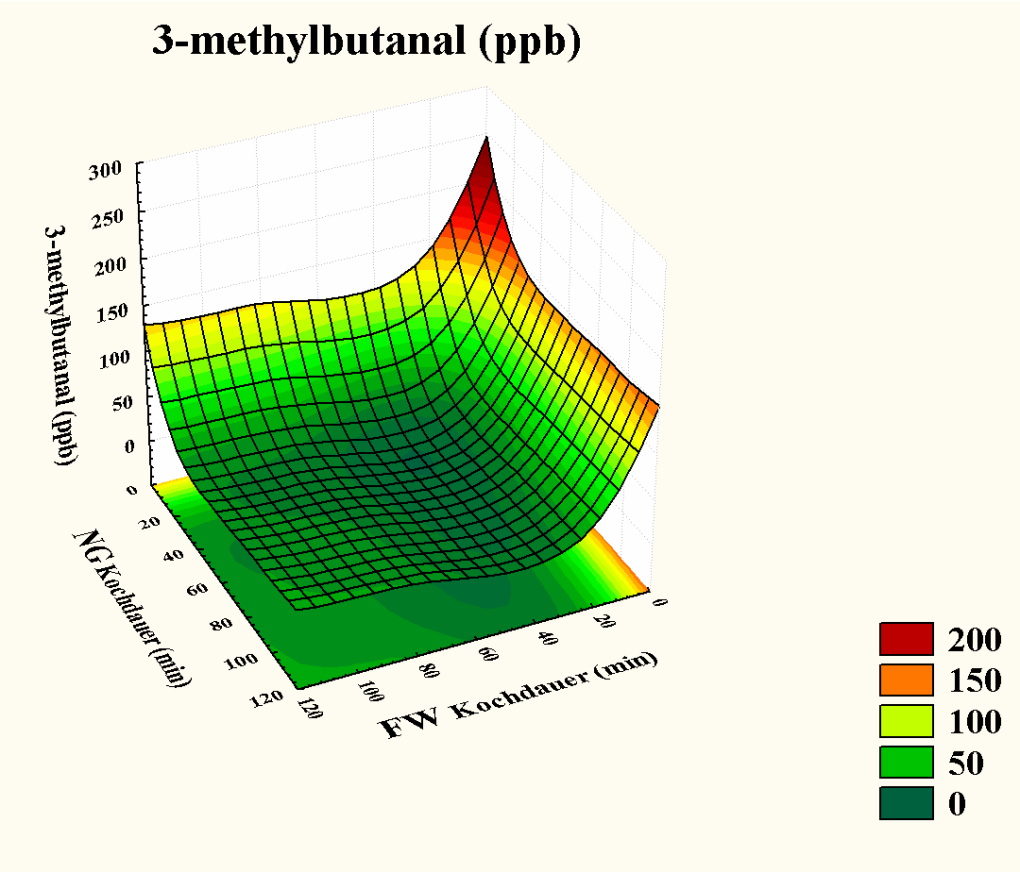


Abbildung 144: **Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw.**

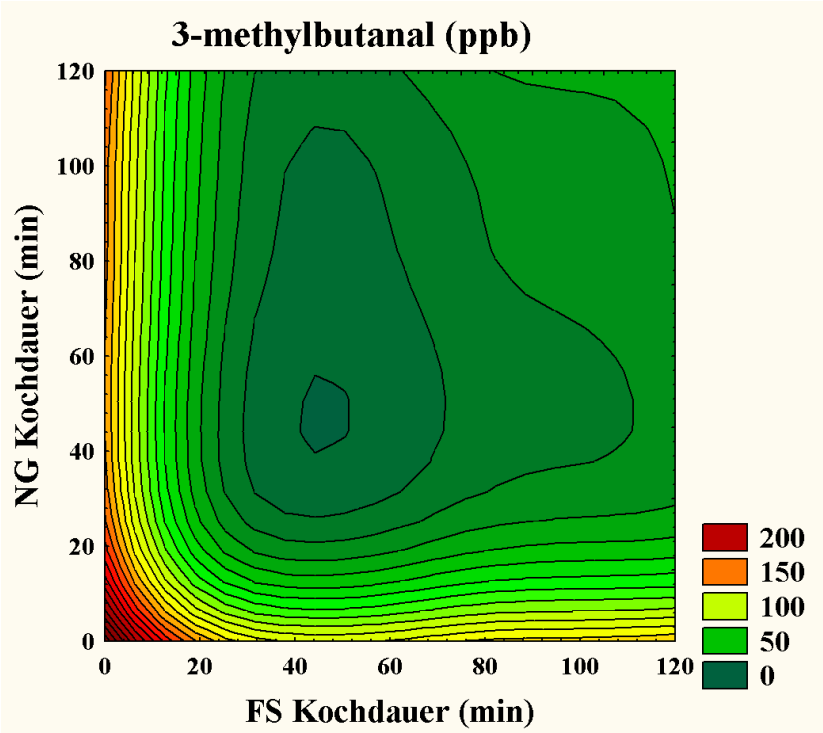


Abbildung 145: **Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw.**

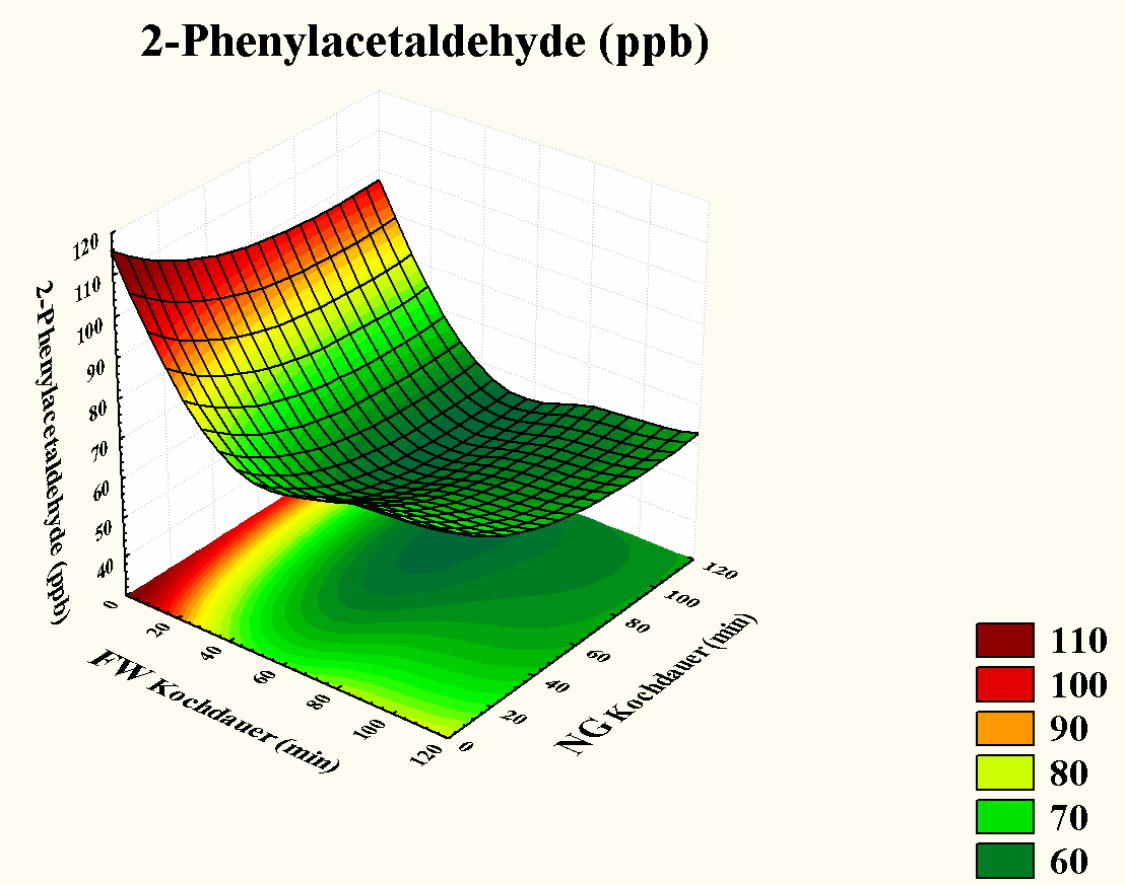


Abbildung 146: **Simulation der Konzentration von 2-Phenylacetaldehyd als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw.**

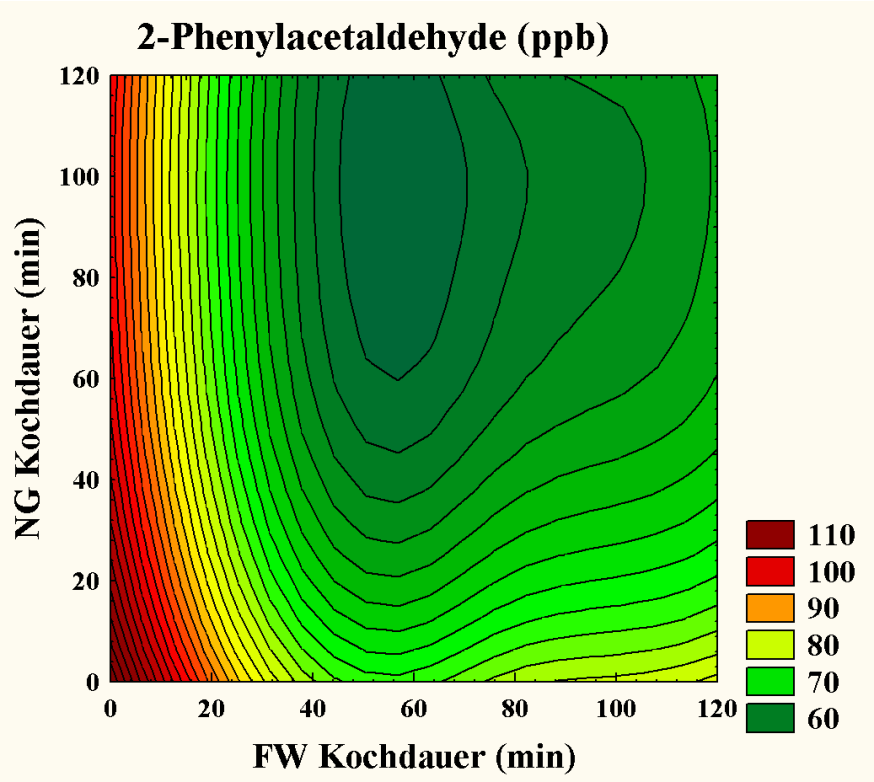


Abbildung 147: **Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw.**

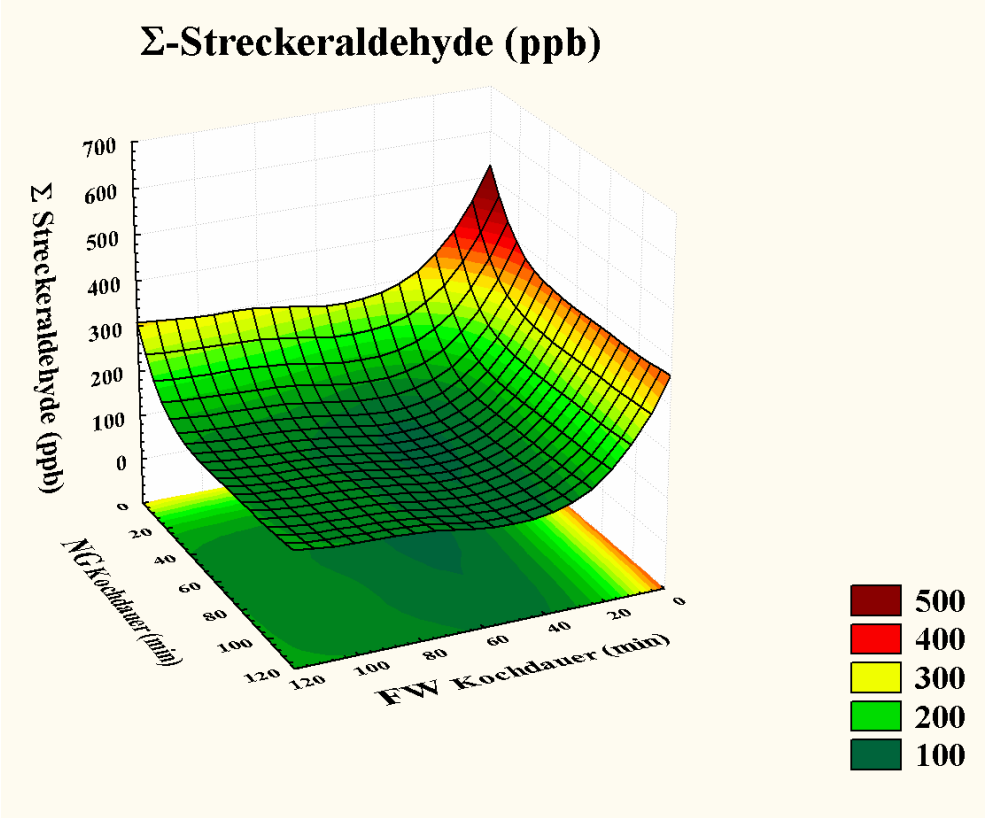


Abbildung 148: Simulation der Summe der Streckeraldehyde als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw.

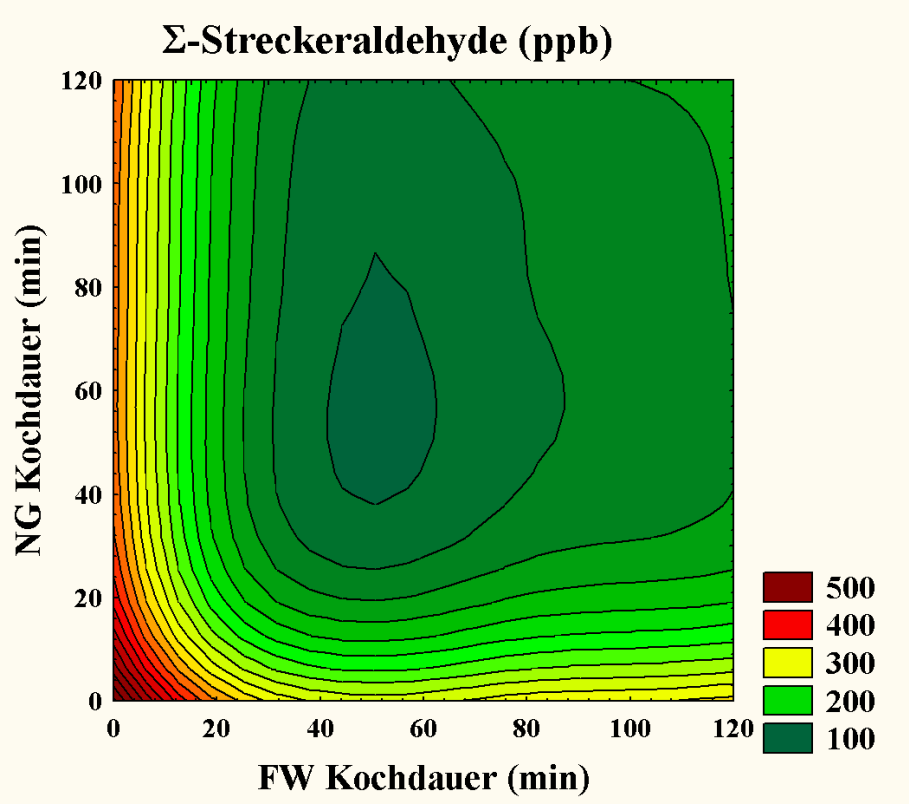


Abbildung 149: Simulation der Summe der Streckeraldehyde bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw.

Hinsichtlich der Ausdampfung von Aromastoffen aus der Maillard-Reaktion hat sich gezeigt, dass eine Kochzeit von ca. 50 min bei der Vorderwürze und den Nachgüssen gleichermaßen ein Optimum darstellt. Dies bestätigt Erfahrungen aus der Praxis, weswegen sich Kochzeiten von maximal einer Stunde in modernen Brauereien durchgesetzt haben. Es wurde bereits beschrieben, dass das Kochverhalten des Pilotsudwerkes zu dem moderner Industriesudwerke vergleichbar ist (scale-up). Offen bleibt die Frage, ob ein Anstieg von Maillard-Produkten bzw. Streckeraldehyden bei längerer Kochung positiv oder negativ für die Geschmacksstabilität des Bieres ist. Erst über die Beurteilung der Geschmacksstabilität im fertigen Bier kann eine Antwort gefunden werden. Sudversuche (Vergleichssude, fraktionierte Kochung) bis zum Bier sind derzeit in Arbeit.

Bezüglich der Ausdampfung von Aromastoffen aus dem Lipidabbau kann festgestellt werden, dass die Kochung möglichst lange erfolgen soll, da diese Stoffe nicht nachgebildet werden sondern nur ausdampfen. Eine getrennte Kochung von Vorderwürze und Nachgüssen wäre in diesem Fall von Vorteil. In den Nachgüssen wurden, absolut gesehen, bei vielen Aromastoffen aus dem Lipidstoffwechsel vergleichbare Konzentrationen wie in der Vorderwürze gefunden, obwohl der Extraktgehalt der Vorderwürze mehr als doppelt so hoch wie in den Nachgüssen war. Eine intensivere Kochung und Ausdampfung bei den Nachgüssen würde die Lipidabbauprodukte reduzieren und wäre bezüglich der thermisch induzierten Maillard-Reaktionsprodukte vertretbar, da in den Nachgüssen der Extraktgehalt niedriger ist als in der Vorderwürze bzw. in der Gesamtwürze.

Nachdem die Möglichkeiten beschrieben wurden, wie die Aromastoffzusammensetzung der Würzen durch die Kochung beeinflusst werden kann, sollten nicht flüchtige Substanzen wie z. B. dieTrubbelastung untersucht werden. Es ist bekannt, dass dies Auswirkungen auf die Gärung und Bierqualität hat.

Quellen

Diplomarbeiten von Hiroshi Yamashita und Alexander Hohrein sowie eigene Veröffentlichungen [163-165, 167, 330]

7.3 Einfluss des Kühltrub-Gehaltes auf die Bierqualität

Ob der Kühltrub entfernt werden muss, ist nicht eindeutig geklärt. Empfohlen wird eine Kühltrubentfernung um 50 % bei beschleunigten Gär- und Reifungsverfahren unter Verwendung von geschlossenen Würzebehandlungsanlagen [215]. Alle Verfahren zur Kühltrubentfernung verursachen jedoch Kosten durch ihren Energieverbrauch, die Investition und die Reinigung. Diese Kosten wie auch ein eventuelles mikrobiologisches Risiko müssen gerechtfertigt sein. Das Produkt muss also einen erkennbaren Nutzen durch die entsprechende Behandlung davontragen. Da die Meinungen über die Notwendigkeit der Kühltrubentfernung geteilt sind, wurde in mehreren Diplomarbeiten der Nutzen der Kühltrubabtrennung in der Praxis untersucht[48]. Eine immer wichtigere Eigenschaft von Bier ist die Geschmacksstabilität, da sich der Vertriebsweg in seiner Dauer von der Brauerei zum Verbraucher ständig verlängert. Ziel war es, den Einfluss der Kühltrubentfernung auf den Geschmack und die Geschmacksstabilität von Bier zu untersuchen, um so Aussagen über ihre Notwendigkeit treffen zu können.

Die Versuche fanden im Praxismaßstab in mehreren Braustätten statt, die mit den Verfahren der Flotation, der Filtration und der Zentrifugation arbeiteten. Bei Kühltrub handelt es sich um Trubstoffe, die bei Temperaturen unter 70 °C entstehen. Der Großteil der Trubbildung findet jedoch bei Temperaturen unterhalb von 20 °C statt. Normwerte für Kühltrub in Würze bei 0 °C sind 150 - 350 mg/l [200]. Er setzt sich aus 50 % Eiweiß, 15 - 25 % Polyphenolen und 20 - 30 % höhermolekularen Kohlenhydraten zusammen [215]. Die reinen Kühltrub-teilchen ohne Eintrag von Heißtrubteilchen und Hopfentrub haben einen Durchmesser von kleiner 1,0 µm. Zum Vergleich: Eine Hefezelle hat einen Durchmesser von 6 - 10 µm. Bei einer Kühltrubbestimmung muss berücksichtigt werden, dass nicht entfernter Heißtrub in der Probe vorhanden sein kann. Beeinflussen lässt sich der Kühltrubgehalt mengenmäßig in steigender Weise durch die Verwendung inhomogener Malze mit Ausbleibern (nicht gekeimten Körnern), polyphenolreichen Hopfengaben und feinem Schrot wie bei Maischefiltern. Eine Erhöhung des Polyphenol- und des Eiweißeintrages bewirkt also mehr Trubausfall. Eine Verringerung des Kühltrubgehaltes lässt sich durch intensives Maischen (z.B. Dekoktionsverfahren) sowie Verwendung von gut gelösten Malzen und Rohfrucht (geringerer Eintrag von Eiweiß und Polyphenolen) erreichen.

Verglichen mit dem Heißtrub lässt sich Kühltrub aufgrund seiner wesentlich geringeren Teilchengröße schwer abscheiden. Eine völlige Entfernung ist nahezu unmöglich. Die untersuchten Verfahren zur Kühltrubentfernung waren folgende:

Zentrifugation

Durch Rotation werden in einem Separator die Trubteilchen, die eine höhere Dichte als die Würze besitzen, von dieser abgeschieden. Mit der Rotationsgeschwindigkeit läßt sich der Grad der Ausscheidung beeinflussen. Je nach Betriebsweise können 30 - 70 % des Kühltrubes entfernt werden.

Filtration

Die Filtration der Würze über Perlite bietet die Möglichkeit, den Kühltrubeintrag um 90 % zu reduzieren. Mit Kieselgurwürzefiltern ist es bei einer Filtrationstemperatur um 0 °C möglich, 95 % des Kühltrubes zu entfernen. Der Kieselgurverbrauch beträgt 50 - 100 g/hl.

Flotation

Bei der Flotation werden feine Luftbläschen mittels Venturidüse, Keramikkerze oder statischem Mischer in die Würze eingebracht. Danach wird die Würze in den Flotationstank gepumpt, um zwei bis sechs Stunden zu ruhen. Während dieser Standzeit steigen die Luftbläschen auf und reißen Partikel, auf die sie treffen, mit an die Flüssigkeitsoberfläche. Die Menge der eingebrachten Luft liegt zwischen 20 und 60 l Luft pro hl Würze, wobei Abscheideraten von 50 - 60 % erreicht werden können [113, 282].

In den drei Betrieben (A, B, C), die im Rahmen der vorliegenden Arbeiten untersucht wurden, betrug das Sudvolumen bei allen Versuchen ca. 400 hl, vier Sude bildeten eine Gärcharge. Die nach MEBAK [200] analysierten Kühltrubmengen in den verschiedenen Brauereien vor und nach der Kühltrubabtrennung zeigt Abbildung 150.

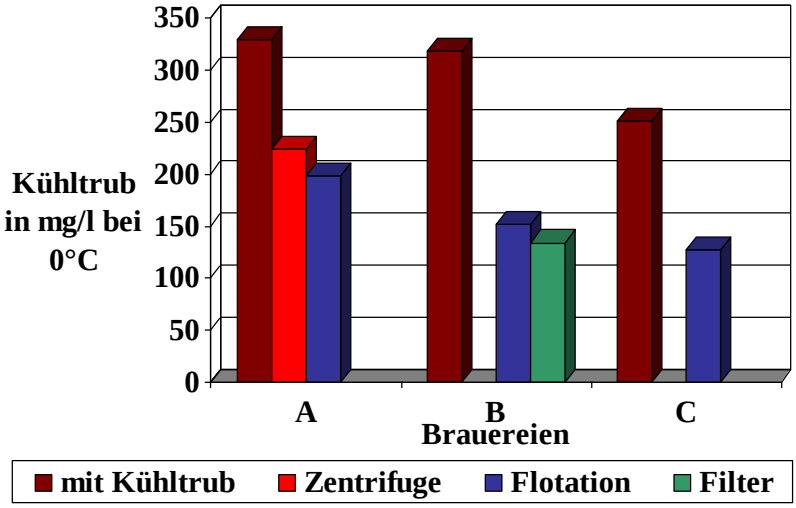


Abbildung 150: Kühltrubmengen vor und nach der Abtrennung in drei Brauereien

Bei der Betrachtung der Kühltrubgehalte der jeweiligen Würzen wird ersichtlich, dass durch Filtration die größte, durch Flotation etwa die halbe und durch Zentrifugation die geringste Menge Kühltrub entfernt wurde. Der Einfluss der Rohstoffe und der Technologie der Würzeherstellung zeigt sich durch die unterschiedlichen Kühltrubgehalte der aus den verschiedenen Brauereien A, B, C produzierten Würzen. Ein direkter Vergleich der Ergebnisse, bezogen auf den absoluten Trubgehalt der Würzen, war aber vor allem aufgrund der unterschiedlichen Maisch- und Gärverfahren der drei Brauereien nicht möglich.

Um die Langzeitauswirkungen der Kühltrubbehandlung auf die Hefe erkennen zu können, muss die Erntehefe mehrfach mit Suden der gleichen Kühltrubbehandlung wieder angestellt werden. Die mangelnde Übereinstimmung der Hefevitalitäten und Hefezellzahlen bei der Vergärung der Würzen lässt auch einen Vergleich der Gärungen unterschiedlicher Brauereien nicht zu. Wenn man die Gärverläufe innerhalb der Brauereien auswertet, so lässt sich eine tendenzielle Aussage zugunsten der Flotation bezüglich einer beschleunigenden Wirkung auf die Gärung treffen. Dies ist primär durch die ausgiebigere Würzebelüftung (Zweitbelüftung beim Umpumpen aus dem Flotationstank) zurückzuführen. Hierzu zeigt Abbildung 151 die Gärdauer der untersuchten Chargen in Tagen in der untersuchten Brauerei C.

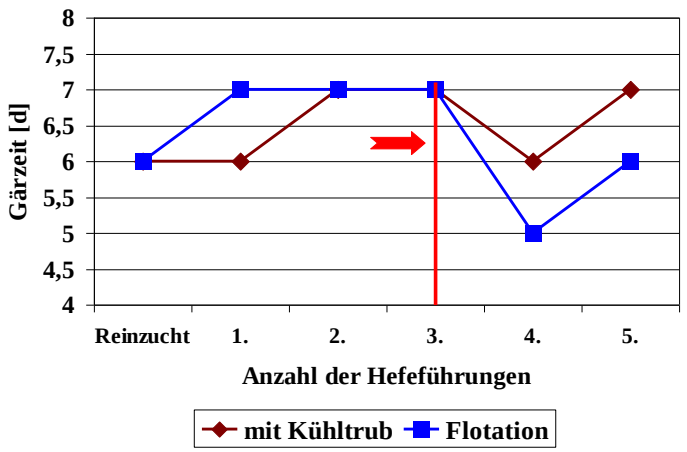


Abbildung 151: Zeit bis zum Erreichen des Gärkellervergärungsgrades in Tagen

Die Behandlung der Hefe war in dieser Brauerei insofern konstant, als geerntete Hefe sofort wieder angestellt wurde. Eine Schwächung des physiologischen Zustandes der Hefe durch die Hefelagerung konnte somit ausgeschlossen werden. Ab der dritten Hefeführung deutete sich eine positive Einflussnahme der Flotation auf den Stoffwechselprozess der Hefe an. Diese Brauerei arbeitete des Weiteren mit dem Verfahren der integrierten Reifung bei 12 °C unter Zugabe von 10 % Kräusen, wobei als Parameter des Reifungsfortschritts der Diacetylgehalt des Bieres erfasst wurde. Abbildung 152 zeigt den Diacetylgehalt der Versuchsbiere am sechsten Reifungstag.

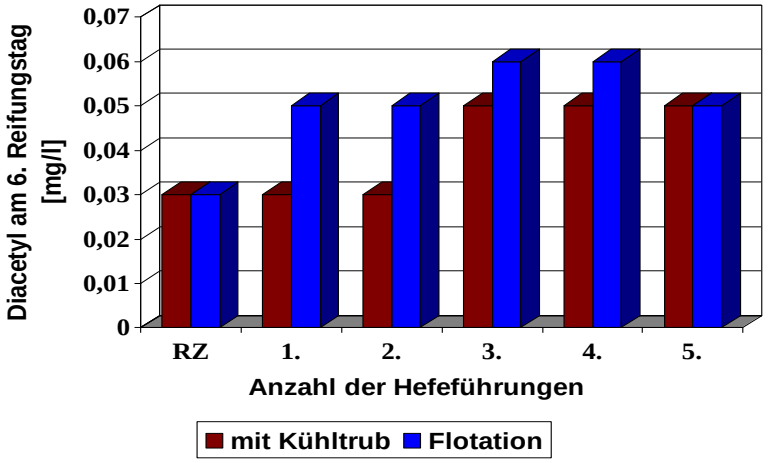


Abbildung 152: Diacetyl am 6. Reifungstag mit Kühltrub oder mit Flotation

Der niedrigere Diacetylgehalt der Biere mit Kühltrub bei niedrigen Führungszahlen deutet auf einen stärkeren Hefestoffwechsel hin. Bei höheren Führungen und damit einhergehender niedrigerer Hefevitalität (z. B. Intracellulärer pH-Wert) und Hefeviabilität (z. B. Anfärbung toter Zellen mit Methylenblau) kann durch eine bessere Sauerstoffversorgung mittels Flotation der physiologische Zustand der Hefe verbessert werden. Bestätigt werden die Ergebnisse durch die Messung des Freien Aminostickstoffes (FAN), wie Abbildung 153 zeigt.

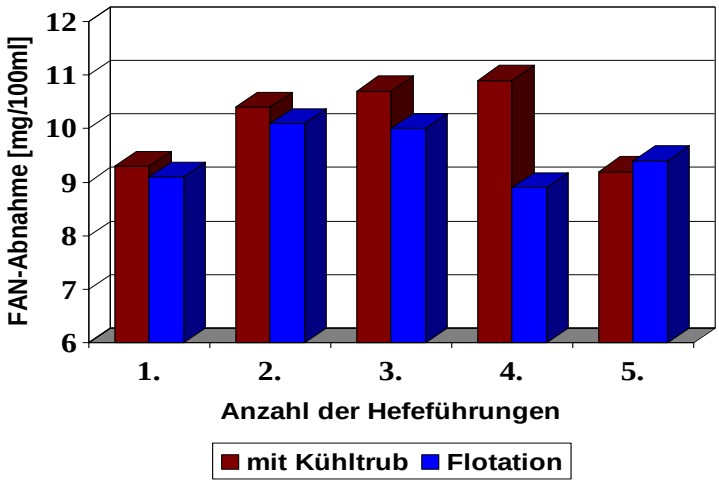


Abbildung 153: Abnahme des Freien Aminostickstoffes (FAN) bei steigenden Hefeführungen

Bis zur vierten Hefeführung kann der Kühltrub den physiologischen Zustand der Hefe verbessern, was zu einer höheren Abnahme des FAN bei der Gärung und Reifung führt. Wird die gleiche Hefe weiter verwendet und der Kühltrub nicht aus der Würze entfernt, so fällt die FAN-Abnahme auf das Niveau der flotierten Gärchargen, wie beim Diacetyl am 6. Gärtag. Die positiven Einflüsse der hohen Sauerstoffversorgung (Flotation) sind stärker als die positiven Einflüsse durch ein erhöhtes Angebot an Wuchs- und Nährstoffen wie z.B. Fettsäuren (Kühltrub). Es liegt nahe, dass Brauereien mit eher schleppenden Gärungen bzw. nicht optimalem Hefemanagement und hohen Hefeführungszahlen auf die Flotation nicht verzichten sollten. Dies trifft vor allem auf Brauereien zu, in welchen die Hefe bei hohen Temperaturen lange gelagert wird.

Zur Ermittlung des Geschmacks wurden die frischen Biere nach DLG-Richtlinie verkostet. Hierbei stellte sich im Kriterium Vollmundigkeit eine statistisch sichere ($\alpha = 0{,}05$) Bevorzugung der unbehandelten Biere der Brauerei C heraus, wie Abbildung 154 zeigt. Somit wurde der Biercharakter durch Kühltrub beeinflusst. In der Tendenz lässt sich eine geringfügig bessere geschmackliche Bewertung der Versuchsreihe mit Kühltrub ableiten.

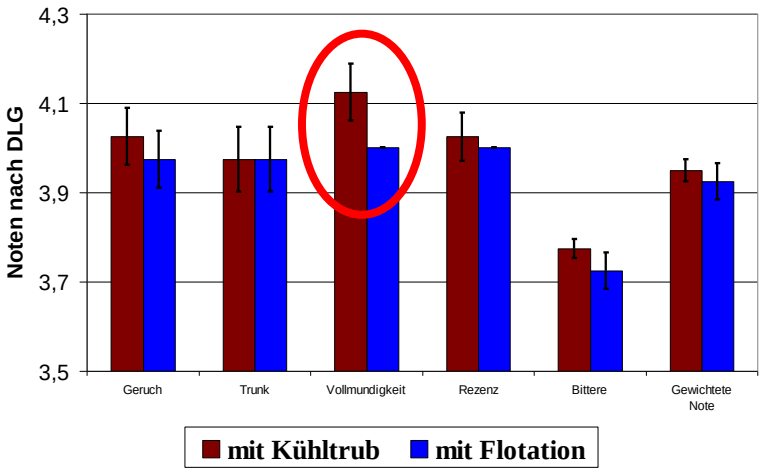


Abbildung 154: DLG-Verkostung frischer Biere mit und ohne Kühltrubentfernung

Betrachtet man die Verkostungsergebnisse der forciert gealterten Biere in Abbildung 155, so fällt auf, dass die Sude mit Kühltrub nicht schlechter abschneiden als die Biere mit Kühltrubentfernung.

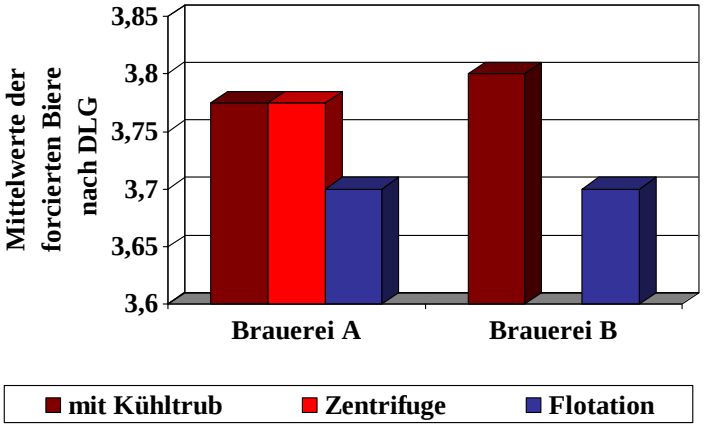


Abbildung 155: DLG-Verkostung forciert gealterter Biere mit und ohne Kühltrubentfernung

Im Sinne einer hohen Geschmacksstabilität wird ein hoher Gehalt an Substanzen gefordert, die Sauerstoff abfangen können, bevor dieser über Oxidationen zu geschmacklichen Veränderungen der Biere führt. Die Ermittlung der „endogenen antioxidativen Aktivität" der Biere erfolgte mittels Elektronen-Spin-Resonanz-Spektroskopie (ESR). Hierbei werden dem Bier freie Radikale zugegeben und die Zeit (Lag-time) gemessen, in welcher das Bier der radikalischen Oxidation standhalten kann. Der Response steigt, wenn das reduktive Potenzial des Bieres erschöpft ist, sodass sich hieraus die Lag-time in Minuten ermitteln lässt. Der SO_2-Gehalt der Biere wurde nach der Destillationsmethode bestimmt. Die Werte der Lag-time von Bieren korrelieren mit den SO_2-Gehalten, wie Abbildung 156 zeigt. Da der SO_2-Gehalt vom verwendeten Hefestamm, der Hefephysiologie und den Gärparametern abhängig ist, liegen die Absolutwerte der unterschiedlichen Brauereien auch auf verschiedenen Niveaus. Betrachtet man z. B. nur Brauerei A, so zeigt sich eindeutig der dominante Einfluss des SO_2-Gehaltes auf die Lag-time-Messung.

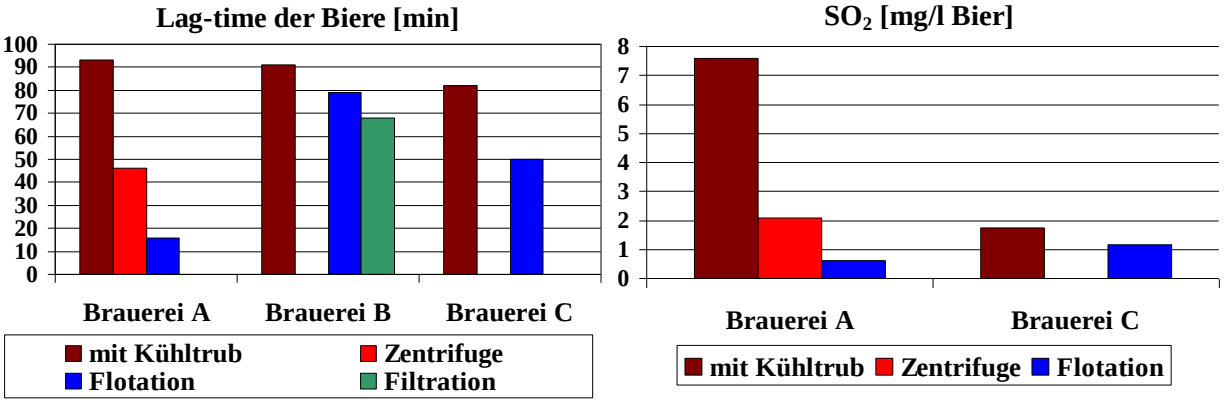


Abbildung 156: Lag-time und SO_2-Gehalt von ,Bieren mit und ohne Kühltrub

Tendenziell bestätigen die Lag-time und der SO_2-Gehalt die Verkostungsergebnisse. Die Biere mit Kühltrub erhalten die besten Bewertungen. Somit konnte aufgezeigt werden, dass

Kühltrub durch seine Auswirkungen auf die Hefe die Geschmacksstabilität sogar fördern kann.

Die größtenteils auf die Maillard-Reaktion und den Lipidmetabolismus basierenden Indikatoren der Geschmacksstabilität sind die sog. „Alterungskomponenten“, welche eine Auswahl von Aromastoffen in Bier darstellen [57, 181]. Je geringer die Summe der Alterungskomponenen in forciert gealterten Bieren ist, desto höher ist die Geschmacksstabilität. Abbildung 157 zeigt, dass mit und ohne Kühltrub ähnliche Gehalte zu finden sind. Eine Kühltrubabtrennung scheint somit nicht zwingend erforderlich. Die Zentrifugation stellt hierbei den geringsten Wert, was auf eine Vielzahl weiterer Maßnahmen der Brauerei zurückzuführen ist, welche die Geschmacksstabilität erhöhen.

Obwohl hinsichtlich der Hefevitalität spätestens bei der 5. Führung eine Abnahme feststellbar war (siehe Abbildung 151, S. 174 bis Abbildung 153, S. 175), wenn der Kühltrub nicht entfernt wurde, so hat dies keinen Einfluss auf die Alterungskomponenten im forciert gealterten Bier. Bei höheren Hefeführungen werden sogar noch weniger Alterungskomponenten im Vergleich zur Flotation gefunden.

