

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie

Trübungsstabilität von Weizenbier

Gem Schwarz

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

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. H. Briesen

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr. W. Back (i. R.)
2. Univ.-Prof. Dr. Dr. H. Parlar
3. Hon.-Prof. Dr. H. M. Eßlinger,
(Technische Universität Bergakademie Freiberg)

Die Dissertation wurde am 26.01.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 05.03.2012 angenommen.

*„Der erste und der schwerste ist
der Kampf mit sich selbst.“*

J. A. Krampe

Danksagung

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Univ.-Prof. Dr.-Ing. Werner Back für die Überlassung dieses Themas und das entgegengebrachte Vertrauen. Darüber hinaus bedanke ich mich für das Vertrauen und die Freiheit, am Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I auch andere Themen der Brautechnologie im Rahmen verschiedener Projekte in selbständiger Arbeit erschließen und meinen Wissensschatz in einer sehr kollegialen Atmosphäre erweitern zu dürfen.

Bei meinen Betreuern Stefan Kreis und Martin Zarnkow bedanke ich mich für die stete Diskussions- und Hilfsbereitschaft und vor allem für ihren kollegialen und freundschaftlichen Umgang. Von beiden konnte ich viel in Bezug auf Projekt- und Laborarbeit lernen.

Mein Dank gilt auch Prof. Thomas Becker, meine Arbeit auch noch am Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie weiterführen zu dürfen.

Prof. Harun Parlar und Prof. Michael Eßlinger möchte ich besonders für die Übernahme des Koreferates und die schnelle Ausarbeitung der Gutachten danken, Prof. Heiko Briesen und Frau Voigt für die Übernahme des Vorsitzes und den zügigen Umlauf der Arbeit von nur drei Wochen. Prof. Parlar wünsche ich alles gute für den Ruhestand.

Martina Gastl danke ich herzlich für ihre Hilfsbereitschaft während der experimentellen Phase und für die zügige Korrektur der Arbeit.

Ich bedanke mich bei den Kolleginnen und Kollegen Elmar Spieleder, Matthias Kessler, René Schneider, Felix Burberg, Elisabeth Steiner, Frithjof Thiele, Mark Schneeberger, Moritz Krahl, Björn Klotzbücher, Michael Wurzbacher, Sascha Wunderlich, Michael Müller, Fei Qian, Florian Kühbeck und Sebastian Kappler für die Hilfsbereitschaft und Unterstützung in der Durchführung und Umsetzung von Analysen und Versuchen, Stefan Hanke für die Unterstützung beim Versuch HPLC zu betreiben und für viele gut gehopfte Biere, bei Cynthia Almaguer und Alicia Munõz für die stete Bereitschaft zur Verkostung.

Ganz besonders bedanke ich mich bei meinem Leidensgenossen als Systemadministrator Florian Schüll für die gute Zeit am Lehrstuhl und für die tatkräftige Unterstützung bei der Organisation, Durchführung und Mitwirkung zahlreicher Lehrstuhlfestivitäten.

Ebenfalls für die tatkräftige Unterstützung (nicht nur bei Lehrstuhlfestivitäten) sei

auch Manfred Wallenwein und den angehenden Braumeistern Hendrik Wiesen und Hannes Kolb gedankt.

Claudia Gün und insbesondere Daniele Schulte möchte ich für ihre Hilfe vor allem in verwaltungstechnischen Angelegenheiten danken.

Für Ihre Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen bedanke ich mich bei den Diplomanden und Studienarbeitern Björn Josten, Alexander Maier, Johannes Bott und Sebastian Lösch.

Dagmar Münzer, Monica Braasch und Thorsten Knöfel danke ich für die zuverlässige Unterstützung im Bierlabor, Martin Zarnkow für das entgegengebrachte Vertrauen.

Für die finanzielle Unterstützung dieses Forschungsthemas möchte ich mich bei der Jubiläumsstiftung von 1905 e. V., der Wissenschaftlichen Station für Brauerei in München e. V. und der Ganzenmüller-Stiftung bedanken und hoffe, dass die Ergebnisse dieser Arbeit auch in der Praxis umgesetzt werden.

Bei der Familie Thormann bedanke ich mich ganz herzlich für die Unterstützung in der letzten Phase.

Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Freunden, die mir aus Isinger Internatszeiten geblieben sind. Ihr habt mich immer in meiner Studienwahl und in meiner Entscheidung für die Promotion bestärkt.

Meiner Mutter danke ich in diesem Rahmen für ihre unermüdliche Bemühung, mir eine gute Ausbildung zukommen zu lassen, wodurch es mir erst ermöglicht wurde, diesen Weg gehen zu können.

Zuletzt möchte ich mich herzlich bei Jenny für ihre Geduld und Unterstützung bedanken und freue mich sehr auf unsere gemeinsame Zukunft!

Vielen Dank!

Cem Schwarz

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	IX
Tabellenverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Kenntnisstand	2
2.1 Charakterisierung der Rohstoffe für Weizenbier	2
2.1.1 Rohstoffspezifikationen von Weizen und Gerste und ihr Einfluss auf die Trübung	2
2.1.2 Alternative Rohstoffe zur Herstellung obergäriger Biere.....	3
2.1.3 Hopfen.....	3
2.1.4 Hefe.....	4
2.2 Trübungsinduzierende Stoffgruppen in Würze und Bier.....	4
2.3 Technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Trübungsstabilität	6
2.4 Einteilung disperser Systeme.....	7
2.5. Kraftwirkungen in dispersen Systemen	7
2.5.1 Diffusion	8
2.5.2 Gravitation	9
2.5.3 Attraktive (anziehende) Kräfte	10
2.5.4 Repulsive (abstoßende) Kräfte.....	11
2.5.5 Stabilität kolloidaler Systeme (DLVO-Theorie)	15
2.6 Einflussfaktoren auf die Sedimentation von Dispersionen	18
2.6.1 Sedimentationsverhalten monodisperser Partikelsuspensionen	19
2.6.2 Sedimentationsverhalten polydisperser Partikelsuspensionen.....	21
2.7 Analytische Erfassung und Charakterisierung von Trübungen	23
2.7.1 Durchlicht- und Streulichtmessung	23
2.7.2 Trübung und Trübungsmessung von Weizenbier	27
2.7.3 Partikelmessung und Trübung von Weizenbier	28
3 Material und Methoden.....	30
3.1 Material	30

3.1.1 Brauereirohstoffe	30
3.1.2 Klein- und Pilotbrauanlage	31
3.1.2.1 Kleinbrauanlage 10 l-Maßstab	32
3.1.2.2 Pilotbrauanlage 60 l-Maßstab	33
3.1.3 Zweiwinkel-Streulichtmessgerät	34
3.1.4 Partikelmessgerät.....	35
3.2 Methoden	38
3.2.1 Kleinmälzung (1 kg-Maßstab).....	38
3.2.2 Brautechnologie.....	38
3.2.2.1 Bierherstellung im 10 l Maßstab.....	38
3.2.2.2 Bierherstellung im 60 l-Maßstab	39
3.2.2.3 Hefevermehrung und Bestimmung der Vitalität und Viabilität	40
3.2.3 Malz-, Würze- und Bieranalysen	41
3.2.4 Verkostung	41
3.2.5 Probenvorbereitung für die Streulicht- und Partikelmessung.....	41
3.2.6 Durchführung der Partikelgrößenbestimmung von Hefe und Weizenbier mit dem HELOS	43
3.2.7 Herstellung eines Partikelstandards auf Basis einer Hefesuspension	46
3.2.8 Partikelquantifizierung mittels Partikelstandard (Hefesuspension)	47
4 Ergebnisse und Diskussion.....	51
4.1 Vorhersage der Trübungsstabilität von Weizenbier mittels Zweiwinkel-Streulichtmessung	52
4.2 Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität von Weizenbier	59
4.3 Quantifizierung von Partikeln	62
4.3.1 Statistische Bewertung der Partikelquantifizierung.....	63
4.3.2 Veränderung der Partikelkonzentration über die Zeit und ihr Einfluss auf die Trübung	65
4.4 Verbesserung der Trübungsstabilität durch den Einsatz von Wintergerstenmalz und alternativen Malzen	68
4.4.1 Kleinbrauversuche mit verschiedenen Wintergerstenmalzen der Ernte 2008	68
4.4.2 Praxisversuche mit der Wintergerstensorte Esterel.....	70

4.4.3 Trübungseigenschaften von Roggen-, Triticale- und Hafermalz.....	72
4.5 Auswirkungen unterschiedlicher Gerbstoffkonzentrationen während des Maischens und der Würzekochung auf die Trübungsstabilität von Weizenbier	74
4.6 Einfluss der Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität.....	77
4.6.1 Einfluss der Kurzzeiterhitzung auf die VZ 90%/25° und auf die Partikelgrößenverteilung.....	77
4.6.2 Verbesserung der Trübungsstabilität durch Kurzzeiterhitzung bei verkürzter Würzekochung	84
4.7 Klärungsverhalten verschiedener Hefestämme	91
4.8 Verbesserung der Trübungsstabilität durch Hefebier	93
5 Zusammenfassung und Ausblick	98
6 Literatur	101
Anhang	108

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Prinzip der Ladungsstabilisierung [46]	11
Abbildung 2.2: Polymerbasierte sterische Stabilisierung [46]	12
Abbildung 2.3: Darstellung des Modells der elektrochemischen Doppelschicht an der Oberfläche eines negativ geladenen Partikels [53].....	14
Abbildung 2.4: Einfluss der Elektrolytkonzentration auf das Zetapotenzial [53].....	14
Abbildung 2.5: Einfluss des pH-Wertes auf das Zetapotenzial, dargestellt als Beispiel mit SiO ₂ -Partikeln [53]	15
Abbildung 2.6: Darstellung der Gesamtwechselwirkungsenergie zweier Partikeln in einer Dispersion.....	16
Abbildung 2.7: Einfluss verschiedener KCl-Konzentrationen auf die Trübung von Apfelsaft.....	18
Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Zetapotenzial und Trübung in Apfelsaft [49]	18
Abbildung 2.9: Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Trennspiegelgeschwindigkeit und auf die Sinkgeschwindigkeit für monodisperse Partikeln [64].....	20
Abbildung 2.10: Einfluss der Volumenkonzentration Φ auf die Sedimentationsgeschwindigkeit monodisperser Partikelsuspensionen	21
Abbildung 2.11: Partikelgrößenverteilungen in einem unfiltrierten Weizenbier, gemessen bei Temperaturen von 11 bis 21 °C [68].....	22
Abbildung 2.12: Lichtstreuung an der Einzelpartikel [35].....	23
Abbildung 2.13: Winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung für die MIE-Parameter 0,1, 1, 10 und 100 [70]	24
Abbildung 2.14: Winkelabhängige Streulichtintensität für die MIE-Parameter 5, 25 und 100 [71].....	25
Abbildung 2.15: Winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung (90° und 25°) für Partikelgrößen von 0,05 μm und 5 μm bei einer Lichtwellenlänge $\lambda = 550 \text{ nm}$ [72]..	25
Abbildung 2.16: Einfluss der Partikelgröße auf die 90°-Streulichtintensität von TiO ₂ , Al ₂ O ₃ und SiO ₂ als Modellpartikel bei gleicher Partikelanzahl und unterschiedlichen Brechungszahlen n [72].....	26

Abbildung 2.17: Einfluss der Partikelgröße auf die 90°-Streulichtintensität (Lichtwellenlänge $\lambda = 550$ nm) bei gleichbleibender Partikelvolumenkonzentration (und unterschiedlicher Brechungszahl n) für TiO_2 , Al_2O_3 und SiO_2 [72].....	26
Abbildung 2.18: Trübung einer Hefesuspension bei verschiedenen Streuwinkeln in Abhängigkeit der Hefezellkonzentration [72]	27
Abbildung 3.1: Anordnung der optischen Instrumente [79].....	36
Abbildung 3.2: Beugungsbild monodisperser, kugelförmiger Partikel [80].....	36
Abbildung 3.3: Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen mittels Nassdispergierung [79].....	37
Abbildung 3.4: Edelstahlbecken der Nassdispergierung [80]	37
Abbildung 3.5: Angewendetes Infusionsmaischverfahren zur Herstellung von Weizenbieren im 10 Liter und 60 Liter Maßstab	38
Abbildung 3.6: Saugflasche mit Vakuumpumpe	42
Abbildung 3.7: Einstellung der Geräteparameter in der HELOS-Sensorsteuerung ..	44
Abbildung 3.8: Q_3 -Partikelgrößenverteilung einer Hefesuspension zur Quantifizierung der Partikeln in Bier	47
Abbildung 3.9: Partikelgrößenverteilung aus dem Überstand eines Weizenbieres 8 Tage nach der Abfüllung.....	48
Abbildung 3.10: Partikelgrößenverteilung vor (gleiche rote Kurve wie Abb. 25, ■) und nach (blaue Kurve, ●) der Zugabe des Partikel-(Hefe-)Standards.....	48
Abbildung 4.1.1: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,5 und 0,6	54
Abbildung 4.1.2: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7	55
Abbildung 4.1.3: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7	55
Abbildung 4.1.4: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,7 und 0,8	56
Abbildung 4.1.5: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° > 0,9	56
Abbildung 4.1.6: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° > 0,9	57
Abbildung 4.2.1: Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität für Weizenbier mit einer VZ 90°/25° < 0,7	60

Abbildung 4.2.2: Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität für Weizenbier mit einer $VZ_{90^\circ/25^\circ} > 0,9$	60
Abbildung 4.2.3: Einfluss der Lagertemperatur auf die PGV	61
Abbildung 4.2.4: Einfluss der Lagertemperatur auf die PGV	61
Abbildung 4.3.1: Partikelgrößenverteilung aus dem Überstand von Weizenbier ca. 24 Stunden nach der Abfüllung	62
Abbildung 4.3.2: Partikelgrößenverteilung im Überstand von Weizenbier vier Wochen nach Abfüllung.....	63
Abbildung 4.3.3: Wiederholbarkeit der Partikelmessung für Hefestandard.....	64
Abbildung 4.3.4: Wiederholbarkeit der Partikelmessung für den Submicronbereich	64
Abbildung 4.3.5: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität für ein Bier mit höherer Trübungsstabilität.....	66
Abbildung 4.3.6: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität für ein Bier mit niedriger Trübungsstabilität	66
Abbildung 4.4.1: Trübungsintensität nach 69 Tagen für Weizenbiere mit unterschiedlichen Schüttungsanteilen für verschiedene Wintergerstenmalze, hergestellt im 10 l-Maßstab	69
Abbildung 4.4.2: Einfluss der Wintergerstensorte <i>Esterel</i> auf die Trübungsstabilität von Weizenbier im Praxisversuch, 64 Tage nach der Abfüllung.....	71
Abbildung 4.4.3: Trübungswerte von Roggen-, Triticale- und Hafermalzbieren 100 Tage nach der Abfüllung.....	73
Abbildung 4.5.1: Einfluss verschiedener Hopfentreberdosagen beim Maischen und bei der Würzekochung auf die Trübungsstabilität 25 Tage nach der Abfüllung.....	74
Abbildung 4.5.2: Gesamt-N-, Anthocyanogen-, Tannoidgehalte und photom. Jodwerte von Würzen mit unterschiedlichen Dosagen an Hopfentreber beim Maischen und Würzekochen	75
Abbildung 45: Trübungswerte der Weizenbiere mit Hopfentrebergabe während des Einmaischens oder zu Kochbeginn 15 Tage nach der Abfüllung.....	76
Abbildung 4.6.1: Vergleich der PGV vor und nach KZE von Probe 56 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität und gleichzeitiger Erhöhung der $VZ_{90^\circ/25^\circ}$, 8 Tage nach der Abfüllung.....	78

Abbildung 4.6.2: Erhöhung der Trübungsintensität von Probe 56 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erhöhung der 90°- und 25°-Trübungsintensität, der VZ 90°/25°, der Partikelkonzentration < 1,5 µm und der Gesamtpartikelkonzentration, gemessen 8 Tage nach der Abfüllung.....	79
Abbildung 4.6.3: Vergleich der PGV der Probe 55 vor und nach KZE, mit einer Verringerung der Trübungsintensität nach KZE und gleichzeitiger Erhöhung der VZ 90°/25°, 13 Tage nach der Abfüllung	80
Abbildung 4.6.4: Verringerung der Trübungsintensität und der Partikelkonzentration von Probe 55 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erhöhung der VZ 90°/25°, 13 Tage nach der Abfüllung.....	80
Abbildung 4.6.5: Erhöhung der Trübungsintensität von Probe 32 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erniedrigung der VZ 90°/25°, 8 Tage nach der Abfüllung.....	81
Abbildung 4.6.6: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 32 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität bei gleichzeitiger Verringerung der VZ 90°/25°, 8 Tage nach Abfüllung.....	82
Abbildung 4.6.7: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 32 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität bei gleichzeitiger Verringerung der VZ 90°/25° nach 22 Tagen.....	82
Abbildung 4.6.8: Vergleich von Proben mit unterschiedlicher Kochzeit in Bezug auf koag. N in der Würze und der Trübung vor und nach einer Flaschenpasteurisierung	85
Abbildung 4.6.12: Konzentrationen an freiem DMS und koagulierbarem Stickstoff in Würze und die Trübungsintensitäten der resultierenden Praxisbiere vor und nach einer KZE 13 Tage nach der Abfüllung.....	88
Abbildung 4.6.13: Trübungsintensität der Praxisbiere mit 30 und 60 Minuten vor und nach einer KZE, 43 Tage nach der Abfüllung	88
Abbildung 4.7.1: Einfluss der Hefestämme <i>W 34</i> , <i>W 68</i> und <i>W 175</i> auf die Trübungsstabilität in der ersten Führung, gemessen 15 Tage nach der Abfüllung...	92
Abbildung 4.7.2: Einfluss der Hefestämme <i>W 34</i> , <i>W 68</i> und <i>W 175</i> auf die Trübungsstabilität in der zweiten Führung, gemessen 27 Tage nach der Abfüllung.	92
Abbildung 4.8.1: Trübungsintensitäten verschiedener Hefebiere 14 Tage nach der Abfüllung.....	93

Abbildung 4.8.2: Steigerung der Trübungsintensität durch Hefebierdosagen (Hefebier D) von 5 und 10 %, gemessen 14 Tage nach der Abfüllung (Probe VR 18)	94
Abbildung 4.8.3: Verbesserte Trübungsstabilität durch Hefebier, gemessen 77 Tage nach der Abfüllung (Probe VR 18)	94
Abbildung 4.8.4: Partikelgrößenverteilung von Hefebier A	95
Abbildung 4.8.5: Einfluss von 5 und 10 % Hefebier auf die Partikelgrößenverteilung der Probe VR 1	96
Abbildung 4.8.6: Partikelgrößenverteilung von Hefebier D	96
Abbildung 4.8.7: Einfluss von 5 und 10 % Hefebier auf die Partikelgrößenverteilung der Probe VR 18	97

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Anteile verschiedener Stoffgruppen an der Trübung in belgischen Weißbieren [23].	5
Tabelle 2.2: Konzentrationen anorganischer Verbindungen in einer 12 °P Würze ...	16
Tabelle 4.2: Min. und max. Werte für die Trübungsstabilität in Abhängigkeit der VZ 90°/25°	54
Tabelle 4.6.1: Vergleich unterschiedlicher Temperaturen bei der Kurzzeiterhitzung von Weizenbier und der Einfluss auf die Konzentration an noch koagulierbarem Stickstoff	83

Abkürzungsverzeichnis

BE	Bittereinheiten
C _v	Feststoffkonzentration
Def.	Definition
EBC	European Brewing Convention
EBC-TE	EBC-Trübungseinheiten
DMS	Dimethylsulfid
HZZ	Hefezellzahl
KZE	Kurzzeiterhitzung
NTU	Nephelometric Turbidity Unit
Φ	Volumenanteil (Volumenbruch)
PGV	Partikelgrößenverteilung
TBZ	Thiobarbitursäurezahl
V.d.W.-Kraft	Van-der-Waals-Kraft
ζ	Zetapotenzial

1 Einleitung

Weizenbier erfreut sich im In- und Ausland zunehmender Beliebtheit aufgrund seines fruchtig-würzigen Aroma- und Geschmacksprofils als unfiltriertes, naturtrübes Bier mit einer ausgeprägten Schaumkrone. Insbesondere Schaum und Trübung werden vom Konsumenten zuerst wahrgenommen und optisch beurteilt. Während die Schaumstabilität durch gewissenhaft angewandte Brautechnologie in der Regel gut beherrschbar ist, werden immer wieder starke Veränderungen im Trübungsbild der Weizenbiere beobachtet. Im offenen Ausschank von Weizenbier kommt es teilweise zu einem intensiven Ausklaren durch Sedimentation der Trübstoffe und der Hefezellen. In der Praxis kann zunehmend beobachtet werden, dass die Fässer von der Brauerei über Kopf ausgeliefert und erst kurz vor dem Anzapfen durch das Personal in der Gaststätte umgedreht werden. Diese Maßnahme findet nicht immer Akzeptanz bei den Wirten und verhindert auch nicht dauerhaft eine Abnahme der Trübungsintensität über die Zeit. Bei Flaschenweizenbieren kann ein sich nicht richtig aufgelöster Hefebodensatz optisch wenig ansprechende Hefeflocken im Glas verursachen. Beide Phänomene können vom Konsumenten als Qualitätsmängel interpretiert werden und zu einer verringerten Akzeptanz oder im schlimmsten Fall zu einer Ablehnung der Weizenbiere führen. Da Hefezellen aufgrund ihrer Größe nicht in Schwebe bleiben, kann eine stabile Trübung nur durch Kolloide mit kleinerer Partikelgröße erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit war es zum Einen, Weizenbier als disperses System zu charakterisieren und messtechnisch zu erfassen, so dass eine analytische Vorhersage der Trübungsstabilität gemacht werden kann. Zum Anderen wurde untersucht, inwieweit durch die Rohstoffwahl und durch brautechnologische Maßnahmen eine Verbesserung der Trübungsstabilität erreicht werden kann. Da bislang nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen über Weizenbier und speziell über die Trübungsstabilität durchgeführt wurden, soll diese Arbeit auch zur Orientierung für nachfolgende Arbeiten dienen, welche Schwerpunkte für weitere Forschungsarbeiten in Bezug auf die Trübungsstabilität von Weizenbier gesetzt werden können.

2 Grundlagen und Kenntnisstand

2.1 Charakterisierung der Rohstoffe für Weizenbier

2.1.1 Rohstoffspezifikationen von Weizen und Gerste und ihr Einfluss auf die Trübung

Für die Herstellung von Weizenbier ist die Verwendung von Weizenmalz statthaft, der Anteil der Schüttung muss mindestens 50 % betragen. Die Brautauglichkeit des Weizenmalzes wird im Wesentlichen durch den Proteingehalt (< 12 %), den Extraktgehalt (> 83,5 %), die Eiweißlösung (36–40 %) und die Viskosität der Kongresswürze (< 1,65 mPas) bestimmt. Zur Beurteilung der Cytolyse fehlen allerdings noch geeignete Analysemethoden [1]. Ein weiteres Problem ist neben der unzureichenden analytischen Beurteilung, dass es im Vergleich zum Braugerstenanbau keinen Brauweizenanbau gibt und sortenreines Weizenmalz in der Regel nicht verfügbar ist [2]. Allgemein bringt Weizen bzw. Weizenmalz im Vergleich zu Gerstenmalz einen größeren Anteil an hochmolekularen Proteinfractionen in die Würze ein, bei gleichzeitig niedrigeren Mengen an freiem Amino-Stickstoff [3, 4]. DELVAUX konnte in Mälzungsversuchen zeigen, dass mit zunehmender Keimdauer des Weizenmalzes eine Zunahme der Trübung einherging [5]. BACK et. al [6] weisen darauf hin, dass Weizenmalze mit überhöhten proteolytischen Kennzahlen, unabhängig von der Weizenpartie oder Intensität des Mälzungsverfahrens, tendenziell zu einer Verschlechterung der sensorischen Eigenschaften führen. Allerdings zeigte sich auch, dass der Einfluss des Gerstenmalzes und insbesondere der Einfluss der Gerstensorte deutlich größer als der Einfluss des Weizenmalzes auf die Trübung war, wodurch auch durch das Schüttungsverhältnis von Weizen- und Gerstenmalz die Trübungsbildung mit beeinflusst werden kann. DUFNER [7] bestätigte dies durch Versuche mit unterschiedlichen Gerstensorten, stellte aber auch gleichzeitig fest, dass durch die Variation von Mälzungsparametern kein signifikanter Einfluss auf das Trübungspotenzial von Gerstenmalz genommen werden kann.

Für die Weizenbierbereitung wird neben dem Weizenmalzanteil i. d. R. Gerstenmalz aus zweizeiliger Sommergerste verwendet, welches auch für die Bereitung untergäriger Biere eingesetzt wird. Bedingt durch Ernteauffälle und zurückgehende

Anbauflächen für Sommerbraugerste rückte in den letzten Jahren immer wieder die Wintergerste zur Überbrückung der Versorgungsengpässe mit Sommergerste in den Fokus der Brauwirtschaft. Aus brautechnologischer Sicht werden Wintergerstenmalze bei untergärigen Bieren meist aufgrund ihres höheren Eiweiß- und Polyphenolgehaltes, ihrer breiten Bittere im Geschmack, einer schlechteren Klärung in Verbindung mit einer intensiveren Trübungsbildung bzw. einer verringerten kolloidalen Stabilität nach der Abfüllung nur selten eingesetzt [8-10]. SCHMIDT [11] berichtete 1979 noch, dass Weizenbiere mit Wintergerstenmalz eine, damals noch ungewünschte, verstärkte Trübungsneigung bzw. schlechte Klärung in der Flasche zeigten. Die Akzeptanz von trüben Weizenbieren hat erst in den letzten 30 Jahren zugenommen und sich mittlerweile zur Verbrauchererwartung entwickelt.

2.1.2 Alternative Rohstoffe zur Herstellung obergäriger Biere

Nach dem vorläufigen Biergesetz [12] ist zur Herstellung obergäriger Biere jedes vermälzte Getreide, mit Ausnahme von Reis, Mais und Dari, zulässig. Hierbei werden Roggen, Hafer, Triticale, Emmer, Dinkel etc. verarbeitet. Das Interesse an Bier aus alternativen Brauereirohstoffen ist in den letzten Jahren stetig gewachsen, aber aufgrund noch vergleichsweise geringer Konsumentenakzeptanz und teilweise schwieriger Verarbeitung führen diese Biere noch ein Nischendasein. Wesentlicher Unterschied zu Gerste und Weizen ist, dass bei diesen Getreidearten keine intensiven züchterischen Anstrengungen für den Einsatz in der Brauerei erfolgten und damit viele Sorten noch einen „ursprünglichen“ Charakter haben, der sich nicht nur in der brautechnischen Verarbeitung äußert (z. B. hohe Viskositäten oder eine trübe Läuterung), sondern auch trübungsstabile Biere daraus resultieren können [13]. Hinweise für die Ursache der Trübungsbildung bei alternativen Brauereirohstoffen wurden nicht gefunden.

2.1.3 Hopfen

Hopfen ist nach Gerstenmalz die zweitgrößte Polyphenolquelle und kann die Ausbildung von trübungsaktiven Polyphenol-Eiweißverbindungen in filtrierten Bieren verstärken [14]. Da jedoch Hopfen in Weizenbieren eine untergeordnete Rolle aufgrund der traditionell geringen Bittere mit weniger als 15 Bittereinheiten einnimmt, ist aufgrund der im Vergleich zu Lagerbieren geringen Dosage eine Auswirkung auf die Trübungsstabilität von Weizenbier zu vernachlässigen.

2.1.4 Hefe

Allgemein darf für die Hauptgärung von Weizenbier nur obergärige Hefe (*Saccharomyces cerevisiae*) verwendet werden. Zur Nachgärung im Tank oder Gebinde dürfen laut vorläufigem Biergesetz maximal 0,1 % an untergäriger Hefe zur obergärigen Hefe oder 15 % untergärige Kräusen zudosiert werden [12].

Gegen Ende der Gärung neigen sowohl unter- als auch obergärige Hefen zur Flockung bzw. Flockulation. Die Flockulation ist ein reversibler Prozess, der auch bei toten Hefezellen (z. B. nach einer Pasteurisierung) beobachtet werden kann. Die Flockulation konnte bis jetzt noch nicht vollständig aufgeklärt werden, hängt jedoch von einer Vielzahl von Einflussfaktoren, wie von z. B. einer Veränderung der Oberflächenladung der Hefezellen, genetischen Eigenschaften, Anwesenheit von Inhibitoren (wie z. B. Mannose) und aktivierenden Substanzen (z. B. Calcium) ab [15-21]. Darüber hinaus wurde beobachtet, dass Reinzuchthefen eine geringere Flockulationsintensität als Erntehefen zeigen [22]. Neben der gegenseitigen Anlagerung (Agglutination) von Hefezellen werden auch Trubstoffe, wie z. B. Eiweißpartikeln, an der Zelloberfläche adsorbiert, welche mit der Hefe durch natürliche oder forcierte Sedimentation (z. B. Separator) ausgeschleust werden und nicht mehr als Trübungsbildner vorhanden sind.

2.2 Trübungsinduzierende Stoffgruppen in Würze und Bier

Einen Überblick über trübungsinduzierende Stoffgruppen in belgischen Weißbieren, die mit 60 % Gerstenmalz und 40 % unvermälztem Weizen hergestellt werden, gibt DELVAUX, dargestellt in Tabelle 2.1 [23]. Polyphenole, Proteine und Polysaccharide bilden die Hauptbestandteile von Trübungspartikeln. Die Entstehung von Polyphenol-Proteinverbindungen in filtrierten untergärigen Bieren als Trübungsbildner wurden in den letzten Jahrzehnten ausführlich diskutiert [14, 24-29]. Für die Trübungsstabilität von Weizenbier scheint insbesondere wasserlösliches Gluten eine Rolle zu spielen [30]. Zunächst wurde mit steigendem Glutengehalt, bei gleichzeitiger Abnahme der Gesamtpolyphenole und Flavanoide, ein Anstieg der Trübungsintensität beobachtet, welche dann mit weiter steigender Konzentration an Gluten wieder deutlich abnahm. Gleichzeitig zeigten Biere aus Weizen mit geringerem Gesamtstickstoff eine bessere Trübungsstabilität, so dass für die Trübung Gesamtstickstoffgehalt, Eiweißlösungsgrad und der Eintrag von Gluten im

Zusammenhang gesehen werden müssen. Prolinreiche Polypeptide konnten ebenfalls als trübungsaktive Fraktion identifiziert werden, die sowohl mit Polyphenolen interagieren oder sich über Disulfidbrücken mit anderen Peptiden vernetzen können.

Tabelle 2.1: Anteile verschiedener Stoffgruppen an der Trübung in belgischen Weißbieren [23].

	Beer A	Beer B	Beer C	Beer D	Beer 1	Beer 2	Beer 3
Haze (mg/L)	38	22	18	34	33	40	40
Proteins (%)	72.4	73.9	6.9	35.5	79.7	76.7	30.3
Polyphenols (%)	4.3	7.7	1.1	2.8	4.9	10.3	3.3
Carbohydrates^a (%)	21.1	18.6	94.5	63.2	14.3	17.2	62.0
Glucose (%) Starch	10.3	10.0	72.1	49.7	2.3	6.5	57.9
β-glucan	0.5	0.0	0.5	0.6	0.3	0.3	0.4
Residual	7.9	6.1	28.4	16.0	4.3	5.2	6.2
Arabinose (%)	0.73	0.94	1.08	0.71	2.24	1.51	0.88
Xylose (%)	0.90	0.76	0.66	0.64	1.39	1.06	1.02
Galactose (%)	0.80	0.84	1.28	0.88	2.21	1.38	0.66
Mannose (%)	2.56	2.00	0.99	2.18	3.20	3.34	1.24
Metal ions (%)	0.63	0.18	0.21	0.51	0.19	0.79	0.08
Iron (‰)	0.56	0.30	0.39	0.57	0.24	0.47	0.03
Calcium (‰)	3.97	0.93	1.19	3.51	1.18	6.59	0.47
Copper (‰)	0.37	0.14	0.15	0.33	0.29	0.29	0.15
Zinc (‰)	1.02	0.11	0.13	0.31	0.05	0.07	0.03
Magnesium (‰)	0.33	0.20	0.26	0.41	0.18	0.50	0.13
Uronic acids (%)	0.82	1.04	0.65	0.40	2.23	1.52	0.71
Total	99.3	101.4	103.4	102.2	101.3	106.5	96.4

^a: Carbohydrates = sum of the monomers * 0.9.

Hochmolekulare alpha-Glucane werden in der Regel durch Fehler in der Sudhausarbeit (Maisch- und Läuterarbeit) aus dem Malz als nicht abgebaute Stärke oder durch „gestresste“ Hefe in Form von Glycogen in das Bier eingetragen [2]. Darüber hinaus kann durch unsachgemäße Behandlung der Hefe, wie z. B. durch Scherbeanspruchung, Mannose und Protein aus der Hefezellwand in das Bier eingetragen werden [31]. Alpha-Glucane verursachen insbesondere in hochmolekularer Form eine sehr stabile Trübung und lassen sich auch durch Filtration nur unvollständig entfernen. Stütz- und Gerüststoffe aus den Zellwänden

von Weizen und Gerste, wie z. B. beta-Glucan und Arabinoxylan, werden durch die Cytolyse während der Mälzung und durch die Maischarbeit beeinflusst. Ihre Trübungsneigung wird als eher gering eingeschätzt [32]. Darüber hinaus werden auch verlinkte Moleküle aus verschiedenen Stoffgruppen, wie z. B. Amylose-Lipidkomplexe [33], mit Trübung in Zusammenhang gebracht. Eine weitere Bedeutung kommt Calciumionen zu, die z. T. fällend auf Proteine wirken und damit eine Vergrößerung der Partikeln fördern oder mit Oxalsäure aus dem Malz Calciumoxalatkristalle bilden können, welche aber aufgrund ihrer Größe sehr schnell sedimentieren und Bodensatz bilden. Gleichzeitig fördert ausgefälltes Calciumoxalat in Flaschenbieren das Gushingpotenzial.

Die meisten Untersuchungen handeln von Trübungen in untergärigen Bieren, die bei der Filtration nicht beseitigt werden konnten oder erst durch Alterung nach der Abfüllung entstanden sind. Für Weizenbiere gilt jedoch, dass die Trübung bereits bei der Auslieferung der Biere deutlich wahrnehmbar sein muss, was impliziert, dass auch ausreichend viele trübende Teilchen vorhanden sind, und dass diese Trübung im Optimalfall bis zum Ablauf der Mindesthaltbarkeit dispergiert im Fass oder in der Flasche bestehen bleibt.

2.3 Technologische Maßnahmen zur Verbesserung der Trübungsstabilität

Die Herstellungsvariationen von deutschen Weizenbieren sind sehr vielfältig [2, 6]. Neben dem Einsatz von Weizenmalz und obergäriger Hefe unterscheidet sich Weizenbier in der Herstellung auch deutlich in der Temperaturführung von untergärigen Bieren durch eine wärmere Hauptgärung und eine kürzere Kaltlagerung, die meist weniger als eine Woche dauert und eine Temperatur von 4 °C nicht unterschritten wird. Bei untergärigen Bieren, welche vor der Abfüllung filtriert werden, ist eine längere kalte Lagerung sinnvoll, um durch natürliche Sedimentation einen Großteil der Hefe und Trübstoffe in Form von Feststoffen und Kältetrübung abzuscheiden und dadurch den Aufwand an Filterhilfsmitteln gering zu halten. Bei Weizenbieren ist ebenfalls das Absetzen eines Großteils der Hefe erwünscht was jedoch keiner Kaltlagerung bedarf. In der Regel wird die Hefekonzentration im Bier entweder durch den Einsatz eines Separators geregelt oder man führt eine teilweise Abtrennung der Hefe durch eine grobe Filtration durch.

Eine lange und intensive Kaltlagerung wird demnach eine Redzierung der Trübung zur Folge haben. Eine Kaltlagerung ist bei Weizenbier insbesondere zur Ausfällung von Calciumoxalat als Gushingauslöser von Bedeutung, was bei Temperaturen $< 8\text{ °C}$ erfolgt.

Positiv auf die Trübungsstabilität wirkte sich in den Untersuchungen von BRANDL [34] eine Kurzzeiterhitzung vor der Abfüllung aus, wodurch eine zusätzliche Koagulation von „Feinsteiweiß“ hervorgerufen wird. Bei der Kurzzeiterhitzung sollte eine Mindesttemperatur von $74\text{--}76\text{ °C}$ erreicht werden und der noch koagulierbare Stickstoff nach der Gärung $> 3\text{ mg}/100\text{ ml}$ betragen, wodurch auch die Würzekochung und die Proteinzusammensetzung des Malzes einen Einfluss auf die Trübungsstabilität haben dürften.

2.4 Einteilung disperser Systeme

In der Verfahrenstechnik können Partikelsuspensionen nach der Größe der enthaltenen Partikel klassifiziert werden [35]:

- Molekulardisperse Systeme für Dispersionen mit Partikeln $< 1\text{ nm}$
- Kolloiddisperse Systeme für Dispersionen mit Partikeln von $1\text{ nm}\text{--}1\text{ }\mu\text{m}$
- Grobdisperse Systeme mit Partikeln $> 1\text{ }\mu\text{m}$.

Darüber hinaus werden disperse Stoffsysteme auch nach

- ihrer chemischen Zusammensetzung,
- den Wechselwirkungen an den Phasengrenzen und
- der Beschreibung der dispersen Struktur unterschieden.

Da in Weizenbier Teilchengrößen aller drei Klassen vorkommen [36] und die Weizenbiermatrix eine Vielzahl an Substanzen mit unterschiedlichen chemisch-physikalischen Eigenschaften aufweist [37], ist eine eindeutige Zuordnung aus verfahrenstechnischer Sicht nicht möglich.

2.5. Kraftwirkungen in dispersen Systemen

Die Stabilität disperser Systeme wird maßgeblich durch wirkende physikalische und thermodynamische Kräfte beeinflusst [38]. Dabei sind sowohl von außen wirkende Kräfte als auch Kräfte, welche die dispergierten Partikeln selber aufeinander ausüben, gleichermaßen von Bedeutung.

Die Bierbereitung erfordert eine Vielzahl von Prozessschritten, die aus verfahrenstechnischer Sicht in thermische (Würzekochung, Pasteurisation des fertigen Bieres etc.), physikalische (Läutern, Heißtrubabscheidung im Whirpool etc.) und biokatalytische (Maischen, Gärung etc.) Prozesse unterschieden werden können. Durch jeden Prozessschritt wird eine tiefgreifende Veränderung der stofflichen Zusammensetzung hervorgerufen, so dass die Intermediärprodukte der Bierbereitung sich deutlich voneinander unterscheiden. Allgemein ist durch die Vielzahl der enthaltenen Stoffe, welche sehr unterschiedliche physiko-chemische Eigenschaften besitzen, eine vollständige Beschreibung der thermodynamischen irreversiblen Prozesse in solchen Biosystemen nicht möglich [39].

Die Darstellung der wichtigsten Kraftwirkungen orientiert sich am Lehrbuch von G. BREZESINKI [38].

2.5.1 Diffusion

Diffusion tritt insbesondere dann auf, wenn in einem betrachteten System nicht an allen Orten die gleiche Konzentration eines ausgewählten Stoffes vorliegt. Treibende Kraft ist die BROWNSCHE Molekularbewegung des Dispersionsmittels, die eine räumliche Umverteilung der diffundierenden Teilchen bewirkt. Der Diffusionsprozess kann durch das 1. FICKSCHE Gesetz mit

$$j_i = -D \frac{d}{dx} c_i \quad (\text{Formel 1.1})$$

beschrieben werden. Der Diffusions- bzw. Teilchenstrom $j_i = (1/A)dn_i/dt$ ist gleich der Menge (Molzahl n) des diffundierenden Stoffes pro Zeit t , welche über eine Fläche A in das Dispersionmittel übergeht, und verändert sich über die Entfernung x zur Grenzschicht und der herrschenden Konzentration $c_i(x)$. Der Diffusionskoeffizient $D = k_B T f_R$ ist eine Materialgröße und charakterisiert den Übergang des diffundierenden Stoffes in das angrenzende Dispersionsmittel (k_B = BOLTZMANN-Konstante, T = Temperatur, f_R = STOKES-Reibung). Unter der Annahme, dass die diffundierenden Teilchen kugelförmig sind, gilt

$$f_R = \frac{1}{6r\eta\pi}, \quad (\text{Formel 1.2})$$

mit r = Radius des diffundierenden Teilchens und η = dynamische Viskosität des Dispersionsmittels. Somit wird deutlich, dass die Diffusion wesentlich durch die Temperatur beeinflusst wird.

2.5.2 Gravitation

Das Absinken und Absetzen dispergierter Teilchen wird im Wesentlichen durch die Gravitationskraft hervorgerufen. Die Sedimentationsgeschwindigkeit u ergibt sich aus dem Gleichgewicht von Gravitationskraft F_G und der STOKES-Reibungskraft F_R .

$$F_G = mg = 6 \pi \eta r u = F_R \quad (\text{Formel 1.3})$$

Für den idealen Fall eines einzelnen kugelförmigen Teilchens ist die Sinkgeschwindigkeit

$$u = \frac{gr^2(\rho_D - \rho_T)}{18\eta} \quad (\text{Formel 1.4})$$

mit der Erdbeschleunigung g , dem Radius r , ρ_D die Dichte des Dispersionsfluids und ρ_T die Dichte des Teilchens. Die Partikelgröße bzw. der Partikeldurchmesser hat somit den größten Einfluss auf die Sinkgeschwindigkeit u , da $u \sim r^2$ ist. Mit abnehmender Partikelgröße und damit verminderter Sinkgeschwindigkeit steigt der Einfluss der BROWNSCHEN Molekularbewegung mit der Folge, dass die Sinkgeschwindigkeit $\rightarrow 0$ geht und die Diffusion überwiegt. Der Zelldurchmesser der in der Brauindustrie eingesetzten Kulturhefen ist in der Regel $> 2 \mu\text{m}$, mit einem mittleren Durchmesser von $5\text{--}7 \mu\text{m}$. Aus der Erkenntnis, dass Hefezellen aufgrund ihrer Sinkgeschwindigkeit keine dauerhafte Trübung erzeugen können und z. B. in Flaschenweizenbier bereits nach 2 Wochen vollständig sedimentiert sind, kann gefolgert werden, dass trübungsrelevante Partikeln eine geringere Größe aufweisen müssen. WEIKL [40] ermittelte einen Partikelgrenzdurchmesser von $\leq 1 \mu\text{m}$ für Trübungspartikeln in Weizenbier. Die Untersuchungen wurden in stark verdünnten Weizenbieren durchgeführt, um Partikelwechselwirkungen weitgehend auszuschließen.

2.5.3 Attraktive (anziehende) Kräfte

Die elektrostatische Anziehung zwischen positiv und negativ geladenen Teilchen (COULOMB-Wechselwirkung) hat den energetisch größten Effekt und führt durch eine Überkompensation der repulsiven Kräfte zur sofortigen Koagulation.

Die attraktive Wirkung der VAN-DER-WAALS-Kraft ist in allen Systemen präsent. Als Ursache für die Anziehung wird von HEITLER und LONDON [41] eine Fluktuation in der Ladungsverteilung der Elektronenhülle der (physikalisch neutralen) Moleküle beschrieben, wodurch Dipole induziert werden. Durch die Dipol-Struktur werden attraktive Wechselwirkungen zwischen benachbarten Molekülen erzeugt (LONDON-Wechselwirkungsenergie e_{da}). Die Wechselwirkungsenergie e_{da} für zwei kugelförmige Teilchen mit den Radien r_{T1} , r_{T2} und dem Abstand z lässt sich wie folgt berechnen:

$$e_{da} = \frac{H_k r_{T1} r_{T2}}{6z(r_{T1} + r_{T2})}, \quad (\text{Formel 1.5})$$

wobei

$$H_h = \pi^2 \rho_{NT1} \rho_{NT2} C_H \quad (\text{Formel 1.6})$$

als HAMAKER-Konstante bezeichnet wird. ρ_{NT1} und ρ_{NT2} geben die Zahl der Atome oder Moleküle pro Volumeneinheit der Feststoffteilchen (Moleküldichte ρ_N) $T1$ und $T2$ an. C_H erfasst die chemischen Eigenschaften der unterschiedlichen Atom-/Molekülsorten, aus der ein Teilchen zusammengesetzt ist. H_k wird experimentell bestimmt.

Die Adsorption von Stoffen spielt in vielen Bereichen der (Bio-)Verfahrenstechnik eine wichtige Rolle und basiert im Wesentlichen auf der Anlagerung funktioneller Gruppen der Teilchen an Festkörpern. In der Brauereitechnologie wird z. B. die adsorptive Eigenschaft von Polyvinyl-Polypyrrolidon (PVPP) genutzt, um Polyphenole aus Würze und Bier zu entfernen [14, 42]. Darüber hinaus sind auch Mikroorganismen, wie z. B. Hefen, in der Lage, Stoffe zu adsorbieren [43, 44]. Die Anlagerung geschieht exotherm [45] und kann physikalischer (Physisorption)

und/oder chemischer (Chemisorption) Art sein.

2.5.4 Repulsive (abstoßende) Kräfte

Die elektrostatische Abstoßung (COULOMB-Abstoßung) gleichnamig geladener Teilchen ist meist größer als die anziehend wirkende VAN-DER-WAALS-Kraft und wirkt dieser entgegen. Dieser Effekt kann prinzipiell künstlich herbeigeführt werden, um kolloidale Systeme zu stabilisieren [46]. Bei der sogenannten Ladungsstabilisierung wird in ein polares Lösungsmittel ein Ionenstarter eingebracht, welcher auf der Teilchenoberfläche eine ionische Kettenreaktion auslöst. Dabei adsorbieren die Teilchen eine Ionensorte und bilden gleichnamige Macroionen, wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist.

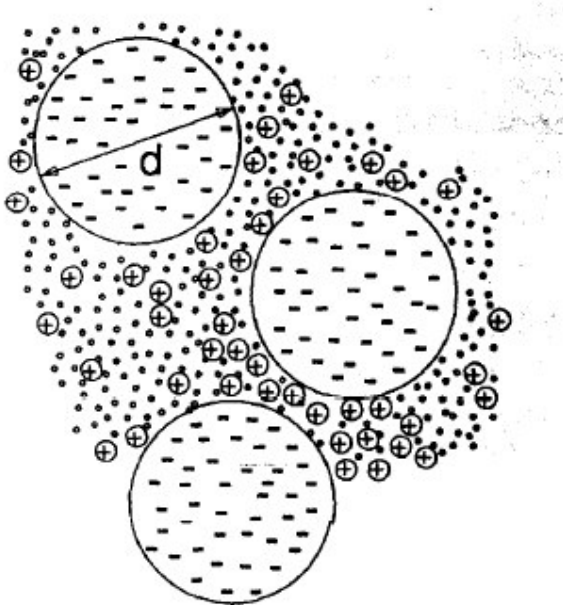


Abbildung 2.1: Prinzip der Ladungsstabilisierung [46]

Die BORNSCHE Abstoßung bezeichnet eine durch die Molekülstruktur bedingte mechanische Behinderung der Anlagerung von verschiedenen Molekülen aneinander oder an Oberflächen. Obwohl die attraktiven Kräfte überwiegen, kommt es nicht zu einer Verbrückung der funktionellen Gruppen und damit nicht zur vollständigen Koagulation.

Eine weitere repulsive Kraftwirkung tritt bei der direkten Aneinanderlagerung von Teilchen durch adsorbierte Moleküle des Dispersionsmittels auf. Insbesondere

Moleküle mit polaren Atomgruppen (z. B. Proteine) können an diesen funktionellen Gruppen Wassermoleküle, aber auch andere polare Moleküle wie Alkohole, adsorbieren [47]. Die adsorbierten Wassermoleküle weisen ein niedrigeres Energieniveau auf als die freien Wassermoleküle im Lösungsmittel. Bei der Aggregatsbildung zwischen zwei Teilchen muss das adsorbierte Wassermolekül desorbiert werden, wofür Energie aufgewendet werden muss [48].

Eine weitere Möglichkeit zur Behinderung der Koagulation bzw. Förderung der gegenseitigen Abstoßung der Partikeln ist die sterische Stabilisierung. Bei der sterischen Stabilisierung werden an der Partikeloberfläche Moleküle bzw. Polymere adsorbiert. Bei der Überlappung der in das Dispersionsmittel ragenden Polymere kommt es zur Behinderung der freien Bewegung, eine Abnahme der Entropie ist die Folge. Die entropische Abstoßung bzw. sterische Stabilisierung gilt nur für kleine Teilchen, da die entropische Abstoßung sehr viel kleiner als die VAN-DER-WAALS-Kraft ist. Abbildung 2.2 zeigt schematisch das Prinzip der sterischen Stabilisierung.

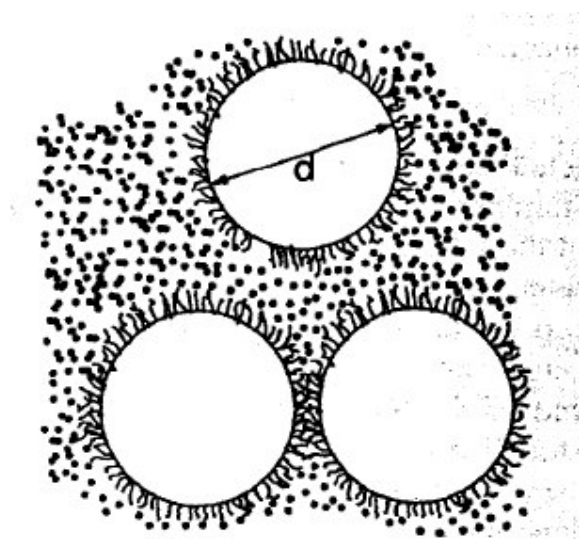


Abbildung 2.2: Polymerbasierte sterische Stabilisierung [46]

Ein Beispiel für eine sterische Stabilisierung ist in naturtrüben Apfelsäften zu beobachten. Pektin wird an der Oberfläche der Fruchtsaftpartikeln adsorbiert wodurch die Agglomeration der Partikeln blockiert wird [49].

Die Ursachen für die Entstehung elektrischer Ladungen auf der Oberfläche von Partikeln sind vielseitig. Zu ihnen zählen unter anderem Defekte, verursacht durch

substituierte Ionen, die Adsorption von Ionen an der Oberfläche oder auch Säure-Base-Reaktionen [50]. Die Adsorption von Ladungen an der Partikeloberfläche führt meist zur Ausbildung einer elektrochemischen Doppelschicht.

Die an der Partikeloberfläche adsorbierten Ladungen bilden die sogenannte innere HELMHOLTZ-Schicht und ziehen entgegen geladene Ionen aus der Dispersion an, welche dann die äußere HELMHOLTZ-Schicht bilden. Innere und äußere Helmholtz-Schicht bilden eine immobile Adsorptionsschicht, die sogenannte STERN-Schicht [51]. Über die immobile STERN-Schicht hinaus werden weiter mehrheitlich der Partikeloberfläche entgegen geladene Ionen adsorbiert, die den diffusen Teil der elektrochemischen Doppelschicht bilden. Das Potenzial im diffusen Teil der elektrochemischen Doppelschicht nimmt exponentiell mit dem Abstand d von der Partikeloberfläche bis zur Ionenkonzentration des Lösungsmittels ab, so dass das Potenzial $\rightarrow 0$ geht und in einem ausreichenden Abstand die Partikel neutral erscheint. Kommt es zur Überlagerung der diffusen Doppelschichten zweier gleichnamig geladener Partikeln, resultiert daraus eine repulsive Kraft, welche mit abnehmendem Abstand der Partikeln größer wird. Abbildung 2.3 zeigt eine idealisierte Darstellung der elektrochemischen Doppelschicht.

Da die Partikeln durch wirkende Kräfte, wie z. B. die BROWNSCHE Molekularbewegung, ständig in Bewegung sind, kommt es zu einer teilweisen Abscherung des diffusen Teils der elektrochemischen Doppelschicht, wodurch die Partikel nicht mehr neutral ist, sondern in der Scherebene ein Potenzial aufweist (Abbildung 2.3). Dieses Potenzial wird als Zetapotenzial bezeichnet und kann durch die Messung der elektropheretischen Mobilität bestimmt werden [52]. Das Zetapotenzial sinkt mit steigender Elektrolytkonzentration und Wertigkeit der Ionen im Lösungsmittel und ist damit auch vom pH-Wert des Lösungsmittels abhängig. Abbildung 2.4 zeigt qualitativ den Einfluss der Elektrolytkonzentration auf das Zetapotenzial, Abbildung 2.5 den Einfluss des pH-Wertes auf SiO_2 -Partikeln.

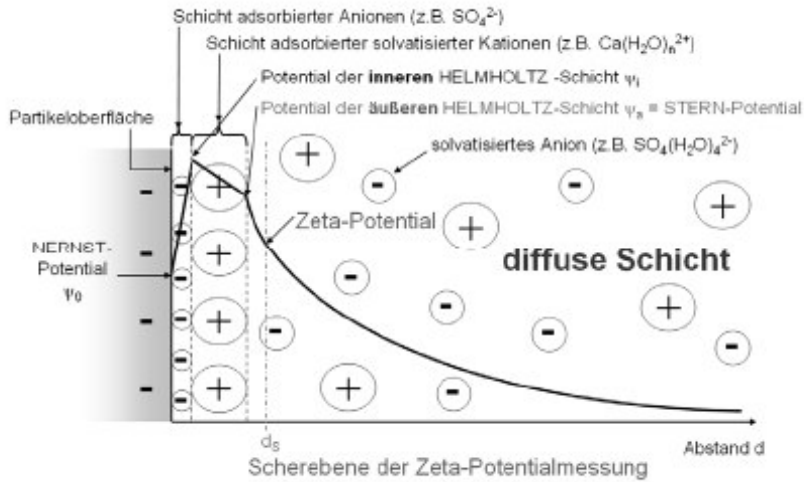


Abbildung 2.3: Darstellung des Modells der elektrochemischen Doppelschicht an der Oberfläche eines negativ geladenen Partikels [53]

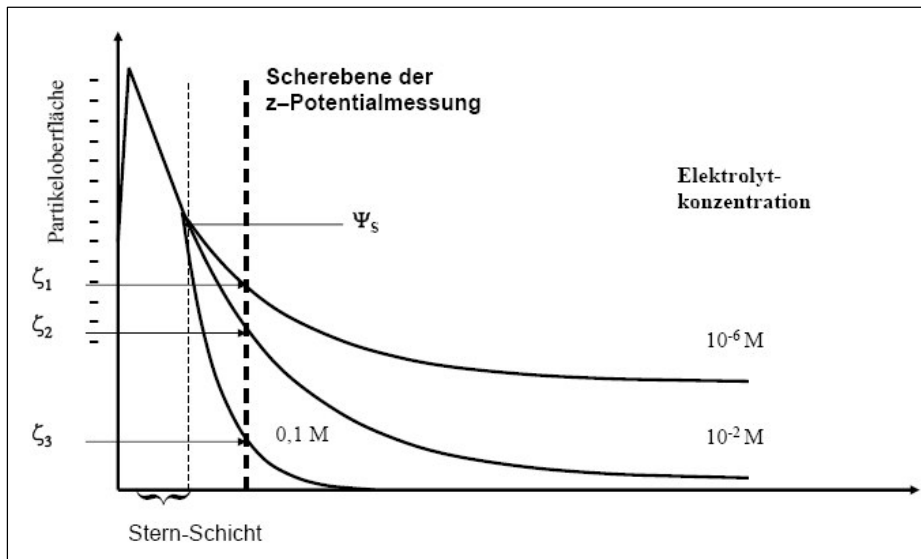


Abbildung 2.4: Einfluss der Elektrolytkonzentration auf das Zetapotenzial [53]

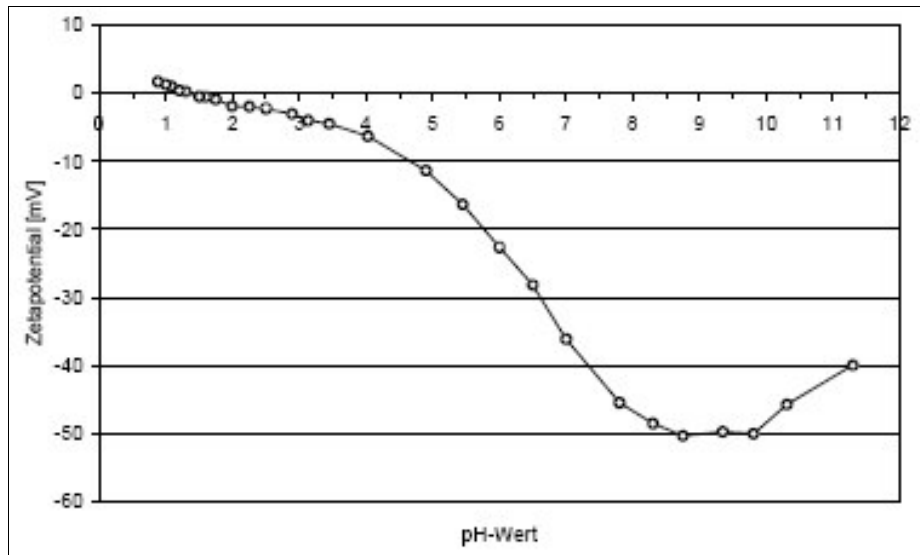


Abbildung 2.5: Einfluss des pH-Wertes auf das Zetapotenzial, dargestellt als Beispiel mit SiO_2 -Partikeln [53]

2.5.5 Stabilität kolloidaler Systeme (DLVO-Theorie)

Die Stabilität kolloidaler Systeme wird im Wesentlichen durch das Verhältnis anziehender und abstoßender Kräfte bestimmt. Grundlegende Überlegungen wurden unabhängig voneinander von DERJAGUIN und LANDAU sowie von VERWEY und OVERBECK (DLVO) gemacht, die nur unter Berücksichtigung der VAN-DER-WAALS-Kraft und der elektrostatischen Abstoßung theoretische Modellrechnungen zur Stabilität von Dispersionen erstellten. Abbildung 2.6 zeigt eine erweiterte Darstellung der Gesamtwechselwirkungsenergie in einer Dispersion in Abhängigkeit des Abstandes zweier Partikeln, unter zusätzlicher Berücksichtigung der BORNSCHE Abstoßung. Für einen sehr großen Abstand wird sowohl die Anziehung als auch die Abstoßung minimal und die Gesamtwechselwirkung $V_T \rightarrow 0$. Kommt es jedoch zur Annäherung der Teilchen, kann es zu einer ersten, jedoch reversiblen Aggregation der Teilchen kommen („sekundäres Minimum“), welche bei weiterer Annäherung durch die aus der Überschneidung der elektrochemischen Doppelschichten resultierenden repulsiven Kraft wieder aufgelöst wird. Bei weiterer Annäherung der Teilchen wird in V_m eine maximale Stabilität der Dispersion erreicht, wenn die Potenziale der elektrochemischen Doppelschichten ausreichend hoch sind. Verkürzt sich der Abstand weiter, kommt es im „primären Minimum“ zur weitgehenden Koagulation, welcher nur noch die BORNSCHE Abstoßung

entgegenwirkt. Die DLVO-Theorie ist meist nur für Lösungen mit geringen Salzkonzentrationen [54, 55] und für Dispersionen mit einem Volumenanteil bis 0,5 % [49] anwendbar.

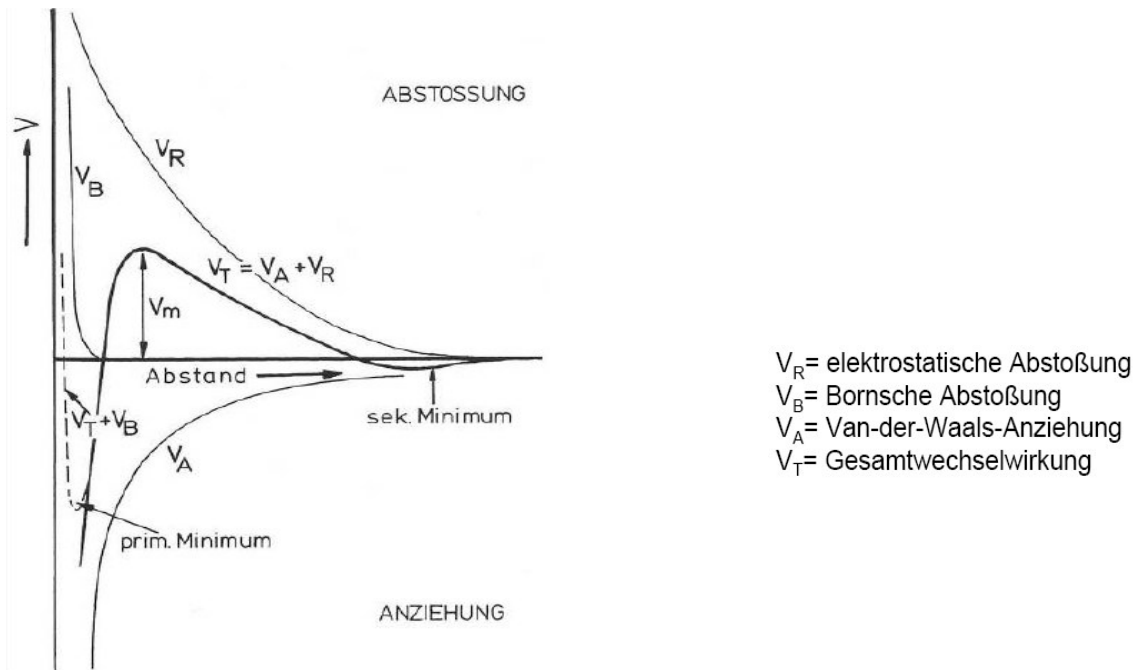


Abbildung 2.6: Darstellung der Gesamtwechselwirkungsenergie zweier Partikeln in einer Dispersion [53]

Die Ergebnisse von KÜHBECK [56] zur Veränderung der Partikelgrößenverteilung der Würze im Bierbereitungsprozess und die Zusammensetzung an anorganischen Substanzen in Tabelle 2.2 lassen schlussfolgern, dass in Würze die DLVO-Theorie aufgrund der deutlich höheren Konzentrationen an Partikeln und Salzen nicht angewendet werden kann.

Tabelle 2.2: Konzentrationen anorganischer Verbindungen in einer 12 °P Würze [57]

Nährstoff	Konzentration in Würze [mg/l]
Kalium	550
Natrium	30
Calcium	35
Magnesium	100
Kupfer	0,1
Eisen	0,1
Mangan	0,15
Zink	0,15
Schwefel	90
Phosphat	575

Die Stabilität von Dispersionen wird nach der SCHULZE-HARDY-Regel durch die Konzentration der Teilchen und insbesondere durch die Elektrolytausstattung des Lösungsmittels beeinflusst. Mit steigender Wertigkeit z der Elektrolyte im Lösungsmittel wird die koagulierende Wirkung erhöht (Herabsetzung des Zetapotenzials) bzw. die kritische Koagulationskonzentration ccc der Dispersion um den Faktor $1/z^6$ erniedrigt ($ccc \sim 1/z^6$). In der Bierbereitung werden aus diesem Grund vorzugsweise Calciumsalze aufgrund der zweiwertigen Calciumionen eingesetzt, um z. B. während der Würzekochung die Bruchbildung zu verbessern [1] und eine ausreichende Ausfällung von Calciumoxalat während der Gärung und Lagerung zu erreichen [57]. In Abbildung 2.7 ist als Beispiel für die koagulierende Wirkung von Ionen der Einfluss verschiedener KCl-Konzentrationen auf die Trübung von Apfelsaft dargestellt. KCl wirkt als Fällungsmittel und fördert die Koagulation der Trubpartikeln durch die Herabsetzung des Zetapotenzials, wie in Abbildung 2.8 graphisch dargestellt. Die Veränderung der Partikelgröße hat eine erhöhte Sedimentationsgeschwindigkeit zur Folge; die gröberen Partikeln setzen sich ab, wodurch auch die Trübung abnimmt.

Zur Berechnung des Koagulations- bzw. Kristallisationsverhaltens von Protein- und Polymerlösungen (reelle Lösungen) unter Berücksichtigung des pH-Werts, der Elektrolytkonzentration, der Elektrolytwertigkeit und der Temperatur wird der 2. osmotische Virialkoeffizient (B_{22}) bestimmt [58-62]. Der 2. osmotische Virialkoeffizient beschreibt die Abweichung vom idealen Verhalten des osmotischen Drucks aufgrund von Wechselwirkungen zwischen den Molekülen und stellt damit einen Korrekturfaktor zum theoretischen Wert des osmotischen Drucks einer Lösung dar. Wenn B_{22} bekannt ist, kann der reelle osmotische Druck einer Lösung vor allem in Abhängigkeit der Konzentration (z. B. der Proteinkonzentration) bestimmt werden. Für positive Werte von B_{22} dominieren repulsive Wechselwirkungen, und umgekehrt [61]. Während die Bestimmung des reellen osmotischen Drucks z. B. indirekt über eine Gefrierpunktmessung möglich ist, dürfte die Bestimmung des 2. osmotischen Virialkoeffizienten in Würze und Bier aufgrund der Vielzahl an Inhaltsstoffen und damit verbundenen Wechselwirkungen schwierig sein.

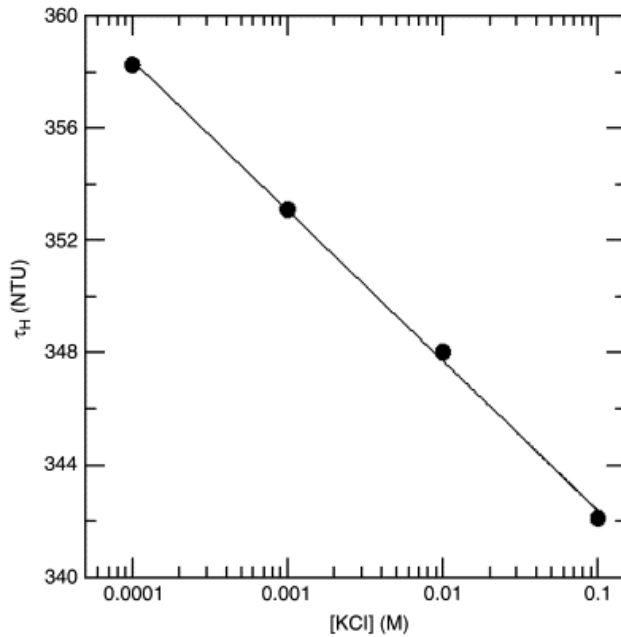


Abbildung 2.7: Einfluss verschiedener KCl-Konzentrationen auf die Trübung von Apfelsaft [49]

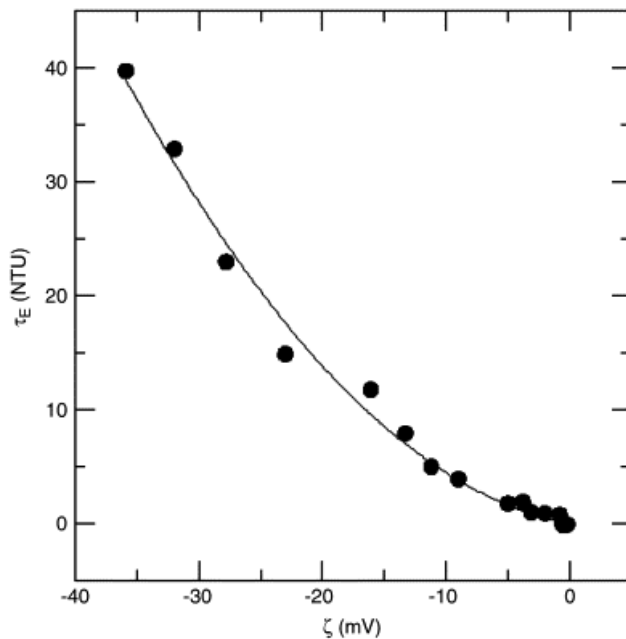


Abbildung 2.8: Zusammenhang zwischen Zetapotenzial und Trübung in Apfelsaft [49]

2.6 Einflussfaktoren auf die Sedimentation von Dispersionen

Die Berechnung der Sedimentationsgeschwindigkeit nach STOKES (Formel 1.4) gilt nur unter bestimmten Voraussetzungen, wie laminare Strömungsverhältnisse (Reynoldszahl $< 0,25$), keine Partikel- und sonstige Wechselwirkungen und

entsprechend nur für sehr niedrige Partikelkonzentrationen $< 1\% \text{vol}$ [35, 54]. Ist eine dieser Voraussetzungen nicht erfüllt, kann das Sedimentationsverhalten meist nur experimentell bestimmt werden. Die experimentelle Bestimmung des Sedimentationsverhaltens kann z. B. durch eine Sedimentationsanalyse (Sedimentationswaage), optisch [35] und auch durch analytische Zentrifugation [63] erfolgen.

Zur Charakterisierung der Sedimentation wird in der Regel die Geschwindigkeit des Trennspiegels zwischen klarer Flüssigkeit und sedimentierenden Partikeln in Abhängigkeit der Feststoffkonzentration bestimmt [64]. Dabei kann nicht von der Trennspiegelgeschwindigkeit auf die Sedimentationsgeschwindigkeit der Partikeln im Inneren der Suspension geschlossen werden. Je nach Konzentration und mono- oder polydispenser Größenverteilung der Partikeln ergeben sich unterschiedliche Absetzverhalten.

2.6.1 Sedimentationsverhalten monodisperser Partikelsuspensionen

Das Sedimentationsverhalten in monodispersen Partikelsuspensionen ist von der Feststoffkonzentration abhängig [35] und wurde von BICKERT und STAHL [64] sehr anschaulich dargestellt. In Abbildung 2.9 ist der Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Trennspiegelgeschwindigkeit U_T und auf die mittlere Partikelsinkgeschwindigkeit U_m in der Suspension in Bezug zur STOKESschen Einzelpartikelsinkgeschwindigkeit U_{St} für monodisperse SiO_2 -Partikeln als Modellpartikeln mit einem Durchmesser von $1\ \mu\text{m}$ dargestellt.

Bereits für niedrige Feststoffkonzentrationen von $100\ \text{ppm}$ ($C_V = 10^{-4}$) zeigt sich eine Erhöhung der mittleren Partikelsinkgeschwindigkeit U_m gegenüber U_{St} , die durch die gegenseitige Abstoßung der Partikeln verursacht wird. Bezogen auf Weizenbier unter Vernachlässigung sonstiger Feststoffe und Kolloide würde dies bei einem durchschnittlichen Hefezellendurchmesser von $5\ \mu\text{m}$ einer Hefezellzahlkonzentration von ca. 1,5 Mio. Zellen/ml entsprechen. Mit weiter steigender Feststoffkonzentration kehrt sich dieser Effekt um, und die die Sedimentation behindernden Einflüsse überwiegen. Bei noch stärkerer Abstoßung der Partikel (z. B. durch sterische Stabilisierung), würde U_m bereits bei niedrigeren Konzentrationen den Wert von U_{St} unterschreiten ($U_m/U_{St} < 1$). Die Trennspiegelsinkgeschwindigkeit U_T wird dagegen bei geringerer Feststoffkonzentration kaum beeinflusst. Erst mit zunehmender Feststoffkonzentration und damit steigender gegenseitiger Abstoßung der Partikeln

wird U_T verlangsamt. Der experimentell ermittelte Verlauf der Trennspiegelgeschwindigkeit in Abhängigkeit von C_V zeigte eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen von EKDAWI und HUNTER [65].

VESARATCHANON et al. [66] untersuchten die Sedimentationseigenschaften von monodispersen Latexpartikelsuspensionen (0,5, 0,8 und 1 μm) in Abhängigkeit der Feststoffkonzentration nach der KOSSEL-Lichtbeugungsmethode [67], mit vergleichbaren Ergebnisse zu BICKERT und STAHL, dargestellt in Abbildung 2.10. Die durchgehenden Graphen 1, 2 und 3 stellen in Abbildung 2.10 die durch Simulation ermittelten Sinkgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Volumenbruchs Φ an Partikeln dar, die einzelnen Punkte zeigen die experimentell ermittelten Sinkgeschwindigkeiten für bestimmte Partikelvolumenanteile und Partikelgrößen.

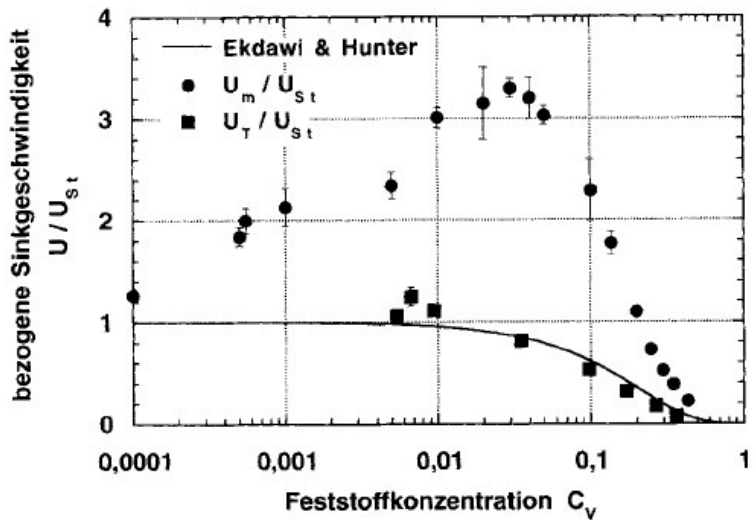


Abbildung 2.9: Einfluss der Feststoffkonzentration auf die Trennspiegelgeschwindigkeit und auf die Sinkgeschwindigkeit für monodisperse Partikeln [64]

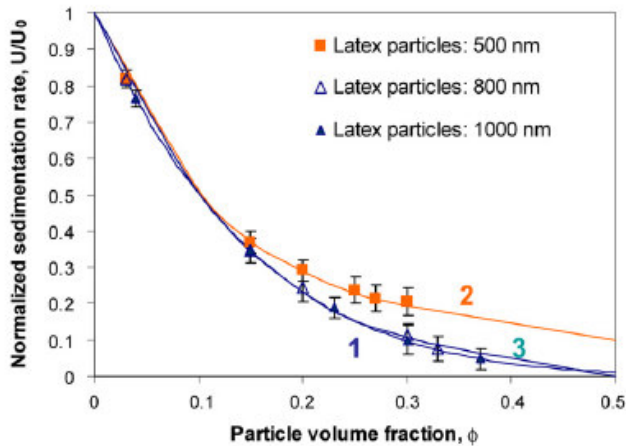


Abbildung 2.10: Einfluss der Volumenkonzentration Φ auf die Sedimentationsgeschwindigkeit monodisperser Partikelsuspensionen [67]

2.6.2 Sedimentationsverhalten polydisperser Partikelsuspensionen

In monodispersen Suspensionen kann es zur Agglomeration bzw. Flockenbildung (Flockung) kommen, woraus i. d. R. eine polydisperse Verteilung resultiert, deren Sedimentationsverhalten nur experimentell bestimmt werden kann [35]. Wie auch für monodisperse Suspensionen wird das Sedimentationsverhalten polydisperser Partikeln durch die Feststoffkonzentration beeinflusst. Für eine Suspension mit einer bimodalen Verteilung mit $0,25 \mu\text{m}$ und $1 \mu\text{m}$ großen SiO_2 -Partikeln wurde festgestellt, dass die Anwesenheit der kleinen Partikeln die Sedimentation der größeren Partikeln durch eine höhere Suspensionsdichte und Suspensionsviskosität beeinträchtigen [64]. Große Partikeln erhöhen bei geringen Anteilen die Sedimentation der kleinen Partikeln, während mit steigendem Anteil und steigender Gesamtkonzentration der von den großen Partikeln bewirkte Fluidgegenstrom die absolute Sinkgeschwindigkeit der kleinen Partikeln verlangsamt und sogar umkehrt. Hohe Feststoffanteile großer Partikeln führen zu einer entgegengesetzten Bewegung der feinen Teilchen; sie werden während der gemeinsamen Sedimentation aufgeschwemmt.

In stark geflockten Dispersionen sedimentieren alle Partikeln im Verbund mit einheitlicher Sedimentationsgeschwindigkeit (Zonensedimentation durch dominante attraktive Wechselwirkungen) [63].

Partikelmessungen in Weizenbier haben gezeigt, dass eine trimodale Verteilung mit teilweise geflockten bzw. agglomerierten Hefezellen vorliegt [68]. Abbildung 2.11

zeigt die Partikelgrößenverteilung von unfiltriertem Weizenbier in einem Temperaturbereich von 11 °C bis 21 °C. Alle Kurven weisen drei Maxima auf:

- 1. Maximum im Bereich 2 µm
- 2. Maximum bei ca. 6–7 µm
- 3. Maximum bei 14 µm.

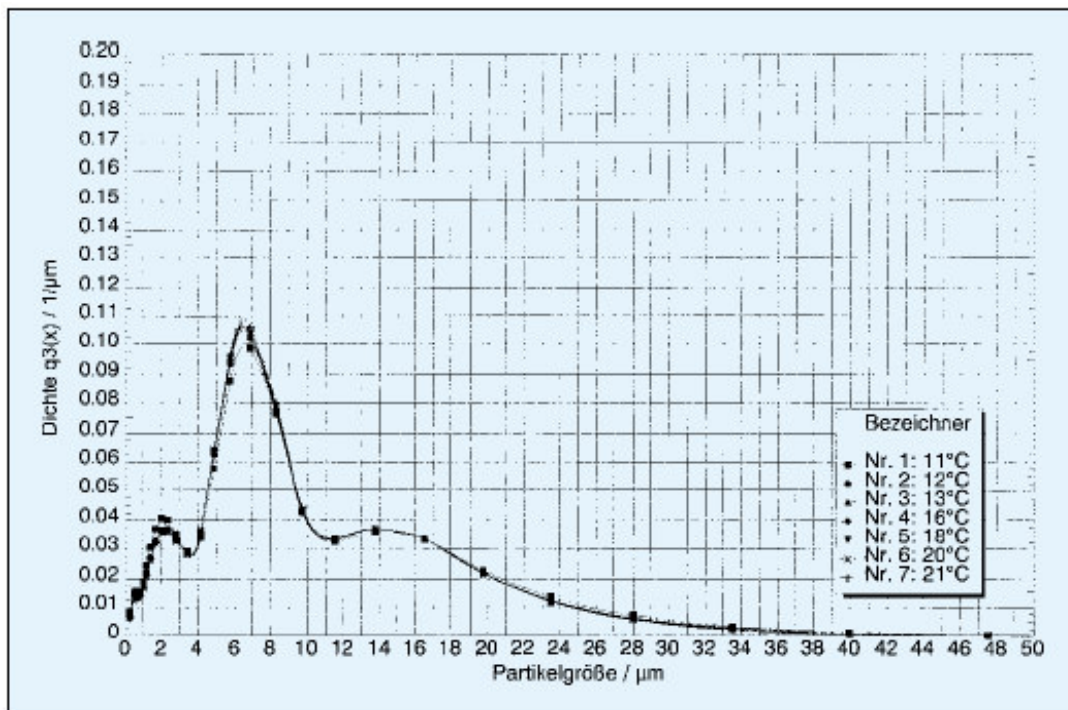


Abbildung 2.11: Partikelgrößenverteilungen in einem unfiltrierten Weizenbier, gemessen bei Temperaturen von 11 bis 21 °C [68]

Das 1. Maximum wird durch Kolloide verursacht, das 2. Maximum von einzelnen Hefezellen. Maximum 3 im Bereich von 14 µm wird durch agglomerierte Hefezellen bzw. durch die für obergärige Hefen (*Saccharomyces cerevisiae*) typischen Zellsprossverbände hervorgerufen. Da sich die Partikelgrößenverteilungen im Bereich von 11 °C bis 21 °C kaum unterscheiden, scheint die kälteinduzierte Partikelbildung (Kältetrübung), die insbesondere die Bildung von Partikeln mit einer Größe von 0,1 µm bis 1 µm verursacht [25], eine untergeordnete Rolle in Bezug auf die Gesamtpartikelmenge zu haben. Nach den Ergebnissen von WEIKL [40] ist jedoch die für die Dauertrübung relevante Partikelfraktion im Bereich < 1 µm bereits als Feststoff vorhanden, jedoch in Bezug zur Gesamtpartikelmenge einschließlich der Hefezellen, wie in Abbildung 2.11 zu sehen ist, nur als geringer Anteil.

2.7 Analytische Erfassung und Charakterisierung von Trübungen

2.7.1 Durchlicht- und Streulichtmessung

Die Trübungsmessung kann in die Durchlichtmessung (Turbidimetrie) und der Streulichtmessung (Nephelometrie) unterteilt werden.

Die Durchlicht- oder Extinktionsmessung basiert auf dem LAMBERT-BEER'schen Gesetz und erfasst die Abschwächung eines Lichtstrahls durch eine trübe Suspension, woraus für Suspensionen die Konzentration bzw. Teilchendichte (z. B. Hefezellzahl) berechnet werden kann [35].

Unter Lichtstreuung wird allgemein die Richtungsänderung der Ausbreitung des Lichts verstanden. Die Lichtstreuung kann durch verschiedene Phänomene wie Lichtbeugung, Lichtbrechung und Reflexion hervorgerufen werden [35]. Abbildung 2.12 zeigt die unterschiedlichen Formen der Lichtstreuung.

Die Intensität des gestreuten Lichts ist abhängig von der Partikelgröße, der Wellenlänge und dem Polarisationswinkel des Lichts, dem Betrachtungswinkel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts und der Brechungszahl.

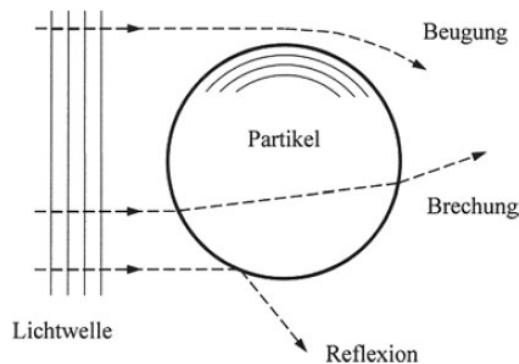


Abbildung 2.12: Lichtstreuung an der Einzelpartikel [35]

Für den Bereich von sichtbarem Licht (um 500 nm) werden die Streubereiche nach der Größe der Partikeln unterschieden:

- RAYLEIGH-Bereich für Partikeln $< 0,02 \mu\text{m}$
- MIE-Bereich für Partikeln von $0,02 \mu\text{m}$ bis $2 \mu\text{m}$
- FRAUNHOFER-Bereich für Partikeln $> 2 \mu\text{m}$.

Die MIE-Theorie liefert die mathematische Grundlage zur Berechnung der Streulichtintensität der drei oben genannten Bereiche in Abhängigkeit der Partikelgröße. Der theoretische Charakter resultiert daraus, dass die Berechnungen auf kugelförmige Körper bezogen sind und dadurch einer Idealisierung unterliegen [69]. Die winkelabhängige Streuintensität ist abhängig von der Partikelgröße und von der Wellenlänge des Lichts und findet Ausdruck im MIE-Parameter x mit

$$x = \frac{\pi d}{\lambda} . \quad (\text{Formel 1.7})$$

Der dimensionslose MIE-Parameter x gibt das Verhältnis der Größe des Partikels (Durchmesser d) zur Lichtwellenlänge λ an und gibt Aufschluss über die winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung, wie in den Abbildungen 2.13 und 2.14 dargestellt [70, 71]. Abbildung 2.15 zeigt konkret die winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung für Partikeln mit einem Durchmesser d von $0,05 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ bei einer Lichtwellenlänge von $\lambda = 550 \text{ nm}$.

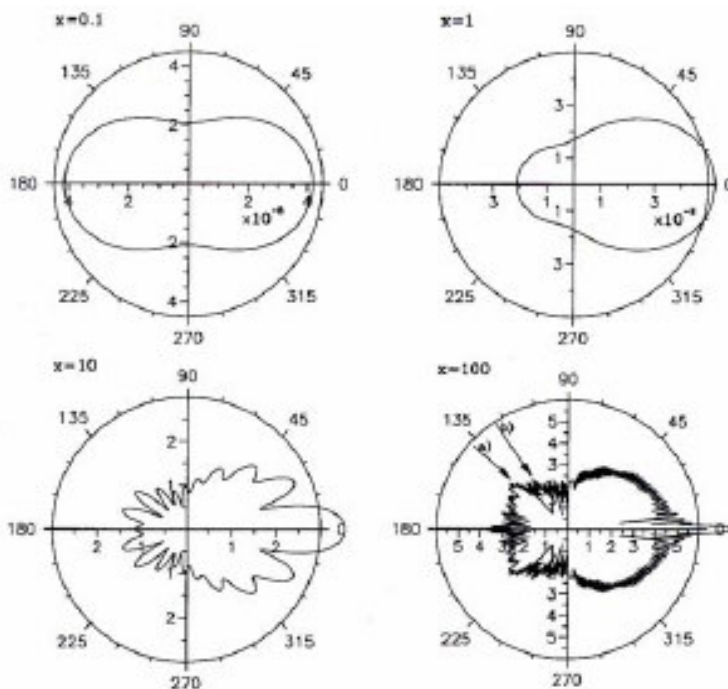


Abbildung 2.13: Winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung für die MIE-Parameter 0,1, 1, 10 und 100 [70]

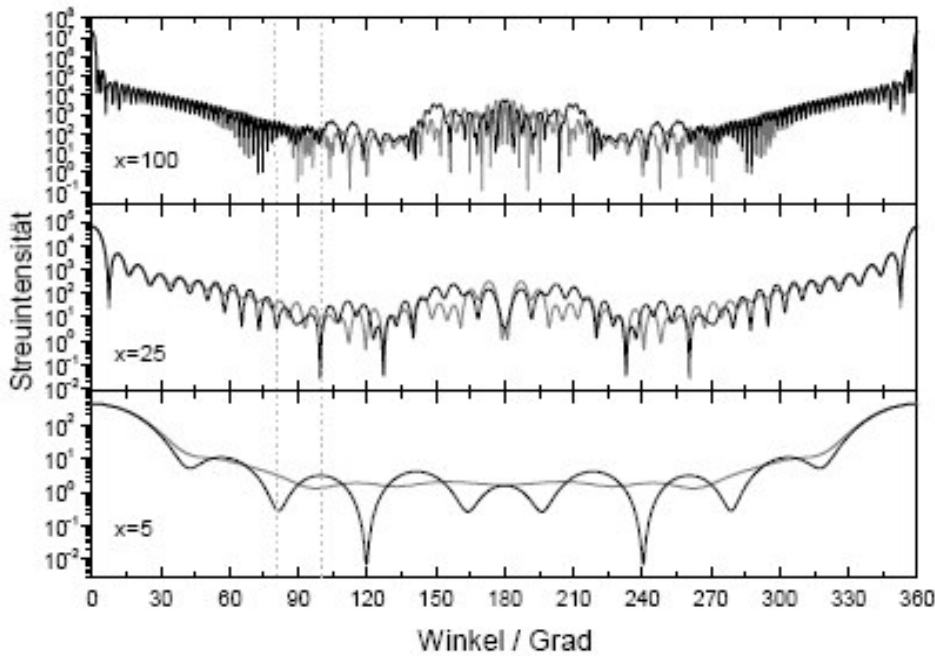


Abbildung 2.14: Winkelabhängige Streulichtintensität für die MIE-Parameter 5, 25 und 100 [71]

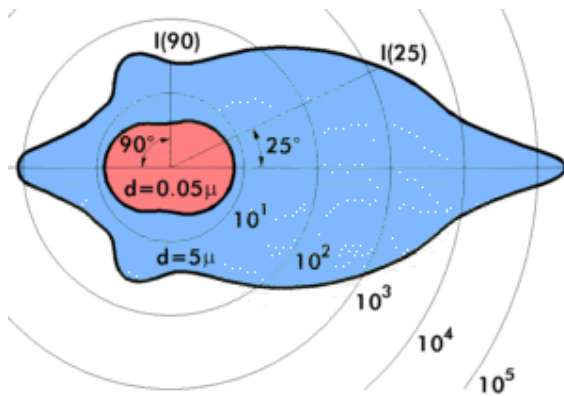


Abbildung 2.15: Winkelabhängige Streulichtintensitätsverteilung (90° und 25°) für Partikelgrößen von $0,05 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ bei einer Lichtwellenlänge $\lambda = 550 \text{ nm}$ [72]

Abbildung 2.15 impliziert auch, dass größere Partikeln eine überproportional größere Streulichtintensität aufweisen. Abbildung 2.16 gibt einen Überblick über den Einfluss der Partikelgröße auf die 90° -Streulichtintensität verschiedener Materialien bei gleicher Partikelanzahl und unterschiedlichen Brechungszahlen n .

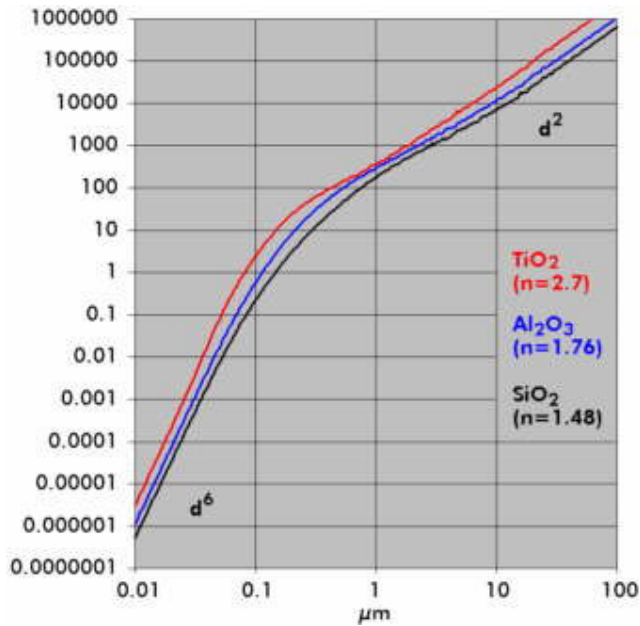


Abbildung 2.16: Einfluss der Partikelgröße auf die 90°-Streulichtintensität von TiO_2 , Al_2O_3 und SiO_2 als Modellpartikel bei gleicher Partikelanzahl und unterschiedlichen Brechungszahlen n [72]

Ein anderes Bild für die 90°-Streulichtintensität zeigt sich für konstante Volumenanteile bei unterschiedlichen Partikelgrößen (Abbildung 2.17):

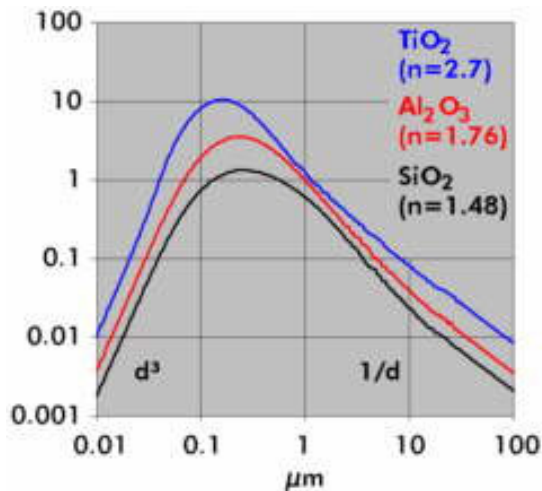


Abbildung 2.17: Einfluss der Partikelgröße auf die 90°-Streulichtintensität (Lichtwellenlänge $\lambda = 550$ nm) bei gleichbleibender Partikelvolumenkonzentration (und unterschiedlicher Brechungszahl n) für TiO_2 , Al_2O_3 und SiO_2 [72]

Für sehr kleine Partikeln ($\ll 0,1$ μm) steigt die Streulichtintensität mit zunehmender Partikelgröße bzw. abnehmendem Dispersionsgrad an. Nimmt der Dispersionsgrad

bei einem konstanten Volumenanteil weiter ab (Partikeldurchmesser d wird größer), nimmt auch die Streulichtintensität ab, da für Partikeln $> 0,1 \mu\text{m}$ die Bedingungen für eine RAYLEIGH-Streuung von sichtbarem Licht nicht mehr erfüllt sind. Die Streulichtintensität bekommt winkelabhängige Minima und Maxima (MIE-Effekt); die Vorwärtsstreuung nimmt insgesamt mit steigender Partikelgröße zu, die Seitwärtsstreuung (in Abbildung 2.17 die 90° -Streulichtintensität) ab [38]. Im brautechnischen Bereich zeigt sich die winkelabhängige Streulichtintensität im Vergleich der 90° - und 25° -Streulichtmessung z. B. für Hefesuspensionen mit unterschiedlichen Zellzahlkonzentrationen (Abbildung 2.18) [72].

Die Streulichtmessung ist zwar Stand der Technik in der Brau- und Getränkeindustrie, jedoch aufgrund der Kalibrierung mit Formazinstandards mit einem systematischen Fehler behaftet. Dies wird z. B. in der Filtrationspraxis deutlich, wo im Filtrat in der Regel höhere 90° - als 25° -Trübungswerte beobachtet werden, was den Grundlagen der Streulichttheorie widerspricht.

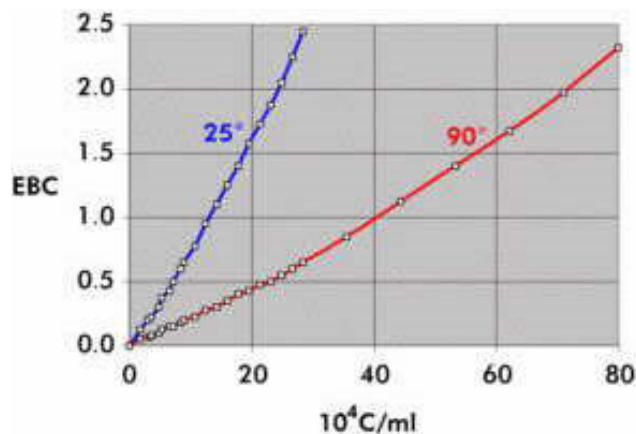


Abbildung 2.18: Trübung einer Hefesuspension bei verschiedenen Streuwinkeln in Abhängigkeit der Hefezellkonzentration [72]

2.7.2 Trübung und Trübungsmessung von Weizenbier

Ein wesentliches Qualitätsmerkmal von Weizenbier ist eine deutlich wahrnehmbare Trübung. Der Trübungseindruck wird durch die Streuung von sichtbarem Licht an Kolloid- und Festkörperteilchen (z. B. Hefezellen, Proteinverbindungen) hervorgerufen und ist keine physikalische Größe, sondern ein individueller optischer Eindruck, der von Blickwinkel, Lichtverhältnissen etc. abhängt. CARRASCO und

SIEBERT [73] stellten fest, dass der visuelle Trübungseindruck bis zu einem Wert von 50 EBC-Trübungseinheiten eine gute Korrelation mit der 90°-Streulichtmessung aufweist. Die Streulichtmessung wurde bereits in den 60er Jahren zur Beurteilung von Trübungen in Bier angewendet [74-76]. Es ist jedoch anzumerken, dass sich der deutlich überwiegende Teil der wissenschaftlichen Arbeiten zur Trübungsmessung und Trübungsentstehung auf die kolloidale Stabilität filtrierter Biere bezieht.

BRANDL [34] stellte in seinen Untersuchungen zur Trübungsstabilität von Weizenbier fest, dass die Trübungsstabilität vom Verhältnis der 90°/12°-Streulichtintensität ($VZ_{90^\circ/12^\circ}$) abhängig ist. Weizenbiere mit höherer $VZ_{90^\circ/12^\circ}$ zeigten eine bessere Langzeittrübungsstabilität als Biere mit einer niedrigen $VZ_{90^\circ/12^\circ}$. Biere mit einer $VZ_{90^\circ/12^\circ} < 0,6$ weisen dagegen nur eine unzureichende Trübungsstabilität auf, was darauf hindeutet, dass ein Verhältnis zugunsten kleiner Partikeln eine bessere Trübungsstabilität mit sich bringt. Als nicht mehr ausreichende Trübung legte BRANDL einen Wert < 15 EBC bei einer Temperatur von 20 °C (Raumtemperatur) in der 12°-Streulichtintensität fest, da die Vorwärtstreuung eine größere Bedeutung für die Trübungswahrnehmung habe als die seitliche Streuung im 90°-Winkel. Die Proben zeigten teilweise noch nach 30 Wochen Trübungswerte > 20 EBC in der 90°- und 12°-Streulichtmessung, wobei die Trübungsmessung in der abgefüllten Handelsflasche ohne weitere Probenaufbereitung durchgeführt wurde, woraus teilweise fehlerbehaftete Messungen durch aufgeschüttelten Bodensatz resultierten.

In der Praxis wird häufig vor der Kurzzeiterhitzung oder vor der Abfüllung eine In-Line-Trübungsmessung (Durchlicht- oder Streulichtmessung) zur Einstellung der Trübung in Verbindung mit einem Separator eingesetzt. Der Separator wird dabei so eingestellt, dass ein auf Erfahrungswerten beruhender Trübungswert erreicht wird. Aus dieser Anordnung lässt sich jedoch keine Vorhersage der Trübungsstabilität ableiten, da die Hefe im Weizenbier störend auf die Trübungsmessung wirkt.

2.7.3 Partikelmessung und Trübung von Weizenbier

FISCHER et. al. [68] wiesen in Untersuchungen zum Abscheideverhalten einer Zentrifuge darauf hin, dass Partikeln $< 1 \mu\text{m}$ nur schwer bzw. gar nicht abgeschieden werden können und damit im Weizenbier verbleiben. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von BRANDL [34], DELVAUX [23] und WEIKL [40], die eine verbesserte Trübungsstabilität auf das Vorhandensein von Partikeln $< 1 \mu\text{m}$

zurückführten. DELVAUX führte einen direkten Vergleich der Partikelanzahl mit zwei unterschiedlich hergestellten Würzen durch, die auf einen pH von 4,2 und einen Alkoholgehalt von 5,2 %vol eingestellt wurden. Die Würze mit dem höheren Anteil an Partikeln $< 1,03 \mu\text{m}$ zeigte die bessere Trübungsstabilität über einen Zeitraum von 31 Tagen bei einer Temperatur von 15 °C.

3 Material und Methoden

3.1 Material

3.1.1 Brauereirohstoffe

Brauwasser

Für die Versuche im 10 l-Kleinsud wurde entmineralisiertes Leitungswasser (Ionentauscherqualität) und für die Versuche im 60 l-Pilotmaßstab Brauwasser mit ca. 5 °dH verwendet, das über eine zweistufige Enthärtung im Splitverfahren [1] aufbereitet wurde.

Weizen- und Gerstenmalz

Für die Brauveruche wurden Weizen- und Gerstenmalze von verschiedenen Mälzereien verwendet. Sortenbezeichnung und Analysenwerte sind im Anhang von Kapitel 4.4 eingefügt.

Roggen-, Hafer- und Triticalemalz

Die verwendeten alternativen Malze wurden im 1 kg-Maßstab in der Kleinmälzungsanlage des Lehrstuhls für Brau- und Getränketechnologie nach der Vorschrift der MEBAK hergestellt [77].

Hopfen

Für die Brauveruche im 10 l- und 60 l-Maßstab wurden Hopfenpellets der Sorte *Hallertrauer Tradition* des Jahrgangs 2006 mit einem α -Säure Gehalt von 10,1 % verwendet.

Hopfentreber als Polyphenolquelle

Hopfentreber der Sorte *Hallertauer Hallertauer* (Jahrgang 2006) nach CO₂-Extraktion wurde als Polyphenolquelle verwendet.

Hefebier

Das Hefebier wurde aus einer Großbrauerei in Nordrhein-Westfalen mit der Hauptsorte Pils bezogen. Bei dem Hefebier handelte es sich um Gelägerhefe,

welche in einem liegenden Tank bei $< 4^{\circ}\text{C}$ für ca. eine Woche zur natürlichen Sedimentation der Hefe aufbewahrt wurde. Der Überstand wurde als Hefebier mit 400 PE kurzzeiterhitzt und mit einem gekühlten Tankwagen zu einer Weizenbier produzierenden Brauerei in Bayern befördert. Die Aufbewahrung erfolgte ebenfalls in einem liegenden und gekühlten Tank bei $0\text{--}4^{\circ}\text{C}$. Die Dosage des Hefebiers zum Weizenbier erfolgte laufend vor Separator und Kurzzeiterhitzung. Für die Versuche im Kleinmaßstab wurde das Hefebier aus der Weizenbierbrauerei über den Zwickelhahn des Aufbewahrungstanks in 10 Liter-Corneliusbehältern innerhalb von 1,5 Stunden ungekühlt zum Lehrstuhl befördert. Bis zur Ausmischung wurde das Hefebier im 10 Liter Corneliusbehälter bei 4°C gelagert.

Würzeextrakt

Zur Hefevermehrung wurde Würzeextrakt Typ „Pilsner“ der Firma Weyermann/Bamberg verwendet.

Hefe

Für Brauversuche wurden die Hefestämme *W 34*, *W 68* und *W 175* aus der Hefesammlung des Lehrstuhls für Brau- und Getränketechnologie verwendet.

Zur Herstellung einer Hefesuspension als Partikelstandard eignet sich abgenutzte untergärige Hefe, welche nicht älter als eine Woche sein sollte und kühl gelagert wurde. Des Weiteren ist es von Vorteil, wenn die Hefe in einem partikelarmen Medium (z. B. Würzeextrakt, keine Betriebswürze) vermehrt wurde. Wenn keine Nutsche zur Verfügung steht, kann die Hefe auch durch Sedimentation und anschließendem Dekantieren der überstehenden Flüssigkeit gewonnen werden. Erntehefen aus dem Brauereibetrieb sind eher ungeeignet, da anhaftende Partikeln aus der Würze bzw. aus dem Bier störend in der Partikelmessung wirken.

3.1.2 Klein- und Pilotbrauanlage

Die Beschreibung der Brauanlagen ist aus der Dissertationsschrift von HERRMANN [78] übernommen und überarbeitet worden.

3.1.2.1 Kleinbrauanlage 10 l-Maßstab

Schrotung

Zur Schrotung wird eine MIAG Labormühle Typ AZ-531/4 verwendet. Der Walzenabstand wurde auf 1,6 mm in der ersten Schrotung und auf 0,8 mm in der zweiten Schrotung eingestellt.

Sudwerk

Das Maischen im Kleinsudwerk des Lehrstuhls für Brau- und Getränketechnologie erfolgte in Glaskolben mit einem Volumen von 20 Litern, die mit Heizpilzen beheizt wurden. Die Temperatursteuerung erfolgte über ein rechnergestütztes Programm der Firma Nerb. Die stufenlos regulierbaren Rührwerke gewährleisteten eine gute Durchmischung der Maische. Das Abläutern erfolgte über beheizbare Edelstahlzylinder, an deren Böden Schlitzbleche eingelegt sind. Die abgeläuterte Würze wurde in ebenfalls beheizten Corneliusbehältern aufgefangen. Von dort aus wurde die Würze mit CO₂ in mittels Heizpilzen beheizte Glaskolben zum Zwecke der Würzekochung gedrückt. Die Heißtrubabtrennung geschah nach dem Sedimentationsprinzip in den Kochgefäßen, die blanke Würze wurde von oben abgezogen. Typische Schüttungen betragen hierbei 1,5 kg, der Hauptguß hat ein Volumen von 6 l. Insgesamt wurden drei Nachgüsse mit 3, 2 und 1 l bei Sichtbarwerden des Treberkuchens gegeben.

Gärgefäße

Die 10 l- und 30 l-Edelstahltanks der Fa. Göldner Brauereitechnik besitzen jeweils eine Konus- und Mantelkühlung, die über einen Rechner angesteuert und kontrolliert wird. Die Tanks wurden von unten befüllt, die Würze mittels Venturirohr mit Sterilluft belüftet. Seitlich ist ein kleiner Wechsel zur Probennahme angebracht.

Lager- und Transportgefäße

Für den Transport und die Reifung bzw. Lagerung von Würze und Bier wurden Corneliusbehälter mit einem Füllinhalt von 10 oder 20 Liter verwendet. Die Corneliusbehälter wurden vor Gebrauch mit 80 °C heißem Wasser zur Entkeimung schwarzbefüllt und über Kopf für 20–30 Minuten stehen gelassen. Anschließend wurden die Behälter mit CO₂ leergedrückt und bis zur Verwendung unter Druck stehengelassen.

Abfüllung

Die hergestellten Biere wurden an der manuellen Abfüllanlage des Lehrstuhls auf 0,5 l-NRW-Flaschen abgefüllt. Vor der Befüllung wurden die Flaschen unter hermetischen Bedingungen doppelt mit CO₂ zur Verdrängung der Luft gespült und mit CO₂ auf ca. 1,6 – 1,8 bar_ü vorgespannt.

3.1.2.2 Pilotbrauanlage 60 l-Maßstab

Schrotmühle

Die zum Schrotten des Malzes verwendete Schrotmühle ist eine Zwei-Walzenschrotmühle der Fa. Künzel, Kulmbach. Der Walzenabstand wurde auf 0.8 mm eingestellt.

Sudwerk

Das von der Fa. Kamm, Ottershausen gefertigte Vier-Geräte-Sudwerk ist für eine Schüttung von 10 kg mit einem typischen Hauptgussvolumen von 40 l ausgelegt. Die komplette Anlage bestehend aus Maischbottichpfanne, Maischpfanne, Läuterbottich, Würzpfanne, Brauwasserreserve und Whirlpool ist aus Edelstahl gefertigt. Zur Würzekühlung ist dem Whirlpool ein Plattenkühler der Fa. Franz Fischer, Wien nachgeschaltet. Die Anlage wird über eine SIEMENS PC-S7 Steuerung betrieben, worüber alle Dampfventile, Rührer, Pumpen und das Hackwerk halbautomatisch angesteuert werden können. Über die Steuerung kann das gewünschte Maischprogramm vollautomatisch durchgeführt werden. Die Geräte der Anlage werden durch Sattdampf beheizt, der Dampf wird von einem externen Dampfkessel „PS 200“ der Fa. Stritzel Dampftechnik erzeugt. Das Maischgefäß ist mit einem Rührwerk ausgestattet, das mit einem Motor stufenlos angetrieben wird. Nach beendeter Maischarbeit kann direkt durch Öffnen des Abmaischventils in den darunter angebrachten Läuterbottich abgemaischt werden. Der Läuterbottich mit 335 mm Durchmesser kann ein Maischevolumen von 68 Litern aufnehmen. Bei einer Schüttung von 10 kg ergibt sich daraus eine spezifische Senkbodenbelastung von 112 kg/m². Um ein Abkühlen der eingelagerten Maische zu verhindern, besitzt der Läuterbottich einen Heizmantel, der über eine Umwälzpumpe mit 78 °C heißem Wasser aus einem temperierten Wasserbad versorgt wird. Der Läuterbottich verfügt

über ein zweiarmiges Hackwerk, das höhenverstellbar ausgelegt ist. Der Antrieb erfolgt über einen drehzahlgeregelten Motor. Am Hackwerk sind drei Messer montiert, woraus sich eine Anzahl von 33 Messern pro m² Senkbodenfläche ergibt. Das Anschwänzen erfolgt über eine CIP-Sprühkugel, die Menge bzw. das Volumen des zugeführten Anschwänzwassers kann mittels eines Durchlaufmeßgerätes festgestellt werden. Die für Niederdruckkochverfahren ausgelegte Würzepfanne misst im Durchmesser 45 cm und hat eine Höhe von 65 cm. Das Bruttovolumen der Pfanne beträgt 95 Liter, das Pfannevollvolumen 70 Liter. Die Pfanne verfügt über ein stufenlos regelbares Rührwerk, das eine homogene Würzekochung gewährleistet. Das Pfannevollvolumen bzw. Ausschlagvolumen wird mit einem Messstab aus Holz abgestochen. Nach beendeter Würzekochung wird in den Whirlpool ausgeschlagen. Dieser ist mit einer Mantelheizung ausgestattet und wird mit Warmwasser auf 85 °C erwärmt. Aus der Würzepfanne wird die Heißwürze über die Ausschlagpumpe und ein Paneel in den Whirlpool gepumpt. Nach einer Rast von 20 Minuten wird das Paneel umgeschraubt und die Würze vom Whirlpool über das Paneel mittels Würzepumpe durch den Würzekühler gekühlt. Der Whirlpool verfügt über zwei Anstiche, einen oberen und einen unteren, über die die vom Heißtrub befreite Würze abgezogen werden kann. Beide Anstiche treffen sich am Paneel, von wo aus der Kaltwürzeweg zum Plattenwärmetauscher führt. Die gekühlte Würze wird am Auslauf des Plattenkühlers in gereinigten, sterilisierten Corneliusbehältern gefüllt.

Gär-, Lager- und Transportgefäße

Für die Sude im Pilotmaßstab wurden die gleichen Gär-, Lager- und Transportgefäße wie in Kapitel 3.1.2.1 beschrieben verwendet.

Abfüllung

Die hergestellten Biere wurden an der manuellen Abfüllanlage des Lehrstuhls auf 0,5 l-NRW-Flaschen abgefüllt. Vor der Befüllung wurden die Flaschen unter hermetischen Bedingungen doppelt mit CO₂ zur Verdrängung der Luft gespült.

3.1.3 Zweiwinkel-Streulichtmessgerät

Die 90°- und 25°-Streulichtintensität der Proben wurden mit dem Zweiwinkel-Streulichtmessgerät „LabScat“ der Fa. SIGRIST bestimmt. Die Messung der Probe

erfolgt in einem Wasserbad bei gleichzeitiger automatischer Rotation der Probe über einen Zeitraum von 5 Sekunden. Durch das Wasserbad wird eine Kondensatbildung an der Gefäßwand (Glasflasche) vermieden und durch die Drehung der Probe der optische Einfluss der Flaschenwand reduziert. Das Wasserbad verfügt über einen Zu- und Ablauf und kann an das Frisch- und Abwassernetz angeschlossen werden. Das Gerät wird mit einer vom Gerätehersteller zu beziehenden Formazinlösung kalibriert. Der Messbereich für beide Streulichtwinkel beträgt 0–200 EBC.

3.1.4 Partikelmessgerät

Die Partikelgrößenmessung erfolgte mittels der Nassdispergierung SUCELL von der Firma Sympatec Clausthal/Zellerfeld. Das HELOS-Messsystem besteht aus einer Anordnung verschiedener optischer Instrumente, wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Angefangen beim Laser passiert der Strahl eine Aufweitung und trifft in der Messzone auf die Partikeln. Das auf die Partikeln auftreffende Licht wird nach vorne in die Richtung des Detektors gebeugt. Die entstehenden FRAUNHOFER'schen Beugungsspektren werden durch die im Anschluss angeordnete Sammellinse gebündelt und durch den sich in der Brennebene befindlichen Detektor aufgenommen. In Abbildung 3.2 ist ein Beugungsspektrum für monodisperse kugelförmige Partikeln dargestellt. In Abhängigkeit von der Probe entsteht eine radialsymmetrische Intensitätsverteilung, deren Stärke von innen nach außen abnimmt. Anzahl und Größe im Messvolumen befindlicher Partikeln wirken sich stark auf die entstehende Intensitätsverteilung aus. Der aus 31 halbkreisförmigen Ringen bestehende Detektor wandelt die unterschiedlichen Intensitäten in äquivalente Spannungen um und digitalisiert sie, um sie schlussendlich für die weitere Auswertung zu speichern. Mit Hilfe eines linearen Gleichungssystems lässt sich aus den gespeicherten Intensitäten die gewünschte Partikelverteilung bestimmen.

Wird eine bestimmte Anzahl an gleichgroßen Partikeln untersucht, wird sich das Beugungsbild nicht ändern, die Intensitätsverteilung jedoch gerade um die Anzahl der vorhandenen Partikeln vergrößern. Befinden sich jedoch n Partikeln unterschiedlicher Größe in der Messebene, muss jedes Partikel für sich betrachtet werden. Die richtige Intensitätsverteilung ergibt sich, indem die Einzelintensitäten aller Partikeln im Messvolumen aufsummiert werden [79].

Die Analyse der Partikelgrößenverteilung wird durch die Windox 5 Software der Fa. Sympatec realisiert. Es können für die Messung der Proben die geeigneten Messbereiche eingestellt werden. Für die Messung der zu untersuchenden Biere wird der Bereich R1 eingestellt.

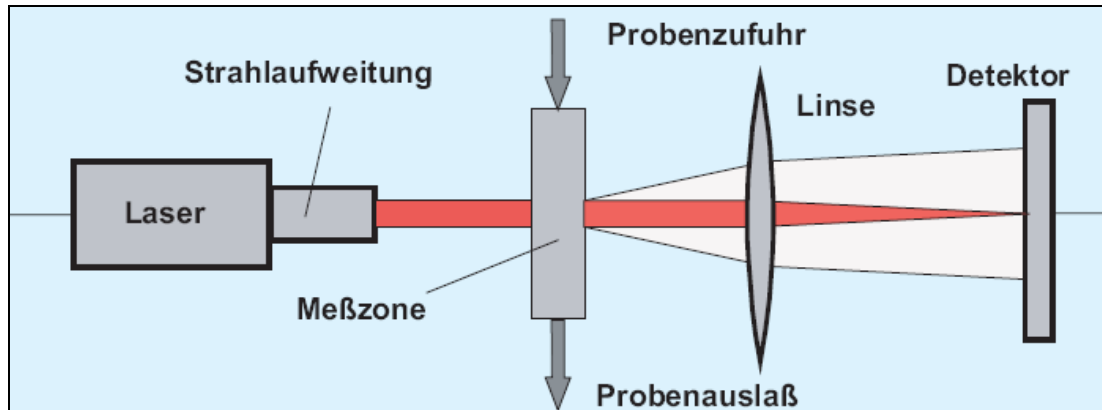


Abbildung 3.1: Anordnung der optischen Instrumente [79]

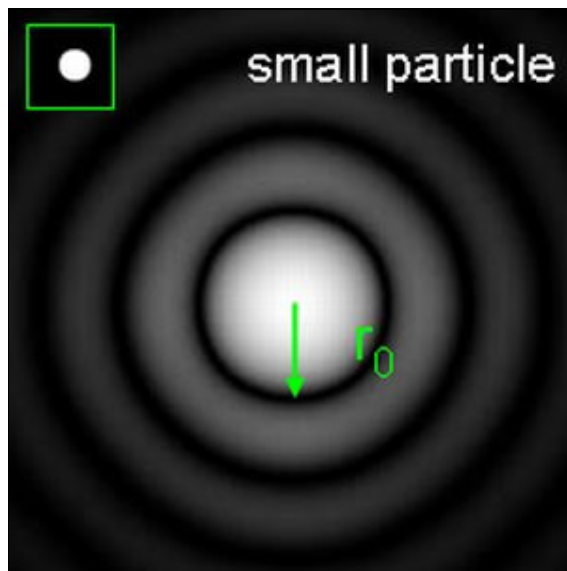


Abbildung 3.2: Beugungsbild monodisperser, kugelförmiger Partikel [80]

Dieser Bereich wird als Submicron-Bereich bezeichnet und liegt laut Hersteller zwischen 0,1 und 35 μm . Das Gerät kann mit unterschiedlichen Edelstahlküvetten („Messzone“, Abb. 3.1) mit Schichtdicken von 2 mm (für verdünnte Lösungen) und 0,2 mm bzw. 0,1 mm (für konzentrierte Lösungen) betrieben werden. In Abbildung 3.3 ist das verwendete Partikelmessgerät der Fa. Sympatec mit integrierter

Dispergiereinheit dargestellt. Die „SUCELL“-Dispergiereinheit besteht aus einem Stahlbecken mit einem Fassungsvermögen von 0,5 l (Abbildung 3.4). Für den einwandfreien Betrieb muss das Probevolumen ebenfalls 0,5 l betragen, da sonst der Vollmelder nicht aktiviert wird. Wenn die Probe eingefüllt ist, muss der Deckel mit integrierten Rührern geschlossen werden und Schlauchpumpe und Rührer werden bei Deckelschließung entsprechend der Softwareeinstellungen aktiviert.



Abbildung 3.3: Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen mittels Nassdispergierung [79]

Die Probe wird kontinuierlich innerhalb eines geschlossenen Kreislaufs mittels einer Schlauchpumpe durch eine Edelstahldurchflussküvette und anschließend wieder zurück ins Becken gepumpt. Die Messung wird über die HELOS-Sensorsteuerung (Software) gestartet. Nach der Messung kann das Edelstahlbecken durch Knopfdruck („drain“) über die Schlauchpumpe entleert werden.



Abbildung 3.4: Edelstahlbecken der Nassdispergierung [80]

3.2 Methoden

3.2.1 Kleinmälzung (1 kg-Maßstab)

Die alternativen Brauereirohstoffe Roggen, Hafer und Triticale wurden in der Kleinmälzungsanlage des Lehrstuhls für Brau- und Getränketechnologie im 1 kg-Maßstab nach dem Standardmälzungsverfahren der MEBAK [77] vermälzt.

3.2.2 Brautechnologie

3.2.2.1 Bierherstellung im 10 l Maßstab

Würzebereitung

- Schüttung: 1,6 kg; 55 % Weizenmalz; 45 % Gerstenmalz
- Hauptguss: 6 l
- Maischprogramm (dargestellt in Abbildung 3.5)

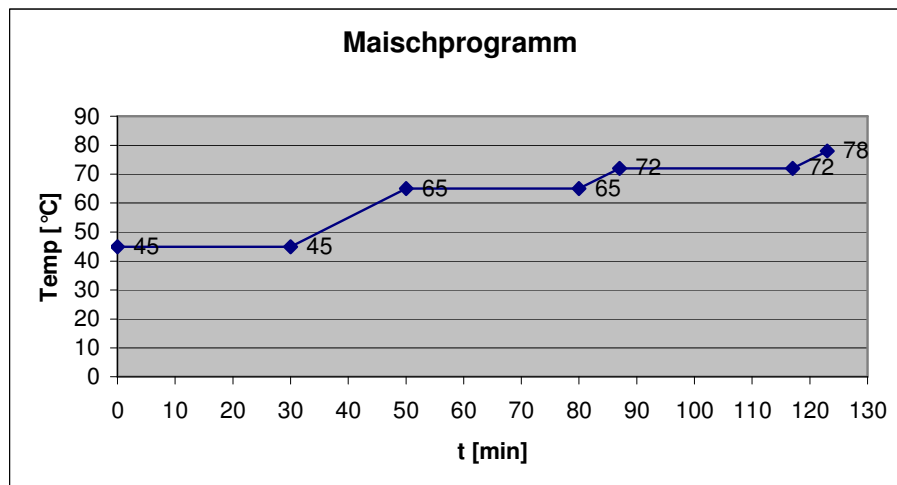


Abbildung 3.5: Angewendetes Infusionsmaisverfahren zur Herstellung von Weizenbieren im 10 Liter und 60 Liter Maßstab

- Aufheizrate: 1 °C/min
- Abläutertemperatur: 78 °C
- Trübwürzepumpen: ca. 0,5 l
- Abläutern: 1,5–3 h; Wasservorlage Senkboden mit 0,5 l und 3 Nachgüsse mit 3 l, 2 l und 1 l ($\Sigma = 6,5$ l), Bei Bedarf Tiefschnitt mit einem Holzstab durch

Rühren

- Würzekochung: 60 min
- Hopfung: Eine Gabe zu Beginn der Kochung mit einem angestrebten Gehalt von 12 mg/l iso-alpha-Säure; berechnet mit einem Isomerisierungsgrad von 33 %
- Whirlpoolrast: 20 min
- Würzekühlen: ca. 15 min

Gärung/Reifung/Lagerung

- Anstelltemperatur: 20 °C
- Anstellzellzahl: 5×10^6 Zellen/ml Würze
- Belüftung: ca. 8–9 mg/l Sauerstoff
- Gärtemperatur: 20 °C (Isotherm)
- Schlauchen: bei 1–1,5 GG-% noch vergärbarem Extrakt in 10 l-Corneliusbehälter
- Reifung: 24 h bei 22 °C in 10 l-Corneliusbehälter
- Lagerung: 4 Tage bei 4 °C in 10 l-Corneliusbehälter (kopfüber)
- Vor der Abfüllung auf 0,5 l-NRW-Flaschen wurde zur Homogenisierung das Bier in einen neuen 10 l-Corneliusbehälter umgedrückt

3.2.2.2 Bierherstellung im 60 l-Maßstab

Würzebereitung

- Schüttung: 10,0 kg; 55 % Weizenmalz; 45 % Gerstenmalz
- Hauptguss: 40 l
- Maischprogramm: wie 10 Liter Maßstab, dargestellt in Abbildung 3.5
- Aufheizrate: 1 °C/min.
- Abläutertemperatur: 78 °C
- Trübwürzepumpen: ca. 3 l
- Abläutern: ca. 2 h; Wasservorlage Senkboden 2 l und 2 Nachgüsse mit 15 l ($\Sigma = 32$ l); ca. 20 min nach Läuterbeginn langsames Absenken des Hackwerks auf 100 mm und 2–3 U/min.
- Würzekochung: 60 min

- Hopfung: Eine Gabe zu Beginn der Kochung mit einem angestrebten Gehalt von 12 mg/l Iso-alpha-Säure; berechnet mit einem Isomerisierungsgrad von 33 %
- Whirlpoolrast: 20 min
- Würzekühlen: ca. 20 min

Gärung/Reifung/Lagerung

- Anstelltemperatur: 20 °C
- Anstellzellzahl: 5×10^6 Zellen/ml Würze
- Belüftung: ca. 8–9 mg/l Sauerstoff
- Gärtemperatur: 20 °C (Isotherm)
- Schlauchen: bei 1–1,5 GG-% noch vergärbarem Extrakt in 10 l-Corneliusbehälter
- Reifung: 24 h bei 22 °C in 10 l-Corneliusbehälter
- Lagerung: 4 Tage bei 4 °C in 10 l-Corneliusbehälter (kopfüber)
- Vor der Abfüllung auf 0,5 l-NRW-Flaschen wurde zur Homogenisierung das Bier in einen neuen 10 l-Corneliusbehälter umgedrückt

3.2.2.3 Hefevermehrung und Bestimmung der Vitalität und Viabilität

Alle Hefestämme wurden von der Hefensammlung des Lehrstuhls bezogen. Die Vermehrung der Anstellhefe erfolgte in 5 Liter-Erlenmeyerkolben, welche durch Auskochen mit Wasser entkeimt wurden. Als Nährsubstrat diente Würzeextrakt Typ „Pilsner“ der Fa. Weyermann/Bamberg mit einer Konzentration von ca. 75 GG-%, der auf eine Konzentration von 12 GG-% mit entmineralisiertem Wasser auf ein Volumen von 3,5 l verdünnt wurde. Dazu wurden 560 ml Würzeextrakt mit 2940 ml Wasser aufgefüllt. Die Vermehrung der Hefe erfolgte bei 21 ± 2 °C für ca. 48 Stunden auf einem Magnetrührer (Fa. Heidolph) mit einem 3-Kant-Rührfrisch bei 300 U/min. Die Hefezellzahl wurde mittels Thoma-Kammer bestimmt. Die Bestimmung der Hefeviabilität erfolgte mittels Metylen-Blau-Methode, die Hefevitalität wurde durch die Bestimmung des intracellulären pH-Wertes (ICP) ermittelt [81].

3.2.3 Malz-, Würze- und Bieranalysen

Alle Malz-, Würze- und Bieranalysen wurden nach den Analysenvorschriften der MEBAK durchgeführt [3, 82, 83].

3.2.4 Verkostung

Die Verkostung der Biere wurde nach den Richtlinien der DLG und dem von HERRMANN [78] für Weizenbier entwickelten Verkostungsschema durchgeführt. Die forcierte Alterung wurde durch 24stündiges Schütteln bei Raumtemperatur und einer anschließenden 96stündigen Wärmebehandlung in einem Wärmeschrank bei 40 °C erreicht. Für den Mittelwert der einzelnen Verkostungsnoten wurde ein Vertrauensbereich von 95 % gewählt.

3.2.5 Probenvorbereitung für die Streulicht- und Partikelmessung

Für die Trübungsstabilität von Weizenbier sind die in Schwebelagerung bleibenden Partikel von Interesse. Da der Sedimentationsprozess für eine polydisperse Suspension wie unfiltriertes Weizenbier sehr komplex ist, ist es sinnvoll, die Hefe und andere schnell sedimentierende Partikel dem natürlichen Sedimentationsprozess auszusetzen und diesen nicht künstlich (z. B. durch Zentrifugation) zu beschleunigen. In der Regel ist eine Woche nach der Abfüllung, spätestens aber nach 10 Tagen im oberen Bereich der Flasche (z. B. für 0,5 l-NRW-Flasche 10 cm über dem Boden, was 250 ml entspricht) keine Hefe mehr zu finden. Hefe kann in der Streulichtmessung zu verfälschten Werten führen. Inwieweit eine Kontamination der Probe mit Hefe vorliegt, kann mikroskopisch oder durch die Partikelmessung (Peak bei 5–7 µm) kontrolliert werden.