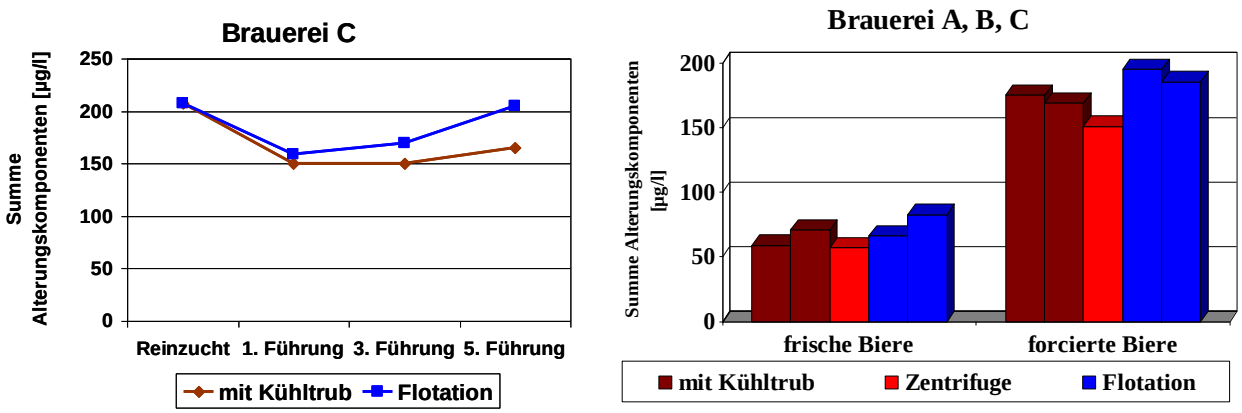


Abbildung 157: Summe der Alterungskomponenten in forciert gealterten Bieren

Ebenso ist bezüglich der chemisch-physikalischen Stabilität aufgrund der erhaltenen Ergebnisse eher eine Verbesserung bei Verzicht auf eine Kühltrubentfernung zu erwarten, wie Abbildung 158 zeigt. Je nach Brauerei wurden gleich gute oder bessere kolloidale Stabilitäten der Biere ermittelt [6].

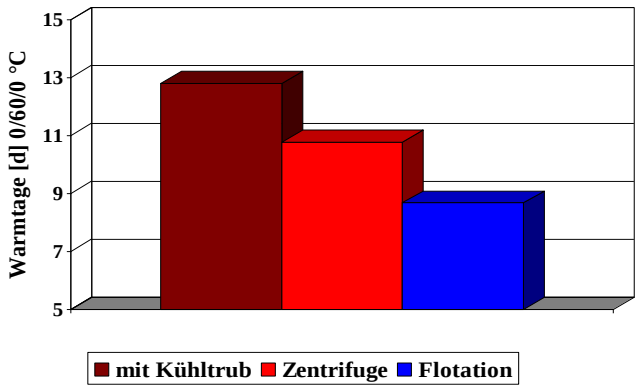


Abbildung 158: Chemisch-physikalische Stabilität von Bieren mit und ohne Kühltrubentfernung

Aus den im Großmaßstab durchgeführten Versuchsreihen lässt sich schließen, dass eine Kühltrubabtrennung nicht nötig ist, wenn folgende Voraussetzungen erfüllt sind:

- die Heißtrubabtrennung funktioniert einwandfrei,
- die Biere sind in ihrer Qualität konstant,
- das Hefemanagement entspricht dem Stand der Technik [17],
- das erzeugte Geschmacksprofil ist von der Brauerei erwünscht.

Es ist zwar bewiesen, dass der Geschmack der Biere durch unterschiedlichen Kühltrubeintrag beeinflusst wird, es konnte aber keine statistisch signifikante Präferenz gefunden werden. Im Einzelnen ändert sich der Biergeschmack brauereispezifisch in Bezug auf Geruch, Bittere und Vollmundigkeit. Somit obliegt es der Brauerei, welchem Geschmack sie den Vorzug gibt. Andere Qualitätsparameter wie Geschmacksstabilität, chemisch-physikalische Stabilität, Reduktionsvermögen und Schaumhaltbarkeit wurden tendenziell verbessert. Das gealterte Bier ohne Kühltrubabtrennung wurde tendenziell bevorzugt. Das reduktive Potenzial erhöhte sich bei Belassen des Kühltrubes in der Würze ebenso wie die chemisch-physikalische Stabilität. Die Schaumhaltbarkeit änderte sich nicht. Bei der Anwendung der Flotation wurde eine geringere Streuung der Analysenwerte festgestellt, weswegen gerade bei schwankenden Hefe- und Bierqualitäten eine Kühltrubabtrennung (Flotation) zu empfehlen ist.

Quellen

Diplomarbeiten von Torsten Dickel, Christian Zellner, Steffen Ammon und Ralf Isenberg sowie eigene Veröffentlichungen [48-50]

7.4 Möglichkeiten des Einsatzes von Prozessbier im Sudhaus

Die Wiederverwertung von Restebier bzw. Prozessbier im Brauprozess war schon in den 1970-ern für die Brauereien von Interesse, da so eine gute Möglichkeit zur Reduzierung des Bierschwandes bestand [213, 244]. *Krüger et al.* [160, 161] zeigten 1980 die zunehmende finanzielle Belastung für die Betriebe als Folge des neuen Abwasserabgabegesetzes und Möglichkeiten der Kostensenkung auf. *Boeck-Nielsen* [33] beschrieb ein Verfahren, bei dem Pozessbier in den Whirlpool zugegeben wurde. Durch die Prozessbier-Wiederverwendung wird der Brauprozess effizienter, Ressourcen werden geschont und die Kosten für Abwasser gesenkt. In der Brauerei fallen Prozessbiere an als:

- Hefebiere aus der Überschusshefe von Gär- und Lagerkeller,
- Vor- und Nachläufe aus der Filtration,
- Ausschub- bzw. Nachdrückmengen zwischen Produktionsabteilungen,
- Bier außerhalb der Produktionsspezifikationen (Diacetyl, O_2 etc.),
- Bier aus der Abfüllung (unterfüllte Gebinde, Fehl-Etikettierungen etc.),
- Rückbier aus dem Handel (überschrittenes Mindesthaltbarkeitsdatum, Reklamationen etc.),
- Rückbier von Festen (aus nicht vollständig entleerten Containern, etc.).

Huige [118] erfasste die Menge des anfallenden Bierschwandes in den unterschiedlichen Produktionsbereichen und bezifferte sie - gesehen auf die gesamte Produktion - mit 5-7 %.

Versuchsaufbau

Um den Einfluss einer variierenden Menge von im Sudhaus verwendeten Restbier zu betrachten, wurden Versuche im Pilotmaßstab (60 l) und im großtechnischen Maßstab durchgeführt. Alle Versuche wurden doppelt durchgeführt. Die Prozessbiere wurden entweder in die Würzepfanne 15 min vor Kochende oder in den Whirlpool zugegeben. Tabelle 22 gibt einen Überblick über die durchgeführten Versuche.

Tabelle 22: Verwendete Prozessbiere im Sudhaus

Prozessbier	Beschreibung	Dosagemenge [v/v]	Maßstab
Restbier 1	überschrittenes MHD	10%	Pilotversuch
Rückbier 1	forciert gealtertes Bier (5 Tage bei 40 °C)	10%	Pilotversuch
Hefebier 1	aus der Cross-Flow-Filtration zurückgewonnen	10%	Pilotversuch
Rückbier 2	Restbier aus dem Produktionsprozess	5%	Großtechn. Versuch
Hefebier 2	aus der Cross-Flow-Filtration zurückgewonnen	5%	Großtechn. Versuch

MHD : Mindesthaltbarkeitsdatum

Die Würze wurde mit 15×10^6 Hefezellen pro Milliliter angestellt, wobei für die Gärung bei 10 °C zylindrokonische 30-L-Tanks zur Verfügung standen. Es wurden täglich Proben gezogen und auf spezifisches Gewicht sowie Alkoholgehalt untersucht. Die Biere reiften während zwei Wochen bei 0 °C und wurden im Anschluss mittels Rahmenfilter filtriert.

Für die großtechnischen Versuche wurden zwei Brauereien mit unterschiedlicher Technologie ausgewählt. Tabelle 23 zeigt die Rahmenbedingungen der beiden Betriebe.

Tabelle 23: Bedingungen der großtechnischen Brauversuche

Parameter	Brauerei A	Brauerei B
Würzepfanne	Zugabe von 5% v/v Restbier	-
Whirlpool	Würzeklärung	Zugabe von 5 % v/v Restbier
Würzetemperatur nach dem Würzekühler	10 °C	10 °C
Anstellzahl	10×10^6 Zellen / ml	15×10^6 Zellen / ml
Gärtemperatur	10 °C	10 °C
Reifung	2 Wochen	3 Wochen
Reifungstemperatur	0 °C	0 °C
Filtration	Kieselgur-Kerzenfilter	Rahmenfilter

Die chemisch-technischen Analysen wurden gemäß MEBAK [200] und EBC [1], die gaschromatographische Analysen nach den institutseigenen Vorgaben durchgeführt. Die sensorische Beurteilung der fertigen Biere erfolgte im frischen und im forciert gealterten (1 Tag im Schüttler, 4 Tage bei 40 °C) Zustand nach den DLG-Richtlinien [200] bzw. nach Eichhorn [57]. Die Biere aus den großtechnischen Versuchen wurden nach einer natürlichen Alterung von drei Monaten bei 20 °C verkostet.

Um eine statistisch gesicherte Aussage treffen zu können, ob sensorische Unterschiede vorliegen, wurde der Student´s t-Test zur Verrechnung der Daten herangezogen [104].

Ergebnisse der Pilotversuche

Die flüchtigen Geschmacksstoffe des Bieres (Ethanol, höhere Alkohole und Ester) verdampfen entweder nach dem Verschneiden des Restbieres in die heiße Würze oder werden mit dem Heißtrub entfernt. Je früher das Prozessbier zur Heißwürze zugegeben wird, desto größer ist der Verlust flüchtiger Bestandteile. Aus wirtschaftlichen Gründen ist insbesondere der Ethanolverlust kritisch zu betrachten. Tabelle 24 zeigt den durchschnittlichen Verlust von Alkohol nach der Restbier-Zugabe in den Whirlpool.

Tabelle 24: Durchschnittlicher Alkoholverlust

Durchschnittliche Abnahme [%]	Standardabweichung	Konfidenzintervall (P = 0,95)
31,8	5,7	6,0

Die Zugabe von Rückbier in den Whirlpool führt zu niedrigeren Würzetemperaturen und damit zu einer geringeren thermischen Belastung. Dies zeigt sich auch an niedrigeren Gehalten der entsprechenden Indikatoren (2-Furfural, 2-Acetyl-Furan) in der Würze, aber auch im Bier. Diese Form von Vorkühlung führt gleichzeitig zu einer verminderten Umwandlung von DMS-P zu DMS [41, 42]. Zusätzlich fällt nach der Prozessbierzugabe der pH-Wert um durchschnittlich 0,3 pH-Einheiten. Das Maximum einer Proteinausflockung liegt an ihrem isoelektrischen Punkt. Durch die pH-Absenkung war die Proteinausfällung in der verschnittenen Würze intensiver als in der Vergleichswürze.

Als Folge des pH-Sturzes war jedoch die Schaumstabilität erheblich reduziert, wohingegen die kolloidale Stabilität sich deutlich verbesserte. Tabelle 25 stellt die Werte für die Schaum- und die kolloidale Stabilität der fertigen Biere dar.

Tabelle 25: Schaum- und kolloidale Stabilität im fertigen Bier

NIBEM oder Nibem (Du hast es vorher immer klein geschrieben!)

Bier	**Kolloidale Stabilität 0/40/0°C [Tage]**	**Schaumstabilität nach NIBEM [s]**
Vergleichsbier	5.0	254
Vergleichsbier + 10% Rückbier 1, zugegeben in die Würzepfanne	7.5	213
Vergleichsbier + 10% Rückbier 1, zugegeben in den Whirlpool	9.5	214
Vergleichsbier	>15	249
Vergleichsbier + 10% Restbier 1, zugegeben in die Würzepfanne	>15	210
Vergleichsbier + 10% Restbier 1, zugegeben in den Whirlpool	>15	203
Vergleichsbier	10	232
Vergleichsbier + 10% Hefebier 1, zugegeben in die Würzepfanne	13.7	184
Vergleichsbier + 10% Hefebier 1, zugegeben in den Whirlpool	>15	179

Der Geschmackseindruck und die Geschmacksstabilität des frischen und des forciert gealterten Bieres wurden von einem trainierten Verkostergremium getestet. Von den verschiedenen Varianten wurden Mittelwerte gebildet und - um wiederum bewerten zu können, ob Unterschiede zwischen den Bieren auftraten - der *Student´s* t-Test durchgeführt. Diese Ergebnisse zeigt Tabelle 26. Die sensorische Beurteilung der frischen Biere ergab erwartungsgemäß keinen signifikanten Unterschied zwischen den Bieren mit bzw. ohne Prozessbierzugabe. Bei den forciert gealterten Bieren ändert sich das Bild jedoch: Bier mit einem 10 %igen Hefebieranteil schnitt schlechter ab als das Vergleichsbier, während die Zugabe anderer Restbiere zu keiner schlechteren Beurteilung im Vergleich zur Kontrolle führte.

Tabelle 26: Signifikanztest für die Alterungsverkostung nach Eichhorn

Rückbier 1	**frisch**		**Forciert gealtert**	
	gew. Note	**Akzeptanz**	**gew. Note**	**Akzeptanz**
Zugabe in Pfanne – V	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.
Zugabe in Whirlpool – V	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	**sign.**
Zugabe in Pfanne – Zugabe in Whirlpool	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.
Restbier 1	**frisch**		**Forciert gealtert**	
	gew. Note	**Akzeptanz**	**gew. Note**	**Akzeptanz**
Zugabe in Pfanne – V	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.
Zugabe in Whirlpool – V	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.
Zugabe in Pfanne – Zugabe in Whirlpool	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.
Hefebier 1	**frisch**		**Forciert gealtert**	
	gew. Note	**Akzeptanz**	**gew. Note**	**Akzeptanz**
Zugabe in Pfanne – V	nicht sign.	nicht sign.	**sign.**	**sign.**
Zugabe in Whirlpool – V	nicht sign.	nicht sign.	**sign.**	**sign.**
Zugabe in Pfanne – Zugabe in Whirlpool	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.	nicht sign.

Abk.: V= Vergleich, sign. = signifikant

Ergebnisse großtechnischer Versuche

Die Pilotversuche wurden auch in den Praxismaßstab übertragen, um zu überprüfen, inwieweit ein Scale-Up die Ergebnisse beeinflusst. Allerdings wurde die Dosagemenge den Praxisgegebenheiten angepasst und somit auf 5 % v/v reduziert.

Die Zusammensetzung der Würzearomastoffe war nahezu identisch mit den Ergebnissen der Pilotversuche. Der Effekt der Würzevorkühlung durch die Zugabe von Prozessbier in den Whirlpool konnte hier ebenfalls beobachtet werden. Tabelle 27 zeigt die Gehalte der beiden thermischen Indikatoren 2-Furfural and 2-Acetyl-Furan in der Würze. Diese Tendenz setzte sich im fertigen Bier fort, das sich in günstigeren Werten für die Alterungskomponenten in den verschnittenen Bieren äußerte. Kein Unterschied wurde im Bereich der Alkoholgehalte und der Stammwürze in den fertigen Bieren festgestellt. Ähnlich wie auch bei den

Pilotversuchen wurden die Gehalte an Gesamtpolyphenolen und Anthocyanogenen durch die Zugabe von Restbier in die Heißwürze reduziert. Dies äußerte sich in einer besseren kolloidalen Stabilität dieser Verschnittbiere. Unauffällig dagegen verhielten sich die Ergebnisse der Schaumhaltbarkeit. Hier konnten im Gegensatz zu den Pilotversuchen keine Unterschiede gemessen werden.

Tabelle 27: Indikatoren für die thermische Belastung der Würze (Brauerei A)

Würze	**2-Furfural [µg/l]**	**2-Acetyl-Furan [µg/l]**
Vergleich	605	7,1
Vergleich + 5% Hefebier 2	351	4,0
Bier (forciert gealtert)	**2-Furfural [µg/l]**	**2-Acetyl-Furan [µg/l]**
Vergleich	110	6,9
Vergleich + 5% Hefebier 2	92	4,9

Die sensorische Bewertung der Biere aus der Brauerei A zeigte die gleichen Tendenzen wie die Pilotversuche, so hatten die Verschnittbiere eine geringere Geschmacksstabilität als die Vergleichsbiere (s. Tabelle 26). Zunächst scheint dies den Analysedaten zu widersprechen (s. Tabelle 27). Bei genauerer Betrachtung fällt aber auf, dass vor allem die Streckeraldehyde (3-Methyl-Butanal, 2-Methyl-Butanal, 2-Phenyl-Ethanal) in den forciert gealterten Verschnittbieren höhere Werte aufwiesen als in den Vergleichsbieren. Es gibt die Hypothese, dass während der Würzebereitung einige inaktive Zwischenstufen gebildet werden, welche nach einer gewissen Lagerungsdauer des fertigen Bieres zur Freisetzung von aktiven Carbonylen führt. Weiterhin wurde beobachtet, dass sich die Gehalte einiger geschmacksaktiver Ester (z. B.: 3-Methyl-Butyl-Acetat) auf einem niedrigeren Niveau in den Verschnittbieren befinden, so dass die positiven maskierenden Eigenschaften dieser Substanzen reduziert werden und der Alterungsgeschmack im Gesamtgeschmackseindruck deutlicher hervordringt.

Die Zugabe von Rückbier 2 in den Whirlpool bei Brauerei B scheint weder einen negativen Effekt auf die Würzezusammensetzung noch auf das fertige Bier zu haben. Wie schon erwähnt, liegt das Niveau der Indikatoren für thermische Belastung nach Zugabe von Prozessbier niedriger. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus der Brauerei A wurden hier keine negativen Ergebnisse auf die Geschmacksstabilität beobachtet. Vom Verkostergremium wurden die fertigen Verschnittbiere im frischen, im forciert und im natürlich gealterten Zustand sogar bevorzugt (s. Tabelle 28). Lediglich der Ethanol-Verlust, der mit ca. 30 % zu Buche schlug, ist negativ zu bewerten.

Tabelle 28: Analytische und sensorische Ergebnisse derBiere (Brauerei B)

Bier	2-Furfural (forciert gealtert)	2-Acetyl-Furan (forciert gealtert)	Alterungsnote (frisch)	Alterungsnote (forciert gealtert)	Alterungsnote (natürlich gealtert)
Vergleich	89	6,1	1,0	2,20	1,60
Vergleich + 5% Rückbier	55	5,6	1,0	2,14	1,34

Weitere Betrachtungen

Die Zugabe von Restbier (Prozessbier) in die Würzepfanne ist wegen des beträchtlichen Ethanolverlustes und der damit sinkenden Wirtschaftlichkeit nicht zu empfehlen. Abhilfe kann eine Dosage von Restbier in die Ausschlagleitung vor dem Würzekühler schaffen, da flüchtige Substanzen hier nicht verdampfen können. Abbildung 159 gibt einen Überblick über dieses Verfahren.

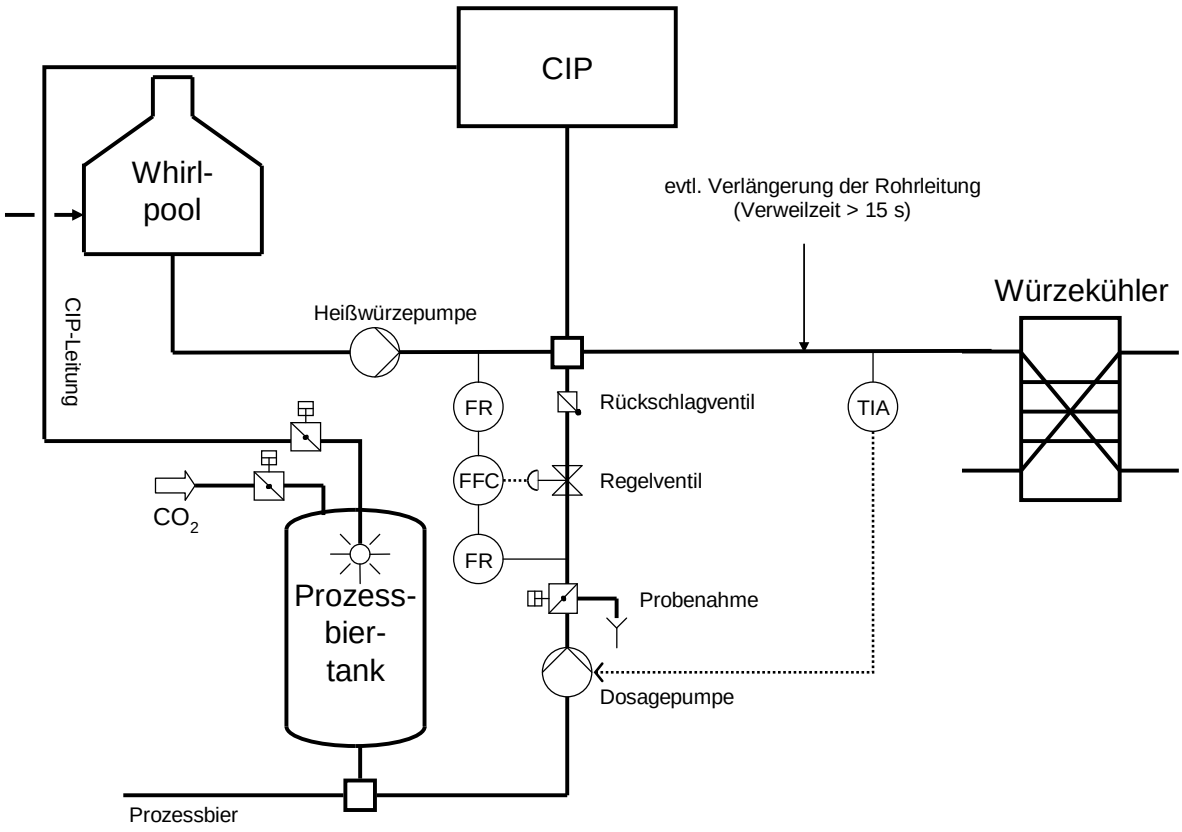


Abbildung 159: Schematische Ansicht der Restbierdosage in die Heißwürzeleitung.

Sobald die Temperatur 85-87 °C unterschreitet, wird die Dosagepumpe automatisch abgeschaltet. Theoretisch sollten bei einem volumen-geregelten Verschnitt von 1-2 % Temperaturen unterhalb 85 °C niemals erreicht werden. Um dennoch eine ausreichende mikrobiologische Sicherheit zu erhalten, ist darauf zu achten, dass die notwendigen Pasteur-Einheiten über eine ausreichende Heißhaltezeit (mittels entsprechender Leitungslänge zwischen Whirlpool und Würzekühler) erreicht werden. Abb. 2 zeigt das Verhältnis zwischen Pasteur-Einheiten und der Heißhaltezeit.

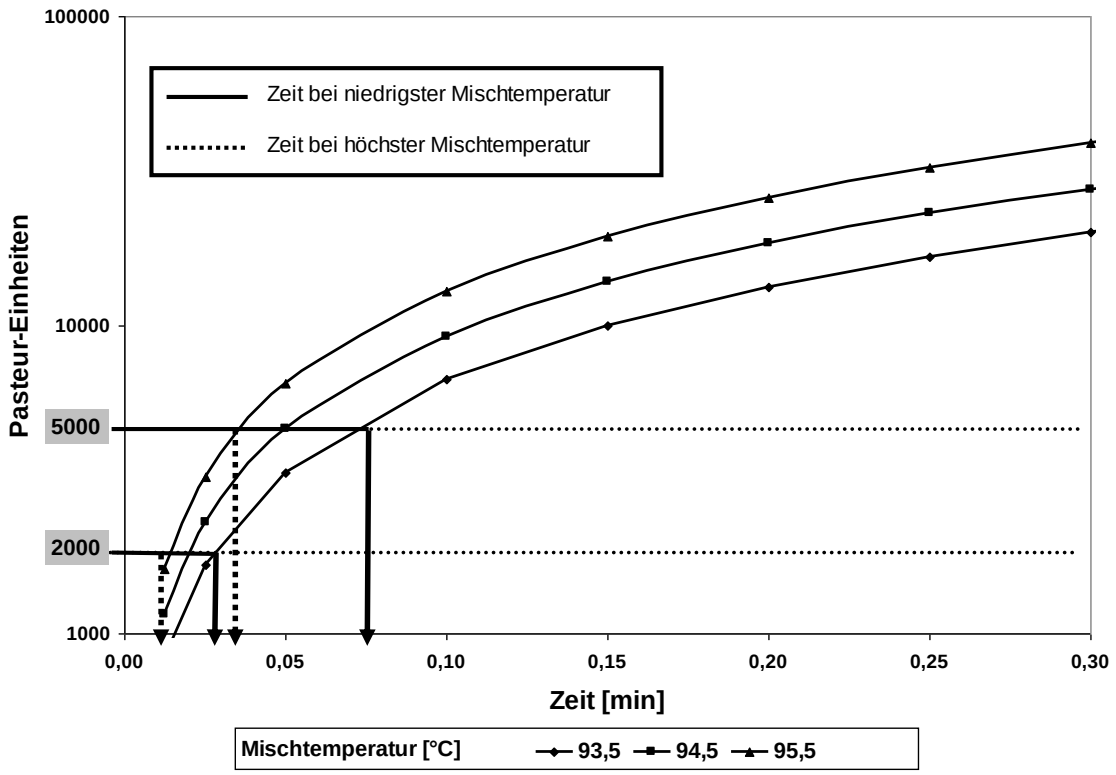


Abbildung 160: Abhängigkeit der Pasteur-Einheit von Heißhaltezeit und Temperatur des Produktes

Für die Berechnung der Pasteur-Einheiten wurde der z-Wert auf 6.95 °C festgelegt. Der sich daraus ergebende Faktor für die PE-Formel ($PE = t*10^{1/z(T-60)}$) ist 1,393. In früheren Veröffentlichungen wurde der z-Wert mit 8 °C angegeben, so dass sich ein Faktor von 1,33 ergibt. Diese Veränderung beruht auf Untersuchungen zur thermischen Belastbarkeit von speziellen heterofermentativen Milchsäure-Bakterien [232, 246]. Die Ergebnisse jüngster Untersuchungen deuten aber darauf hin, dass heterofermentative Milchsäure-Bakterien nicht so thermotolerant sind wie lange vermutet wurde [7]. In Tabelle 29 sind die minimale und maximale Rohrleitungslänge zwischen Whirlpool and Würzekühler aufgeführt. Die Durchflussrate beträgt 500 hl/h, der Innerdurchmesser der Rohrleitung 100 mm.

Tabelle 29: Rohrleitungslänge zwischen Whirlpool und Würzekühler in Abhängigkeit der PE-Einheiten.

Gemisch-Temperatur [°C]	Länge $_{2000\ PE}$ [m]	Länge $_{5000PE}$ [m]
93,5	3,27	8,19
94,5	2,37	5,93
95,5	1,69	4,22

Schlussfolgerungen

Durch die Wiederverwendung von Rest- und Rückbieren haben Brauereien die Möglichkeit, den internen Bierschwand zu minimieren. Allerdings müssen bestimmte qualitative und mikrobiologische Aspekte berücksichtigt werden. Insbesondere können Probleme mit der Schaum- und Geschmacksstabilität auftreten. Es ist wichtig, dass alle Prozessbiere wie normales Bier behandelt werden. Sie sollten also sauerstoff-frei und unter hygienisch einwandfreien Bedingungen bei niedrigen Temperaturen gelagert werden. Tabelle 30 stellt die empfohlenen Zugabeorte für die verschiedenen Prozessbiere dar. Unter Einhaltung dieser Empfehlungen sind keine negativen Effekte auf das fertige Bier zu erwarten.

Tabelle 30: Empfohlener Zugabeort für Prozessbier.

Prozessbier	empfohlene Zugabe	Begründung
Hefebier	Anstellwürze	Reduktion der kurz- und mittelkettigen Fettsäuren
Vor- und Nachläufe	Filtration (Alternativ: Whirlpool)	Prozesstechnik; Mikrobiologie
Andere Restbiere	Heißwürzeleitung (Alternativ: Whirlpool)	Mikrobiologie
Rückbier	Heißwürzeleitung (Alternativ: Whirlpool)	Mikrobiologie
Infizierte Rückbiere	Entsorgung außerhalb des Produktionsbereiches	Mikrobiologie

Quellen

Doktorarbeit von Mark Schneeberger [254] sowie eigene Veröffentlichungen [255-259]

7.5 Möglichkeiten zur Verwertung von Brüdenkondensat

Um Geruchsemissionen zu vermeiden und Energie einzusparen, wird Brüden aus der Würzekochung meist in Pfannendunstkondensatoren oder nach Brüdenverdichtung in Außen- oder Innenkochern kondensiert. Dabei fällt Brüdenkondensat an. Im Sinne der Senkung des spezifischen Abwasseranfalls in der Brauerei und der entsprechenden Kosten wurde nach Möglichkeiten zur Verwertung von Brüdenkondensat mit und ohne Aufbereitung gesucht. Tabelle 31 verdeutlicht den Anfall an Brüdenkondensat.

Tabelle 31: Brüdenkondensat-Anfall bei Würzekochung mit thermischer Brüdenverdichtung und mit anderen Würzekochsystemen

Würzekochsystem	Brüdenkondensat-Anfall	
Thermische Brüdenverdichtung	8,8 - 10,2 hl/t Schüttung	0,13 - 0,15 hl/hl VB
Andere Würzekochsysteme	7 hl/t Schüttung	0,1 hl/hl VB

VB: Verkaufsbier
Annahmen: Gesamtverdampfung 10 %, Schwand 10 %, vollständige Brüdenkondensation, Brüdenkondensattemperatur 100 °C.

7.5.1 Eigenschaften von Brüdenkondensat aus der Würzekochung.

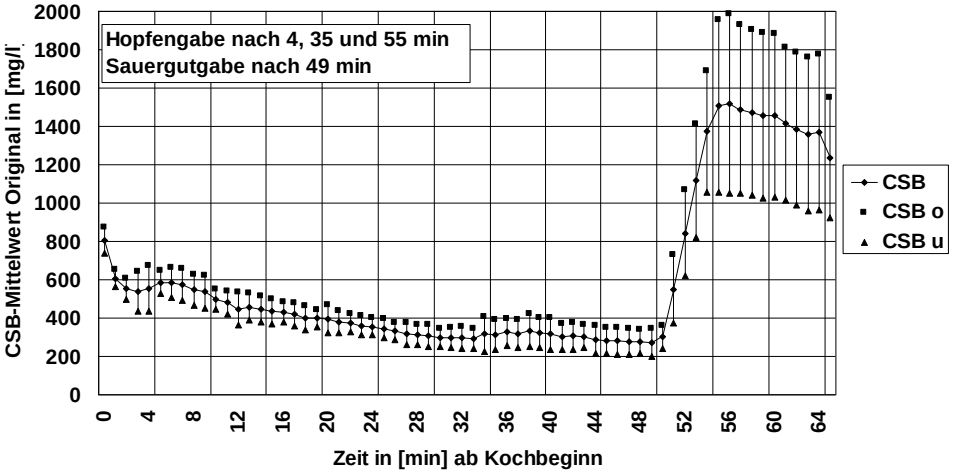
Brüdenkondensat besteht zu über 99 % aus Wasser. Es ist salzfrei und enthält ausschließlich organische Inhaltsstoffe aus Hopfen und Malz [101]. Bisher wurden 161 Inhaltsstoffe identifiziert [121]. Diese gehören zu den Gruppen Aldehyde, Alkane, Alkohole, Ester, Furane, Ketone und Terpene. Die Konzentrationen der einzelnen Stoffe liegen im Bereich < 5 – 338 µg/l [55].
Bei schleppluftfreier Würzekochung und ausreichenden Wärmeübertragerflächen werden hydrophile Brüdeninhaltsstoffe vollständig kondensiert. Hydrophobe Brüdeninhaltsstoffe, zu denen einige Aromakomponenten des Hopfens gehören, werden nicht vollständig kondensiert [312]. Die nicht kondensierbaren Anteile des Brüdens werden als Restgas an die Atmosphäre abgegeben.

CSB und pH-Wert von Brüdenkondensat aus der Würzekochung

Der chemische Sauerstoffbedarf CSB ist als Summenparameter zur Charakterisierung der organischen Inhaltsstoffe von Brüdenkondensat geeignet. Je höher der CSB, desto mehr Inhaltsstoffe enthält das Brüdenkondensat. Aus der Literatur ist zum CSB und pH-Wert von Brüdenkondensat bekannt [73, 328]:

- CSB: Einzelwerte von 140 - 1106 mg/l, Mittelwerte 150 - 353 mg/l;
- maximaler CSB: kurz nach Kochbeginn und kurz nach Hopfengaben;
- pH-Wert: Einzelwerte 6,0 - 9,0, Mittelwerte 6,0 - 7,0.

Abbildung 161 zeigt den Verlauf des CSB-Wertes von Brüdenkondensat, so wie er während einer Kochung von heller Vollbierwürze in einer Brauerei (330 hl Ausschlagwürze) ermittelt wurde.



CSB: Mittlerer CSB aus Messungen bei drei Suden
CSB o: Obere Grenze des 95 % - Konfidenzintervalls des mittleren CSB
CSB u: Untere Grenze des 95 % - Konfidenzintervalls des mittleren CSB

Abbildung 161: Mittlerer CSB des Brüdenkondensates von hellem Vollbier während der Würzekochung

Der CSB erreichte bei hellem Vollbier zu Kochbeginn einen Wert von 812 mg/l. In den folgenden 3 min sank er auf 538 mg/l ab. Nach 4 min Kochzeit erfolgte die erste Hopfengabe. Der CSB stieg in den folgenden 3 min um 46 auf 584 mg/l an. Bis zur zweiten Hopfengabe nach 35 min sank der CSB kontinuierlich auf 291 mg/l ab. Es folgte in den nächsten 5 min ein Anstieg um 43 auf 336 mg/l. Betrachtet man die Konfidenzintervalle, so ist es statistisch nicht nachweisbar, dass die Hopfengabe zu einem CSB-Anstieg führt.

Durch die Sauergutgabe nach 49 min stieg der CSB in 7 min von 273 auf 1517 mg/l. Der CSB-Anstieg durch die Sauergutgabe ist statistisch eindeutig nachweisbar. Bis zum Kochende sank der CSB fast kontinuierlich auf 1235 mg/l ab. Ein Einfluss der dritten Hopfengabe nach 55 min ist nicht erkennbar.

Zu Kochbeginn wurden in kurzer Zeit viele leicht flüchtige Inhaltsstoffe der Würze ausgedampft, was zum CSB-Maximum am Kochbeginn führte. Im weiteren Verlauf der Würzekochung ausgedampfte Stoffe sind schwerer flüchtig oder werden erst gebildet. Dies wird durch gaschromatographische Messung verschiedener Inhaltsstoffe von Würze und Brüdenkondensat bestätigt (vgl. Kapitel 7.1, S. 122). Die Untersuchungen von *Treitinger*

[299] ergaben Maxima des Gesamtkohlenstoffgehalts und der Geruchsstoffkonzentration des Brüdens zum Kochbeginn und nach Hopfengaben. Demnach enthält Brüden nach Hopfengaben leicht flüchtige Hopfeninhaltsstoffe. Da der CSB des Brüdenkondensats aber nach den Hopfengaben nicht ansteigt, zeigt sich, dass viele Hopfeninhaltsstoffe nicht kondensiert werden und ins Restgas anstatt ins Brüdenkondensat gelangen.

Einflussparameter auf die Inhaltsstoffe von Brüdenkondensat aus der Würzekochung

Grundsätzlich haben alle Parameter, die die Würzebereitung beeinflussen, in gewissem Umfang Einfluss auf die organischen Inhaltsstoffe des Brüdenkondensats. Brüdenkondensat wurde anhand des chemischen Sauerstoff-Bedarfs CSB des pH-Wertes untersucht. Ergebnisse der Messungen sind:

- Der mittlere CSB bei hellen Würzen ohne Zugabe von Restbier, Farbebier oder Sauergut zur Würzekochung liegt unter 300 mg/l;
- der CSB von Brüdenkondensat wird wesentlich beeinflusst durch: Den Aufbau der Würzekochanlage, insbesondere der Brüdenkondensatkühlung, die Zugabe von Restbier, Farbebier und Sauergut zur Würzekochung sowie dem Zeitpunkt der Probenahme;
- bei Zugabe von Restbier, Farbebier oder Sauergut zur Würzekochung liegt der mittlere CSB über 500 mg/l, maximal bei 6500 mg/l. Je früher der Zeitpunkt der Zugabe, desto höher der mittlere CSB;
- weitere Einflußgrößen sind: Würzesorte und Würzefarbe;
- Hopfengaben beeinflussen den CSB nicht signifikant.
- abhängig vom Aufbau der jeweiligen Würzekochanlage erreicht der CSB zu Kochbeginn oder bis zu 18 min danach ein Maximum;
- der mittlere pH-Wert von Brüdenkondensat bei Zugabe von Restbier, Farbebier und Sauergut zur Würzekochung liegt im Bereich 4,2 - 4,8;
- bei hellen Würzen ohne Zugabe von Restbier, Farbebier und Sauergut liegt der mittlere pH-Wert von Brüdenkondensat im Bereich 5,8 - 6,4;
- nach Zugabe von Sauergut zur Würze sinkt der pH-Wert um etwa eine pH-Einheit. Tendenziell steigt der pH-Wert für 1 - 2 min um 0,6 - 1,0 pH-Einheiten nach Zugabe von Aromahopfen.

Um die CSB-Fracht des Brüdenkondensats zu senken, sollte daher die Zugabe von Farbebier, Restbier oder Sauergut nicht zu Kochbeginn, sondern zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, soweit dies technologisch möglich ist. Alternativ können CSB-Spitzen während der Kochung nicht dem Brüdenkondensatsammeltank, sondern dem Abwasser zugeführt werden, um den mittleren CSB-Wert im abgestapelten Brüdenkondensat gering zu halten.

Bedingungen für die Verwertung für Brüdenkondensat aus der Würzekochung

Zur Verwertung von Brüdenkondensat sind alle Prozesse denkbar, bei denen Wasserbedarf besteht und die organischen Inhaltsstoffe von Brüdenkondensat keine Nachteile erbringen. Dabei sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Es darf keine Geruchsbelästigung bei der Wiederverwendung von Brüdenkondensat entstehen;

- die Wiederverwendung darf keine negativen Beeinträchtigungen auf die Produktqualität oder Verarbeitbarkeit haben,
- mikrobielles Wachstum ist durch Vorhandensein von Kohlenstoffquellen im Brüdenkondensat möglich. Es muss durch eine schnelle Verwertung oder durch eine Zudosage von Reinigungs- oder Desinfektionsmittel stabilisiert werden, wobei bei letzterem nur noch eine technische Verwertung möglich ist.