Sowohl für die Streulichtmessung als auch für die Partikelmessung kann die gleiche Probe (in der genannten Reihenfolge) verwendet werden. Die Probe besteht aus 0,5 l Bier, welches aus dem Überstand von zwei 0,5 l-Flaschen gewonnen wird. Eine optimale Gewinnung des Probenmaterials gelingt mit einer Vakuumpumpe und einer 2 l-Saugflasche, wie in Abbildung 3.6 zu sehen ist. Steht keine Saugflasche mit Vakuumpumpe zur Verfügung, kann auch mit einer möglichst großvolumigen Pipette abgesaugt werden.

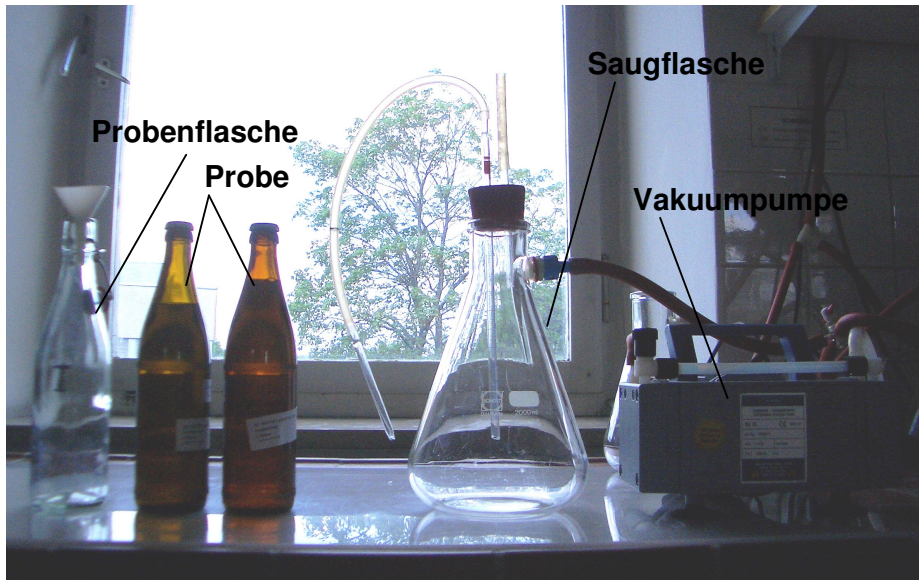


Abbildung 3.6: Saugflasche mit Vakuumpumpe

Nacheinander werden die Überstände beider 0,5-Flaschen (2 x 250 ml) in der Saugflasche zusammengeführt. Soll aus kleineren Gebinden (z. B. 0,33 l-Flasche) eine Bestimmung durchgeführt werden, so kann das Probenvolumen aus drei oder mehr Flaschen gewonnen werden. Durch den beim Absaugen entstehenden Unterdruck kommt es auch gleichzeitig zur Schaumbildung und zu einer gewünschten Entgasung der Probe. Die Schaumbildung kann so heftig sein, dass das Absaugen kurzzeitig unterbrochen werden muss, um ein Übersäumen der 2 l-Saugflasche zu vermeiden. Den Inhalt der Saugflasche über einen Trichter in eine 0,5 l-Bügelverschlussflasche überführen und für die Streulichtmessung auf Messtemperatur einstellen. Bei der Partikelmessung muss beachtet werden, dass die Probe sich im Partikelmessgerät erwärmt und darum 3–4 °C unter die Messtemperatur gekühlt werden muss.

Durchführung:

1. Proben ca. 24 h vorher (oder über Nacht) auf ca. 4–8 °C kühlen (nur wenn unterhalb der Raumtemperatur gemessen wird; dann entfällt 2.)
2. Wenn möglich, auch alle Gefäße, mit denen die Probe in Kontakt kommt (Saugflasche, 0,5 l-Bügelverschlussflasche) kühlen
3. Saugflasche mit Absaugvorrichtung und Vakuumpumpe aufbauen
4. Flaschen bereitstellen und öffnen, jeweils 250 ml Überstand absaugen

5. Inhalt der Saugflasche mit einem Trichter in 0,5 l- Bügelverschlussflasche überführen und Probe auf Messtemperatur für die Streulichtmessung bzw. ca. 3–4 °C unterhalb der Messtemperatur für die Partikelmessung einstellen.
6. Das Wasserbad im Streulichtmessgerät darf keine Verunreinigungen durch Schwebstoffe/Partikeln aufweisen; die Trübungswerte des Wassers im Wasserbad sollten für die 90°- und 25°-Intensität < 0,02 EBC sein.

Anmerkung:

Die Verwendung des Überstandes zur Bestimmung der Streulichtintensität hat sich insbesondere im Zusammenhang mit dem „LabScat“ als vorteilhaft erwiesen. Bei der Messung der Streulichtintensität direkt in der handelsüblichen Flasche wurde durch die Rotation während der Messung Bodensatz (Hefe) aufgewirbelt, was zu verfälschten (höheren) Trübungswerten führte.

3.2.6 Durchführung der Partikelgrößenbestimmung von Hefe und Weizenbier mit dem HELOS

Das Partikelmessgerät ist entsprechend den Herstellerangaben in Betrieb zu nehmen. Für die Bestimmung der PGV von Weizenbier und Hefe wurden der Messbereich R 1 (0,1–35 µm) und eine 0,2 mm Edelstahldurchflussküvette verwendet. Die vorgenommenen Einstellungen für die HELOS-Sensorsteuerung sind in Abbildung 3.7 abgebildet. Die entsprechenden Einstellungen können unter einem Produktnamen (im Beispiel hier „Weißbier“) gespeichert werden.

Vor Beginn einer jeden Messreihe muss eine Referenzmessung mit reinem Wasser durchgeführt werden. Bevor die Referenzmessung durchgeführt wird, sollte das Edelstahlbecken 2–3 Mal mit Wasser befüllt und für 1–2 Minuten im Kreislauf gepumpt werden. Das Becken kann durch Drücken des „drain“-Knopfes an der SUCCELL-Nassdispergiereinheit halbautomatisch entleert werden. Nachdem die Geräte- und Softwareeinstellungen durchgeführt wurden (Speicherung der Einstellungen unter einem Produktnamen) und die eigene Probenbezeichnung in der HELOS-Sensorsteuerung eingetragen wurde, kann mit der Messung begonnen werden. Dazu muss 0,5 l Probe in das Edelstahlbecken der Dispergiereinheit eingefüllt werden. Anschließend ist der Deckel zu schließen und die Messung kann über die HELOS-Sensorsteuerung gestartet werden.

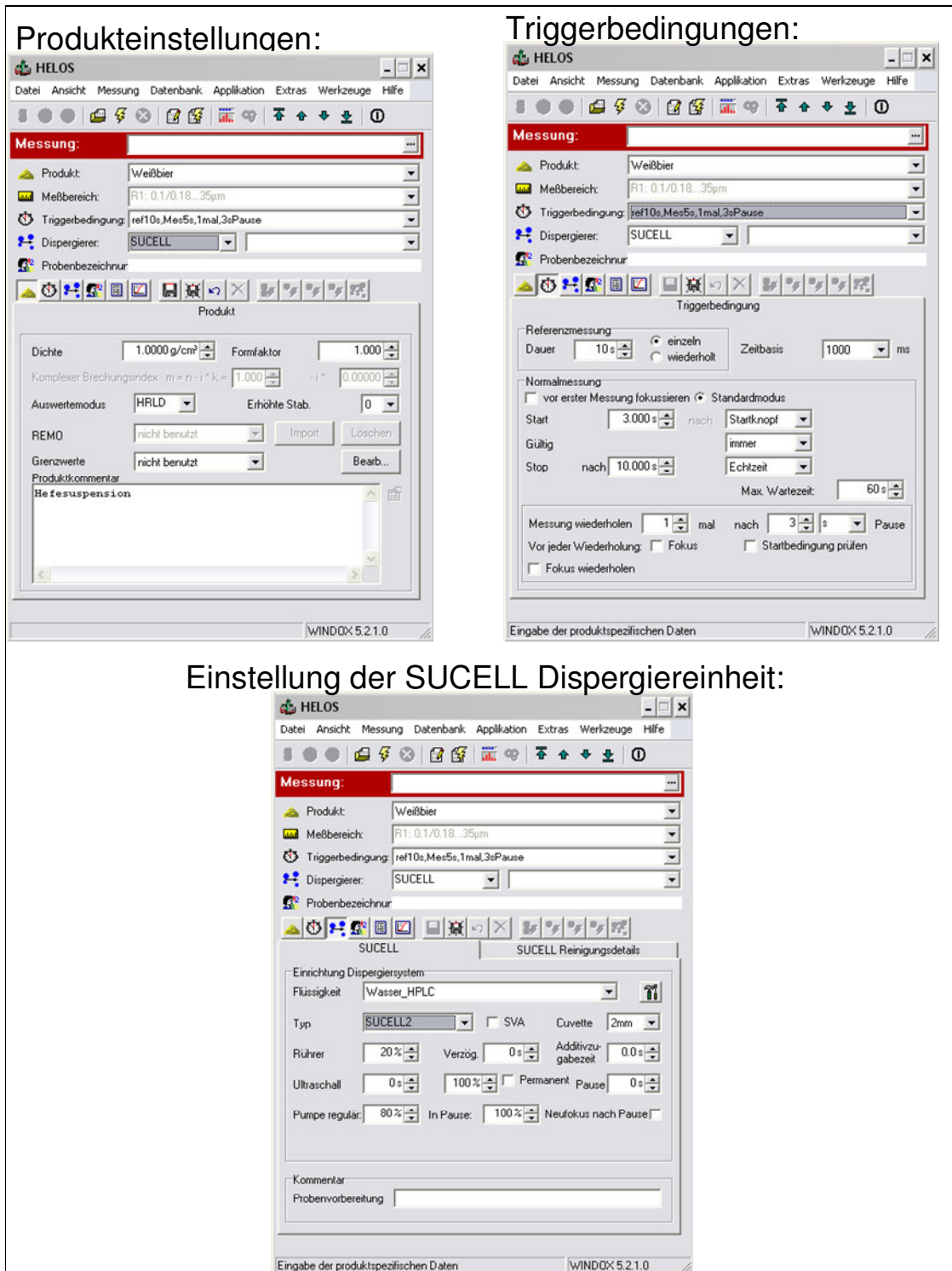


Abbildung 3.7: Einstellung der Geräteparameter in der HELOS-Sensorsteuerung

Die Messung und Auswertung erfolgt automatisch. Die Daten der Messung werden in der HELOS-Datenbank hinterlegt, die PGV-Diagramme aus dem gespeicherten Datensatz generiert. Die Datensätze werden in der Datenbank nach dem Messzeitpunkt abgespeichert und können von dort jederzeit wieder abgerufen werden. Zur leichteren Rückverfolgung, welche Probe wann gemessen wurde, empfiehlt es sich, die Messzeitpunkte der Proben zusätzlich handschriftlich oder elektronisch zu vermerken. Zwischen zwei Proben muss das Edelstahlbecken 3 Mal mit ca. 0,4 Liter Wasser gespült werden, um eine Partikelverschleppung auf ein Minimum zu reduzieren. Danach kann mit der Messung der nächsten Probe ohne weitere Referenzmessung fortgefahren werden.

Nach der letzten Messung sollte die SUCCELL-Nassdispergiereinheit 2–3 Mal mit Wasser für jeweils ca. 20 Sekunden im Kreislauf gefahren werden. Zur Vermeidung von biologischem Besatz im System hat sich das Spülen mit 1–2 % NaOH-Lösung bewährt (ca. 20 Sekunden), welche auch bis zum nächsten Messtag in der Dispergiereinheit verbleibt. Wenn das Gerät für eine neue Messreihe wieder verwendet wird, kann eine schnellere Neutralisierung mit einer 1 %igen H₂SO₄-Lösung und anschließenden Wasserspülungen erfolgen.

Messung von Proben mit einer niedrigeren Temperatur als unterhalb der Raumtemperatur:

Bei Messungen im Kaltbereich sollte die das Gerät umgebende Lufttemperatur maximal 3–4 °C über der Messtemperatur der Probe liegen, da es sonst zur Kondensatbildung auf der Durchflussküvette kommt und die Partikelmessung dadurch verfälscht wird. Für den Probentransport bieten sich isolierte Behälter (z. B. aus Styropor) und Kühlakkus an. Des Weiteren muss beachtet werden, dass es zu einer Erwärmung der Probe während der Messung kommt. Die Erwärmung kann verzögert werden, wenn die Umgebungstemperatur unter der Messtemperatur ($\Delta \vartheta = 3\text{--}4\text{ °C}$) liegt und/oder wenn zum Zwischenspülen zwischen zwei Proben kaltes Wasser verwendet wird. Bei Betriebstemperaturen unter 10 °C (z. B. in einer Kühlkammer) sollten Rechner und Partikelmessgerät vor dem Herabkühlen des Raumes bereits eingeschaltet werden. Die niedrigste Betriebstemperatur von Rechner, Bildschirm und Partikelmessgerät für einen einwandfreien Betrieb lag bei ca. + 4 °C.

3.2.7 Herstellung eines Partikelstandards auf Basis einer Hefesuspension

Untergärende Hefe verfügt über eine kugelähnliche Form und lässt sich unter bestimmten Bedingungen gut dispergieren. Die eigene Herstellung eines Partikelstandards auf der Basis von Hefezellen ist vor allem eine sehr kostengünstige Alternative im Vergleich zu käuflichen Partikelstandards, welche teilweise mit einer Abweichung der Partikelanzahl von $\pm 10\%$ größere Abweichungen aufweisen, als die eigens hergestellten Hefesuspensionen

Durchführung:

1. ca. 10–15 g abgenutzte untergärende Hefe in 1 Liter NaCl-Lösung (0,9 g/l) durch Rühren (z. B. mit einem Spatel) homogenisieren. Als Gefäß kann ein handelsüblicher Maßkrug mit einem Volumen von 1 l oder ein Gefäß mit ähnlichen Maßen verwendet werden.
2. Nach ca. 3 Stunden je nach Bedarf ca. 50 ml oder 100 ml Hefesuspension ca. 5 cm unter der Flüssigkeitsoberfläche mit einer Pipette abziehen und in ein verschließbares Gefäß (z. B. Messkolben) überführen. Aus der Hefesuspension im verschließbaren Gefäß müssen die Hefezellzahl und die Partikelgrößenverteilung (PGV) bestimmt werden.
3. Die Bestimmung der Hefezellzahl erfolgt mittels THOMA-Kammer [84]. Vor der Auszählung mittels THOMA-Kammer muss die Hefesuspension durch Schütteln homogenisiert werden. Optimal ist eine Hefekonzentration von 10–15 Mio/ml.
4. Die Bestimmung der PGV der Hefesuspension kann in verdünnter Form (für SYMPATEC HELOS SUCCELL 5 ml in 500 ml H₂O) in reinem Wasser (Ionentauscher-Qualität oder H₂O dest.) erfolgen. Die PGV der Hefesuspension sollte eine Normalverteilung aufweisen (monomodale Partikelgrößenverteilung).

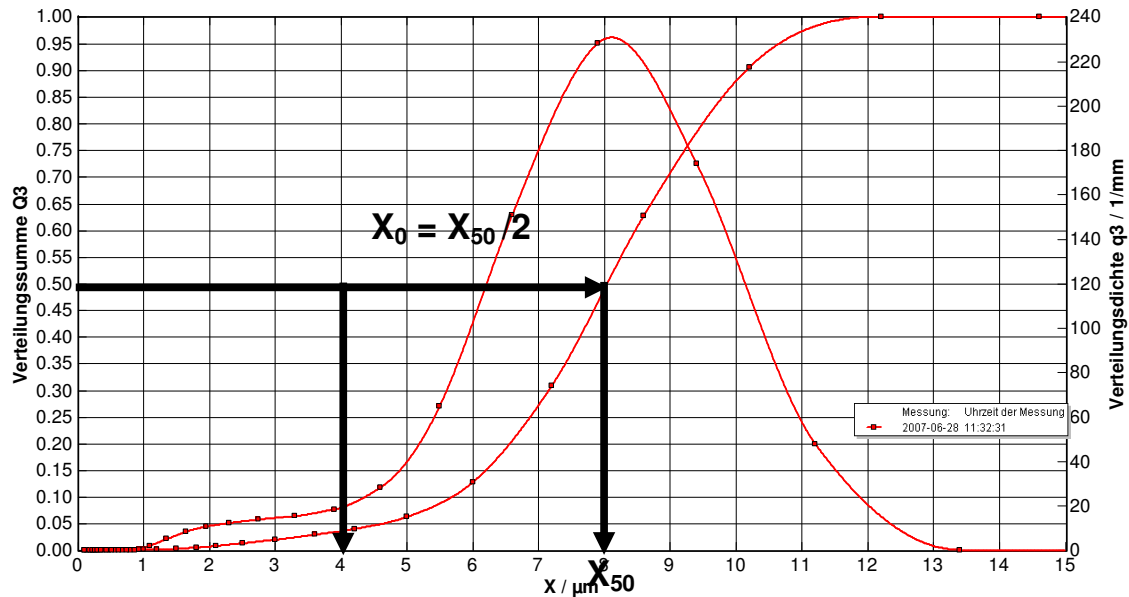


Abbildung 3.8: Q₃-Partikelgrößenverteilung einer Hefesuspension zur Quantifizierung der Partikeln in Bier

Bei der Berechnung des Volumens der Hefezellen in der Suspension, welche als Partikelstandard verwendet wird (V_{St}), muss die Standardabweichung der Hefezellzahlbestimmung berücksichtigt werden.

Beispiel:

Die direkte zehnfache Auszählung einer Hefesuspension mit einer THOMA-Kammer ergab folgende Werte pro 16 Kleinquadrate:

Mittelwert: 259,7 Hefezellen

Standardabweichung: 22 Hefezellen

Zur Bestimmung der Hefekonzentration muss mit dem THOMA-Kammer-Faktor 15625 multipliziert werden, um die Hefekonzentration pro ml zu erhalten.

Die Hefezellzahl pro ml Suspension beträgt $4057812,5 \pm 343750$, also $4,06 \pm 0,34 \times 10^6$ Zellen/ml. Mit einem x_{50} -Wert von $8 \mu\text{m} \Rightarrow$

$$V_{St} = \frac{4\pi}{3} \left(\frac{8\mu\text{m}}{2}\right)^3 \times 4,06 \pm 0,34 \times 10^6 \text{ Zellen/ml} = \underline{\underline{0,51 \pm 0,09 \mu\text{l/ml Hefesuspension}}}$$

3.2.8 Partikelquantifizierung mittels Partikelstandard (Hefesuspension)

In Abbildung 3.9 ist eine PGV aus dem Überstand eines Weizenbieres 8 Tage nach der Abfüllung zu sehen. Gibt man nun nach der Messung der Bierprobe direkt in das

Edelstahlbecken eine bestimmte Menge an Partikelstandard zur Weizenbierprobe dazu und misst erneut die PGV, erhält man eine veränderte PGV mit einem verstärkten oder neuen Peak, wie in Abbildung 3.10 zu sehen, im Bereich des x_{50} -Wertes (hier $8 \mu\text{m}$) des Partikelstandards.

Die gesuchte Größe ist die Gesamtpartikelmenge im Weizenbier.

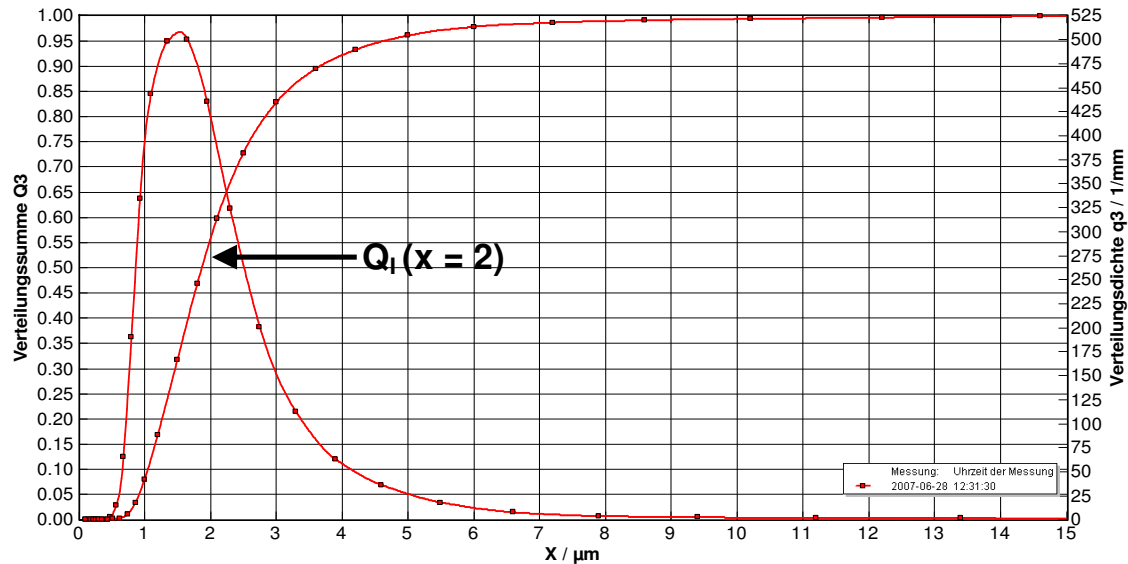


Abbildung 3.9: Partikelgrößenverteilung aus dem Überstand eines Weizenbieres 8 Tage nach der Abfüllung

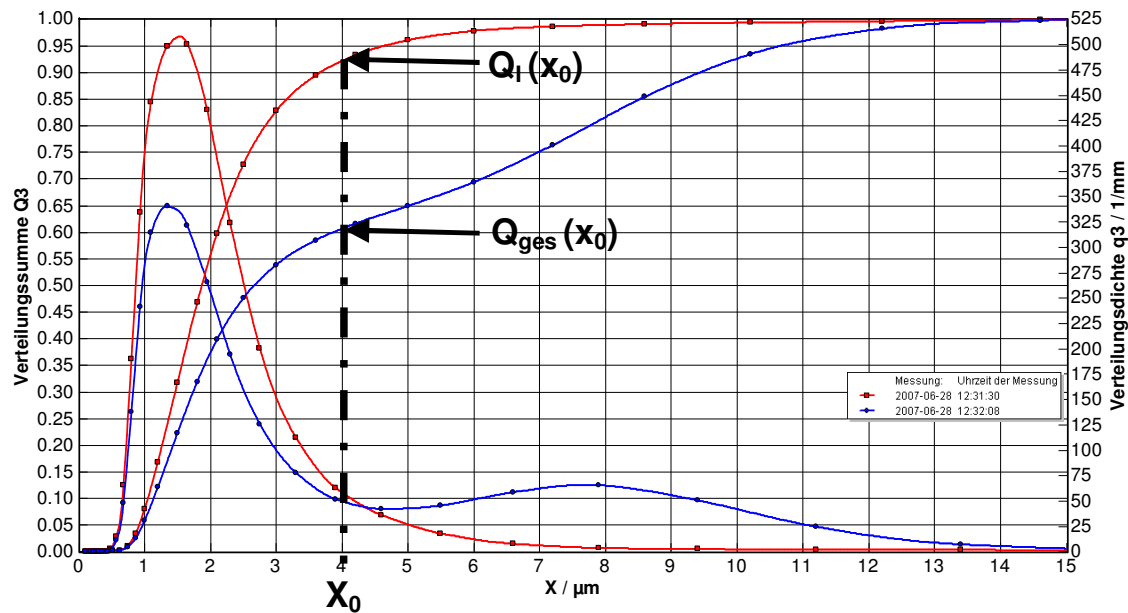


Abbildung 3.10: Partikelgrößenverteilung vor (gleiche rote Kurve wie Abb. 25, ■) und nach (blaue Kurve, ●) der Zugabe des Partikel-(Hefe-)Standards

Sind von zwei Partikelkollektiven die PGV bekannt, so lässt sich aus einer Mischung mit bekannten Anteilen die PGV der Mischung bestimmen [35]:

μ_I ist die allgemeine Menge eines Partikelkollektivs mit der PGV $q_I(x)$ (z. B. das Volumen aller Partikeln wie Kolloide, Hefen etc. in einem Weizenbier);

μ_{II} ist die allgemeine Menge eines anderen Partikelkollektivs mit der PGV $q_{II}(x)$ (z. B. Hefesuspension).

Das Gesamtvolumen der Partikeln einer Mischung beider Kollektive ist dann:

$$\mu_I + \mu_{II} = \mu_{ges}$$

Mit $v_I = \mu_I/\mu_{ges}$ und $v_{II} = \mu_{II}/\mu_{ges}$ \Rightarrow nach Def.: $v_I + v_{II} = 1$.

Für die Dichteverteilung der Mischung $q_{ges}(x)$ kann dann geschrieben werden.

$$q_{ges}(x) = v_I q_I(x) + v_{II} q_{II}(x)$$

Durch Integration folgt die Summenverteilung der Mischung:

$$Q_{ges}(x) = v_I Q_I(x) + v_{II} Q_{II}(x)$$

Die gesuchte Größe ist das gesamte Partikelvolumen in der Weizenbierprobe μ_I .

Mit der Bestimmung der PGV der Hefesuspension und der Hefezellzahl erhalten wir $Q_{ges}(x)$ und V_{St} ($=\mu_{II}$). $Q_{ges}(x)$ ist die Mischung aus Partikelstandard und Weizenbier und wird gemessen (•Kurve in Abbildung 3.10).

$$Q_{ges}(x) = \mu_I/\mu_{ges} Q_I(x) + \mu_{II}/\mu_{ges} Q_{II}(x).$$

Für die Partikelgröße $x_0 = x_{50}/2$ wird $Q_{II}(x_0) = 0$.

x_0 stellt die kleinste Partikelgröße des Partikelstandards dar, unter Vernachlässigung der Verschmutzung durch kleinere Partikeln, die bei der Bestimmung der HZZ in der Thoma-Kammer nicht erfasst werden.

$$\Rightarrow Q_{ges}(x_0) = [\mu_I/(\mu_I + \mu_{II})] Q_I(x_0) = [\mu_I/(\mu_I + \mu_{II})] Q_I(x_0)$$

Allgemein ergibt sich dann für die Menge des Partikelkollektivs μ_i :

$$\mu_i = [(Q_{\text{ges}}(x_0) \mu_{ii}) / [Q_i(x_0) - Q_{\text{ges}}(x_0)]].$$

Beispiel für die Berechnung des Gesamtpartikelvolumens V_{WB} in 500 ml (Probenvolumen) Weizenbier mit der PGV in Abb. 3.9 und 3.10 und mit 5 ml Partikelstandard mit der PGV aus Abbildung 3.8:

$$x_0 = 4 \mu\text{m}; \quad Q_{\text{ges}}(x_0) = 0,66; \quad Q_i(x_0) = 0,92; \quad V_{\text{St}} = 0,51 \pm 0,09 \mu\text{l/ml}$$

$$V_{WB} = \frac{0,66 \times 5 \text{ ml} \times 0,51 \mu\text{l/ml}}{0,92 - 0,66} \pm \frac{0,66 \times 5 \text{ ml} \times 0,09 \mu\text{l/ml}}{0,92 - 0,66} = 6,5 \pm 1,1 \mu\text{l} / 500 \text{ ml Bier.}$$

Da nun bekannt ist, dass das Gesamtvolumen aller Partikeln in 500 ml Weizenbier 6,5 μl beträgt, kann aus der Q_3 -Summenverteilung in Abbildung 3.9 bestimmt werden, wie groß z. B. das Gesamtvolumen aller Partikeln $< 2 \mu\text{m}$ ist:

$$Q_i(x = 2 \mu\text{m}) \times 6,5 \mu\text{l} = 0,55 \times 6,5 \mu\text{l} = 3,58 \mu\text{l}.$$

In der Regel reichen 5–10 ml Hefesuspension auf 500 ml Probe bei einer HZZ von $> 10 \text{ Mio/ml}$ aus.

4 Ergebnisse und Diskussion

In den Kapiteln 4.1 und 4.2 wurde mittels Streulichtmessung die Veränderung der Trübung von Handelsproben über die Zeit beobachtet und herausgearbeitet, wie anhand der Streulichtmessung eine Vorhersage der Trübungsstabilität getroffen werden kann. Ergänzend zu den Kapiteln 4.1 und 4.2 wurde in Kapitel 4.3 die messtechnische Erfassung der Trübung und ihre Veränderung über die Zeit durch die Partikelmessung erweitert. Insbesondere durch die entwickelte Methode zur Partikelquantifizierung konnte neben der reinen Darstellung von Partikelgrößenverteilungen auch die quantitativen Veränderungen einzelner Partikelfraktionen, wie z. B. der Gesamtpartikelmenge und der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$, über die Zeit dargestellt und damit die für die Trübungsstabilität relevante Partikelfraktion ermittelt werden. Darüber hinaus trug die Streulicht- und Partikelmessung zur Aufklärung und zum besseren Verständnis der in den Kapiteln 4.4–4.8 untersuchten Zusammenhänge bei.

In Kapitel 4.4 wurden verschiedene vermälzte Wintergerstensorten und alternative vermälzte Brauereirohstoffe auf ihr trübungsstabilisierendes Potenzial untersucht, mit dem Ergebnis teilweise signifikant unterschiedlicher Trübungsneigungen. In Kapitel 4.5 wurde untersucht, wie sich durch die Variation des Polyphenolgehaltes aus Hopfentreber nach CO_2 -Extraktion die Trübungsstabilität verändert.

Der Einfluss der thermischen Prozessschritte Würzekochung und Kurzzeiterhitzung und ihre Auswirkung auf die Trübungsstabilität wurden im Einzelnen als auch im Zusammenhang im Kapitel 4.6 beleuchtet.

Die Ergebnisse in Kapitel 4.7 deuten darauf hin, dass der Hefestamm in Bezug auf die Trübungsstabilität eine untergeordnete Bedeutung zu haben scheint.

Die trübungsstabilisierende Wirkung von Hefebier aufgrund des hohen Anteils an Partikeln $< 1,5 \mu\text{m}$ wird in Kapitel 4.8 beschrieben.

Die Diskussion wurde aufgrund der Vielzahl an Themen jeweils in den entsprechenden Kapiteln geführt.

4.1 Vorhersage der Trübungsstabilität von Weizenbier mittels Zweiwinkel-Streulichtmessung

Trübung ist ein Phänomen, das durch viele physikalische und chemische Faktoren beeinflusst wird. Eine Definition für die Trübungsstabilität wurde nur bei BRANDL [34] gefunden, der die Trübungsstabilität als Zeitraum vom Tag der Abfüllung bis zur Unterschreitung der 12°-Streulichtintensität von 15 EBC-Trübungseinheiten (EBC-TE) bei einer Temperatur von 20 °C festlegte. Während den eigens durchgeführten Untersuchungen zeigte sich jedoch, dass insbesondere im Bereich < 20 EBC-TE nicht immer die gemessene höhere Trübungsintensität mit dem visuellen Eindruck korrelierte und auch nicht immer eine ausreichend intensive Trübung wahrgenommen werden konnte, so dass 15 EBC-TE in der 25°-Streulichtmessung einen zu niedrigen Wert darstellt. Zudem erscheint die Temperatur von 20 °C als unpassend, da zwar vor allem Flaschenweizenbier in diesem Temperaturbereich verkauft wird, jedoch die Konsumtemperatur eher im Bereich von 10–12 °C liegt.

Aus diesem Grund wird folgende Definition für die „Trübungsstabilität von Weizenbier“ vorgeschlagen, welche auch zur Bestimmung der Trübungsstabilität in dieser Arbeit zugrunde gelegt wurde:

Trübungsstabilität ist der Zeitraum nach der Abfüllung bis zur Unterschreitung der 90°-Streulichtintensität von 30 EBC bei einer Messtemperatur von 12 °C.

Erklärung:

- In der Literatur [73] wurde der Hinweis gefunden, dass die 90°-Streulichtintensität mit der menschlichen Wahrnehmung von Trübung bis zu 50 EBC-TE korreliert.
- Da viele Weizenbiere bei Raumtemperatur nur eine geringe Trübung aufweisen, jedoch in der Regel kühler konsumiert werden, wurde als Bezugsgröße eine Messtemperatur von 12 °C gewählt, um eine eventuell vorhandene Kälte-trübung zu berücksichtigen.

Die Streulichtmessung ist eine einfache und weit verbreitete Methode zur Bestimmung der Trübungsintensität von filtrierten als auch von unfiltrierten Bieren.

Ziel der Untersuchungen war es, den von BRANDL [34] gefundenen Zusammenhang einer verbesserten Trübungsstabilität bei einem hohen Verhältnis der 90°- und 25°-Streulichtintensität zu verifizieren. Die Untersuchungen wurden mit abgefüllten Flaschenbieren durchgeführt, welche direkt von Brauereien bezogen wurden. Die Proben wurden über die Versuchsdauer bei einer Temperatur von 20–22 °C gelagert. Eine Einteilung der 28 untersuchten Proben nach ihrem Verhältnis der 90°- und 25°-Streulichtintensität (VZ 90°/25°) zeigte Werte von 0,5 bis 1. Die Verteilung der Proben in Bezug auf die VZ 90°/25° ist in Tabelle 4.1 wiedergegeben. Die Veränderung der Trübung über die Zeit wurde für die einzelnen Klassen der VZ 90°/25° 0,5–0,6, 0,6–0,7, 0,7–0,8 und > 0,9 entsprechend in den folgenden Abbildungen 4.1.1–4.1.6 dargestellt. Biere mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,8 und 0,9 kamen nicht vor.

Tabelle 4.1: Einteilung der Proben nach der VZ 90°/25°

VZ (90°/25°)	Anzahl Proben
0,5 – 0,6	5
0,6 – 0,7	10
0,7 – 0,8	4
> 0,9	9
Σ	28

Bemerkenswert ist, dass die 90°-Trübungsverläufe über die Zeit für die unterschiedlichen Proben nicht einheitlich waren, sondern sich teilweise deutlich unterschieden. Tendenziell zeigten die Proben mit steigender VZ 90°/25° auch eine höhere Mindestdauer der Trübungsstabilität. Für die maximale erreichte Trübungsstabilität zeigte sich jedoch in Abhängigkeit der VZ 90°/25° kein einheitlicher Trend. In Tabelle 4.2 sind die minimale und maximale Trübungsstabilität der untersuchten Proben in Abhängigkeit der VZ 90°/25° dargestellt.

Darüber hinaus zeigten Proben mit einem höheren Trübungswert (bei Betrachtung der jeweils ersten gültigen Messwerte innerhalb des Messbereichs < 200 EBC-TE) tendenziell auch eine bessere Trübungsstabilität. Somit ist eine hohe Trübungsstabilität bei einem hohen Anfangstrübungswert in Verbindung mit einer hohen VZ 90°/25° zu erwarten.

Tabelle 3.2: Min. und max. Werte für die Trübungsstabilität in Abhängigkeit der VZ 90°/25°

VZ (90°/25°)	t _{min} und t _{max} * [Tagen] der Trübungsstabilität
0,5 – 0,6	19–38 (> 80)
0,6 – 0,7	26–78 (> 90)
0,7 – 0,8	32–48
> 0,9	37– >160

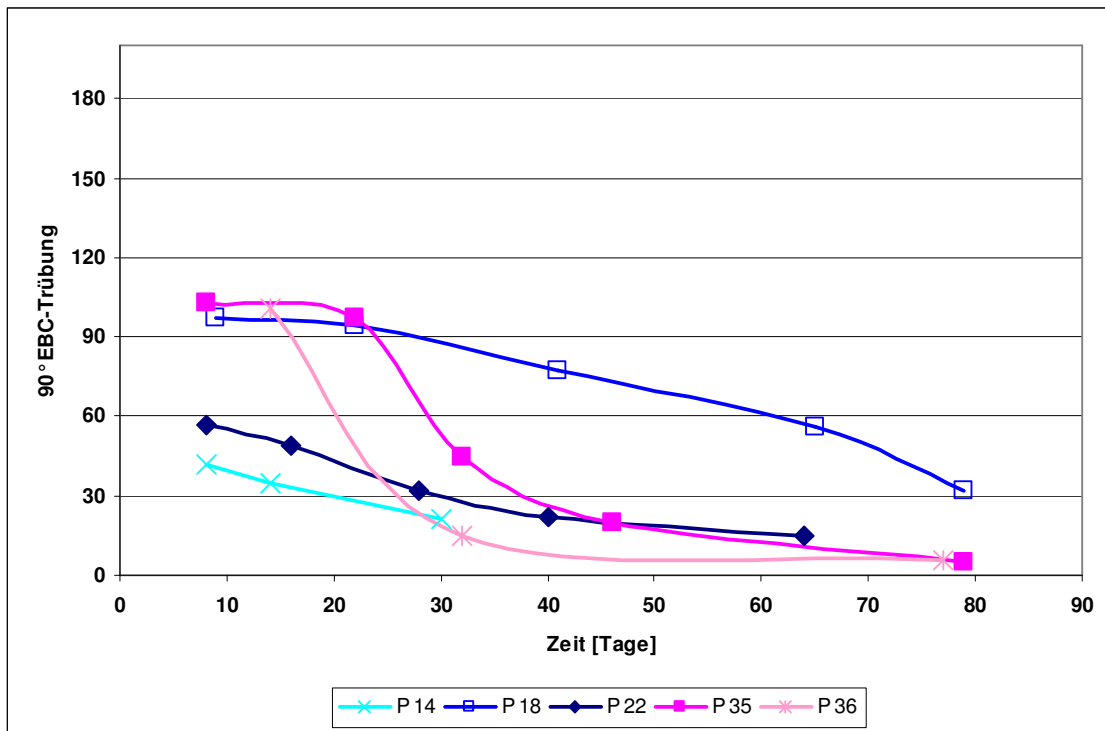


Abbildung 4.1.1: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,5 und 0,6

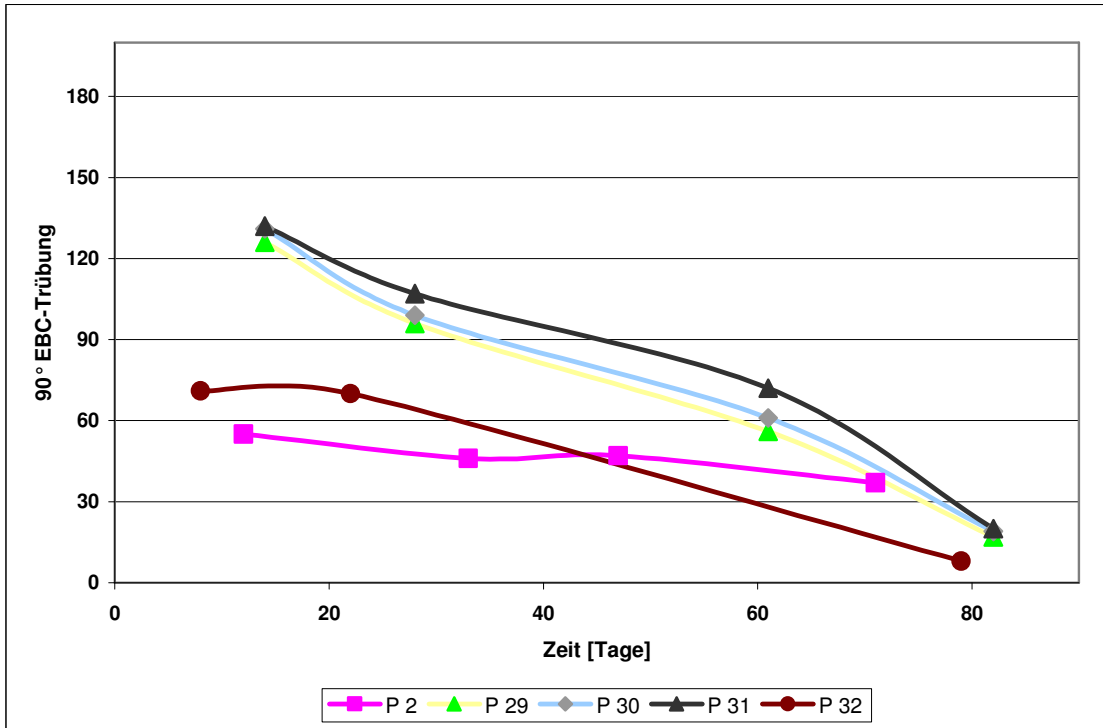


Abbildung 4.1.2: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7

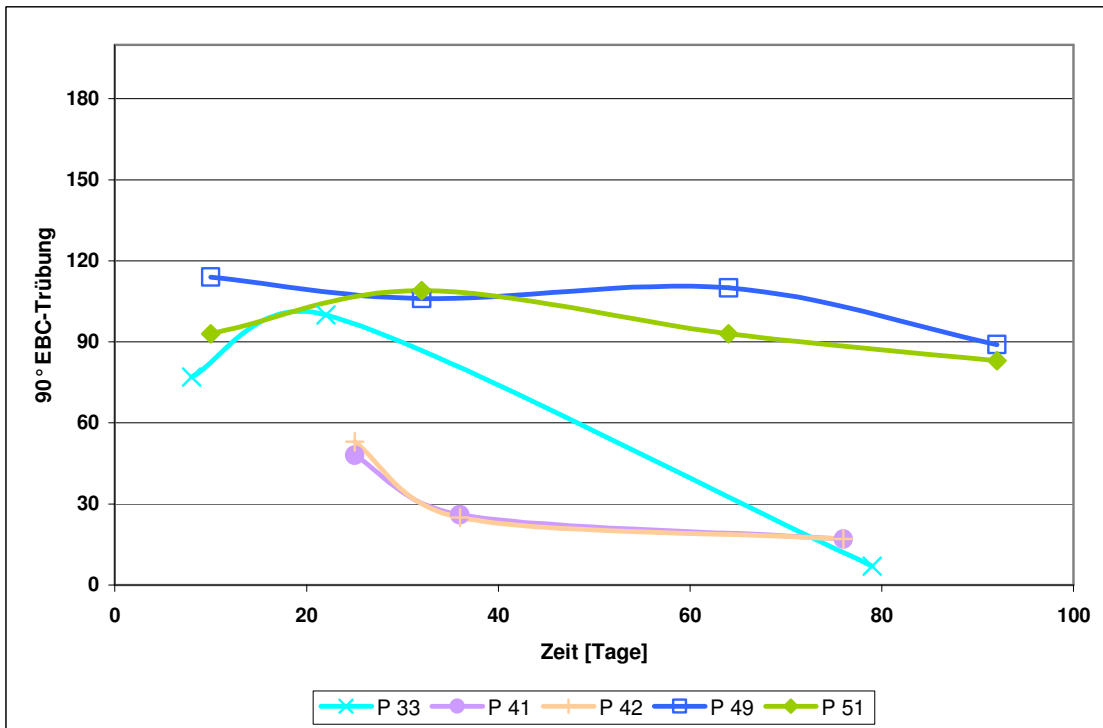


Abbildung 4.1.3: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7

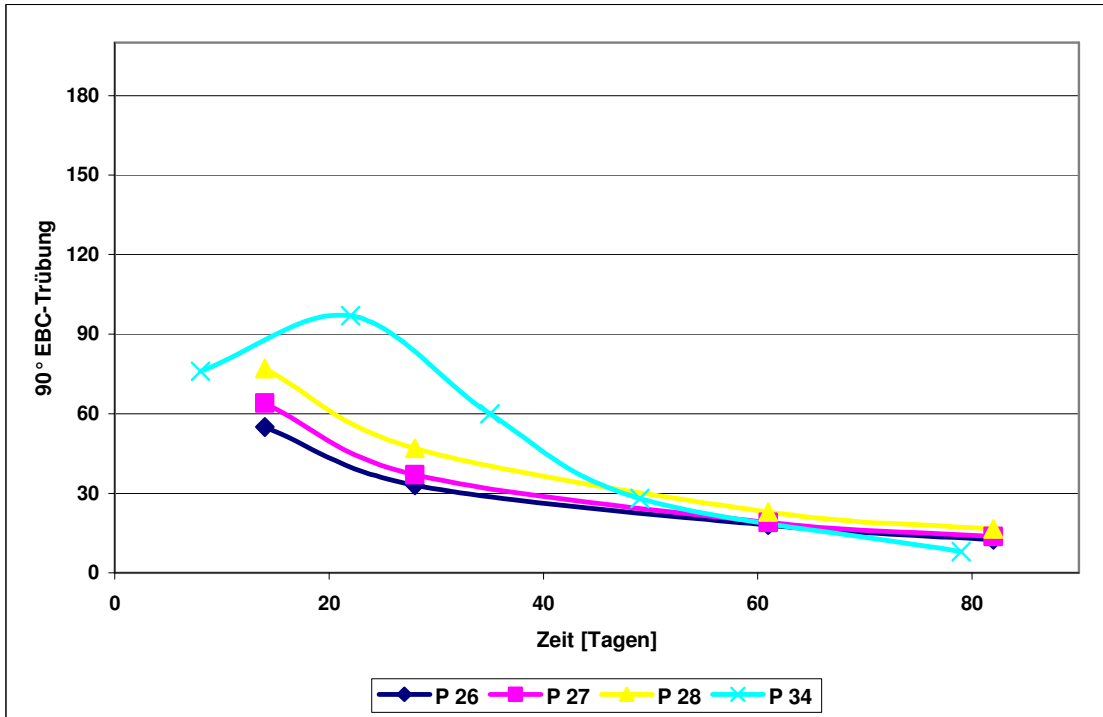


Abbildung 4.1.4: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ $90^\circ/25^\circ$ zwischen 0,7 und 0,8

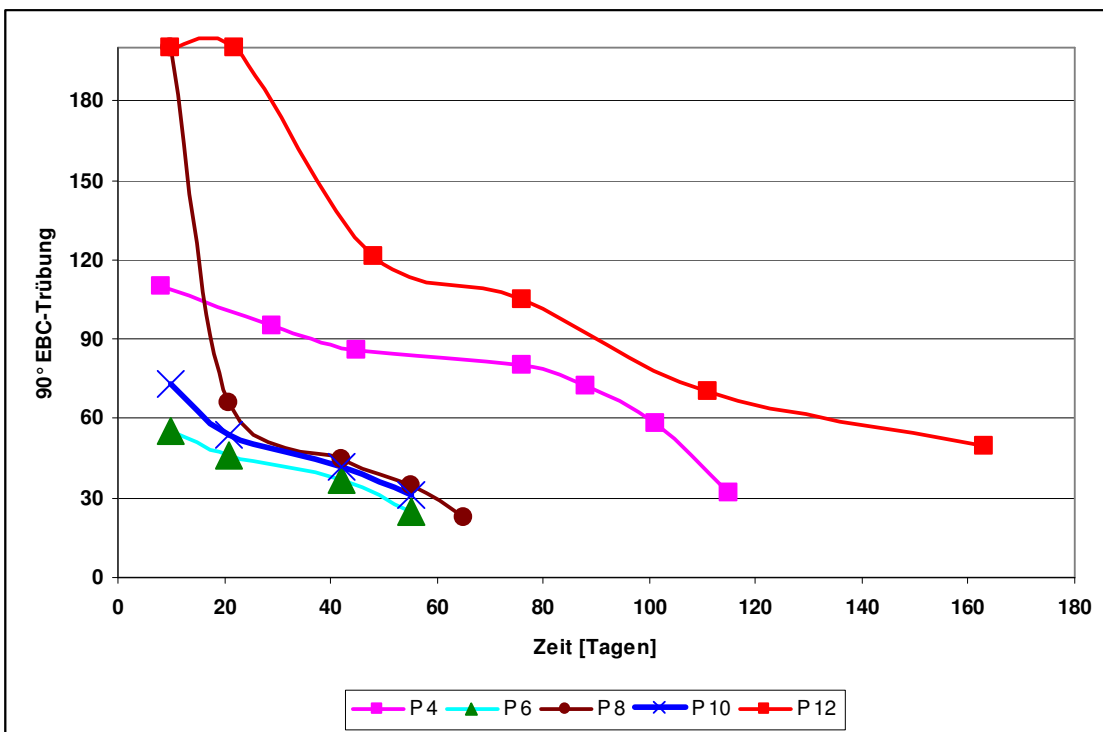


Abbildung 4.1.5: Trübungsverlauf für Proben mit einer VZ $90^\circ/25^\circ > 0,9$

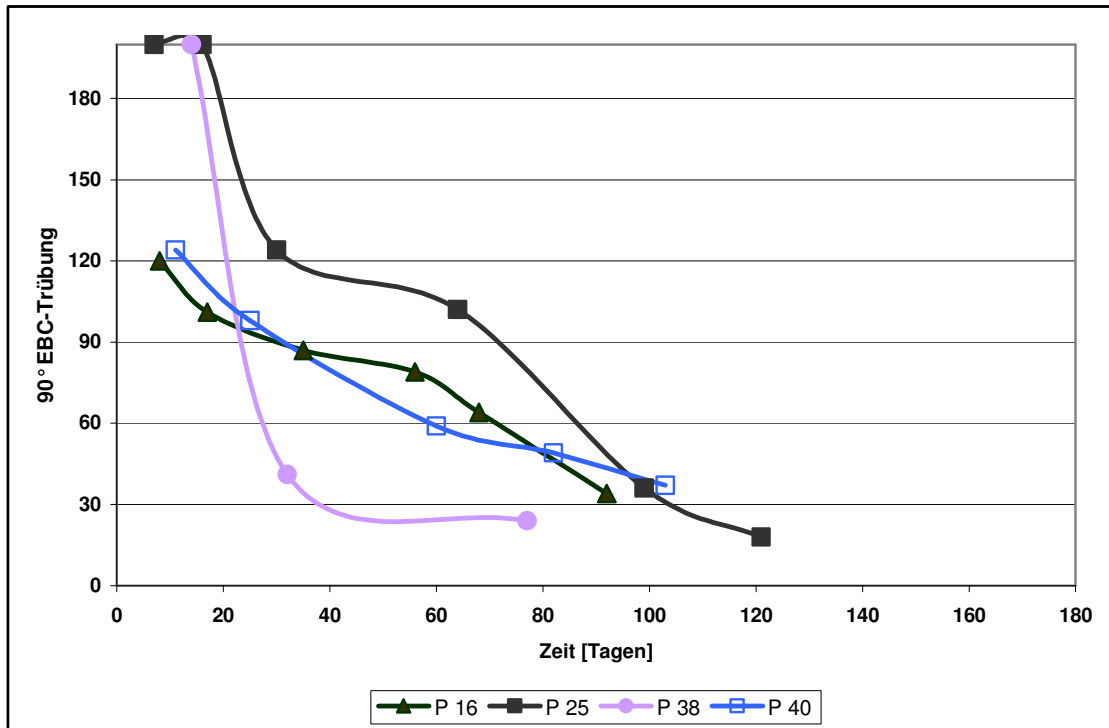


Abbildung 4.1.6: Trübungsverlauf für Proben mit einer $VZ_{90^\circ/25^\circ} > 0,9$

Parallel zu den Trübungsmessungen wurden die Partikelgrößenverteilungen der Proben bestimmt. Die Proben mit einer $VZ_{90^\circ/25^\circ} < 0,8$ zeigten entweder eine mono- oder eine bimodale Partikelgrößenverteilung (s. Anhang Kap. 4.1, Abbildungen A 4.1.1–A 4.1.5). Lediglich die Proben mit einer $VZ_{90^\circ/25^\circ} > 0,9$ zeigten alle eine monomodale PGV, mit einem Maximum im Bereich $< 1 \mu\text{m}$ (s. Anhang Kap. 4.1, Abbildungen A4.1.6 und A4.1.7), wodurch sich nur für diesen Bereich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der $VZ_{90^\circ/25^\circ}$ und der PGV herstellen lässt. Demnach haben insbesondere Weizenbiere mit einer $VZ_{90^\circ/25^\circ} > 0,9$ und damit verbundenen monomodalen PGV ein geringeres Agglomerationspotenzial und gleichzeitig überwiegend Partikeln $< 1 \mu\text{m}$, welche nur noch sehr langsam sedimentieren bzw. in Schwebelag bleiben. Im Vergleich dazu scheinen Weizenbiere mit einer bimodalen Partikelgrößenverteilung stärker zu Agglomeration bzw. Koagulation zu neigen, so dass sich kleinere Partikeln zu größeren zusammenlagern und durch die neu gewonnene Größe schneller sedimentieren.

Für die Praxis lässt sich aufgrund dieser Ergebnisse eine tendenzielle Vorhersage der Trübungsstabilität machen. Im Rahmen der betrieblichen Qualitätssicherung

kann durch regelmäßige Streulichtmessungen die Veränderung der Trübung über die Zeit dokumentiert und aufgrund dieser Erfahrungswerte die Trübungsstabilität vorhergesagt werden. Darüber hinaus können die Auswirkungen veränderter Brautechnologie oder Rohstoffqualität frühzeitig erkannt und im Falle einer zu erwartenden Verschlechterung der Trübungsstabilität für nachfolgende Chargen entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden.

Die hier vorgeschlagene Definition für die Trübungsstabilität von Weizenbier basiert auf den während der Durchführung der Messungen gewonnenen Erfahrungen. Letztendlich muss jedoch jeder Betrieb entsprechend den spezifischen Qualitätsansprüchen, welche sehr unterschiedlich sein können, die Parameter für die Trübungsstabilität von Weizenbier definieren. So stellt sich im Wesentlichen die Frage, ob die Trübungsintensität bereits schon während des Verkaufs als Flaschenbier bei Zimmertemperatur erkennbar sein soll oder mehr Wert auf eine ausreichende Trübung während des Konsums gelegt wird. Entscheidet man sich für eine ausreichende Trübung bereits beim Verkauf des Flaschenbieres, so sollte auch berücksichtigt werden, dass durch das Abkühlen vor dem Konsum zusätzlich Kältetrübung erzeugt werden kann, so dass insgesamt eine zu intensive Trübung entsteht, die teilweise von Konsumenten nicht zwingend als positiv empfunden werden kann.

4.2 Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität von Weizenbier

Die Lagerbedingungen der abgefüllten Weizenbiere nach dem Verkauf unterscheiden sich im Gaststätten- und Privatkonsumentenbereich insbesondere in der Lagertemperatur vor dem Ausschank bzw. Konsum. Entweder wird das Bier bereits nach Anlieferung bzw. Abholung gekühlt (Aufbewahrung des Fass- und Flaschenbieres in Kühlräumen) oder es wird kurz vor dem Ausschank über einen Durchlaufkühler gekühlt bzw. der Flaschenbierkühlschrank täglich aufgefüllt. Aus diesem Grund wurde überprüft, wie sich eine Kalt- bzw. Warmlagerung (4 °C bzw. 20 °C) bei Flaschenweizenbier der gleichen Abfüllung auf die Trübungsintensität im Überstand der 0,5 l-Flaschen bei einer Messtemperatur von 12 °C auswirkt.

Die Verläufe der 90°-Streulichtintensität sind in den nachfolgenden Abbildungen 4.2.1 und 4.2.2 für Biere mit einer $VZ_{90/25^\circ} < 0,7$ bzw. $> 0,9$ dargestellt. Probenpaare sind durch eine Strichverbindung in den Diagrammen kenntlich gemacht. Bei allen untersuchten Proben führte die kalte Lagerung, unabhängig von der $VZ_{90/25^\circ}$, zu einer schnelleren Abnahme der Trübungsintensität und damit zu einer niedrigeren Trübungsstabilität. Dabei zeigten Biere mit einer monomodalen Partikelgrößenverteilung (PGV) relativ gesehen eine geringere Abnahme der Trübung als Biere mit einer bimodalen PGV, wie in den Abbildungen 4.2.3 und 4.2.4 dargestellt. Biere mit einer bimodalen PGV neigen bei Temperaturerniedrigung mehr zur Bildung grober Partikeln, was zu einer deutlichen Steigerung der Trübungsintensität führt. Dieser Effekt kann auch in der Praxis bei Flaschenweizenbieren beobachtet werden, die bei Raumtemperatur häufig nur eine geringe Trübung aufweisen, welche mit sinkender Temperatur deutlich zunimmt. Diese kälteinduzierte Trübung ist jedoch nicht stabil, da die großen Partikeln schneller sedimentieren und auch eine Sogwirkung auf kleinere Partikeln haben können. In der Literatur wird für Kälte-trübung in untergärigen Bieren eine Partikelgröße von 0,1–1 µm angegeben. Die Messungen zeigen, dass Kälte-trübung in Weizenbier durchaus auch aus größeren Partikeln zusammengesetzt sein kann. Letztendlich bleibt die Frage offen, welche Faktoren eine mono- bzw. bimodale Verteilung hervorrufen. In Anbetracht der Ergebnisse sollten in der Praxis, und vor allem im Fassbierausschank, lange Lagerzeiten bei sehr niedrigen Temperaturen vermieden werden, wobei bei der Wahl der Lagertemperatur nach der Abfüllung

auch der Geschmacksstabilität Rechnung getragen werden muss.

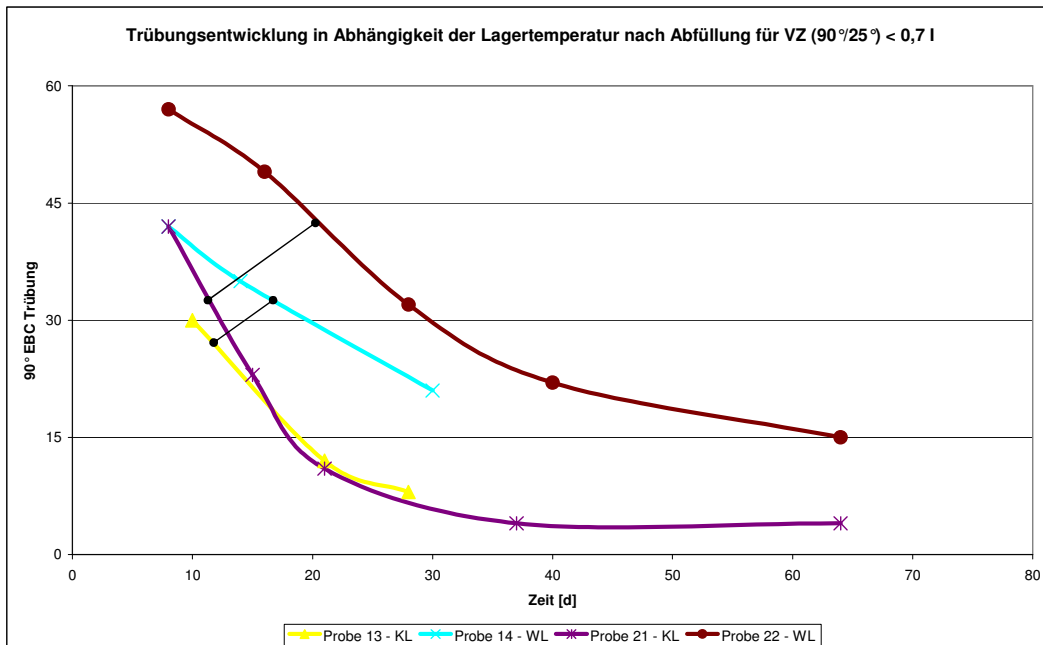


Abbildung 4.2.1: Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität für Weizenbier mit einer VZ 90°/25° < 0,7

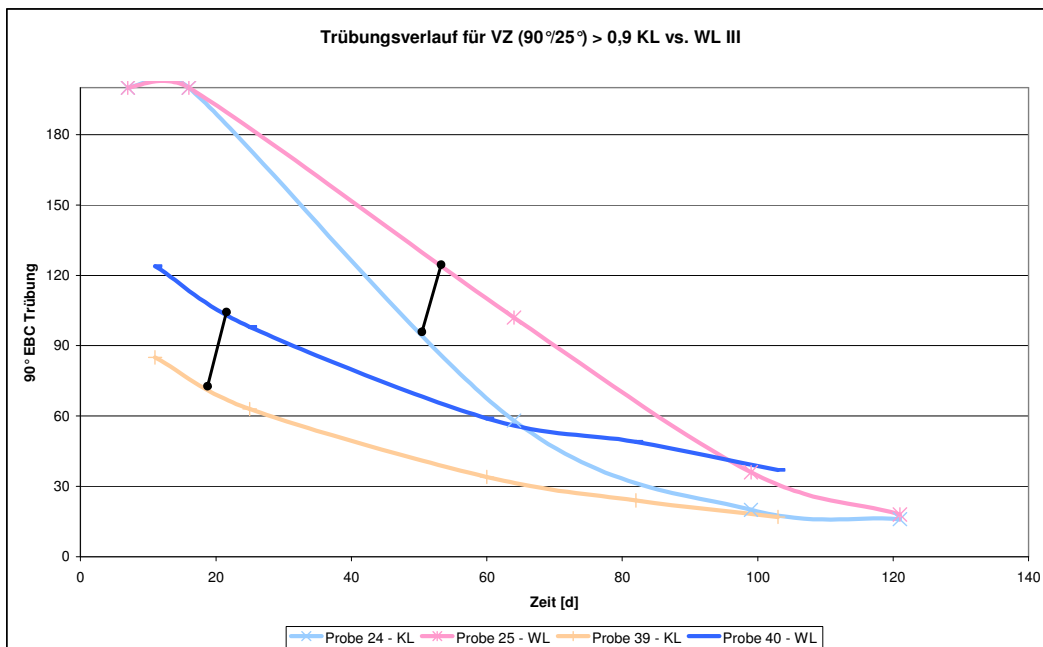


Abbildung 4.2.2: Einfluss der Temperatur nach der Abfüllung auf die Trübungsstabilität für Weizenbier mit einer VZ 90°/25° > 0,9

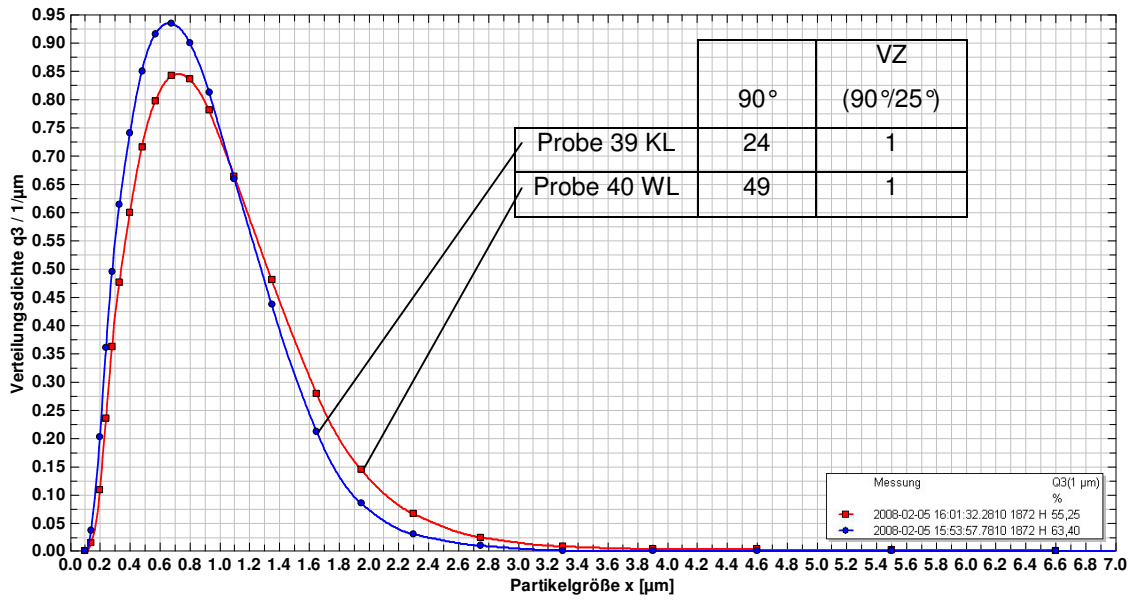


Abbildung 4.2.3: Einfluss der Lagertemperatur auf die PGV

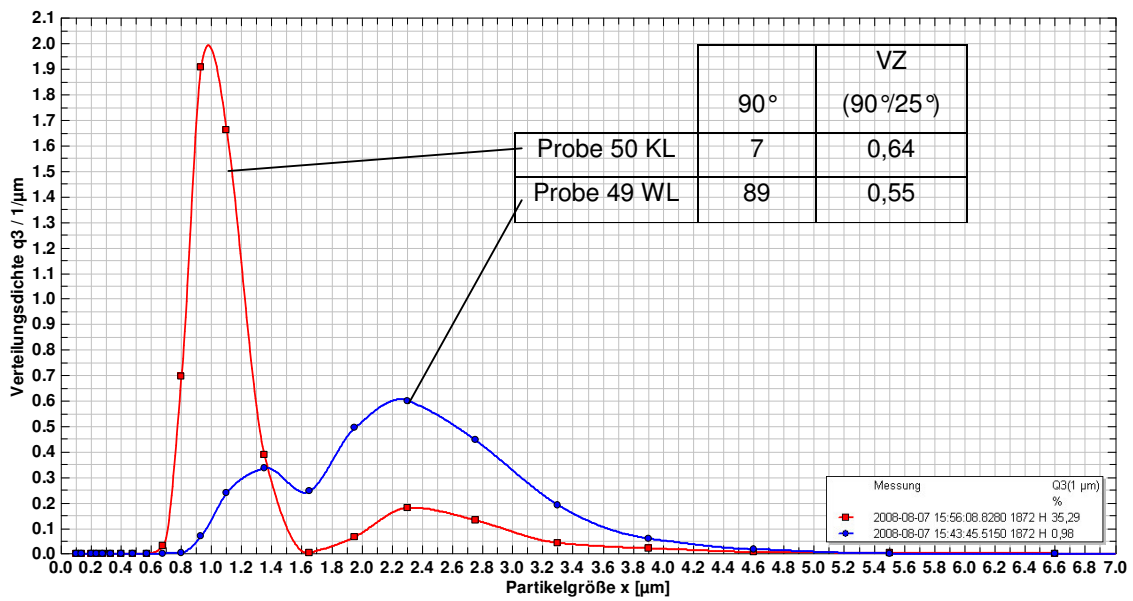


Abbildung 4.2.4: Einfluss der Lagertemperatur auf die PGV

4.3 Quantifizierung von Partikeln

Da die Partikelgrößenverteilung (mono- bzw. polydispers) als auch die Partikelgröße bzw. der Partikeldurchmesser wesentlich die Sedimentationsgeschwindigkeit bzw. das Sedimentationsverhalten beeinflussen können, wurde untersucht, wie sich die Partikelgrößenverteilung über die Zeit nach der Abfüllung in Flaschenbier verändert. Abbildung 4.3.1 zeigt die Partikelgrößenverteilung ca. 24 Stunden nach der Abfüllung, gemessen bei 12 °C.