Tabelle 32: Denkbare Verwertungsmöglichkeiten für Brüdenkondensat

Produktionsbereich	Wasserverbrauchsstellen
Reinigungszwecke allgemein	Sanitation (Bodenreinigung), Spülwasser zur Innen- und Außenreinigung von Behältern, Kfz-Waschanlage, Ansatz von Reinigungs- und Desinfektionslösungen
Sudhaus bis Würze-kühlung	Nachguss bei Läuterbottichen und Maischefiltern, Senkbodenspülung bei Läuterbottichen, Trubaustrag mittels Hydro-Jet aus Whirlpool, Trebersilo-Reinigung
Energieanlagen	Kühlwasser für Kondensatoren, Kühltürme und Motoren

Grundsätzlich kann man zwischen der Wiederverwendung von aufbereitetem und unaufbereitetem Brüdenkondensat unterscheiden.

Quellen

Das Buch Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie [11] sowie eigene Veröffentlichungen [11, 70-72]

7.5.2 Verwendung von aufbereitetem Brüdenkondensat als Hauptguss

Die Kosten für Frisch- und Abwasser sind in den letzten Jahren stetig gestiegen. Vor diesem Hintergrund wurde ein Konzept entwickelt, mit welchem das Brüdenkondensat aufbereitet werden kann, so dass zumindest ein erheblicher Anteil als Betriebswasser in der Brauerei weiterverwendet werden kann.

Die Abtrennung der organischen Inhaltsstoffe des Brüdenkondensates erfolgte nach dem Prinzip der Umkehr-Osmose (Reverse Osmosis, RO). Dabei wird auf eine Flüssigkeit ein Druck ausgeübt, der höher als der osmotische Druck der Flüssigkeit selbst ist. Dies hat zur Folge, daß an einer semipermeablen Membran Flüssigkeit (Wasser) entgegen dem osmotischen Gefälle von der Seite der höheren Konzentration (Retentat) in den Bereich mit der niedrigeren Konzentration (Permeat) fließt. Mit zunehmendem Druck steigt die Permeabilität der Membran für Wasser, wohingegen die Permeabilität für die zurückgehalten Verbindungen konstant bleibt. Dabei darf jedoch der maximale Betriebsdruck des Systems (Modul, Membran) nicht überschritten werden, da sonst eine irreversible Schädigung im Membransystem auftreten würde.

Das so aufbereitete Brüdenkondensat wurde im Pilotsudwerk des Lehrstuhles als Brauwasser wiederverwendet sowie die sensorischen und qualitativen Auswirkungen auf die daraus gefertigten Biere untersucht.

Die RO-Anlage ist schematisch dargestellt in Abbildung 162. Das Brüdenkondensat wird über einen Wärmetauscher von ca. 95 °C auf max. 35 °C abgekühlt (Temperaturstabilität der Membran), in einem Vorlagebehälter aufgefangen und mittels Vorlagepumpe durch einen Feinfilter (5 µm) zur Hochdruck-(HD)-Pumpe gefördert. Diese drückt das Kondensat auf das RO-Hochdruckmodul, bestehend aus Polyester, Polysulfon und Polyamid. Das Retentat wird im Kreis gefahren und erfüllt die Funktion einer Spülflüssigkeit für die Membranoberfläche, um sie von Verstopfungen freizuhalten bzw. die Deckschichtbildung zu behindern. Dem Spülkreislauf wird eine kleine Ablaufmenge entnommen, der tatsächliche Abwasseranfall. Das Permeat fließt in einen Sammelbehälter und wird dann mittels Druckerhöhungspumpe durch einen Aktivkohlefilter gefördert, um eventuelle Geruchskomponenten zu entfernen. Die Reinigung der Pilotanlage erfolgte mit Zitronensäure und konnte gleichzeitig mittels UV-Strahlung entkeimt werden. Nach einer Zwischenspülung wurde sie mit Natriumbisulfit bis zur Wiederinbetriebnahme konserviert.

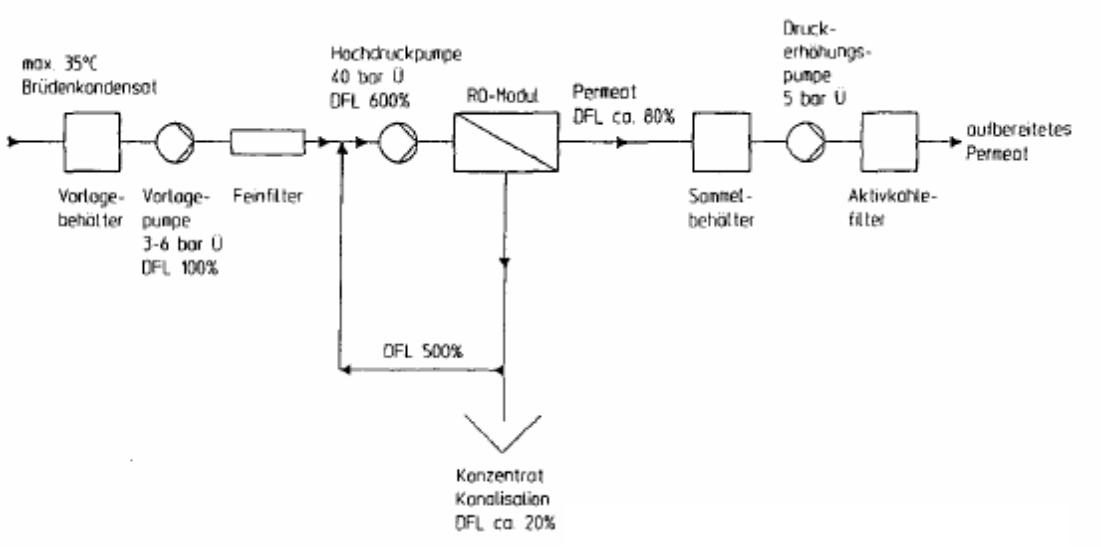


Abbildung 162: Fließschema einer Umkehrosmose-Anlage zur Aufbereitung von Brüdenkondensat

Die Analysenergebnisse von den Teilströmen der RO-Anlage sind in Tabelle 33 zusammengefaßt.

Tabelle 33: Analyse von Brüdenkondensat und Permeat einer RO-Anlage

	Unfiltrat	Permeat	Abnahme in %
pH	6,0	5,8	3
m-Wert (0,1 n HCl/100 ml)	0,32	0,24	25
DMS_{frei} [ppb]	232	36	84
CSB [mg O_2]	167	54	68
Summe Aldehyde [ppb]	2687	22	99
Summe Alkohole [ppb]	2143	29	99
Summe Furane [ppb]	6	n.n.	100
Summe Lactone [ppb]	26	n.n.	100
Summe S-haltige Verb. [ppb]	186	n.n.	100
Summe Terpene [ppb]	520	9	98

n.n. = nicht nachweisbar

Der pH und der m-Wert des Permeats nimmt im Vergleich zum Unfiltrat geringfügig ab. Dies zeigt, dass das RO-Modul auch Karbonathärte zurückhält. Das freie Dimethylsulfid im Unfiltrat liegt mit 232 ppb weit über der sensorischen Schwelle von ca. 100 ppb. Es wird aber um ca. 85 Prozent auf 36 ppb im Permeat reduziert. Die CSB-Fracht des Brüdenkondensats wird auf ca. ⅓ des Anfangswertes reduziert. Betrachtet man die Aromastoffzusammensetzung, als Stoffgruppen zusammengefasst, so zeigt sich, dass die Aromastoffe des Brüdenkondensates fast vollständig abgetrennt werden.

Pilotsudversuche unter Einsatz von aufbereitetem Brüdenkondensat

Um den Einfluss des aufbereiteten Brüdenkondensates auf die Würze- und Bierqualität zu untersuchen wurden im Pilotmaßstab (60 l Bier) drei helle, untergärige Biere mit einem Stammwürzegehalt von 11,5- 12,0 GG-% und ca. 20 BE hergestellt. Es kam ein Infusionsverfahren mit einer Einmaischtemperatur von 48 °C zum Einsatz. Im ersten Sud wurde kein Brüdenkondensat verwendet (Vergleichssud). Im zweiten Sud wurden 5 % des Hauptgusswassers durch Brüdenkondensat ersetzt. Im dritten Sud bestanden der komplette Haupt- und Nachguss aus aufbereitetem Brüdenkondensat.

In den Würzen zeigte der Sud mit 100 % Brüdenkondensat erwartungsgemäß den tiefsten pH, da das Permeat mit pH 5,8 deutlich unter dem pH-Wert des verwendete Brauwassers von 6,8 - 7,0 lag. Durch den niedrigen pH-Wert und die niedrige Einmaischtemperatur wurden die Phosphatasen gefördert, was zu einer erhöhten Pufferung der Würze führte. Als Konsequenz war die pH-Abnahme bei der Gärung langsamer und nicht so weitgehend, so dass das Bier mit 100 % Brüdenkondensat den höchsten pH-Wert zeigte. Durch die verstärkte Proteolyse beim Maischen hat dieser Sud auch die dunkelste Farbe. Die DMS-Gehalte und die Schaumstabilitäten aller Sude bewegten sich innerhalb der Analysentoleranz.

Die Alterungskomponenten wurden sowohl in den frischen als auch in den forciert gealterten Bieren bestimmt, um einen Einblick in die Veränderungen während des Alterungsprozesses zu erhalten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Alterungskomponenten von Bieren, deren Hauptguss teilweise aus aufbereitetem Brüdenkondensat bestand

	Frisches Bier			Forciert gealtertes Bier		
Einsatzmenge	100 %	5 %	0 %	100 %	5 %	0 %
2-Methyl-Butanal	13,2	14,6	12,9	11,8	13,6	13,7
3-Methyl-Butanal	12,0	10,3	7,9	18,3	12,5	12,0
Benzaldehyd	2,3	2,2	1,4	3,2	2,6	1,8
2-Phenylacetaldehyd	21,7	23,1	14,3	36,0	26,8	20,3
γ-Nonalacton	15,4	15,5	34,5	20,8	27,2	21,0
2-Phenyl-Essigsäure-Ethyl-Ester	0,3	0,4	0,3	0,4	0,4	0,4
2-Propionylfuran	2,8	2,2	2,4	3,6	2,4	2,6
5-Methyl-Furfural	2,9	2,9	3,4	3,0	3,0	3,7
Summe	70,6	71,2	77,1	97,1	88,5	75,5

Um die Bieralterung summarisch zu erfassen, wurden einige alterungsrelevante Aromastoffe aufsummiert. Es zeigt sich, dass die frischen Biere vergleichbare Ergebnisse liefern. Bei den forciert gealterten Bieren (1 d Schütteln, 4 d 40 °C) zeigt sich jedoch, dass mit steigender Menge an eingesetztem Brüdenkondensat die Summe der Alterungsindikatoren ebenfalls zunimmt.

Die sensorische Bewertung der Biere nach den DLG-Richtlinien und nach dem Alterungsschema nach Eichhorn [57] zeigt Tabelle 35.

Tabelle 35: Verkostungsergebnisse frischer und forciert gealterter Biere bei Einsatz von aufbereitetem Brüdenkondensat zum Einmaischen

	100 %	5 %	0 %
Frisches Bier			
mod. DLG-Prüfzahl	3,7	3,9	3,8
Alterungsnote	1,0	1,0	1,0
Forciert gealtertes Bier			
mod. DLG-Prüfzahl	3,0	2,6	3,2
Alterungsnote	2,7	3,2	2,2

Die Bewertung nach dem DLG-Schema wurde dahingehend modifiziert, dass die Kriterien Rezenz und Vollmundigkeit ausgeschlossen wurden. Die Bewertungsskala reicht von 0-5 Punkten, wobei die beste Bewertung 5 Punkte darstellt. Es wurden nur die Merkmale Geruch, Trunk und Bittere berücksichtigt. Im frischen Zustand wurden alle drei Biere vergleichbar gut beurteilt. Im gealterten Zustand ergeben sich eindeutige Unterschiede, wobei das Bier ohne Brüdenkondensat am besten beurteilt wird.

Beim Verkostungsschema nach Eichhorn werden 1 bis 4 Punkte vergeben, wobei 1 Punkt den frischesten Zustand charakterisiert. Die Merkmale Geruch, Trunk und Bittere werden speziell hinsichtlich Oxidation bewertet. Somit kann dieses Verkostungsverfahren eine Aussage über die Geschmacksstabilität geben. Die Ergebnisse decken sich mit den DLG-Prüfzahlen.

Auffällig ist, dass der Sud mit 5 % Brüdenkondensat und nicht jener mit 100 % Brüden-kondensat am schlechtesten bewertet wurde. Hierfür ist wahrscheinlich die Gärung verantwortlich. Wiederholungssude sind notwendig, um das Ergebnis zu betätigen. Dennoch

kann festgehalten werden, dass insgesamt der Vergleichssud ohne Brüdenkondensat die besten sensorischen Bewertungen im gealterten Bier erhalten hat. Diese Aussage deckt sich mit den analytischen Werten zur Geschmacksstabilität.

Aus wirtschaftlicher Sicht würde sich mit der untersuchten Anlage in einer Brauerei mit 4 Mio hl Jahresausstoß eine Amortisationszeit von 2 Jahren ergeben. Da qualitative Nachteile für das Bier zu erwarten waren, wurde der Einsatz von aufbereitetem Brüdenkondensat nicht weiter verfolgt.

Quellen

Diplomarbeit von Kornel Vetterlein und eigene Veröffentlichungen [11, 14]

7.5.3 Verwendung von unaufbereitetem Brüdenkondensat

Als Verfahren zur Aufbereitung von Brüdenkondensat wurden bisher Umkehr-Osmose [14, 40] und Aktivkohlefiltration untersucht. Probleme dieser Verfahren bestehen nicht nur in der negativen Beeinflussung der Bierqualität, sondern auch in technischer Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit. Nach eigenen Untersuchungen kann der chemische Sauerstoffbedarf (CSB) von Brüdenkondensat durch Aktivkohlefiltration um maximal 40 % reduziert werden. Trink-, Brau- oder Kesselspeisewasserqualität wird damit nicht erreicht, so dass dieses Verfahren nicht zur Aufbereitung von Brüdenkondensat geeignet ist.

Um dennoch Kosteneinsparungen zu erzielen ohne die Bierqualität negativ zu beeinflussen wurde nach Möglichkeiten gesucht, das Brüdenkondensat ohne Aufbereitung einsetzen zu können.

Ausspritzen des Läuterbottich-Senkbodens

In modernen Läuterbottichen werden Treberreste, die nach dem Abläutern und Austrebern unter dem Senkboden verbleiben, mittels einer automatischen Hochdruckausspritzvorrichtung entfernt. Bei Ersatz des verwendeten Frischwassers durch Brüdenkondensat können nach teilweise mehrjährigen Erfahrungen von vier Brauereien 10-33 % des anfallenden Brüdenkondensates verwertet werden. Besonders Brauereien, die im Sinne einer Kostenreduzierung die Gesamtmenge an Ausspritzwasser reduziert haben können nun den Reinigungseffekt wieder verbessern, da ein Überschuss an Brüdenkondensat zur Verfügung steht.

Letzter Nachguss beim Abläutern

In den Trebern befindet sich ein dem Volumen an Brüdenkondensat vergleichbares Volumen an Wasser. Das Wasser in den Trebern soll durch das von oben aufgebrachte Brüdenkondensat verdrängt werden, so dass kein Frischwasser für den letzten Nachguss benötigt wird. Das Brüdenkondensat könnte so mit den Trebern entsorgt werden. Gleichzeitig würde dieselbe Menge an aufbereitetem Brauwasser gespart werden.

Im Pilot- und im Praxismaßstab wurde daher untersucht, wann ein auf die Treber aufgebrachter Nachguss als Läuterwürze abläuft. Es konnten maximal 28 % des gesamten Brüdenkondensates bzw. 2,0 hl Brüdenkondensat / 1000 kg Schüttung genutzt werden. Dabei darf die Aufhackmaschine nicht in Betrieb sein. Der Grund dafür ist, dass das Nachgusswasser im Läuterbottich nicht nach dem Prinzip der Kolbenströmung den Treberkuchen passiert, sondern Zonen schnelleren Durchlaufes bestehen. Da besonders gegen

Ende der Läuterung der Würzevolumenstrom und die Hackwerkstätigkeit hoch sind, muss mit einem Durchschlagen des Brüdenkondensates gerechnet werden, wenn nicht vollständig auf ein Aufhacken verzichtet wird.

Kühlwasser für Verdunstungskondensatoren

Als Bestandteil von Kälteanlagen werden in Brauereien häufig Verdunstungskondensatoren eingesetzt. Der spezifische Kühlwasserbedarf beträgt etwa 0,11 - 0,57 hl Kühlwasser/hl Verkaufsbier (VB). Bei einem Anfall von 0,1 hl Brüdenkondensat/hl VB bedeutet dies, dass auch bei Annahme des geringsten Wasser- und Kältebedarfs das gesamte anfallende Brüdenkondensat als Kühlwasser verwertet werden kann.
Im Folgenden werden mehrere Möglichkeiten der Wiederverwendung vorgestellt, die zusammen mit Brauereien entwickelt wurden.

Normalerweise wird das Brüdenkondensat auf 25 - 30 °C gekühlt und mit 6 ppm Chlordioxid zur Desinfektion versetzt. Ohne Zusatz eines Desinfektionsmittels kommt es zu Verschleimung und Verschlammung der Verdunstungskondensatoren und eventuell vorhandener Zwischenstapelgefäßen. Außerdem verhindert der Zusatz des Chlordioxids eine Geruchsbelästigung. Der Einsatz von H_2O_2 hat sich als ungeeignet erwiesen, da H_2O_2 keine Depotwirkung besitzt und höhere Kosten verursacht.

Bei einer Brauerei wird das Brüdenkondensat mit Frischwasser im Verhältnis 70:30 verschnitten. Die Abschlämmung des Verdunstungskondensators wird über die elektrische Leitfähigkeit des Kühlwassers gesteuert. Da Brüdenkondensat salzfrei ist, funktioniert die Steuerung ohne einen Frischwasseranteil nicht. Wegen der räumlichen Ausdehnung der Brauerei wird nur die Kälteanlage des Sudhauses mit Brüdenkondensat betrieben. 20 % des anfallenden Brüdenkondensats werden verwertet. Die für Chlordioxid-Dosage und Verrohrung erforderliche Investition amortisierte sich in weniger als einem Jahr.

Bei einer anderen Brauerei wird das Brüdenkondensat kontinuierlich auf die Verdunstungskondensatoren gegeben. Überschüssiges Kühlwasser läuft ins Abwasser, so dass kontinuierlich abgeschlämmt wird und keine eigene Vorrichtung erforderlich ist. Das gesamte Brüdenkondensat der Brauerei i. H. v. 140.000 hl/a wird verwertet, obwohl wegen der thermischen Brüdenverdichtung relativ viel Brüdenkondensat vorhanden ist. Da bereits eine Chlordioxid-Anlage vorhanden war, waren außer der Verrohrung keine Investitionen erforderlich.

Ansatz alkalischer Reinigungslösungen

Die bei der Herstellung von Bier und anderen Lebensmitteln berührten Oberflächen müssen regelmäßig gereinigt werden. Zur Entfernung organischen Schmutzes kommen alkalische Reinigungsmittel zum Einsatz. Dazu werden häufig Additive, etwa zur Senkung der Oberflächenspannung, gegeben. Zum Ansatz dieser Reinigungslösungen ist der Einsatz von Frischwasser nicht erforderlich, so dass es durch Brüdenkondensat substituiert werden kann. Die Verwertung von Brüdenkondensat zum Ansatz saurer Reinigungslösungen wurde nicht untersucht, da diese überwiegend zur Neutralisierung vorausgegangener alkalischer Reinigungen oder zur Lösung anorganischen Schmutzes dienen. Die Inhaltsstoffe von Brüdenkondensat sind aber organischer Natur.
Der mittlere CSB von Brüdenkondensat aus Suden ohne Zugabe von Farbe- oder Restbier liegt meist unter 1000 mg/l, häufig unter 500 mg/l. Dagegen liegt der CSB von CIP- und Flaschenreinigungslösungen mit 4000 - 9000 mg/l [40] um den Faktor 4 - 18 höher. Eigene Messungen an Flaschenreinigungslösungen ergaben einen CSB von 4000 - 6600 mg/l. Der

CSB des Brüdenkondensates ist klein im Vergleich zum CSB-Eintrag durch Produktreste in die Reinigungslösungen und beeinträchtigt daher die Wirkung der Reinigungslösungen kaum.

Die Auswirkungen des Ansatzes alkalischer Reinigungslösungen mit Brüdenkondensat statt mit Frischwasser wurden im Labor- und im Praxismaßstab untersucht. Dies geschah anhand der in drei Brauereien in verschiedenen Produktionsbereichen gebräuchlichen Reinigungslösungen. Konzentration und elektrische Leitfähigkeit, also Einsatzfähigkeit und Handhabbarkeit der Reinigungslösungen wurden durch den Ansatz mit Brüdenkondensat anstelle mit Frischwasser nicht beeinträchtigt.

Beim Einsatz von Brüdenkondensat anstelle von Frischwasser zum Ansatz alkalischer Reinigungsmittel muß die Dosage chlorhaltiger Additive erhöht werden. Die Dosage von Additiven zur Senkung der Oberflächenspannung kann reduziert werden, falls die Reinigungslösungen bisher mit nicht oder teilweise entsalztem Frischwasser angesetzt wurden.

Reines Brüdenkondensat riecht nach Hopfen. Bei Standproben bildeten sich eine milchige Trübung und ein grüner Bodensatz. Bei Standproben mit Zusatz von NaOH stellte sich ein chemikalienartiger Geruch ein, Trübung und Bodensatz waren nicht erkennbar. Daher sollte Brüdenkondensat, das zum Ansatz alkalischer Reinigungslösungen verwertet wird, nach seinem Anfall in Pfannen-Dunst-Kondensatoren, Innen- oder Außenkochern mit mindestens 0,2 % NaOH angesetzt werden. Zusätzlich wird mögliches mikrobielles Wachstum gehemmt.

Ein großes Verwertungspotenzial für Brüdenkondensat besteht bei CIP-Anlagen, die zur Reinigung in mehreren Produktionsbereichen eingesetzt werden oder bei verlorener Reinigung. Bei Brauereien, die in allen Produktionsbereichen mit CIP-Anlagen arbeiten und die Reinigungslösungen selten (z. B. einmal jährlich) ansetzen, ist das Verwertungspotenzial gering.

Übersicht zur Verwendung nicht aufbereiteten Brüdenkondensates

Bei Substitution von Frischwasser mit Brüdenkondensat werden Kosten für Bezug und Aufbereitung des Frischwassers sowie für die Entsorgung des Frischwassers eingespart. Die Abwasserkosten für das Brüdenkondensat bleiben erhalten, da das Abwasser nicht vermieden sondern nur einer Zweitnutzung zugeführt wird.

In Tabelle 36 ist der verwertbare Anteil der anfallenden Brüdenkondensatmenge dargestellt, wenn man von einer Gesamtverdampfung bei der Würzekochung von 10 % ausgeht.

Tabelle 36: Bei verschiedenen Prozessen maximal verwertbarer Anteil am insgesamt anfallenden Brüdenkondensat

Prozess	Verwertbarer Anteil [%]
Ausspritzen des Läuterbottich-Senkbodens	33
Letzter Nachguss beim Abläutern	28
Kühlwasser für Verdunstungskondensatoren	100
Ansatz alkalischer Reinigungsmittel - Flaschenreinigung - CIP- und verlorene Reinigung	 100 100

Das größte Potenzial bietet die Verwertung von Brüdenkondensat als Kühlwasser für Verdunstungskondensatoren. Hier kann auch bei Würzekochungen mit hohem Kondensat-

Anfall, z. B. bei thermischer Brüdenverdichtung das gesamte anfallende Brüdenkondensat verwertet werden.

Ein Teil der Würzekochung ist die Hopfengabe im Sudhaus. Im Rahmen des Bayrischen Reinheitsgebotes muss nach dem Vorläufigen Biergesetz der Hopfen der Würze zugegeben werden. In den folgenden Kapiteln wird näher auf die Hopfungstechnologie und die Sortenwahl eingegangen. Aus spezielle Aspekte der Hopfung, sowie der Verwendung von downstream- und Spezialprodukten werden vorgestellt.

Quellen

Doktorarbeit von Markus Fohr, sowie eigene Veröffentlichungen [11, 70-72]

8 Hopfen

Neben Wasser, Malz und Hefe wird Hopfen zum Brauen von Bier verwendet. Einerseits gibt es einen direkten Aromatransfer von z. B. ätherischen Ölen des Hopfens in die Würze bzw. das Bier, wodurch das Aroma des Bieres geprägt wird. Andererseits werden die α-Säuren des Hopfens erst isomerisiert, um als iso-α-Säuren eine sensorische Wirkung auf den Geschmack des Bieres ausüben zu können. Die Lösung, Isomerisierung, Ausdampfung und sonstige Beeinflussung der Hopfeninhaltssubstanzen kann technologisch beeinflusst werden.

Die technologischen Möglichkeiten des Einsatzes von Hopfen und dessen Auswirkungen auf die Bierqualität werden im Folgenden beschrieben.

Beginnend mit den Inhaltsstoffen des Hopfens werden Brauversuche im Pilot- und Großmaßstab vorgestellt.

8.1 Inhaltsstoffe des Hopfens und Relevanz für die Technologie

Der Kulturhopfen (*Humulus lupulus*) gehört innerhalb der botanischen Ordnung der Urticales (Nesselgewächse) zur Familie der Hanfgewächse (*Cannabaceae*) [145].

Von der Hopfendolde sind die auf der Innenseite der Vor- und Deckblätter lokalisierten gelblich-grünen - im frischen Zustand klebrigen - Becherdrüsen (Lupulindrüsen) für den Brauer von größtem Interesse, denn diese beinhalten die technologisch relevanten Bitter- und Aromastoffe. Die Zusammensetzung des Hopfens [209] ist abhängig von der Sorte, dem Jahrgang, der Provenienz, dem Erntezeitpunkt, der Trocknung und der Lagerung [82].

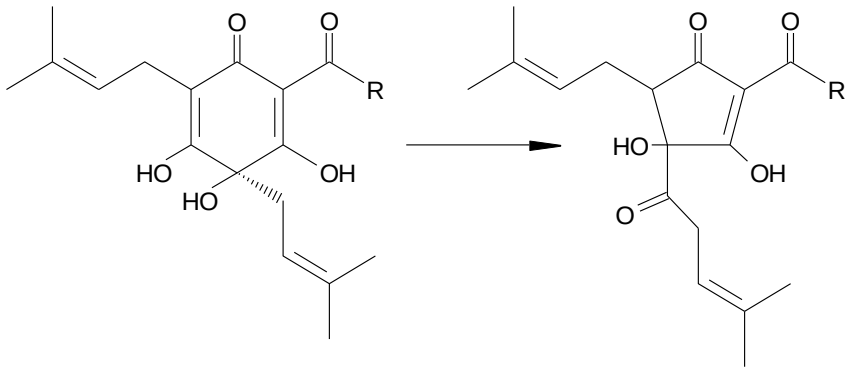
Die Gesamtharze stellen die Summe aller Bitterstoffe dar und lassen sich in Hart- und Weichharze unterteilen. In den Weichharzen sind als Hauptkomponenten die Bittersäuren enthalten, welche sich in α- (3 - 17 %) und β-Säure (2 - 7 %) gliedern lassen. Die fünf Homologen der α-Säure sind Humulon, sowie Co-, Ad-, Pre- und Posthumulon. Ebenfalls fünf Homologe zeigen sich bei der β-Säure (Lupulone), welche sich vom Humulon lediglich durch die Seitenkette am C3 (Dimethyl-allyl-Gruppe statt einer OH-Gruppe) unterscheiden.

Bitterstoffe

Die Bitterstoffe verleihen dem Bier die feine, angenehme Hopfenbittere, fördern die Bekömmlichkeit, stabilisieren den Bierschaum und erhöhen durch ihre antibakteriellen Eigenschaften (bes. gegen gram-negative, aber auch gegen gram-positive Bakterien) die biologische Haltbarkeit des Bieres [5]. Studien belegen einen positiven Einfluss auf Diabetes Typ 2 [139].

Das Bitterungspotenzial und damit der Brauwert der einzelnen Substanzen ist unterschiedlich. Neben der Löslichkeit in Würze und Bier kommt der Bitterqualität eine große Bedeutung zu. Die iso-α-Säuren und ihre Derivate zeigen die größte Bitterkraft. Die β-Säuren liefern, auf Grund ihrer Unlöslichkeit in Würze und Bier, praktisch keinen Beitrag zur Bitterung des Bieres.

Bei der thermischen Isomerisierung entstehen aus den optisch aktiven hexacyclischen Verbindungen Strukturen mit einem Fünferring. In Folge der starken Sauerstoffanfälligkeit des Hopfens wird auch eine Vielzahl von oxidierten Derivaten gebildet. Diese schwerflüchtigen, gut wasserlöslichen, meist komplexen Verbindungen lösen sich in der Würze und können bis in das Bier gelangen. Aus den iso-α-Säuren bilden sich Abeo-iso-α-Säuren, Allo-iso-α-Säuren und Anti-iso-α-Säuren. Aus den β-Säuren bilden sich Hulupone, die zur Bierbittere beitragen [103].
Beim Würzekochen vollzieht sich die Umwandlung der beim Würze-pH nur begrenzt löslichen α-Säuren in die gut löslichen cis- und trans-iso-α-Säuren, wie Abbildung 163 zeigt [145].



alpha - Säuren Iso - alpha - Säuren

Name	R
Humulon	$-CH_2CH(CH_3)_2$
Cohumulon	$-CH(CH_3)_2$
Adhumulon	$-CH(CH_3)CH_2CH_3$

Quelle : Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau / Hüll

Abbildung 163: Isomerisierung von α- zu iso-α-Säuren beim Würzekochen.

Aromastoffe

Über 300 flüchtige Komponenten konnten bisher in Hopfen identifiziert werden [129]. Man unterteilt sie in eine Kohlenwasserstoff-Fraktion, bestehend aus Terpenkohlenwasserstoffen (70 - 75 %) und eine Sauerstoff-Fraktion, welche sich aus sauerstoffhaltigen Verbindungen (25 - 30 %) sowie weiteren Aromasubstanzen zusammensetzt. Erstere untergliedert sich in

Monoterpene und Sesquiterpene. Monoterpene sind α- und β-Pinen, Limonen sowie Myrcen, welches mit 17 - 37 % Massenanteil an den Gesamtölen die quantitativ bedeutendste Substanz darstellt. Sesquiterpene sind β-Caryophyllen, α-Humulen und Farnesen [24]. Farnesen ist typisch bei den Sorten des Saazer Formenkreises (Spalter, Tettnanger) und mit einem Anteil von bis zu 30 % am Gesamtöl zu finden. Sauerstoffhaltige Verbindungen sind Alkohole, Aldehyde, Ketone, Säuren, Ester und Sauerstoffheterocyclen. Die oxidierten Terpene Linalool (Abbildung 164) und Geraniol weisen einen blumigen bzw. rosenartigen Geruch auf. Linalool ist eine chirale Verbindung und liegt überwiegend in der deutlich geruchsaktiveren (R)-Form vor (92 - 94%) [122, 287, 288].

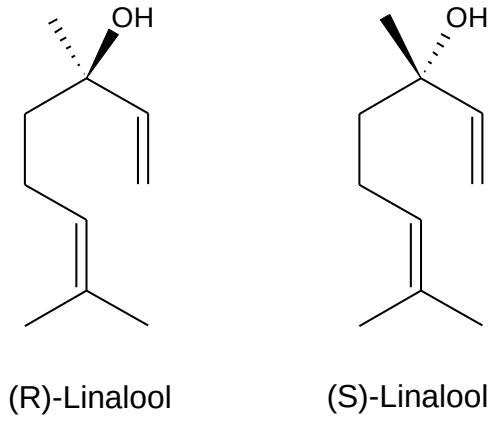


Abbildung 164: Chemische Form der chiralen Verbindung Linalool

Es wurde festgestellt, dass die chirale Verteilung von Linalool in Aromahopfen - ausgehend von Rohhopfen bis hin zu sämtlichen konventionellen Hopfenprodukten - annähernd stabil bei 94 % R-Linalool bleibt [127].
Ester können zu einem fruchtigen Aromaeindruck beitragen. Fettsäuren sind meist für das käsige Aroma, vor allem bei unter ungünstigen (warmen) Bedingungen gelagerten Hopfen, verantwortlich. Sauerstoffheterocyclen (Epoxide) entstehen durch Autoxidation von Sesquiterpenkohlenwasserstoffen. Hopfen enthält auch schwefelhaltige Aromakomponenten wie Thioester, Sulfide und Schwefelheterocyclen [173, 286].

Die Zusammensetzung der Hopfenöle ist abhängig von der Sorte und kann durch die Trocknungsbedingungen sowie die Verarbeitungsverfahren stark beeinflusst werden. Durch die Einhaltung einer Kühlkette von der Annahme des Rohhopfens über die Veredelung bis zum Hopfenprodukt werden Oxidationseinflüsse weitgehend unterbunden. Abbildung 165 zeigt verschiedene Aromahopfensorten und deren Intensität an den sensorisch wahrnehmbaren Noten „fruchtig“ und „blumig“.

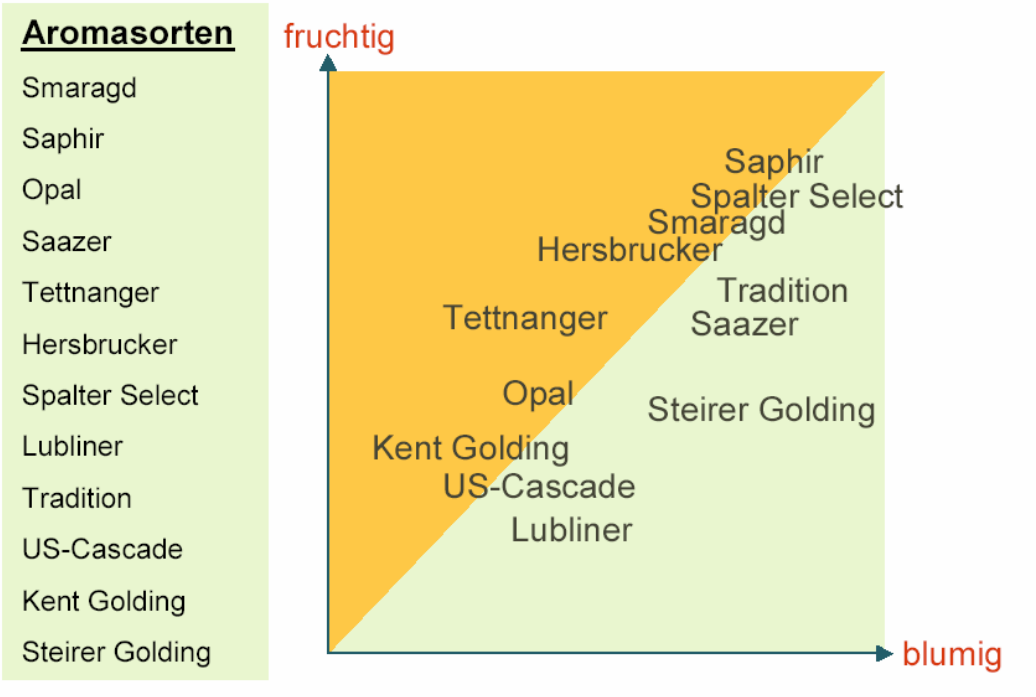


Abbildung 165: Aromaintensitäten „fruchtig“ und „blumig“ von verschiedenen Aromahopfensorten

Polyphenole

Die Polyphenole der Würze stammen vom Hopfen, sowie vom Malz. Ca. 100 verschiedene polyphenolische Einzelkomponenten können analytisch bestimmt werden. Die Polyphenole bestehen zu ca. 80 % aus kondensierbaren und zu ca. 20 % aus hydrolysierbaren Verbindungen. Erstere sind monomere Polyphenole und deren Glycoside. Diese können zu höhermolekularen Produkten polymerisieren. Polyphenole umfassen Hydroxybenzoesäuren, Hydroxyzimtsäuren, Proanthocyanidine, Flavanole, Flavonole, Quercetinflavonoide, Kämpferolflavonoide und Prenylflavonoide. Der Hauptvertreter der Prenylflavonoide ist Xanthohumol [145].

Aromahopfen enthalten höhere Mengen an niedermolekularen Polyphenolen als Bitterhopfen [75-78]. Unterschiede ergeben sich abhängig von Anbauort, Sorte und Vegetationsverlauf.

Besonders eiweißfällend bzw. trübungsverursachend sind die Proanthocyanidine, welche sich aus Catechin-Einheiten zusammensetzen. Man bezeichnet sie auch als Tannoide mit einem Molekulargewicht zwischen 500 und 3000 Da. Anthocyanogene sind Glycoside von Proanthocyanidinen [24].

Niedermolekulare Polyphenole sind natürliche Antioxidantien und erhöhen die Reduktionskraft des Bieres. Sie schützen das Bier vor Oxidation und können dadurch indirekt die Geschmacksstabilität verbessern. Darüber hinaus vermutet man, dass sie als Radikalfänger im menschlichen Körper fungieren und so eine krebshemmende Wirkung ausüben können. Das Prenylflavanoid Xanthohumol zeigt eine anticancerogene Wirkung in-vitro als auch im Tierversuch. [26, 28, 30, 77, 81, 130]. Das Polyphenol Xanthohumol ist in den Lupulindrüsen lokalisiert.

Hochmolekulare Polyphenole können, besonders bei langen Kochzeiten, die Bierfarbe erhöhen und eine adstringierende Bittere verursachen. Sie verringern die kolloidale Stabilität

und führen zu Trübungen im Bier. Um eine hohe physikalische Stabilität des Bieres zu erzielen, verringert man den Eintrag von Polyphenolen oder man entfernt sie partiell. Man kann polyphenolfreien Hopfenextrakt sowie proanthocyanidinfreie Gerstensorten verwenden. Alternativ können trübungsbildende Polyphenole durch Adsorption an Polyvinylpolypyrrolidon (PVPP) im Zuge der Bierfiltration entfernt werden [77]. Polyphenole werden durch Abtrennung von Heiß- und Kühltrub, Geläger und bei der Filtration teilweise entfernt. Phenolsäuren sind Vorläufer für bestimmte Bieraromen. Aus Ferulasäure entsteht besonders bei bestimmten obergärigen Hefestämmen 4-Vinylguajakol (Aromaeindruck wie Gewürznelke), welches verantwortlich für das typische Aroma von Weizenbier ist [8, 145]. Auch im Hopfen wurde 4-Vinylguajakol nachgewiesen [286].

Hopfenprodukte

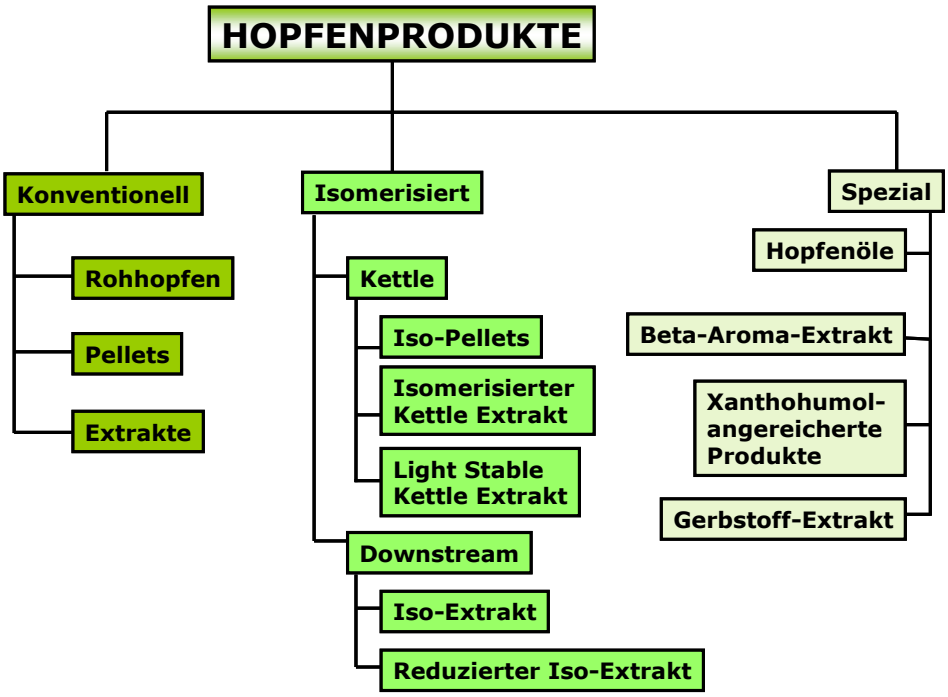


Abbildung 166: Einteilung von Hopfenprodukten

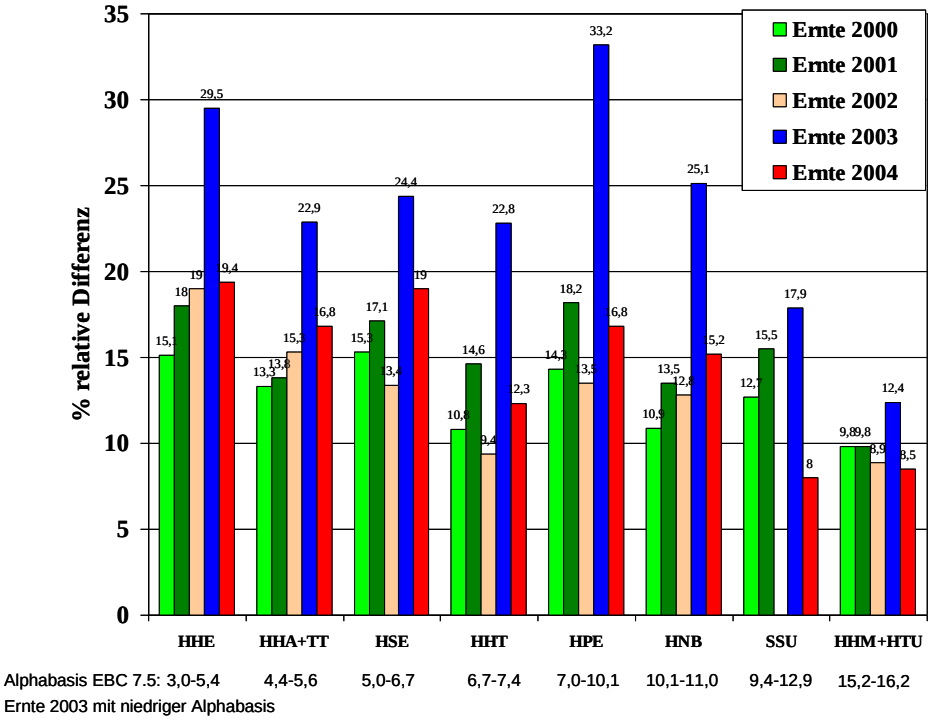
In Abbildung 166 ist die Klassifizierung von Hopfenprodukten dargestellt. Ein Hauptmerkmal von Hopfenprodukten im Vergleich zu Doldenhopfen ist das reduzierte Volumen. Speziell die angereicherten Hopfenprodukte (Pellets Typ 45 oder Extrakte) vereinen viele Vorteile in sich. Sie ermöglichen eine gute Lagerfähigkeit in den Kühlräumen, eine vereinfachte Logistik und eine Verringerung des anfallenden Verpackungsmaterials. Durch die homogene α-Säurenverteilung in einer Produktcharge ist eine exakte Dosage des Hopfens in der Brauerei möglich. Des Weiteren sind Hopfenprodukte durch spezielle Verpackungen vor Oxidationen besser geschützt und gewährleisten somit einen längeren Erhalt der Rohstoffqualität. Pflanzenschutzmittel-Rückstände liegen in Rohhopfen weit unter den gesetzlich zugelassenen Grenzwerten und werden in Hopfenprodukten durch die Verarbeitung unterschiedlich stark reduziert [74, 102, 145, 253]. Man kann die Produkte anhand ihrer Einsatzzwecke und ihres Dosagezeitpunktes differenzieren (Bitterung, Aromatisierung, Schaumverbesserung, Lichtstabilität usw.). Erfolgt die Dosage nach der Würzekochung, also in das Bier, so spricht man von down-stream-Produkten [35].

Hopfenanalytik

Die konventionelle Hopfengabe in der Brauerei wird meist durch den Konduktometerwert (KW) bei Pellets und durch den mittels HPLC ermittelten α-Säuregehalt bei CO_2-Extrakt eingestellt. Es hat sich gezeigt, dass so ein konstantes Bitterniveau im Bier erreicht werden kann. Bei Ethanolextrakt verwendet man den Konduktometerbitterwert (KBW), da dieser eine hohe Korrelation zur sensorisch wahrgenommenen Bittere des Bieres zeigt [202].

Klassische Standard-Analysenmethoden zeichnen sich oft durch eine summarische Erfassung von Stoffgruppen aus. Der Trend in der Analytik geht hin zur quantitativen Bestimmung von Einzelkomponenten. Die Bestimmung der α-Säuren kann z.B. über den Konduktometerwert erfolgen, die α- und β-Säuren werden mittels HPLC bestimmt [1, 238].

Vergleicht man den Konduktometerwert mit der Summe an α-Säuren aus der HPLC-Analyse, so ergeben sich zum Teil deutliche Differenzen. Abbildung 167 zeigt die relative Differenz der EBC-Methoden 7.5 (KW) zu 7.7 (HPLC). Mit der summarischen Bestimmung des Konduktometerwertes werden neben den α-Säuren auch unspezifische Bitterstoffe erfasst. Deshalb ist der KW höher als die Summe der α-Säuren nach HPLC. Außerdem sind jahrgangsbedingt große Schwankungen festzustellen.



Legende:

HHE : Hallertau Hersbrucker Spät	HPE : Hallertau Perle
HHA : Hallertau Hallertauer Mittelfrüher	HNB : Hallertau Northern Brewer
TT : Tettnang Tettnanger	SSU : Slowenischer Super Steirer
HSE : Hallertau Spalter Select	HHM : Hallertau Hallertauer Magnum
HHT : Hallertau Hallertauer Tradition	HTU : Hallertau Taurus

Bei der Bezeichnung von Hopfensorten ist jeweils der Anbauort gefolgt von der Hopfensorte angegeben.

Abbildung 167: Relative Analysendifferenz der Methoden EBC 7.5 (KW) zu EBC 7.7 (HPLC)

8.2 Technologie der Hopfung

Die Ziele der Hopfengabe sind die Beeinflussung des Bieraromas und des Biergeschmacks. Das Bieraroma wird durch die ätherischen Öle des Hopfens beeinflusst. Es handelt sich dabei um leichtflüchtige Substanzen, die zum charakteristischen Hopfenaroma des Bieres beitragen. Unter einem Bieraroma wird derjenige Aromabeitrag verstanden, der nasal oder orthonasal wahrnehmbar ist. Davon unterscheidet sich der Biergeschmack, welcher unabhängig vom Geruch einen Geschmacksbeitrag leistet. Mann kann bei einer Bierverkostung z. B. mittels Nasenklammer den Geruchssinn ausschalten, um sich nur noch auf die geschmacklich wahrnehmbaren Substanzen konzentrieren zu können. Die geschmackliche Wahrnehmung beim Menschen ist auf die Eindrücke salzig, sauer, süß, bitter und umami begrenzt [267]. Der Biergeschmack wird durch nicht-flüchtige Substanzen bestimmt. Den größten Beitrag zur Bierbittere haben die iso-α-Säuren [215].

Die Hopfendosage muss auf das Geschmacksprofil des jeweiligen Bieres abgestimmt werden. Geschmack und Aroma des Hopfens müssen sich harmonisch in die Biermatrix einfügen.

Folgende Parameter sind zu beachten [11, 123, 126]:

- Rohstoffzusammensetzung (Wasser, Malz, Malzersatzstoffe, Zusatzstoffe);
- Hopfensorte;
- Hopfenprodukt;
- Alter des Hopfens;
- Menge der Hopfengabe;
- Zeitpunkt der Hopfengabe (Hopfenkochzeit);
- Würzekochsystem und Homogenität der Würzeverteilung;
- Whirlpoolstandzeit und –temperatur;
- Intensität der Trubabtrennung (Heißtrub, Kühltrub);
- Wiederverwendung von Heißtrub;
- Gärung (Gärgefäße, Gärtemperaturen, Hefephysiologie);
- Stammwürze;
- Endvergärungsgrad;
- Filtration und Stabilisierung (Polyphenole);
- Gebinde (Weißglas z.B. Lichtgeschmack);
- Verbrauchererwartung (regional und kulturell unterschiedlich);
- Deklarationspflicht (gesetzliche Vorschriften).

Ein harmonisches Geschmacksprofil wirkt sich direkt auf die „Drinkability“ aus. Darunter versteht man den Genusswert, welcher sich durch eine hohe Akzeptanz des Verbrauchers wiederspiegelt. Unabhängig davon können durch gezielten Einsatz der Hopfung verschiedene Biertypen entwickelt werden, welche sich auf dem Biermarkt eindeutig platzieren lassen.

Im Rahmen des Vorläufigen Biergesetzes dürfen nur konventionelle Hopfenprodukte der Würze zugesetzt werden (siehe Abbildung 166). Denkbar sind die Verwendung von Rohhopfen, Pellets und Extrakt [205]. Der Rohhopfen erfordert einen Hopfenseiher zur Abtrennung der Hopfenmatrix aus der Würze. Unlösliche Hopfenbestandteile aus den Pellets können mit dem Heißtrub (z.B. Whirlpool) ausgeschieden werden. Hierbei ist zu beachten, dass durch Überdosage die Whirlpoolfunktion nicht negativ beeinflusst wird. Sollten größere Mengen des Heißtrubes mit zur Gärung gelangen, so kann dies zu einer kratzigen Bittere führen. Der Trubkegel im Whirlpool sollte nach Ablauf der Würze die Zarge nicht berühren.

Die Hopfenmatrix kann Nitrat in die Würze und somit in das Bier einbringen. Durch die Verwendung von Extrakt und angereicherten Pellets kann der Nitrateintrag erheblich reduziert werden.

Für internationale Biere, außerhalb des Deutschen Reinheitsgebotes, gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Hopfenprodukte, welche weitere Veredelungsschritte erfahren haben (siehe Abbildung 166). Die isomerisierten Hopfenprodukte können einerseits in die heiße Würze (Kettle) dosiert werden. Hierzu zählen Iso-Pellets und isomerisierte „Kettle-Extrakte“. Andererseits kann die Dosage vor der Bierfiltration erfolgen. Hierbei spricht man von „Downstream-Produkten“. Zur Korrektur der Bierbittere werden Iso-Extrakte eingesetzt. Reduzierte Iso-Extrakte erhöhen die Schaumstabilität und schützen vor der Entstehung des Lichtgeschmackes im Bier. Da die Isomerisierung der α-Säuren des Hopfens bei höheren Temperaturen stattfindet, kann ein Einfluss auf das Aroma- und Geschmacksprofil des Bieres nicht ausgeschlossen werden [133]. Besonders bei Iso-Pellets ist auf eine schonende Prozessführung während der Isomerisierung in der Wärmekammer zu achten.
Um speziellen Anforderungen gerecht zu werden gibt es Hopfenprodukte, in welchen unterschiedliche Fraktionen des Hopfens angereichert sind.

Speziell die reduzierten Iso-Extrakte wirken sich unterschiedlich auf die sensorisch wahrgenommene Intensität der Bittere aus. Ermittelt man die sensorische Bitterintensität von gleichen Mengen an Tetra-hydro-iso-α-Säuren und iso-α-Säuren im Bier, so haben die Tetra-hydro-iso-α-Säuren das 1,0 - 1,7-fache Bitterpotenzial. Rho-iso-α-Säuren haben im Vergleich zu iso-α-Säuren ein 0,6 - 0,8-faches Bitterpotenzial [99, 277, 324]. Im Kapitel „Lichtgeschmack“ wird noch näher darauf eingegangen.

Es gibt mehrere Gründe, Hopfenprodukte zu unterschiedlichen Stufen während des Brauprozesses zu dosieren. Neben den gesetzlichen Besonderheiten (z.B. Reinheitsgebot) ist die Zusammensetzung des Hopfenproduktes dafür verantwortlich. Bei einer Dosage in das fertige Bier geht das Hopfenprodukt direkt in das Getränk über. Die sensorischen Eigenschaften des Hopfenproduktes, die Löslichkeit in Bier und vieles mehr müssen hier bestimmten Anforderungen genügen. Bei einer Dosage im Sudhaus ist sichergestellt, dass noch mehrere Prozessstufen durchlaufen werden. Dies garantiert die Ausscheidung z. B. schlecht bierlöslicher Hopfeninhaltsstoffe und unerwünschter Aromastoffe des Bitterhopfens. Ein Einsatz isomerisierter Produkte wird primär aus wirtschaftlichen Gründen und kaum aus qualitativen Gründen vorgenommen. Bitterhopfen sollte bei Kochbeginn gegeben werden, um eine möglichst optimale Isomerisierung und eine Ausdampfung unerwünschter Aromanoten zu erzielen.

Aromahopfen kann bereits nach der Bitterstoffgabe zur Erzielung einer weichen Bittere im Trunk gegeben werden. Je später die Dosage erfolgt, desto weniger Aroma wird ausgedampft und desto mehr Hopfenöle gehen in das Bier über. Aromahopfengaben für hopfenaromatische

Biere sollten erst gegen Ende der Kochung bzw. als Vorlage in den Whirlpool erfolgen, um einen möglichst optimalen Aromatransfer bis in das Bier zu erzielen.
Die Dosagemenge von Aromahopfen wird in Brauereien meist über den α-Säuregehalt bestimmt. Logischer ist die Dosage nach dem Hopfenölgehalt oder besser nach dem Linaloolgehalt [128, 203] bzw. nach Leitkomponenten des Hopfenaromas [86, 286]. Dadurch ist sichergestellt, dass immer gleiche Mengen an Aromastoffen dosiert werden. Jahrgangsbedingte Schwankungen im Ölgehalt können ausgeglichen werden. Besonders bei später Aromadosage ist die α-Säuredosage uninteressant, da nur ein sehr geringer Teil isomerisiert. Ziel dieser Hopfengaben ist ein maximaler Aromatransfer. Als Leitkomponente „character impact compound“ für hopfenaromatische Biere konnte Linalool gefunden werden [87, 88, 127]. Der Geschmacksschwellenwert in Bier wird von 2 µg/l bis 80 µg/l angegeben [85, 122, 208]. Ein sensorisch wahrnehmbares Hopfenaroma in hellen deutschen Vollbieren kann ab einer Linaloolkonzentration von ca. 20 µg/l festgestellt werden. Dieser Wert ist abhängig vom jeweiligen Geschmacksprofil des Bieres. Ab ca. 50 µg/l kann das Hopfenaroma als blumig-parfümiert beschrieben werden. Neben Linalool sind andere Aromastoffe des Hopfens am Hopfenaroma des Bieres beteiligt. Diese liegen teilweise unter deren Geschmacksschwellenwert in Bier, können aber durch synergistische Effekte zum Geschmacksprofil des Bieres beitragen.
Die Geschmacksstabilität des Bieres kann durch späte Aromagaben positiv beeinflusst werden. Durch ein - wenn auch nur dezent wahrnehmbares - Hopfenaroma wird der Alterungsgeschmack des Bieres maskiert [10, 77, 125].

Aus Abbildung 168 kann man erkennen, dass durch frühe Gaben vorzugsweise die Bittere bzw. der Geschmack beeinflusst werden kann. Für die Aromatisierung eignet sich ein Zeitfenster gegen Kochende.

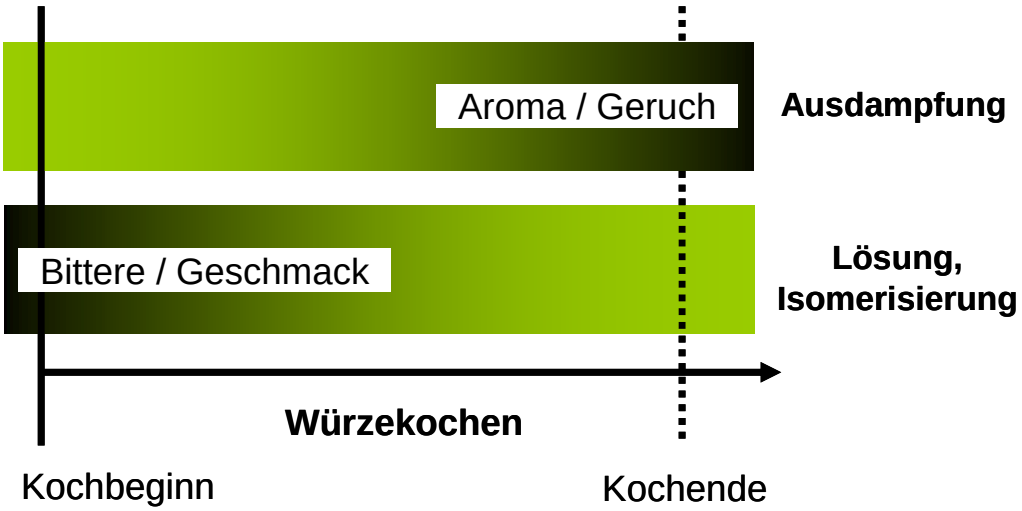


Abbildung 168: Einfluss der Hopfengabe auf den Biercharakter

In den folgenden Kapiteln werden Untersuchungen dargestellt, welche auf einzelne technologisch interessante Parameter der Hopfungstechnik eingehen. Ziel war es diejenigen Aspekte näher zu betrachten, welche besonders für die Praxis von Relevanz sind.

Quellen

Dissertationen von Christina Schönberger [267] und Dietmar Kaltner [122], sowie Co-Autorentätigkeit bei Büchern [11, 145, 200] und eigene Veröffentlichungen [195, 268, 269]

8.2.1 Einfluss der Hopfensorte auf den Biercharakter

Neben der Provenienz und dem Erntejahr hat vor allem die Hopfensorte einen Einfluss auf die Hopfen-, Würze- und Bierqualität. Den Hopfenpflanzer interessieren die agronomischen Eigenschaften, da sie die Wirtschaftlichkeit maßgeblich beeinflussen. Die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln soll sich im Sinne einer Kosteneinsparung und Schonung der Umwelt möglichst auf das Nötigste reduzieren. Da das Resistenzprofil genotypisch ist, kann durch die Wahl geeigneter Hopfensorten der Spritzmitteleinsatz reduziert werden. Schon aus diesem Grunde ist die Züchtung und Zulassung neuer, krankheitsresistenter Sorten von größter Bedeutung.

Im Folgenden werden Untersuchungen zu einer neuen Bittersorte und zu einer neuen Aromasorte vorgestellt. Die Versuche fanden im Pilot- und Industriemaßstab statt und wurden bis zum fertigen Bier durchgeführt.

Vergleich zweier Bitterhopfensorten

Es wurde die neu zugelassene mehltauresistente Bitterhopfensorte Hallertauer Merkur im Vergleich mit der in der Praxis verbreiteten Sorte Magnum in drei verschiedenen Brauereien im Praxismaßstab verbraut. Ziel war es, zu erforschen, ob die Sorten durcheinander substituiert werden können.

Die Hopfensorte Merkur zeichnet sich durch einen niedrigen Co-Humulongehalt aus, was sich in den Würze- und Bieranalysen wiederspiegelt. Bis jetzt, wenn auch kontrovers diskutiert, gilt ein niedriger Co-Humulongehalt als wünschenswert, weswegen Neuzüchtungen nach diesem Kriterium selektiert werden. Da die Reinsubstanzen der Homologen (z. B. Co-Humulon) nicht in ausreichenden Mengen beschaffbar sind, können keine statistisch abgesicherten Untersuchungen an dotierten Bieren durchgeführt werden d. h. eine Zumischung zu Bieren und deren analytische und sensorische Beurteilung ist nicht möglich. Derzeit wird nach altenativen Versuchsanstellungen gesucht, die sensorische Relevanz von Co-Humulon zu erforschen.

Es wurden gaschromatographische Analysen der flüchtigen Bieraromastoffe im frischen Bier durchgeführt. Dabei konnten keine signifikanten Konzentrationsunterschiede zwischen den Magnum- und den Merkur-Bieren gefunden werden. Die Daten zeigten aber, dass die Gärungen normal und innerhalb der Brauerei reproduzierbar verlaufen sind.

Die Auswertung von mehr als 180 Verkostungsergebnissen frischer Biere zeigte, dass kein Unterschied festzustellen war. Bei der beschreibenden Verkostung der frischen Biere wurde ein tendenziell, jedoch nicht signifikant, reinerer Geruch und intensiverer Nachgeschmack der Merkur-Biere festgestellt. Diese wiesen in zwei Brauereien ein etwas höheres Verhältnis iso-α-Säuren / Bittereinheiten auf, was auf eine etwas intensiver wirkende Bittere hindeutet. In den vorangegangenen Kapiteln 8.1, 8.2 und 8.2.2 wurde bereits auf die sensorische Bedeutung bitternder Substanzen eingegangen, welche nicht α-Säuren sind. Diesen unspezifischen Weich- und Hartharzen wird eine „weiche“ Bittere zugeschrieben. Aus den Versuchen zur Gabe von isomerisierten α-Säuren bei der Bierfiltration weiß man, dass die α-

Säuren eine sehr anhaltende, zuweilen „harte“ Bittere vermitteln [145]. Somit wurde die Aussage, dass Biere mit einer hohen Ratio iso-α-Säuren zu Bittereinheiten zu einer etwas reineren, aber auch nachhaltigeren Bittere führen bestätigt.

Die Ausprägung des Hopfengeschmacks ist jedoch sehr stark vom Biertyp abhängig, sodass nur Werte einer Brauerei untereinander verglichen werden sollten.
Beim Vergleich zwischen den Magnum- und Merkur-Bieren der einzelnen Brauereien zeigte sich eine tendenziell höhere Geschmacksstabilität bei den Magnum-Bieren, wie aus der Akzeptanz der gealterten Biere ersichtlich war. Diese Tendenz deutete sich bei der Alterungs- und bei der DLG-Note bereits an. Dennoch konnte kein statistisch signifikanter Unterschied in der Geschmacksstabilität festgestellt werden.

Das Züchtungsziel eines niedrigen Co-Humulongehaltes wurde von Merkur erfüllt und konnte bis zum Bier analytisch nachgewiesen werden. Sensorisch wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Je nach Biertyp wurde die Sorte Magnum oder die Sorte Merkur tendenziell von den Verkostern bevorzugt. Abschließend ist festzustellen, dass die Hopfensorte Hallertauer Merkur eine Alternative zu Hallertauer Magnum darstellt.

Vergleich zweier Aromahopfensorten

Um die Brautauglichkeit der neuen Aromasortes Saphir zu ermitteln, wurden Großversuche in drei verschiedenen Brauereien durchgeführt. Da es sich um Praxisversuche handelte, konnten die Versuchsbedingungen (Anlagen, Technologie) nicht vollständig identisch gestaltet werden. Bewusst wurden Brauereien gewählt, welche unterschiedliche Aromaprofile in ihrem Bier aufweisen. Ziel war es, die universelle Praxistauglichkeit der Sorte Saphir zu ermitteln.

Die eingesetzten Hopfenprodukte der drei Versuchsreihen sind in Tabelle 37 dargestellt. Nur 30 % der α-Säuregabe erfolgte durch Bitterhopfenextrakt der Sorten Hallertauer Magnum (HM) bzw. aus einem Gemisch der Sorten Hallertauer Magnum, Northern Brewer (NB) und Taurus (TU) bei Kochbeginn (Grundhopfung). Die restlichen 70 % der α-Säuregabe wurden entweder als vermahlener Doldenhopfen der Sorte Saphir oder als Pellets der Sorten Perle bzw. Tettnanger zugegeben. Mit dem hohen Anteil an Aromahopfen wurde eine starke Aromatisierung der Biere angestrebt, die eine aussagekräftige Beurteilung der Brauqualität der Sorte Saphir möglich machen sollte.

Tabelle 37: Hopfengabe der Großsudversuche

	Pils	Helles Vollbier	
	Brauerei A	Brauerei B	Brauerei C
Grundhopfung Saphir- und Vergleichs-Sud	30 % HM/NB/TU	30 % HM	30 % HM
Aromahopfung Saphir-Sud	70 % Saphir, vermahlene Dolden	70 % Saphir, vermahlene Dolden	70 % Saphir, vermahlene Dolden
Aromahopfung Vergleichs-Sud	70 % Tettnanger, Typ 90	70 % Perle, Typ 45	70 % Perle, Typ 90

Das im Rohhopfen verwirklichte Züchtungsziel eines geringen Co-Humulongehaltes der Sorte Saphir konnte auf alle Saphir-Würzen der Brauereien in Form eines ausgeprägt niedrigen Co-Humulon- sowie Co-isohumulongehaltes übertragen werden, wie Tabelle 38

zeigt. Ein geringer Co-Humulongehalt des Hopfens wird mit einer feinen Bittere des Bieres in Verbindung gebracht.

Tabelle 38: Linaloolgehalt und Bitterstoffgehalt der Biere der Großsudversuche

	Pils		Helles Vollbier			
	Brauerei A		Brauerei B		Brauerei C	
	Tettnanger	Saphir	Perle	Saphir	Perle	Saphir
Linalool [µg/l]	11,5	17,9	24,9	40,8	19,5	54,6
Bittereinheiten [EBC]	33	35	17	18	22	20
Iso-α-Säuren [mg/l]	33,4	32,4	16,2	15,8	19,8	19,0
Co- Anteil [%]	34,6	24,0	36,5	33,5	37,2	25,0
N- Anteil [%]	52,6	65,0	49,1	52,8	48,3	63,4
Ad- Anteil [%]	12,8	11,0	14,4	13,7	14,6	11,6

Die großen Unterschiede des Linaloolgehaltes der Biere der verschiedenen Brauereien können auf die unterschiedlichen Hopfenprodukte zurückgeführt werden, die für die Grund- und Aromahopfung bei der Würzekochung zum Einsatz kamen. Weiterhin fielen auch der Zeitpunkt der Hopfendosage, die Kochdauer, die Ausdampfung und andere technologische Parameter, die den Linaloolgehalt des Hopfens beeinflussen, in den Großsudversuchen unterschiedlich aus. Dennoch ist es auffällig, dass die Sorte Saphir in Labor- und Praxissuden stets durch einen guten Aromatransfer vom Hopfen in das Bier auffällt. Die Ausbeute an Linalool ist bei der Sorte Saphir gut, was sich auch meist in den Verkostungsergebnissen niederschlägt.

Die Versuchsreihen zeigten alle eine hohe Gleichmäßigkeit der Biere im Gehalt an Bitterstoffen (EBC-Bittereinheiten) sowie in der Summe der iso-α- und der α-Säuren mittels HPLC. Deutliche Unterschiede zeigten sich wieder bei den Anteilen der Co-Isohumulone sowie der Co-Humulone an den Hopfenbittersäuren. Zwar sind die festgestellten Unterschiede in den Bieren kleiner ausgefallen als in den Würzen, dennoch wurden in allen Saphir-Bieren geringere Anteile der Co-Bittersäuren bestimmt. Ein Vergleich der Bitterstoff- und Linaloolgehalte der Versuchsreihen lässt die sortentypischen Ausprägungen des Hopfenaromas der drei Brauereien erkennen.

Die gewichtete Note der DLG-Verkostung, bei der die Prüfmerkmale Geruch, Reinheit des Geschmacks und Bittere doppelt, sowie Rezenz und Vollmundigkeit einfach gewertet werden, ergab eine nahezu gleiche Bewertung von Saphir-Bier und Vergleichs-Bier. Während die Saphir-Sude beim Pilsbier mit einem Vergärungsgrad von nur 77 % geschmacklich etwas abfielen, wurden die Vollbiere mit höheren Vergärungsgraden tendenziell besser beurteilt.

Zur genaueren sensorischen Bewertung des Hopfenaromas wurde das Verkostungsschema für hopfenaromatische Biere nach *Kaltner* [122] angewendet. Das Verkostungsschema beinhaltete eine Wertung für Geruch und Trunk der Biere in den Ausprägungen Intensität und Güte des Hopfenaromas anhand einer 5-Punkte Skala (zunehmende Intensität bzw. Güte von 1-5). Mit gleicher 5-Punkte Skala wurde die Intensität der Bittere bewertet, während die Güte der Bittere anhand einer vorgegebenen Terminologie beschrieben wurde. Die Verkostungsergebnisse ließen erkennen, dass die Intensität des Hopfenaromas in den Merkmalen Geruch und Trunk bei allen Versuchsreihen durch die Verwendung der Hopfensorte Saphir zunahm. Die Güte des Hopfenaromas im Trunk wurde bei allen Saphir-Bieren besser bewertet. In der Intensität der Bittere konnten, wie schon bei der DLG-

Verkostung, auch mit diesem Verkostungsschema nur geringe Unterschiede der Biere einer Brauerei festgestellt werden.

Aus Abbildung 169 ist erkennbar, dass die Anzahl der Zuordnungen zum Attribut „fein-harmonisch“ bei allen Saphir-Bieren erhöht war, während Nennungen für „nachhängend“ und „hart“ gegenüber den Vergleichsbieren zurückgingen. Es kann somit eine eindeutige Aromatisierung der Biere durch die Saphir-Hopfung festgestellt werden. Dieses Ergebnis deckt sich mit der zuvor beschriebenen erhöhten Intensität des Hopfenaromas in Geruch und Trunk der Saphir-Biere.

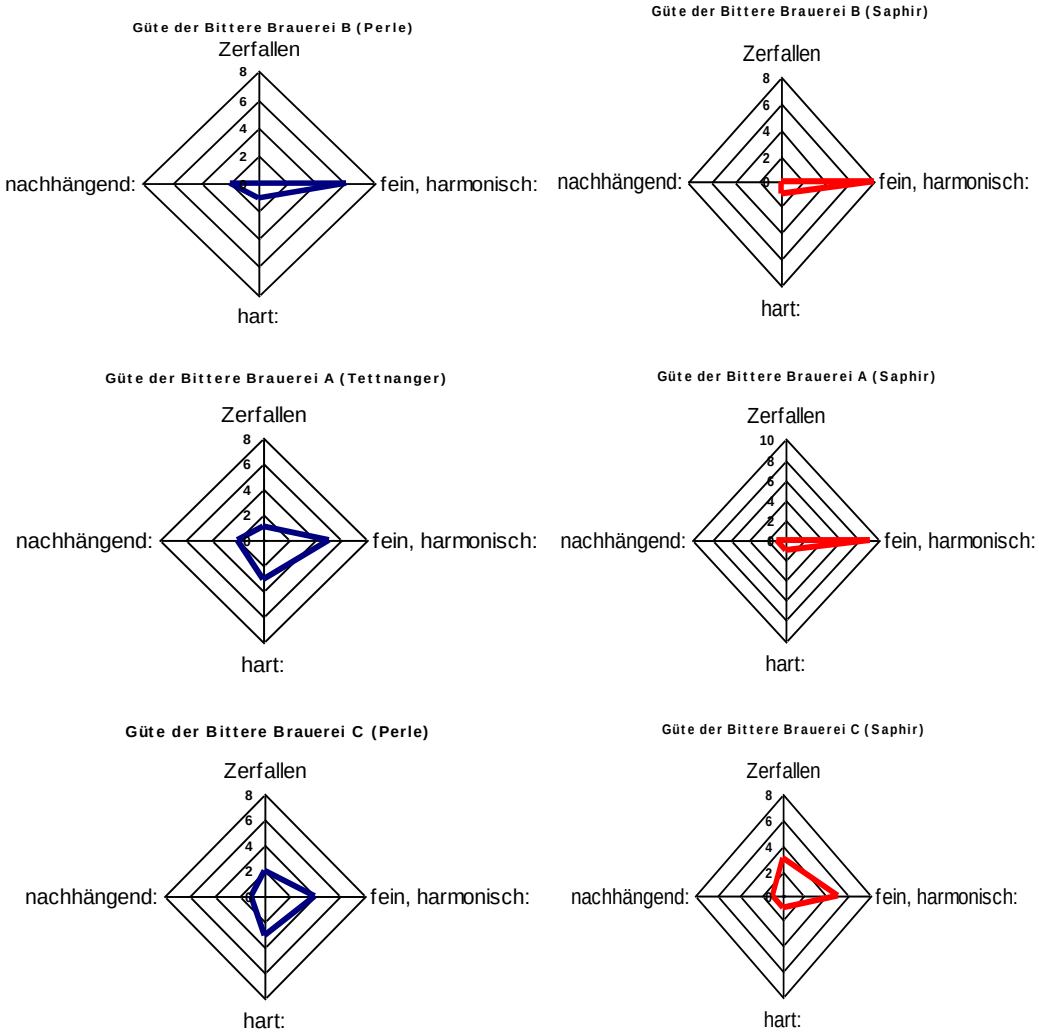


Abbildung 169: Güte der Bittere im Bier bei Einsatz der Aromahopfensorten Perle und Saphir

Aus den bisherigen Ergebnisssen ist erkennbar, dass die Sorte einen Einfluss auf das Hopfenaroma hat. Bei der sensorischen Analyse eines Bieren wird der Konsument jedoch immer das Aroma und die Bittere gemeinsam beurteilen. Geruch und Geschmack ergeben ein Gesamtbild, welches über Zu- oder Abneigung entscheidet. Somit war es von Interesse zu erforschen, wie stark sich Aromahopfen zur Verbesserung des Bittergeschmacks eigenen. Es ist bekannt, dass die Matrix des Bieres einen Einfluss darauf hat, wie stark sich die Hopfung

sensorisch auswirkt. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen wurden Pilotsude mit Gerstenmalzbieren gemäß dem Reinheitsgebot und Rohfruchtbiere mit unterschiedlichen Mengen an Aromahopfen erzeugt.

Quellen

Eigene Veröffentlichungen [144, 148, 158]

8.2.2 Einfluss einer frühen Gabe von Aromahopfen auf den Geschmack des Bieres

Allmalzbiere (100 % Gerstenmalz) und Reisbiere (70 % Gerstenmalz, 30 % Reis) wurden gebraut, um den reinheitsgebotskonformen wie auch den internationalen Biermarkt zu repräsentieren. Gehopft wurde jeweils zu Kochbeginn mit 100 % Bitterhopfen und einer 50/50 % Mischung bezogen auf die Bittereinheiten aus Aroma- und Bitterhopfen. Verwendung fanden dazu:

- Hallertauer Tradition, Pellets Typ 45, 6,7 % α-Säuren (EBC 7.5), sowie
- Hallertauer Magnum, Pellets Typ 45, 14,8 % α-Säuren (EBC 7.5)

Die Allmalzbiere erreichten im fertigen Bier durchschnittlich 23 BE (Gabe: 83 mg α-Säuren/l Würze) und eine Stammwürze von 11,5 %, die Reisbiere 18 BE (Gabe: 50 mg α-Säuren/l Würze) und 11,8 % Stammwürze. Die Kochdauer betrug 70 min. Je Versuchssud wurden ca. 40 l ausgeschlagen. Gärung, Reifung, Lagerung und Filtration waren bei allen Bieren identisch:

Bei diesem Versuch wurden durch die Mischung der beiden Hopfensorten tendenziell höhere Werte an beiden Polyphenolen erzielt, als dies mit reinem Bitterhopfen der Fall war wie Abbildung 170 zeigt. Diese Unterschiede folgen aus der Tatsache, dass vom Aromahopfen (6,7 % α-Säuren) eine mehr als doppelt so hohe quantitative Gabe an Hopfenprodukt als vom Bitterhopfen (14,8 % α-Säuren) erfolgen musste, um die gleichen Bittereinheiten zu erzielen. Mit dem Aromahopfen gelangen somit mehr Blattmaterial, in welcher der Großteil der Polyphenole lokalisiert ist, sowie mehr unspezifische Weich- und Hartharze in die Würze.

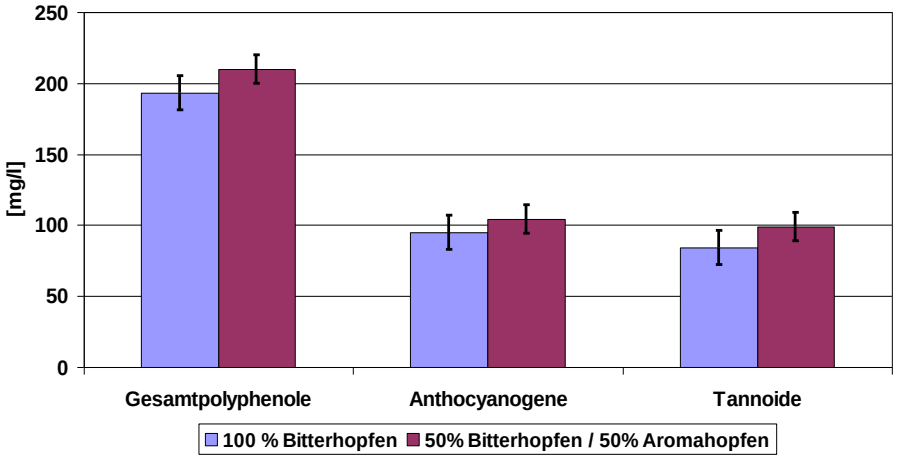


Abbildung 170: Gehalt an Gesamtpolyphenolen, Anthocyanogenen und Tannoiden der Allmalzwürzen zum Zeitpunkt Kühlmitte (KM)

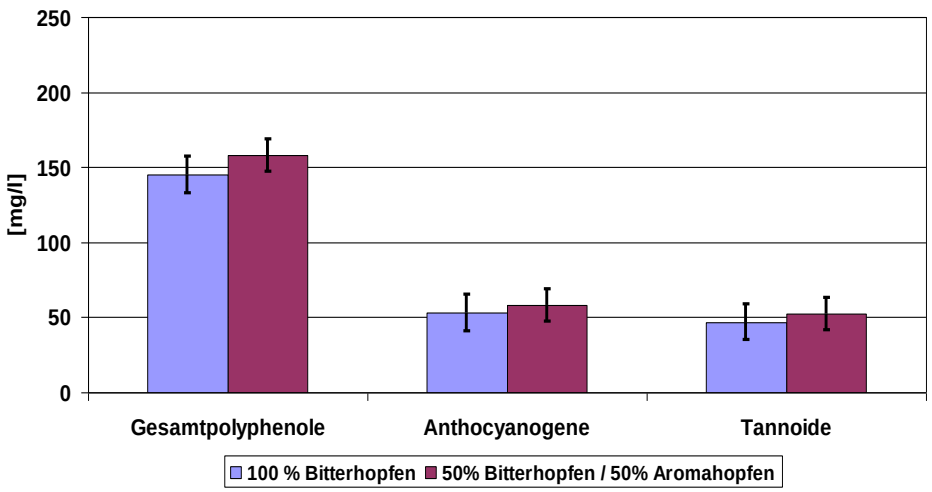


Abbildung 171: Gehalt an Gesamtpolyphenolen, Anthocyanogenen und Tannoiden der Reiswürzen zum Zeitpunkt Kühlmitte (KM)

Zwischen den unterschiedlich gehopften Bieren war bei der sensorischen Beurteilung der Güte bzw. Intensität der Bittere im frischen wie im forciert gealterten Zustand kein signifikanter Unterschied erkennbar. Die frischen und forciert gealterten (1 d schütteln, 4 d 40 °C) Biere wurden nach dem DLG-Verkostungsschema und nach dem Alterungsschema von Eichhorn [57] verkostet. Bei der Alterungsverkostung konzentrierte man sich ausschließlich auf den Oxidationsgeschmack, der mit einer Skala von 1-4 bewertet wurde. Eine Alterungsnote von 1,0 bedeutet, dass kein erkennbarer Alterungsgeschmack vorhanden ist und stellt somit die beste Bewertung dar. Ebenso wie bei den frischen Bieren erreicht hier die Mischung tendenziell die besseren sensorischen Ergebnisse.