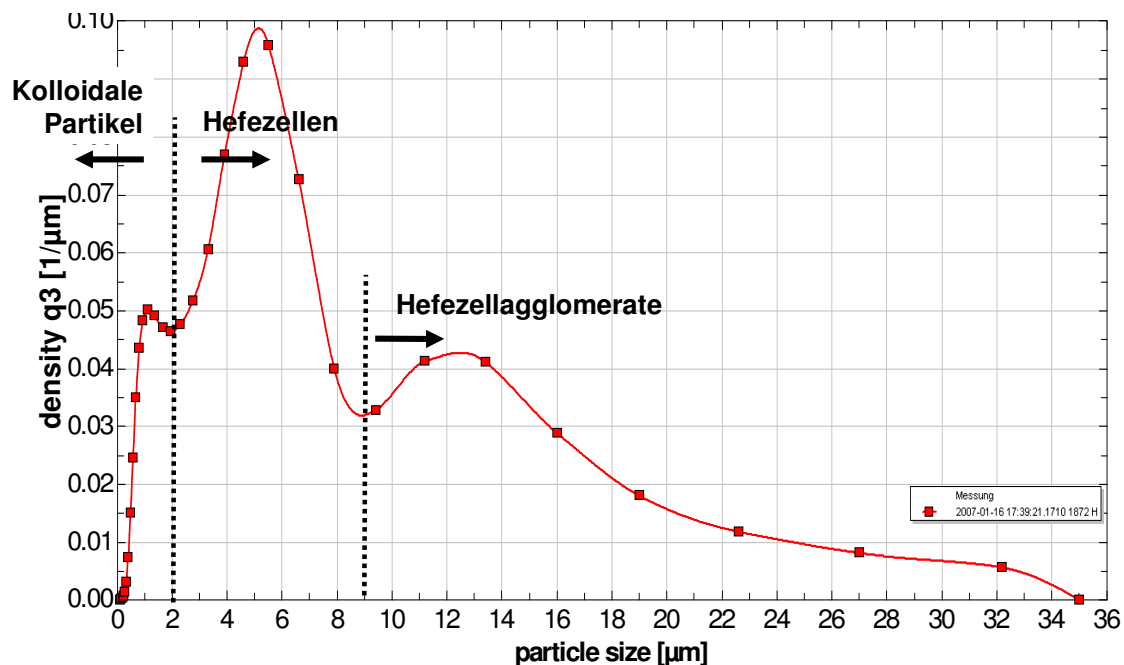


Abbildung 4.3.1: Partikelgrößenverteilung aus dem Überstand von Weizenbier ca. 24 Stunden nach der Abfüllung

Zu erkennen ist eine trimodale Verteilung, wie auch in den Untersuchungen von FISCHER et al. [68] beschrieben. Der erste Peak im Bereich von 1 μm wird durch Kolloide verursacht. Der zweite Peak bei 5 μm wird durch einzelne Hefezellen und der dritte Peak bei 12–13 μm durch die für obergärige Hefestämme typischen Sprossverbände und agglomerierte Hefezellen hervorgerufen. Die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung vier Wochen später ist in Abbildung 4.3.2 dargestellt und zeigt, dass nahezu alle Partikeln und Hefen > 2 μm aus dem Überstand sedimentiert sind und die verbliebenen Partikeln ein Maximum im Bereich von 1 μm aufweisen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von WEIKL [40], der feststellte, dass Partikeln

im Größenbereich von $\leq 1 \mu\text{m}$ kaum noch sedimentieren und damit stabile Trübungen erzeugen können. WEIKL führte allerdings die Sedimentationsanalyse an stark verdünnten Proben durch, um Partikelwechselwirkungen ausschließen zu können. Um das reale Sedimentationsverhalten und weitere Zusammenhänge, wie Partikelwechselwirkungen und den Zusammenhang zwischen Partikelkonzentration und Trübungsintensität beurteilen zu können, wurde eine Methode zur Quantifizierung von Partikeln ausgearbeitet, die eine mengenmäßige Erfassung (Volumenanteil) der Partikeln direkt in der unverdünnten Probe erlaubt. Die Grundlagen zur Partikelquantifizierung wurden in Kapitel 3.2.8 dargestellt und die Durchführung der Partikelquantifizierung in der Praxis an einem Beispiel erklärt.

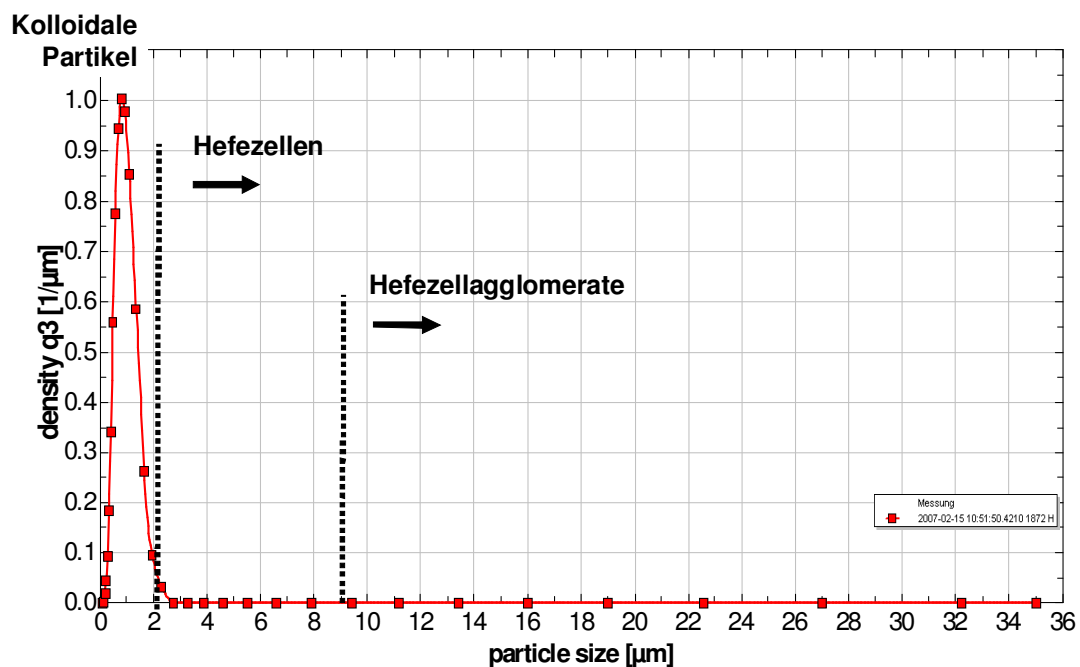


Abbildung 4.3.2: Partikelgrößenverteilung im Überstand von Weizenbier vier Wochen nach Abfüllung

4.3.1 Statistische Bewertung der Partikelquantifizierung

Die Genauigkeit der Partikelquantifizierung hängt im Wesentlichen von der Hefezellzahlbestimmung und der Wiederholbarkeit der Partikelmessung ab. Die Hefezellzahlbestimmung wurde für jede Messreihe zehnfach durchgeführt. Die Wiederholbarkeit der Partikelmessung wurde mit einer selbst hergestellten Hefesuspension (Partikelstandard) und mit weitgehend hefefreiem Weizenbier durch

Mehrfachmessungen überprüft. Die Reproduzierbarkeit für die Partikelmessung der Hefesuspension ist in Abbildung 4.3.3 wiedergegeben, die Reproduzierbarkeit der Partikelmessung für das Weizenbier in Abbildung 4.3.4.

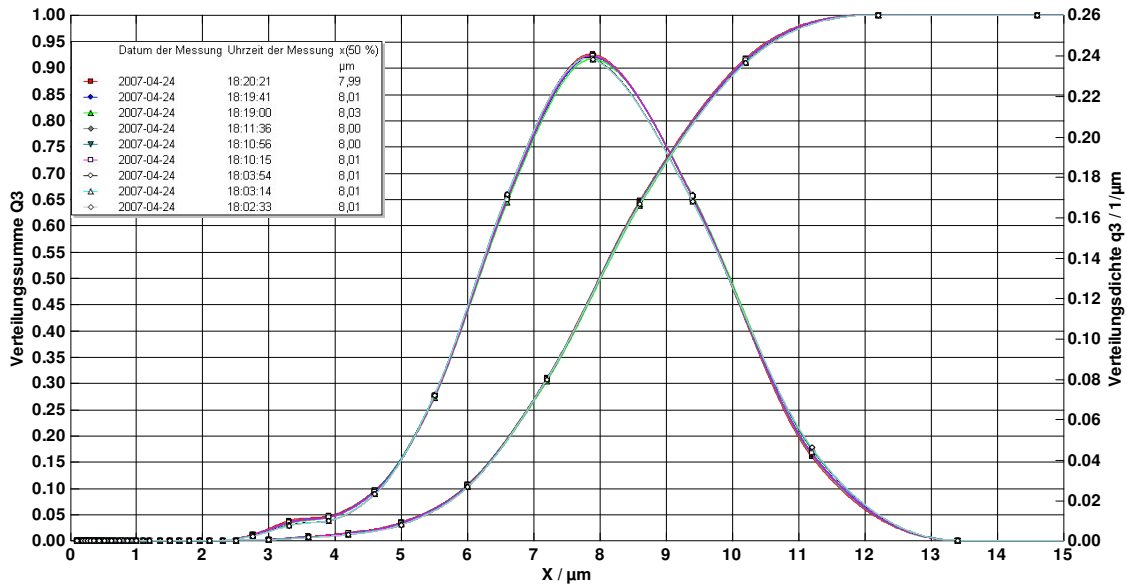


Abbildung 4.3.3: Wiederholbarkeit der Partikelmessung für Hefestandard

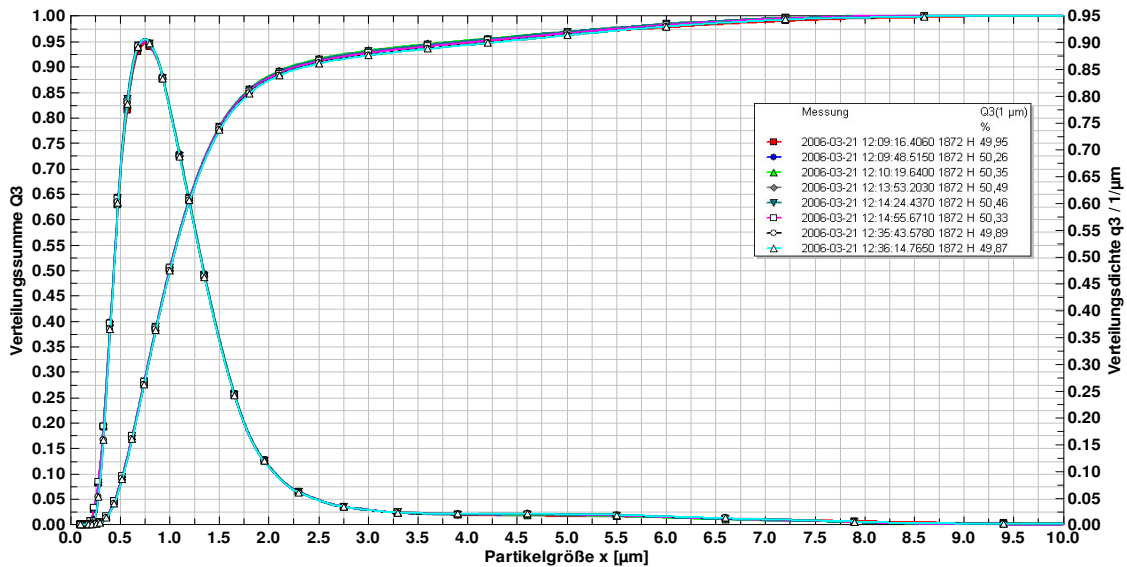


Abbildung 4.3.4: Wiederholbarkeit der Partikelmessung für den Submicronbereich

Die Mehrfachmessung der Hefesuspension zeigte folgendes Ergebnis:

- Mittelwert für $Q_3 = 50\%$: 8,01 μm
- Standardabweichung: 0,01 μm
- Variationskoeffizient: < 0,0013

Aufgrund der geringen Standardabweichung und des niedrigen Variationskoeffizienten wurde die messtechnische Abweichung für den x_{50} -Wert des Hefestands in der Berechnung der Partikelkonzentration nicht berücksichtigt.

Die statistische Auswertung der Mehrfachmessung für das hefearme Weizenbier zeigte folgendes Ergebnis:

Mittelwert für Q_3 ($x = 1 \mu\text{m}$):	0,502
Standardabweichung:	0,0026
Variationskoeffizient:	< 0,0051

Auch für das Weizenbier mit einem relativ hohen Anteil an Partikeln $< 1,5 \mu\text{m}$ wurde eine sehr gute Wiederholbarkeit festgestellt. Die geringe messtechnische Abweichung, die hier Ausdruck in der geringen Standardabweichung bzw. im niedrigen Variationskoeffizienten findet, wurde bei der Berechnung der Partikelvolumenfraktionen nicht berücksichtigt.

4.3.2 Veränderung der Partikelkonzentration über die Zeit und ihr Einfluss auf die Trübung

Die Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ über die Zeit wurde mit der in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Methode zur Partikelquantifizierung untersucht.

Im Vergleich zur Streulichtintensität veränderte sich die Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ über die Zeit nur gering. In Abbildung 4.3.5 ist die Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ im Vergleich zur abnehmenden Trübungsintensität für ein relativ trübungsstabiles Weizenbier zu sehen, in Abbildung 4.3.6 für ein Weizenbier mit einer geringen Trübungsstabilität. Die Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ zeigte für unterschiedliche Proben sowohl eine Zu- als auch eine Abnahme über die Zeit. Eine Erklärung für beide Phänomene könnte die stetige Vergrößerung des Partikelgefüges durch Koagulation bzw. Agglomeration sein. Bei einer Abnahme der Partikelkonzentration $< 1,5 \mu\text{m}$ überwiegt die Vergrößerung der Partikeln, wodurch eine verstärkte Sedimentation stattfindet und diese Partikeln dann nicht mehr im Überstand vorhanden sind. Kommt es zu einem Zuwachs dieser Fraktion, überwiegt die Agglomeration bzw. Koagulation sehr kleiner Partikeln (z. B. Nanopartikeln) zu größeren Partikeln, welche erst durch die Vergrößerung vom Partikelmessgerät

erfasst werden können. Damit wird deutlich, dass die Trübungsstabilität nicht nur von der Partikelgröße abhängt, welche WEIKL in stark verdünntem Weizenbier mit $> 1 \mu\text{m}$ als kritische Partikelgröße ermittelte, sondern auch von Partikelwechselwirkungen, die durch eine Vielzahl von Faktoren, wie Ionenkonzentration, pH-Wert, Partikelgröße etc. und von äußeren Kräften, wie z. B. der BROWNSchen Molekularbewegung, beeinflusst werden. Die Bestimmung der Partikelkonzentration bzw. ihre Veränderung über die Zeit erlaubt in gewissen Grenzen eine tendenzielle Aussage über die Intensität von Partikelwechselwirkungen.

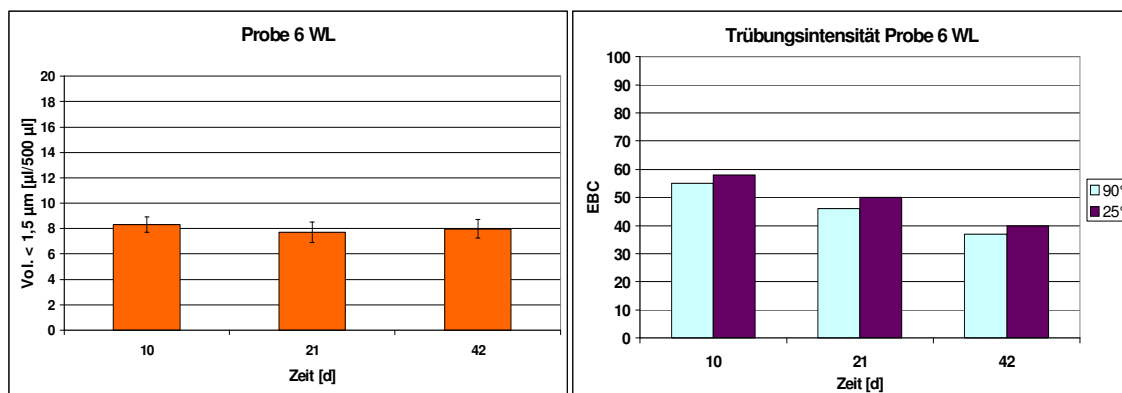


Abbildung 4.3.5: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität für ein Bier mit höherer Trübungsstabilität

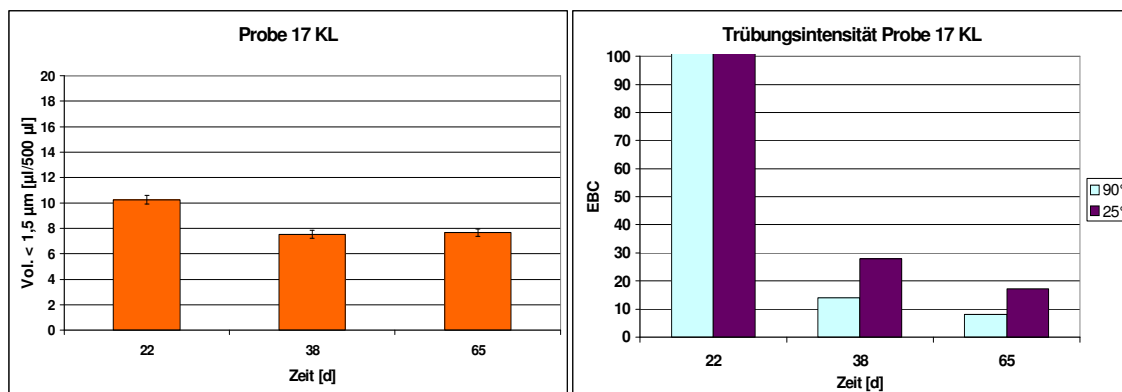


Abbildung 4.3.6: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität für ein Bier mit niedriger Trübungsstabilität

Die Veränderung der Partikelkonzentration $< 1,5 \mu\text{m}$ und der Gesamtpartikelkonzentration der untersuchten Proben sind im Anhang von Kapitel 4.3 in den Abbildungen A 4.3.1 ff dargestellt. Auch wenn für einige Proben ein

Verhältnis zwischen der 90°- und 25°-Streulichtintensität und der Partikelkonzentration $< 1,5 \mu\text{m}$ bzw. der Gesamtpartikelkonzentration zu bestehen scheint, so konnte unter Berücksichtigung aller Proben kein Verhältnis zwischen der Trübungsmessung und der Gesamtpartikelkonzentration hergeleitet werden. Dies liegt insbesondere in der Kalibrierung von Streulichtmessgeräten mit Formazinstandard begründet, wodurch das reale Streulichtverhalten von Suspensionen nicht wiedergegeben wird. In der täglichen Filtrationspraxis kann dieses Phänomen beobachtet werden, wo in der Regel im filtrierten Bier der 90°-Streulichtwert zwei- bis vierfach höher ist als der 25°-Streulichtwert, was der MIE-Theorie widerspricht, da Partikeln in der Regel eine größere Vorwärts- als Rückwärtsstreuung aufweisen.

Durch die Partikelquantifizierung können Rückschlüsse auf Partikelwechselwirkungen gezogen werden. Die alleinige Kenntnis der Partikelgrößenverteilung und der Partikelkonzentration lassen aufgrund noch mangelnder Erfahrungen keine Rückschlüsse auf das reale Streulichtspektrum zu. Aus diesem Grund muss zusätzlich die Streulichtmessung durchgeführt werden, um auch die letztendlich entscheidende Information über die Trübungsintensität zu erhalten.

4.4 Verbesserung der Trübungsstabilität durch den Einsatz von Wintergerstenmalz und alternativen Malzen

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 erwähnt, scheint für die Trübungsstabilität von Weizenbier bei den Rohstoffen insbesondere das verwendete Gerstenmalze von Bedeutung zu sein. Da in Vorarbeiten [7, 85] durch Sommergerstenmalz keine ausschlaggebenden Verbesserungen der Trübungsstabilität erzeugt werden konnten, wurde im Pilot- und Praxismaßstab der Einfluss verschiedener Wintergerstensorten auf die Trübung und auf weitere Qualitätsparameter untersucht. Darüber hinaus wurden die Trübungseigenschaften von Roggen-, Triticale- und Hafermalz untersucht.

4.4.1 Kleinbrauversuche mit verschiedenen Wintergerstenmalzen der Ernte 2008

Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Wintergersten auf die Trübungsstabilität wurden im 10 l-Maßstab Wintergerstenmalze der Ernte 2008 mit einem Weizenmalzanteil der Sorte Herrmann von 55 % verbraut. Folgende Wintergerstensorten wurden mit einem Schüttungsanteil von 25 % bzw. 45 % eingesetzt:

- *Cervoise*: 25 % und 45 %
- *Vanessa*: 25 % und 45 %
- *Esterel*: 45 %
- *Malwinta*: 25 %.

Für den Vergleichssud und zur Ergänzung des Gerstenmalzanteils wurde Malz der Sommergerstensorte *Tolar* verwendet.

Die deutlichsten Steigerungen der Trübungsstabilität zeigten die Sorten *Esterel* und *Vanessa* bei einem Schüttungsanteil von 45 %; eine leichte Verbesserung konnte mit *Malwinta* bei einem Schüttungsanteil von 25 % verzeichnet werden. In Abbildung 4.4.1 sind die Trübungswerte der Biere 69 Tage nach der Abfüllung dargestellt. Ein Vergleich der chemisch-technischen Würzeanalysenwerte (Anhang Tabelle A 4.4.2 und Abbildung A 4.4.1) zeigte, dass die Trübungsstabilität in dieser Versuchsreihe zum Einen vom Verhältnis Anthocyanogene bzw. Tannoide zum Gesamt-Stickstoff abzuhängen scheint, welches bei dem trübungsstabilsten Bier mit

45 % *Esterel* am höchsten war. Die Analysenwerte sind in Tabelle 4.4.1 aufgeführt.

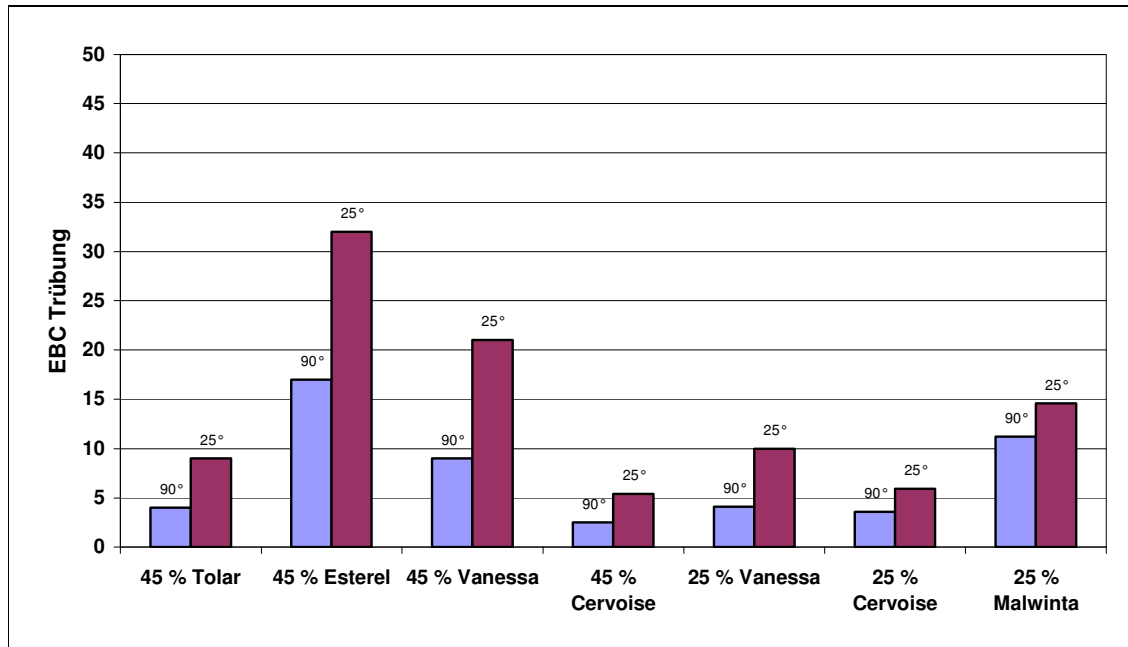


Abbildung 4.4.1: Trübungsintensität nach 69 Tagen für Weizenbiere mit unterschiedlichen Schüttungsanteilen für verschiedene Wintergerstenmalze, hergestellt im 10 l-Maßstab

Die Probe mit 45 % *Vanessa* zeigte die zweithöchste Trübungsstabilität bei einem niedrigeren Verhältnis von Anthocyanogene bzw. Tannoide zu Gesamt-N. Zusätzlich dürfte der erhöhte Jodwert beider Proben mit 0,8 und 0,78 einen Beitrag zur Trübungsstabilität haben, was auch die dem Vergleichsbier gegenüber verbesserte Trübungsstabilität des Bieres mit einem Anteil von 25 % *Malwinta* bei einem photometrischen Jodwert von 1,34 zeigte. Die verbesserte Trübungsstabilität mit jeweils 45 % *Esterel* und *Vanessa* zeigte sich auch in der VZ 90°/25°, die für diese Proben bei der ersten Messung nach 15 Tagen mit 0,65 und 0,63 am höchsten war. Neben einer teilweise höheren Trübungsstabilität zeigten vor allem die Biere mit 45 % Wintergerstenmalz bei der ersten und zweiten Trübungsmessung nach 15 und 34 Tagen deutlich höhere Trübungswerte als das Vergleichsbier (s. Anhang Abbildungen A 4.4.2 und A 4.4.3). Brautechnologisch brachte der Einsatz von Wintergerstenmalz aber auch teilweise deutliche Nachteile in der Verarbeitung und für die Bierqualität mit sich. Insbesondere lange Läuterzeiten (Anhang Tabelle A 4.4.1) und teilweise niedrigere Schaumstabilitäten (Anhang Tabelle A 4.4.3) sowie eine schlechtere sensorische Bewertung sind hier hervorzuheben (Anhang Abbildungen A 4.4.4 und A 4.4.5). Zusammenfassend zeigte *Esterel* in der

qualitativen und sensorischen Beurteilung die besten Ergebnisse.

Tabelle 4.4.1: Würzeanalysen der Biere aus verschiedenen Wintergerstenmalzen mit unterschiedlichen Schüttungen

	Anthocyanogene [mg/l]/ Ges.-N [mg/100 ml]	Tannoide [mg/l]/ Ges.-N [mg/100 ml]	photom. Jodwert
45 % TOL	0,28	0,17	0,72
45 % EST	0,51	0,55	0,8
45 % VAN	0,37	0,25	0,78
45 % CER	0,38	0,20	0,45
25 % VAN	0,32	0,17	0,42
25 % CER	0,23	0,17	0,95
25 % MAL	0,16	0,14	1,336

Die Versorgung mit qualitativ hochwertiger Sommerbraugerste in ausreichendem Maß litt in den letzten Jahren zunehmend unter dem Rückgang der Anbauflächen und durch klimatisch bedingte Ernteauffälle und förderte die züchterischen Anstrengungen zur Entwicklung von brautauglichen Wintergerstensorten. Da die Entwicklung einer Qualitätsbrauweizensorte aus züchterischer Sicht nicht lukrativ ist und Gerstenmalz insbesondere für die Trübungsstabilität eine größere Bedeutung hat, sollte die Entwicklung von Wintergerstensorten und ihre Eignung zur Weizenbierbereitung beobachtet werden. Insbesondere Sorten, die für untergärige Biere ungeeignet sind, könnten gerade für Weizenbiere und sonstige naturtrübe Biere die gewünschten trübungspositiven Eigenschaften aufweisen.

4.4.2 Praxisversuche mit der Wintergerstensorte Esterel

Nachdem in Vorversuchen im 10 l-Maßstab mit der Wintergerstensorte *Esterel* die Trübungsstabilität deutlich verbessert werden konnte, wurden in einer Brauerei Versuche mit einem Schüttungsanteil von 22 % und 40 % durchgeführt. Parallel zu den Vorversuchen konnte auch im Praxismaßstab eine deutliche Verbesserung der Trübungsstabilität erreicht werden. Die höchste Trübungsstabilität nach 2 Monaten (64 Tagen) zeigte das Bier mit einem Schüttungsanteil von 22 % *Esterel*, wie in Abbildung 4.4.2 zu sehen ist. Der Einsatz des Wintergerstenmalzes führte in der ersten Trübungsmessung nach zehn Tagen zu einer dem Vergleichsbier gegenüber leicht verbesserten VZ 90°/25° von 0,57 auf 0,63 bzw. 0,67. Trotzdem zeigte das

Bier mit 22 % *Esterel* ($VZ\ 90^\circ/25^\circ = 0,63$) nach zwei bzw. drei Monaten die höchsten Trübungswerte. Die Trübungsstabilität aller Proben ist insgesamt als gut zu werten, da auch nach über drei Monaten keine Probe unter 30 EBC-Trübungseinheiten in der 90°-Messung gefallen war. Da keine Würzeanalysen durchgeführt werden konnten, kann nur vermutet werden, inwieweit ein günstigeres (höheres) Verhältnis von Anthocyanogenen bzw. Tannoiden zum Gesamtstickstoff für die Probe mit 22 % *Esterel* vorlag.

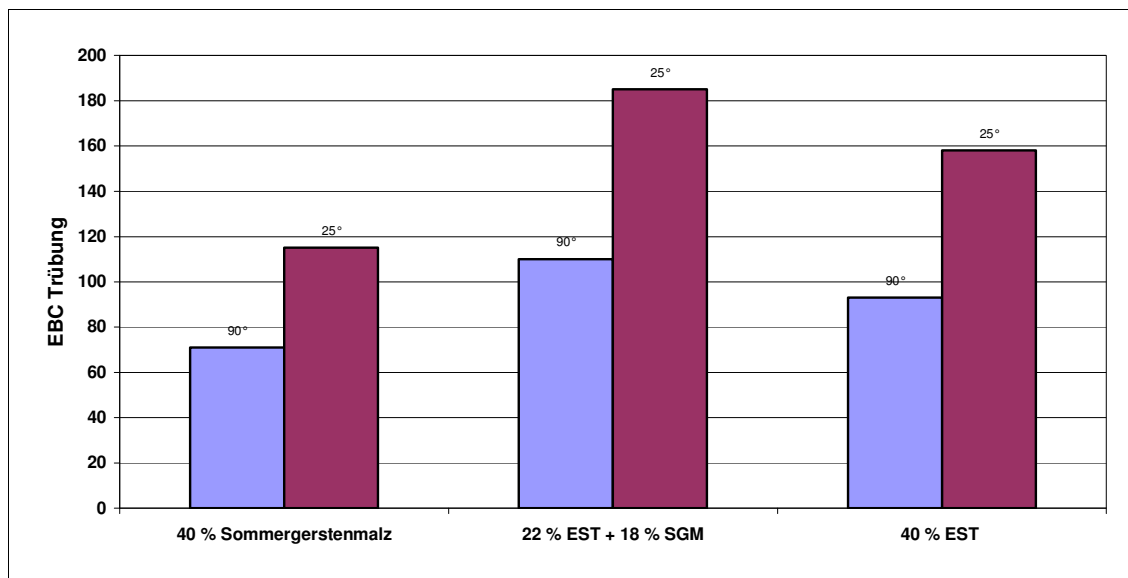


Abbildung 4.4.2: Einfluss der Wintergerstensorte *Esterel* auf die Trübungsstabilität von Weizenbier im Praxisversuch, 64 Tage nach der Abfüllung

In den durchgeführten Bieranalysen zeigte sich ein leichter Rückgang der Schaumstabilität mit zunehmender Schüttung an Wintergerste, der allerdings nur für die Probe mit 40 % *Esterel* signifikant war. In der sensorischen Bewertung der Biere konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Anhang Abbildungen A 4.4.6 und A 4.4.7). Der Einsatz von Wintergerstenmalz zeigte keinen großen Einfluss auf die für alle drei Proben bimodalen Partikelgrößenverteilungen, die nach 10, 34, 64 und 92 Tagen nach der Abfüllung gemessen wurden (Anhang Abbildungen A 4.4.8–A 4.4.11). Auffallend war, dass auch noch nach zwei bzw. drei Monaten im Überstand bis zu 6 µm große Partikeln vorhanden waren, welche sich durch das Abkühlen der Proben von 20–22 °C auf die Messtemperatur von 12 °C gebildet haben dürften. Die Biere wurden mit Flaschengärung hergestellt, so dass nach der Gebindegärung keine Kaltphase mehr erfolgte. Da eine Verschleppung von

Hefezellen in die Probe ausgeschlossen werden kann, müssen diese Partikel temperaturbedingt entstanden sein. Vermutlich ging mit der Absenkung der Temperatur eine Reduzierung der Löslichkeit im Bier einher, was zu einer Ausfällung von Bierinhaltsstoffen führte, welche nicht weiter klassifiziert wurden. Vermutlich handelte es sich um proteinische Stoffgruppen, die in der Regel für eine Kälte-trübung verantwortlich gemacht werden.

4.4.3 Trübungseigenschaften von Roggen-, Triticale- und Hafermalz

Nach dem vorläufigen Biergesetz ist der Einsatz von vermälztem Getreide zur Bereitung obergäriger Biere erlaubt. In diesem Versuch wurden die Trübungseigenschaften von Roggen-, Triticale- und Hafermalz untersucht. Roggen und Hafer unterscheiden sich genetisch von Gerste und Weizen und bilden eigenständige Getreidesorten, während Triticale eine Kreuzung aus Weizen (lat. *Triticum*) und Roggen (lat. *Secale*) darstellt. Biere aus diesen Getreidesorten finden zunehmend Verbreitung in der deutschen und internationalen Bierlandschaft. Da alternative Getreide brautechnologisch Verarbeitungsschwierigkeiten aufgrund ihrer Eigenschaften mit sich bringen können (z. B. verlängerte Läuterzeiten durch eine hohe Viskosität in der Würze), wurde in dieser Versuchsreihe das Weizenmalz durch Roggen-, Triticale- bzw. Hafermalz mit einem Schüttungsanteil von 50 % substituiert. Alle Biere zeigten eine hervorragende Trübungsstabilität, wie in Abbildung 4.4.3 zu sehen ist. Insbesondere das Bier mit Roggenmalz war besonders trübungsstabil und zeigte auch nach über 100 Tagen noch einen Trübungswert > 200 EBC für beide Streulichtwerte. Die Würzen und Biere unterschieden sich teilweise deutlich in der chemisch-technischen Analyse von Weizenbieren, insbesondere im Endvergärungsgrad und in den Gehalten an Gesamt-N und Polyphenolen (Anhang Kapitel 4.4.3). Zum Einen können Eiweiß-Gerbstoffverbindungen bekanntermaßen Trübungen im Bier hervorrufen. Der niedrige Endvergärungsgrad deutet darauf hin, dass ein vergleichsweise großer Anteil an Oligo- und Polymeren in den Bieren vorhanden war, welche zudem trübungsbildende Eigenschaften aufwiesen. Ein Zusammenhang zwischen einzelnen Analysenwerten und der Trübungsstabilität wurde nicht gefunden.

Alternative Rohstoffe haben teilweise eine deutlich veränderte Zusammensetzung an verschiedenen Stoffgruppen im Vergleich zu den typischen Brauereirohstoffen

Gerste und Weizen, was sich positiv auf die Trübungsstabilität auswirken, aber auch zu Verarbeitungsschwierigkeiten führen kann. Die Läuterzeiten waren z. B. sehr unterschiedlich: Für das Bier mit Hafermalz betrug die Läuterzeit 1,5 h, für das Triticalebier 2,5 h und für das Bier mit Roggenmalz knapp 4 h. Die an der Bildung von Trübungspartikeln beteiligten Stoffgruppen wurden nicht untersucht. Vielmehr sollte durch den Einsatz von alternativen Getreidesorten gezeigt werden, dass bei anderen Getreidesorten trübungspositive Eigenschaften noch vorliegen, die bei Gerste und insbesondere bei Weizen nicht mehr vorhanden sind oder aber nie vorhanden waren. Der Einsatz anderer vermälzter Getreidesorten als Weizen- und Gerstenmalz ist für obergärige Biere prinzipiell erlaubt; der Schüttungsanteil sollte jedoch so bemessen sein, dass der typische Weizenbiercharakter nicht signifikant verändert wird. Problematisch dürfte neben der Deklarationspflicht auch die Verfügbarkeit dieser Getreidesorten in vermälzter Form bei gleichbleibender Qualität bzw. mit gleichbleibenden Trübungseigenschaften sein, ähnlich wie bei der Versorgung mit Weizenmalz.

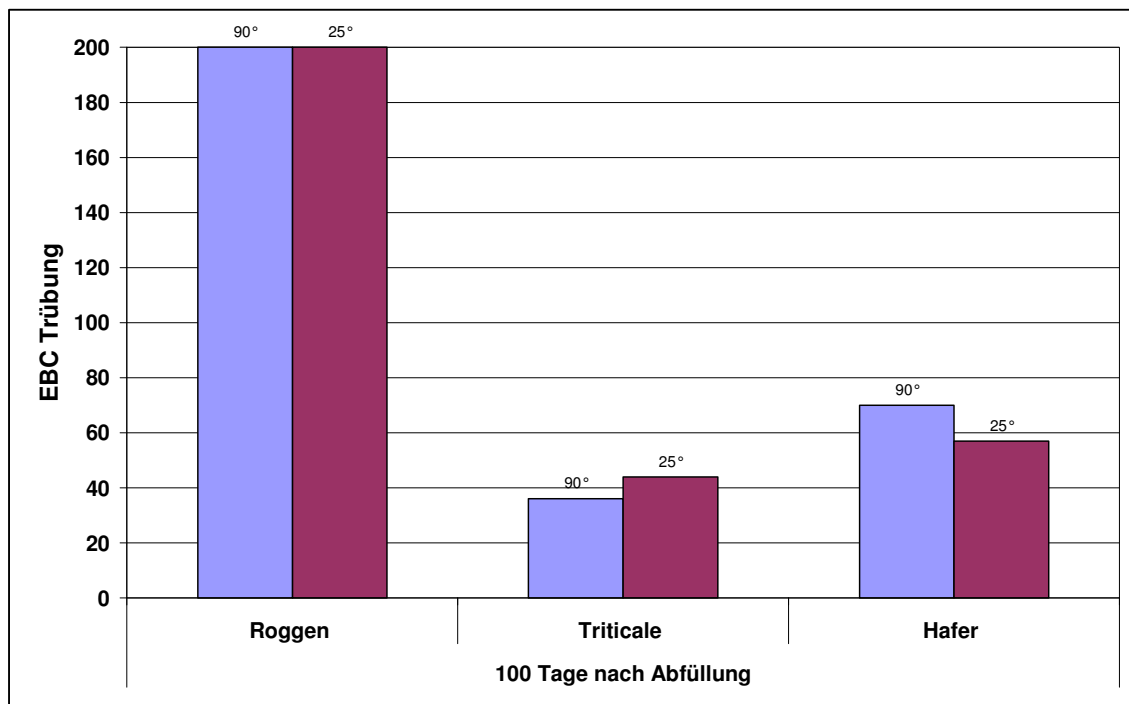


Abbildung 4.4.3: Trübungswerte von Roggen-, Triticale- und Hafermalzbieren 100 Tage nach der Abfüllung

4.5 Auswirkungen unterschiedlicher Gerbstoffkonzentrationen während des Maischens und der Würzekochung auf die Trübungsstabilität von Weizenbier

Die Ergebnisse aus Kapitel 4.4.1 zeigten für das trübungsstabilste Weizenbier mit einem Schüttungsanteil von 45 % der Wintergerstensorte *Esterel* ein den anderen Proben gegenüber erhöhtes Verhältnis von Anthocyanogenen bzw. Tannoiden zum Gesamtstickstoffgehalt von 0,5. Um den Einfluss des Gerbstoff-Gesamtstickstoff-Verhältnisses zu untersuchen, wurde durch den Zusatz von Hopfentreber (nach CO₂-Extraktion) als Polyphenolquelle die Gerbstoffkonzentration beim Maischen bzw. bei der Würzekochung variiert und die Trübungsentwicklung über die Zeit nach der Abfüllung untersucht. Die Versuche wurden im 60 l-Maßstab durchgeführt. Die Hopfentrebergabe betrug beim Einmaischen 1, 2 bzw. 3 g/l Maische und 1 bzw. 2 g/l Ausschlagwürze bei Kochbeginn.

Weder die Zugabe beim Maischen noch die Zugabe bei der Würzekochung zeigten einen positiven Einfluss auf die Trübungsstabilität, dargestellt in Abbildung 4.5.1. Durch die Zugabe von Hopfentreber beim Maischen und bei der Würzekochung konnten die Gehalte an Tannoiden und Anthocyanogenen gesteigert werden.

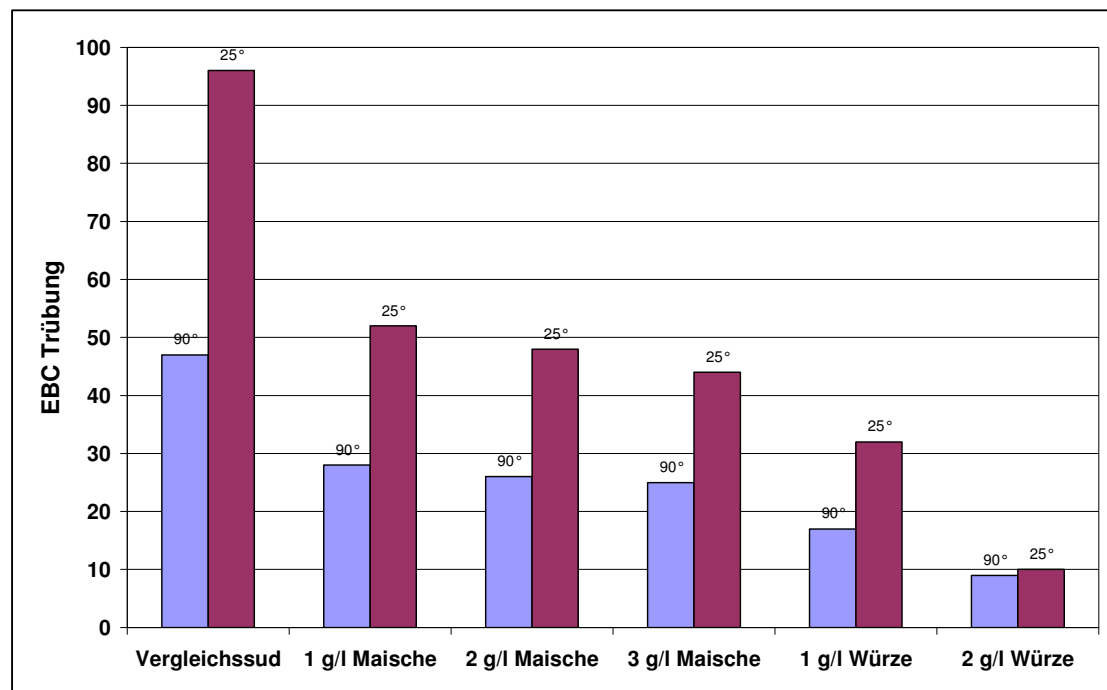


Abbildung 4.5.1: Einfluss verschiedener Hopfentreberdosagen beim Maischen und bei der Würzekochung auf die Trübungsstabilität 25 Tage nach der Abfüllung

Insbesondere die Zugabe bei der Würzekochung brachte eine verbesserte Löslichkeit der Gerbstoffe durch die höheren Temperaturen mit sich, so dass die höchsten Konzentrationen an Gerbstoffverbindungen in diesen Würzen gefunden wurden. In Abbildung 4.5.2 sind die Konzentrationen der Anstellwürzen an Gesamtstickstoff (Gesamt-N), Anthocyanogene, Tannoiden und die photometrischen Jodwerte dargestellt.

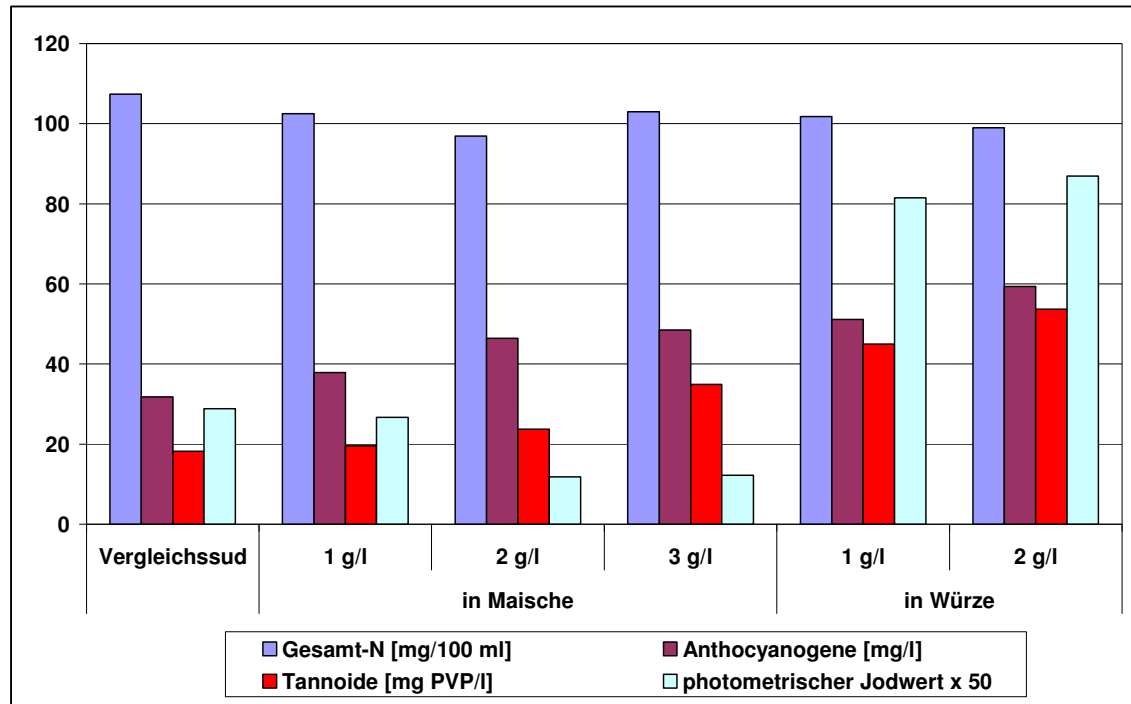


Abbildung 4.5.2: Gesamt-N-, Anthocyanogen-, Tannoidgehalte und photom. Jodwerte von Würzen mit unterschiedlichen Dosagen an Hopfentreiber beim Maischen und Würzekochen

Das angestrebte Verhältnis von Anthocyanogenen bzw. Tannoiden zum Gesamtstickstoff von 0,5 wurde annähernd für die Proben mit der Dosage bei der Würzekochung erreicht, jedoch ohne eine Verbesserung der Trübungsstabilität zu bewirken. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus Kapitel 4.4.1 ist hier ein gegenteiliger Trend zu erkennen. Mit steigender Konzentration der Gesamtpolyphenole bzw. Anthocyanogene und Tannoiden nahm die Trübungsstabilität ab, wie in Abbildung 45 dargestellt. Demnach scheinen die durch Hopfentreiber eingebrachten Polyphenole fäallend gewirkt zu haben. In Anbetracht dieser Ergebnisse und den Ergebnissen aus Kapitel 4.4.1 scheinen vor allem Polyphenole aus Malz eine positive Wirkung auf die Trübungsstabilität zu haben,

wobei die Polyphenolzusammensetzung immer im Zusammenhang zur Proteinzusammensetzung gesehen werden muss.

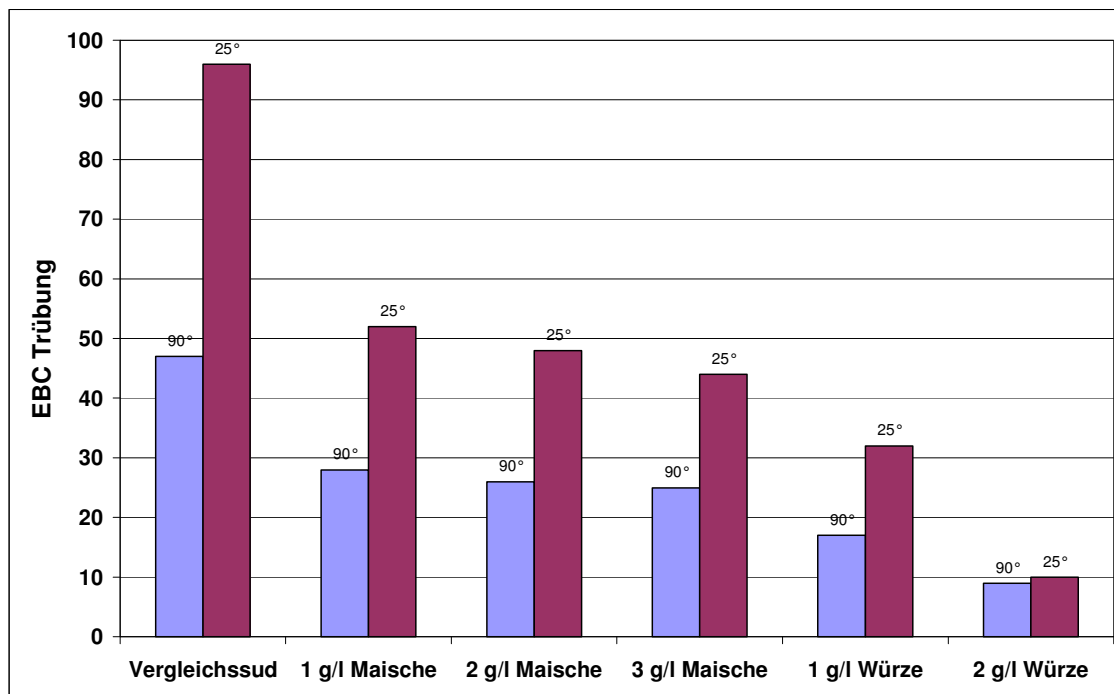


Abbildung 45: Trübungswerte der Weizenbiere mit Hopfentrebergabe während des Einmischens oder zu Kochbeginn 15 Tage nach der Abfüllung

Auffallend in der chemisch-technischen Analyse waren auch die verhältnismäßig hohen Jodwerte der Proben „1 g/l in Würze“ und „2 g/l Würze“ mit 1,6 und 1,7. Da diese Proben die niedrigste Trübungsstabilität mit insgesamt sehr niedrigen Trübungswerten bereits nach 15 Tagen zeigten, scheint der Einfluss von hochmolekularem alpha-Glucan für die Trübung von Weizenbier eine untergeordnete Rolle zu spielen. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass die für untergärige, filtrierte Biere trübungsrelevanten Stoffgruppen und deren Reaktionsmechanismen für die Trübung und Trübungsstabilität von Weizenbier nahezu keine Bedeutung haben.

4.6 Einfluss der Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität

Hinweise auf eine positive Wirkung der Kurzzeiterhitzung (KZE) finden sich in den Untersuchungen von BRANDL [34], der die verbesserte Trübungsstabilität auf die Koagulation von Proteinen bzw. eine Neubildung von Partikeln im Bereich $< 1 \mu\text{m}$ zurückführte, da gleichzeitig auch der koagulierbare Stickstoff durch die KZE abnahm. Zusätzlich stellte er die Erhöhung der VZ 90%/12° nach der Kurzzeiterhitzung fest. Die von BRANDL beschriebenen Zusammenhänge wurden in eigenen Versuchen anhand von Praxisproben aus vier unterschiedlichen Brauereien untersucht. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4.6.1 wiedergegeben.

In einer weiterführenden Versuchsreihe (Kapitel 4.6.2) wurden unter Berücksichtigung des noch koagulierbaren Stickstoffs die Auswirkungen einer Kochzeitverkürzung in Verbindung mit einer Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität und auf die sensorischen Eigenschaften im Pilot- und Praxismaßstab untersucht. Die Versuche wurden mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss der thermischen Prozesse Würzekochung und Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität und auf die sensorischen Eigenschaften zu untersuchen.

4.6.1 Einfluss der Kurzzeiterhitzung auf die VZ 90%/25° und auf die Partikelgrößenverteilung

In den Versuchen zeigte die Kurzzeiterhitzung unterschiedliche Auswirkungen und führte teilweise auch zu einer geringfügig niedrigeren Trübungsstabilität.

Folgende Auswirkungen auf die Trübung und auf die VZ 90%/25° wurden festgestellt:

1. eine Erhöhung der VZ 90%/25° bei gleichzeitiger Erhöhung der Trübungsintensität \Rightarrow Trübungsstabilität \uparrow .
2. eine Erhöhung der VZ 90%/25° bei gleichzeitiger Abnahme der Trübungsintensität \Rightarrow Trübungsstabilität \uparrow und \downarrow .
3. eine Abnahme der VZ 90%/25° bei gleichzeitiger Erhöhung der Trübungsintensität \Rightarrow Trübungsstabilität \uparrow und \downarrow .

Zu 1: Erhöhung der $VZ 90^\circ/25^\circ$ bei gleichzeitiger Erhöhung der Trübungsintensität nach KZE

Nach den Ergebnissen aus Kapitel 4.1 führt ein Anstieg der $VZ 90^\circ/25^\circ$ bei gleichzeitiger Erhöhung der 90° - und 25° -Trübungsintensität zur größten Verbesserung der Trübungsstabilität. In Abbildung 4.6.1 sind die Partikelgrößenverteilungen vor und nach der KZE für die Probe 56 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die KZE eine Verschiebung der Dichteverteilung zu Gunsten kleiner Partikeln bewirkte. Dies zeigte sich auch in einem Anstieg der 90° - und 25° -Trübungsintensität und einer Erhöhung der Gesamtpartikelkonzentration V_{Ges} und der Partikelkonzentration $< 1,5 \mu\text{m}$, dargestellt in Abbildung 4.6.2.

Die Trübungs- und Partikelmessungen zeigten, dass die wesentliche Wirkung der Kurzzeiterhitzung in der Koagulation von Teilchen liegt. Darauf deuten die gestiegene Trübungsintensität und die gestiegene Partikelkonzentration sowie die (nicht signifikante) Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs von 39 auf 36 mg/l hin.

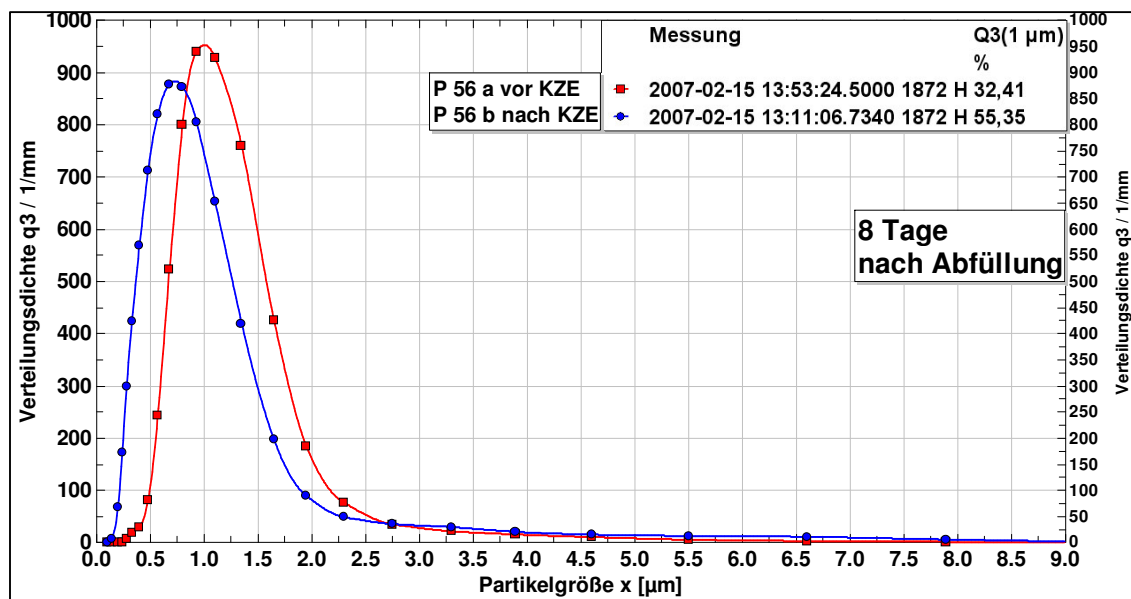


Abbildung 4.6.1: Vergleich der PGV vor und nach KZE von Probe 56 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität und gleichzeitiger Erhöhung der $VZ 90^\circ/25^\circ$, 8 Tage nach der Abfüllung

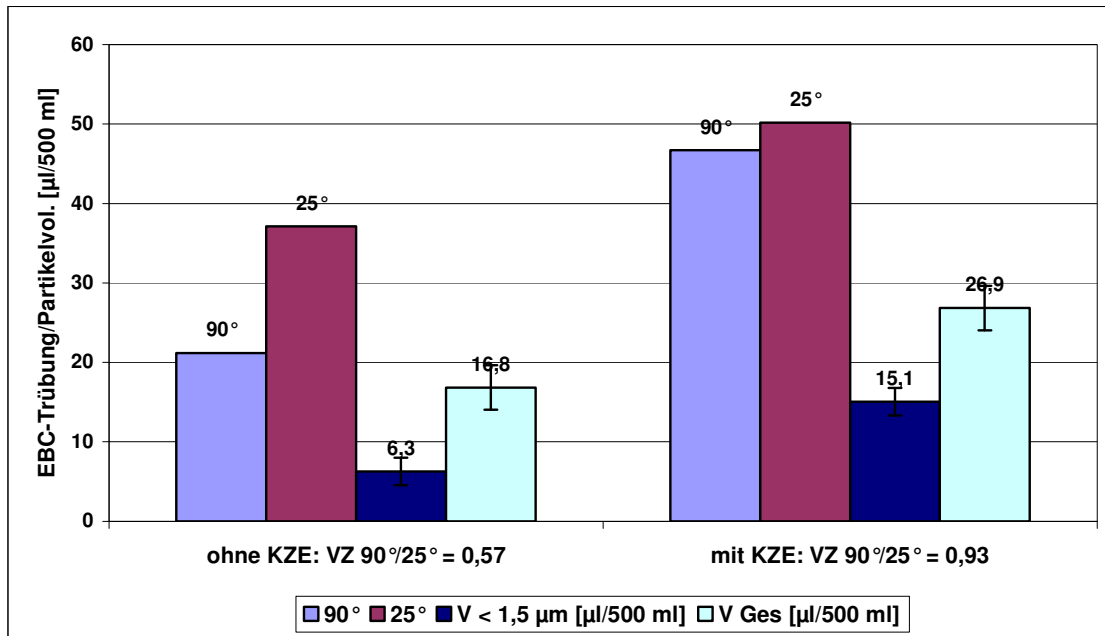


Abbildung 4.6.2: Erhöhung der Trübungsintensität von Probe 56 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erhöhung der 90°- und 25°-Trübungsintensität, der VZ 90°/25°, der Partikelkonzentration < 1,5 µm und der Gesamtpartikelkonzentration, gemessen 8 Tage nach der Abfüllung

Zu 2: Erhöhung der VZ 90°/25° bei gleichzeitiger Abnahme der Trübungsintensität nach KZE

Die KZE bewirkte die Koagulation und damit eine Verschiebung der mittleren Partikelgröße von „klein“ nach „groß“. Sind nicht mehr genug „kleine“ Partikel (z. B. Nanopartikeln) vorhanden, die zu „mittleren“ (Submicronpartikeln) koaguliert werden können, erfolgt eine überwiegende Vergrößerung zu Partikeln, die sehr schnell sedimentieren. Wie in Abbildung 4.6.3 am Beispiel der Probe 55 zu sehen ist, bewirkte die KZE eine Verschiebung der Partikeldichteverteilung zur Ordinate hin, wie auch bei Probe 56 in Abbildung 4.6.2. In der Trübungsmessung und der Bestimmung der Partikelkonzentration wird jedoch deutlich, dass nach der KZE die Partikelkonzentration der Probe 55 im Überstand geringer war. Wie in Abbildung 4.6.4 dargestellt, reduzierte sich sowohl die Trübungsintensität, als auch die Gesamtpartikelkonzentration sowie die Partikelkonzentration < 1,5 µm. Die Bestimmung des noch koagulierbaren Stickstoffs zeigte einen Anstieg von 22 mg/l auf 24 mg/l, was jedoch im Rahmen der Analysengenauigkeit keinen Unterschied darstellt.