Außerdem zeigen die Reisbiere aufgrund der schlechteren Alterungsnoten im forciert gealterten Zustand eine geringere Geschmacksstabilität als die Allmalzbiere. Zu berücksichtigen ist aber, dass sie, bedingt durch die Reissorte und den möglichen Grad an Verunreinigungen mit Fremdsamen, erhöhte Gehalte an Bieraromastoffen aus dem Fettabbau aufweisen können [334].

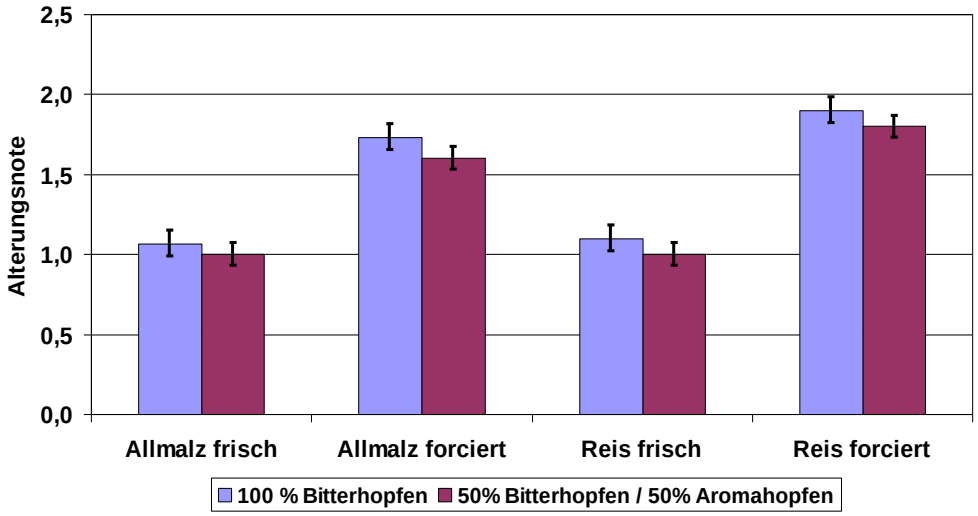


Abbildung 172: Alterungsnoten der Allmalz- und Reisbiere.

Die Versuchsergebnisse bestätigen wie bereits aus der Praxis berichtet, einen leichten, jedoch nicht signifikanten Trend zu einer besseren sensorischen Beurteilung der Biere mit einem höheren Aromahopfenanteil, wenn dieser bereits bei Kochbeginn gegeben wurde. Grund hierfür könnten die mit dem Aromahopfen in stärkerem Ausmaß in die Würze gelangenden phenolischen Substanzen sowie die unspezifischen Weich- und Hartharze sein [30]. Bei der Herstellung xanthohumolreicher Hopfenprodukte wurden auch Hartharzfraktionen angereichert. Brauversuche mit diesen Produkten haben gezeigt, dass eine starke, aber auch schnell abklingende Bittere sensorisch wahrnehmbar war. Dieses Phänomen kann nicht auf die α-Säuren zurückgeführt werden, da diese Hopfenprodukte geringe α-Säurenkonzentrationen hatten. Weiterhin vermitteln die unspezifischen Weichharze laut *Narziss* etwa ein Drittel der Bittere der α-Säuren und stellen somit eine zusätzliche Gruppe von bitteren Geschmacksstoffen im Bier dar [215].

Auch wenn die sensorischen Ergebnisse dieser Versuchsreihen nicht signifikant sind, zeichnet sich ab, dass eine Erhöhung des Aromahopfenanteils zu Kochbeginn eine Verfeinerung der Bierbittere erzeugen kann.

Zu einer analytischen Charakterisierung des Geschmacksprofils des Bieres fehlen der Brauwissenschaft bislang noch geeignete Instrumente, mit deren Hilfe das sensorische Potenzial einzelner Substanzen oder -gruppen der Harz- und Polyphenolfraktionen besser eingestuft werden kann. Haupthindernis ist die Verfügbarkeit oder der hohe Preis von Reinsubstanzen. Zumischversuche zu Bier, welche die sensorische Relevanz der Substanzen bzw. Substanzgruppen aufzeigen könnten sind somit nicht möglich.

Eine einfache Möglichkeit den Beitrag des Hopfens auf die Sensorik des Bieres zu beeinflussen ist die Wahl der Hopfensorte. Die Braueignung von Hopfen-Neuzüchtungen wurde in den vorangegangenen Kapiteln untersucht.

Neben den sensorischen Auswirkungen des Hopfens auf das Bier können auch Eigenschaften wie die Schaumhaltbarkeit, die Mikrobiologie oder die Anreicherung mit wertvollen Inhaltsstoffen durch den Hopfen beeeinflusst werden. Hierfür kommen außerhalb des Bayrischen Reinheitsgeboges meist downsstream-Produkte zum Einsatz. Außerdem wird im folgenden Kapitel näher auf die Lagerbedingungen des Hopfens eingegangen, da dies qualitativ und wirtschaftlich große Auswirkungen hat.

Quellen

Diplomarbeit Franz Kummert sowie eigene Veröffentlichungen [11, 145, 151, 195]

Spezielle Aspekte zum Thema Hopfen

Hopfen hat neben den sensorischen Auswirkungen auf das Bier auch noch weitere qualitätsbeeeinflussende Eigenschaften. Einige wichtige Aspekte werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

So gibt es die Anreicherung von gesundheitlich positiv eingestuften sekundären Pflanzeninhaltsstoffen, wie z. B. das Prenylflavanoid Xanthohumol. Um dieses bis zum Bier möglichst unisomerisiert zu erhalten, wurde am Lehrstuhl ein patentiertes Verfahren entwickelt.

Durch die Entwicklung von downstream-Produkten wurde die Dosage des Hopfens zur Würze, so wie sie im Vorläufigen Biergesetz vorgeschrieben ist, verlassen. Diese Hopfenprodukte können z. B. isomerisierte und reduzierte α-Säuren enthalten und sind somit für die Dosage in das fertige Bier geeignet. Deren sensorische Eigenschaften und daraus abgeleitet die Art der Hopfendosage sind von Interesse, zumal die Produkte bereits weltweit eingesetzt werden.

Die Haltbarkeit des Bierschaumes ist für alle Biere ein Qualitätskriterium. Besonders innerhalb des Bayrischen Reinheitsgebotes wird darauf sehr geachtet, weswegen die gesamte Technologie der Bierbereitung darauf abgestimmt werden muss. International betrachtet gibt es Länder, die den Bierschaum kaum beachten und andere die den Schaum durch Additive beeinflussen. Der Hopfen bzw. Hopfenprodukte können den Bierschaum signifikant verbessern.

Nach dem Bayrischen Reinheitsgebot dürfen nur Wasser, Malz, Hopfen (und Hefe) verwendet werden. Dem Hopfen wurde schon damals eine sensorische Relevanz, aber auch eine bakteriostatische Relevanz zugesprochen, weshalb mikrobiologische Untersuchungen durchgeführt wurden.

Zuletzt werden die Lagerbedingungen von Hopfen und Hopfenprodukten betrachtet. Da Hopfen weltweit gehandelt und auch über mehrere Jahre gelagert wird, sollten Transport und Lagerung möglichst werterhaltend gestaltet werden. Für den Brauer ist besonders interessant, nach welchen Analysenwerten ein gealterter Hopfen dosiert werden soll.

Xanthohumolangereichertes Bier

Das Prenylflavanoid Xanthohumol erfährt zunehmend mehr Interesse von medizinischer und brautechnologischer Seite. Das Ziel einer Xanthohumol-Anreicherung in Bier kann über den Einsatz spezieller Hopfenprodukte erreicht werden [27, 29, 79, 80, 204, 317, 329].
Xanthohumol ist in Rohhopfen, Pellets, Ethanolextrakt sowie in xanthohumolangereicherten Hopfenprodukten zu finden. Über spezielle Brauverfahren kann im Rahmen des Vorläufigen Biergesetzes Xanthohumol in höheren Konzentrationen unisomerisiert bis in das Bier erhalten werden. *Back*, *Zürcher* und *Wunderlich* haben ein patentiertes Verfahren entwickelt. Außerhalb des Deutschen Reinheitsgebotes sowie in Biermisch- und alkoholfreien Getränken kann durch spezielle Hopfenprodukte Xanthohumol in gewünschter Konzentration dosiert werden. Eine Bierstabilisierung mittels PVPP sollte vermieden werden, da PVPP das Polyphenol bzw. Prenylflavonoid Xanthohumol weitgehend aus dem Bier entfernt. Bei dunklen Bieren, die mit einem Anteil an dunklen Spelzialmalzen gebraut wurden, ist eine PVPP-Stabilisierung mit geringeren Xanthohumol-Verlusten möglich [11].

Vermeidung des „Lichtgeschmackes“ im Bier.

Durch den Abbau von iso-α-Säuren unter Lichteinfluss entsteht das als „Lichtmerkaptan“ bekannte 3-Methyl-2-buten-1-thiol (MBT), dessen Geschmacksschwellenwert weit unter 1 µg/l liegt. Braune Flaschen halten die hierfür verantwortlichen UV-Strahlen fast vollständig ab, grüne Flaschen nur teilweise und weiße Flaschen gar nicht [24, 145].
Durch die ausschließliche Verwendung lichtstabiler bzw. reduzierter Hopfenprodukte kann die Bildung von Lichtgeschmack verhindert werden. Jeglicher Eintrag von iso-α-Säuren muss dabei vermieden werden. Mögliche Kontaminationsquellen sind die Reste vorheriger Hopfendosagen, z. B. in den Rohrleitungen, die Wiederverwendung des Heißtrubes oder die Hefe eines vorausgegangenen konventionell gehopften Sudes.

Wenn reduzierte Produkte verwendet werden, muss auf die sensorische Bittere, d. h. auf die vom Verkoster wahrgenommene Bittere der Biere geachtet werden. Bei Dosage gleicher Mengen an reduzierten iso-α-Säuren im Vergleich zu iso-α-Säuren, unterscheiden sich die Biere in ihrem Bittereindruck bei der Verkostung. Deshalb sind Probesude in der Brauerei anzuraten, um die genaue Dosagemenge zu ermitteln. Zur Orientierung ist das Bitterpotenzial einiger Produkte in Tabelle 39 aufgeführt.

Tabelle 39: Relatives Bitterpotenzial verschiedener reduzierter Hopfenprodukte, bezogen auf das Bitterpotenzial von iso-α-Säuren [324]

	Lichtschutz	Schaum-verbesserung	Bitterpotenzial
iso-α-Säuren	Nein	normal	1,0 (Vergleich)
Rho-iso-α-Säuren	Ja	normal	0,6-0,7
Tetra-hydro-iso-α-Säuren	Ja	verbessert	1,0-1,7
Hexa-hydro-iso-α-Säuren	Ja	verbessert	1,0-1,3

Bei einer höheren Dosage reduzierter iso-α-Säuren wird zwar der Bittereindruck stärker, die Qualität der Bittere nimmt aber in gleichem Maße ab. Außerdem tritt bei einer hohen Dosage von Tetra-hydro-iso-α-Säuren eine Sättigung hinsichtlich der sensorischen Bittere und der Schaumverbesserung auf. Ist die Geschmacksmatrix eines Bieres sehr intensiv oder wird das Bier bei extrem kalten Temperaturen getrunken, so kann eine Maskierung der Bittere das Bitterpotenzial absenken. Dies erklärt auch, warum die Tetra-hydro-iso-α-Säure in Wasser ein Bitterpotenzial von ca. 1,7 hat, welches je nach Biertyp bis auf den Wert 1,0 absinken kann.

Schaum

Hopfen hat einen positiven Einfluss auf die Schaumstabilität des Bieres. Im Rahmen des Deutschen Reinheitsgebotes kann durch eine späte Hopfendosage der Gehalt unisomerisierter α-Säuren im Bier erhöht werden. Diese sind in nur geringem Maße bierlöslich (ca. 2 mg/l), können aber die Schaumstabilität erhöhen [124].
Bei internationalen Bieren, außerhalb des Reinheitsgebotes, können reduzierte Hopfen-produkte verwendet werden. Dosagen von 3 - 5 mg Tetra-hydro-iso-α-Säuren pro Liter Bier verbessern den Bierschaum signifikant. Überhöhte Dosagen können zu einer unnatürlichen, bieruntypischen Schaumstruktur führen. Außerdem muss auf die sensorisch wahrgenommene Bittere geachtet werden, wie Tabelle 39 zeigt.[145, 280]. Mit zunehmender Hydrierung der iso-α-Säuren steigt die Hydrophobizität und damit der positive Einfluss auf den Bierschaum.

Gleichzeitig sinkt die Löslichkeit in Bier, was zu technischen Problemen bei der Dosage (Ausscheidung) führen kann.

Mikrobiologie

Die mikrobiologische Stabilität des Bieres wird durch Hopfen erhöht. Unisomerisierte α-Säuren haben einen 3-4fach stärkeren antimikrobiellen Effekt auf bierschädliche Mikroorganismen der Gattung *Lactobacillus* und *Pediococcus* als iso-α-Säuren. Durch späte Hopfengaben kann der Gehalt an α-Säuren in Bier erhöht werden. Ähnlich wie beim Schaum wirkt sich die zunehmende Hydrierung der iso-α-Säuren positiv auf die mikrobiologische Stabilität des Bieres aus.

Beginnend von der schlechtesten bis zur besten mikrobiologischen Stabilität des Bieres lassen sich Hopfenbitterstoffe wie folgt auflisten [124]:

- Ungehopftes Bier;
- iso-α-Säuren;
- Rho-iso-α-Säuren;
- Tetra-hydro-iso-α-Säuren;
- 50 % Tetra-hydro-iso-α-Säuren + 50 % hexa-hydro-iso-α-Säuren;
- α-Säuren.

Beim Betrieb einer biologischen Säuerungsanlage ist darauf zu achten, dass keine Hopfenbitterstoffe mit der Laktobazillenkultur (z. B. *Lactobacillus amylolyticus*) in Kontakt kommen, da diese keine Hopfentoleranz aufweisen. Erst nach Entnahme der Vorderwürze für die biologische Säuerungsanlage darf mit der Rückführung des Heißtrubes in den Läuterbottich begonnen werden.

Hopfenlagerung

Hopfen ist anfällig für Oxidationen und chemische Veränderungen seiner Inhaltsstoffe. Die Bitterkraft kann bei schlechten Lagerbedingungen durch eine Oxidation der α-Säuren abnehmen. Dagegen ist bei einer optimalen Lagertemperatur (siehe Tabelle 40) bei der Dosage des Hopfens weiterhin vom ursprünglich angegebenen Wert auszugehen, da selbst die dabei entstandenen Abbauprodukte wiederum zu einer geschmacklich einwandfreien Bittere beitragen. Das Aroma wird bei unsachgemäßer Lagerung des Hopfens vor und nach der Veredelung unangenehm und „käsig“. Dies gilt insbesondere für Rohhopfen und Pellets. Deshalb sollte der Hopfen lichtgeschützt, bei kalten Temperaturen und vor Fremdeinflüssen (Geruch, Wasser usw.) geschützt gelagert werden. α-Säuren oxidieren unter Sauerstoffeinfluss und isomerisieren unter inerter Atmosphäre. Dies erklärt den α-Säureverlust bei der Lagerung. Hartharzkomponenten sind im Rohhopfen bereits vorhanden. Außerdem sind sie Oxidationsprodukte von Bittersäuren, welche bei Vorhandensein von Sauerstoff entstehen können. Man bezeichnet sie auch als polare Bittersubstanzen. Als Konsequenz ist die Kaltlagerung von Rohhopfen und Pellets unbedingt zu empfehlen. Reinharzextrakte sind erheblich stabiler als Doldenhopfen und Pellets. Tabelle 40 zeigt empfohlene Lagertemperaturen für Hopfen und Hopfenprodukte.

Tabelle 40: Empfohlene Lagertemperaturen für Hopfen und Hopfenprodukte

Lagerstabilität von Hopfen und Hopfenprodukten					
	1 Jahr	2 Jahre	3 Jahre	5 Jahre	8 Jahre
Doldenhopfen	< 5 °C	< -20 °C	nicht praktikabel		
Pellets	< 5 °C			< -20°C	nicht praktikabel
Ethanol-Extrakt	< 10 °C				< 5 °C
CO_2-Extrakt	< 25 °C		< 5 °C		

Der Abbau der α-Säuren scheint bei der Messung mittels HPLC (EBC 7.7) stärker als bei der Ermittlung anhand des Konduktometerwertes (EBC 7.5), wie Abbildung 173 zeigt. Dies liegt daran, dass die summarische Analyse des KW auch unspezifische Bitterstoffe erfasst, welche eine Bitterkraft besitzen. Somit muss besonders bei Verwendung gealterter Hopfenpellets die Hopfendosage über den Konduktometerwert eingestellt werden.

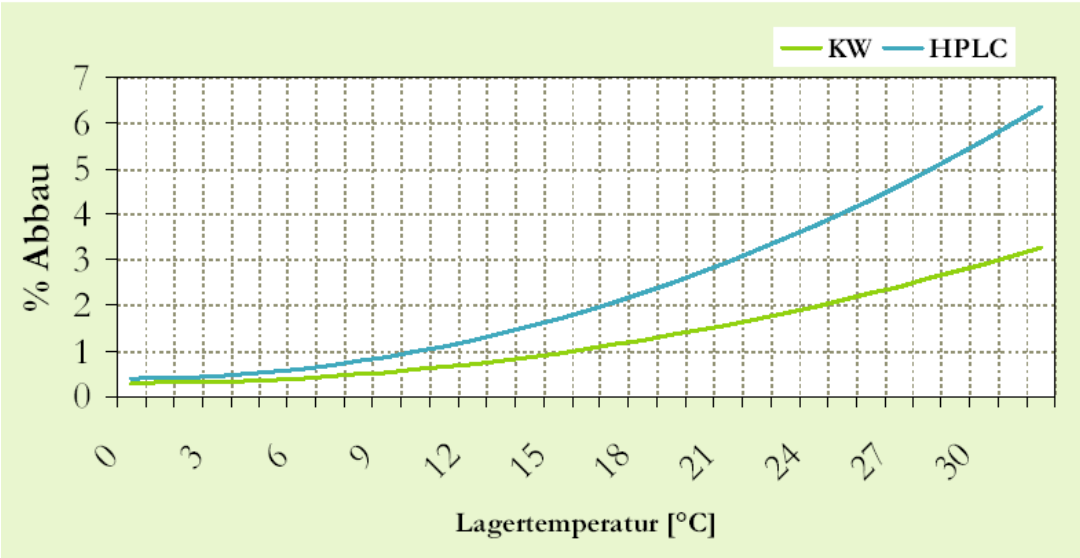


Abbildung 173: Monatlicher relativer α-Abbau (ohne 0_2) in Pellets als Funktion der Lagertemperatur

9 Diskussion und Schlussfolgerung

Die Bierbereitung ist nicht nur durch die Vielzahl unterschiedlicher mechanischer und biochemischer Prozessschritte sehr komplex, sondern wird auch durch die Zusammensetzungen der verwendeten Rohstoffe (Wasser, Gerste bzw. Malz, Hopfen, Hefe) stark beeinflusst. Ziel der Arbeit war es, die Prozesse schrittweise zu beschreiben und neue Technologien zur Verbesserung der Würze- und Bierqualität zu entwickeln. Nach den Versuchen im Labor- und Pilotmaßstab wurden Großversuche in Industrieanlagen durchgeführt. Innovationen können sich am Markt nur durchsetzen, wenn sie großtechnisch übertragbar und wirtschaftlich sind. Bei einigen der hier erarbeiteten Technologien (dynamische Niederdruckkochung, Würzevorkühlung vor dem Whirlpool mittels Wärmeübertrager oder Expansionsverdampfung, Maltase-Maischverfahren, Protektive Schrotung, Läutern mittels Fuzzy-Logic) wurde dies auch erreicht.

Malzbereitung

Bei der Malzbereitung aus Braugetreide hat sich gezeigt, dass alle cytolytischen, proteolytischen und amylolytischen Kennzahlen des Malzes durch die Mälzungstechnologie signifikant beeinflusst werden können. Ausnahmen sind die Diastatische Kraft (DK) und der Rohproteingehalt. Die DK ist genotypisch und somit durch die Gerstensorte bestimmt. Der Rohproteingehalt hängt ebenfalls von der Gerstensorte ab, wird aber durch die Umweltbedingungen dominant beeinflusst. Durch eine entsprechend angepasste Mälzungstechnologie kann aus sehr unterschiedlichen Sorten und Provenienzen ein gutes Braumalz erzeugt werden.

Dennoch gibt es qualitative Mängel, da das Mälzungsverfahren gelegentlich nicht nach optimalen technologischen, sondern nach ausschließlich wirtschaftlichen Gesichtspunkten gewählt wird. So sollen z. B. für eine gute Geschmacksstabilität die proteolytischen Kennzahlen im Malz nicht zu hoch sein. Gleichzeitig wird eine möglichst hohe cytolytische Lösung des Malzes gefordert, um Filtrationsprobleme zu vermeiden. Bei höheren Rohproteingehalten der Gerste, z. B. in einzelnen Jahrgängen, kann dies auch durch höhere Keimtemperaturen erreicht werden, wobei sich jedoch der Mälzungsschwand erhöht.

Aus Produkten der Keimung bzw. dem Schwelken entstehen Edukte für thermische Prozesse beim Darren und Würzekochen, welche zu Aromastoffen führen und so den Biercharakter sowie dessen Geschmacksprofil und -stabilität beeinflussen. Bereits im Malz können Malzaromastoffe bestimmt werden, welche eine Vorhersage des Geschmackes und der Geschmacksstabilität des Bieres ermöglichen. Um eine überarbeitete und neu entwickelte gaschromatographische Analysenmethode zu evaluieren, werden derzeit die Standardmalze verschiedener Gerstensorten der Wertprüfung III des Bundessortenamtes untersucht. Die vorausgesagten sensorischen Eigenschaften werden mit den tatsächlichen Verkostungsergebnissen der frischen und künstlich gealterten Kleinsudbiere verglichen.

Versuche zur Wirbelschichttrocknung haben gezeigt, dass sich diese Technologie in der Schwelkphase stark von den klassischen Systemen unterscheidet, jedoch in der Abdarrphase vergleichbar ist. Für eine optimale Wirtschaftlichkeit wäre eine kontinuierliche Wirbelschichtdarre mit Schwelk- und Darrabteilung am besten geeignet, da so die Energieströme optimal aufeinander abgestimmt werden können. Beim Übergang vom chargenweisen Keimen zum kontinuierlichen Schwelken und Darren treten unterschiedlich lange Verweilzeiten auf, welche zu dementsprechend variierenden Lösungsgraden führen.

Somit wäre ebenfalls eine kontinuierliche Keimung anzustreben. Dies ist aber in der Praxis nur in Einzelfällen gegeben. Einfacher als die Optimierung einer bestehenden Anlage ist die Wahl einer geeigneten Gerstensorte. Dadurch ergeben sich auch Verbesserungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sowohl für den Landwirt als auch für den Mälzer und Brauer. Hier kommt der Gerstenzüchtung eine große Bedeutung zu. Neben der Sortenwahl können auch statt zweizeiliger Sommergerste geeignete Wintergersten vermälzt werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Wintergerste im Rohproteingehalt um ca. 1 % niedriger als bei der Sommergerste des gleichen Jahrganges liegen muss, um vergleichbare Werte der Malzanalyse zu liefern. Im Ausland können alternativ unvermälzte Rohstoffe eingesetzt werden.

Schroten

Die Zerkleinerung von Malz ist mit einer Erhöhung des Dispersitätszustandes verbunden, was zu einer Vergrößerung der Oberfläche des Körnerkollektivs, einer Verkleinerung der Weglänge der erforderlichen Stofftransportvorgänge und einer Freilegung des Substrates für den enzymatischen Abbau beim Maischen führt. Da die Schrotzusammensetzung die Läutereigenschaften des Treberkuchens beeinflusst, sind Mühlentyp und Mühleneinstellung auf das Läutersystem abzustimmen.

Für Nassschrotverfahren wird eine Schrotzeit von ca. 20 min gefordert, um die enzymatischen Vorgänge kontrollierbar zu halten. Durch die dadurch bedingten hohen Durchsatzleistungen, können Mahlspaltänderungen während des Betriebes auftreten, wie an einer Zwei-Walzen-Nassschrotmühle gezeigt wurde. Eine derartige Mühle sollte deshalb im Ruhezustand eine Spaltweite aufweisen, welche 0,1 – 0,2 mm kleiner ist als der Sollwert. Außerdem haben Druckversuche gezeigt, dass bei gut gelösten Malzen mehr Druckkraft notwendig ist, um das Korn zu brechen. Bei schlecht gelösten Malzen ist die Druckkraft zwar geringer, jedoch die Rückdehnung des Kornes größer. Aus diesem Grund ist das Mahlergebnis von Rohfrucht oder knapp gelöstem Malz schlechter. Um diesen Nachteil zu kompensieren, können Rohfruchtanteile bei geringerem Walzenabstand (automatisch verstellbarer Walzenstuhl) vermahlen oder separat über Hammermühlen gefahren werden.

Bereits bei der Schrotung kann durch Reduzierung der Lipidoxidation ein positiver Einfluss auf die Geschmacksstabilität des Bieres erreicht werden. Das System der „Protektiven Schrotung“ führt zu einer Schonung der Blattkeime, ist aber mechanisch aufwändig und hat sich bis jetzt nur in einer Großbrauerei durchgesetzt. Zur Reduzierung der Lipidoxidation kann bei Trockenschroten der Schrotkasten inert begast oder auf kurze Schrotlagerzeiten geachtet werden. Bei Nassschrotungen kann das Konditionierwasser inert begast werden, wobei die Maische meist zusätzlich sauerstoffarm von unten in den Maischbottich eingepumpt wird. Unabhängig davon kann durch die Wahl hoher Einmaischtemperaturen (> 60 °C) und eventuell einer gleichzeitigen Maischesäuerung die Lipidoxidation vermindert werden.

Um Mängel in der cytolytischen Lösung der Malze auszugleichen und die Filtrierbarkeit des Bieres zu verbessern, wurde das System der „Fraktionierten Schrotung“ entwickelt. Hierbei wird mittels Prallmühle das Malz grob zerkleinert. Die Mahlbeanspruchung in der Prallmühle ist in etwa so groß wie die Mahlbeanspruchung bei der Laboranalyse des Friabilimeters. Durch eine Siebung über ein 1,6-mm Sieb (vgl. Spelzensieb der Trockenschrotmühlen) wird eine Fraktion mit hohem β-Glucangehalt (Grobfraktion) abgereichert. Sowohl die Fein- als auch die Grobfraktion müssen nachgemahlen werden, um den Anforderungen des in der Brauerei vorhandenen Läutergerätes zu genügen. Die Grobfraktion durchläuft ein kurzes Infusionsmaischverfahren bis hin zur Verkleisterungstemperatur, wodurch sich das β-Glucan aus den schlecht gelösten Malzanteilen maximal löst. Die Feinfraktion wird bei tiefen

Temperaturen eingemaischt und mit der Maische der Grobfraktion zusammengeführt, so dass sich eine Mischtemperatur < 45 °C ergibt. Dadurch erfolgt eine cytolytische Modifikation des gelösten β-Glucans vor allem durch die endo-β-1,4-Glucanase, was zu einer besseren Filtrierbarkeit des Bieres führt. Diese aufwändige Verfahrensweise hat sich aber in der Praxis nicht durchgesetzt, zumal auch die Malzqualitäten weltweit immer besser wurden. Außerhalb des Reinheitsgebotes ist zusätzlich noch die Möglichkeit des Einsatzes exogener Enzyme möglich, falls eine cytolytische Unterlösung vorliegt. Außerdem wurde erkannt, dass unvermälzte Gerste bei angepasster Technologie bis zu einem Anteil von ca. 20 % ohne Enzymzusatz verarbeitet werden kann.

Maischen

Die Schrotung stellt die mechanische Modifikation, das Maischen die enzymatische Modifikation der Malzinhaltsstoffe dar. Beide Prozessschritte müssen aufeinander abgestimmt werden, um eine optimale Ausbeute und Würzequalität zu erzielen. Abhängig vom Lösungsgrad des Malzes müssen entsprechende Maischverfahren gewählt werden. Ziel ist es, eine Würzezusammensetzung zu erzeugen, welche zu einer optimalen Bierqualität führt. Für die Bierqualität ist zunächst durch das gewünschte Aroma- und Geschmacksprofil wichtig. Darüber hinaus müssen aber auch die Geschmacksstabilität, chemisch-physikalische Stabilität, mikrobiologische Stabilität und Schaumstabilität gewährleistet sein. Diese Stabilitäten werden ebenfalls durch die Gärung stark beeinflusst. Das bedeutet, dass die Würzezusammensetzung mit der Hefephysiologie abgestimmt werden muss. Gleichzeitig wird ein reibungsloser und kostengünstiger Ablauf der Prozesse gefordert. Die Proteolyse soll ein ausreichendes Angebot an Freiem Aminostickstoff (FAN) für die Hefeernährung gewährleisten. Gleichzeitig muss aber beachtet werden, dass der Eiweißabbau im Hinblick auf die Schaumhaltbarkeit nicht zu weitgehend ist. Die amylolytische Lösung (Extraktausbeute) soll maximal und die Lösung filtrationshemmender Stoffe minimal sein.

Um die Zusammenhänge der Maischarbeit zu erforschen, wurden systematische Maischversuche durchgeführt. Bezüglich der Temperaturführung hat sich gezeigt, dass erst nach Überschreiten der Verkleisterungstemperatur eine maximale proteolytische, amylolytische und cytolytische Lösung erreicht wird. Eine feinere Schrotung führt zwar zu einer schnelleren Lösung unterhalb der Verkleisterungstemperatur, kann jedoch die Verkleisterung und Verflüssigung der stärkeführenden Schrotbestandteile nicht ersetzen. Erst nach der Verzuckerung ist die maximale Extraktausbeute erreichbar. Eine cytolytische Unterlösung von Malzen kann nur durch aufwändige Maischverfahren mit tiefen Einmaischtemperaturen teilweise ausgeglichen werden. Gleichzeitig führen derartige Maischverfahren zu einer proteolytischen Überlösung, welche nicht gewünscht ist. Wichtigster Faktor für die Ausbeute an Würzeinhaltsstoffen ist die Malzlösung, welche die Schrot- und Maischarbeit zum großen Teil kompensieren kann.

Es wurde versucht, den Maischprozess online zu verfolgen, um noch während des Maischens lenkend eingreifen zu können. Dies würde es ermöglichen, bei schwankenden Malzqualitäten stets eine gleichbleibende und optimale Würzequalität zu erzeugen. Unterhalb der Verkleisterungstemperatur konnte eine Korrelation zwischen dem Leitwert und FAN-Gehalt festgestellt werden.

Durch die Zuckerzusammensetzung kann das Aromaprofil des Bieres beeinflusst werden. Wird das Verhältnis Glucose : Maltose zu Gunsten der Glucose verschoben, so reagiert die Hefe mit einer höheren Bildung von Estern. Im Rahmen des Bayrischen Reinheitsgebotes sind Zusätze nicht erlaubt, so dass ein spezielles Maischverfahren entwickelt wurde. Beim „Maltase-Maischverfahren“ wird, ähnlich der „Fraktionierten Schrotung“, eine Absenkung

der Maischtemperatur während des Maischprozesses durchgeführt. Dies erfolgt vorzugsweise durch getrenntes Einmaischen von zwei Teilen des Gesamtschrotes bei unterschiedlichen Temperaturen. Bisher wird nur in heißen Ländern durch eine Kaltwasserzugabe die gewünschte Temperatur realisiert. Durch die Verzuckerung der ersten Maische ist zwar ein Großteil an Maltose gebildet worden, jedoch wurde das Enzym Maltase inaktiviert. Das Zubrühen zu einer zweiten, kalten Maische führt zu einer Mischtemperatur von 45 °C. Die Maltase der zweiten Maische spaltet Maltose aus der ersten Maische zu zwei Molekülen Glucose, wodurch sich das Verhältnis Glucose : Maltose verschiebt und die Esterbildung angeregt wird. In einigen Weißbierbrauereien wurde das Verfahren erfolgreich eingeführt. Alternativ führt die Gärung in liegenden Tanks oder offenen Bottichen zu höheren Estergehalten, ist aber apparativ viel aufwändiger, was sich in den Investitionskosten niederschlägt.

Bei Untersuchungen zur kontinuierlichen Reifung zeigte sich, dass die Esterkonzentrationen beim Einsatz eines Festbettreaktors reduziert werden. Die Hefevitalität nahm über die Laufzeit leicht ab, was sich im Anstieg des Acetaldehyd, der mittelkettigen Fettsäuren (C6, C8-C12) und letztendlich auch des pH-Wertes zeigte. Die kontinuierliche Reifung benötigt einen Separator, einen Kurzzeiterhitzer, einen Festbettreaktor und einen zusätzlichen Kühler. Die Investition kann vermieden werden, wenn das Hefemanagement derart optimiert ist, dass der Diacetyl-Abbau noch bei der Gärtemperatur oder leicht darüber im Gärtank erfolgen kann.

Der Vergleich von Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren hat gezeigt, dass sich die Dextrinzusammensetzung (G4 – G10) in der Kochmaische erwartungsgemäß verändert. Nach Zubrühen der Kochmaische zur Restmaische und nach erfolgter Verzuckerung gleichen sich die Zuckerzusammensetzungen an die eines Infusionsmaischverfahrens an. Deshalb verwundert es nicht, dass sensorisch keine signifikanten Unterschiede erkannt werden konnten − aber nur wenn die Temperaturführung des Infusionsverfahrens dem der Restmaische ähnlich war. Die erfolgreiche Umstellung von Dekoktion auf Infusion in vielen Brauereien bestätigt dies. Bisher wenig erforscht ist die Proteinzusammensetzung von Würzen und Bieren aus Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren. Die Betrachtung der Eiweißausfällung bzw. Trubbildung bei der Würzekochung hat gezeigt, dass diese stärker ist als die der Maischekochung und somit dominant für die Würze- und Bierqualität.

Eine Berechnung des Energiebedarfes beim Maischen hat ergeben, dass die Abstrahlungsverluste bei isolierten Maischgefäßen bei nur ca. 0,3 % liegen. Die größte Wärmemenge wird für das Aufheizen der Maische verwendet. Besteht ein Wärmeüberschuss in der Brauerei, kann dieser am besten durch Zubrühen von warmem Brauwasser zum Maischen ausgenutzt werden. Alternativ stellt die Flaschenfüllerei eine geeignete Abnahmequelle dar.

Läutern

Es wurde eine Optimierung des Läuterprozesses mittels Fuzzy-Logic untersucht. Die Vergleiche der unscharf abgeläuterten Würzen mit den konventionell abgeläuterten ergaben keine wesentlichen Unterschiede in der Würze- und Bierzusammensetzung. Positive Effekte der Neuentwicklung zeigten sich vor allem in der technischen Leistungsfähigkeit des Systems. Hier ist vor allem eine Verkürzung der Läuterzeit zu nennen. Außerdem führt eine Verringerung der Hubspiele zu einer Schonung der mechanischen Einrichtungen und somit zu weniger Verschleiß.

Läuterbottich und Maischefilter separieren mit einer natürlichen Filterschicht aus Spelzen. Deshalb kann das Malzkorn nicht beliebig fein vermahlen und auf die Spelzen verzichtet werden. Um die Vorteile einer Malzfeinvermahlung und Spelzentrennung auszuschöpfen,

wurde eine neue Scherspaltfiltrationstechnik, die Vibrations-Membran-Filtration (VMF), an die Maischefiltration angepasst. Als Membranmaterial hat sich eine hydrophobe Polytetrafluorethylen-Membrane (PTFE) mit einer Porenweite von 0,1 µm oder 0,45 µm bewährt. Für eine gute Wirtschaftlichkeit der Anlage wird ein möglichst hoher Flux angestrebt. Es gibt eine maximale Feststoffkonzentration im Retentat, welche nicht überschritten werden sollte, da sonst der Filterwiderstand exponentiell zunimmt. Durch die Oszillationsfrequenz und -amplitude der Filterpakete kann die kritische Feststoffkonzentration beeinflusst werden. Es zeigte sich, dass mit steigendem β-Glucangehalt der Flux reduziert wird. Gleichzeitig konnte eine Verschlechterung des Bierschaumes festgestellt werden. Durch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen (REM) und chemische Nachweismethoden konnte gezeigt werden, dass sich eine Deckschicht auf der Membrane ausbildet, welche größere schaumpositive Moleküle sowie β-Glucan zurückhalten kann. Ein weiteres Problem stellen die Spelzenanteile der Maische dar, welche sehr abrasiv sind und die Membran schädigen.

Bekanntlich übt die Würzezusammensetzung einen Einfluss auf die Filtrierbarkeit von Maische und Bier aus. Es sollte nun untersucht werden, welche Bierinhaltstoffe für das Membran-Fouling bei der Bierfiltration verantwortlich sind, um diesbezügliche Verbesserungen zu erreichen. Anorganische Ionen werden durch die Membrane nicht zurückgehalten. Eine ladungsabhängige Adsorption von Calciumionen aus dem Spülwasser konnte pH-abhängig festgestellt werden. Besonders bei warmer Reinigung und kalter Wasserspülung werden Ablagerungen von Calciumcarbonat an der Membrane beobachtet. Eine saure Spülung der Membrane vor der Bierfiltration kann dieses Problem lösen und führt zusätzlich zu einer verringerten Adsorption von Polyphenolen. Eine Infrarot-Spektroskopie verblockter Membranen brachte die Erkenntnis, dass β-glycosidische Verbindungen am Membran-Fouling beteiligt sind. Bei der Reinigung der Membranen mit unterschiedlichen Enzymen zeigte das Enzym Cellulase die beste Wirkung. Aus diesen Erkenntnissen wurde ein patentiertes Reinigungsverfahren für Membranen entwickelt. Weitere Untersuchungen, wie die der Partikelgrößenverteilung mittels Photonen-Korrelationsspektroskopie, haben gezeigt, dass die Verblockungen nicht-partikulärer Natur waren. Erst die Untersuchung des Zeta-Potenzials zeigte eine Übereinstimmung mit den REM-Aufnahmen. Das Zeta-Potenzial eignet sich zur Vorhersage des Verblockungsgrades der Membrane, bereits bevor eine Abnahme des Flux oder ein Anstieg des Differenzdruckes am Filter beobachtet wird.