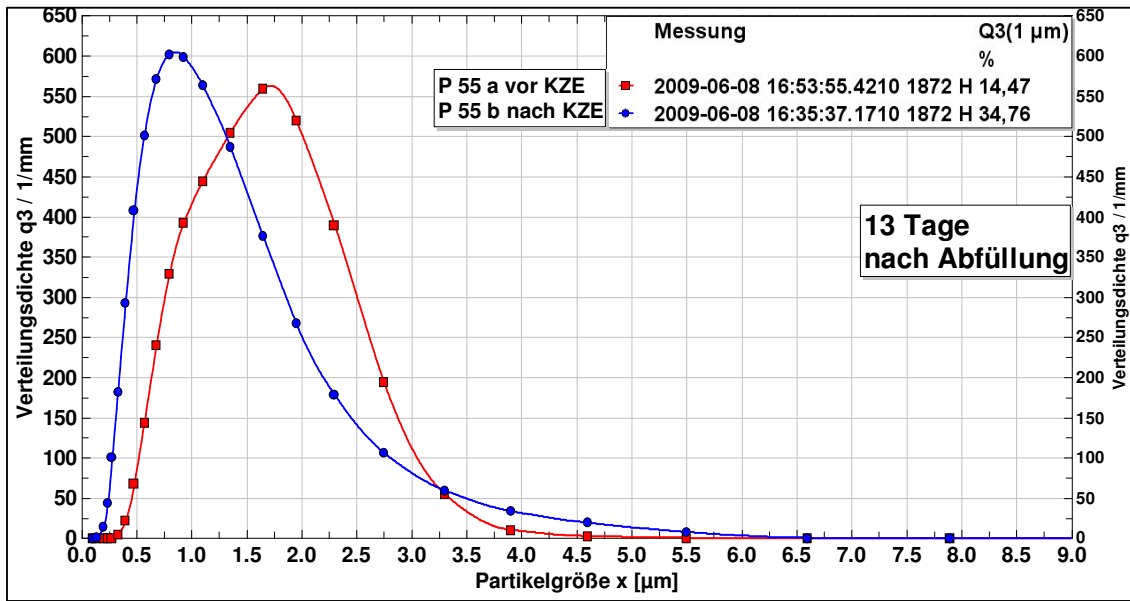


Abbildung 4.6.3: Vergleich der PGV der Probe 55 vor und nach KZE, mit einer Verringerung der Trübungsintensität nach KZE und gleichzeitiger Erhöhung der VZ 90°/25°, 13 Tage nach der Abfüllung

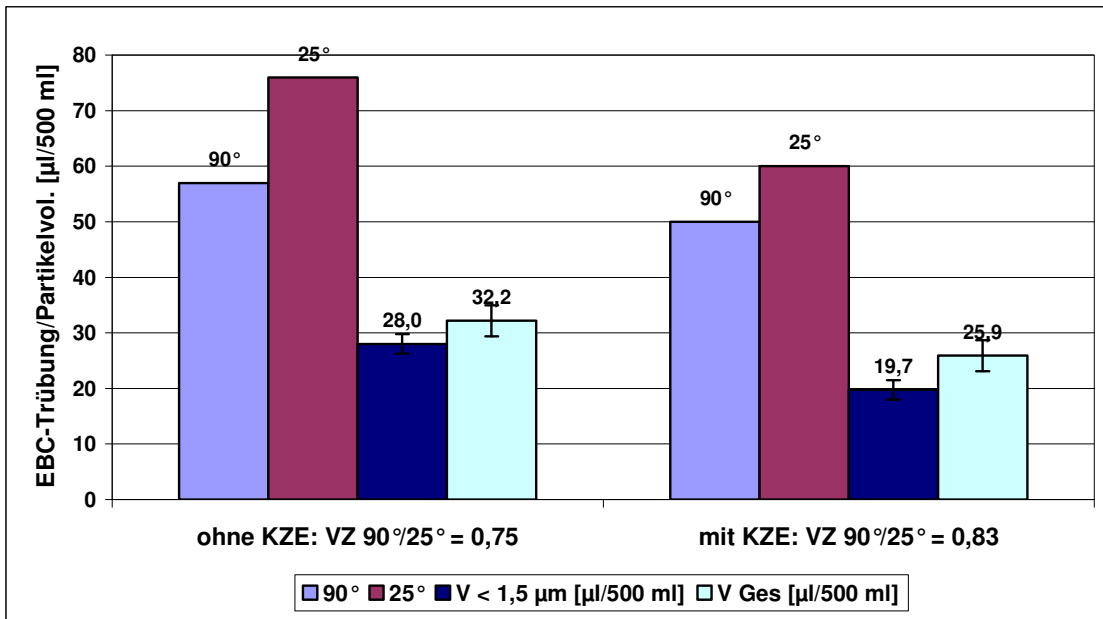


Abbildung 4.6.4: Verringerung der Trübungsintensität und der Partikelkonzentration von Probe 55 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erhöhung der VZ 90°/25°, 13 Tage nach der Abfüllung

Zu 3: Abnahme der $VZ_{90^\circ/25^\circ}$ bei gleichzeitiger Erhöhung der Trübungsintensität nach KZE

Die deutlichste Auswirkung der KZE zeigte die Probe 32 mit einer starken Zunahme der 90° - und 25° -Trübung und der Gesamtpartikelkonzentration von 24,5 auf 64,5 $\mu\text{l}/500\text{ ml}$, dargestellt in Abbildung 4.6.5. Parallel zum deutlichen Anstieg der Trübung wurde auch eine signifikante Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs von 32 auf 24 mg/l festgestellt. In Abbildung 4.6.6 sind die Partikelgrößenverteilungen vor und nach der KZE für die Probe 32 dargestellt. Der Vergleich der Partikelgrößenverteilungen nach 8 Tagen zeigte eine deutliche Vergrößerung des Partikelgefüges durch die KZE und erklärt den deutlichen Anstieg der 25° -Trübung, die überwiegend von „großen“ Partikeln hervorgerufen wird. Im Vergleich zur Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs veränderte sich die Partikelkonzentration $< 1,5\ \mu\text{m}$ kaum, was darauf hindeutet, dass eine deutliche Verschiebung des Partikelgefüges aus dem molekulardispersen in den grobdispersen Bereich $> 1\ \mu\text{m}$ stattgefunden hat. Auffallend für die Probe 32 war die bimodale Verteilung vor der KZE, die nach der KZE noch schemenhaft vorhanden war.

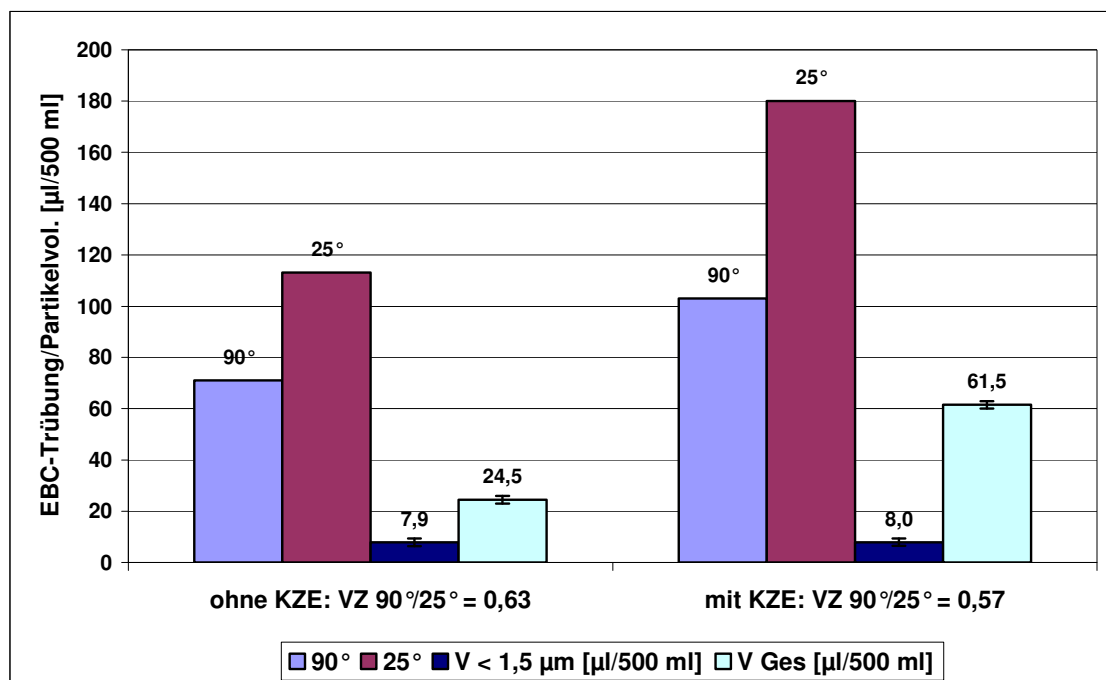


Abbildung 4.6.5: Erhöhung der Trübungsintensität von Probe 32 durch Kurzzeiterhitzung bei gleichzeitiger Erniedrigung der $VZ_{90^\circ/25^\circ}$, 8 Tage nach der Abfüllung

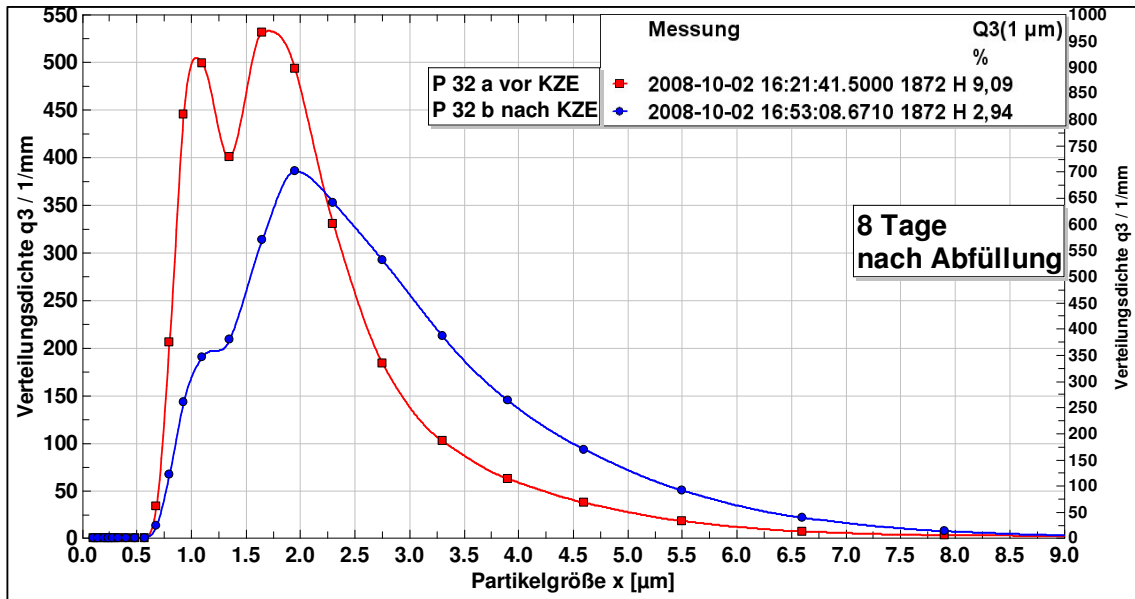


Abbildung 4.6.6: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 32 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität bei gleichzeitiger Verringerung der VZ 90°/25°, 8 Tage nach Abfüllung

Die Messung der Partikelgrößenverteilungen nach 22 Tagen zeigte eine monomodale Verteilung für beide Proben und eine weiterhin deutlich erhöhte 90°- und 25°-Trübungsintensität für die Probe 32 b, die kurzzeiterhitzt wurde (Abbildung 4.6.7).

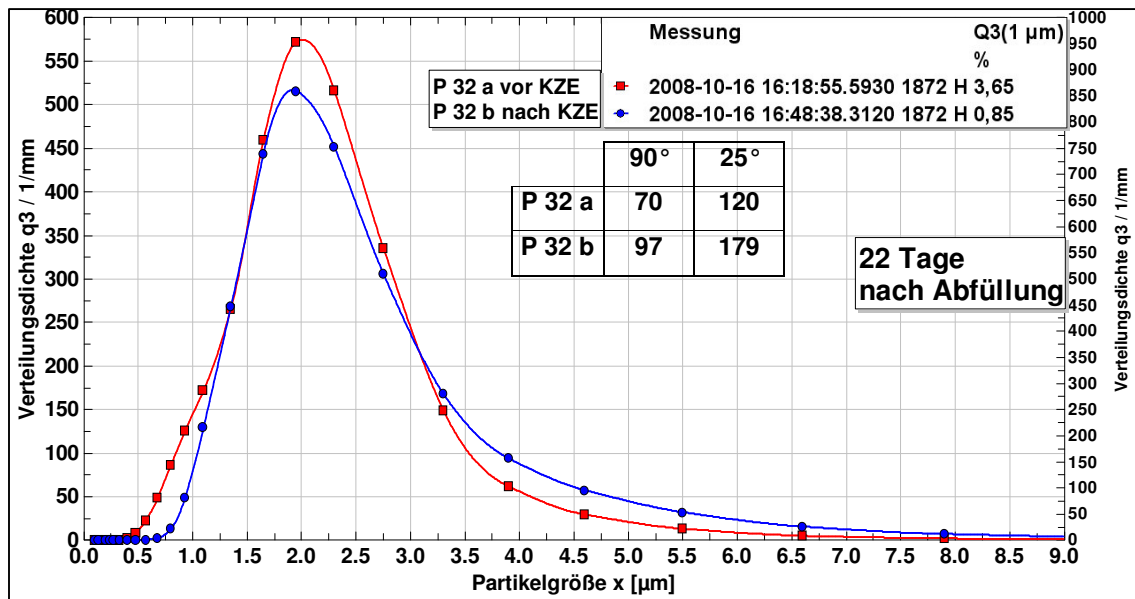


Abbildung 4.6.7: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 32 mit einer Erhöhung der Trübungsintensität bei gleichzeitiger Verringerung der VZ 90°/25° nach 22 Tagen

Für alle drei Fälle lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Kurzzeiterhitzung im Wesentlichen eine Koagulation von Partikeln und damit eine Vergrößerung des Partikelgefüges verursacht hat. Eine stabilisierende Wirkung wurde insbesondere dann beobachtet, wenn es zu einer deutlichen Bildung von Submicronpartikeln kam oder die Kurzzeiterhitzung eine Verschiebung der Verteilungsdichte zu feineren Partikeln bewirkte. Nur für drei der acht untersuchten Praxisproben konnte eine signifikante Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs verzeichnet werden. Diese Biere zeigten alle eine Abnahme der VZ 90°/25° und eine deutliche Zunahme der 90°- und 25°-Trübungsintensität, wie z. B. Probe 32, dargestellt in Abbildung 4.6.5. Zum Einen kann nicht genau beurteilt werden, wie intensiv die Koagulation bei den Proben wirklich war, die keine signifikante Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs zeigten. Zum Anderen zeigte ein Praxisversuch mit unterschiedlichen KZE-Temperaturen bei einer Heißhaltezeit von 36 Sekunden, dass die Methode zur Bestimmung des koagulierbaren Stickstoffs nach MEBAK für Weizenbiere größere Abweichungen aufweisen muss, als die für die Wiederholbarkeit *r* angegebenen 8 mg/l. In Tabelle 4.6.1 sind die Werte der angewendeten Temperaturen während der Kurzzeiterhitzung, die ermittelten Werte für den koagulierbaren Stickstoff und die Werte der Trübungsmessung wiedergegeben.

Tabelle 4.4.1: Vergleich unterschiedlicher Temperaturen bei der Kurzzeiterhitzung von Weizenbier und der Einfluss auf die Konzentration an noch koagulierbarem Stickstoff

Probe	KZE-Temperatur [°C]	koag. N [mg/100 ml]	EBC-Trübung		VZ (90°/25°)
			90°	25°	
57 a	ohne KZE	2,0	8,2	22	0,37
57 b	70	2,2	7,7	19	0,41
57 c	75	3,2	7,8	18,3	0,43
57 d	80	2,5	8	17,6	0,45

Demnach wäre nach der KZE bei Probe 57 c die Konzentration an noch koagulierbarem Stickstoff gegenüber der Probe vor der KZE signifikant erhöht, was unrealistisch erscheint. Auch der tendenzielle Anstieg des koagulierbaren Stickstoffs durch die KZE bei verschiedenen Proben erscheint nicht logisch. Eine Erklärung für die Unregelmäßigkeiten könnte jedoch darin liegen, dass durch die Kurzzeiterhitzung in der Brauerei bereits eine Vorstufe der endgültigen Denaturierung der Proteine erreicht wurde, so dass dann in der Analyse beim Kochen im 108 °C heißen Glycerinbad vermehrt Stickstoffverbindungen koagulieren.

In der Praxis werden bei der Kurzzeiterhitzung Temperaturen von 70–80 °C angewendet, jedoch im Sonderfall der Probe 56 z. B. auch eine Temperatur von 120 °C und damit über 4000 Pasteureinheiten (PE) erreicht, obwohl für die mikrobiologische Sicherheit 100 PE in Weizenbier in der Regel ausreichend sind. Die Intensität der Koagulation hängt jedoch neben der Temperatur und der Heißhaltezeit von weiteren Faktoren wie z. B. der Ionenzusammensetzung und dem der Würze gegenüber verringerten pH-Wert ab. Auch vorhergehende Prozessschritte wie die Würzekochung können einen Einfluss auf die Koagulation von Partikeln im Bier haben. Da die verschiedenen Einflussfaktoren und damit zusammenhängende synergetische Effekte noch nicht ausreichend erfasst werden können, muss die Einstellung der KZE in der Praxis aufgrund der vielen Einflussfaktoren, unter Berücksichtigung der geschmacklichen Veränderungen und der mikrobiologischen Sicherheit, experimentell ermittelt werden, wobei die Zunahme der VZ 90%/25° bei steigender 90°- und 25°-Trübungsintensität die optimale Verbesserung der Trübungsstabilität darstellt.

4.6.2 Verbesserung der Trübungsstabilität durch Kurzzeiterhitzung bei verkürzter Würzekochung

Ziel der im Pilot- und Praxismaßstab durchgeführten Versuche war es, durch eine verkürzte Kochzeit mehr noch koagulierbaren Stickstoff im Weizenbier zu erhalten und erst vor der Abfüllung durch eine Kurzzeiterhitzung zu koagulieren. Durch den Überschuss an noch koagulierbarem Stickstoff sollte der positive Effekt der Kurzzeiterhitzung verstärkt werden. Da die Würzekochung einen wesentlichen Einfluss auf das Geschmacksbild und die Geschmacksstabilität hat, wurde in diesem Kapitel die sensorische Beurteilung ausführlich diskutiert.

Vorversuch

In einem Vorversuch wurde Betriebsweizenbierwürze eines Sudes aus der Staatsbrauerei Weihenstephan mit unterschiedlichen Kochzeiten unter gleichen Bedingungen vergoren:

- Probe A: 10 Minuten nach Kochbeginn
- Probe B: 50 % Probe A + 50 Probe C
- Probe C: Kühlmitte-Würze, 70 Minuten Kochung.

Aus den Würzen wurde im 10 l-Maßstab Weizenbier hergestellt. Nach der Abfüllung auf 0,5 l-NRW-Flaschen wurde eine Flaschenpasteurisierung durchgeführt. Dabei wurden > 250 PE erreicht. Erwartungsgemäß war der koagulierbare Stickstoff (in den Würzen gemessen) bei Probe A mit 40 mg/l deutlich höher als bei Probe C mit 23 mg/l. Umgekehrt zeigte die Probe C mit einer Kochzeit von 70 Minuten die höchsten Trübungswerte und die Probe A die niedrigsten in den fertigen Bieren. Da die Würzen der Biere zu unterschiedlichen Zeitpunkten entnommen wurden, resultierte für Probe A aufgrund der geringeren Verdampfung ein niedrigerer Stammwürzegehalte von 12,33 GG% im Vergleich zu 12,91 GG% bei Probe C. Die Stammwürzedifferenz von 0,6 GG% alleine erklären jedoch nicht die um ca. 50 % erhöhte Trübungsintensität der Probe C gegenüber der Probe A. Die Flaschenpasteurisierung brachte für die Trübung nahezu keine Veränderung. In Abbildung 4.6.8 sind die Trübungswerte der Biere vor und nach der Flaschenpasteurisierung und die Würzekonzentrationen an koagulierbarem Stickstoff dargestellt.

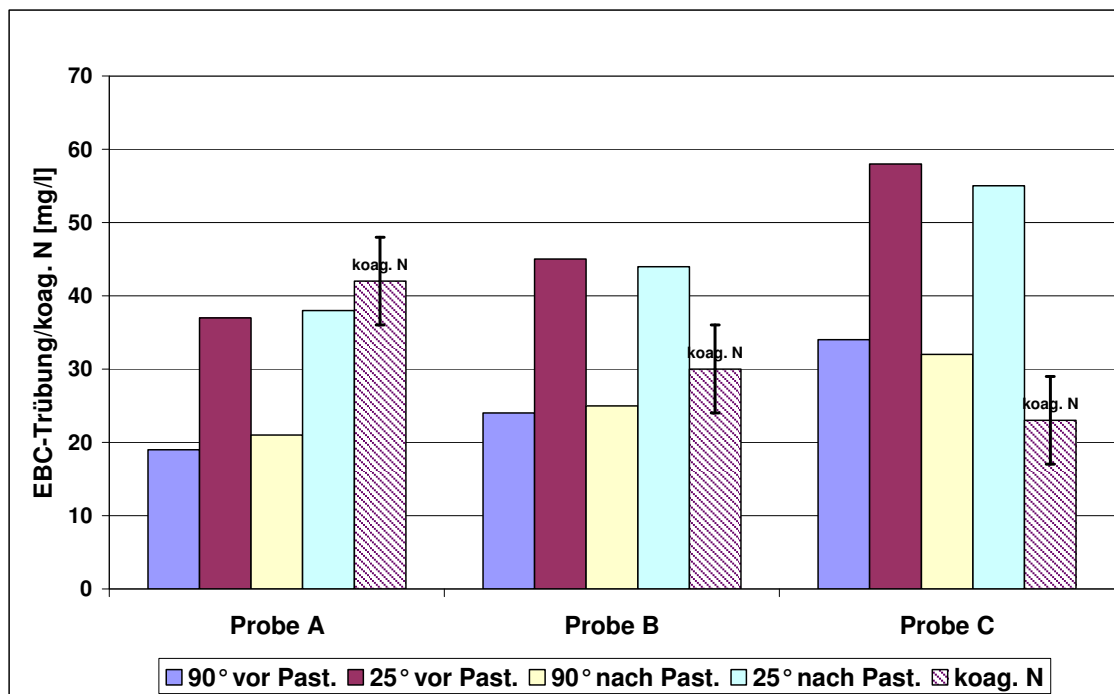


Abbildung 4.6.8: Vergleich von Proben mit unterschiedlicher Kochzeit in Bezug auf koag. N in der Würze und der Trübung vor und nach einer Flaschenpasteurisierung

Dass die thermische Behandlung der Proben in Form einer Flaschenpasteurisierung nahezu keine Veränderung der Trübung mit sich brachte, deutet darauf hin, dass neben der Erwärmung des Bieres bei der konventionellen Kurzzeiterhitzung in Plattenwärmetauschern auch die darin herrschenden turbulenten Strömungsverhältnisse wesentlich zur Koagulation beitragen müssen und die Wahrscheinlichkeit, dass zwei koagulationsfähige Partikeln aufeinander treffen, deutlich erhöht wird.

Da die Kochzeit einen wesentlichen Einfluss auf das Geschmacksprofil und auf die Geschmacksstabilität hat, wurden die Biere frisch und forciert nach den Schemata der DLG und nach HERRMANN verkostet. Die Ergebnisse der Verkostungen sind im Anhang in den Abbildungen A 4.6.9–A 4.6.11 dargestellt. Geschmacksfehler, wie, z. B. Dimethylsulfid aufgrund der reduzierten Kochzeit bei Probe A, wurden nicht festgestellt. Allgemein ist der Gehalt der DMS-Vorläufersubstanz S-Methylmethionin in Weizenmalz niedriger als in Gerstenmalz, so dass insgesamt in Weizenbierwürzen niedrigere Gehalte an freiem-DMS vorkommen. Dies zeigten auch die Würzeanalysen (Anhang Tabelle A 4.6.2). Probe A mit nur 10 min Kochzeit wurde in der DLG-Verkostung der frischen und forciert gealterten Biere vor allem in den doppelt gewerteten Parametern Geruch und Trunk tendenziell besser bewertet als Probe C. Die bessere Bewertung der Probe C in der Vollmundigkeit kann mit dem höheren Stammwürzegehalt erklärt werden. Probe A enthielt nur eine von insgesamt zwei Hopfengaben, woraus nur 9 Bittereinheiten (BE) resultierten, im Vergleich zu Probe C mit 21 BE. Die Verkoster bewerteten Probe A sowohl frisch als auch forciert gealtert tendenziell besser. In der sensorischen Analyse der weizenbiertypischen Aromakomponenten wurde die Probe A qualitativ besser bewertet und zeigte eine höhere Intensität der estrigen und der phenolischen Note. Die tendenziell bessere Bewertung der Probe A, insbesondere der forciert gealterten Probe, könnte auf die reduzierte thermische Belastung mit einer TBZ von 21 im Vergleich zu einer TBZ von 54 der Probe C zurückzuführen sein.

Praxisversuch

Nach den positiven Verkostungsergebnissen des oben dargestellten Vorversuchs und den Ergebnissen aus Kapitel 4.6.1 wurde im Praxismaßstab untersucht, wie sich eine Kochzeitreduzierung von 60 auf 30 Minuten in Verbindung mit einer Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität, auf das Geschmacksprofil und auf die

Geschmacksstabilität auswirkt. Im Praxisversuch wurden jeweils zwei Sude zusammen vergoren.

Die um 50 % reduzierte Kochzeit erbrachte nicht die erwarteten Unterschiede in den thermisch beeinflussten Parametern wie koagulierbarer Stickstoff und TBZ (Anhang Tabelle A 4.6.4). Deutlicher machte sich die verkürzte Kochung in den Gehalten an freiem DMS bemerkbar, die bei 30 Minuten Kochzeit im Durchschnitt des Doppelsudes beim Geschmacksschwellenwert für untergärige Biere von 100 µg/l lag und ungefähr doppelt so hoch war, wie in den Vergleichswürzen mit 60 Minuten Kochzeit.

Die kürzere Kochzeit von 30 Minuten bewirkte, analog zu den oben dargestellten Ergebnissen des Vorversuchs, ohne KZE eine geringere Trübungsintensität im Bier als die Probe mit 60 Minuten Würzekochung. Zusätzlich war die VZ 90°/25° bei der kürzer gekochten Probe mit 0,60 um 0,15 niedriger. Die KZE brachte für beide Proben eine Erhöhung der VZ 90°/25°; eine Erhöhung der Trübungsintensität wurde nur für die Probe mit 30 Minuten Kochzeit beobachtet, welche letztendlich auch die trübungsstabilere Probe war. Die Kurzzeiterhitzung wurde für beide Weizenbiere bei einer Temperatur von 74 °C für ca. 120 Sekunden durchgeführt. In Abbildung 4.6.12 sind die Trübungsintensitäten vor und nach der KZE, 13 Tagen nach der Abfüllung, sowie die Konzentrationen von DMS und koagulierbarem Stickstoff der Kühlmittewürzen dargestellt, Abbildung 4.6.13 zeigt die Trübungsintensitäten der Biere mit und ohne KZE nach 43 Tagen. Die verkürzte Kochzeit in Verbindung mit einer Kurzzeiterhitzung brachte im Praxisversuch die erwartete Verbesserung der Trübungsstabilität. Wie es scheint, werden die koagulierbaren Teilchen in ihrer nativen Form weniger stark im Whirlpool und während des Gär-, Reif- und Lagerprozesses abgeschieden und stehen somit bei der Kurzzeiterhitzung noch zur Bildung von Trübungspartikeln zur Verfügung. Die Ergebnisse machen aber auch deutlich, dass nicht nur die Kochzeit, sondern auch die darauf folgenden Prozessschritte wie das Ausschlagen und die Whirlpoolverweilzeit der Würze bis zur Kühlung eine wesentliche thermische Belastung darstellen und dadurch die Koagulation vorangetrieben wird.

In der Verkostung zeigten die Biere tendenziell Unterschiede (Anhang Tabellen A 4.6.11–A 4.6.13). Das Bier mit einer Würzekochzeit von 60 Minuten wurde „frisch“ in der DLG-Verkostung tendenziell besser bewertet, erhielt jedoch in der DLG-Verkostung der forciert gealterten Proben weniger Punkte.

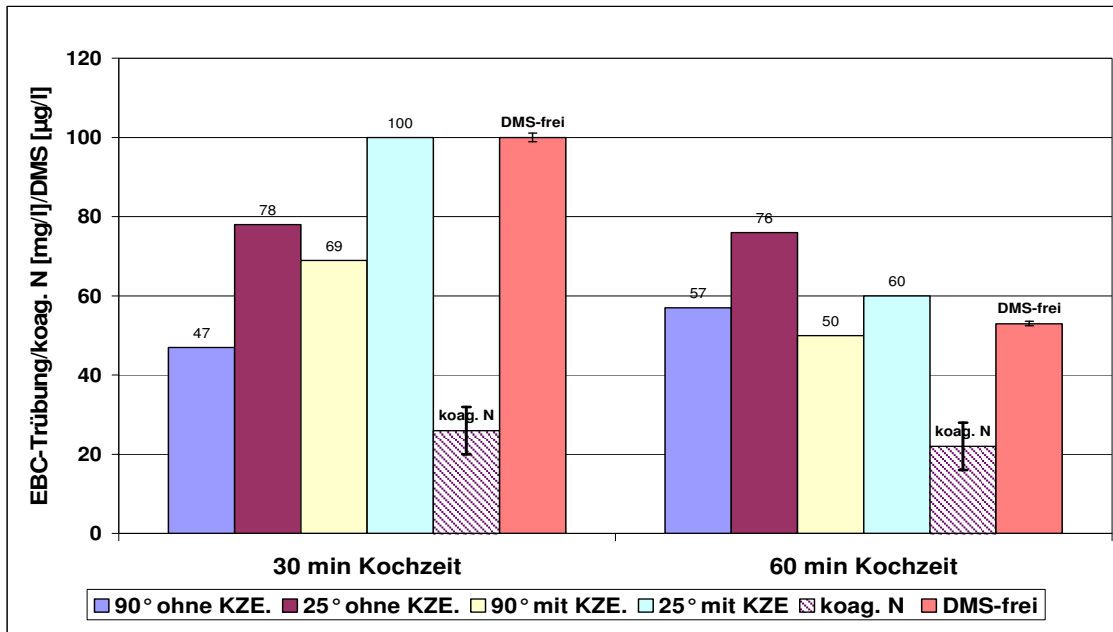


Abbildung 4.6.12: Konzentrationen an freiem DMS und koagulierbarem Stickstoff in Würze und die Trübungsintensitäten der resultierenden Praxisbiere vor und nach einer KZE 13 Tage nach der Abfüllung

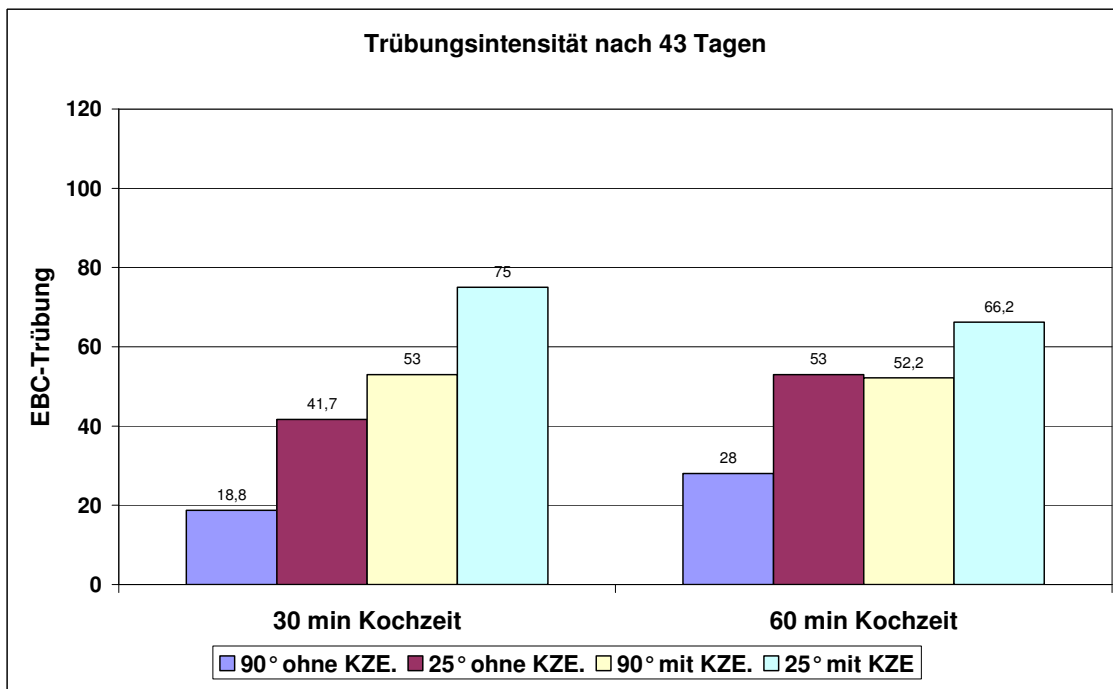


Abbildung 4.6.13: Trübungsintensität der Praxisbiere mit 30 und 60 Minuten vor und nach einer KZE, 43 Tage nach der Abfüllung

Im Dreieckstest erkannten 6 von 10 Verkostern die abweichende Probe, wovon 4 von 6 das Bier mit der verkürzten Würzekochzeit bevorzugten. Im Dreieckstest (Anhang Tabelle A 4.6.6) der forciert gealterten Proben ordneten 5 von 10 Verkostern die Proben richtig zu, wobei alle 5 Verkoster das Bier mit der Kochzeit von 60 Minuten bevorzugten. Die nur 30 Minuten gekochte Würze zeigte in der Analyse der Würzearomastoffe (Anhang Tabelle A 4.6.7) leicht erhöhte Konzentrationen an Alterungsindikatoren in Form von Streckeraldehyden, was wahrscheinlich dazu führte, dass im Dreieckstest der forciert gealterten Proben das Bier mit 60 Minuten Kochung bevorzugt wurde, obwohl das Verkosterpanel in der DLG-Verkostung keine Alterung erkannte. Die Ergebnisse des Dreiecktests sind im Anhang in Tabelle A 4.6.6 dargestellt. Die Bildung von Alterungsaromen läuft in Weizenbieren nach den gleichen Mechanismen wie in Lagerbieren ab, jedoch werden diese oftmals durch die typischen Weizenbieraromen maskiert bzw. überdeckt. Durch die unterschiedlichen Tendenzen in der Einzelbewertung und im Dreieckstest lässt sich keine eindeutige Aussage machen, welches Bier besser war. Beide Biere erreichten insgesamt sowohl „frisch“ als auch nach forcierter Alterung gute Bewertungen und zeigten auch eine gute Geschmackstabilität.

Die Versuche haben gezeigt, dass die Kochzeit ein wichtiger Parameter für die Trübungsstabilität ist. Die Verkürzung der Kochzeit stößt mit der konventionellen Sudhaustechnologie durch eine niedrigere Hopfenausbeute und durch die verstärkte Nachbildung von freiem DMS und der notwendigen Heißtrubabscheidung im Whirlpool an ihre Grenzen. Wird auf eine KZE verzichtet, deuten zudem die Ergebnisse darauf hin, dass eine praxisübliche Kochzeit von 50–70 Minuten auch eine bessere Trübungsstabilität mit sich bringt. Besteht jedoch die Möglichkeit einer KZE, ergeben sich neue technologische Ansätze zur Verbesserung der Trübungsstabilität, wie im Folgenden diskutiert wird:

Dazu wird ein Teil der Pfanne-Würze vor Kochbeginn und Hopfengabe bei einer Temperatur, die eine mikrobiologische Sicherheit gewährleistet (z. B. 95 °C), direkt gekühlt, um eine Nachbildung von DMS aus dem Vorläufer S-Methylmethionin zu verhindern. S-Methylmethionin ist geschmacks- und geruchsneutral, eine spätere Bildung von DMS während der KZE kann vernachlässigt werden. Durch die fehlende Hopfung und geringe thermische Belastung ist die Bildung von Kochtrub geringer, so dass eine Verblockung der Würzekühleinheit nicht zu erwarten ist. Die restliche Würze kann dann unter Beachtung des nötigen Würzevolumens des

Würzekochsystems wie gewohnt verarbeitet werden. Legt man die Würzeanalysen der Praxisversuche zugrunde, so würden bereits 10 % Pfanne-voll-Würze mit ca. 100 mg/l koagulierbarem Stickstoff die Konzentration von 22 auf 30 mg/l erhöhen, mit 20 % Pfanne-voll-Würze auf 38 mg/l. Werden mehrere Sude zusammen vergoren, könnte auch ein ganzer Sud ohne Kochung und Hopfung verwendet werden, was gleichzeitig eine Einsparung von Primärenergie zur Folge hätte. Bei welchen Mischungsverhältnissen signifikante Änderungen des Geschmacks- und Aromaprofils resultieren, hängt vom Aromaprofil des Weizenbieres ab und muss unter den jeweiligen Praxisbedingungen experimentell geklärt werden.

4.7 Klärungsverhalten verschiedener Hefestämme

Die Flockulation der Hefe spielt eine wichtige Rolle für die Klärung und Filtrierbarkeit untergäriger Biere. Neben der reinen Agglomeration einzelner Zellen kommt es durch die geladene Oberfläche der Hefezelle auch zur Adsorption von Partikeln. Die genauen Mechanismen der Hefeagglomeration und Adsorption sind allerdings noch nicht vollständig aufgeklärt.

Ziel dieser Versuchsreihe war ein relativer Vergleich des untergärigen Hefestammes W 34 und der beiden obergärigen Hefestämme W 68 und W 175, inwieweit sich ihre Klärungs- und Adsorptionseigenschaften auf die Trübungsstabilität auswirken. Alle drei Hefestämme sind in der Brauereipraxis verbreitet. Die Versuche wurden im 10 Liter-Maßstab mit Betriebswürze der Staatsbrauerei Weihenstephan durchgeführt, die Hefestämme von der Hefesammlung des Lehrstuhls bezogen. Die Biere wurden endvergoren und auf Flaschen abgefüllt. Verglichen wurden die Trübungsstabilitäten der Weizenbiere mit Reinzuchthefer (erste Führung) und die Trübungsstabilität der Weizenbier mit Erntehefe aus der ersten Führung (zweite Führung).

Die Hefestämme zeigten in der ersten Führung kaum Unterschiede in der Trübungsstabilität. Die Biere erreichten bereits nach 15 Tagen ein vergleichbares niedriges Niveau, mit Ausnahme der Probe *W 175 I*, die deutlich erhöht war, wie in Abbildung 4.7.1 zu sehen ist. Nach 27 Tagen zeigte aber auch diese abweichende Probe eine mit den anderen Proben vergleichbare Trübungsintensität (Anhang Tabelle A 4.7.2). Der Grund für die hohe Trübung der abweichenden Probe *W 175 I* konnte nicht geklärt werden. In der zweiten Führung zeigten die Hefestämme eine ähnlich geringe Trübungsstabilität wie bei der ersten Führung, wie in Abbildung 4.7.2 dargestellt. Im Vergleich zeigten sich kaum Unterschiede im Klärungsverhalten der drei untersuchten Hefestämme bei gleicher Anstellhefezellzahl und gleicher Belüftungsrate. Die Ergebnisse lassen jedoch keine Rückschlüsse auf das Absetz- bzw. Sedimentationsverhalten der untersuchten Hefestämme zu. So ist z. B. aus der Praxis bekannt, dass sich untergärige Hefen nach der zweiten Gärung im Gebinde (Fass bzw. Flasche) aufgrund ihrer Morphologie besser absetzten als obergärige Hefestämme. Inwieweit sich durch Variation der Hefeanstellzellzahl, Belüftungsrate und weiteren Faktoren, wie z. B. Ionen- und Zuckerszusammensetzung der Würze, die Klärungs- und Adsorptionseigenschaften verändern, muss noch geklärt werden.

Für die Wahl des Hefestammes und der Hefetechnologie in der Praxis kann vorerst keine Empfehlung in Bezug auf die Trübungsstabilität gegeben werden. Somit bleiben die Auswahlkriterien das Geschmacks- und Aromaprofil und der zeitliche Extraktabbau, die für die untersuchten Hefestämme unterschiedlich waren (Anhang Tabelle A 4.7.1 und A 4.7.2).

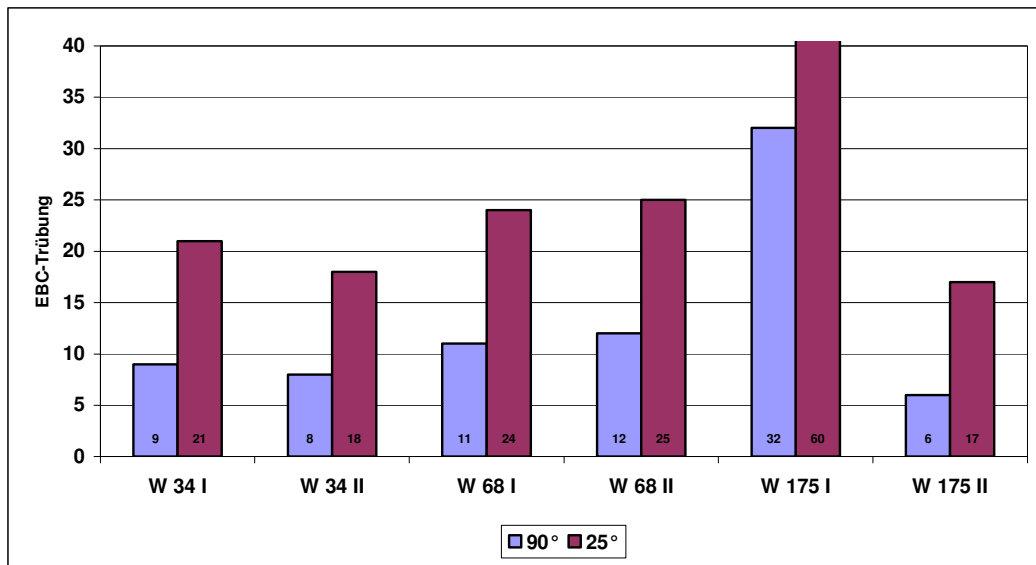


Abbildung 4.7.1: Einfluss der Hefestämme *W 34*, *W 68* und *W 175* auf die Trübungsstabilität in der ersten Führung, gemessen 15 Tage nach der Abfüllung

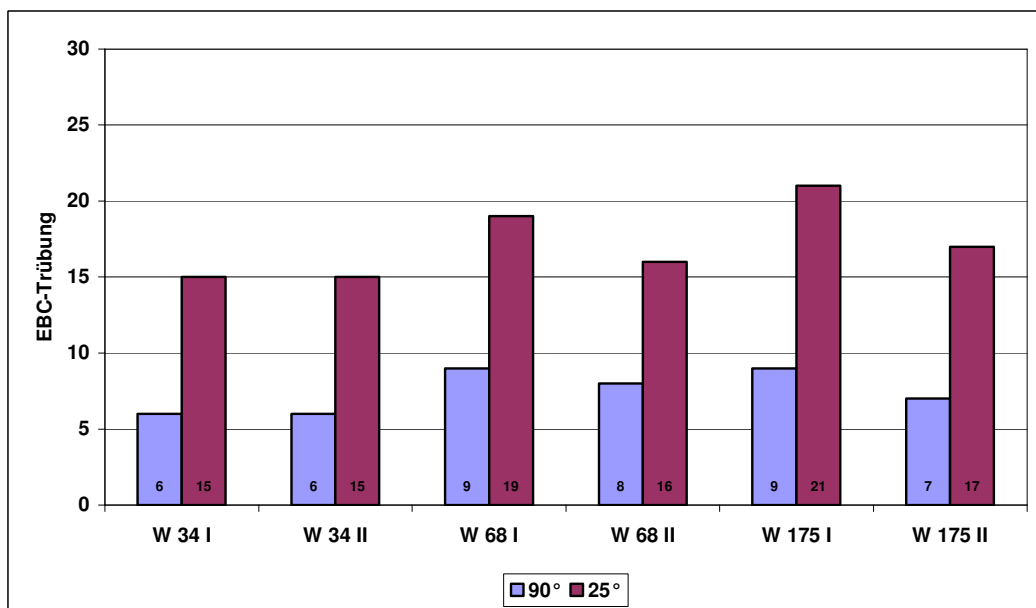


Abbildung 4.7.2: Einfluss der Hefestämme *W 34*, *W 68* und *W 175* auf die Trübungsstabilität in der zweiten Führung, gemessen 27 Tage nach der Abfüllung

4.8 Verbesserung der Trübungsstabilität durch Hefebier

Im Rahmen der Untersuchungen von SCHNEEBERGER [86] zur Wiederverwendung von Rück- und Restbieren wurde in Praxisversuchen zufällig beobachtet, dass die Dosage von Hefebier im Kaltbereich gleichzeitig zu einer Verbesserung der Trübungsstabilität bei Weizenbier führte. Die Trübungsmessungen verschiedener Hefebiere zeigten hohe bis sehr hohe Trübungsintensitäten bei gleichzeitig hohen VZ 90°/25°-Werten. In Abbildung 4.8.1 sind Trübungswerte verschiedener Hefebiere dargestellt, gemessen 14 Tage nach der Abfüllung. Die Hefebiere zeigten insgesamt hohe bis sehr hohe Trübungswerte > 100 EBC in der 90°- und 25°-Streulichtmessung auf. Darüber hinaus zeigten die VZ 90°/25° insgesamt sehr hohe Werte > 0,9, so dass nach den Ergebnissen von Kapitel 4.1 mit einer sehr guten Trübungsstabilität der Hefebiere zu rechnen war.

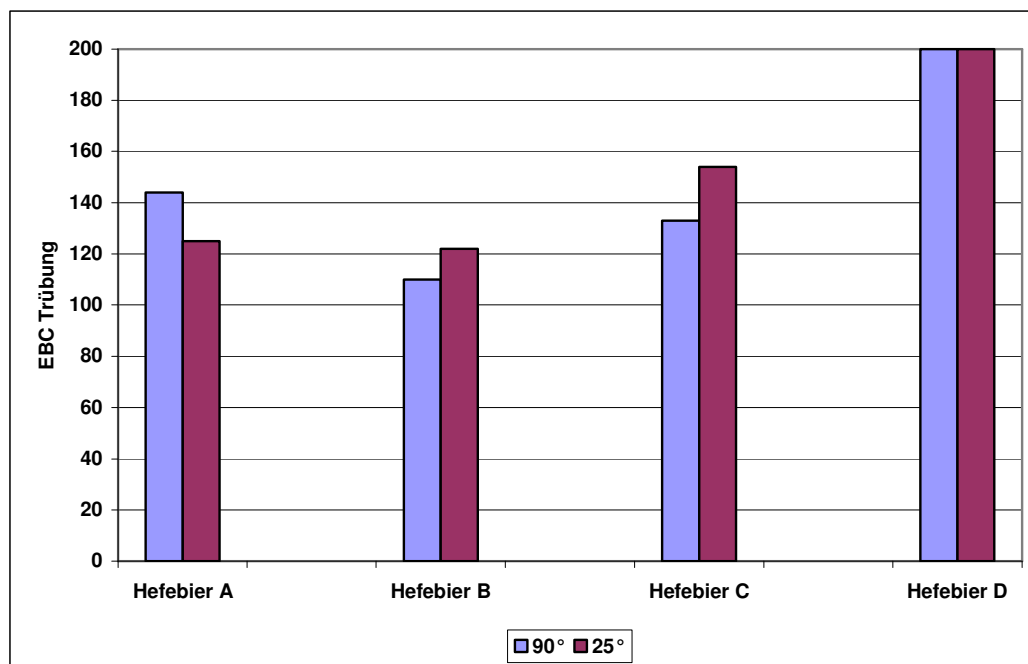


Abbildung 4.8.1: Trübungsintensitäten verschiedener Hefebiere 14 Tage nach der Abfüllung

In Praxisversuchen wurde Hefebier in Konzentrationen von 5 und 10 % zu fertigem Weizenbier dosiert und die Veränderungen auf die Trübungsstabilität und auf das Geschmacksprofil untersucht.

Die Hefebierdosagen wirkten sich vor allem dann positiv auf die Trübungsstabilität aus, wenn die Trübungswerte des unbehandelten Bieres niedriger waren als die

Trübungswerte des Hefebieres, in Abbildung 4.8.2 anhand der Probe VR 18 dargestellt. Zusätzlich erhöhte die Hefebierdosage die VZ 90°/25° mehr oder weniger stark. Abbildung 4.8.3 zeigt die Trübungsintensitäten der drei Proben 77 Tage nach der Abfüllung.

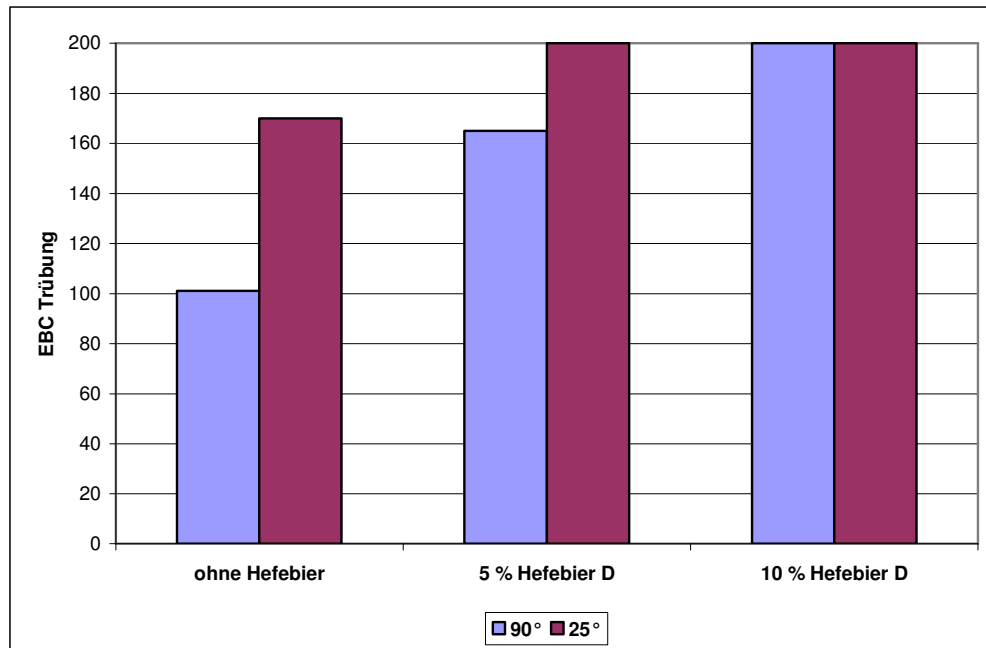


Abbildung 4.8.2: Steigerung der Trübungsintensität durch Hefebierdosagen (Hefebier D) von 5 und 10 %, gemessen 14 Tage nach der Abfüllung (Probe VR 18)

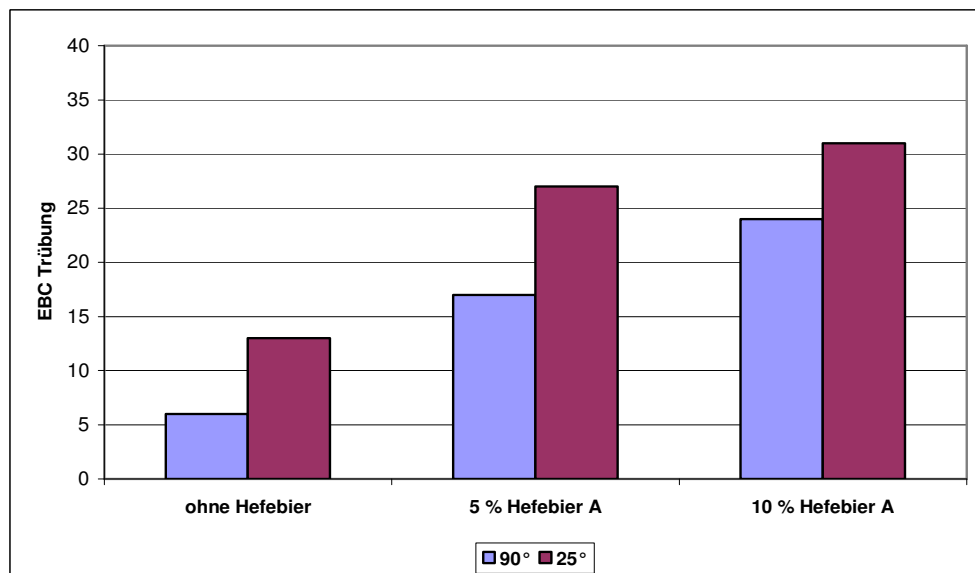


Abbildung 4.8.3: Verbesserte Trübungsstabilität durch Hefebier, gemessen 77 Tage nach der Abfüllung (Probe VR 18)

War die Differenz der Trübungsintensität zwischen Probe und Hefebier gering, blieb der positive Effekt teilweise aus oder die Trübungsstabilität war geringfügig niedriger (Anhang Tabelle A 4.8.1).

In den Partikelmessungen zeigten die Hefebierdosagen in den ersten Messungen 8 bzw. 14 Tage nach der Abfüllung durch die noch hohen Partikelkonzentrationen teilweise nur geringfügige Veränderungen der Partikelgrößenverteilungen, insbesondere wenn die Partikelgrößenverteilungen von Weizenbier und Hefebier ähnlich waren. Abbildung 4.8.4 zeigt die Partikelgrößenverteilung von Hefebier A. Analog dazu sind in Abbildung 4.8.5 die Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 1, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebier A dargestellt. Durch die ähnlichen Partikelgrößenverteilungen sind kaum Unterschiede erkennbar, jedoch resultierte aus der Hefebierdosage eine deutliche Zunahme der Trübungsintensität und der Trübungsstabilität (Anhang Tabelle A 4.8.1).

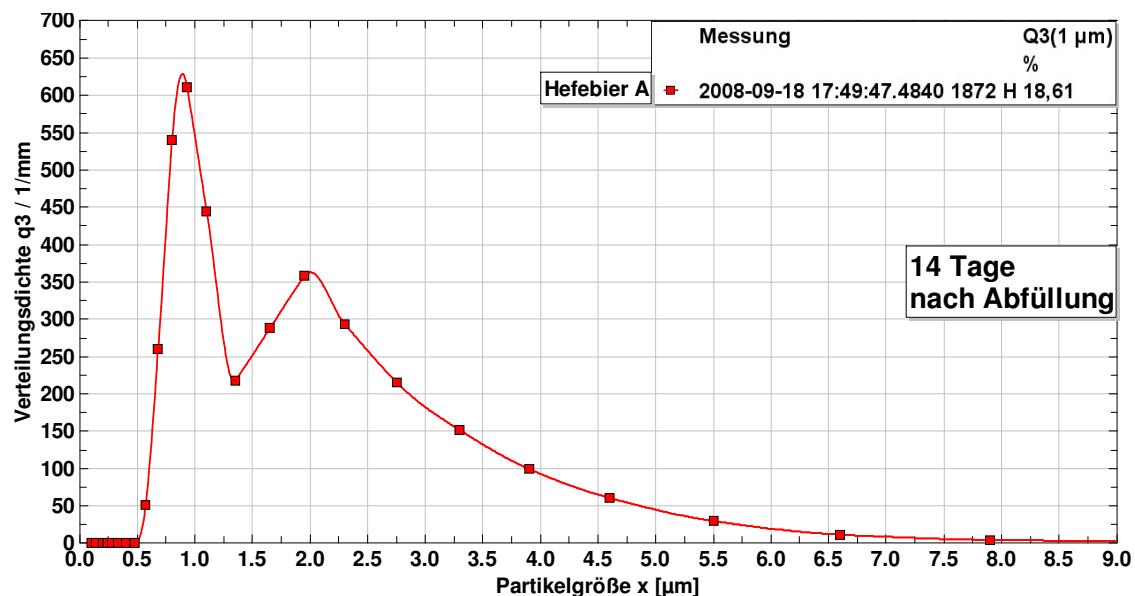


Abbildung 4.8.4: Partikelgrößenverteilung von Hefebier A

In Abbildung 4.8.6 ist die Partikelgrößenverteilung von Hefebier D mit einem Maximum bei 1 μm dargestellt. Mit steigendem Anteil an Hefebier D verschiebt sich der Peak von Probe VR 18 von ca. 2,3 μm zur Ordinate hin, zu sehen in Abbildung 4.8.7. Am Beispiel von Probe VR 18 wird deutlich, dass die wesentliche trübungsverbessernde Wirkung des Hefebiers vor allem im erhöhten Anteil an kleineren Partikeln zu finden ist. Die Partikelgrößenverteilungen der anderen Proben

mit und ohne Hefebier sind im Anhang in den Abbildungen A 4.8.1–A 4.8.15 dargestellt. Da nur kurzzeiterhitztes Hefebier für die Versuche zur Verfügung stand, konnte die Herkunft des erhöhten Anteils an feinen Partikeln nicht eindeutig geklärt werden.