Würzekochen

Unter einer klassischen Würzekochung versteht man eine Heißhaltung und eine gleichzeitige Verdampfung. Die Umstellung der klassischen Niederdruckkochung auf die dynamische Niederdruckkochung wurde großtechnisch durchgeführt und das Gesamtsystem hinsichtlich Technik und Technologie optimiert. Kochsysteme mit 4 – 6 Druckpeaks und einer Gesamtverdampfung von 4 – 6 % erfüllen alle energetischen sowie technologischen Forderungen und führen zu qualitativ hochwertigen Bieren. Die durch die Druckentlastung eintretende Blasenbildung im gesamten Würzevolumen führt zu einer erhöhten Ausdampfeffizienz unerwünschter Aromastoffe. Bei Vorhandensein von Energiespeicher-systemen im Sudhaus (z. B. Pfannendunstkondensator mit Energiespeicher und Läuterwürzeerhitzer) ist eine Gesamtverdampfung von ca. 5 % optimal. Bei einer niedrigeren Verdampfung muss nachgeheizt werden, bei höheren Verdampfungen gibt es einen Energieüberschuss im Sudhaus.

Bei modernen Würzekochsystemen werden die Prozesse der Heißhaltung und Verdampfung getrennt behandelt, wodurch sich die Flexibilität des Systems erhöht. Thermische Prozesse, wie z. B. die Maillard-Reaktion, werden durch hohe Temperaturen begünstigt und führen zu

Aromastoffen, welche das Aromaprofil und die Geschmacksstabilität des Bieres beeinflussen. Ebenso verhält es sich mit der Bildung eines Off-Flavours, des freien Dimethylsulfid (DMS_{frei}), aus dessen Precursor. Um die Aromastoffkonzentrationen in der Anstellwürze gezielt auf einen Maximalwert reduzieren zu können, muss die Verdampfung nach der thermische Belastung erfolgen oder man reduziert die Umsetzung thermischer Reaktionen durch eine Kühlung der Würze. Verdampfungssysteme nach dem Whirlpool und Würzekühlsysteme vor dem Whirlpool werden hierfür eingesetzt Die „Würzevorkühlung" bzw. „Precooling" zwischen Kochung und Heißtrubabtrennung im Whirlpool wurden im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Hierfür kann z. B. der Würzekühler (Fa. Huppmann) eingesetzt werden, wobei dieser passend ausgelegt werden sollte, oder es kommen Entspannungsverdampfer (Fa. Ziemann, Fa. Nerb) zum Einsatz, welche im Vakuum betrieben werden. Die genannten Systeme sich mittlerweile weltweit in Brauereien anzutreffen.

Für alle am Markt erhältlichen modernen Kochsysteme konnte eine Praxistauglichkeit festgestellt werden, wobei die Flexibilität der Systeme stark voneinander abweicht. Je mehr Aufgaben bei der Würzekochung getrennt behandelt werden können, umso optimaler kann die Würzequalität eingestellt werden. Bisher hat man die Würzekochung immer als Gesamtsystem betrachtet. Bei der „Fraktionierten Würzekochung" werden dagegen, ähnlich wie bei der „Fraktionierte Schrotung", die unterschiedlichen chemischen und physikalischen Eigenschaften von Teilfraktionen der Prozesse genutzt. So hat sich bei den Simulationen einer getrennten Kochung von Vorderwürze und Nachgüssen gezeigt, dass eine Kochzeit von ca. 50 – 60 min zu einer minimalen Konzentration an Streckeraldehyden führt. Analysen der Läuterwürzen haben gezeigt, dass die absoluten Gehalte an Fettsäuren und Lipidabbau-produkten in den Nachgüssen vergleichbar hoch waren wie in der Vorderwürze. Somit werden durch die Nachgüsse unerwünschte Stoffe aus dem Treberkuchen ausgewaschen. Besteht der Wunsch nach einer stärkeren Ausdampfung unerwünschter Aromastoffe aus dem Lipidabbau, so kann mittels einer getrennten Kochung die Ausdampfung bei den Nachgüssen forciert werden. Günstigerweise werden durch den geringen Extraktgehalt der Nachgüsse auch weit weniger negative Maillard-Reaktionsprodukte gebildet als in der Vorderwürze, da die Aromabildung durch thermische Reaktionen abhängig von der Würzekonzentration verläuft. Dieses im Rahmen der Arbeit entwickelte Kochsystem wird derzeit im Pilotmaßstab evaluiert, wobei unter Variation der Kochparameter Biere erzeugt werden. Diese werden hinsichtlich ihrer Bierqualität (Geschmacksstabilität, Schaumstabilität …) untersucht.

Würzebehandlung

Die Trubfracht der Würze hat einen Einfluss auf die Gärung und somit auf die Bierqualität. Einerseits wurde festgestellt, dass Fettsäuren und Zink am Trub adsorbiert sind und sich während der Gärung in der Würze bzw. dem Bier rücklösen können, wobei sie der Hefeernährung dienen. Sude ohne Heißtrubabtrennung haben zu einer Verkürzung der Gärzeit von einem Tag geführt. Andererseits ist seit langer Zeit die Meinung verbreitet, dass eine möglichst vollständige Trubabtrennung (Läutertrübung, Heißtrub, Kühltrub) zu den besten Gärungen und Bieren führt. Es wurde in deutschen Brauereien untersucht, unter welchen Voraussetzungen auf die Kühltrubabtrennung verzichtet werden kann, um Kosten zu sparen. Es kann bei Bieren mit 100 % Malzeinsatz auf eine Abtrennung des Kühltrubes verzichtet werden, wenn die Heißtrubabtrennung und die Hefevitalität gut sind und die geschmacklichen Erwartungen im Bier erfüllt werden. Verkostungen ergaben, dass Biere mit Kühltrub sich durch einen charaktervolleren Trunk auszeichnen. Bei einer schlechten Hefevitalität sollte jedoch der Kühltrub abgetrennt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Flotation, evtl. mit Zweitbelüftung beim Umpumpen, ab der dritten Gärführung zu einer besseren Gärung führt. Außerhalb des Bayrischen Reinheitsgebotes kann es bei Suden mit hohem Rohfruchtanteil zu

einer Unterbilanzierung von Nährstoffen kommen, weswegen dort auf eine Kühltrubabtrennung verzichtet werden kann.

Durch die Wiederverwendung von Reste- und Rückbieren haben Brauereien die Möglichkeit, den Bierschwand zu minimieren. Wichtig ist, dass die sog. Prozessbiere sauerstofffrei, hygienisch unbedenklich und bei Vorhandensein von Hefe auch hefephysiologisch optimal behandelt werden. So erfüllt eine Lagerung der Hefesuspension bei einer Temperatur < 4 °C für einen Zeitraum unter ca. 4 Tagen Bedingungen, welche auch für Hefe gelten. Die Zugabe von Prozessbieren (ca. 5 % der Bierproduktion) in den Whirlpool oder die Dosage in die Leitung zum Würzekühler haben sich bewährt. Dabei ist darauf zu achten, dass eventuell vorhandene Mikroorganismen, wie z. B. Bierschädlinge, sowie Enzyme, wie z. B. Proteasen und Esterasen, inaktiviert werden, da sie sonst die mikrobiologische Stabilität sowie die Schaum- und Geschmacksstabilität mindern können.

Eine weitere Möglichkeit, Kosten zu senken, stellt die Wiederverwendung des Brüdenkondensates aus der Würzekochung dar. Eine Aufbereitung des Brüdenkondensates mittels Umkehrosmose und dessen Einsatz zum Einmaischen zeigte eine tendenzielle Verschlechterung der Geschmacksstabilität des Bieres. Wirtschaftlicher und unbedenklicher ist es, unaufbereitetes Brüdenkondensat als Kühlwasser für Verdunstungskondensatoren oder für den Ansatz alkalischer Reinigungsmittel zu verwenden. Die gesamte Kondensatmenge kann hier eingesetzt werden. Oft wird Brüdenkondensat zum Ausspritzen des Läuterbottich-Senkbodens verwendet. Hier muss auf die hygienischen Verhältnisse geachtet werden, um eine geschmackliche Kontamination der Würzen und Biere zu verhindern. Der Einsatz von sand- und aktivkohlefiltriertem Brüdenkondensat als Kesselspeisewasser ist möglich, sollte aber mit dem Kesselhersteller abgesprochen werden.

Hopfen

Einerseits gibt es einen direkten Aromatransfer von z. B. ätherischen Ölen des Hopfens in die Würze bzw. in das Bier, wodurch dessen Aroma geprägt wird. Andererseits werden die α-Säuren des Hopfens isomerisiert, um als iso-α-Säuren eine sensorische Wirkung im Bier ausüben zu können. Die Lösung, Isomerisierung, Ausdampfung und sonstige Beeinflussung der Hopfeninhaltsstoffe können technologisch beeinflusst werden.

Ein Einfluss der Hopfensorte auf den Biercharakter ist vor allem bei Gaben von Aromahopfen zu beobachten. Jede Hopfensorte zeigt ein charakteristisches Aromaprofil, welches sich in Abhängigkeit der Biermatrix bis zum Bier mitteilen kann. Über Aromaextrakt-verdünnungsanalysen wurde die chirale Verbindung Linalool, welche zu 92 – 94 % in ihrer geruchsaktiveren (R)-Form vorliegt, als Leitsubstanz für das Hopfenaroma erkannt. Ab Konzentrationen von 60 µg Linalool / l Bier kann durch eine weitere Erhöhung das Hopfenaroma nicht mehr gesteigert werden. Es tritt eine Sättigung in der nasalen und retronasalen Wahrnehmung ein, wobei die Verkoster die Intensität des Hopfenaromas sogar als zunehmend schwächer beurteilt haben. Je nach Dosagezeitpunkt und Dosagemenge des Hopfenproduktes werden die Hopfeninhaltsstoffe unterschiedlich stark in der Würze gelöst bzw. aus der Würze, z. B. über Verdampfung oder Bruchbildung, entfernt. Bitterhopfen sollte 5 min nach Kochbeginn gegeben werden, da einerseits durch die bereits eingesetzte Bruchbildung weniger Bitterstoffe mit dem lipophilen Trub ausgefällt werden. Andererseits ermöglicht die frühe Gabe eine gute Ausdampfung unerwünschter Aromastoffe (z. B. Myrcen) und eine maximale Hopfenisomerisierung in Folge der langen Kochzeit. Aromahopfen sollte zu Kochende oder als Whirlpoolvorlage gegeben werden, um Verluste zu vermeiden und den Aromatransfer zu begünstigen. Es gibt Hopfensorten, wie z. B. Saphir, welche sich durch einen guten Aromatransfer auszeichnen und zu hohen Linaloolgehalten und

einem ausgeprägten Hopfenaroma im Bier führen. Welche Hopfensorte am besten für ein Bier geeignet ist, hängt von der Biermatrix (Stammwürze, Rohfruchtanteil, Malzmischung, Estergehalt, Bittereinheiten …) und den sensorischen Erwartungen der Brauerei bzw. der Verbraucher ab. Großbrauversuche mit unterschiedlichen Bitter- und Aromahopfen haben gezeigt, dass die Bewertungen starken subjektiven Schwankungen unterliegen, wenn die Biermatrix und die angewandte Technologie sehr unterschiedlich sind.

Ein unterschwelliges oder leicht wahrnehmbares Hopfenaroma kann bereits die Geschmacksstabilität fördern, indem es Alterungsnoten maskiert. Dieser maskierende Effekt kann auch bei esterreichen Bieren, wie z .B Weißbieren, beobachtet werden. Nicht nur späte Gaben, welche zu einem Hopfenaroma im Bier führen, haben einen Einfluss auf die Biersensorik. Auch Aromahopfen-Gaben in Form von Pellets zu Kochbeginn haben zu besseren sensorischen Beurteilungen geführt als der Vergleich mit einer Gabe aus Bitterhopfen. Da Aromahopfen einen geringeren α-Säuregehalt als Bitterhopfen hat, wurde für diese Versuche mehr Hopfenmenge gegeben, was sich in höheren Gehalten an Polyphenolen, Anthocyanogenen und Tannoiden äußerte. Anscheinend wurden geschmacklich wirksame Substanzen aus dem Hopfen gelöst, da die Verkostungsergebnisse mit Aromahopfen tendenziell besser waren als bei ausschließlicher Verwendung von Bitterhopfen. Welche sensorische Rolle die β-Fraktion, bestehend aus Weich- und Hartharzen spielt, ist noch ungeklärt. β-Säuren werden im Bier nicht mehr nachgewiesen, wobei deren Umsetzungsprodukte noch nicht vollständig erforscht sind.

Zusätzlich gibt es große Unterschiede in der Bitterstoffzusammensetzung zwischen den einzelnen Jahrgängen und Sorten. Bei der Interpretation von Ergebnissen der Bitterstoffanalyse muss beachtet werden, ob Einzelkomponenten erfasst wurden oder ob es sich um die summarische Erfassung von Substanzgruppen handelt. Zur Vermeidung eines „Lichtgeschmackes“ werden reduzierte isomerisierte α-Säuren verwendet, da sie die Bildung von 3-Methyl-2-Buten-1-Thiol unterbinden. Es dürfen aber keine Reste konventioneller Hopfenprodukte in die Würze und das Bier gelangen. Viele Brauereien, die außerhalb des Reinheitsgebotes brauen, haben den Zusatznutzen dieser Produkte erkannt. Je höher der Hydrierungsgrad, desto besser ist die schaumfördernde Wirkung. Außerdem wird die mikrobiologische Stabilität der Biere durch diese Produkte erhöht.

Fazit

Die Brauereitechnologie befindet sich auf einem hohen Niveau. Weltweit sind Biere guter Qualität auf dem Markt. Dennoch besteht ein Spannungsfeld zwischen Wirtschaftlichkeit und Qualität. Um eine zufriedenstellende Bierqualität kostengünstig erzeugen zu können, ist eine optimierte Technologie notwendig. Hierfür sind nicht unbedingt teure Anlagen und komplizierte Systeme, sondern eine auf den Rohstoff und die technische Ausrüstung abgestimmte Technologie notwendig. Dabei müssen die unterschiedlichen und schwankenden Eigenschaften des Wassers, der Gerste bzw. des Malzes, des Hopfens bzw. des Hopfenproduktes und der Hefe beachtet werden.

Literaturverzeichnis

1 **(EBC), E. B. C.: Grundwerk- *Analytika EBC*. Nürnberg: Hans Carl Verlag, 1998.**

2 **Anger, H.-M.: Analysensammlung der Mitteleuropäischen Brautechnischen Analysenkommission (MEBAK)- *Gerste, Rohfrucht, Malz, Hopfen*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der MEBAK, 2005.**

3 **Anger, H.-M.; Anderegg, P.; Bartels, W.; Bender, G.; Böhm-Schraml, M.; Geiger, E.; Graf, H.; Hagen, W.; Jäger, P.; Koller, A.; Krottenthaler, M.; Lempart, K.; Miedaner, H.; Natter, M.; Pfenninger, H.; Schur, F.; Schwarz, H.; Skach, J.; Senften, H.; Stempfl, W.; Vogeser, G.; Wachter, R.; Zakany, F.; Zanker, G.: *Brautechnische Analysenmethoden Band I*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der Mitteleuropäischen Brautechnischen Analysenkommission (MEBAK), 1997.**

4 **Anness, B. J.; Bamforth, C. W.: Dimethyl Sulfide - a Review. In: *Journal of the Institute of Brewing* 88 (1982), S. 244-252.**

5 **Back, W.: Teil 1- *Farbatlas und Handbuch der Getränkebiologie*. Nürnberg: Verlag Hans Carl, 1994.**

6 **Back, W.: Hefemanagement und Anstelltechnologie mit ihren Auswirkungen auf Geschmack und Geschmacksstabilität. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 72/627-636.**

7 **Back, W.: *Farbatlas und Handbuch der Getränkebiologie. Teil 2*. Nürnberg: Fachverlag Hans Carl, 2000.**

8 **Back, W.; Diener, C.; Sacher, B.: Hefeweizenbier - Geschmacksvarianten und Technologie. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 28/29, S. 1279-1284.**

9 **Back, W.; Diener, C.; Sacher, B.: Hefeweizenbier - Geschmacksvarianten und Technologie. In: *Brauwelt* (1998), Nr. 28/29, S. 1279-1284.**

10 **Back, W.; Forster, C.; Krottenthaler, M.; Lehmann, J.; Sacher, B.; Thum, B.: Neue Forschungserkenntnisse zur Verbesserung der Geschmacksstabilität. In: *Brauwelt* 137 (1997), Nr. 38, S. 1677-1692.**

11 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Bohak, I.; Dickel, T.; Franz, O.; Hanke, S.; Hartmann, K.; Herrmann, M.; Kaltner, D.; Keßler, M.; Kreisz, S.; Kühbeck, F.; Mezger, R.; Narziss, L.; Schneeberger, M.; Schütz, M.; Schönberger, C.; Spieleder, E.; Thiele, F.; Vetterlein, K.; Wunderlich, S.; Wurzbacher, M.; Zarnkow, M.; Zürcher, J.: *Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie.* Nürnberg: Fachverlag Hans Carl GmbH, 2005.**

12 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Braun, T.: Investigations into continuous beer maturation. In: *Brauwelt International* 16 (1998), Nr. 3, S. 222-226.**

13 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Braun, T.: Untersuchungen zur kontinuierlichen Bierreifung. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 3-4, S. 70-73.**

14 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Vetterlein, K.: Zurück zum Ursprung. Aufbereitung von Brüdenkondensat und Weiterverarbeitung im Sudhaus. In: *Brauindustrie* 83 (1998), Nr. 2, S. 81-86.**

15 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Voigt, T.; Hege, U.; Van de Braak, B.; Stippler, K.: Neue Regelung für den Abläutervorgang im Läuterbottich. In: *Brauwelt* 139 (1999), Nr. 37-38, S. 1666-1668.**

16 **Back, W.; Krottenthaler, M.; Voigt, T.; Hege, U.; Van de Braak, B.; Stippler, K.: New Control System for the Lautering Process in the Lauter Tun. In: *Brauwelt International* 18 (2000), Nr. 6, S. 475-477.**

17 **Back, W.; Vetterlein, K.: Praxiserfahrungen mit der Assimilationstechnik. In: *Der Weihenstephaner* 67 (1999), S. 134.**

18 **Bamforth, C. W.: Enzymolysis of ß-Glucan. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Copenhagen, 1981, S. 335-346.**

19 **Bamforth, C. W.: Beer Flavour: Esters. In: *Brewers Guardian* (2001), Nr. 9, S. 32-34.**

20 **Bamforth, C. W.; Martin, H. L.; Wainright, T.: A Role of Carboxypeptidase in the Solubilization of Barley ß-Glucan. In: *Journal of the Institute of Brewing* 85 (1979), S. 334-338.**

21 **Bamforth, C. W.; Moore, J.; Proudlove, M. O.; Bartholome, B.; Williamson, G.: The Dissolution of β-Glucan: New Dimensions. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 50 (1997), S. 90-95.**

22 **Baxter, D.: Lipoxidases in Malting and Mashing. In: *Journal of the Institute of Brewing* 88 (1982), S. 390-396.**

23 **Beer, G.; Balk, G.; Krottenthaler, M.; Narziss, L.; Ketterer, M.; Brand, O.: Mälzungs- und Brauversuche mit der Wintergerstensorte Astrid. In: *Brauwelt* 134 (1994), Nr. 28, S. 136-1368.**

24 **Benitez, J. L.; Forster, A.; De Keukeleire, D.; Moir, M.; Sharpe, F. R.; C., V. L.; Westwood, K. T.: Manual of Good Practice - European Brewery Convention-*Hops and Hop Products*. Nürnberg: Getränke Fachverlag Hans Carl, 1997.**

25 Biawa, J. P.; Bamforth, C. W.: A Two-Substrate Kinetic Analysis of Lipoxygenase in Malt. In: *Journal Cereal Sciences* 35 (2002), S. 95-98.

26 Biendl, M.: Grünes Gold. Anticancerogene Aktivität - Ein neuer Aspekt bei Hopfeninhaltsstoffen. In: *Brauindustrie* 84 (1999), Nr. 9, S. 502-507.

27 Biendl, M.: Research on the Xanthohumol content in hops. Untersuchungen zum Xanthohumol-Gehalt in Hopfen. In: *Hopfenrundschau international* (2002/2003), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 72-75.

28 Biendl, M.; Methner, F.-J.; Stettner, G.; Walker, C. J.: Brauversuche mit einem xanthohumolreichen Hopfenprodukt. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 9/10, S. 236-241.

29 Biendl, M.; Methner, F.-J.; Stettner, G.; Walker, C. J.: Brauversuche mit einem xanthohumolreichen Hopfenprodukt. In: *Brauwelt* (2004), Nr. 9/10, S. 236 ff.

30 Biendl, M.; Mitter, W.; Peters, U.; Methner, F.-J.: Einsatz eines xanthohumolreichen Hopfenproduktes bei der Bierherstellung. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 46-47, S. 2006-2011.

31 Binkert, J.; Haertl, D.: Neues Würzekochsystem mittels Expansionsverdampfung. In: *Brauwelt* 141 (2001), Nr. 37, S. 1494-1503.

32 Binkert, J.; Haertl, D.: New wort boiling using flash evaporation. In: *Brauwelt International* 20 (2002), Nr. 1, S. 31-38.

33 Boeck-Nielsen, j.: Addition of Rest Beer into the Whirlpool. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 36 (1999), Nr. 4, S. 423-425.

34 Boivin, P.: A review of pro- and anti-oxidant of malt. In: *Monograph of the Symposium Flavour and Flavour Stability - European Brewery Convention.* Nancy, 2001, S.

35 Bradley, L.: Extracting success. In: *Brewers` Guardian* 130 (2001), Nr. 10, S. 24-26.

36 Bühler, T.; Burell, K.; Eggars, H. U.; Reed, R. J. R.: The application of membranes for new approach to brewery operations. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Oslo, 1993, S. 691-700.

37 Bühler, T.; Michel, R.; Kantelberg, B.: Dynamic low-pressure-boiling - systematically optimized for top quality. In: *Brauwelt International* 21 (2003), Nr. 5, S. 306-313.

38 **Bühler, T.; Michel, R.; Kantelberg, B.; Baumgärtner, Y.: Die dynamische Niederdruckkochung - systematisch qualitätsoptimiert. In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 38, S.**

39 **Bühler, T. M.: *Effects of physical parameters in mashing on lautering performance.* Loughborough, University Loughborough, doctoral thesis, 1996.**

40 **Chmiel, H.; Fähnrich, A.; Janke, H. D.; Kaschek, M.; Kluth, J.; Mavrov, V.; Rögener, F.: Kosteneinsparpotentiale durch Wasser- und Laugenmanagement. In: *Brauwelt* 137 (1997), Nr. 1/2, S. 16-26.**

41 **Coors, G.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Auswirkungen einer Würzevorkühlung beim Ausschlagen. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 42-43, S. 1696-1699.**

42 **Coors, G.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Wort Pre-Cooling and its Influence on Casting. In: *Brauwelt International* 21 (2003), Nr. 1/03, S. 40-41.**

43 **Dalgliesh, C. E.: Flavour Stability. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Amsterdam, 1977, S. 623-659.**

44 **Daoud, I.: Crossflow Filtration: An alternative for mash separation. In: *Brewing and Distilling International* 5 (1985), Nr. 23, S. 31-32.**

45 **Daoud, I.; Bailey, T. P.: A novel system for separation of wort from mash. In: Engineers, T. I. o. C.: Rugby, UK, 1995, S. 145-157.**

46 **Devreux, A.: Die Regulation der Bildung von Alkoholen und Estern im Verlaufe der Gärung und ihr Einfluss auf die Qualität des Bieres. In: *Brass. Malt Europe* (1975), Nr. 2, S.**

47 **Dickel, T.: *Untersuchungen zu enzymatischen Abbauprodukten beim Maischen im Hinblick auf die Entwicklung eines Prozessführungssystems*. München, Technischen Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2003.**

48 **Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Studies into the influence of the cold break insertion on beer quality. Untersuchungen zum Einfluß des Kühltrubeintrages auf die Bierqualität. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 53 (2000), Nr. 5-6, S. 95-100.**

49 **Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Untersuchungen zum Einfluß des Kühlturbeintrages auf die Bierqualität. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 33/34, S. 1330-1332.**

50 **Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Investigations Into the Influnece of Residual Cold Break on Beer Quality. In: *Brauwelt International* 20 (2002), Nr. 1, S. 23-25.**

51 Dietschmann, J.: *Entwicklung einer Methode mit Serieneignung zur brautechnologischen Differenzierung von Gerstensorten in frühem Züchtungsstadium*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1989.

52 Dillenhöfer, W.; Rönn, D.: Kontinuierliche Bierreifung. In: *Brauwelt* 136 (1996), Nr. 46/47, S. 2295-2296.

53 Norm 8777 Sudhausanlagen in Brauereien.

54 DLG: Deutsche Landwirtschafts Gesellschaft e.V. - Aktualisierungsdatum: Mai 2006.

55 Drawert, F.; Wächter, F.: Verfahren zur Bewertung von Emissionen bei Brauereianlagen mit dem Ziel rationeller und energiesparender Abwendung. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 37 (1984), Nr. 7, S. 304-313.

56 Drost, B. W.; Van den Berg, R.; Freijee, F. J. M.; Van der Velde, E. G.; Hollemanns, M.: Flavour Stability. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 48 (1990), Nr. 4, S. 124-131.

57 Eichhorn, P.: *Untersuchungen zur Geschmacksstabilität des Bieres*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1991.

58 Einsiedler, F.: *Experimentelle Untersuchung und Modellierung komplexer biochemischer und technologischer Prozesse am Beispiel des Maischens*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1998.

59 Einsiedler, F.; Schwill-Miedaner, A.; Sommer, K.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierung komplexer biochemischer und technologischer Prozesse am Beispiel des Maischens. Teil 1: Proteolyse. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 50 (1997), Nr. 9/10, S. 164-171.

60 Einsiedler, F.; Schwill-Miedaner, A.; Sommer, K.; Hämäläinen, J.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierung komplexer biochemischer und technologischer Prozesse am Beispiel des Maischens. Teil 2: Amylolyse. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 50 (1997), Nr. 11/12, S. 202-209.

61 Einsiedler, F.; Schwill-Miedaner, A.; Sommer, K.; Hämäläinen, J.: Experimentelle Untersuchungen und Modellierung komplexer biochemischer und technologischer Prozesse am Beispiel des Maischens. Teil 3: Cytolyse. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 50 (1997), Nr. 1/2, S. 11-21.

62 Engan, S.: Esters in Beer. In: *The Brewers Digest* (1974), S. 40-48.

63 Ferstl, F.; Banke, F.; Kain, J.; Krottenthaler, M.: Untersuchungen der Einflussfaktoren auf die Betriebsgrenzen einer Naßschrotmühle. In: *Chemie Ingenieur Technik* 73 (2001), Nr. 11, S. 1477-1483.

64 Ferstl, F.; Banke, F.; Kain, J.; Krottenthaler, M.: Examination of the Factors Influencing the Operational Limits of a Wet Mill. In: *Chemical Engineering & Technology* 25 (2002), Nr. 8, S. 220-225.

65 Feussner, I.; Wasternack, C.: The Lipoxygenase Pathway. In: *Annu. Rev. Plant. Biol.* (2002), Nr. 55, S.

66 Fickert, B.; Schieberle, P.: Identification of the key odorants in barley malt (caramalt) using GC/MS techniques and odour dilution analyses. In: *Nahrung* 42 (1998), Nr. 6, S. 371-375.

67 Fischer, G.: *Hydrodynamische Optimierung eines Filterhydrozyklons für Biosuspensionen* Freising-Weihenstephan, München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2006.

68 Fischer, G.; Mitzscherling, M.; Becker, T.; Delgado, A.; Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Development of a Process Control System for the Optimisation of the Cytolytic, Proteolytic and Amylolytic Degradation during Mashing. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S. 699-706 (Poster No. 675).

69 Fohr, M.: Höhepunkte der Sudhaustechnik auf der Brau 2000. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 48, S. 2090-2092.

70 Fohr, M.; Meyer-Pittroff, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Stand der Technik bei der Verwertung von Brüdenkondensat. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 48, S. 2387-2393.

71 Fohr, M.; Meyer-Pittroff, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Verwertung von Brüdenkondensat ohne Aufbereitung. In: *Der Weihenstephaner* 66 (1998), Nr. 1, S. 25-28.

72 Fohr, M.; Meyer-Pittroff, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: State-of-the-art in utilisation of vapour condensate. In: *Brauwelt International* 17 (1999), Nr. 5, S. 360-365.

73 Förderprogramm), B. S. f. L. u. U. U.: Verminderung der Emission von geruchsintensiven Stoffen und von Abwärme bei Brauereibetrieben durch ein Verfahren zur Verdichtung der beim Würzekochen entstehenden Brüden. In: München: 1983.

74 Forster, A.; Beck, B.; Gehrig, M.: Der Verbleib von Pestizidrückständen des Hopfens bei der Herstellung von Hopfenprodukten. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Lisbon, 1991, S. 193-200.

75 Forster, A.; Beck, B.; Massinger, S.; Schmidt, R.: Niedermolekulare Polyphenole beim Hopfenwachstum. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 46-47, S. 15561461.

76 Forster, A.; Beck, B.; Schmidt, R.: Untersuchungen zu Hopfenpolyphenolen. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Brussels, 1995, S.

77 Forster, A.; Beck, B.; Schmidt, R.: Hopfenpolyphenole - mehr als nur Trübungsbildner in Bier, Hop Polyphenoles do more than just cause Turbidity in Beer. In: *Hopfenrundschau international* (1999), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 68-74.

78 Forster, A.; Beck, B.; Schmidt, R.; Jansen, C.; Mellenthin, A.: Über die Zusammensetzung von niedermolekularen Polyphenolen in verschiedenen Hopfensorten und zwei Anbaugebieten. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 55 (2002), Nr. 5/6, S. 98-108.

79 Forster, A.; Gahr, A.; Ketterer, M.: Xanthohumol in Bier - Möglichkeiten und Grenzen einer Anreicherung. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 55 (2002), Nr. 9/10, S. 184-194.

80 Forster, A.; Ketterer, M.; Gahr, A.: A new xanthohumol-enriched hop-extract and its use for unfiltered beers, Ein neuartiger Xanthohumol-angereicherter Hopfenextrakt und sein Einsatz für unfiltrierte Biere. In: *Hopfenrundschau international* (2003/2004), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 65-71.

81 Forster, A.; Köberlein, A.: Der Verbleib von Xanthohumol aus Hopfen während der Bierbereitung. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 37, S. 1677-1679.

82 Forster, A.; Schmidt, R.; Biendl, M.: Wie bestimmt sich der durchschnittliche alpha-Säuregehalt einer Hopfensorte? In: *Brauwelt* (2004), Nr. 22, S. 654-660.

83 Forster, C.: *Der Einfluß der Darrtechnologie au die Malz- und Bierqualität.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1996.

84 Foster II, R. T.; Samp, E. J.; Patino, H.: Multivariate modeling of sensory and chemical data to understand staling in light beer. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 59 (2001), Nr. 4, S. 201-210.

85 Fritsch, H. T.: *Einfluss des Hopfens auf wertgebende Aromastoffe in Pilsener Bieren sowie in Zwischenstufen des Brauprozesses.* München, Technische Universität München, Institut für Lebensmittelchemie, 2001.

86 Fritsch, H. T.; Kaltner, D.; Schieberle, P.; Back, W.: Entschlüsselung des Hopfenaromas in Bier. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 39/40, S. 1206-1207.

87 **Fritsch, H. T.; Schieberle, P.: Changes in Key Aroma Compounds during Boiling of unhopped and hopped Wort. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S. 259-268.**

88 **Fritsch, H. T.; Schieberle, P.: Bewertung von Hopfenaromastoffen in Pilsner Bieren. In: *Brauerei Forum* 20 (2005), Nr. 3, S. 66-67.**

89 **Garbe, L.-A.: *Untersuchungen zum Metabolismus von Mono- und Dihydroxyfettsäuren in Hefen.* Berlin, Technische Universität, Dissertation, 2002.**

90 **Garbe, L.-A.; Hübke, H.; Tressl, R.: Oxygenated fatty acids and flavour stability - new insights. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S.**

91 **Garbe, L.-A.; Lange, H.; Tressl, R.: Biosynthesis of y-nonalactone in yeast. In: *ACS symposium series 794. Aroma active compounds in foods. Chemistry and sensory properties.* 2001, S. 176-182.**

92 **Geiger, E.: Der Einfluss gärungstechnologischer Maßnahmen auf das Verhalten einiger Gärungsnebenprodukte. In: *Der Weihenstephaner* 45 (1977), Nr. 3, S. 139-142.**

93 **Gijs, L.; Chevance, F.; Jerkovic, V.; Collin, S.: How low pH can intensify beta-damascenone and dimethyl trisulfide production through beer aging. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (2002), S. 5612-5616.**

94 **Gnielinski, V.; Mersmann, A.; Thurner, F.: *Verdampfung, Kristallisation, Trocknung*. Vieweg-Verlag, 1993.**

95 **Grigsby, J. H.; Palamand, S. R.: Studies on the staling beer: the use of 2-thiobarbituric acid in the measurement of beer oxidation. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 34 (1976), Nr. 2, S. 49-55.**

96 **Groneick, E.; Groppe, H.; Dillenhöfer, W.; Rönn, D.: Kontinuierliche Bierreifung. In: *Brauwelt* 137 (1997), Nr. 19/20, S. 778-786.**

97 **Grönquist, A.; Pajunen, E.; Ranta, B.: Secondary Fermentation with Immobilized Yeast - Industrial Scale. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Zürich, 1989, S. 339-346.**

98 **Guyot-Declerck, C.; Francois, N.; Ritter, C.; Govaerts, B.; Collin, S.: Influence of pH and ageing on beer organoleptic properties. A sensory analysis based on AeDA data. In: *Food Quality and Preference* (2002), Nr. 16, S. 157-162.**

99 **Guzinski, J. A.: Practical Considerations of Reduced Hop Extracts. In: *Monograph XXII of the Symposium of Hops - European Brewery Convention.* Zoeterwoude, 1994, S. 105-113.**

100 Hackensellner, T.: Würzebereitung mit dynamischer Niederdruckkochung: Energie- und Anlagentechnik - Teil 1. In: *Brauindustrie* 86 (2001), Nr. 3, S. 14-16.

101 Hackensellner, T.; Pensel, S.: Mechanische und thermische Brüdenverdichtung im Sudhaus. In: *Brauwelt* 133 (1993), Nr. 38, S. 176-1799.

102 Hartl, A.: Kaum Pestizide in Hopfenextrakten. Beitrag zur Frage der Schadstoffreduzierung mit Hopfenprodukten. In: *Brauwelt* 133 (1992), Nr. 7/8, S.

103 Hartl, A.; Reininger, W.: Über die Umwandlung von Lupulonen in bierlösliche Bitterstoffe. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Nice, 1975, S.

104 Haseloff, O. W.; Hoffmann, H.-J.: *Kleines Lehrbuch der Statistik.* Berlin: Verlag Walter de Gryuter, 1970.

105 Hashimoto, N.: Amino-carbonyl reaction during wort boiling in relation to flavor stability of beer. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 8 (1971), S. 121-126.

106 Herrmann, H.; Kantelberg, B.; Wiesner, R.: Schrotsysteme mit Weichkonditionierung - Verfahrensweise - Neue Erkenntnisse. In: *Brauwelt* 137 (1997), S. 492-503.

107 Herrmann, H.; Vollhals, B.: Wort Boiling with Microwave Technology. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 37 (2000), Nr. 3, S. 351-357.

108 Herrmann, M.: *Entstehung und Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe bei der Herstellung von Weißbier.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2005.

109 Herrmann, M.; Back, W.; Sacher, B.; Krottenthaler, M.: Options to Technologically Influence Flavour Compounds in Beer, Möglichkeiten zur technologischen Beeinflussung der Bieraromastoffe. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 56 (2003), Nr. 5-6, S. 99-106.

110 Hertel, M.; Tippmann, J.; Sommer, K.; Glas, K.: Engineering investigations of the recreating kinetics of flavour-components during the boiling of wort. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 59 (2006), Nr. 1/2, S. 45-55.

111 Heß, D.: Molekulare und biochemische Grundlagen von Stoffwechsel und Entwicklung der Pflanzen- *Pflanzenphysiologie*. Stuttgart: Ulmer, 1999.

112 Heupke, H.-J.: *α-Amylase-Synthese und -Sekretion in Aleuronzellen der Gerste (Hordeum vulgare L.)*. Göttingen, Universität Göttingen, Dissertation, 1988.

113 **Heyse, K.-U.: *Handbuch der Brauereipraxis*. Nürnberg: 1995.**

114 **Hidalgo, J. F.; Zamora, R.: Strecker-type degradation produced by the lipid oxidation products 4,5-epoxy-2-alkenals. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* (2004), Nr. 52, S. 7126-7131.**

115 **Hill, P.; Lustig, S.; Sawatzki, V.: Die Aminosäure Glutamin als Parameter zur Bestimmung des Alterungszustandes von Bieren. In: *Monatsschrift fuer Brauwissenschaft* 51 (1998), Nr. 3/4, S. 36-38.**

116 **Hirschberg, H.-G.: *Handbuch Verfahrenstechnik und Anlagenbau*. Springer Verlag, 1999.**

117 **Hug, H.; Pfenninger, H. B.: Brauversuche mit Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Berlin (West), 1979, S. 355-364.**

118 **Huige, N.: Handbook of Brewing- *Brewery By-Products and Effluents.* New York: Marcel Dekker Verlag, 1995.**

119 **Huppmann: Würzevorkühlung - Wort Precooling. - Aktualisierungsdatum: 2005.**

120 **Hyttinen, I.; Kronlöf, J.; Hartwall, P.: Use of Porous Glass at Hartwall Brewery in the Maturation of Beer with Immobilized Yeast. In: *Monograph of the Symposium Immobilized Yeast Applications in the Brewing Industry - European Brewery Convention.* Espoo, 1996, S. 55-61.**

121 **Jülich, E.: *Entwicklung einer gaschromatographischen Headspacemethode zur Anreicherung und Identifizierung von Spurenkomponenten, dargestellt am Beispiel der Passionsfrucht und Würzearomas.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1986.**

122 **Kaltner, D.: *Untersuchungen zur Ausbildung des Hopfenaromas und technologisch Maßnahmen zur Erzeugung hopfenaromatischer Biere.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2000.**

123 **Kaltner, D.: Moderne Aspekte zur Hopfung des Bieres. In: *Brauindustrie* 90 (2005), Nr. 2, S. 22-25.**

124 **Kaltner, D.; Bohak, I.; Forster, A.; Gahr, A.; Back, W.: Investigation of the Influence of Hop Products on the Mikrobiological Stability of Beer. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S. 174-180.**

125 **Kaltner, D.; Forster, C.; Thum, B.; Back, W.: Untersuchungen zur Ausbildung des Hopfenaromas während des Brauprozesses. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 63-70.**

126 Kaltner, D.; Mitter, W.; Binkert, J.; Preis, F.; Zimmermann, R.; Biendl, M.: Würzekochsystem SCHOKO und Hopfenkomponenten. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 46-47, S. 1562-1567.