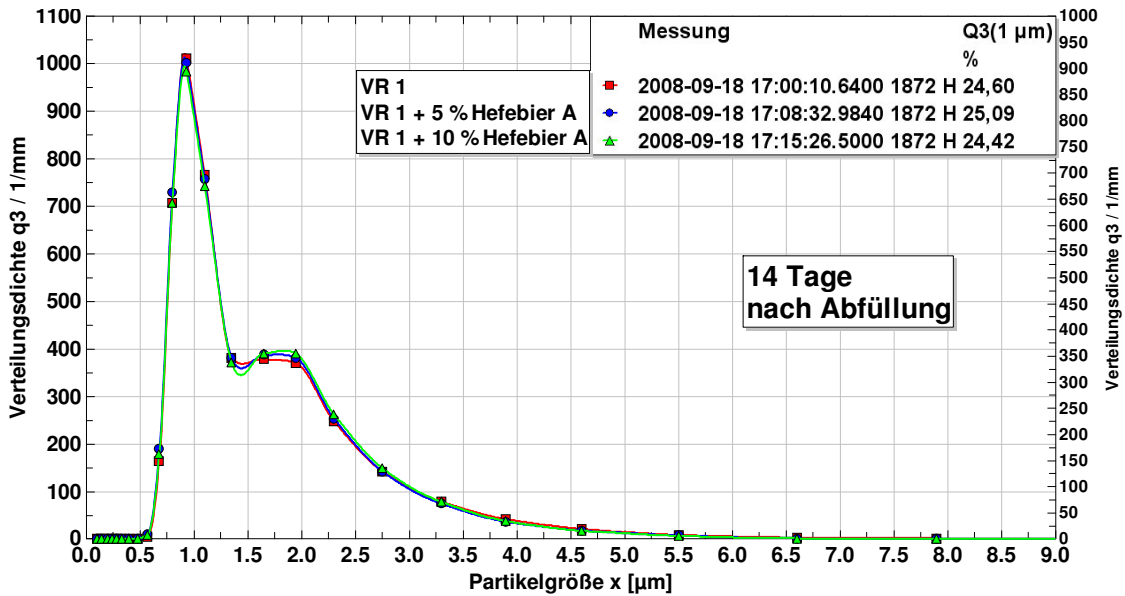


Abbildung 4.8.5: Einfluss von 5 und 10 % Hefebier auf die Partikelgrößenverteilung der Probe VR 1

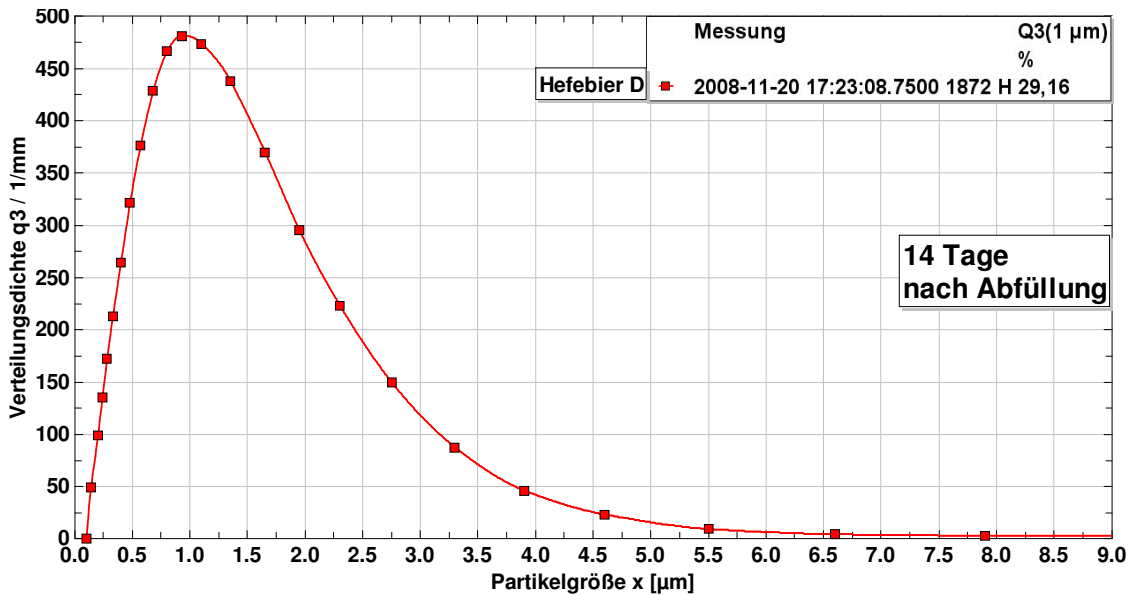


Abbildung 4.8.6: Partikelgrößenverteilung von Hefebier D

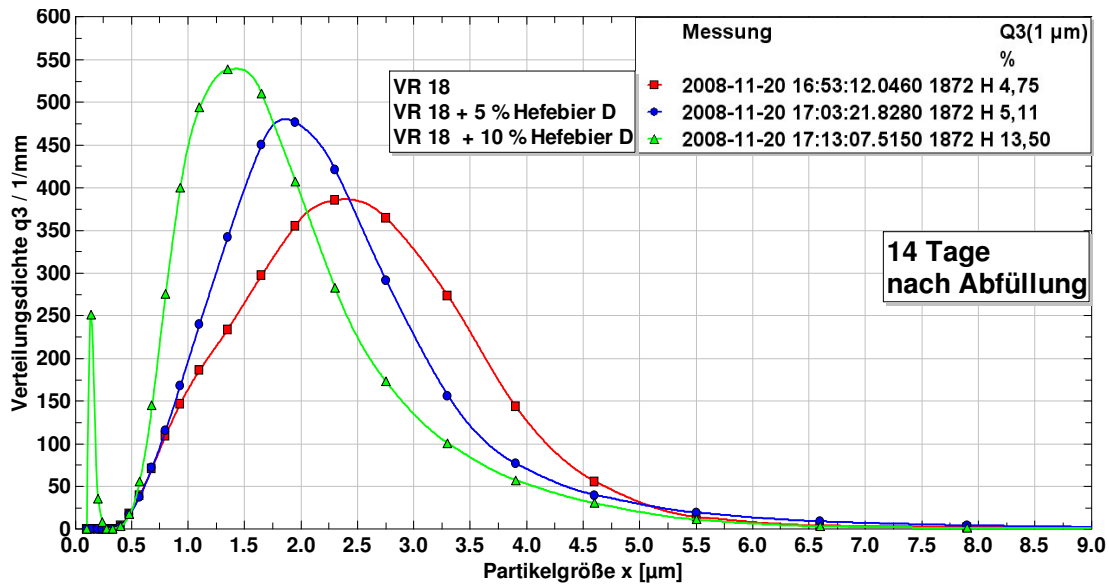


Abbildung 4.8.7: Einfluss von 5 und 10 % Hefebier auf die Partikelgrößenverteilung der Probe VR 18

Die Partikeln könnten zum Einen bei der notwendigen Kurzzeiterhitzung des Hefebieres durch Koagulation entstanden sein, wie es bereits im Kapitel 4.6 diskutiert wurde. Zum Anderen wäre aber auch eine „Ablösung“ bzw. Desorption vormals adsorbierter Partikeln von der Hefezelloberfläche oder auch eine Zerstörung der Hefezellen durch die Kurzzeiterhitzung denkbar. Das verwendete Hefebier wurde nach Angaben der Brauerei, von der es bezogen wurde, ständig unter 4 °C gekühlt und nach ca. einer Woche mit 400 PE kurzzeiterhitzt. Für die korrekte Behandlung des Hefebieres sprechen auch die Ergebnisse der durchgeführten Verkostungen, wonach keine signifikanten Unterschiede, weder bei 5 % noch bei 10 % Hefebieranteil, festgestellt wurden (Anhang Abbildungen A 4.8.16–A 4.8.20). SCHNEEBERGER [86] stellte in Untersuchungen fest, dass ein Hefebieranteil von 5 % für untergärige Lagerbiere keine signifikanten Abweichungen in der sensorischen Bewertung zur Folge hat. Durch das teilweise intensivere Aromenprofil der Weizenbiere zeigten sich auch bei 10 % Hefebieranteil keine signifikanten Unterschiede in der Verkostung. Der Einsatz von Hefebier bedingt allerdings Investitionen, wie z. B. einen Plattenwärmetauscher zur Kurzzeiterhitzung und einen gekühlten, liegenden Tank, in dem das Hefebier aufbewahrt werden und sich ein Großteil der Hefe absetzen kann. Demgegenüber stehen Einsparungen durch die Hefebierverwertung und eine verbesserte Trübungsstabilität.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Weizenbier stellt nach wie vor eine Randsorte auf dem deutschen und internationalen Biermarkt dar, was sich auch in der noch geringen Zahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen widerspiegelt. Besonders in Bezug auf die Trübungsstabilität von Weizenbier sind nur wenige Arbeiten bekannt, so dass es erst notwendig war, eine Definition für die Trübungsstabilität von Weizenbier auszuarbeiten.

Die Vorhersage der Trübungsstabilität gelang mittels 90°- und 25°-Streulichtmessung. Dabei war eine hohe Trübungsintensität und ein hohes Verhältnis der 90°- und 25°-Trübungsintensität (VZ 90°/25°) gleichsam von Bedeutung, so dass Biere, die beide Eigenschaften hatten auch die beste Trübungsstabilität zeigten. Voraussetzung für die Vorhersage der Trübungsstabilität war die Ausarbeitung einer geeigneten Probenvorbereitung.

Da Trübung von Partikeln erzeugt wird, wurde eine Methode zur Quantifizierung von Partikeln entwickelt, womit die Veränderung der Partikelkonzentration über die Zeit nach der Abfüllung untersucht werden konnte, ohne in die komplexen Koagulations- und Sedimentationsvorgänge einzugreifen. Während sich die Gesamtpartikelkonzentration erwartungsgemäß mit zunehmender Zeit reduzierte, veränderte sich die Partikelfraktion < 1,5 µm nur wenig und zeigte somit eine gute Stabilität durch die zu vernachlässigende Sinkgeschwindigkeit von Partikeln dieser Größe. Durch die Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen und durch die Partikelquantifizierung konnte auch gezeigt werden, dass nicht alleine die Partikelgröße eine Rolle für die Stabilität der Dispersion spielt, sondern dass eine durch Partikelwechselwirkungen verursachte Vergrößerung des Partikelgefüges sowohl positiv als auch negativ für die Trübungsstabilität sein kann. Insgesamt hat die entwickelte Methode zur Partikelquantifizierung einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis der komplexen Sedimentations- und Koagulations- bzw. Agglomerationsvorgänge in Weizenbier beigetragen.

Im Rahmen der Trübungs- und Partikelmessung wurde eine teilweise deutlich niedrigere Trübungsstabilität bei kalter Lagerung (4 °C) festgestellt als bei warmer Lagerung (20 °C). Die niedrigere Trübungsstabilität konnte durch die Partikel- und Trübungsmessung auf eine Ausfällung von Partikeln von bis zu 6 µm Größe zurückgeführt werden, welche spätestens nach 14 Tagen nicht mehr im Überstand

nachgewiesen werden konnten. Dieses Ergebnis verdeutlicht auch, dass grundsätzlich zwischen der Kälte-trübung in filtrierten untergärigen Bieren und unfiltrierten obergärigen Weizenbieren unterschieden werden muss.

Technologisch zeigten vor allem thermische Verfahrensschritte wie die Würzekochung und die Kurzzeiterhitzung (KZE) einen großen Einfluss auf die Trübungsstabilität. Eine verkürzte Kochzeit ohne Kurzzeiterhitzung vor der Abfüllung führte zu einer niedrigeren Trübungsstabilität. Wurde jedoch die Kochzeit in Verbindung mit einer Kurzzeiterhitzung reduziert, zeigte sich eine Verbesserung der Trübungsstabilität. Die Kurzzeiterhitzung bewirkte die Koagulation von Partikeln und damit eine Vergrößerung des Partikelgefüges. Besonders positiv wirkte die Kurzzeiterhitzung dann, wenn ein Anstieg der Partikelkonzentration $< 1,5 \mu\text{m}$, der 90°- und 25°-Trübungsintensität und der VZ 90°/25° resultierte. Darüber hinaus konnten aus den Untersuchungen zum Einfluss der Würzekochung und der Kurzzeiterhitzung auf die Trübungsstabilität neue technologische Aspekte für die Weizenbierherstellung, mit gleichzeitigem Einsparpotential an Primärenergie und Verbesserung der Trübungsstabilität, abgeleitet und auch erfolgreich in die Praxis übertragen werden.

Neben der Kurzzeiterhitzung zeigte der Zusatz von Hefebier in Dosagen von 5 % und 10 % eine positive Wirkung auf die Trübungsstabilität aufgrund der hohen Konzentrationen an Partikeln $< 1,5 \mu\text{m}$. Dabei wurden auch bei einem Zusatz von 10 % Hefebier keine signifikanten Unterschiede in der sensorischen Bewertung festgestellt.

Dagegen zeigten Untersuchungen mit verschiedenen Hefestämmen keine Unterschiede für die Trübungsstabilität der resultierenden Weizenbiere.

Die Versuche mit unterschiedlichen Wintergerstensorten und alternativen Braugetreidesorten, wie Roggen, Hafer und Triticale, haben sehr positive Ergebnisse gebracht und gezeigt, dass bereits die verwendeten Rohstoffe einen großen Einfluss auf die Trübungsstabilität haben können.

Die unterschiedlichen Trübungseigenschaften von Rohstoffen machen deutlich, dass vor allem die an der Trübungsbildung in Weizenbier beteiligten Stoffgruppen und ihre physiko-chemischen Eigenschaften in den Fokus zukünftiger Arbeiten auf diesem Gebiet rücken müssen. Nachdem trübungsrelevante Stoffgruppen identifiziert worden sind, kann dann durch gezielte Rohstoffwahl und technologische

Maßnahmen in der Mälzerei und Brauerei auf die Trübungsstabilität Einfluss genommen werden. In der Praxis kann insbesondere in den thermischen Verfahrensschritten, aber auch durch den Einsatz von Hefebier die Trübungsstabilität signifikant verbessert werden.

6 Literatur

1. Narziß, L.: Die Bierbrauerei, Band II: Technologie der Würzebereitung. 7. Auflage, Enke Verlag, Stuttgart 1992.
2. Back, W.: Ausgewählte Kapitel der Brauereitechnologie, Hans Carl Verlag, Nürnberg 2008.
3. Pfenninger, H.: Brautechnische Analysenmethoden, Band. II, 3. Auflage, Selbstverlag der MEBAK, Freising 1993.
4. Sacher, B.: Über den Einfluß von Sorte, Umwelt, agronomischen Maßnahmen und Mälzungstechnologie auf die wertbestimmenden Eigenschaften von Winterweizen. Dissertation, Fakultät für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft TU München, Freising-Weihenstephan 1997.
5. Delvaux, F., Combis, F. J., Delvaux, F. R.: The Effect of Wheat Malting on the Colloidal Haze of Wheat Beers. Technical Quarterly, 2004. 41 (1): S. 27–32.
6. Back, W., Diener, C., Sacher, B.: Hefeweizenbier - Geschmacksvarianten und Technologie. Brauwelt, 1998. 28/29: S. 1279–1284.
7. Dufner, F.: Untersuchung der rohstoffbedingten Einflüsse sowie technologische Möglichkeiten der Bierproduktion zum Zwecke der Optimierung einer stabilen Weizenbiertrübung. Diplomarbeit, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt. Department für Lebensmittel und Ernährung, TU München, Freising-Weihenstephan 2005.
8. Landwirtschaftliche Zeitung für Westfalen und Lippe, 1902. 33.
9. Heiden, L.: Untersuchungen an verschiedenen neuzeitlichen Wintergerstensorten gleicher Provenienz zur Feststellung ihrer technologischen Eigenschaften in ihrer Eignung für Brauzwecke. Dissertation, Fakultät für Brauwesen, Technische Hochschule München, Freising-Weihenstephan 1967.
10. Schöndorfer, H.: Optimierungsversuche zur Herstellung von Malzen und Bieren aus verschiedenen Wintergerstensorten. Diplomarbeit, Fachbereich für Brauwesen, Lebensmitteltechnologie und Milchwissenschaft, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan 1978.
11. Schmidt, G.: Rund um das Hefeweizenbier, Teil II Brauwelt, 1981. 18: S. 638–652.

12. Bundesgesetzblatt, Vorläufiges Biergesetz. 1993. S. 1400–1401.
13. Hanke, S.: Braueigenschaften von Hafermalz. Diplomarbeit, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2004.
14. Kusche, M.: Kolloidale Trübung in untergärigen Bieren - Entstehung, Vorhersage und Stabilisierungsmaßnahmen. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2005.
15. Bayly, J. C. et al.: Characteristics of Flo11-dependent flocculation in *Saccharomyces cerevisiae*. *Fems Yeast Research*, 2005. 5 (12): S. 1151–1156.
16. Rhymes, M. R., Smart, K. A.: Effect of storage conditions on the flocculation and cell wall characteristics of an ale brewing yeast strain. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2001. 59 (1): S. 32–38.
17. Rhymes, M. R., Smart, K. A.: Effect of starvation on the flocculation of ale and lager brewing yeasts. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1996. 54 (1): S. 50–56.
18. Narziss, L.: Abriss der Bierbrauerei, WILEY-VCH, Weinheim 2001.
19. Verstrepen, K. J. et al.: Yeast flocculation: what brewers should know. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003. 61 (3): S. 197–205.
20. Jin, Y. L., Speers, R. A.: Flocculation of *Saccharomyces cerevisiae*. *Food Research International*, 1999. 31 (6-7): S. 421–440.
21. Reiff, F.: Die Hefen. Band II: Technologie der Hefen, Hans Carl Verlag, Nürnberg 1962.
22. Wackerbauer, K., Cheong, C., Beckmann, M.: Die Propagation der Hefe. *Brauwelt*, 2002 (23/24): S. 785–797.
23. Delvaux, F.: Haze: A Determining Factor in White Beers. Dissertation, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste Biologische Wetenschappen K. U. Leuven, Leuven 2001.
24. Siebert, K. J., Carrasco, A., Lynn, P. Y.: Formation of protein-polyphenol haze in beverages. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996. 44 (8): S. 1997–2005.
25. Bamforth, C. W.: Beer haze. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 1999. 57 (3): S. 81–90.

26. Meredith, W. O. S.: The absorption of chill haze protein from barley, malt, wort, and beer by nylon. *Journal of the Institute of Brewing*, 1961. 67: S. 255–256.
27. Miedl, M., Garcia, M. A., Bamforth, C. W.: Haze formation in model beer systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005. 53 (26): S. 10161–10165.
28. Siebert, K. J., Lynn, P. Y.: Effect of protein-polyphenol ratio on the size of haze particles. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2000. 58 (3): S. 117–123.
29. Siebert, K. J., Lynn, P. Y.: Effects of alcohol and pH on protein-polyphenol haze intensity and particle size. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2003. 61 (2): S. 88–98.
30. Delvaux, F. et al.: Ambiguous impact of wheat gluten proteins on the colloidal haze of wheat beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2003. 61 (2): S. 63–68.
31. Stoupis, T., Stewart, G. G., Staffort, R. A.: Mechanical Agitation and Rheological Considerations of Ale Yeast Slurry. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2002. 60 (2): S. 58–62.
32. Hartmann, K.: Bedeutung rohstoffbedingter Inhaltsstoffe und produktionstechnologischer Einflüsse auf die Trübungsproblematik im Bier. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2006.
33. Keßler, M.: Analytische Erfassung und Interpretation der Stärkedegradation im Gersten- und Malzkorn und die Aussagekraft für den Brauprozess. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2006.
34. Brandl, A.: Partikelgrößenverteilungen und Trübungsstabilität von Hefeweißbier. Diplomarbeit, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehrstuhl für Technologie der Brauerei II, TU München, Freising-Weihenstephan 2001.
35. Stuess, M.: *Mechanische Verfahrenstechnik-Partikeltechnologie*¹, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg 2009.
36. Delvaux, F., Delvaux, F. R., Delcour, J. A.: Characterisation of the colloidal haze in commercial and pilot scale Belgian white beers. *Journal of the Institute of Brewing*, 2000. 106 (4): S. 222–227.

37. Delvaux, F. et al.: Contribution of wheat and wheat protein fractions to the colloidal haze of wheat beers. *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 2001. 59 (3): S. 135–140.
38. Brezesinski, G.: *Grenzflächen und Kolloide: physikalisch-chemische Grundlagen*, Spektrum, Akad. Verlag, Heidelberg 1993.
39. Keller, J. U.: Perspektiven der Biothermodynamik - I. Thermostatik und Thermodynamik irreversibler Prozesse. *Chemie Ingenieur Technik*, 2008. 80 (6): S. 741–753.
40. Weigl, D., Schwill-Miedaner, A., Sommer, K.: *Untersuchung der physikalischen Aspekte der Trübungsentstehung in Bier und ihre messtechnische Erfassung unter besonderer Berücksichtigung von dauertrüben Weissbieren*, Abschlussbericht für die wiss. Station für Brauerei in München e. V. Lehrstuhl für Maschinen- und Apparatekunde, TU München, Weihenstephan 2003.
41. Heitler, W., London, F.: Wechselwirkung neutraler Atome und homöopolare Bindung nach der Quantenmechanik. *Zeitschrift für Physik*, 1927. 44: S. 455–472.
42. Poeschl, M.: *Die kolloidale Stabilität untergäriger Biere - Einflussmöglichkeiten und Vorhersagbarkeit*. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan TU München, Freising 2009.
43. Goetzinger, M. et al.: Effect of roughness on particle adhesion in aqueous solutions: A study of *Saccharomyces cerevisiae* and a silica particle. *Colloids and Surfaces, B: Biointerfaces*, 2007. 55 (1): S. 44–50.
44. Hermansson, M.: The DLVO theory in microbial adhesion. *Colloids and Surfaces, B: Biointerfaces*, 1999. 14 (1–4): S. 105–119.
45. Keller, J. U.: Perspektiven der Biothermodynamik - Teil II. Adsorption von Proteinen. *Chemie Ingenieur Technik*, 2008. 80 (6): S. 755–769.
46. Löwen, H.: Kolloide - auch für Physiker Interessant? *Physikalische Blätter*, 1995. 51 (Nr. 3): S. 165–168.
47. Keller, J. U.: Perspektiven der Biothermodynamik IV. Hydratisierung von Proteinen. *Chemie Ingenieur Technik*, 2009. 81 (No. 3): S. 255–266.
48. Rowe, A. J.: Probing hydration and the stability of protein solutions - a colloid scientific approach. *Biophysical Chemistry*, 2001. 93: S. 93–101.
49. Benitez, E. I., Genovese, D. B., Lozano, J. E.: Effect of pH and ionic strength

- on apple juice turbidity: Application of the extended DLVO theory. *Food Hydrocolloids*, 2007. 21 (1): S. 100–109.
50. Jacobasch, H. J. et al.: *Elektrokinetische Messmethoden: Grundlagen und Anwendungen*. *Technisches Messen*, 1996. 63 (12): S. 439–446.
51. Vogt, I.: *Synthese und Oberflächencharakterisierung von Poly(vinylamin)-co-Poly(vinylformamid)-Kieselgel-Hybrid-Materialien*. Dissertation, Fakultät für Naturwissenschaften. TU Chemnitz, Chemnitz 2001.
52. Jacobasch, H. J. et al.: *Bestimmung des Zetapotentials aus Strömungspotenzial- und Strömungsstrommessung*. *Technisch Messen*, 1996. 63 (12): S. 447–452.
53. Plank, J., Lerf, A.: *Nanostrukturierte Materialien*. Vorlesung, TU München, Lehrstuhl für Bauchemie. 2008. Garching.
54. Taboada-Serrano, P. et al.: *Modeling aggregation of colloidal particles*. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 2005. 10 (3–4): S. 123–132.
55. Peukert, W.: *Optimierung der Produktqualität bei der Fällung von Proteinen* Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Abschlussbericht AiF-Projekt Nr. 14053 N, 2006.
56. Kühbeck, F.: *Analytische Erfassung sowie technologische und technische Beeinflussung der Läutertrübung und des Heißtrubgehaltes der Würze und deren Auswirkung auf Gärung und Bierqualität*. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan, Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I, Technische Universität München, Freising-Weihenstephan 2007.
57. Becker, T., Krottenthaler, M., Qian, F.: *Brautechnologie 3: Gärung und Lagerung*. Vorlesung. TU München, Lehrstuhl für Brau- und Getränketechnologie. 2010.
58. Striolo, A., Prausnitz, J. M.: *Osmotic second virial coefficient for linear and star poly(ethylene oxide)*. *Polymer*, 2001. 42: S. 4773–4775.
59. Tessier, P. M., Lenhoff, A. M., Sandler, S. I.: *Rapid Measurement of Protein Osmotic Second virial Coefficient by Self-Interaction Chromatography*. *Biophysical Journal*, 2002. 82 (3): S. 1620–1631.
60. Neal, B. L., Asthagiri, D., Lenhoff, A. M.: *Molecular Origins of Osmotic Second Virial Coefficients of Proteins*. *Biophysical Journal*, 1998. 75: S. 2469–2477.
61. Wanka, J., Peukert, W.: *Die Bedeutung des zweiten osmotischen Virialkoeffizienten für die Proteinkristallisation*. *Chemie Ingenieur Technik*,

2006. 78 (3): S. 273–278.
62. Pan, X., Glatz, C. E.: Solvent Effects on the Second Virial Coefficient of Subtilising and Solubility. *Crystal Growth & Design*, 2003. 3 (2): S. 203–207.
63. Sobisch, T., Lerche, D.: Charakterisierung interpartikulärer Kräfte für Fest/Flüssig-Trennverfahren mittels analytischer Zentrifugation. *Chemie Ingenieur Technik*, 2008. 80 (3): S. 393–397.
64. Bickert, G., Stahl, W.: Sedimentationsverhalten von mono- und polydispersen, submikronen Partikeln in verdünnten und konzentrierten Suspensionen. *Chemie Ingenieur Technik*, 1996. 68 (11): S. 1459–1462.
65. Ekdawi, N., Hunter, R. J.: Sedimentation of disperse and coagulated suspensions at high particle concentrations. *Colloids and Surfaces*, 1985. 15 (1/2): S. 147–159.
66. Vesaratchanon, J. S., Nikolov, A., Wasan, D. T.: Sedimentation of concentrated monodisperse colloidal suspensions: Role of collective particle interaction forces. *Journal of Colloid and Interface Science* 2008. 322 (1): S. 180–189.
67. Xua, X. et al.: Particle Structure and Stability of Colloidal Dispersions as Probed by the Kossel Diffraction Technique. *Journal of Colloid and Interface Science*, 1997. 191 (2): S. 471–481.
68. Fischer, S., Schäfer, W., Sommer, K.: Abscheideverhalten einer Zentrifuge bei der Weizenbierseparation. *Brauwelt*, 2000. 20: S. 849–852.
69. Huber, E.: Laboruntersuchungen zum Gefrierprozeß in polaren stratosphärischen Wolken. Dissertation, Fachbereich Physik, FU Berlin, 1998.
70. Meffert, C.: Mie-Streuung an sphärischen Partikeln. Fakultät für Physik, Hauptseminar, Fakultät für Physik, Universität Duisburg-Essen 2005.
71. Vortisch, H.: Beobachtung von Phasenübergängen in einzeln levitierten Schwefelsäuretröpfchen mittels Raman-Spektroskopie und elastischer Lichtstreuung. Dissertation, Fachbereich Physik, FU Berlin, 2002.
72. <http://www.photometer.com/de/abc/show.html?q=Scatter%20angle>, 09/2006.
73. Carrasco, A., Siebert, K. J.: Human visual perception of haze and relationships with instrumental measurements of turbidity. Thresholds, magnitude estimation and sensory descriptive analysis of haze in model systems. *Food Quality and Preference*, 1999. 10 (6): S. 421–436.
74. Thorne, R. S. W., Swendsen, K.: Particle size of beer turbidogens and its

- influence on nephelometry. Journal of the Institute of Brewing, 1962. 68: S. 257–270
75. Morris, T. M.: The Relationship between Haze and the Size of Particles in Beer. Journal of the Institute of Brewing, 1987. 93 (1): S. 13–17.
76. Thorne, R. S. W.: Application of formazin standards to nephelometric estimation of beer turbidity. Journal of the Institute of Brewing, 1961. 67 (2): S. 191–199.
77. Anger, H.-M.: MEBAK: Band Rohstoffe, 1. Auflage, Selbstverlag der MEBAK, Freising-Weihenstephan 2006.
78. Hermann, M.: Entstehung und Beeinflussung qualitätsbestimmender Aromastoffe bei der Herstellung von Weißbier. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt., TU München, Freising-Weihenstephan 2005.
79. Peinert, J. C.: Partikelgröße - Indikator für die Trübungsstabilität von Weißbier. Brauwelt, 2006. 17: S. 478–481.
80. Sympatec. <http://www.sympatec.com/DE/LaserDiffraction/SUCCELL.html>, 09/2006.
81. Thiele, F.: Einfluss der Hefevitalität und der Gärparameter auf die Stoffwechselprodukte der Hefe und auf die Geschmacksstabilität. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2006.
82. Pfenninger, H.: Brautechnische Analysenmethoden, Band I; 3. Auflage, Selbstverlag der MEBAK, Freising-Weihenstephan 1997.
83. Pfenninger, H.: Brautechnische Analysenmethoden, Band III; 2. Auflage, Selbstverlag der MEBAK, Freising-Weihenstephan 1996.
84. Pfenninger, H.: MEBAK, Band III; 2. Auflage, Selbstverlag der MEBAK, Freising 1996.
85. Sass, T.: Einfluss der Gerstenmalzqualität auf die Würze- und Bierqualität von Weizenbier. Diplomarbeit, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung Landnutzung und Umwelt, Department für Lebensmittel und Ernährung, TU München, Freising-Weihenstephan 2004.
86. Schneeberger, M.: Verwertung von Prozessbieren in der Brauerei. Dissertation, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München, Freising-Weihenstephan 2006.

Anhang

Anhang Kapitel 4.1.1

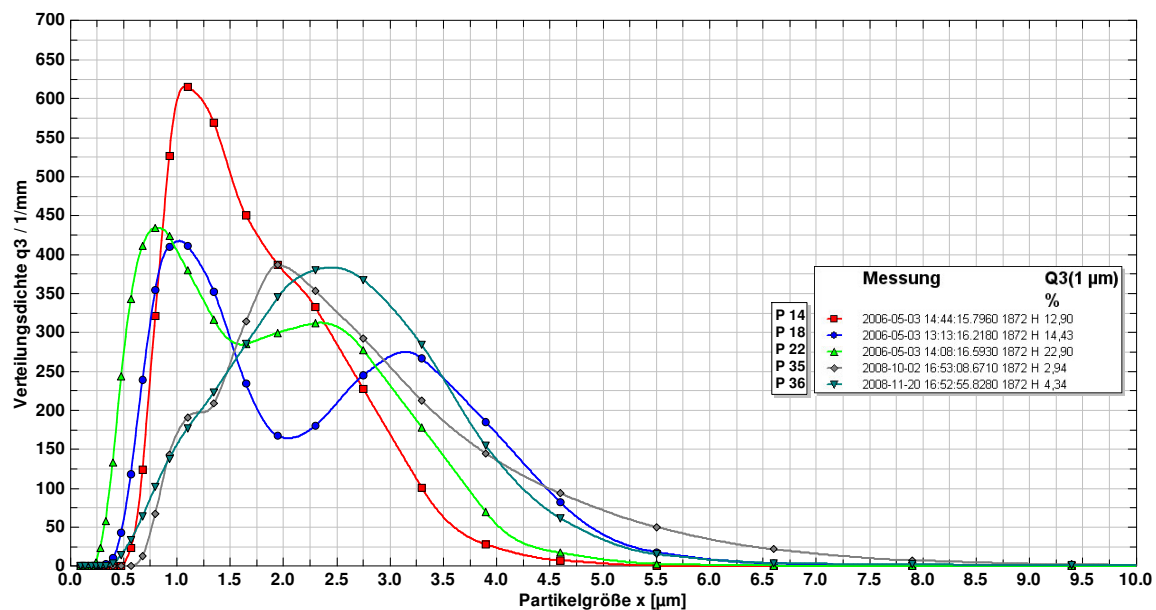


Abbildung A4.1.1: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 14, P 18, P 22, P 35 und P 36 mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,5 und 0,6

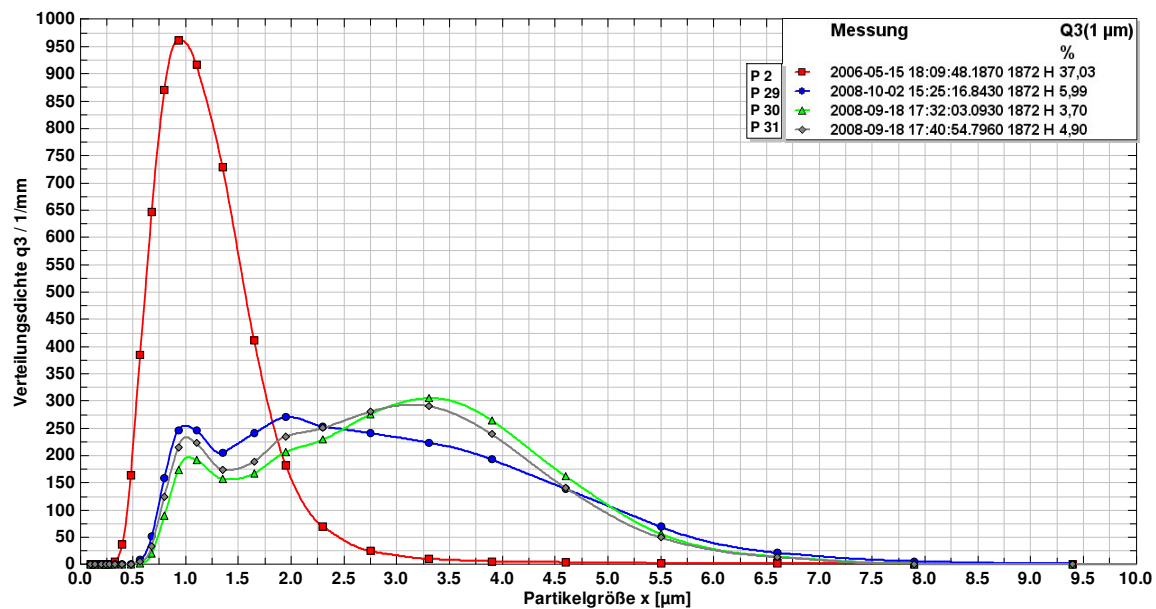


Abbildung A4.1.2: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 2, P 29, P 30 und P 31 mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7

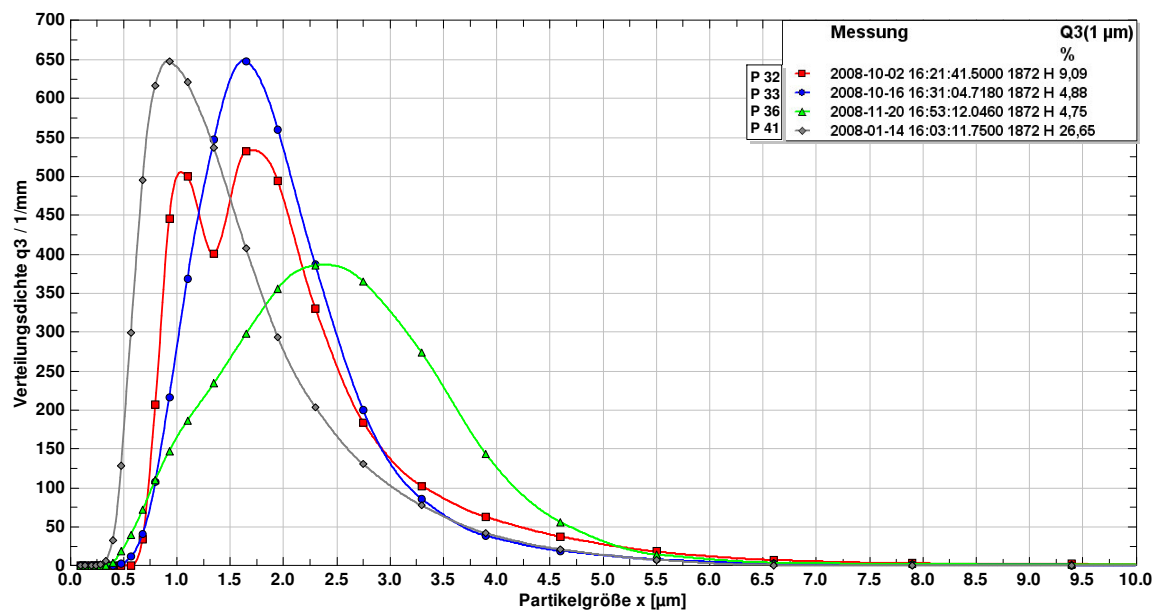


Abbildung A4.1.3: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 32, P 33, P 36 und P 41 mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7

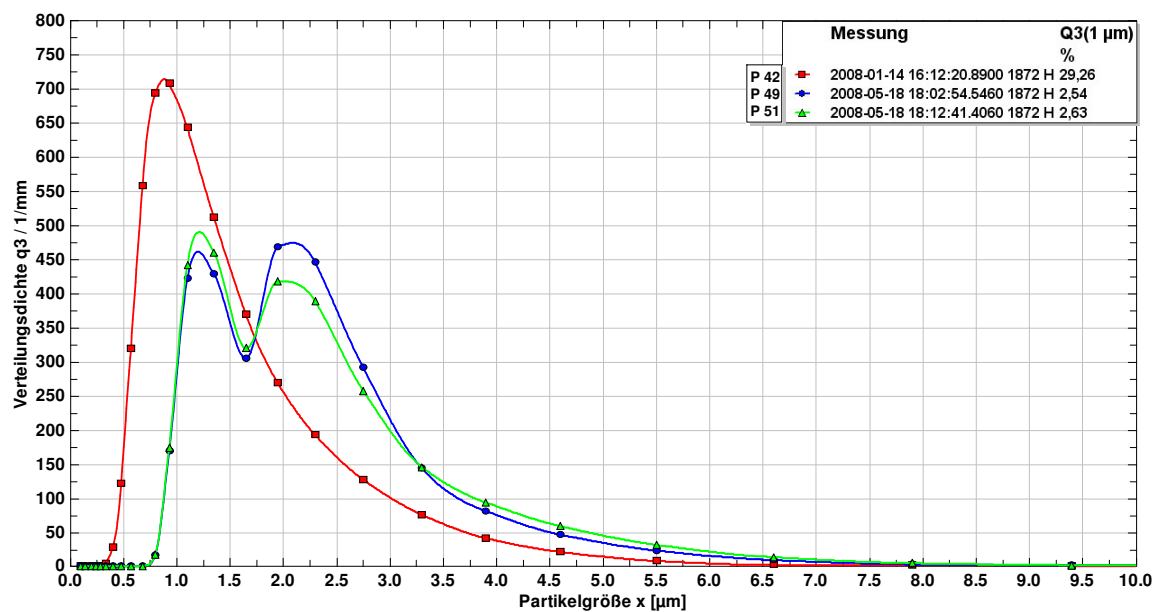


Abbildung A4.1.4: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 42, P 49 und P 51 mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,6 und 0,7

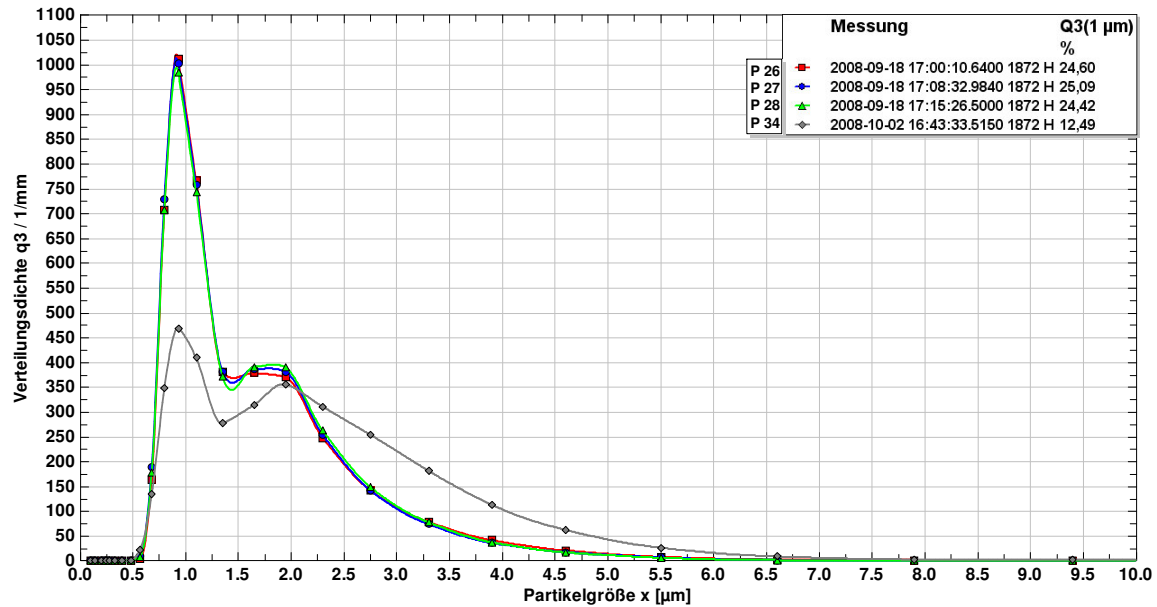


Abbildung A4.1.5: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 26, P 27, P 28 und P 34 mit einer VZ 90°/25° zwischen 0,7 und 0,8

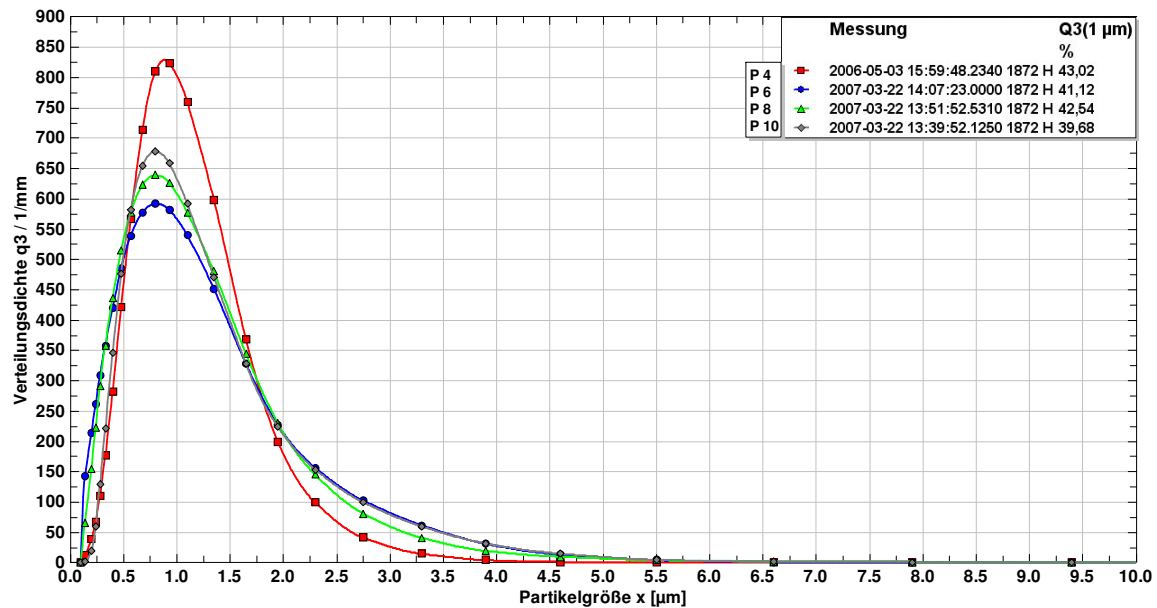


Abbildung A4.1.6: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 4, P 6, P 8 und P 10 mit einer VZ 90°/25° > 0,9

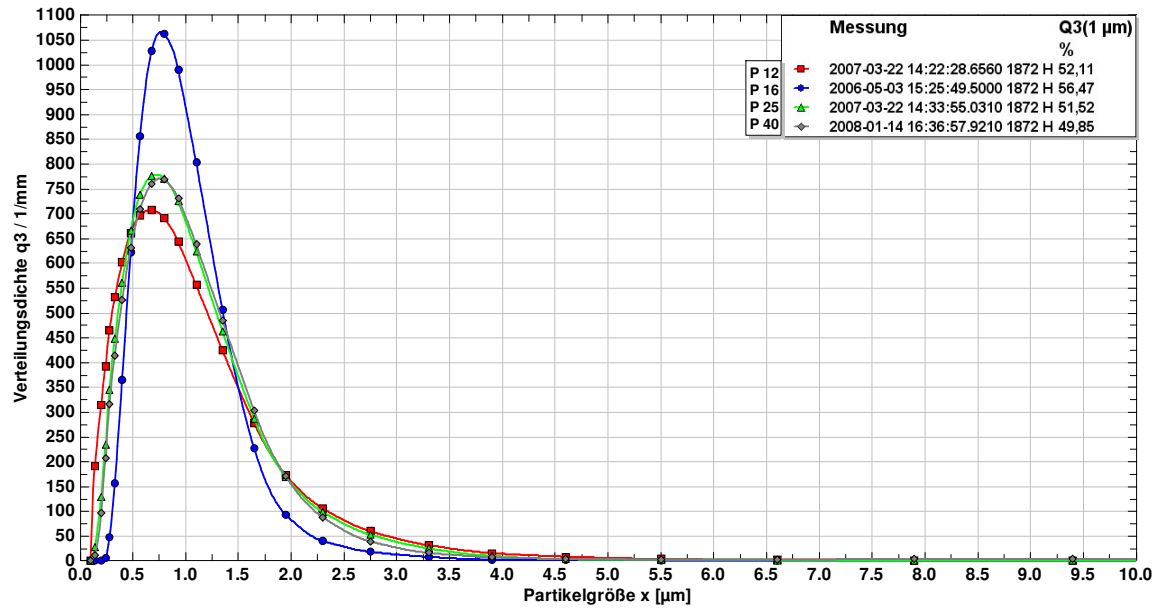


Abbildung A4.1.7: Partikelgrößenverteilungen der Proben P 12, P 16, P 25 und P 40 mit einer VZ $90\%/25^\circ > 0,9$

Anhang Kapitel 4.2

Tabelle A 4.2.1: Zeitliche Veränderung der 90°- und 25°-Trübungsintensität von Weizenbieren bei Lagertemperaturen von 4 °C im Vergleich zu 20 °C, gemessen bei 12 °C

Probe	Lagerung nach Abfüllung				VZ (90°/25°)		Lagerung nach					
	Abfüllung	Δt [d]	90°	25°			Abfüllung	Δt [d]	90°	25°	VZ (90°/25°)	
1	Kaltlag.	8	50	80	0,63		17	Kaltlag.	9	175	200	0,88
1	Kaltlag.	26	10	7	1,43		17	Kaltlag.	22	125	200	0,63
1	Kaltlag.	44	12	12	1,00		17	Kaltlag.	38	14	28	0,50
2	Warmlag.	12	55	86	0,64		17	Kaltlag.	65	8	17	0,47
2	Warmlag.	33	46	74	0,62		18	Warmlag.	9	97	175	0,55
2	Warmlag.	47	47	70	0,67		18	Warmlag.	22	94	166	0,57
2	Warmlag.	71	37	54	0,69		18	Warmlag.	41	77	133	0,58
3	Kaltlag.	8	70	71	0,99		18	Warmlag.	65	56	91	0,62
3	Kaltlag.	23	55	57	0,96		19	Kaltlag.	8	200	200	1,00
3	Kaltlag.	40	33	34	0,97		19	Kaltlag.	21	200	200	1,00
3	Kaltlag.	69	23	27	0,85		19	Kaltlag.	54	200	200	1,00
3	Kaltlag.	85	22	26	0,85		19	Kaltlag.	89	200	200	1,00
3	Kaltlag.	112	13	13	1,00		19	Kaltlag.	111	171	150	1,14
4	Warmlag.	8	110	114	0,96		20	Warmlag.	10	200	200	1,00
4	Warmlag.	29	95	101	0,94		20	Warmlag.	21	200	200	1,00
4	Warmlag.	45	86	92	0,93		20	Warmlag.	54	200	200	1,00
4	Warmlag.	76	80	95	0,84		20	Warmlag.	89	200	200	1,00
4	Warmlag.	88	72	84	0,86		20	Warmlag.	111	200	191	1,05
4	Warmlag.	101	58	65	0,89		21	Kaltlag.	8	42	86	0,49
5	Kaltlag.	10	35	37	0,95		21	Kaltlag.	15	23	47	0,49
5	Kaltlag.	21	32	34	0,94		21	Kaltlag.	21	11	28	0,39
5	Kaltlag.	42	21	23	0,91		21	Kaltlag.	37	4	15	0,27
6	Warmlag.	10	55	58	0,95		21	Kaltlag.	64	4	14	0,29
6	Warmlag.	21	46	50	0,92		22	Warmlag.	8	57	97	0,59
6	Warmlag.	42	37	40	0,93		22	Warmlag.	16	49	96	0,51
6	Warmlag.	55	25	28	0,89		22	Warmlag.	28	32	58	0,55
7	Kaltlag.	10	200	200	1,00		22	Warmlag.	40	22	41	0,54
7	Kaltlag.	21	72	69	1,04		22	Warmlag.	64	15	36	0,42
7	Kaltlag.	42	37	39	0,95		24	Kaltlag.	7	200	200	1,00
7	Kaltlag.	55	20	21	0,95		24	Kaltlag.	16	200	200	1,00
8	Warmlag.	10	200	200	1,00		24	Kaltlag.	64	58	55	1,05
8	Warmlag.	21	66	63	1,05		24	Kaltlag.	99	20	30	0,67
8	Warmlag.	42	45	45	1,00		24	Kaltlag.	121	16	23	0,70
8	Warmlag.	55	35	36	0,97		25	Warmlag.	7	200	200	1,00
8	Warmlag.	65	23	23	1,00		25	Warmlag.	16	200	200	1,00
9	Kaltlag.	10	73	80	0,91		25	Warmlag.	64	102	97	1,05
9	Kaltlag.	21	56	64	0,88		25	Warmlag.	99	36	44	0,82
9	Kaltlag.	42	20	26	0,77		25	Warmlag.	121	18	27	0,67
10	Warmlag.	10	73	80	0,91		39	Kaltlag.	11	85	87	0,98
10	Warmlag.	21	54	62	0,87		39	Kaltlag.	25	63	64	0,98
10	Warmlag.	42	42	49	0,86		39	Kaltlag.	60	34	37	0,92
10	Warmlag.	55	31	34	0,91		39	Kaltlag.	82	24	24	1,00
11	Kaltlag.	10	200	200	1,00		39	Kaltlag.	103	17	19	0,89
11	Kaltlag.	22	85	83	1,02		40	Warmlag.	11	124	127	0,98
11	Kaltlag.	48	62	61	1,02		40	Warmlag.	25	98	99	0,99
11	Kaltlag.	76	57	54	1,06		40	Warmlag.	60	59	59	1,00
11	Kaltlag.	121	63	51	1,24		40	Warmlag.	82	49	50	0,98
11	Kaltlag.	163	43	35	1,23		40	Warmlag.	103	37	38	0,97
12	Warmlag.	10	200	200	1,00		49	Warmlag.	10	114	177	0,64
12	Warmlag.	22	200	200	1,00		49	Warmlag.	32	106	186	0,57
12	Warmlag.	48	121	115	1,05		49	Warmlag.	64	110	185	0,59
12	Warmlag.	76	105	93	1,13		49	Warmlag.	92	89	161	0,55
12	Warmlag.	111	70	57	1,23		50	Kaltlag.	10	114	177	0,64
12	Warmlag.	163	50	41	1,22		50	Kaltlag.	32	12	19	0,63
13	Kaltlag.	10	30	52	0,58		50	Kaltlag.	64	9	14	0,64
13	Kaltlag.	21	12	20	0,60		50	Kaltlag.	92	7	11	0,64
13	Kaltlag.	28	8	15	0,53		51	Warmlag.	10	93	138	0,67
14	Warmlag.	8	42	81	0,52		51	Warmlag.	32	109	184	0,59
14	Warmlag.	14	35	66	0,53		51	Warmlag.	64	93	158	0,59
14	Warmlag.	30	21	48	0,44		51	Warmlag.	92	83	132	0,63
15	Kaltlag.	12	75	78	0,96		52	Kaltlag.	10	93	138	0,67
15	Kaltlag.	28	61	62	0,98		52	Kaltlag.	32	13	19	0,68
15	Kaltlag.	49	40	42	0,95		52	Kaltlag.	64	9	14	0,64
15	Kaltlag.	65	36	38	0,95		52	Kaltlag.	92	7	11	0,64
15	Kaltlag.	92	22	21	1,05							
16	Warmlag.	8	200	200	1,00							
16	Warmlag.	17	120	127	0,94							
16	Warmlag.	35	101	107	0,94							
16	Warmlag.	56	87	97	0,90							
16	Warmlag.	68	79	84	0,94							
16	Warmlag.	92	64	62	1,03							

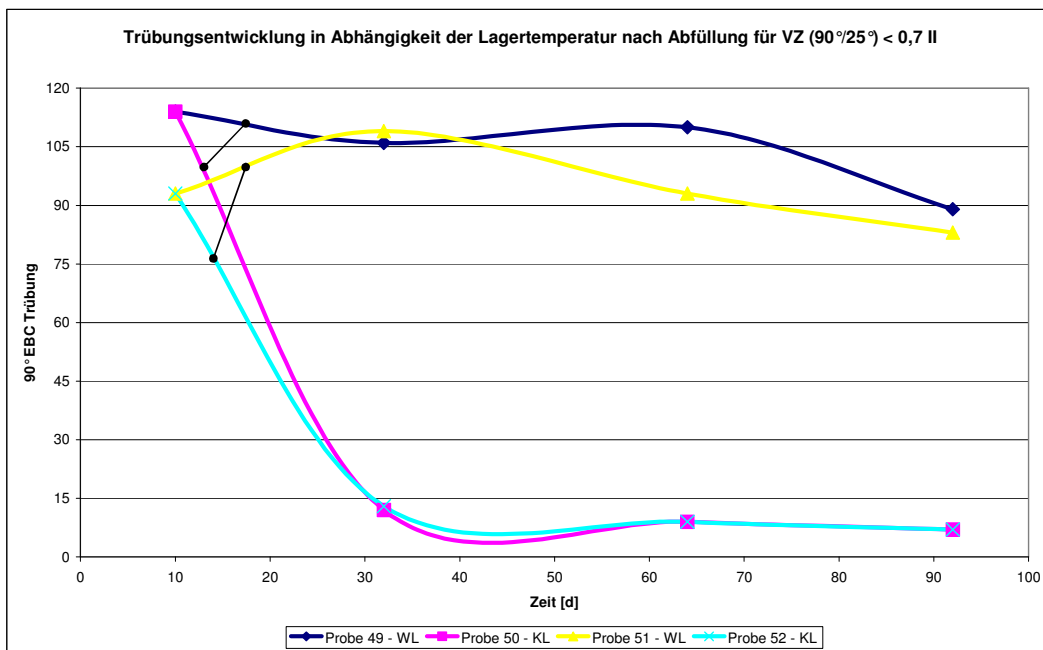


Abbildung A 4.2.1: Vergleich der Trübungsabnahme von Probenpaaren mit einer VZ 90°/25° < 0,7 bei unterschiedlichen Lagertemperaturen von 4 °C (KL) und 20 °C (WL) für die Probenpaare 49 WL (20 °C) und 50 KL (4 °C) und 51 WL (20 °C) und 52 KL (4 °C), gemessen bei 12 °C

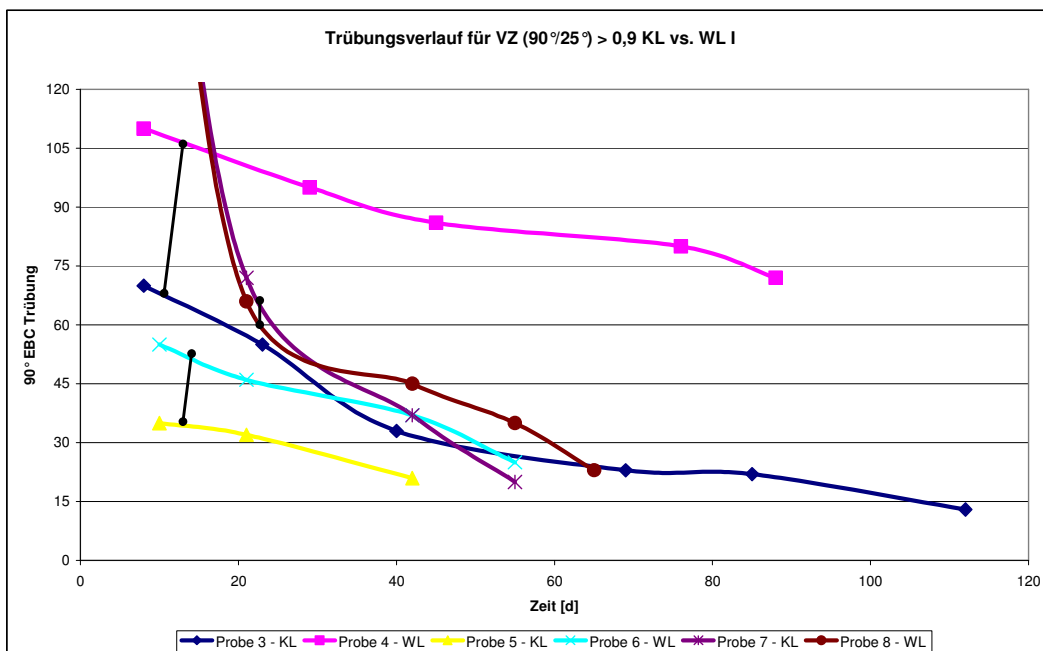


Abbildung A 4.2.2: Vergleich der Trübungsabnahme von Probenpaaren mit einer VZ 90°/25° > 0,9 bei unterschiedlichen Lagertemperaturen von 4 °C (KL) und 20 °C (WL) für die Probenpaare 3 KL (4 °C) und 4 WL (20 °C), 5 KL (4 °C) und 6 WL (20 °C) und 7 KL (4 °C) und 8 WL (20 °C), gemessen bei 12 °C

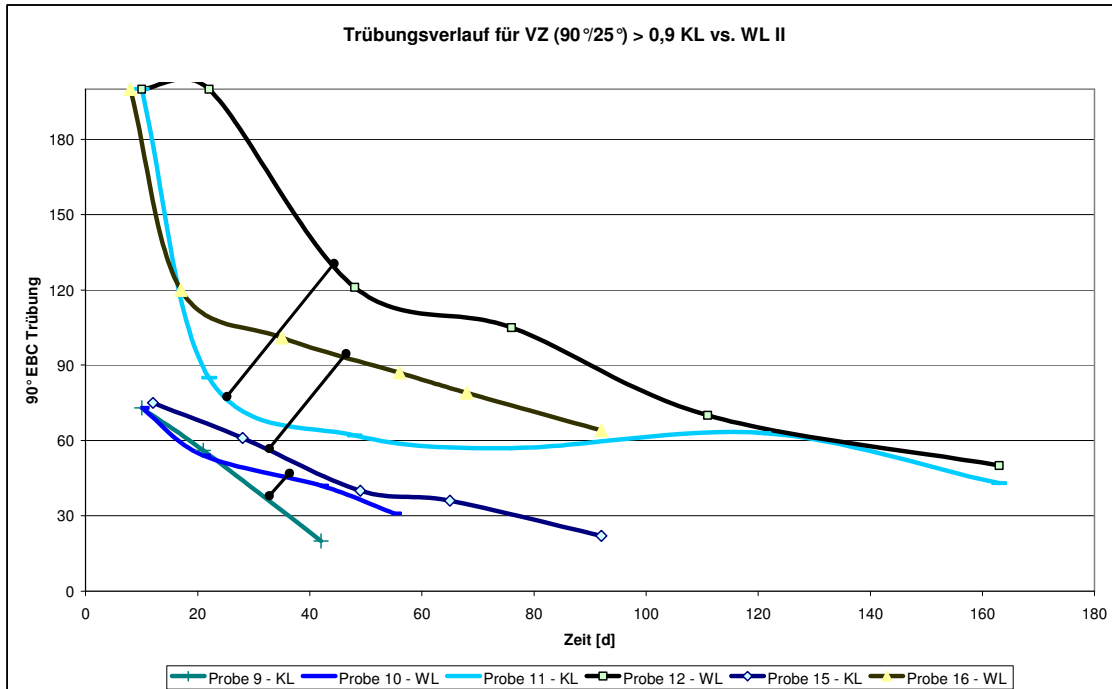


Abbildung A 4.2.3: Vergleich der Trübungsabnahme von Probenpaaren mit einer VZ 90°/25° > 0,9 bei unterschiedlichen Lagertemperaturen von 4 °C (KL) und 20 °C (WL) für die Probenpaare 9 KL (4 °C) und 10 WL (20 °C), 11 KL (4 °C) und 12 WL (20 °C) und 15 KL (4 °C) und 16 WL (20 °C), gemessen bei 12 °C

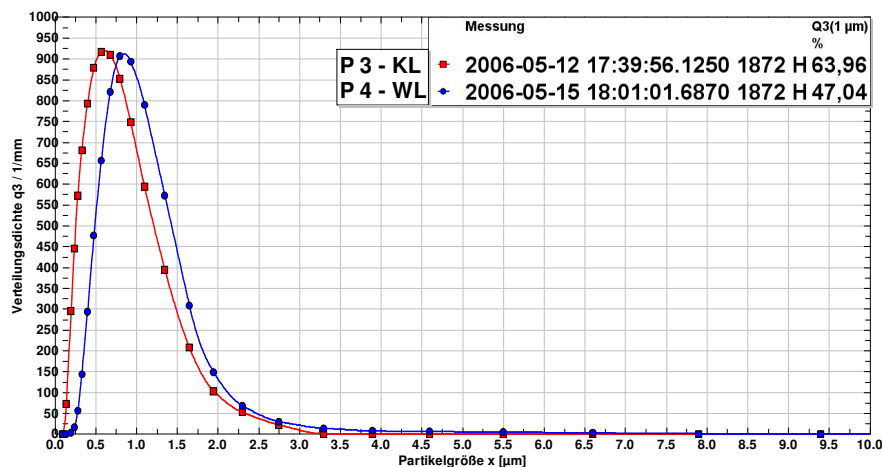


Abbildung A 4.2.4: Vergleich der PGV von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 3 KL bei 4 °C, P 4 WL bei 20 °C, gemessen bei 12 °C

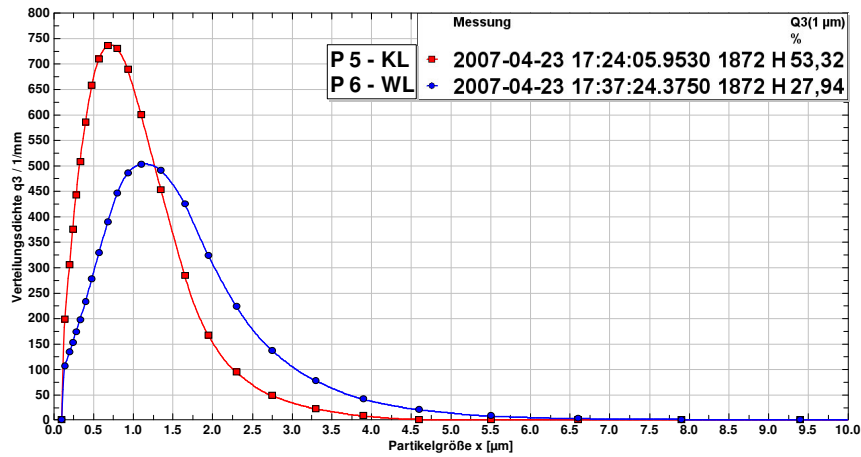


Abbildung A 4.2.5: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 5 KL bei 4 °C, P 6 WL bei 20 °C