127 Kaltner, D.; Steinhaus, M.; Mitter, W.; Biendl, M.; Schieberle, P.: (R)-Linalool as key flavour for hop aroma in beer and its behaviour, (R)-Linalool als Schlüsselaromastoff für das Hopfenaroma in Bier und sein Verhalten während der Bieralterung. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 56 (2003), Nr. 11-12, S. 192-196.

128 Kaltner, D.; Thum, B.; Forster, C.; Back, W.: Untersuchungen zum Hopfenaroma in Pilsner Bieren bei Variation technologischer Parameter. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 54 (2001), Nr. 9/10, S. 199-205.

129 Kammhuber, K.; Hagl, S.: Statistische Untersuchungen zur Korrelation von Hopfenölkomponente. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 54 (2001), Nr. 5/6, S. 100-103.

130 Kammhuber, K.; Zeidler, C.; Seigner, E.; Engelhard, B.: Stand der Erkenntnisse zum Hopfeninhaltsstoff Xanthohumol. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 36, S. 1633-1636.

131 Kaukovirta-Norja, A.; Laakso, S.: The Effect of Kilning on the Capability of Malt to oxidise Lipids. In: *Journal of the Institute of Brewing* 104 (1998), S. 327-332.

132 Kessler, M.; Kreisz, S.; Zarnkow, M.; Back, W.: Investigations about the relative Hartong Extract at 45 °C. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 58 (2005), Nr. 4, S. 56-62.

133 Ketterer, M.; Forster, A.; Gahr, A.; Beck, B.; Massinger, S.; Schmidt, R.: The Influence of Isomerised Hop Pellets on Beer Quality. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S. 275-286.

134 Kirby, W.; Williams, P. M.; Wheeler, R. E.; Jones, M.: The importance of ghe polyphenols of barleys and malts in beer sediment and haze formation. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Amsterdam, 1977, S. 415-427.

135 Klisch, W.: *Handbuch für die Brennerei- und Alkoholwirtschaft, Brennerei-Kalender*. Hagen: 1993.

136 Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Kano, Y.; Koshina, S.: Lipid oxidation during wort produktion. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Oslo, 1993, S.

137 Köhler, P.; Krottenthaler, M.; Herrmann, M.; Keßler, M.; Kühbeck, F.: Tests on Infusion and Decoction Method. In: *Brauwelt International* 24 (2006), Nr. 1, S. 33-37.

138 Köhler, P.; Krottenthaler, M.; Herrmann, M.; Keßler, M.; Kühbeck, F.; Back, W.: Untersuchungen zu Infusions- und Dekoktionsverfahren. In: *Brauwelt* 145 (2005), Nr. 6/05, S. 143-150.

139 Kondo, K.: Preventive Effects of Dietary Beer on Lifestyle-. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S. 1339-1350.

140 Kreisz, S.: *Der Einfluss von Polysacchariden und Bakterien auf die Filtrierbarkeit von Würze und Bier*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2003.

141 Kreisz, S.; Back, W.: Neue Aspekte der Filtrierbarkeit von Bier. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 779-786.

142 Kretschmer, H.: *Der Einfluß physiologischer Vorgänge beim Mälzen auf das Verhalten der Lipide und deren Einfluß auf Bieraromastoffe und Bieralterung*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1996.

143 Krottenthaler, M.: Praxistauglichkeit von Wintergerstenmalz. In: *Brauindustrie* 82 (1997), Nr. 1, S. 25.

144 Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau und Deutsche Gesellschaft für Hopfenforschung Hans-Pfülf-Institut (Hrsg.): *Jahresbericht 1997, Sonderkultur Hopfen, Zusammenfassende Beurteilung der Sudversuche.* Freising, 1998.

145 Krottenthaler, M.: Hopfen. In: Heyse, K.-U.: *Praxishandbuch der Brauerei*. Hamburg: Behr`s Verlag GmbH & Co. KG, 2000, S. 1-55.

146 Unternehmensgruppe Huppmann (Hrsg.): *Verringerung der thermischen Belastung während der Whirlpool-Standzeit, Reduction of Thermal Stress During Whirlpool Standing Time.* 20. Kitzingen, 2000.

147 Krottenthaler, M.; Back, W.: The Effects of Wort Precooling during Cast-out. In: *BDI - Brewing & Distilling International* 32 (2001), Nr. 3, S. 14-15.

148 Krottenthaler, M.; Back, W.; Engelhard, B.: Großversuche mit der neuen Hüller Zuchtsorte "Hallertauer Merkur" (MR), Large-scale Brewing Trials with the new Hüll Variety "Hallertauer Merkur" (MR). In: *Hopfenrundschau international* (2000), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 43-46.

149 **Krottenthaler, M.; Hartmann, K.; Back, W.: Einsatz eines Entspannungsverdampfers zur Würzebehandlung. In: *Brauwelt* 141 (2001), Nr. 39/01, S. 1690-1693.**

150 **Krottenthaler, M.; Hartmann, K.; Back, W.: Use of a Flash Evaporator for Wort Treatment. In: *Brauwelt International* 19 (2001), Nr. 6, S. 457-459.**

151 **Krottenthaler, M.; Kummert, F.; Back, W.; Kaltner, D.; Mitter, W.: Das Geheimnis der Hopfenblume - The Secret of the Hop Bouquet. In: *Hopfenrundschau international* (2005/2006), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 16-20.**

152 **Krottenthaler, M.; Lehmann, J.; Mieth, R.: Einsatz der Vakuumverdampferanlage im Sudhaus der Gilde Brauerei AG. In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 30, S. 953-960.**

153 **Krottenthaler, M.; Lehmann, J.; Mieth, R.: Use of a Vacuum Evaporator Unit in Gilde Brauerei AG. In: *Brauwelt International* 21 (2003), Nr. 6, S. 382-387.**

154 **Krottenthaler, M.; Narziss, L.; Miedaner, H.; Dietschmann, J. E.: Ein Fortschritt in der Bewertung von neuen Braugerstensorten unter Anwendung nicht konventioneller Analysenmethoden. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention* 23rd (1991), S. 93-100.**

155 **Krottenthaler, M.; Sacher, B.: Germination and Malt Quality. In: *World Brewing Congress.* Orlando, USA, 2000, S.**

156 **Krottenthaler, M.; Zanker, G.; Gaub, R.; Back, W.: Sterile Filtration of Beer by Membranes-Economical and physiological Aspects. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S. 28/21-28/11.**

157 **Krottenthaler, M.; Zürcher, J.; Back, W.; Schneider, J.; Weisser, H.: Grist Fractionating and Adjusted Mashing to Improve the Reduction of β-Glucan. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 603-610.**

158 **Krottenthaler, M.; Zürcher, J.; Zarnkow, M.; Back, W.: Großversuche mit der neuen Hüller Zuchtsorte "Saphir", Large-scale Trials with the new Hüll Variety "Saphir". In: *Hopfenrundschau international* (2001/2002), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 60-67.**

159 **Kruger, L.; Ryder, D. S.; Alcock, C.; Murray, J. P.: Malt Quality, Prediction of Malt Fermentability Part 1. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 19 (1982), Nr. 1, S. 45-51.**

160 **Krüger, R.; Fischer, H.; Rejschek, H.; Fremerey, M.: Verwertungsmöglichkeiten von Abfällen aus der Brauerei. In: *Der Weihenstephaner* 50 (1982), Nr. 2, S. 90-127.**

161 Krüger, R.; Rejschek, H.; Kuhn-Reinhard, J.: Künftige Kostenbelastung der Brauereien aus dem neuen Abwasserabgabengesetz und Möglichkeiten der Kostensenkung. In: *Der Weihenstephaner* 48 (1980), Nr. 2, S. 85-109.

162 Kuehbeck, F.; Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.; Mitzcherling, M.; Delgado, A.; Becker, T.: Effects of mashing parameters on mash b-glucan, FAN and soluble extract levels. In: *Journal of the Institute of Brewing* 111 (2005), Nr. 3, S. 316-327.

163 Kühbeck, F.: *Analytische Erfassung sowie technologische und technische Beeinflussung trübungsrelevanter Würzeinhaltsstoffe beim Brauprozeß und deren Auswirkungen auf die Würze- und Bierqualität.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2006.

164 Kühbeck, F.; Back, W.; Krottenthaler, M.: Influence of Lauter Turbidity on Wort Composition, Fermentation Performance and Beer Quality in Large-Scale Trials. In: *Journal of the Institute of Brewing* 112 (2006), Nr. 3, S. 222-231.

165 Kühbeck, F.; Back, W.; Krottenthaler, M.: Release of Long-Chain Fatty Acids and Zinc from Hot Trub to Wort. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 59 (2006), S. 67-77.

166 Kühbeck, F.; Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.; Mitzscherling, M.; Delgado, A.; Becker, T.: Effects of Mashing Parameters on Mash β-Glucan, FAN and Soluble Extract Levels. In: *Journal of the Institute of Brewing* 111 (2005), Nr. 3, S. 316-327.

167 Kühbeck, F.; Schütz, M.; Thiele, F.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Influence of lauter turbidity and hot trub on wort composition, fermentation, and beer quality. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 64 (2006), Nr. 1, S. 16-28.

168 Kunze, W.: *Technogie Brauer und Mälzer*. Berlin: VLB Berlin, 1994.

169 Kunze, W.: 3rd int. Edition- *Technology Brewing and Malting*. Berlin: 2005.

170 Kuroda, H.; Kobayashi, N.; Kaneda, H.; Takashio, M.; Shinotuka, K.: Trihydroxyoctadecenoic acids having negative effects on beer foam are produced by enzymatic factors present in malt. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S.

171 Landaud, S.; Latrille, E.; Corrieu, G.: Top Pressure and Temperature Control the Fusel Alcoholic/Ester Ratio. In: *Journal of the Institute of Brewing* 107 (2001), Nr. 2, S. 107-117.

172 Larsen, O. V.; Aastrup, S.; Nielsen, H.; Lillelund, A. C.: Improvement of flavour stability by reduction of trans-2-nonenal - a case study. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S. 533-539.

173 **Lermusieau, G.; Bulens, M.; Collin, S.: Use of GC-olfactometry to identify the hop aromatic compounds in beer. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 49 (2001), Nr. 8, S. 3867-3874.**

174 **Liégeois, C.; Meurens, N.; Badot, C.; Collin, S.: Release of deuterated (E)-2-nonenal during beer aging from labeled precursors synthesized before boiling. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50 (2002), Nr. 26, S. 7634-7638.**

175 **Linemann, A.: *Untersuchungen zur Struktur-Eigenschaftsbeziehung von β-Glucan bei der Bierherstellung*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1995.**

176 **Lotz, M.: *Neue Maischefiltratonstechnik für das Verarbeiten von Pulverschrot.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1997.**

177 **Lotz, M.; Krottenthaler, M.; Degant, O.: Improvement of beer foaming by addition of malt meal to mash. 1998.**

178 **Lotz, M.; Krottenthaler, M.; Degant, O.: Method for producing mash products. 1998.**

179 **Lotz, M.; Schneider, J.; Weisser, H.; Krottenthaler, M.; Back, W.: New Mash Filtration Technique for Processing of Powder Grist. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Maastricht, 1997, S. 299-305.**

180 **Lüders, J.: Technologie mit immobilisierten Hefen. In: *Brauwelt* 134 (1994), Nr. 3, S. 57-62.**

181 **Lustig, S.: *Das Verhalten flüchtiger Aromastoffe bei der Lagerung von Flaschenbier und deren technologische Beeinflussung beim Brauprozeß*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1994.**

182 **Lustig, S.; Bellmer, H. G.; Eils, H.-G.; Gromus, J.: Geschmacksstabilität und Sudhaustechnologie - Praktische Erfahrungen mit einem neuen Anlagenkonzept. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 583-593.**

183 **Meilgaard, M. C.: Stale flavor carbonyls in brewing. In: *Brewers Digest* (1972), S. 48-62.**

184 **Meilgaard, M. C.: Flavor chemistry of beer. Part II: Flavor threshold of 239 aroma volatiles. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 12 (1975), Nr. 3, S. 151-168.**

185 **Meilgaard, M. C.: *Beer flavour*. Technical University of Denmark, Dissertation, 1981.**

186 **Meura: Meura - Traditionally Pioneers since 1845, Tournai / Belgien. - Aktualisierungsdatum: 2006.**

187 **Mezger, R.: *Betrachtung moderner Würzekochsysteme bezüglich ihres Einflusses auf technologisch und physiologisch bedeutende Würzeinhaltsstoffe.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2005.**

188 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Moderne Würzekochsysteme - ein Überblick. In: *Brauwelt* 142 (2002), Nr. 4-5, S. 93-99.**

189 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Die Aufteilung des Prozessschrittes Würzekochung in zwei Phasen, Am Beispiel des Kochverfahrens "SchoKo". In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 33, S. 1055-1061.**

190 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Jakosc piwa - Wplyw nowoczesnych systemów gotowania brzeczki na skladniki brzeczki i jkosc piwa. In: *Agro Przemysl* 1 (2003), Nr. 223, S. 18-19.**

191 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Modern Wort Boiling Systems - an Overview. In: *Brauwelt International* 21 (2003), Nr. 1, S. 34-39.**

192 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Moderne Würzekochsysteme - ein Überblick auf russisch. In: *Brauwelt in Russisch* (2003), Nr. 1/03, S. 19-28.**

193 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Sistemas modernos de ebullición del mosto - una révision. In: *Cerveza y Malta* 157 (2003), Nr. XL (1), S. 26-32.**

194 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Dividing Wort Boiling into two Phases. Using the "SchoKo" Boiling Process as an example. In: *Brauwelt International* 22 (2004), Nr. 1, S. 29-32.**

195 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Hopfen - entdecke die Möglichkeiten, Hops - Discover their Potential. In: *Hopfenrundschau international* (2004/2005), Nr. International Edition of the German Hop-Grower Magazine, Wolnzach, Hallertau, S. 6-10.**

196 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Vakuumkochung - eine neue Möglichkeit zur schonenden Würzebehandlung im Sudhaus. In: *Brauwelt* 145 (2005), Nr. 12-13, S. 350-354.**

197 **Mezger, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Vacuum Boiling - a new Alternative for gentle Wort processing in the Brewhouse. In: *Brauwelt International* 24 (2006), Nr. 1, S. 22-25.**

198 **Midigan, D.: Furanic aldehyde analysis by HPLC as a method to determine heat-induced flavor damage to beer. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 56 (1998), Nr. 4, S. 146-151.**

199 **Miedaner, H.: *Ein Beitrag zur Technologie der Gärung und Reifung des Bieres.* Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Habilitation, 1980.**

200 **Miedaner, H.; Anger, H.-M.; Bender, G.; Culik, J.; Geiger, E.; Graf, H.; Gresser, A.; Hagen, W.; Jülich, E.; Krottenthaler, M.; Lindemann, B.; Lustig, S.; Miedaner, H.; Natter, M.; Schur, F.; Schwarz, H.; Skach, J.; Stempfl, W.; Unkel, M.; Zanker, G.: *Brautechnische Analysenmethoden Band II*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der Mitteleuropäischen Brautechnischen Analysenkommission (MEBAK), 2002.**

201 **Miedaner, H.; Zinsberger, P.: Untersuchungen über den 2-Acetolactatabbau bei der Reifung des Bieres. In: *Der Weihenstephaner* 53 (1985), Nr. 2, S. 86-96.**

202 **Mitter, W.: Analytik und Bewertung von Hopfen und Hopfenprodukten im Hinblick auf die Bierbittere. In: *Schweizer Brauerei-Rundschau* 100 (1989), Nr. 11, S. 5.**

203 **Mitter, W.; Biendl, M.; Kaltner, D.: Behavior of Hop derived Aroma Substances during Wort Boiling. In: *Monograph XXXI of the Symposium Flavour and Flavour Stability - European Brewery Convention.* Nancy, 2001, S.**

204 **Mitter, W.; Biendl, M.; Kaltner, D.: Possible Effects of prenylated Flavonoids and their Presence in Beer. In: *Proceedings of the 28th Convention of the Institute & Guilt of Brewing - Asian Pacific Section.* Hanoi, 2004, S.**

205 **Mitter, W.; Kessler, H.; Biendl, M.: Geprüfte Variation - Bitterhopfengabe in Form von Pellets und Extrakt und deren Einfluss auf Würze und Bier. In: *Brauindustrie* 84 (1999), Nr. 10, S. 560-564.**

206 **Mitzscherling, M.: *Prozeßanalyse des Maischens mittels statistischer Modellierung*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2004.**

207 **Mitzscherling, M.; Fischer, G.; Becker, T.; Delgado, A.; Dickel, T.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Entwicklung eines Messsystems zur Beobachtung der Abbauvorgänge beim Maischen. In: *Der Weihenstephaner* 71 (2003), Nr. 1, S. 18-21.**

208 **Moir, M.: Hop Aromatic Compounds. In: *Monograph of the Symposium on Hops - European Brewery Convention.* Zouterwoude, The Netherlands, 1994, S. 165-180.**

209 **Moir, M.: Hops-A Millennium Review. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 58 (2000), Nr. 4, S. 131-146.**

210 **Moonjai, N.; Verstrepen, K. J.; Delvaux, F. R.; Derdelinckx, G.; Verachtert, H.: The Effects of Linolic Acid Supplementation of cropped Yeast on its Subsequent**

Fermentation Performance and Acetate Ester Synthesis. In: *Journal of the Institute of Brewing* 108 (2002), Nr. 2, S. 227-235.

211 Morikawa, M.; Yasui, T.; Ogawa, Y.; Ohkochi, M.: Influence of wort boiling and wort clarification conditions on cardboard flavour in beer. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* 2003, S. 775-782.

212 Mück, E. A.: *Über das Verhalten der Fettsäuren beim Brauprozeß*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1985.

213 Narziss, L.: Die Verwendung von Nebenprodukten in der Brauerei. In: *Brauwelt* 119 (1979), S. 637-642.

214 Narziss, L.: Hefeweißbier, Rohstoffe und Technologie. In: *Brauwelt* 123 (1983), Nr. 6, S. 198-199.

215 Narziss, L.: *Die Bierbrauerei Band II: Die Technologie der Würzebereitung*. Stuttgart: Ferdinand Enke Verlag, 1992.

216 Narziss, L.: *Abriss der Bierbrauerei*. Weinheim: Willey-VCH Verlag, 2005.

217 Narziss, L.; Litzenburger, K.: Malzqualität, Maischeintensität und Gummistoffgehalt. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 30 (1977), Nr. 9, S. 264-269.

218 Narziss, L.; Miedaner, H.; Koch, M.: Untersuchungen über flüchtige Substanzen bei der Malz- und Bierbereitung - unter besonderer Berücksichtigung solcher, die durch thermische Belastung des Produktes entstehen. Teil 1: Analytik, Identifizierung, Geruchseindrücke. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 41 (1988), S. 344-352.

219 Narziss, L.; Miedaner, H.; Koch, M.: Untersuchungen über flüchtige Substanzen bei der Malz- und Bierbereitung - unter besonderer Berücksichtigung solcher, die durch thermische Belastung des Produktes entstehen. Teil II: Einfluß der Mälzungs- und Maischparameter. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 42 (1989), Nr. 1989, S. 232-242.

220 Narziss, L.; Miedaner, H.; Krottenthaler, M.: Development of a Selection Method with Serial Suitability for Increasing the Quality of Beer and Which Can Be Applied as Standard Barley Quality Parameters Which Influence the Beer Flavor, Entwicklung einer Selektionsmethode mit Serieneignung zur Anhebung der Bierqualität und der den Biergeschmack beeinflussenden Qualitätsparameter der Gerste, Teil 1: Untersuchungen an Micro-, Klein- und Pilotsudwerken - Einfluss des Gärverlaufes auf den Biergeschmack. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 47 (1994), Nr. 7-8, S. 232-234.

221 Narziss, L.; Miedaner, H.; Krottenthaler, M.: Entwicklung einer Selektionsmethode mit Serieneignung zur Anhebung der Bierqualität und der den Biergeschmack beeinflussenden Qualitätsparameter der Gerste, Teil 2: Statistische Erhebung über die Zusammenhänge von Analysendaten und Biergeschmack. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 47 (1994), Nr. 12, S. 399-403.

222 Narziss, L.; Miedaner, H.; Krottenthaler, M.: Development of a Selection Method Suitable for Serial Application for Improving the Quality of the Beer and the Quality Parameters of Barley Which Influence the Taste of Beer .3., Entwicklung einer Selektionsmethode mit Serieneignung zur Anhebung der Bierqualität und der den Biergeschmack beeinflussenden Qualitätsparameter der Gerste, Teil 3: Rückschluss aus Malz- und Bieranalysen auf den zu erwartenden Biergeschmack. Darstellung anhand von Brauversuchen im Groß- und Kleinmaßstab. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 48 (1995), Nr. 3-4, S. 108-111.

223 Narziss, L.; Miedaner, H.; Schneider, F. P.: Weiterführende Untersuchungen zur Technologie der Würzekochung unter besonderer Berücksichtigung energiesparender Maßnahmen (Teil 3). In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 44 (1991), Nr. 9, S. 296-311.

224 Narziss, L.; Miedaner, H.; Schöndorfer, H.: Untersuchungen zur Technologie der Angärung in der Brauerei. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 36 (1983), Nr. 6, S. 236-241.

225 Narziss, L.; Miedaner, H.; Schwill, A.; Schmidt, R.: Stickstoff-Heterocyclen im Malz, bei der Würzebereitung und im Bier. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 38 (1985), S. 128-136.

226 Narziß, L.; Reicheneder, E.; Ngo-Da, P.: Infusions- und Dekoktionsverfahren. In: *Brauwelt* 121 (1981), Nr. 21, S. 768-785.

227 Nerb: Kochsystem Varioboil. - Aktualisierungsdatum: 2005.

228 Nothaft, A.: The Sart-up of an Immobilized Yeast System for Secondary Fermentation at Brahma. In: *Monograph of the Symposium Immobilized Yeast Applications in the Brewing Industry - European Brewery Convention.* Espoo, 1996, S. 41-49.

229 Nyborg, M.; Outtrup, H.; Dreyer, T.: Investigation of the protective mechanism of sulfite against beer staling and formation of adducts with trans-2-nonenal. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 57 (1999), Nr. 1, S. 24-28.

230 Nykaenen, L.: Production of Esters by different Yeast Strains in Sugar Fermentation. In: *Journal of the Institute of Brewing* 83 (1977), Nr. 1, S. 30-31.

231 Ogane, O.; Imai, T.; Ogawa, Y.; Ohkochi, M.: Influence of wort boiling and wort clarification conditions on ageing-relevant carbonyl compounds in beer. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Prague, 2005, S. 774-780.

232 Ohkochi, M.; Takahashi, R.: Die Bestimmung der Hitzebeständigkeit bierschädlicher Lactobacillen. In: *Monatsschrift für Brauerei* 35 (1982), S. 317-322.

233 Pajunen, E.: Immobilized Yeast Lager Maturation: DEAE-Cellulose at Sinebrychoff. In: *Monograph of the Symposium Immobilized Yeast Applications in the Brewing Industry - European Brewery Convention.* Espoo, 1996, S. 24-34.

234 Pajunen, E.; Grönquist, A.; Lommi, H.: Continuous Secondary Fermentation and Maturation of Beer in an Immobilized Yeast Reactor. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 26 (1989), S. 147-151.

235 Pajunen, E.; Grönquist, A.; Ranta, B.: Immobilized Yeast Reactor Application in Continuous Secondary Fermentation in Industrial Scale Operation. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Lisbon, 1991, S. 361-368.

236 Pajunen, E.; Jaeaskeinen, K.; Vehvilaeinen, H.; Maekinen, V.: Estergehalt während der Biergärung und -lagerung. In: *Brauwissenschaft* (1977), Nr. 30, S. 129-133.

237 Perpète, P.; Collin, S.: Contribution du 3-méthylthiopropanaldéhyde à la flaveur de mout des bières sans alcool. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 17-26.

238 Pfenninger, H.: *Brautechnische Analysenmethoden Band III*. Freising-Weihenstephan: Selbstverlag der Mitteleuropäischen Brautechnischen Analysenkommission (MEBAK), 1996.

239 Preuß, T.: *Maßnahmen zur Erzielung malzaromatischer dunkler Biere hoher Geschmacksstabilität nach Charakterisierung der Schlüsselaromastoffe in ausgewählten dunklen Bieren*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2001.

240 Quilter, M. G.; Hurley, J. C.; Lynch, F. J.; G., M. M.: The Production of Isoamyl Acetate from Amyl Alcohol by Saccharomyces Cerevisiae. In: *Journal of the Institute of Brewing* 109 (2003), S. 34-40.

241 Renger, R. S.; Van Hateren, S. H.; Luyben, K.: The Formation of Esters and higher Alcohols during Brewery Fermentation. The Effect of Carbon Dioxide Pressure. In: *Journal of the Institute of Brewing* 98 (1992), S. 509-513.

242 **Richter, K.: *Kontinuierliche Treberabtrennung aus Maische mit Dekantern unter Verwendung von Pulverschrot.* München, Technische Universiät, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1998.**

243 **Richter, K.; Sommer, K.: Pulverschrot - Reaktionsgeschwindigkeiten beim Maischen. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 47 (1994), Nr. 1/2, S. 4-7.**

244 **Ries, S.: Restbiergewinnung aus Gelägerhefe. In: *Brauwelt* 112 (1972), Nr. 57, S.**

245 **Riis, P.: Activity During Mashing. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Dublin, 2003, S. 875-882.**

246 **Röcken, W.: Aktuelle Gesichtspunkte zum Thema Pasteurisation. In: *Brauwelt* 124 (1984), Nr. 42, S. 1826-1832.**

247 **Runkel, U. D.: Infusions- und Dekoktionsverfahren. In: *Tageszeitung für Brauerei* (1965), Nr. 12/13, S. 61.**

248 **Ruß, W.; Sobiech, R.; Meyer-Pittroff, R.; Krottenthaler, M.; Back, W.; Jolibert, F.: Darren von Malz in einer Wirbelschicht. In: *Brauwelt* 138 (1998), Nr. 33-34, S. 1480-1491.**

249 **Scheibe, M.: *Die Fördercharakteristik einer Zellenradschleuse unter Berücksichtigung der Wechselwirkung von Silo und Austragsorgan*. Freiberg, Technische Universität Freiberg, Dissertation, 1997.**

250 **Schieberle, P.: Primary odorants of pale lager beer. In: *Zeitschrift für Lebensmittel- Untersuchung und -Forschung* 193 (1991), S. 558-565.**

251 **Schieberle, P.; Komarek, D.: Changes in key aroma compounds during natural beer aging. In: *ACS symposium series 836. Freshness and shelflife of foods.* 2003, S. 70-79.**

252 **Schieberle, P.; Komarek, D.: Staling of beer aroma: a long-known, but still unresolved challenge in brewing science. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* 2005, S. 661-675.**

253 **Schmidt, R.; Anderegg, P.; Biendl, M.: Umweltkontaminanten in Hopfen. In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 45, S. 1493-1497.**

254 **Schneeberger, M.: *Verwertung von Prozessbieren in der Brauerei.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2006.**

255 **Schneeberger, M.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Der Einfluss der Aufbewahrungsbedingungen der Hefesuspension auf die Qualität des darin**

enthaltenen, wiedergewinnbaren Hefebieres. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 38, S. 1148-1151.

256 Schneeberger, M.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Anlagentechnische Aspekte zur Hefebier-Rückgewinnung. In: *Der Weihenstephaner* 73 (2005), Nr. 4, S. 140-143.

257 Schneeberger, M.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Effect of the storage of surplus yeast on the quality of recoverable yeast beer. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 42 (2005), Nr. 3, S. 219-222.

258 Schneeberger, M.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Möglichkeiten zur Rückgewinnung von Hefebier aus Überschusshefe. In: *Brauwelt* 145 (2005), Nr. 45, S. 1479-1484.

259 Schneeberger, M.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Anlagentechnische Aspekte zur Hefebier-Rückgewinnung. In: *Chinesische Brauwelt* 5 (2006), Nr. 36, S. 47-49.

260 Schneider, F. P.: *Weiterführende Untersuchungen zur Technologie der Würzekochung unter besonderer Berücksichtigung energiesparender Maßnahmen*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 1989.

261 Schneider, J.: *Dynamische Mikrofiltration von Feinstschrotmaische mit oszillierenden Membranen.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2001.

262 Schneider, J.; Krottenthaler, M.; Back, W.; Weisser, H.: Vibrating Membrane Filtration of Mash for the Beer Production. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S. 217-225 (Poster no. 222).

263 Schneider, J.; Krottenthaler, M.; Back, W.; Weisser, H.: Study on the Membrane Filtration of Mash with Particular Respect to the Quality of Wort and Beer. In: *Journal of the Institute of Brewing* 111 (2005), Nr. 4, S. 380-387.

264 Schneider, J.; Krottenthaler, M.; Weisser, H.: Membrane Filtration and Diafiltration of Mash for the Wort Production. In: *China Brew & Beverage Conference.* International Exhibition Centre, Beijing, 2004, S. 28-36.

265 Schneider, J.; Weisser, H.: New technology for the beer recovery from spent yeast. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the AmericasA)* 37 (2000), Nr. 4, S. 477-481.

266 Schneider, J.; Weisser, H.: Diafiltration of mash. In: *Journal of the Institute of Brewing* 110 (2004), Nr. 4, S. 326-334.

267 Schönberger, C.: *Bedeutung nicht-flüchtiger Geschmacksstoffe im Bier.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2004.

268 Schönberger, C.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Sensory and analytical Characterization of nonvolatile taste-active Compounds in bottom-fermented Beers. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 39 (2002), Nr. 4, S. 210-217.

269 Schönberger, C.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Formulation of an alternative tasting scheme for the sensory evaluation of beer. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 57 (2004), Nr. April, S. 16-24.

270 Schuh, G., F.: Würzekochung. In: IGS Ingenieurbüro Dr. Georg F. Schuh, S. B. B. e. V.: *6. Energietechnisches Seminar.* Hallbergmoos, 2002, S.

271 Schulz: Schonkochverfahren zur Würzekochung. - Aktualisierungsdatum: 2005.

272 Schütz, M.: *Technologische Einflussnahme auf den Lipidabbau im Sinne einer Verbesserung der Geschmacksstabilität des Bieres*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation in Bearbeitung, 2005.

273 Schwarz, P. B.; Pyler, R. E.: Lipoxygenase and Hydroperoxide Isomerase Activity of Malting Barley. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 42 (1984), Nr. 2, S. 47-53.

274 Schwill-Miedaner, A.: *Ausgewählte Aspekte zur Technologie der Würzebereitung.* München, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Habilitation, 2002.

275 Schwill-Miedaner, A.; Krottenthaler, M.: Neue Kochsysteme im Überblick. In: *Der Weihenstephaner* 67 (1999), Nr. 1, S. 69-73.

276 Schwill-Miedaner, A.; Sommer, K.: Probenahme im Sudhaus: Ein Beitrag zur Qualitätssicherung, Teil 1. In: *Brauwelt* 136 (1996), Nr. 34/35, S. 1607-1610.

277 Seldeslachts, D.; De Winter, D.; Mélotte, L.; De Bock, A.; Haerinck, R.: The Use of High Tech Hopping in Practice. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 291-297.

278 Seldeslachts, D.; Van den Eynde, E.; Degelin, L.: Wort Stripping. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Maastricht, 1997, S. 323-332.

279 Shindo, S.; Umemoto, S.; Maeba, H.; Shinotsuka, K.: Primary Fermentation with immobilized Yeast Cells in Brewing: Control of Flavour Production. In: *Recent Res. Devel. Fermentation & Bioengeneering* (1999), Nr. 2, S. 21-39.

280 Smith, R. J.; Davidson, D.; Wilson, R. J. H.: Natural Foam Stabilizing and Bittering Compounds Derived from Hops. In: *Journal of the American Society of Brewing Chemists* 56 (1998), Nr. 2, S. 52-57.

281 Soares da Costa, M.; Goncalves, C.; Ferreira, A.; Ibsen, C.; Guedes de Pinho, P.; Silva Ferreira, A. C.: Further insights into the role of methional and phenylacetaldehyde in lager beer flavor stability. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 52 (2004), S. 7611-7617.

282 Solfrank, B.; Sommer, K.: Effektivität der flotativen Abscheidung von Kühltrub aus Bierwürze bei verschiedenen Belüftungsorganen. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 42 (1989), S. 365.

283 Sommer, G.: Versuche zur Optimierung des Maischverfahrens. In: *Brauwelt* 125 (1985), Nr. 19/20, S. 1120-1126.

284 Spieleder, E.: *Systematische Untersuchungen von reduzierenden Substanzen im Malz und ihr Einfluss auf den Brauprozess.* München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation in Bearbeitung, 2005.

285 Steinecker: - Aktualisierungsdatum: 2006.

286 Steinhaus, M.: *Wichtige Aromastoffe im Hopfen (Humulus Lupulus L.)*. München, Verlag Dr. Hut, 2000.

287 Steinhaus, M.; Fritsch, H. T.; Schieberle, P.: Quantitation of (R)- and (S)-linalool in beer using solid phase microextraction (SPME) in combination with a stable isotope dilution assay (SIDA). In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 51 (2003), Nr. 24, S. 7100-7105.

288 Steinhaus, M.; Schieberle, P.: Comparison of the most odor-active compounds in fresh and dried hop cones (Humulus lupulus L. variety spalter select) based on GC-olfactometry and odor dilution techniques. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 48 (2000), Nr. 5, S. 1776-1783.

289 Steward, G.; Lyness, A.; Younis, O.: The Control of Ester Synthesis during Wort Fermentation. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 36 (1999), Nr. 1, S. 61-66.

290 Stieß, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik*. Berlin: Springer Verlag, 1994.

291 Stippler, K.; Wasmuht, K.; Gattermeyer, P.: Generationswechsel beim Innenkocher, Teil 1. In: *Brauwelt* 141 (2001), Nr. 31/32, S. 1265-1267.

292 Stippler, K.; Wasmuht, K.; Gattermeyer, P.: Generationswechsel beim Innenkocher, Teil II. In: *Brauwelt* 141 (2001), Nr. 35/36, S. 1386-1397.

293 Suzuki, M.; Wanikawa, A.; KOno, K.; Shibata, K.: Factors affecting the formation of gamma-nonalactone and its contribution to the flavor and aroma of aging beer. In: *The institute of brewing & distilling asia pacific section.* Tasmania, 2006, S.

294 **Thalacker, R.; Bößendörfer, G.: Die Thiobarbitursäurezahl (TBZ). In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 44, S. 1441-1445.**

295 **Thompson, R. G.; LaBerge, D. E.: Barley Endosperm Cell Walls: A Review of Cell Wall Polysaccharides and Cell Wall-Degrading Enzymes. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 14 (1977), Nr. 4, S. 238-243.**

296 **Thurston, P. A.; Quain, D. E.; Tubb, R. S.: The Control of voltile Biosynthesis in Saccharomyces Cerevisiae. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Copenhagen, 1981, S. 21/197-206.**

297 **Tilli, T.: *Automatisierung mit Fuzzy-Logic.* München: 1993.**

298 **Traeger, D. H.: *Einführung in die Fuzzy-Logik.* Stuttgart: 1993.**

299 **Treitinger: *Messung von Geruchsemissionen in Wasserdampfatmosphäre am Beispiel von Sudhausbrüden*. Freising-Weihenstephan, Technische Universität München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2000.**

300 **Tressl, R.; Bahri, D.; Silwar, R.: Bildung von Aldehyden und deren Bedeutung als "Off-Flavour"-Komponenten in Bier. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Berlin (West), 1979, S. 2/27-41.**

301 **Tressl, R.; Garbe, L.-A.; Lange, H.; Hübke, H.; Schulz, H.: Metabolismus oxygenierter Fettsäuren in Brauereihefen. In: Berlin, V. u. L. f. B. i.: *Brau- und maschinentechnische Arbeitstagung der VLB.* 2001, S.**

302 **Ueda, T.; Sasaki, K.; Itagaki, H.; Inomoto, K.; Kagami, N.; Kawatura, K.: Investigation into conditions during early kilning stage for improving beer flavour stability. In: *World Brewing Congress.* Sandiego, 2004, S.**

303 **Ulrich, F.; Grosch, W.: Indentification of most volatile flavor compounds formed during autoxidation of linoleic acid. In: *Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung* 184 (1987), S. 277-282.**

304 **Ulrich, F.; Grosch, W.: Identification of the most intense odor compounds formed during autoxidation of methyl-linoleate at room temperature. In: *Journal of the American Oil Chemists` Society* 65 (1988), S. 1313-1317.**

305 **Van Dieren, B.; Pieters, W.; Brekelsmans, M.; Meersman, E.: Einsatz von Entspannungsverdampfung im Über- und Unterdruckbereich. In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 46/47, S. 1579-1584.**

306 **Van Gheluwe, G.; Chen, E.; Valyi, Z.: Factors effecting the Formation of Fusel Alcohols during Fermentation. In: *Technical Quarterly - Master Brewers Association of the Americas* 12 (1975), Nr. 3, S. 169-175.**

307 Van Iersel, M.; Lustig, S.; Meersman, E.; Dekkers, F.: Improvement of beer flavor stability by the development of novel malting techniques. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Prague, 2005, S. 702-707.

308 Van Waesberghe, J. M. W.: Die Keimfähigkeit von geputztem hellem Darrmalz. In: *Brauwelt* 138 (1998), S. 1689-1691.

309 Van Waesberghe, J. M. W.: New Milling and Mashing-in Systems, Developed to Avoid the Initiation of Lipid Oxidation at the Start of the Lagerbeer Brewing Process. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Cannes, 1999, S. 30-37.

310 Vauk, W.: *Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik*. Leipzig: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1994.

311 Visser, M. K.; Lindsay, R. C.: Role of methional in the development of off-flavors in beer. In: *American Society of Brewing Chemists, Inc.* 29 (1971), S. 230-237.

312 VDI (Hrsg.): *Erprobung von Verfahren zur qualitativen und quantitativen Erfassung von Geruchsstoffen.* 561. Düsseldorf, 1985.

313 Wackerbauer, K.; Bender, G.; Poloczek, K.: Die Beeinflussung der freien Fettsäuren durch die technologischen Parameter bei der Sudhausarbeit. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 36 (1983), Nr. 1, S. 20-21.

314 Wackerbauer, K.; Fitzner, M.; Günther, J.: Technisch-technologische Möglichkeiten mit immobilisierter Hefe. In: *Brauwelt* 136 (1996), Nr. 45, S. 2140-2150.

315 Wackerbauer, K.; Hardt, R.; Hendschuch, S.: Lox-Aktivität, Wiederkeimfähigkeit und hydroxylierende Fettsäuren in der Maische. In: *Brauwelt* 142 (2002), S. 442-447.

316 Wagner, N.: *β-Glucan und Bedeutung dieser Stoffgruppe für die Bierfiltration*. Berlin, Technische Universität Berlin, Dissertation, 1990.

317 Walker, C. J.; Biendl, M.; Lence, C. F.: Investigation into the high levels of xanthohumol found in stout and porter style beers. In: *Brauwelt International* 22 (2004), Nr. II, S. 100 ff.

318 Wasmuht, K.; Stippler, K.; Weinzierl, M.; Gattermeyer, P.: Stromboli kocht ohne Druck - eine sympathische Lösung. In: *Brauwelt* 143 (2003), Nr. 30, S. 948-952.

319 Wasmuht, K.; Weinzierl, M.; Gattermeyer, P.; Baumgärtner, Y.: Stromboli - ein Vulkan auf der Überholspur. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 30/31, S. 925-927.

320 Wasmuht, K.; Weinzierl, M.; Vasel, B.: Neue Ergebnisse zum Kochsystem Merlin. In: *Brauwelt* 140 (2000), Nr. 26, S. 1057-1059.

321 Weinfurtner, F.; Wullinger, F.; Piendl, A.: Gerstensorten - Kultivierungsmaßnahmen - Würzezusammensetzung - Gärverlauf. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 19 (1966), S. 390-395.

322 Weinzierl, M.; Stippler, K.; Wasmuht, K.; Miedaner, H.; Englmann, J.: Ein neues Würzekochsystem. In: *Brauwelt* 139 (1999), Nr. 5, S. 185-189.

323 Weinzierl, M.; Stippler, K.; Wasmuht, K.; Miedaner, H.; Englmann, J.: A new wort boiling system. In: *Brauwelt International* 18 (2000), Nr. 1, S. 40-44.

324 Weiss, A.; Schonberger, C.; Mitter, W.; Biendl, M.; Back, W.; Krottenthaler, M.: Sensory and Analytical Characterisation of Reduced, Isomerised Hop Extracts and their Influence and Use in Beer. In: *Journal of the Institute of Brewing* 108 (2002), Nr. 2, S. 236-242.

325 Weiß, S.; Militzer, K.; Gramlich, K.: *Thermische Verfahrenstechnik*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1993.

326 White, F. H.; Portno, A. D.: The Influence of Wort Composition on Beer Ester Levels. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Berlin, 1979, S. 447-460.

327 White, F. H.; Portno, A. D.: Continuous Fermentation by Immobilized Brewers Yeast. In: *Journal of the Institute of Brewing* 83 (1987), S. 228-230.

328 Wildhagen, H.: Engergiesparende Würzekochung mit einer mechanischen Brüdenverdichtungsanlage in einer Brauerei. In: Berlin: 1985.

329 Wunderlich, S.; Zürcher, J.; Back, W.; Frank, N.; Hussong, R.; Gerhäuser, C.; Berwanger, S.; Becker, H.: Mehr Xanthohumol im Bier für mehr Gesundheit? In: *33. Deutscher Lebensmittelchemikertag.* Bonn, 2004, S. 85.

330 Yamashita, H.; Kühbeck, F.; Hohrein, A.; Herrmann, M.; Back, W.; Krottenthaler, M.: Fractionated Boiling technology: Wort Boiling of different Lauter Fractions. In: *Monatsschrift für Brauwissenschaft* 59 (2006), Nr. 7/8, S. 130-147.

331 Yamauchi, Y.; Okamato, R.; Murayama, H.; Kajino, K.; Amikura, T.; Hiratsu, H.; Nagara, A.; Kamiya, T.; Inoue, T.: Rapid Maturation of Beer using an Immobilized Yeast Bioreactor. 1. Heat Conversion of 2-Acetolactate. In: *Journal of Biotechnology* (1995), Nr. 38, S. 101-108.

332 Zamora, R.; Gallardo, E.; Navarro, J. L.; Hidalgo, J. F.: Strecker-type of phenylalanine by methyl 9,10-epoxy-13-oxo-11-octadecenoate and methyl 12,13-

epoxy-9-oxo-11-octadecenoate. In: *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 53 (2005), S. 4583-4588.

333 Zanker, G.: *Charakterisierung des Membranfoulingprozesses bei der Mikrofiltration von Bier.* Graz, Karl-Franzens-Universität, Dissertation, 2001.

334 Zarnkow, M.: Probleme bei der Herstellung von Rohfruchtbieren mit hohen Reisgaben. In: *Brauwelt* 144 (2004), Nr. 13/14, S. 391-396.

335 Zentgraf, G.; Kneissl, A.: *Die Brauerei im Bild*. Nürnberg: Verlag Hans Carl, 1993.

336 Ziemann: Vakuumverdampfer. - Aktualisierungsdatum: 2005.

337 Zipfel, W.; Rathke, K.-D.: Vorläufiges Biergesetz- *Lebensmittelrecht*. München: Verlag C. H. Beck, 1999.

338 Zoog, M.: *Einführung in die Mechanische Verfahrenstechnik*. Stuttgart: Teubner Verlag, 1993.

339 Zürcher, J.: *Der Einfluß des Blattkeims von Gerstenmalz auf die Geschmacksstabilität und weitere Qualitätsmerkmale von Bier*. München, Technische Universität, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Dissertation, 2003.

340 Zürcher, J.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Influence of the Acrospire of Malted Barley on Flavour Stability and other Quality Parameters of Beer. In: *Proceedings of the Congress - European Brewery Convention.* Budapest, 2001, S. 514-523 (Poster No. 554).

341 Zürcher, J.; Krottenthaler, M.; Back, W.: Lipoxygenasen im Brauprozess. In: *Der Weihenstephaner* 69 (2001), Nr. 1, S. 34-37.

342 Zürcher, J.; Krottenthaler, M.; Rauber, M.; Schneeberger, M.; Back, W.: Influence of the Acrospire of Malted Barley on Flavour Stability and other Quality Parameters of Beer. In: *Monograph of the European Brewery Convention (EBC) Symposium.* Nancy, 2001, S.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Proteolytische Lösung in Abhängigkeit von Keimzeit, Weichgrad und Keimtemperatur. ... 19
Tabelle 2: Einfluss von Inhaltsstoffen auf den Biergeschmack ... 32
Tabelle 3: Malz- und Würzeanalysen von Sommer- und Winterbraugersten im Industriemaßstab ... 36
Tabelle 4: Zusammensetzung von Blattkeim und Ausgangsmalz ... 46
Tabelle 5: Analysenergebnisse der Malze nach Heißkonditionierung (Dauer der Wasserweiche: 0 bis 60 s; Temperatur des Weichwassers: 80 °C) ... 51
Tabelle 6: Ergebnisse der Untersuchung von Geschmack und Geschmacksstabilität des Bieres in Abhängigkeit der Schrotlagerzeit ... 56
Tabelle 7: Einfluss der Schrotfraktionierung auf die Malzanalytik ... 60
Tabelle 8: Analysendaten der verwendeten Malze ... 62
Tabelle 9: Versuchsplan der Maischversuche ... 63
Tabelle 10: Analyse der verbrauten Gerste ... 78
Tabelle 11: Extraktgehalt von Laborwürzen bei unterschiedlichen Anteilen an Gerste ... 80
Tabelle 12: Versuchsplanung für die Pilotsude mit unterschiedlichen Anteilen an Gerste ... 81
Tabelle 13: Würzeanalyse der Laborwürzen mit steigendem Blattkeimanteil; GM = Gerstenmalz, BK = Blattkeime (n = 3) ... 89
Tabelle 14: Gärungsnebenprodukte bei der kontinuierlichen Bierreifung. F = Fermenterbier, R = Referenzbier ... 100
Tabelle 15: Vergleich einer konventionellen Crossflow Filtration mit der Vibrations-Membran-Filtration (VMF) ... 104
Tabelle 16 : Einfluss der thermischen Behandlung auf den Vitamin- und Aminosäuregehalt ... 117
Tabelle 17: Eckwerte der Würzekochung [225] ... 125
Tabelle 18: Beschreibung der untersuchten Kochsysteme im Industriemaßstab ... 127
Tabelle 19: Verfahrensparameter von Würzekochverfahren ... 137
Tabelle 20: Würzearomastoffe von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während einer Kochung (Sud 1) ... 162
Tabelle 21: Geschmacksschwellenwerte von Würzearomastoffen [207-209, 312, 325, 344] ... 166
Tabelle 22: Verwendete Prozessbiere im Sudhaus ... 179
Tabelle 23: Bedingungen der großtechnischen Brauversuche ... 179
Tabelle 24: Durchschnittlicher Alkoholverlust ... 180
Tabelle 25: Schaum- und kolloidale Stabilität im fertigen Bier ... 180
Tabelle 26: Signifikanztest für die Alterungsverkostung nach Eichhorn ... 181
Tabelle 27: Indikatoren für die thermische Belastung der Würze (Brauerei A) ... 182
Tabelle 28: Analytische und sensorische Ergebnisse derBiere (Brauerei B) ... 182
Tabelle 29: Rohrleitungslänge zwischen Whirlpool und Würzekühler in Abhängigkeit der PE-Einheiten. ... 184
Tabelle 30: Empfohlener Zugabeort für Prozessbier. ... 185
Tabelle 31: Brüdenkondensat-Anfall bei Würzekochung mit thermischer Brüdenverdichtung und mit anderen Würzekochsystemen ... 185
Tabelle 32: Denkbare Verwertungsmöglichkeiten für Brüdenkondensat ... 188
Tabelle 33: Analyse von Brüdenkondensat und Permeat einer RO-Anlage ... 190
Tabelle 34: Alterungskomponenten von Bieren, deren Hauptguss teilweise aus aufbereitetem Brüdenkondensat bestand ... 191
Tabelle 35: Verkostungsergebnisse frischer und forciert gealterter Biere bei Einsatz von aufbereitetem Brüdenkondensat zum Einmaischen ... 191

Tabelle 36: Bei verschiedenen Prozessen maximal verwertbarer Anteil am insgesamt anfallenden Brüdenkondensat 194
Tabelle 37: Hopfengabe der Großsudversuche 205
Tabelle 38: Linaloolgehalt und Bitterstoffgehalt der Biere der Großsudversuche 206
Tabelle 39: Relatives Bitterpotenzial verschiedener reduzierter Hopfenprodukte, bezogen auf das Bitterpotenzial von iso-α-Säuren [361] 212
Tabelle 40: Empfohlene Lagertemperaturen für Hopfen und Hopfenprodukte 214

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Bierbereitung im Überblick ... 13
Abbildung 2: Varianzkomponentenschätzung von Malzanalysendaten ... 17
Abbildung 3: Alterungskomponenten und Alterungsgeschmack von Bier ... 18
Abbildung 4: Eiweißlösungsgrad des Malzes und Alterungskomponenten im Bier ... 18
Abbildung 5: Relative Abnahme von Carbonylen in Würze und Bier durch erhöhte Keimtemperaturen ... 19
Abbildung 6: Prinzip der Wirbelschicht ... 22
Abbildung 7: Schema eines Wirbelschichttrockners ... 23
Abbildung 8: Schichthöhe und Druckverlauf in einer Wirbelschicht mit Malz ... 25
Abbildung 9: Trocknungsgeschwindigkeit von Malz bei verschiedenen Anfangstemperaturen ... 26
Abbildung 10: Thermische Kenndaten eines Darrprozesses in der Wirbelschicht ... 27
Abbildung 11: Einfluss des Wassergehaltes beim Überschreiten von 60 °C auf den Friabilimeterwert ... 28
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen DMS-P-Gehalt und Abdarrzeit bei verschiedenen Temperaturen ... 29
Abbildung 13: Hauptkomponentenanalyse sensorisch unterschiedlicher Biere ... 31
Abbildung 14: Reproduzierbarkeit des Hefezellzahlverlaufes bei Microgärungen ... 33
Abbildung 15: Zwei-Walzen-Nassschrotmühle zur Malzzerkleinerung ... 39
Abbildung 16: Förderkennlinie der unteren Speisewalze ... 40
Abbildung 17: Mahlspaltänderungen während der Versuche mit variierten Schrotleistungen ... 41
Abbildung 18: Mahlspaltänderung bei Variation der Weichwassertemperatur ... 42
Abbildung 19: Wege des Lipidabbaus ... 44
Abbildung 20: Enzyme des Lipidabbaus ... 45
Abbildung 21: Prozentuale Verteilung der freien höheren Fettsäuren in einem Kaltwasserextrakt aus Blattkeimen (BK) und Gerstenmalz (GM); Tabellenangaben in mg/l ... 47
Abbildung 22: Konzentration der höheren ungesättigten Fettsäuren sowie deren Hydroperoxide in Maische in Abhängigkeit der Schrotlagerdauer, Linolsäurehydroperoxide (HPOD) und Linolensäurehydroperoxide (HPOT), Linolsäure (18:2) und Linolensäure (18:3) ... 48
Abbildung 23: Konzentration der Linolsäurehydroperoxide (HPOD) in Maische in Abhängigkeit von der Temperatur des Schrotes und der Schrotlagerdauer (Maischdauer 5 min, Maischtemperatur 50 °C); FM: Fächerschlägermühle, AM: Analysenmühle ... 49
Abbildung 24: LOX-Aktivität beim Maischen in Abhängigkeit der Schrotfeinheit. Aktivitäten (%) bezogen auf die LOX-Aktivität der Pulverschrotmaische; Probenahme 15 min nach Einmaischen (50 °C) ... 50
Abbildung 25: Verlauf der LOX-Aktivität von Malz bei der Weichkonditionierung mit unterschiedlichen Weichwassertemperaturen (Gußverhältnis Malz:Wasser = 1:4) ... 50
Abbildung 26: Temperaturverlauf und Verlauf der LOX-Aktivität beim Maischen; Mittelwerte (n = 6); HM = Hammermühlenmaische, DP = Dispergiermaische, (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges ... 52
Abbildung 27: LOX-Aktivität beim Maischen, Mittelwerte (n = 3); HM = Hammermühle, 6-WM = Sechswalzenmühle, (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges ... 54

Abbildung 28: LOX-Aktivität in Maische nach Weichkonditionierung bei 65 °C bzw. 80 °C (Heißkonditionierung); Mittelwerte (n = 7) 55
Abbildung 29: Anlagenschema eines Systems zur „Protekiven Schrotung“ 57
Abbildung 30: Verlauf der LOX-Aktivität beim Maischen mit und ohne CO_2-Begasung des Schrotbunkers; Mittelwerte (n = 3), (⇔) = Dauer des Einmaischvorganges..... 58
Abbildung 31: Höhere ungesättigte Fettsäuren und deren Hydroperoxide in Maische: (A) Linolsäure (18:2) und Linolensäure (18:3); (B) Linolsäurehydroperoxide (HPOD) und Linolensäurehydroperoxide (HPOT), EE = Ende Einmaischen, 20 min = 20 min nach EE..... 58
Abbildung 32: Q_3-Verteilung einer speziellen Grobfraktion und von Schroten für verschiedene Läutersysteme..... 59
Abbildung 33: Maischprogramm für das Fraktionierte Einmaischen 60
Abbildung 34: β-Gucankonzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis 64
Abbildung 35: FAN-Konzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis 65
Abbildung 36: Extrakt-Konzentration in Maische: Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) und isothermes Maischen (20 und 60 °C). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz und 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis 66
Abbildung 37: β-Gucankonzentration in Maische: Variation der Schrotfeinheit. Bedingungen: 2-Walzenmühle / Hammermühle, 100 % schwach gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)..... 67
Abbildung 38: FAN-Konzentration in Maische: Variation der Schrotfeinheit. Bedingungen: 2-Walzenmühle / Hammermühle, 100 % schwach gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)..... 68
Abbildung 39: Extrakt-Konzentration in Maische: Variation der Gussführung. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 30 % schwach gelöstes Malz, 70 % gut gelöstes Malz, jeweils 30 min Rastzeit, 1:4 / 1:5 Gußverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C) 69
Abbildung 40: Temperaturbezogene β-Glucankonzentration: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 0/100 % schwach gelöstes Malz, 20/30/40 min Rastzeit, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C)..... 70
Abbildung 41: FAN-Konzentration beim Maischen: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 0 % schwach gelöstes Malz, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C), 20/30/40 min Rastzeit..... 71
Abbildung 42: Extrakt-Konzentration beim Maischen: Variation der Rastzeiten. Bedingungen: 2-Walzenmühle, 100 % schwach gelöstes Malz, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren (45/62/70 °C), 20/30/40 min Rastzeit..... 71
Abbildung 43: β-Glucan-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-

Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren 45/62/70 °C jeweils 30 min Rastzeit. ... 72
Abbildung 44: FAN-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard-Maischverfahren 45/62/70 °C, jeweils 30 min Rastzeit. ... 73
Abbildung 45: Extrakt-Konzentration beim Maischen: Variation der Malzqualität (0/30/50/70/100 % schwach gelöstes Malz). Bedingungen: 2-Walzenmühle, 1:4 Gussverhältnis, Standard Maischverfahren 45/62/70 °C jeweils 30 min Rastzeit ... 73
Abbildung 46: R & I Schema einer Messanlage zur Beobachtung des Maischvorganges ... 75
Abbildung 47: Verlauf des löslichen Stickstoffes und der Leitfähigkeit bei einer Maischtemperatur von 45 °C ... 75
Abbildung 48: Korrelation zwischen FAN und Leitfähigkeit unterhalb der Verkleisterungstemperatur für Stärke ... 76
Abbildung 49: Verlauf der Gärungszucker bei einem Eyben-Maischverfahren ... 76
Abbildung 50: Maischverfahren bei der Verwendung unvermälzter Gerste ... 78
Abbildung 51: β-Glucangehalt in Labormaischen bei unterschiedlichen Anteilen unvermälzter Gerste ... 79
Abbildung 52: Gehalt an Freiem Aminostickstoff (FAN) in Labormaischen bei unterschiedlichen Anteilen unvermälzter Gerste ... 79
Abbildung 53: Prozentuale Anteile des wasserfreien Extraktes der Würze bei Anwendung eines Eyben-Maischverfahrens unter Variation der Gerstenanteile ... 81
Abbildung 54: β-Glucankonzentrationen in Ausschlagwürze bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren ... 82
Abbildung 55: Löslicher Stickstoff der Ausschlagwürze bezogen auf 12 % Stw. bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren ... 83
Abbildung 56: Freier Aminostickstoff (FAN) der Ausschlagwürze bezogen auf 12 % Stw. bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren. ... 83
Abbildung 57: Aufschließbarer Extrakt der Naßtreber in GG-% (bez. 80 % Wassergehalt) bei Anwendung verschiedener Gerstenanteile, Schrotungstechniken und Maischverfahren ... 84
Abbildung 58: Schema der Infusions- und Dekoktionsmaischen ... 85
Abbildung 59: Fettsäuregehalte in Pfanne-voll-Würzen nach Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren ... 85
Abbildung 60: Dextrinspektrum der Kochmaische nach dem Kochen und nach dem Zubrühen zur Restmaische ... 86
Abbildung 61: Summe der Streckeraldehyde von Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren in Pfanne-voll- und Ausschlagwürze ... 87
Abbildung 62: Aromastoffspektrum von Infusions- und Dekoktionsmaischverfahren in Pfanne-voll- und Ausschlagwürze ... 87
Abbildung 63: LOX-Aktivität in isothermen Maischen ... 90
Abbildung 64: Relativer Energiebedarf beim Maischen in Abhängigkeit von Biersorte und Maischverfahren, Bedingungen: s. Annahmen Rechenmodell; Sudwerk Staatsbrauerei Weihenstephan (Ausschlagmenge 330 hl); Wärmedämmung: Steinwolle (Stärke

Dämmaterial: 2 mm); EMT = Einmaischtemperatur; AMT = Abmaischtemperatur; 2MV = Zweimaischverfahren 91
Abbildung 65: Maischdiagramm des „Maltasemaischverfahrens“ 95
Abbildung 66: Konzentration von Glucose und Maltose während des „Maltasemaischverfahrens“ 95
Abbildung 67: Änderung der Konzentration des Acetaldehyds, Ethylacetats und Isoamylacetats nach 96 Stunden Gärzeit bezogen auf 100 % Maltose 96
Abbildung 68: Fließschema einer Anlage zur kontinuierlichen Bierreifung 97
Abbildung 69: Scherspaltfilter für die Maischefiltration 102
Abbildung 70: Läuterdiagramm eines Scherspaltfilters 102
Abbildung 71: Einfluss des β-Glucangehaltes auf den Filtrationsfluss eines Scherspaltfilters 103
Abbildung 72: Vibrations-Membran-Filtration (VMF) 103
Abbildung 73: Filterpaket einer Vibrations-Membran-Filtration (VMF) 104
Abbildung 74: Vergleich einer konventionellen Crossflow Filtration mit der Vibrations-Membran-Filtration (VMF) 104
Abbildung 75: Filtrationsleistung einer PTFE- und einer PA-Membrane im Laborversuch 105
Abbildung 76: Filterwiderstand in Abhängigkeit der Feststoffkonzentration und der Maischeviskosität (Messung der Maischeviskosität mit einem Plattenrheometer Rheometrics SR 5000) 106
Abbildung 77: Zusammenhang zwischen dem Filterwiderstand und der β-Glucankonzentration während des Vorderwürzelaufes 106
Abbildung 78: Protein- und β-Glucankonzentrationen von Maische bzw. Unfiltrat (Quadrate) und Permeat (Dreiecke) während der Vorderwürzefiltration. Die Auftragung erfolgte gegen das relative Filtratvolumen (V_P : Permeatvolumen, V_{VW}: Gesamtvolumen des Permeates nach der Vorderwürze) 107
Abbildung 79: Dynamische Viskosität η_P (links) und β-Glucankonzentration (rechts) der Ausschlagwürze. MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall $\alpha = 0{,}05$ 107
Abbildung 80: Filtrierbarkeit des unfiltrierten Bieres hergestellt mit unterlöstem Malz und Druckdifferenz einer Pilotfiltration (Zürcher-Filter). MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall $\alpha = 0{,}05$ 108
Abbildung 81: Schaumstabilität nach Nibem, gemessen von Bieren aus normal gelöstem Malz. MF: Membranfiltration, LB: Läuterbottich, Konfidenzintervall $\alpha = 0{,}05$ 109
Abbildung 82: Raster-Elektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen einer PTFE-Membrane in verschiedenen Stadien (0,45 µm Porenweite) 109
Abbildung 83: REM-Aufnahme (Oberfläche) eines neuen Membranfiltersatzes 111
Abbildung 84: REM-Aufnahme (Schrägschnitt) eines neuen Membranfiltersatzes 112
Abbildung 85: REM-Aufnahme eines teilweise verblockten Filtersatzes 112
Abbildung 86: REM-Aufnahme (Anströmseite) eines verblockten Membranfiltersatzes 112
Abbildung 87: REM-Aufnahme (Filtratseite) eines verblockten Membranfiltersatzes 113
Abbildung 88: Konzentrationsänderung über die Zeit bei einer Membranfiltration mit 400 hl/h 113
Abbildung 89: Infrarotspektroskopie einer verblockten Membrane 114
Abbildung 90: Esser-Test nach einer enzymatischen Reinigung von Membranen 115
Abbildung 91: Zeta-Potenzial vs. pH einer verblockten Membrane aus Nylon 66 nach der Reinigung 116

Abbildung 92: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane 116
Abbildung 93: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane nach einer alkalischen Reinigung 116
Abbildung 94: REM-Aufnahme einer verblockten Membrane nach einer enzymatischen Reinigung 117
Abbildung 95: Beispiel für eine linguistische Variable (Fuzzy-Logik) 119
Abbildung 96: Ein- und Ausgänge der Fuzzy-Regelung für die Läuterung 120
Abbildung 97: Vorteile der Fuzzy-Regelung gegenüber der konventionellen Methode, Mittelwerte aus 7 Versuchen 121
Abbildung 98: Verfahrensschritte einer klassischen Würzekochung 123
Abbildung 99: Verfahrensschritte einer moderner Würzekochung 124
Abbildung 100: Analytische Eckwerte der Würzekochung 124
Abbildung 101: Zusammenhang zwischen der Zunahme der TBZ und der Abnahme von L-Glutamin bei der Würzekochung 126
Abbildung 102: Verlauf von Furfural bei der Würzekochung 126
Abbildung 103: Verlauf von freiem DMS und DMS-Precursor bei der Würzekochung mit Nachverdampfung 128
Abbildung 104: Verlauf von 2-methyl-Butanal bei der Würzekochung 129
Abbildung 105: Verlauf von 2-Phenylacetaldehyd bei der Würzekochung 130
Abbildung 106: Verlauf von Hexanal während der Würzekochung 130
Abbildung 107: Verlauf von Hexanal bei einer Würzekochung mit unterschiedlicher Würzetemperatur am Außenkocher 131
Abbildung 108: Veränderung des Aromaprofils bei verkürzter Würzekochung 132
Abbildung 109: Würzevorkühlung durch einen Wärmeübertrager [133] 132
Abbildung 110: Thiobarbitursäurezahl (TBZ) von Würzen mit und ohne Würzevorkühlung vor dem Whirlpool auf 89 °C, Gesamtverdampfung jeweils 5,0 % 133
Abbildung 111: Dimethylsulfid (DMS) und Dimethylsulfid-Precursor (DMS-P) von Würzen mit und ohne Würzevorkühlung vor dem Whirlpool auf 89 °C, Gesamtverdampfung jeweils 5,0 % 133
Abbildung 112: Noch koagulierbarer Stickstoff in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 3) 135
Abbildung 113: Thiobarbitursäurezahl in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 12) 135
Abbildung 114: Freies Dimethylsulfid in Pfanne-voll-Würze und Ausschlagwürze bei verschiedenen Kochsystemen und Gesamtverdampfungen (α = 0,05, n = 4) 136
Abbildung 115: Prinzipieller Aufbau eines Innenkochers [133] 138
Abbildung 116: Kochsystem Stromboli [317] 139
Abbildung 117: Dynamische Niederdruckkochung [133] 140
Abbildung 118: Aufbau einer Hochtemperatur-Würzekochung 141
Abbildung 119: Vakuumverdampfung [375] 142
Abbildung 120: Noch Koagulierbarer Stickstoff in Pfanne-voll und Kaltwürze, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 45 min, 7 % Verdampfung und 1-1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool. 143
Abbildung 121: Prozentuale Reduzierung von Aromastoffen in Würze bei einer Vakuumverdampfung von 1,5 % 144

Abbildung 122: Qualitätszahl nach DLG von frischen und forciert gealterten Bieren, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 40 - 45 min, 7 % Verdampfung und 1 - 1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool 144
Abbildung 123: Spider-Plots sensorischer Analysen von frischen und forciert gealterten Bieren, Konventionelle Kochung 70 min, 10 % Gesamtverdampfung / Reduzierte Kochung 45 min, 7 % Verdampfung und 1 - 1,5 % Vakuumnachverdampfung nach dem Whirlpool 145
Abbildung 124: Schonkochverfahren zur Würzekochung [301]..... 146
Abbildung 125: Außenkocher mit thermischer Brüdenverdichtung und Pfannendunst-Kondensator [317]..... 147
Abbildung 126: Kochsystem Varioboil [254] 148
Abbildung 127: Dünnfilmverdampfung mit Pfannendunst-Kondensator und Wärmespeicher [317] 149
Abbildung 128: Kochsystem mit Stripping-Kolonne [210] 150
Abbildung 129: Freies Dimethylsulfid (DMS) und dessen Precursor S-Methylmethionin (DMS-P) in Ausschlagwürze (AW) und Bier bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung 151
Abbildung 130: Photometrisch gemessene Farbe in Ausschlagwürze (AW) und Bier bei der Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung 151
Abbildung 131: Thiobarbitursäurezahl (TBZ) und noch koagulierbarer Stickstoff (koag. N) in Ausschlagwürze (AW) bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung..... 152
Abbildung 132: Hochmolekularer Stickstoff (hochmol. N) in Ausschlagwürze (AW) und Bier sowie Schaum nach Ross & Clark in Bier bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung 153
Abbildung 133: 2-Furfural in gealtertem Bier und Akzeptanz des gealterten Bieres bei Mikrowellenkochungen mit unterschiedlicher Gesamtverdampfung 153
Abbildung 134: Verlauf des pH-Wertes von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)..... 157
Abbildung 135: Farbe von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2) 157
Abbildung 136: Polyphenolgehalt von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)... 158
Abbildung 137: Gesamtaminosäuren und Glutamin von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während einer Kochung..... 159
Abbildung 138: Zunahme der Thiobarbitursäurezahl (Δ TBZ) von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2) 160
Abbildung 139: Freies Dimethylsulfid (DMS) von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)..... 160
Abbildung 140: Konzentration von 2-methyl-Butanal von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)..... 163
Abbildung 141: Konzentration von 2-Phenylacetaldehyd von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2)..... 163

Abbildung 142: Verlauf langkettiger Fettsäuren (C 14 – C 18:3) während der Abläuterung 164
Abbildung 143: Konzentration von γ-Nonalacton von Vorderwürze (VW) und Nachgüssen (NG) bezogen auf 12 % Stw. während zwei Kochungen (Sud 1 und Sud 2) 165
Abbildung 144: Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw. 168
Abbildung 145: Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw. 168
Abbildung 146: Simulation der Konzentration von 2-Phenylacetaldehyd als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw. 169
Abbildung 147: Simulation der Konzentration von 3-methyl-Butanal bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw. 169
Abbildung 148: Simulation der Summe der Strecker-Aldehyde als 3-D-Graphik bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG), jeweils bez. 12 % Stw. 170
Abbildung 149: Simulation der Summe der Strecker-Aldehyde bei unterschiedlicher Kochzeit von Vorderwürze (FW) und Nachgüssen (NG) jeweils bez. 12 % Stw. 170
Abbildung 150: Kühltrubmengen vor und nach der Abtrennung in drei Brauereien 173
Abbildung 151: Zeit bis zum Erreichen des Gärkellervergärungsgrades in Tagen 174
Abbildung 152: Diacetyl am 6. Reifungstag mit Kühltrub oder mit Flotation 174
Abbildung 153: Abnahme des Freien Aminostickstoffes (FAN) bei steigenden Hefeführungen 175
Abbildung 154: DLG-Verkostung frischer Biere mit und ohne Kühltrubentfernung 175
Abbildung 155: DLG-Verkostung forciert gealterter Biere mit und ohne Kühltrubentfernung 176
Abbildung 156: Lag-time und SO_2-Gehalt von ‚Bieren mit und ohne Kühltrub 176
Abbildung 157: Summe der Alterungskomponenten in forciert gealterten Bieren 177
Abbildung 158: Chemisch-physikalische Stabilität von Bieren mit und ohne Kühltrubentfernung 177
Abbildung 159: Schematische Ansicht der Restbierdosage in die Heißwürzeleitung. 183
Abbildung 160: Abhängigkeit der Pasteur-Einheit von Heißhaltezeit und Temperatur des Produktes 184
Abbildung 161: Mittlerer CSB des Brüdenkondensates von hellem Vollbier während der Würzekochung 186
Abbildung 162: Fließschema einer Umkehrosmose-Anlage zur Aufbereitung von Brüdenkondensat 189
Abbildung 163: Isomerisierung von α- zu iso-α-Säuren beim Würzekochen. 196
Abbildung 164: Chemische Form der chiralen Verbindung Linalool 197
Abbildung 165: Aromaintensitäten „fruchtig“ und „blumig“ von verschiedenen Aromahopfensorten 198
Abbildung 166: Einteilung von Hopfenprodukten 199
Abbildung 167: Relative Analysendifferenz der Methoden EBC 7.5 (KW) zu EBC 7.7 (HPLC) 200
Abbildung 168: Einfluss der Hopfengabe auf den Biercharakter 203

Abbildung 169: Güte der Bittere im Bier bei Einsatz der Aromahopfensorten Perle und Saphir 207
Abbildung 170: Gehalt an Gesamtpolyphenolen, Anthocyanogenen und Tannoiden der Allmalzwürzen zum Zeitpunkt Kühlmitte (KM) 208
Abbildung 171: Gehalt an Gesamtpolyphenolen, Anthocyanogenen und Tannoiden der Reiswürzen zum Zeitpunkt Kühlmitte (KM) 209
Abbildung 172: Alterungsnoten der Allmalz- und Reisbiere. 209
Abbildung 173: Monatlicher relativer α-Abbau (ohne 0_2) in Pellets als Funktion der Lagertemperatur 214

Anhang

Liste der betreuten Diplomarbeiten

1. Ammon, S., *Einfluß der Kühltrubabscheidung auf die Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
2. Bahns, P., *Untersuchungen zum Einfluss einer Dekantierzentrifuge auf die Qualität wiedergewinnbaren Hefebieres aus Überschusshefe*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2004, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
3. Bartschat, H., *Einfluß der Heißtrubabscheidung auf die Filtrierbarkeit von Bier - Ein Vergleich zwischen einem neu konzipierten Whirlpool und einer modernen Zentrifuge*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
4. Bischoff, E., *Einfluß der Gerstensorte und des Mälzungsverfahrens auf die Alterungsstabilität des Bieres*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität München: München.
5. Braun, T., *Untersuchungen zur kontinuierlichen Bierreifung im halbtechnischen Maßstab*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
6. Clauss, E.H., *Verwendung von High Maltose Corn Sirup als Malzersatzstoff*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
7. Coors, G., *Einfluss einer Würzevorkühlung auf die Würze- und Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
8. Dickel, T., *Einfluss des Trubeintrages auf den Geschmack und die Geschmacksstabilität von Bier*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
9. Dingeldein, A., *Optimierung der Würzekochung und -behandlung in einer Brauerei*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
10. Eisler, T., *Einergieeinsparungsmöglichkeiten beim Maischprozess*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2003, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
11. Erhardt, R., *Schäl- und Prallversuche an verschiedenen Cerealien und Pseudocerealien mittels eines Labor-Druckluftentspelzers*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität München: München.
12. Falatik, M., *Verbesserung des cytolytischen Abbaus im Sudhaus durch neue Schrotungs- und Maischtechniken*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
13. Faltermeier, M., *Einsatzmöglichkeiten von fraktionierten CO_2-Hopfenextrakten zur gezielten Beeinflussung des Aromas im fertigen Bier*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
14. Ferstl, F., *Ermittlung von Einflussfaktoren auf die Betriebsgrenzen einer Nassschrotmühle Typ Variomill*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2001, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
15. Gerner, M., *Optimierung der Auswaschausbeute beim Würzegewinnen mit einem Dynamischen Filter*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.

16. Groeger, T., *Otimierung eines Maischgefäßes im Industriemaßstab*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2005, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
17. Gröger, R., *Vergleich zwischen einer Würzekochung mit Innenkocher und dem Würzekochsystem Merlin unter besonderer Berücksichtigung der flüchtigen Inhaltsstoffe der Würze*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
18. Haaben, M., *Vergleich der Würze- und Bierqualität bei verschiedenen Sudgrößen; Scale-Up*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1992, Diplomarbeit, Techniche Universität: München.
19. Hartmann, K., *Auswirkungen von Würzeverteilungssystemen beim Kochen auf die Würze- und Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2001, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
20. Hermann, S., *Optimierung der Sudhausausbeute durch Variation der Auswaschparameter bei einem Dynamischen Membran-Läuterverfahren und Anwendung von Ultraschall beim Maischen*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
21. Herrmann, M., *Untersuchung zum Hopfenaroma in Pilsbieren bei Variation der Whirlpool-Temperatur und der Anwendung verschiedener Hopfentrocknungstemperaturen*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
22. Herzog, T., *Die Auswirkungen verschiedener Weich- und Keimtemperaturen auf die Lösung von Braugerste beim Mälzen*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
23. Hohrein, A., in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2006, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
24. Isenberg, R., *Kaltwürzefiltration und Kaltwürzeflotation - ein Systemvergleich*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
25. Köhler, P., *Einfluss von Dekoktions- und Infusionsverfahren auf die Bildung von Aroma- und Geschmacksstoffen.*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2004, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
26. Krottenthaler, M., *Untersuchungen zur kolloidalen Stabilität des Bieres*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1989, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
27. Kube, H., *Einsatz von feinstvermahlenen Malzmehlfraktionen im Sudhaus und deren Auswirkungen auf die Würze- und Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
28. Kummert, F., *Unterschiede früher Aroma- und Bitterhopfengaben auf die sensorischen Eigenschaften von Rohfrucht- und Allmazbieren*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2005, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
29. Kurz, T., *Versuche zur dynamischen Niederdruckkochung*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
30. Laubrock, H., *Einflüsse auf die Würzequalität in Pfannen mit Außenkocher*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
31. Lippold, J., *Optimierung der Schrotung einer Nassschrotmühle mit Schachtweiche*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.

32. Mader, F., *Mälzungsparameter, Malzbeschaffenheit und Bierqualität. Untersuchungen anhand der Gerstensorte Alexis*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1991, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
33. Mezger, R., *Optimierung der Verdampfung bei der Würzekochung in einer Innenkocherpfanne mit Brüdenverdichter*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
34. Mieth, R., *Energetische Bilanzierung und technologische Betreuung einer Modul-Vakuumverdampfungsanlage im Sudhaus der Gilde-Brauerei AG, Hannover*. 2002, Diplomarbeit, Hochschule Anhalt: Köthen.
35. Milkreiter, M., *Auswirkungen verschiedener Messerkonstruktionen auf die Läuterarbeit eines Läuterbottichs*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
36. Müller, K.P., *Brauversuche unter Einsatz unvermälzter Gerste*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2004, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
37. Nieroda, J., *Einfluss der Schrotfeinheit auf den Maischprozess*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
38. Reiter, T., *Auswirkungen einer Maischesäuerung*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2004, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
39. Riggert, S., *Optimierung des Hopfenaromas im Bier unter Verwendung von neuen Aromahopfensorten*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2005, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
40. Rohrbach, J., *Würzebereitung mit unvermälzten Cerealien in Verbindung mit einer Feinstvermahlung und der Membranfiltration von Maische*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
41. Rückel, K., *Variation der biologischen Säuerung beim Verbrauen sodaalkalischer Wässer unter Verzicht auf eine Wasserenthärtung durch Ionentauscher*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
42. Schneider, F., *Vergleich der Läutersysteme bei der Brauerei Beck & Co. unter dem Aspekt einer erhöhten Würzekonzentration*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2003, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
43. Schneider, J., *Würzegewinnung aus Pulverschrotmaische mit einem Scherspaltfilter*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
44. Scholer, A., *Untersuchungen einer Würzekochanlage mit Innenkocher unter besonderer Berücksichtigung der thermischen Belastung*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
45. Schutzmaier, M., *Untersuchung verschiedener Würzkochsystem bei der Brauerei Beck & Co., Bremen*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
46. Spohr, V., *Die Auswirkungen verschiedener Kochverfahren auf die Würze- und Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
47. Stammel, V., *Die Auswirkungen verschiedener Weich- und Keimtemperaturen auf die proteolytische Lösung von Braugerste*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
48. Steiner, O., *Technologische Beurteilung der Dynamischen Mikrofiltration von Maische*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2000, Diplomarbeit, Technische Universität: München.

49. Vetterlein, K., *Aufbereitung von Brüdenkondensat und Wiederverwendung im Sudhaus*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1996, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
50. Voigt, T., *Einführung eines unscharfen Reglers für die Läuterung im Praxismaßstab*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
51. Wanke, M., *Die Malztrocknung im Wirbelschichtverfahren*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
52. Yamashita, H.: *Untersuchung der Kochung verschiedener Läuterfraktionen (Research in different lauter fractions by wort boiling* in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2006, Masterarbeit, Technische Universität: München.
53. Zeidler, U., *Darren von Malz unter Einsatz der Wirbelschichttechnologie - Verfahrensoptimierung und energetische Betrachtung*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1998, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
54. Zellner, C., *Untersuchungen des Einflusses der Kühltrubabtrennung mittels Kaltwürzefilter auf die Bierqualität und die Bierstabilität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 2001, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
55. Zürcher, J., *Untersuchungen verschiedener Malzaufbereitungsverfahren zur Verbesserung der Würze- und Bierqualität*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1999, Diplomarbeit, Technische Universität: München.
56. Zwick, M., *Einsatz von Milchsäure beim Verbrauen unaufbereiteter harter Rohwässer*, in *Wissenschaftszentrum Weihenstephan*. 1997, Diplomarbeit, Technische Universität: München.