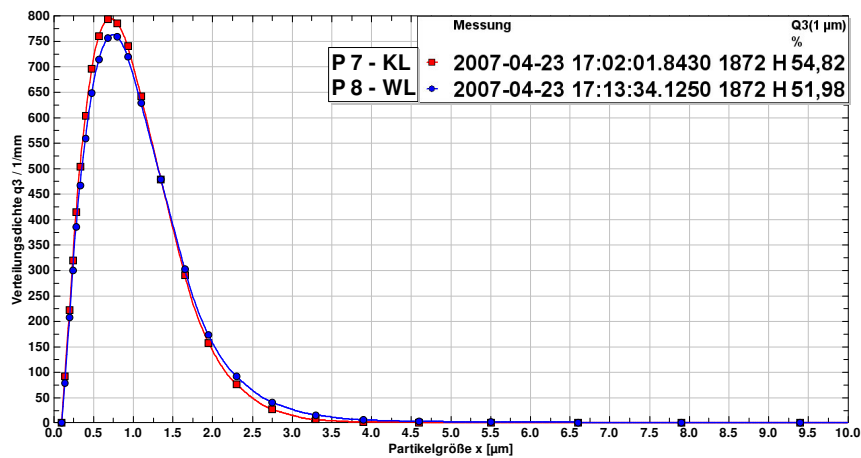


Abbildung A 4.2.6: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 7 KL bei 4 °C, P 8 WL bei 20 °C

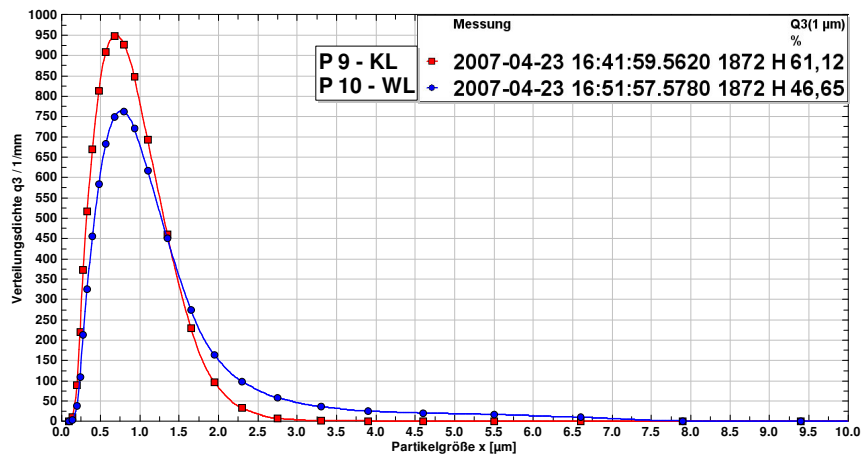


Abbildung A 4.2.7: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 9 KL bei 4 °C, P 10 WL bei 20 °C

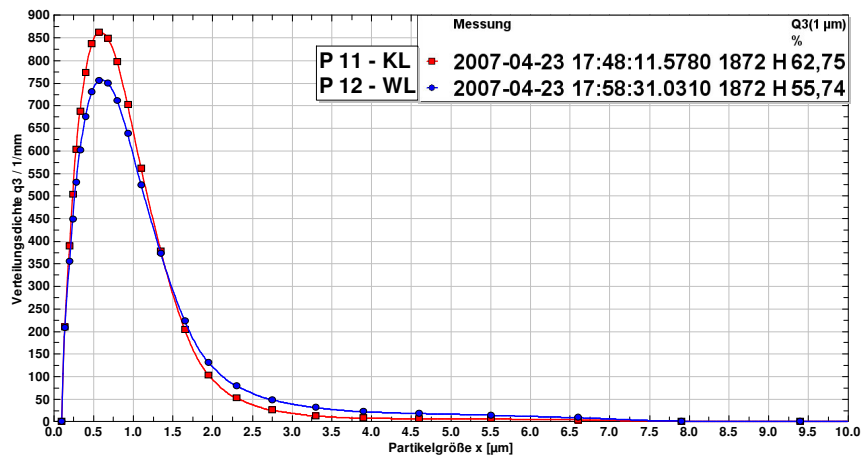


Abbildung A 4.2.8: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 11 KL bei 4 °C, P 12 WL bei 20 °C

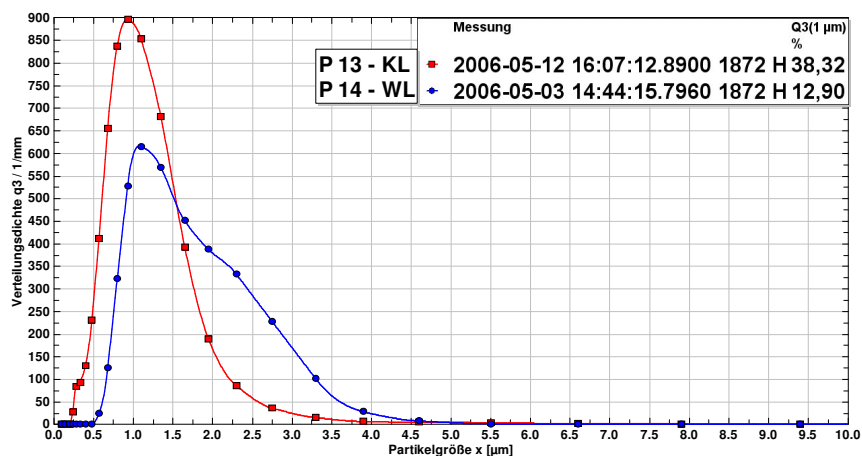


Abbildung A 4.2.9: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 13 KL bei 4 °C, P 14 WL bei 20 °C

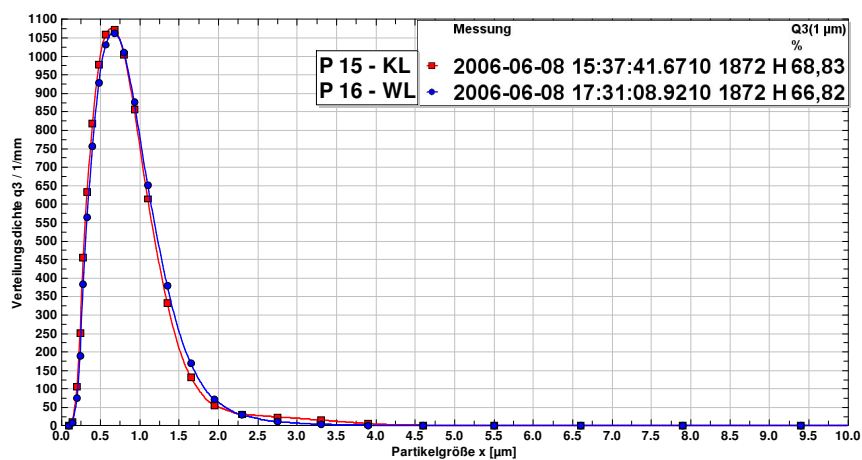


Abbildung A 4.2.10: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 15 KL bei 4 °C, P 16 WL bei 20 °C

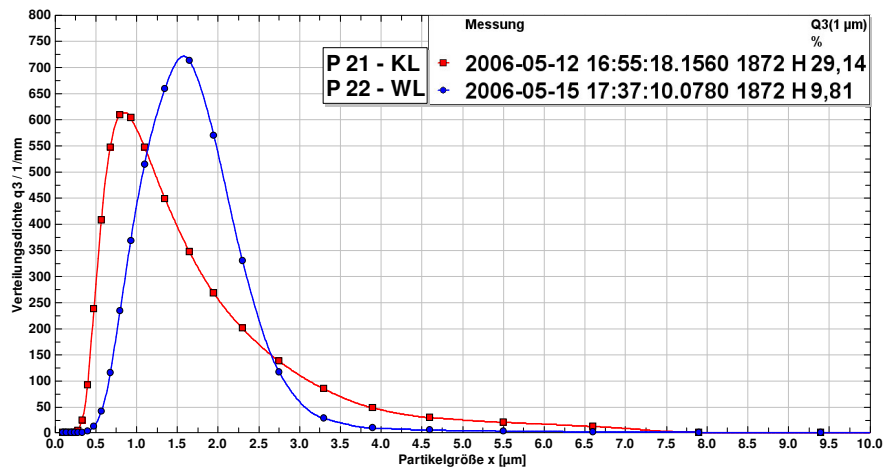


Abbildung A 4.2.11: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 21 KL bei 4 °C, P 22 WL bei 20 °C

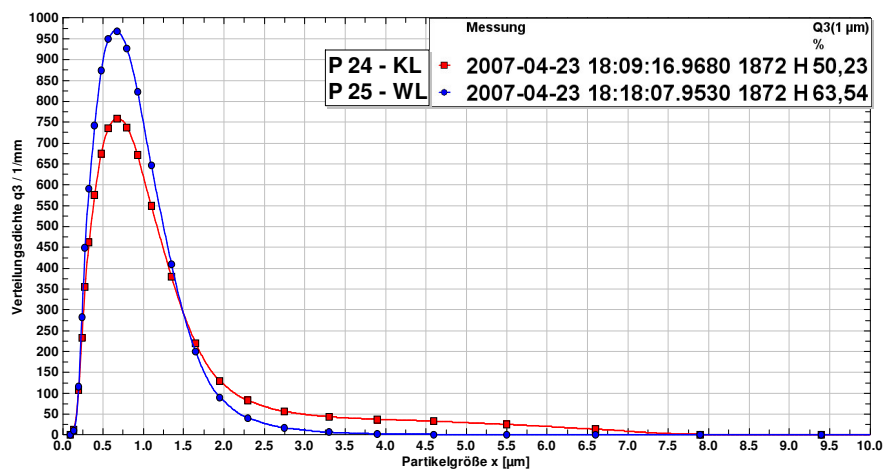


Abbildung A 4.2.12: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 24 KL bei 4 °C, P 25 WL bei 20 °C

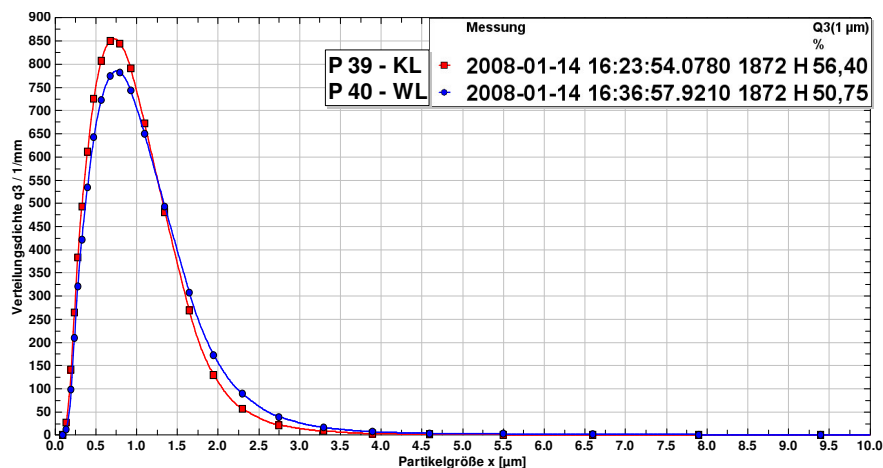


Abbildung A 4.2.11: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 39 KL bei 4 °C, P 40 WL bei 20 °C

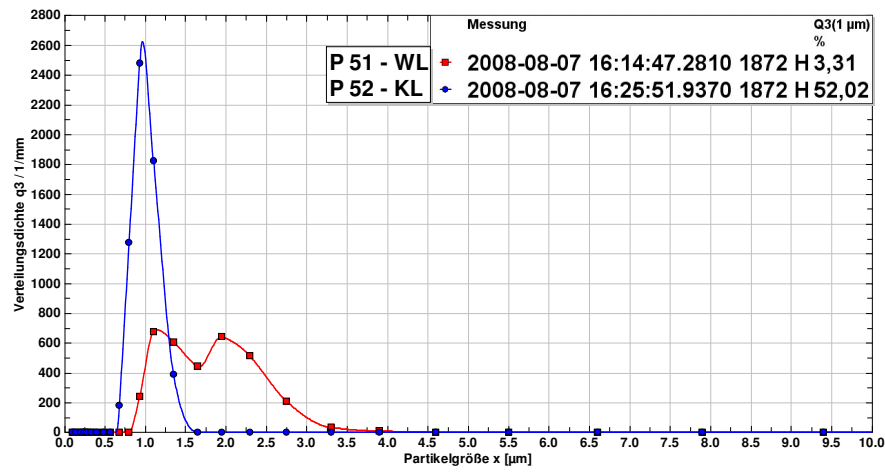


Abbildung A 4.2.12: Vergleich der PGV (bei 12 °C) von Bieren der gleichen Abfüllung und unterschiedlichen Lagertemperaturen nach der Abfüllung: P 51 KL bei 4 °C, P 52 WL bei 20 °C

Anhang Kapitel 4.3

Tabelle A 4.3.1:

Statistische Auswertung der Hefezellzahlbestimmung und der Partikelstandards									
Messung am	26.04.2006	03.05.2006	12.05.2006	15.05.2006	08.06.2006	15.02.2007	22.03.2007	02.04.2007	23.04.2007
Hefezellzahl	11411500	11411500	11411500	11411500	26473000	4920000	9770000	5625000	13180000
Stabw. HZZ	1141150	1141150	1141150	1141150	2647300	492000	977000	667888,793	1318000
x50	6,53	6,53	6,49	6,59	4,79	5,88	8,35	8,36	8,06
x50/2	3,265	3,265	3,245	3,295	2,395	2,94	4,175	4,18	4,03
VSt [µl/ml]	1,6628791	1,6628791	1,63250764	1,70913897	1,52260797	0,52345033	2,97668163	1,71996558	3,61159409
Stabw. VSt [µl/ml]	0,16628791	0,16628791	0,16325076	0,1709139	0,1522608	0,05234503	0,29766816	0,20422146	0,36115941
VK	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,11873579	0,1
KI = 95 %	0,10306442	0,10306442	0,10118201	0,10593158	0,09437049	0,03244319	0,18449325	0,14151565	0,22384481
Messung am	29.05.2007	28.06.2007	05.09.2007	13.11.2007	19.11.2007	29.11.2007	11.12.2007	19.12.2007	14.01.2008
Hefezellzahl	14000000	20670000	7799479,17	3943750	4798437,5	4967187,5	1540625	1834375	1393750
Stabw. HZZ	1353125	1784375	508176,953	460824,197	500837,515	510387,435	197532,522	94096,5816	102274,481
x50	7,64	8,07	6,32	6,52	7,01	6,71	5,97	4,64	6,12
x50/2	3,82	4,035	3,16	3,26	3,505	3,355	2,985	2,32	3,06
VSt [µl/ml]	3,27	5,69	1,03	0,57	0,87	0,79	0,17	0,10	0,17
Stabw. VSt [µl/ml]	0,31578856	0,49077805	0,06713432	0,06684308	0,09028785	0,08069487	0,02199581	0,00491933	0,01226874
VK	0,09665179	0,0863268	0,06515524	0,11684924	0,10437513	0,1027518	0,12821584	0,05129626	0,07338079
KI = 95 %	0,19572418	0,3041818	0,05371766	0,04142901	0,05595996	0,05001428	0,0136329	0,00304898	0,0076041
Messung am	25.01.2008	05.02.2008	26.02.2008	06.03.2008	20.03.2008	18.05.2008	10.06.2008	11.07.2008	24.07.2008
Hefezellzahl	8312500	3632812,5	4229166,67	1756250	6324218,75	1257812,5	6218750	10986979,2	17558593,8
Stabw. HZZ	431695,121	265427,973	258387,931	233992,744	439230,474	152782,71	214011,171	508080,859	1343951,14
x50	6,01	6,12	6,99	6,27	5,79	4,93	5,43	5,92	6,55
x50/2	3,005	3,06	3,495	3,135	2,895	2,465	2,715	2,96	3,275
VSt [µl/ml]	0,94	0,44	0,76	0,23	0,64	0,08	0,52	1,19	2,58
Stabw. VSt [µl/ml]	0,04904322	0,03184046	0,046183	0,03018446	0,04461764	0,00958061	0,01793141	0,05516662	0,19764497
VK	0,05193325	0,07306404	0,06109665	0,1332343	0,06945213	0,121467	0,03441386	0,04624391	0,07654093
KI = 95 %	0,03039674	0,02206391	0,03695342	0,01870818	0,03091788	0,00593802	0,01434785	0,04414168	0,13695846
Messung am	07.08.2008	21.08.2008	05.09.2008	10.09.2008	18.09.2008	02.10.2008	10.10.2008	16.10.2008	
Hefezellzahl	9171875	9171875	6890625	6968750	1805555,56	9589843,75	361328,125	1765625	
Stabw. HZZ	1403450,14	1758612,86	1122996,87	1065355,64	536230,737	566069,404	69595,8017	390103,819	
x50	5,97	6,63	6,88	7,07	6,32	6,46	6,95	6,71	
x50/2	2,985	3,315	3,44	3,535	3,16	3,23	3,475	3,355	
VSt [µl/ml]	1,02	1,40	1,17	1,29	0,24	1,35	0,06	0,28	
Stabw. VSt [µl/ml]	0,15627819	0,26821881	0,19139133	0,1970295	0,07084045	0,079863	0,01222689	0,06167741	
VK	0,15301671	0,19173973	0,1629746	0,15287615	0,29698933	0,05902801	0,19261108	0,22094376	
KI = 95 %	0,09686045	0,16624068	0,11862339	0,1221179	0,04628158	0,05534122	0,00847264	0,03822736	

Tabelle A 4.3.2: Rohdaten der Partikelquantifizierung und Trübungsmessung für die Proben 2–10

Probe	Partikelvol. Gesamt		Partikelvol. für $x < 1,5 \mu\text{m}$		ml VSt	VSt [µl/ml]	StAbw	Gesamt	StAbw VSt/ml	Qges(x ₀)	Ql(x ₀)	Ql(x=1)	Ql(x=1,5)	Partikelgröße x ₅₀ der Hefe-suspension [µm]		Δt [d]	90°	25°	VZ (90°/25°)
	[µl/500 ml]	Gesamt	[µl/500 ml]	Partikelgröße										x ₀ (= x _{50/2})					
2 Warmlag.	7,3		5,3		2	1,66	0,33	0,17	0,54	0,99	0,29	0,72	6,53	3,265	35	46	74	0,62	
2 Warmlag.	10,0		7,8		2	1,71	0,34	0,17	0,65	0,99	0,38	0,78	6,59	3,295	47	47	70	0,67	
2 Warmlag.	7,1		6,3		2	1,52	0,30	0,15	0,57	1	0,52	0,89	4,79	2,395	71	37	54	0,69	
3 Kaltlag.	6,2		5,3		2	1,66	0,33	0,17	0,46	1	0,62	0,867	6,53	3,265	69	23	27	0,85	
3 Kaltlag.	5,0		4,4		2	1,63	0,33	0,16	0,344	1	0,638	0,875	6,49	3,245	75	22	26	0,85	
3 Kaltlag.	4,2		4,0		2	1,52	0,30	0,15	0,27	1	0,71	0,95	4,79	2,395	102	13	13	1,00	
4 Warmlag.	10,2		6,0		2	1,66	0,33	0,17	0,67	0,994	0,44	0,59	6,53	3,265	66	80	95	0,84	
4 Warmlag.	8,6		6,9		2	1,71	0,34	0,17	0,59	0,98	0,48	0,8	6,59	3,295	78	32	42	0,76	
4 Warmlag.	4,5		4,5		2	1,52	0,30	0,15	0,32	1	0,85	1	4,79	2,395	102	22	26	0,85	
5 Kaltlag.	12,8		8,3		2	2,98	0,60	0,30	0,53	0,99	0,41	0,65	8,35	4,175	10	35	37	0,95	
5 Kaltlag.	9,6		6,4		2	1,72	0,41	0,20	0,63	0,98	0,42	0,67	8,36	4,18	21	32	34	0,94	
5 Kaltlag.	10,7		8,3		2	3,61	0,72	0,36	0,325	1	0,525	0,78	8,06	4,03	42	21	23	0,91	
6 Warmlag.	12,8		8,3		2	2,98	0,60	0,30	0,53	0,99	0,41	0,65	8,35	4,175	10	55	58	0,95	
6 Warmlag.	15,3		7,3		4	1,72	0,82	0,20	0,54	0,98	0,226	0,48	8,36	4,18	21	46	50	0,92	
6 Warmlag.	14,9		8,0		2	3,61	0,72	0,36	0,5	0,97	0,28	0,534	8,06	4,03	42	37	40	0,93	
7 Kaltlag.	16,7		11,5		2	2,98	0,60	0,30	0,638	0,99	0,425	0,685	8,35	4,175	10	200	200	1,00	
7 Kaltlag.	14,2		10,2		2	1,72	0,41	0,20	0,75	0,99	0,45	0,72	8,36	4,18	21	72	69	1,04	
7 Kaltlag.	13,5		10,9		2	3,61	0,72	0,36	0,464	1	0,54	0,81	8,06	4,03	42	37	39	0,95	
8 Warmlag.	16,7		11,5		2	2,98	0,60	0,30	0,638	0,99	0,425	0,685	8,35	4,175	10	200	200	1,00	
8 Warmlag.	12,6		9,1		2	1,72	0,41	0,20	0,72	0,99	0,455	0,726	8,36	4,18	21	66	63	1,05	
8 Warmlag.	13,5		10,6		4	1,72	0,82	0,20	0,485	0,99	0,52	0,788	8,06	4,03	42	45	45	1,00	
9 Kaltlag.	23,6		10,6		2	2,98	0,60	0,30	0,516	0,69	0,27	0,45	8,35	4,175	10	73	80	0,91	
9 Kaltlag.	16,7		12,0		4	1,72	0,82	0,20	0,585	0,993	0,44	0,715	8,36	4,18	21	56	64	0,88	
9 Kaltlag.	10,7		9,4		2	3,61	0,72	0,36	0,325	1	0,6	0,88	8,06	4,03	42	20	26	0,77	
10 Warmlag.	23,6		10,6		2	2,98	0,60	0,30	0,516	0,69	0,27	0,45	8,35	4,175	10	73	80	0,91	
10 Warmlag.	14,1		10,0		2	1,72	0,41	0,20	0,748	0,989	0,442	0,71	8,36	4,18	21	54	62	0,87	
10 Warmlag.	15,1		10,3		2	3,61	0,72	0,36	0,47	0,9	0,437	0,68	8,06	4,03	42	42	49	0,86	

Tabelle A 4.3.3: Rohdaten der Partikelquantifizierung und Trübungsmessung für die Proben 11–52

Probe	Partikelvol. Gesamt		Partikelvol. für $x < 1,5 \mu\text{m}$		ml VSt	VSt [$\mu\text{l}/\text{ml}$]	StAbw	Gesamt	StAbw VSt/ml	Qges(x_0)	Ql(x_0)	Ql($x=1$)	Ql($x=1,5$)	Partikelgröße x_{50} der Hefe-suspension [μm]		$x_0 (= x_{50}/2)$	Δt [d]	90°	25°	VZ (90°/25°)
	$\mu\text{l}/500 \text{ ml}$	Gesamt	$\mu\text{l}/500 \text{ ml}$	StAbw										μm	μm					
11 Kaltlag.	16,2	12,7	8	0,52	0,42	0,05	0,72	0,97	0,52	0,78	2,94	76	57	54	1,06					
11 Kaltlag.	15,3	12,6	4	1,72	0,82	0,20	0,55	0,996	0,578	0,82	4,18	121	63	51	1,24					
11 Kaltlag.	12,1	10,3	2	3,61	0,72	0,36	0,4	0,99	0,63	0,85	4,03	144	43	35	1,23					
12 Warmlag.	16,1	11,2	4	0,52	0,21	0,05	0,8	0,92	0,5	0,7	2,94	76	105	93	1,13					
12 Warmlag.	13,4	10,2	2	2,98	0,60	0,30	0,55	0,99	0,52	0,76	4,175	111	70	57	1,23					
12 Warmlag.	14,0	10,6	2	3,61	0,72	0,36	0,46	0,95	0,55	0,76	4,03	144	50	41	1,22					
15 Kaltlag.	8,4	7,2	2	1,66	0,33	0,17	0,605	1	0,56	0,854	3,265	49	40	42	0,95					
15 Kaltlag.	7,8	6,8	2	1,63	0,33	0,16	0,58	1	0,59	0,88	3,245	65	36	38	0,95					
15 Kaltlag.	5,2	4,7	2	1,52	0,30	0,15	0,4	0,97	0,69	0,905	2,395	92	22	21	1,05					
16 Warmlag.	12,3	10,7	2	1,66	0,33	0,17	0,725	0,995	0,57	0,87	3,265	56	87	97	0,90					
16 Warmlag.	13,5	11,5	2	1,71	0,34	0,17	0,71	0,95	0,57	0,85	3,295	68	79	84	0,94					
16 Warmlag.	9,7	8,8	2	1,52	0,30	0,15	0,68	0,98	0,67	0,91	4,79	92	64	62	1,03					
17 Kaltlag.	46,6	10,2	2	1,66	0,33	0,17	0,91	0,98	0,05	0,22	3,265	22	125	200	0,63					
17 Kaltlag.	9,1	7,5	2	1,63	0,33	0,16	0,64	1	0,45	0,83	3,245	38	14	28	0,50					
17 Kaltlag.	8,7	7,7	2	1,52	0,30	0,15	0,65	1	0,54	0,88	2,395	65	8	17	0,47					
18 Warmlag.	26,6	8,8	2	1,66	0,33	0,17	0,7	0,8	0,14	0,33	3,265	29	94	166	0,57					
18 Warmlag.	24,2	11,1	2	1,71	0,34	0,17	0,85	0,99	0,138	0,458	3,295	41	50	96	0,52					
18 Warmlag.	28,1	10,4	2	1,52	0,30	0,15	0,74	0,83	0,07	0,37	4,79	65	56	91	0,62					
21 Kaltlag.	8,2	4,7	2	1,66	0,33	0,17	0,57	0,96	0,32	0,57	3,265	8	42	86	0,49					
21 Kaltlag.	6,6	3,3	2	1,63	0,33	0,16	0,43	0,855	0,27	0,5	3,245	28	23	47	0,49					
21 Kaltlag.	5,5	3,4	2	1,52	0,30	0,15	0,39	0,87	0,38	0,61	2,395	55	11	28	0,39					
22 Warmlag.	16,4	6,4	4	1,66	0,67	0,17	0,5	0,84	0,22	0,39	3,265	16	49	96	0,51					
22 Warmlag.	14,6	6,1	2	1,71	0,34	0,17	0,75	0,98	0,1	0,42	3,295	28	32	58	0,55					
22 Warmlag.	12,5	5,8	2	1,52	0,30	0,15	0,56	0,74	0,06	0,46	4,79	62	22	41	0,54					
24 Kaltlag.	13,6	8,3	4	0,52	0,21	0,05	0,66	0,78	0,41	0,61	2,94	64	58	55	1,05					
24 Kaltlag.	9,9	8,6	2	2,98	0,60	0,30	0,4	1	0,61	0,87	4,175	100	16	23	0,70					
24 Kaltlag.	7,5	6,4	2	1,72	0,41	0,20	0,54	1	0,6	0,86	4,18	111	14	22	0,64					
39 Kaltlag.	14,1	10,0	2	0,79	0,16	0,08	0,88	0,99	0,42	0,71	3,355	14	80	80	1,00					
39 Kaltlag.	11,5	8,7	10	0,10	0,05	0,00	0,88	0,96	0,467	0,755	2,32	34	55	55	1,00					
39 Kaltlag.	7,6	6,4	5	0,17	0,06	0,01	0,89	1	0,56	0,84	3,06	60	34	37	0,92					
40 Warmlag.	14,4	11,1	5	0,17	0,06	0,01	0,91	0,966	0,498	0,77	3,06	60	59	59	1,00					
40 Warmlag.	11,7	9,7	3	0,44	0,10	0,03	0,879	0,99	0,55	0,828	3,06	82	49	50	0,98					
40 Warmlag.	5,5	4,6	5	0,23	0,15	0,03	0,77	0,97	0,567	0,83	3,135	111	36	38	0,95					
51 Warmlag.	110,7	23,2	6	0,52	0,11	0,02	0,936	0,963	0,02	0,21	2,715	33	109	184	0,59					
51 Warmlag.	74,0	16,6	4	1,19	0,22	0,06	0,87	0,93	0,025	0,225	2,96	64	93	158	0,59					
51 Warmlag.	27,3	10,1	6	1,02	0,94	0,16	0,76	0,98	0,04	0,37	2,985	92	83	132	0,63					
52 Kaltlag.	12,9	11,1	6	0,52	0,11	0,02	0,76	1	0,29	0,86	2,715	33	13	19	0,68					
52 Kaltlag.	7,1	5,7	4	1,19	0,22	0,06	0,32	0,97	0,3	0,8	2,96	64	9	14	0,64					
52 Kaltlag.	4,9	4,9	4	1,02	0,63	0,16	0,17	1	0,52	1	2,985	92	7	11	0,64					

Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität

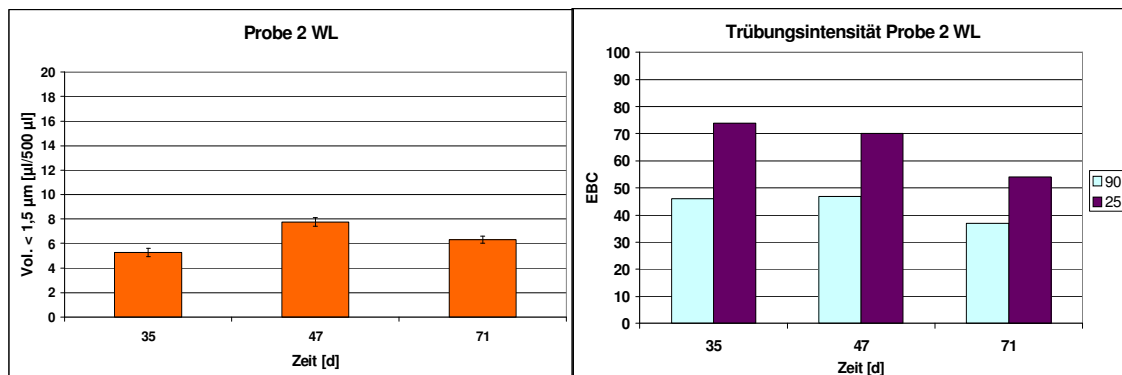


Abbildung A 4.3.1: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 2

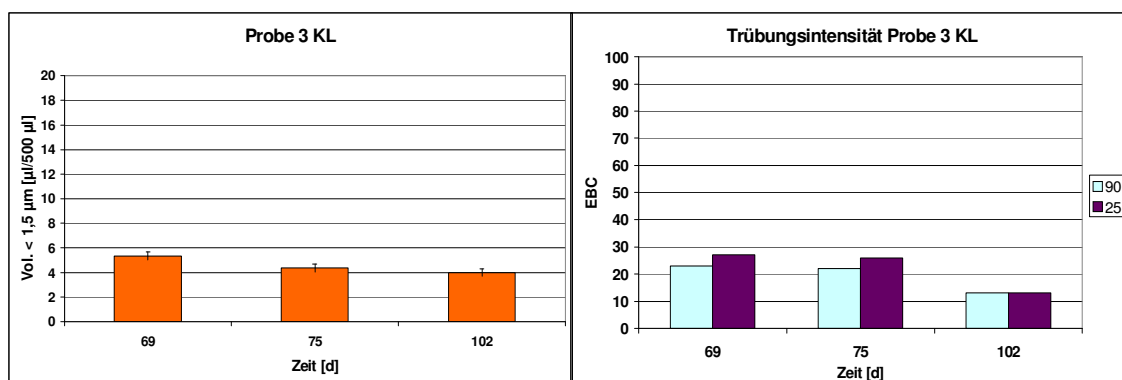


Abbildung A 4.3.2: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 3

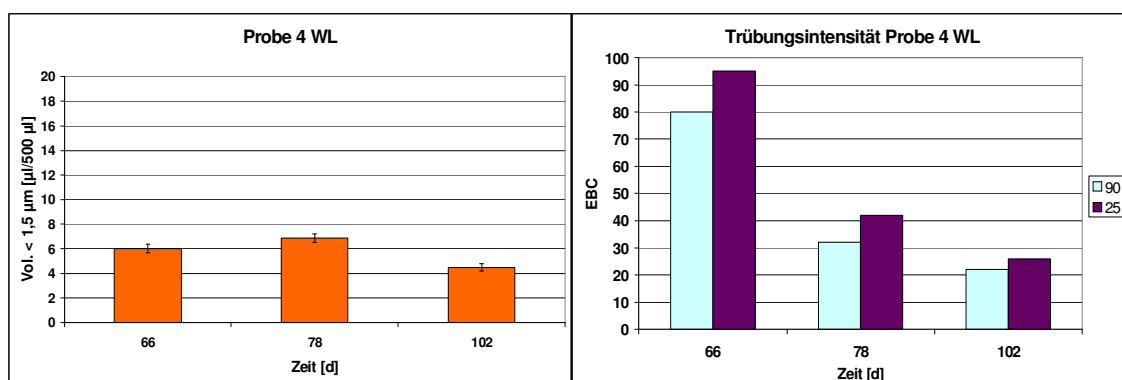


Abbildung A 4.3.3: Veränderung der Partikelfraktion $< 1,5 \mu\text{m}$ und der 90° - und 25° -Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 4

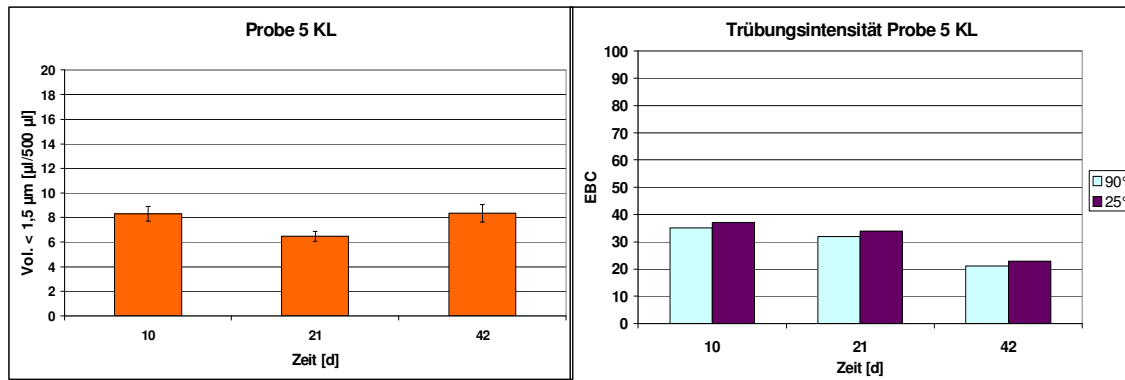


Abbildung A 4.3.4: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 5

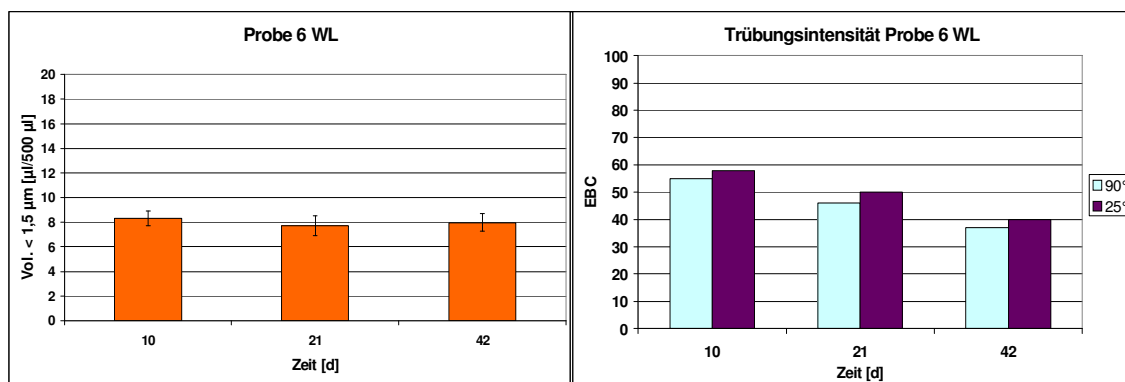


Abbildung A 4.3.5: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 6

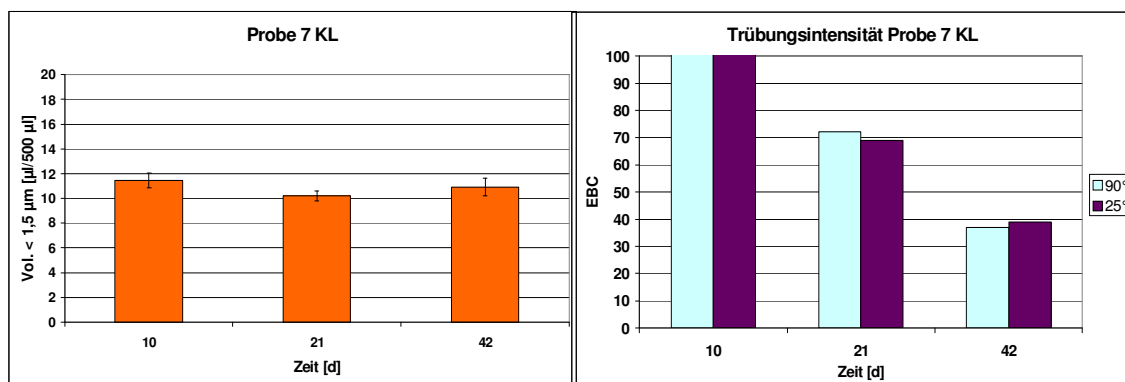


Abbildung A 4.3.6: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 7

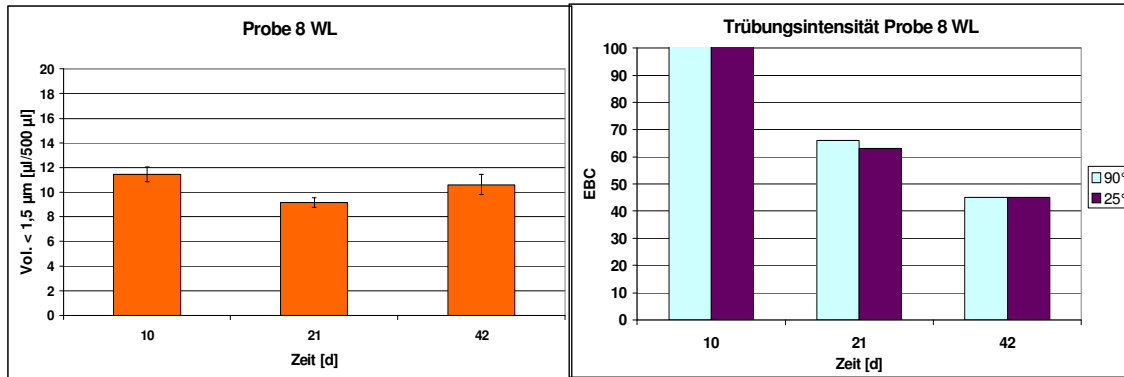


Abbildung A 4.3.7: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 8

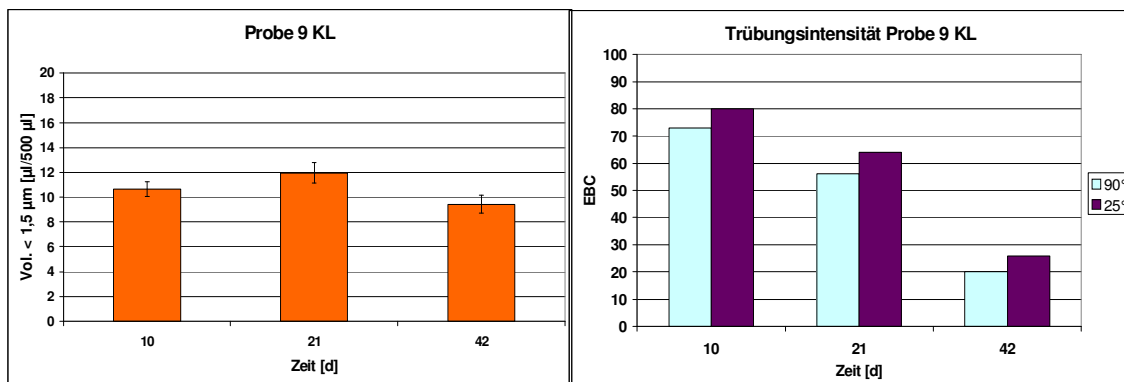


Abbildung A 4.3.8: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 9

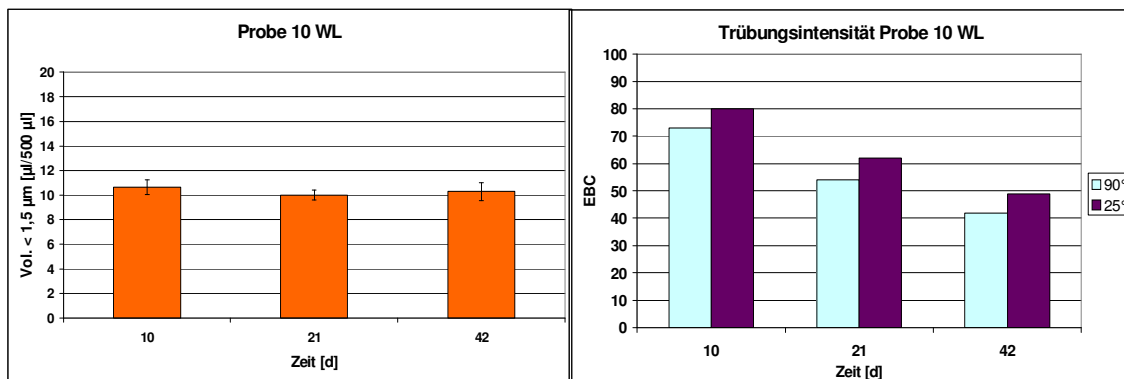


Abbildung A 4.3.9: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 10

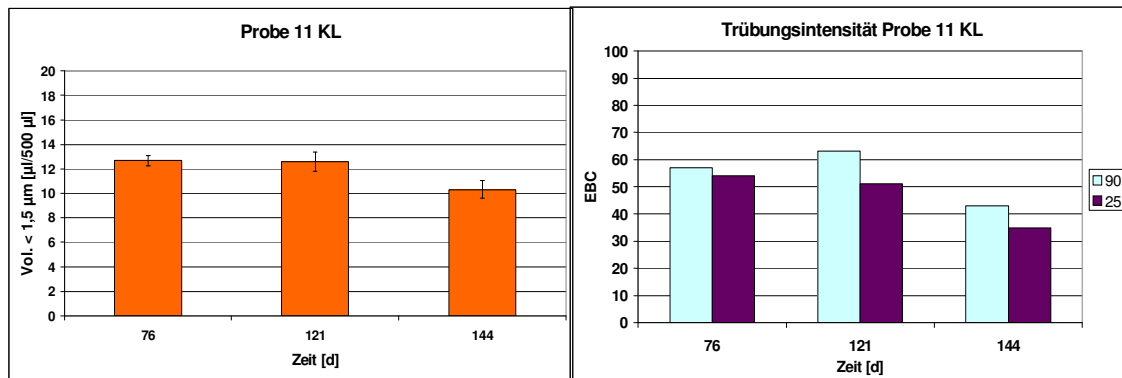


Abbildung A 4.3.10: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 11

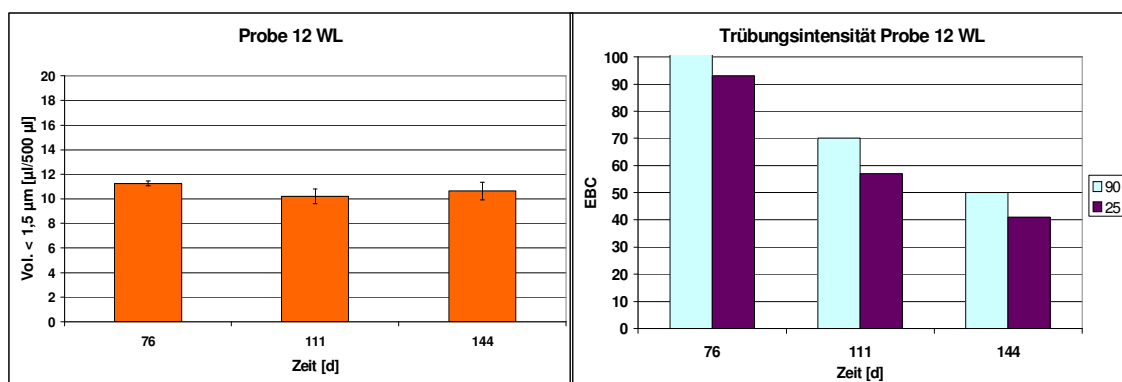


Abbildung A 4.3.11: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 12

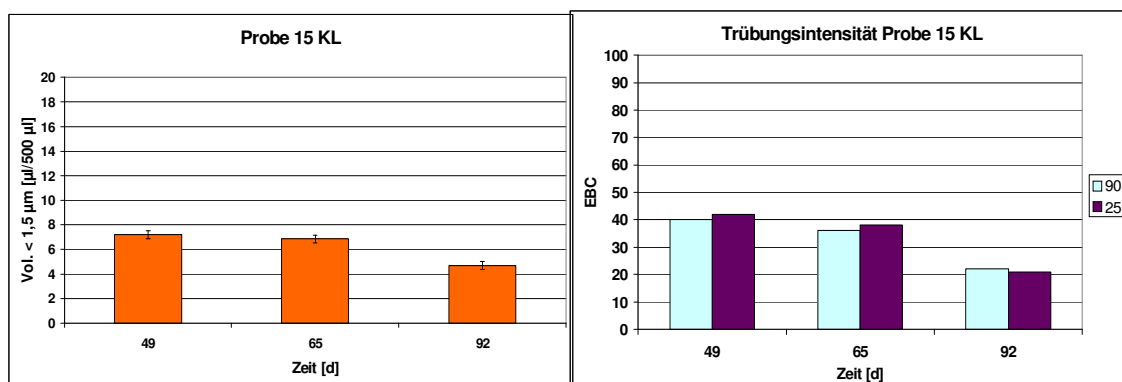


Abbildung A 4.3.12: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 15

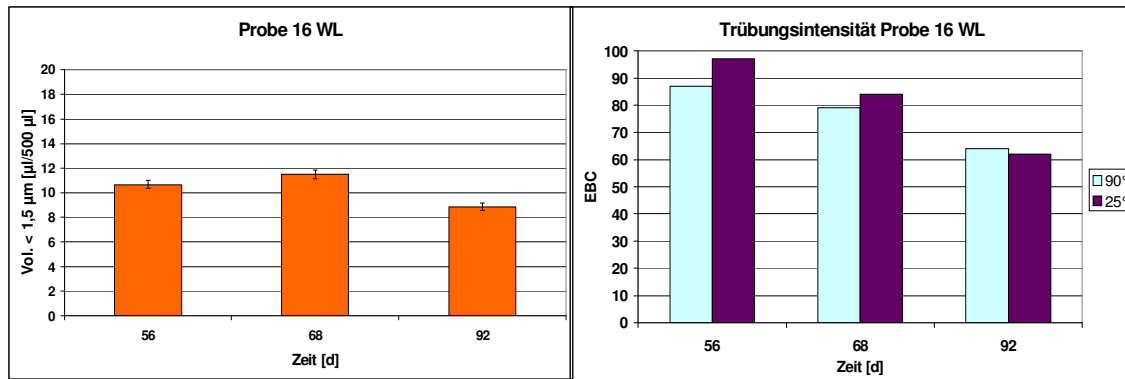


Abbildung A 4.3.13: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 16

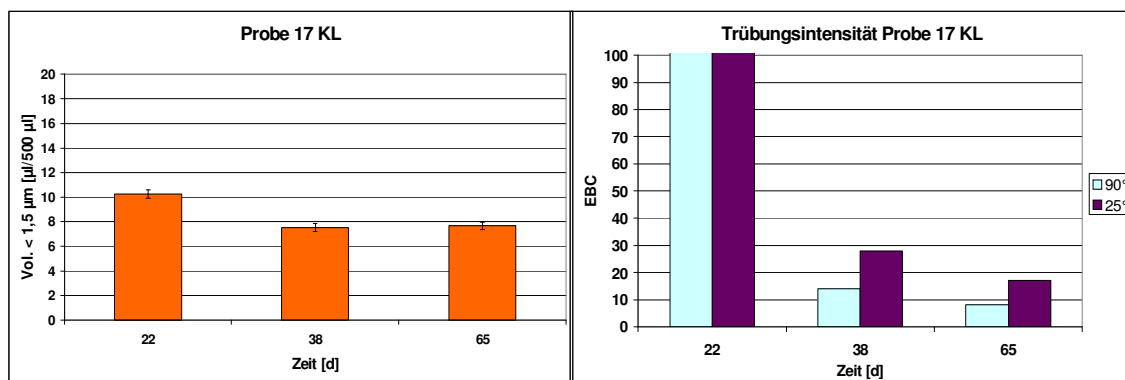


Abbildung A 4.3.14: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 17

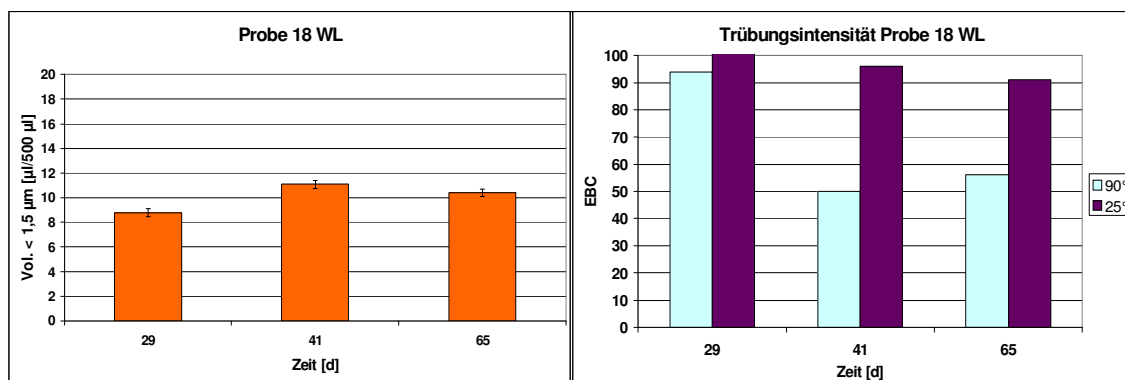


Abbildung A 4.3.15: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 18

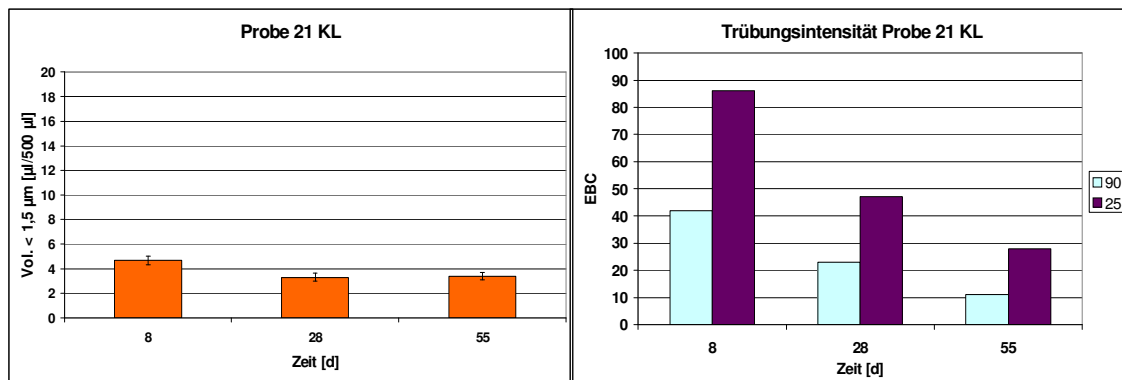


Abbildung A 4.3.16: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 21

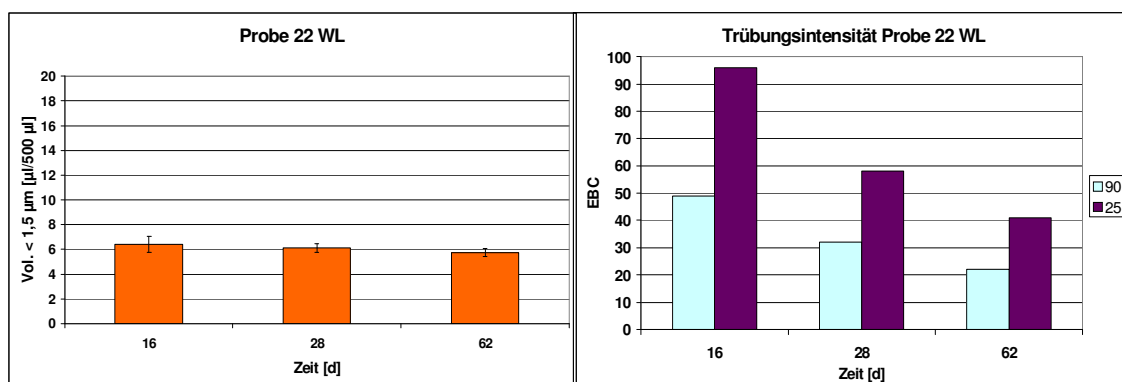


Abbildung A 4.3.17: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 22

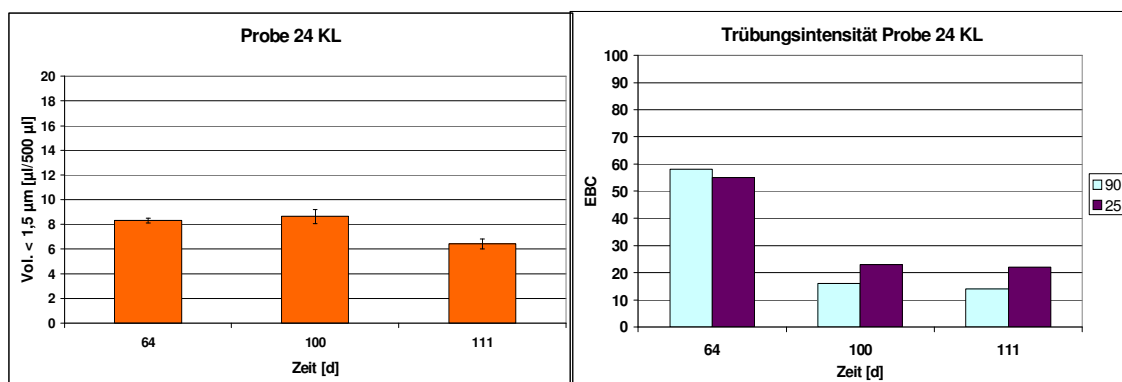


Abbildung A 4.3.18: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 24

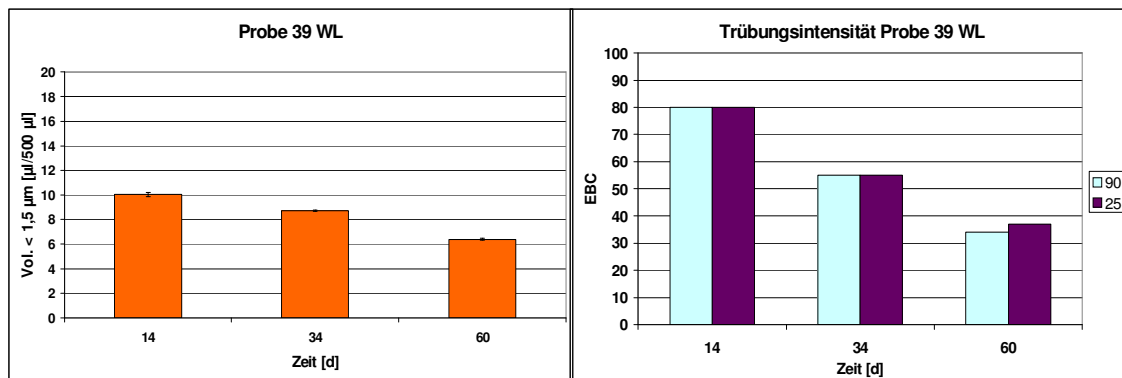


Abbildung A 4.3.19: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 39

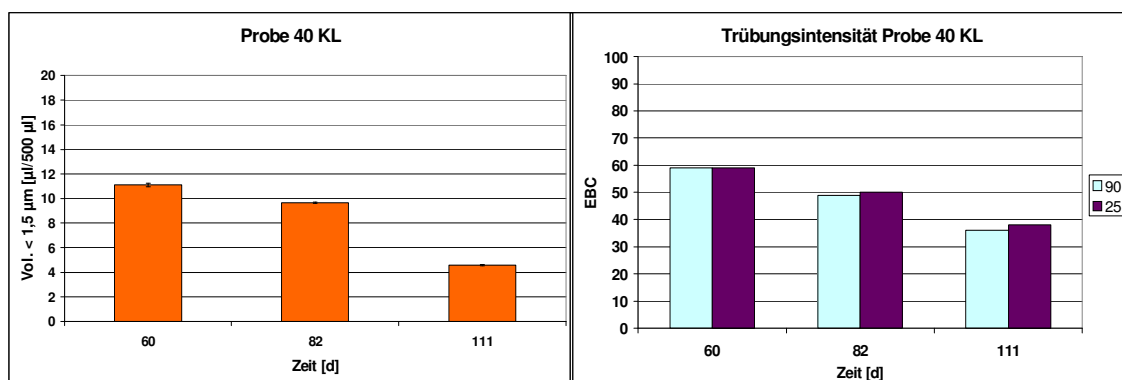


Abbildung A 4.3.20: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 40

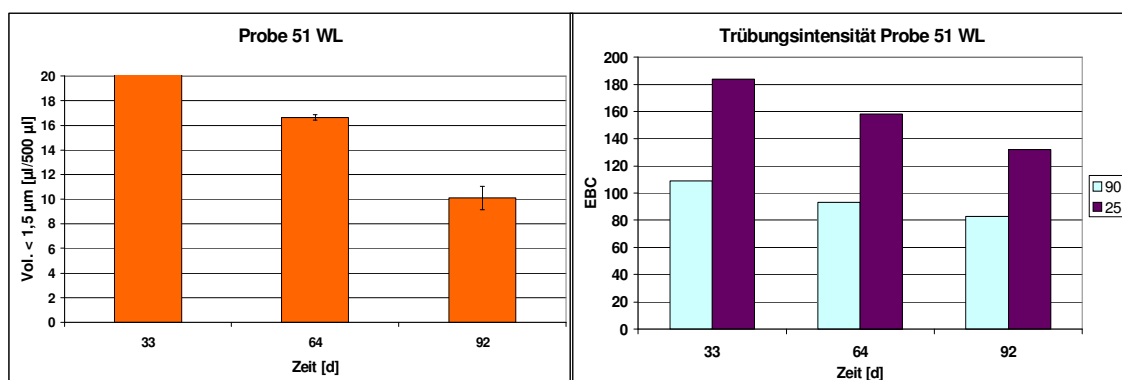


Abbildung A 4.3.21: Veränderung der Partikelfraktion < 1,5 µm und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 51

Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität

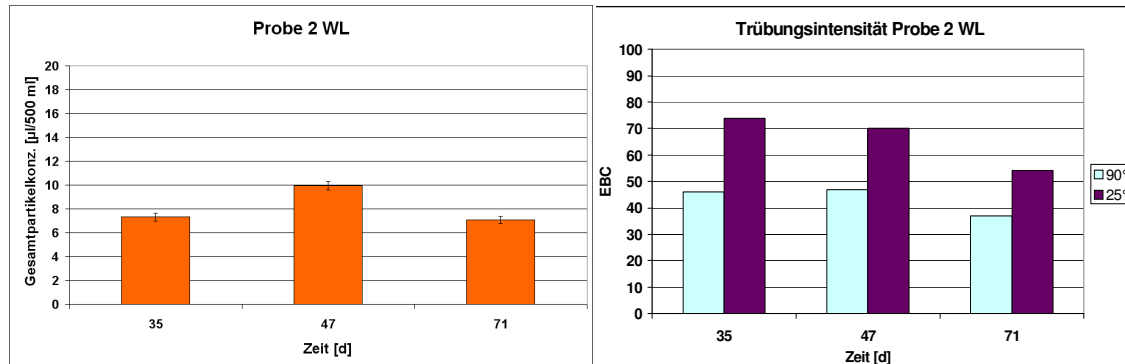


Abbildung A 4.3.22: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 2

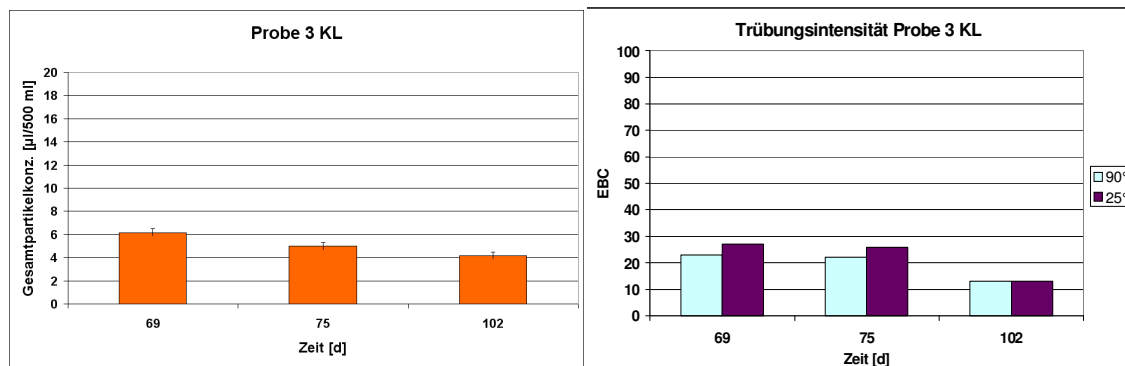


Abbildung A 4.3.23: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 3

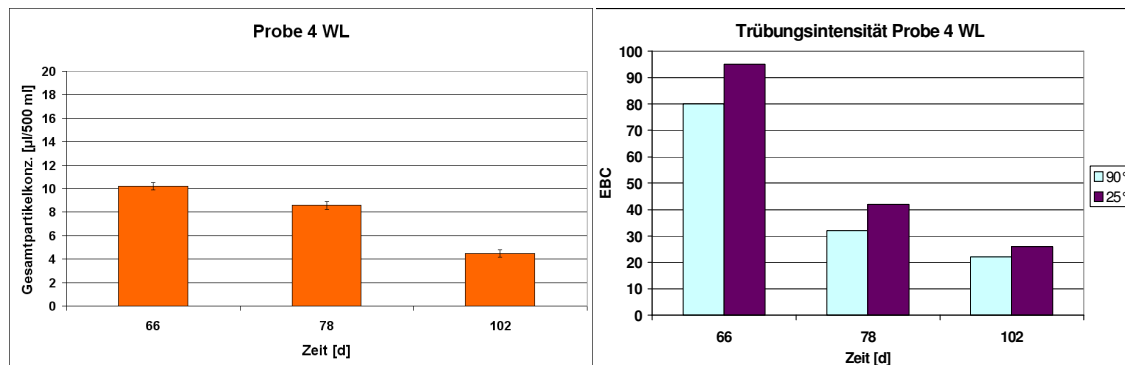


Abbildung A 4.3.24: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 4

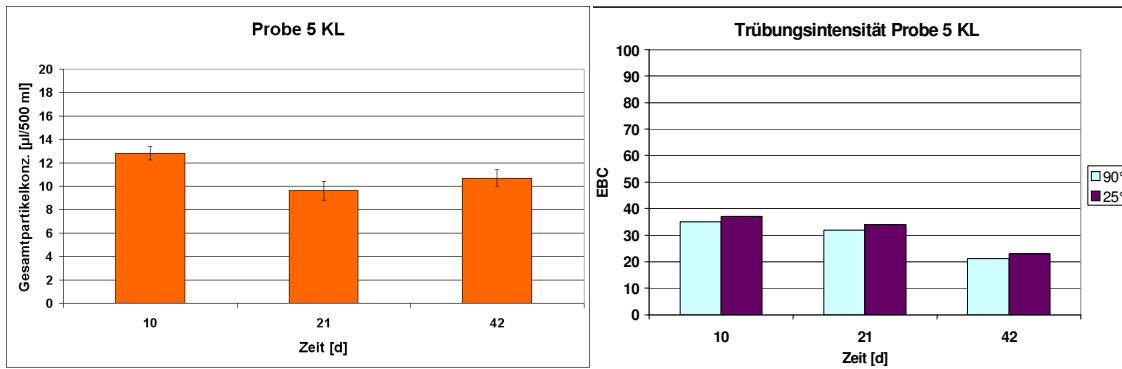


Abbildung A 4.3.25: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 5

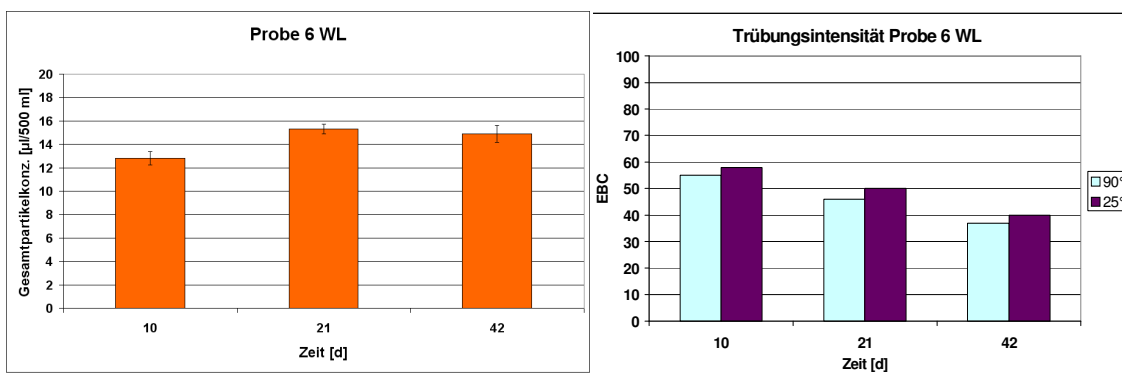


Abbildung A 4.3.26: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 6

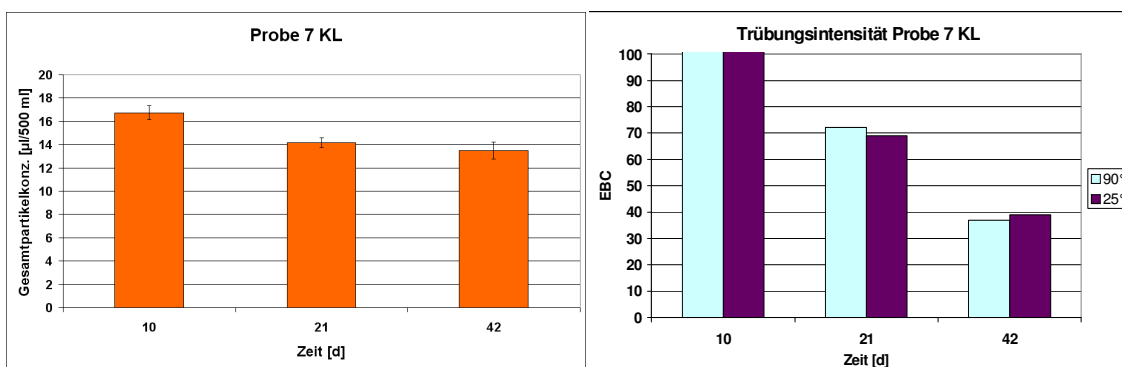


Abbildung A 4.3.27: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 7

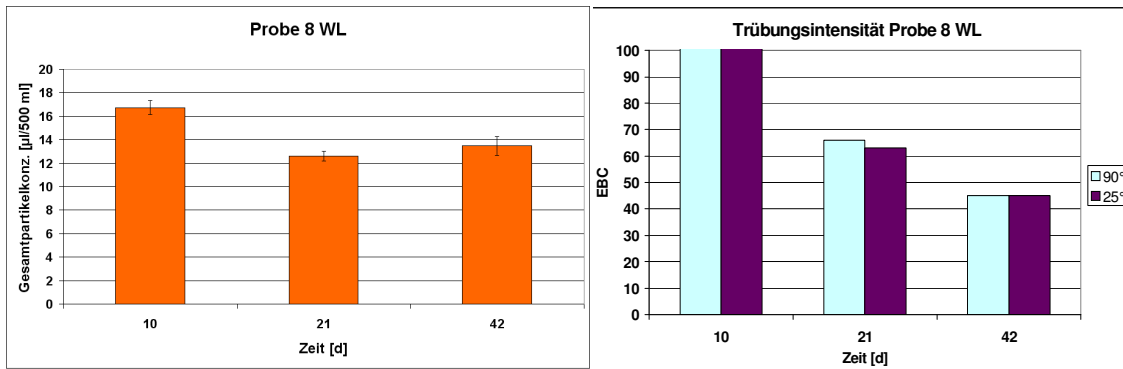


Abbildung A 4.3.28: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 8

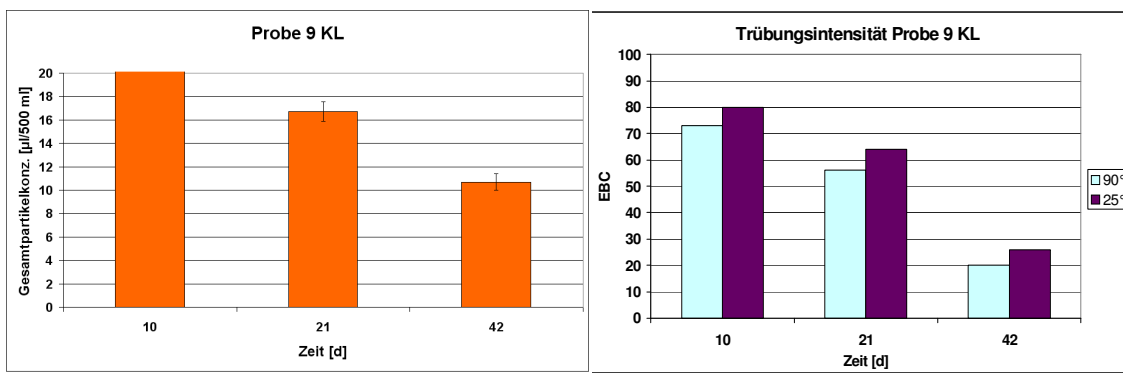


Abbildung A 4.3.29: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 9

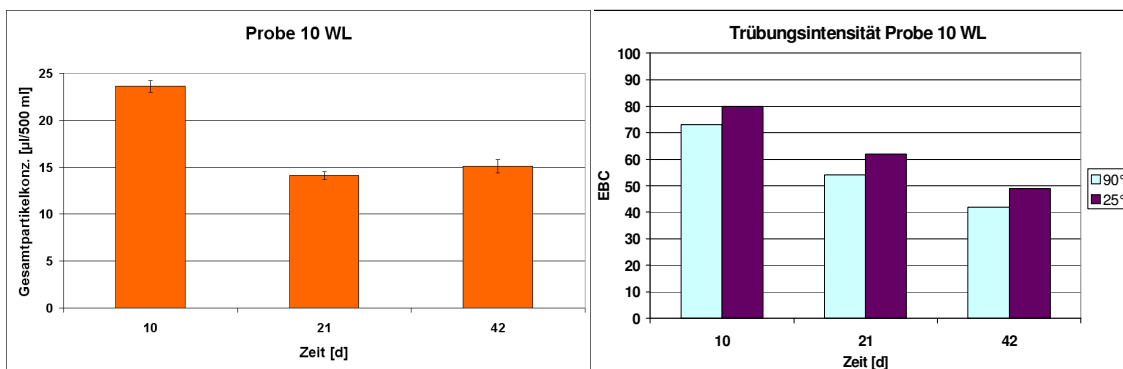


Abbildung A 4.3.30: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 10

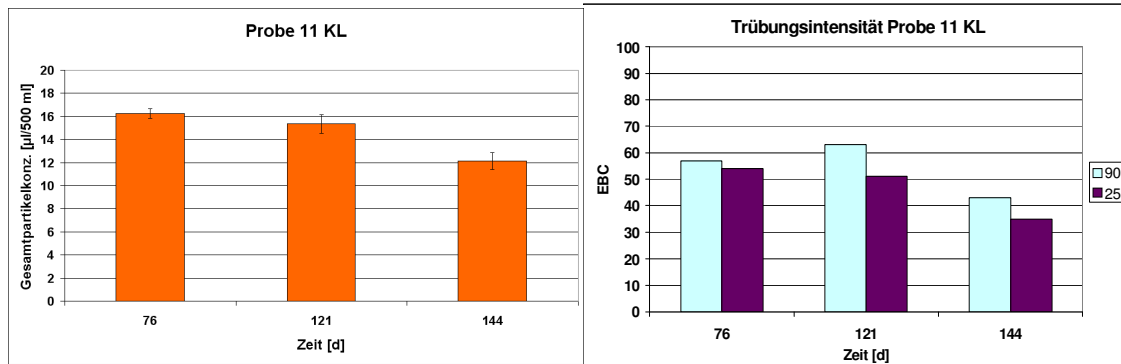


Abbildung A 4.3.31: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 11

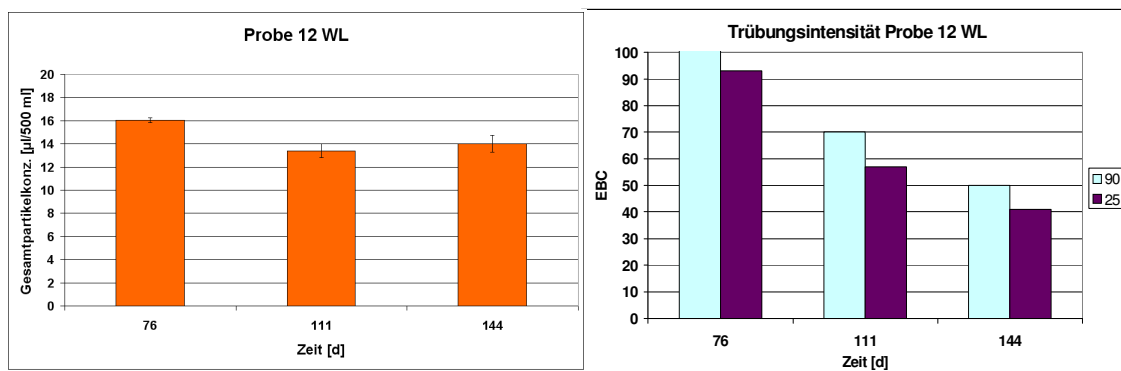


Abbildung A 4.3.32: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 12

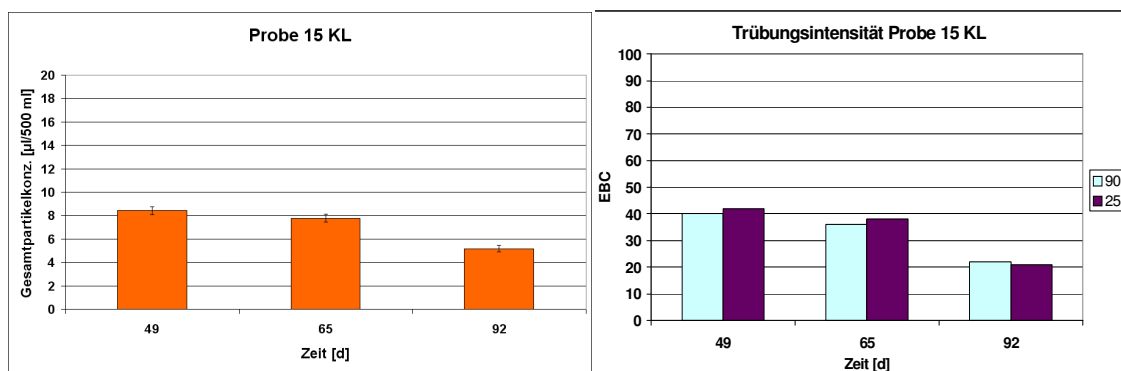


Abbildung A 4.3.33: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 15

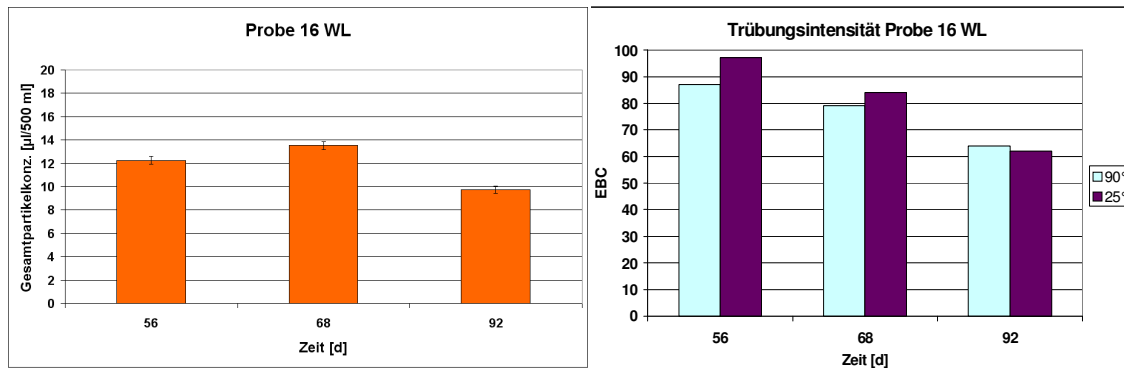


Abbildung A 4.3.34: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 16

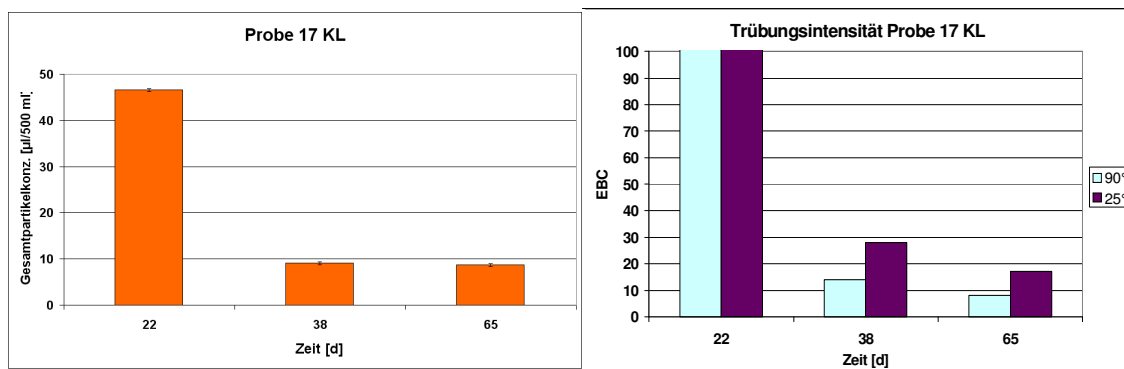


Abbildung A 4.3.35: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 17

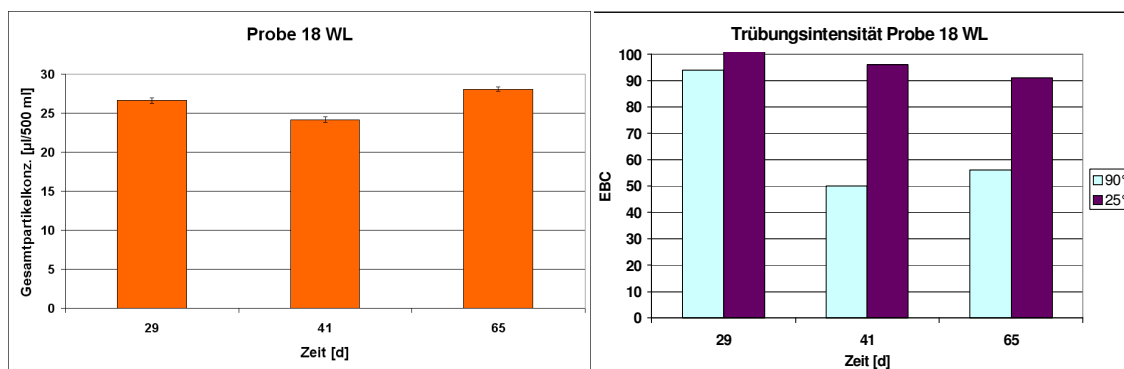


Abbildung A 4.3.36: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 18

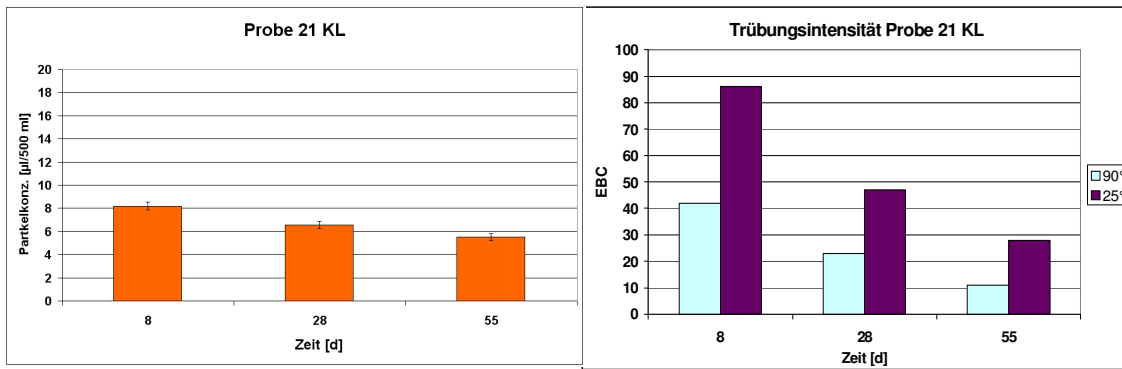


Abbildung A 4.3.37: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 21

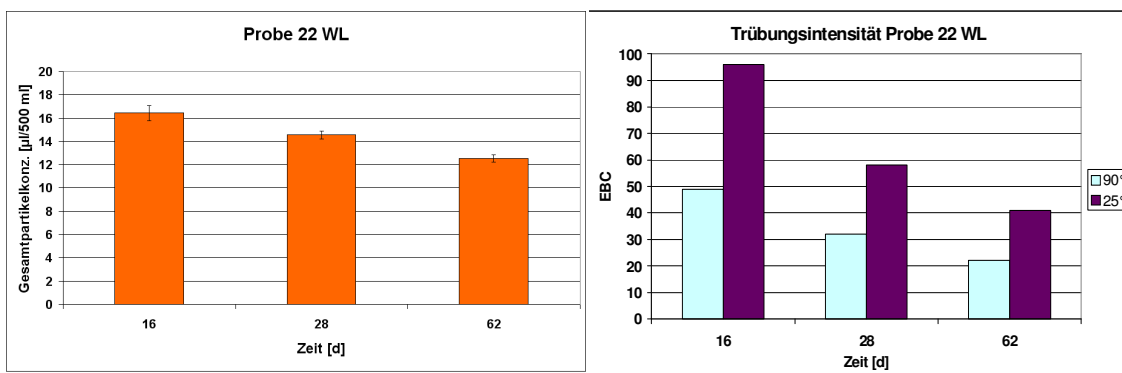


Abbildung A 4.3.38: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 22

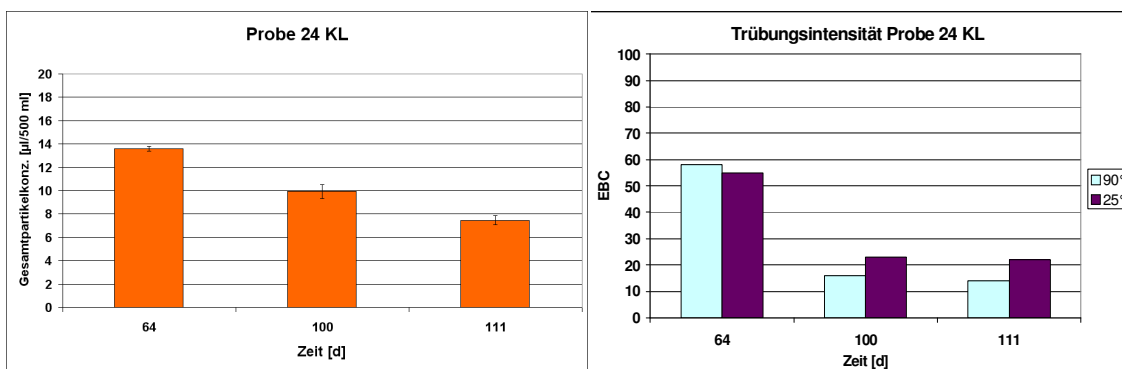


Abbildung A 4.3.39: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 24

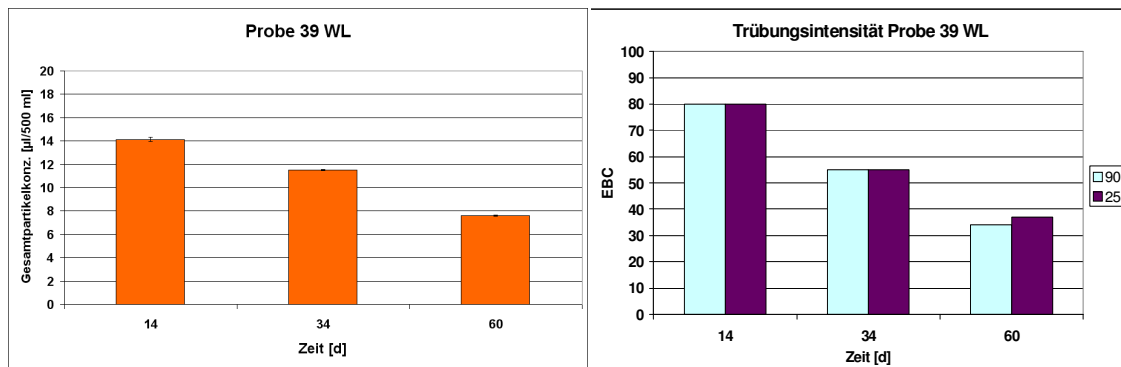


Abbildung A 4.3.40: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 39

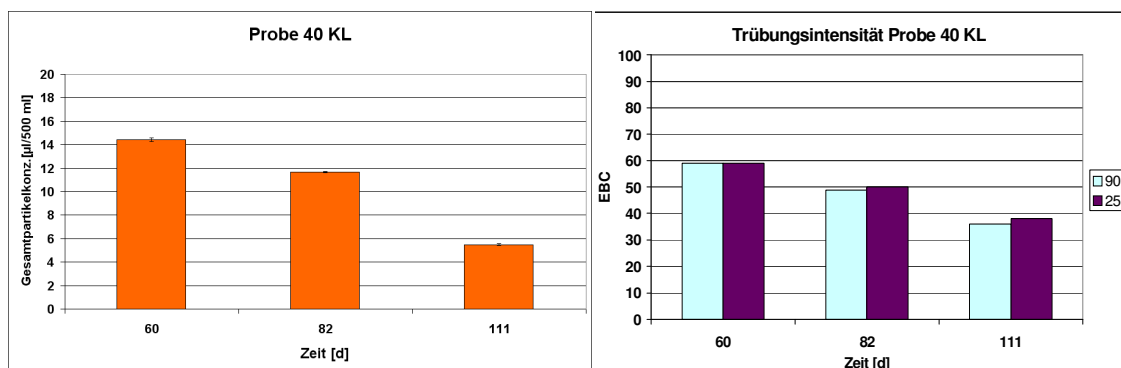


Abbildung A 4.3.41: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 40

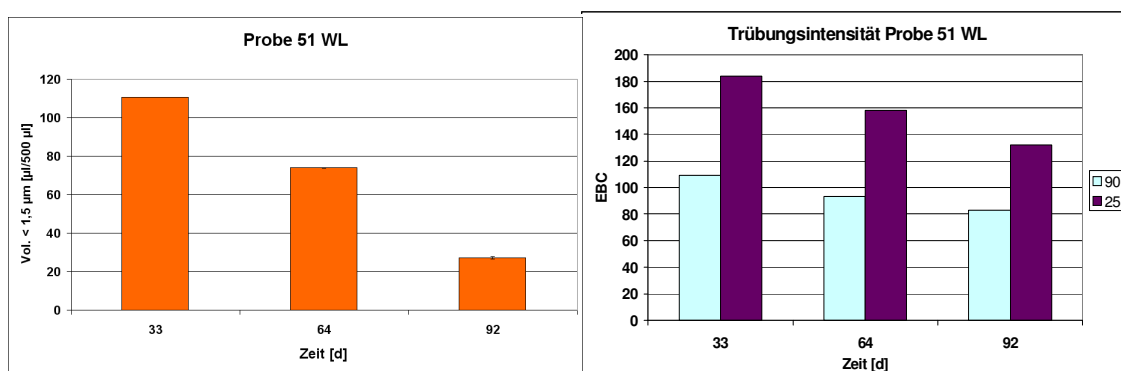


Abbildung A 4.3.42: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 51

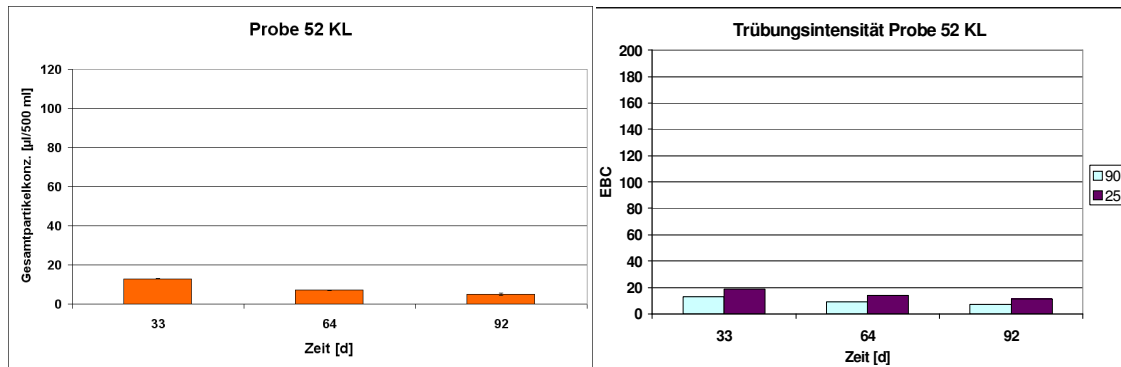


Abbildung A 4.3.43: Veränderung des Gesamtpartikelvolumens und der 90°- und 25°-Streulichtintensität über die Zeit für die Probe 52

Anhang 4.4.1

Tabelle A 4.4.1: Übersicht über die Läuterarbeit der verschiedenen Weizenbiersude mit Wintergerstenmalzen

Läuterarbeit

	Zeit	1. NG	2. NG	3. NG	Aufgehackt
45 % TOL	130	40 min	85 min	115 min	-----
45 % EST	135	65 min	100 min	120 min	90 min
45 % VAN	170	60 min	130 min	155 min	-----
45 % CER	150	40 min	110 min	140 min	130 min
25 % VAN	170	60 min	125 min	155 min	110 min
25 % CER	160	45 min	115 min	135 min	125 min
25 % MAL	130	50 min	95 min	110 min	70 min

Tabelle A 4.4.2: Würzeanalysen der Weizenbiersude mit verschiedenen Wintergerstenmalzen

Würzeanalysen									
	Anthocyanog. [mg/l]/ Ges.-N [mg/100 ml]	Tannoiide [mg/l]/ Ges.-N [mg/100 ml]	photom. Jodwert	Gesamtpoly- phenole [mg/l]	Gesamt-N [mg/100 ml]	Anthocya- no- gene [mg/l]	Tannoiide [mg PVP/l]	Stw. [GV%]	pH
45% TOL	0,28	0,17	0,72	104	95,655	27	16,50	11,86	5,90
45% EST	0,51	0,55	0,8	139	99,1	51	55,00	11,70	5,80
45% VAN	0,37	0,25	0,78	118	103,935	38	25,60	10,94	5,76
45% CER	0,38	0,20	0,45	112	95,75	36	19,20	12,15	5,94
25% VAN	0,32	0,17	0,42	105	106,82	34	18,60	11,93	5,82
25% CER	0,23	0,17	0,95	102	101,325	23	17,20	12,17	5,98
25% MAL	0,16	0,14	1,336	87,33	102,315	16	14,60	11,82	5,93

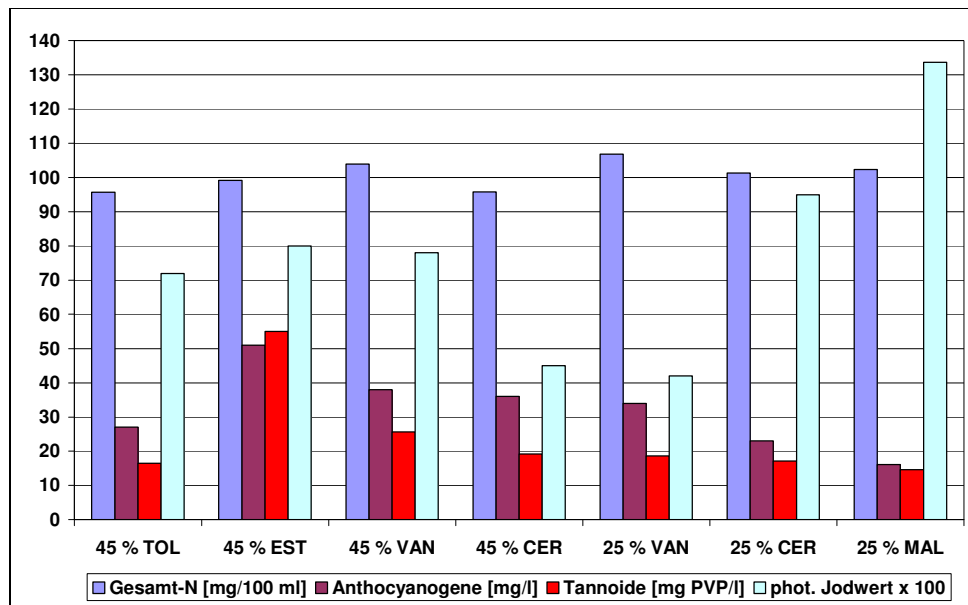


Abbildung A 4.4.1: Vergleich der Würzeanalysen der Kleinsudweizenbiere mit verschiedenen Wintergerstenmalzen

Tabelle A 4.4.3: Bieranalysen der Weizenbiersude mit verschiedenen Wintergerstenmalzen

Bieranalysen					
	Schaum (NIBEM) [s]	pH	Stw. [GV%]	[%vol]	VGS
45 % TOL	299	4,27	11,28	4,77	80,62
45 % EST	254	4,27	11,51	4,83	80,09
45 % VAN	230	4,32	11,91	5,14	81,98
45 % CER	266	4,52	11,65	4,96	80,97
25 % VAN	206	4,78	11,14	4,63	79,31
25 % CER	242	4,37	11,75	4,98	80,53
25 % MAL	243	4,58	12,11	5,21	81,56

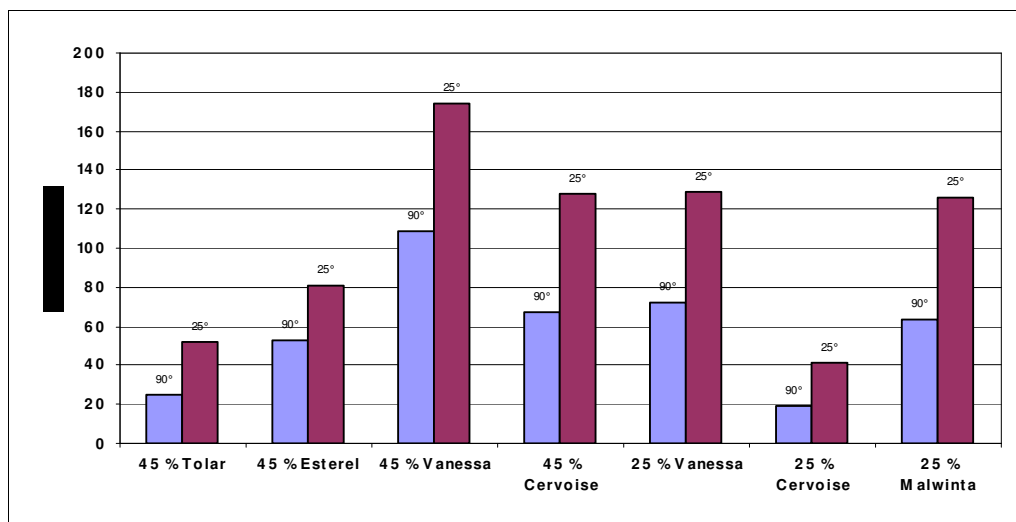


Abbildung A 4.4.2: Trübungswerte der Kleinsudweizenbiere 15 Tage nach der Abfüllung

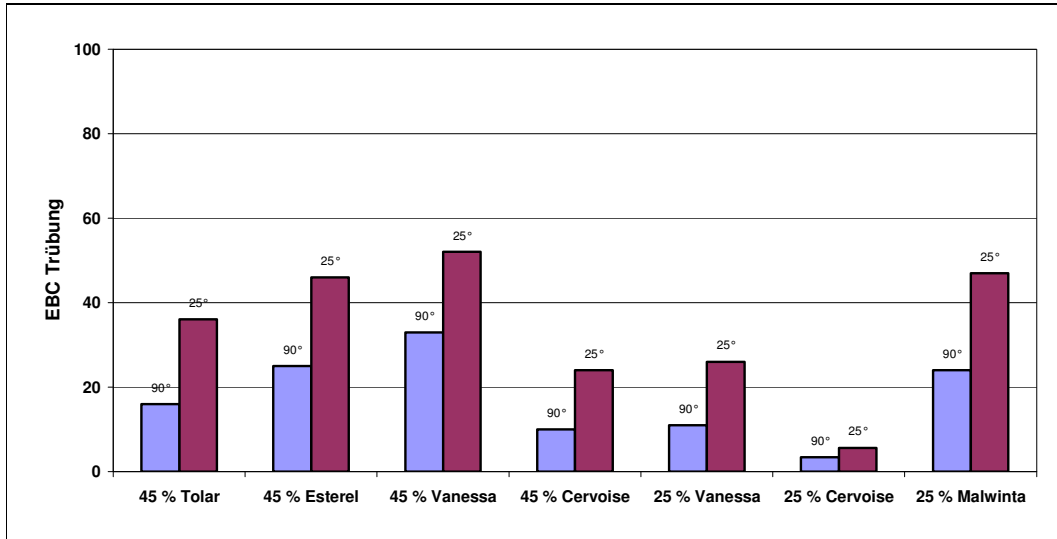


Abbildung A 4.4.3: Trübungswerte der Kleinsudweizenbiere 34 Tage nach der Abfüllung

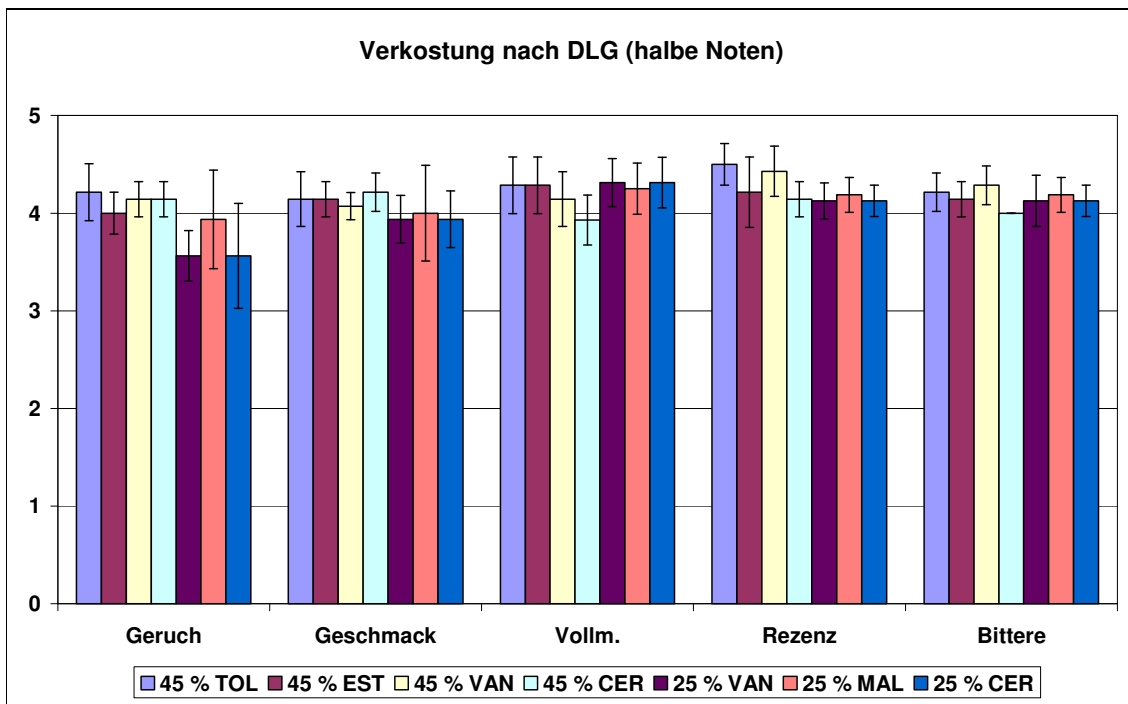


Abbildung A 4.4.4: Verkostungsergebnisse der Kleinsudweizenbiere mit Wintergestenmalz nach DLG

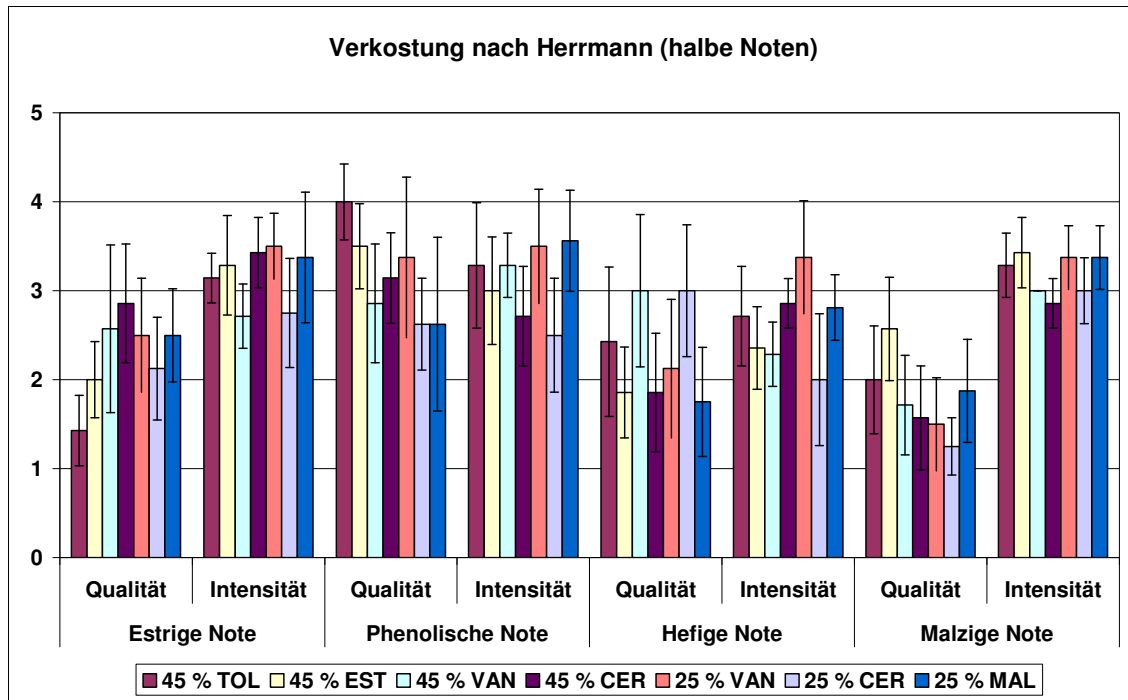


Abbildung A 4.4.5: Sensorische Beurteilung nach HERRMANN für die Kleinsudweizenbiere mit Wintergerstenmalzanteil

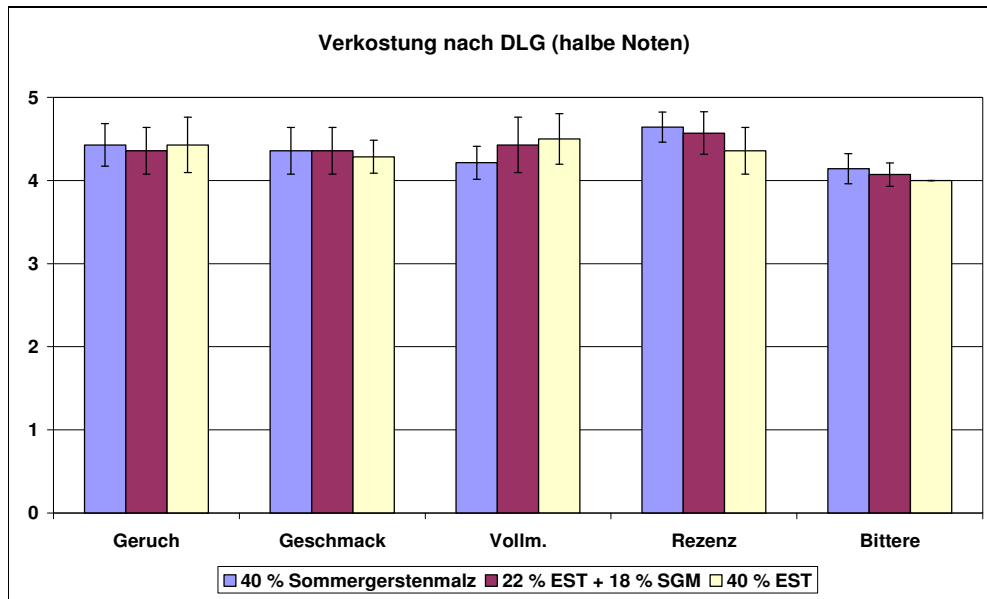
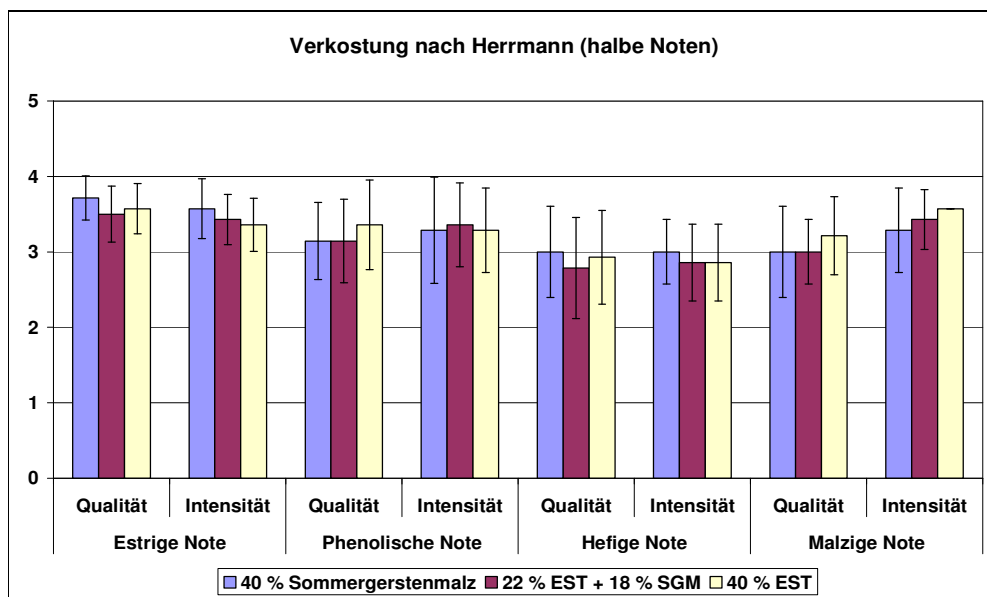
Anhang Kapitel 4.4.2

Tabelle A 4.4.4: Malzanalysen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte Esterel

Malzanalysen				
Analysenbezeichnung	Einheit	Herrmann	SG-Malz	Esterel
Wassergehalt Malz	%	4,6	8,2	3,8
Extrakt Malz	%, lftr.	80,5	74,8	76,8
Extrakt Malz TrS.	%, wfr.	84,4	81,5	79,8
Viskosität (8,6 %)	mPas	1,905	1,596	1,647
Friabilimeter Mürbigkeit	%		86,2	84,6
Ganzglasigkeit	%		1,6	2
Verzuckerungszeit	min.	5 - 10	5- 10	5- 10
Endvergärungsgrad	%, schb.	78,4	81,3	82,2
Ablauf	klar/opal	opal	klar	opal
Farbe Fotometer	EBC	4,1	3,4	3,2
pH-Wert		6,08	5,85	5,89
Rohprotein Malz	%, wfr.	11,8	11,3	11,6
Löslicher Stickstoff Malz TrS.	mg/100g Malz-TrS.	733	764	774
Eiweiss-Lösungsgrad	%	38,8	42,3	41,7
Alpha-Amylase	ASBC, wfr.	18	56	38
Diastatische Kraft	WK	370	392	455

Tabelle A 4.4.5: Bieranalysen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte Esterel

Bieranalysen	Schaum (NIBEM) [s]	pH	p[GV%]	[%vol]	VG _s
60 % HER / 40 % SGM	287	4,24	12,07	5,07	79,74
60 % HER / 22 % EST / 18 % SGM	281	4,22	12,12	5,02	78,57
60 % HER / 40 % EST	276	4,27	12,11	5,11	80,21

Abbildung A 4.4.6: Verkostungsergebnisse für die Praxisversuche mit der Wintergestensorte *Esterel* nach DLGAbbildung A 4.4.7: Sensorische Beurteilung nach HERRMANN für die Praxisversuche mit der Wintergerstensorte *Esterel*

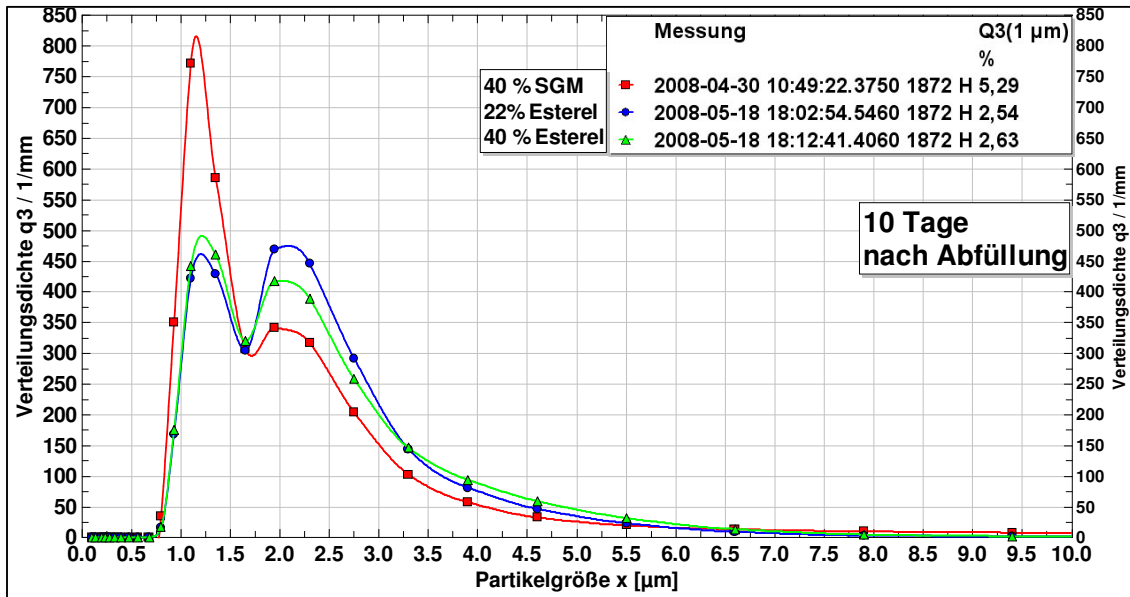


Abbildung A 4.4.8: Partikelgrößenverteilungen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte *Esterel* 10 Tage nach der Abfüllung

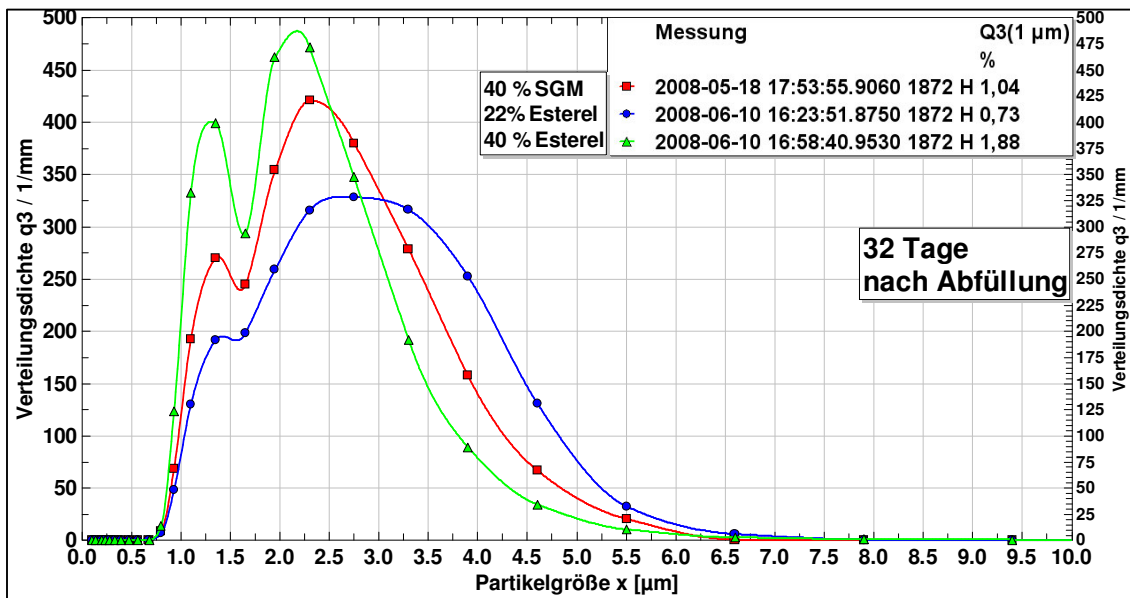


Abbildung A 4.4.9: Partikelgrößenverteilungen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte *Esterel* 32 Tage nach der Abfüllung

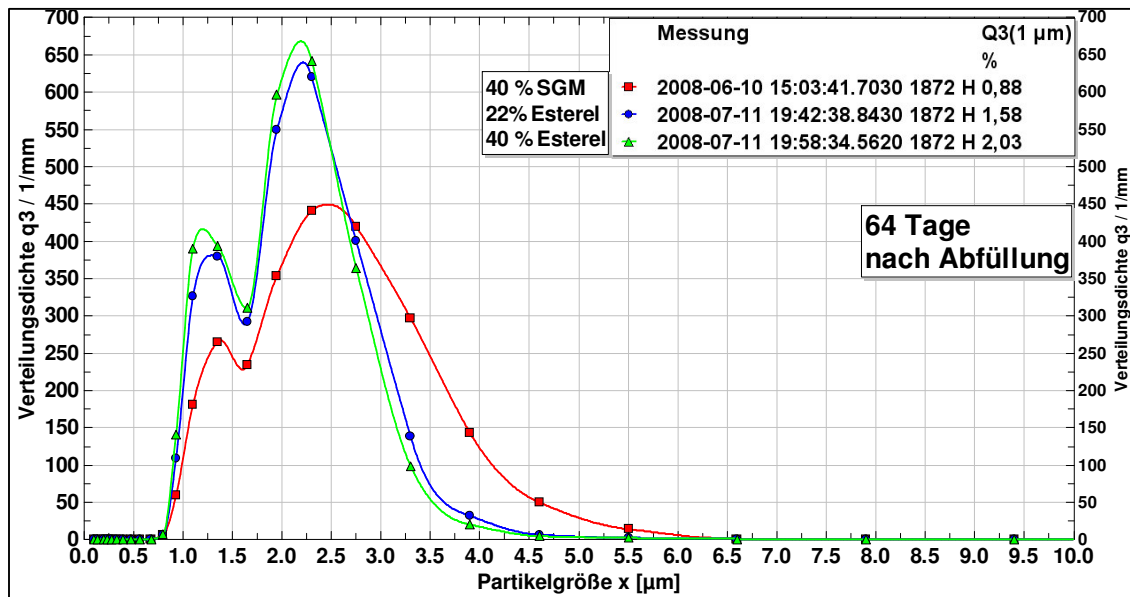


Abbildung A 4.4.10: Partikelgrößenverteilungen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte *Esterel* 64 Tage nach der Abfüllung

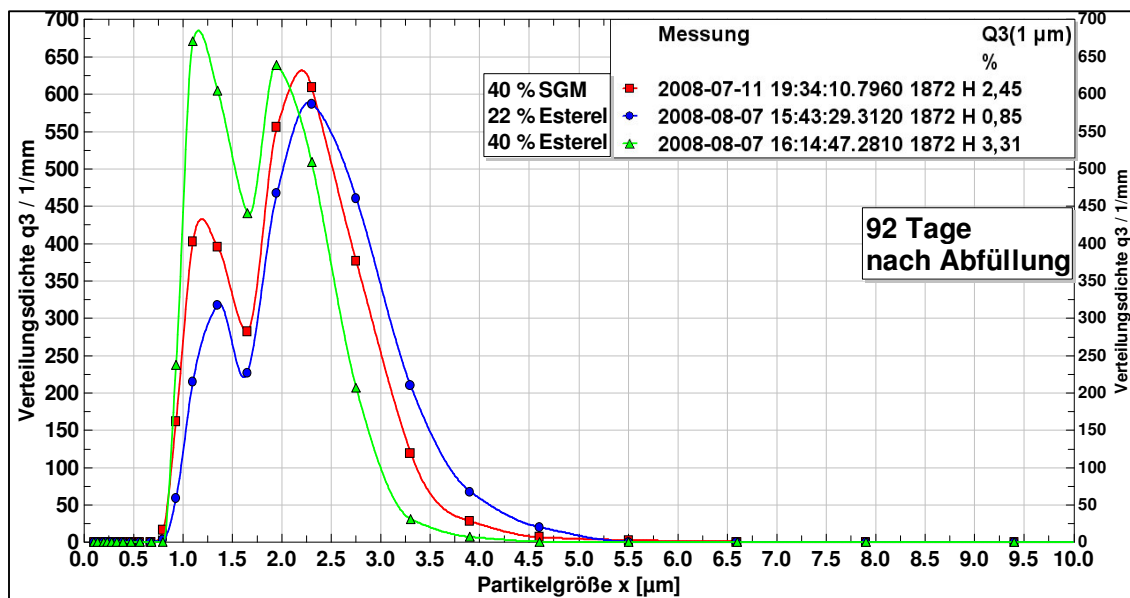


Abbildung A 4.4.11: Partikelgrößenverteilungen der Praxisversuche mit der Wintergerstensorte *Esterel* 92 Tage nach der Abfüllung

Anhang Kapitel 4.4.3

Tabelle A 4.4.6: Würze- und Bieranalysen der Biere mit jeweils 50 % Roggen-, Hafer- und Triticalemalz und 50 % Sommergerstenmalz

Würzeanalysen	Gesamtschüttung 1,6 kg		
	50 % + 50 % Gerstenmalz		
Sude	Roggen	Triticale	Hafer
Laborquotient	1,0462	1,0457	1,048
Stammwürze (GG%)	11,48	11,35	12,60
Stammwürze (GV%)	11,99	11,85	13,21
Gesamt-N [mg/100 ml]	137,1	121,7	114
Gesamt-N (bez. auf 12 GG%)	143,3	128,7	108,6
Hochmolekularer N	33,7	39,2	41,9
Hochmolekularer N (bez. auf 12 GG%)	35,2	41,4	39,9
Koag-N [mg/100 ml]	6,1	4,6	6,1
Koag-N (bez. auf 12 GG%)	6,4	4,9	5,8
Gesamtpolypenole [mg/l]	123	110	182
Anthocyanogene [mg/l]	46,0	39,0	47,0
Tanninoide [mg/l]	24,0	19,0	21,0
photometrischer Jodwert	0,24	0,59	0,82
Bieranalysen			
Alkohol [vol%]	4,82	4,92	5,48
Alkohol [GG%]	3,76	3,86	4,31
Extrakt, wahr [GG%]	4,98	3,77	3,17
Extrakt, scheinbar [[GG%]	3,23	1,98	1,17
p [GG%]	12,26	11,28	11,55
p [GV%]	12,84	11,77	12,06
Vergärungsgrad, wahr	60,99	67,92	73,78
pH	4,36	4,63	4,78

Anhang Kapitel 4.5

Tabelle A 4.5.1: Weizen- und Gerstenmalzanalysen

Malzanalysen	Schüttungsanteil	60%	40%
	Einheit	Herrmann	Scarlett
Wassergehalt	%	6,2	6,7
Extrakt Malz	%, lftr.	79,1	76,2
Extrakt Malz TrS.	%, wfr.	84,3	81,7
Ablauf	klar/opal	opal	opal
Verzuckerungszeit	Min.	5-10	5-10
Viskosität (8,6%)	mPas	1,752	1,58
Rohprotein Malz	%, wfr.	13,3	11,1
Löslicher Stickstoff Malz TrS.	mg/100g Malz-TrS.	882	687
Eiweiß-Lösungsgrad	%	41,4	38,7
Friabilimeter Mürbigkeit	%		81
Ganzglasigkeit	%		1,2

Tabelle A 4.5.2: Würzeanalysen der Pilotsud mit unterschiedlichen Dosagen von Hopfentreiber zu Maische oder Würze

Würzeanalysen						
	Vergleichssud	in Maische			in Würze	
		1 g/l	2 g/l	3 g/l	1 g/l	2 g/l
Laborquotient	1,0507	1,049	1,05	1,0487	1,049	1,0507
Stammwürze (GG%)	12,55	12,15	12,28	12,1	12,38	12,45
Stammwürze (GV%)	13,16	12,73	12,87	12,67	12,97	13,06
Gesamt-N [mg/100 ml]	107,4	102,5	96,9	103	101,8	99
Gesamt-N (bez.auf 12 GG%)	107,8	101,2	94,7	102,1	98,7	95,4
Koag-N [mg/100 ml]	3,7	3,6	3,5	3,2	2,6	3,0
Koag-N (bez.auf 12 GG%)	3,5	3,6	3,4	3,2	2,5	2,9
Gesamtpolypenole [mg/l]	90,2	103,3	124,6	127,1	136,1	158,3
Anthocyanogene [mg/l]	31,8	37,9	46,4	48,5	51,2	59,4
Tannoide [mg/l]	18,2	19,6	23,8	34,9	45,0	53,7
photometrischer Jodwert	0,578	0,534	0,237	0,246	1,63	1,74
Anthocyan. [mg/l] / Gesamt-N [mg/100 ml]	0,30	0,37	0,48	0,47	0,50	0,60
Tannoide [mg/l] / Gesamt-N [mg/100 ml]	0,17	0,19	0,25	0,34	0,44	0,54

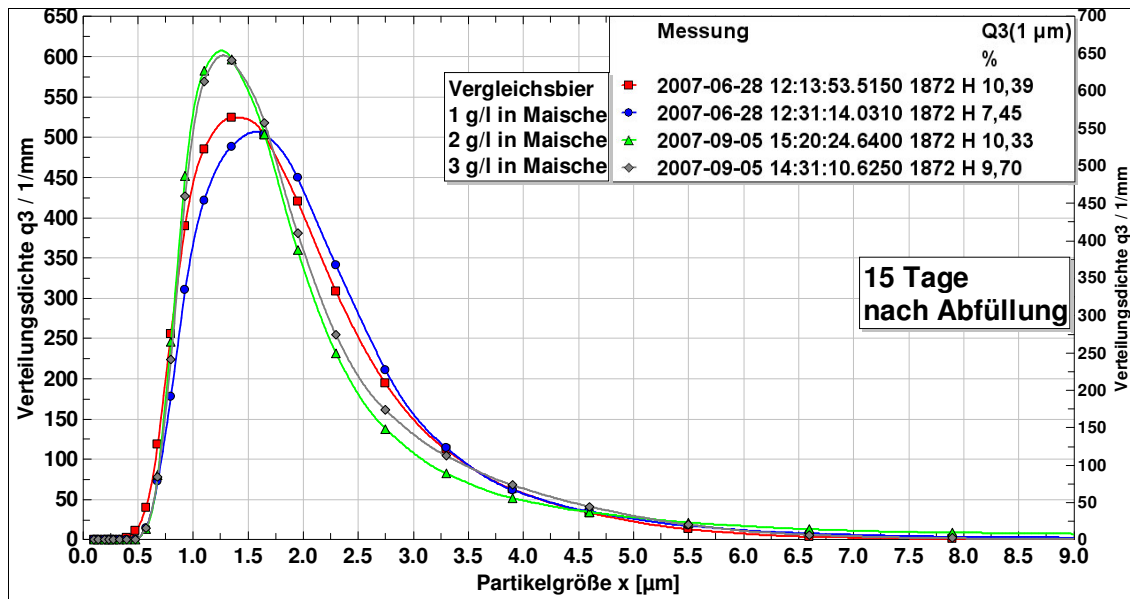


Abbildung A 4.5.1: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Weizenbiere mit unterschiedlichen Hopfentreberdosagen zur Maische, 15 Tage nach Abfüllung

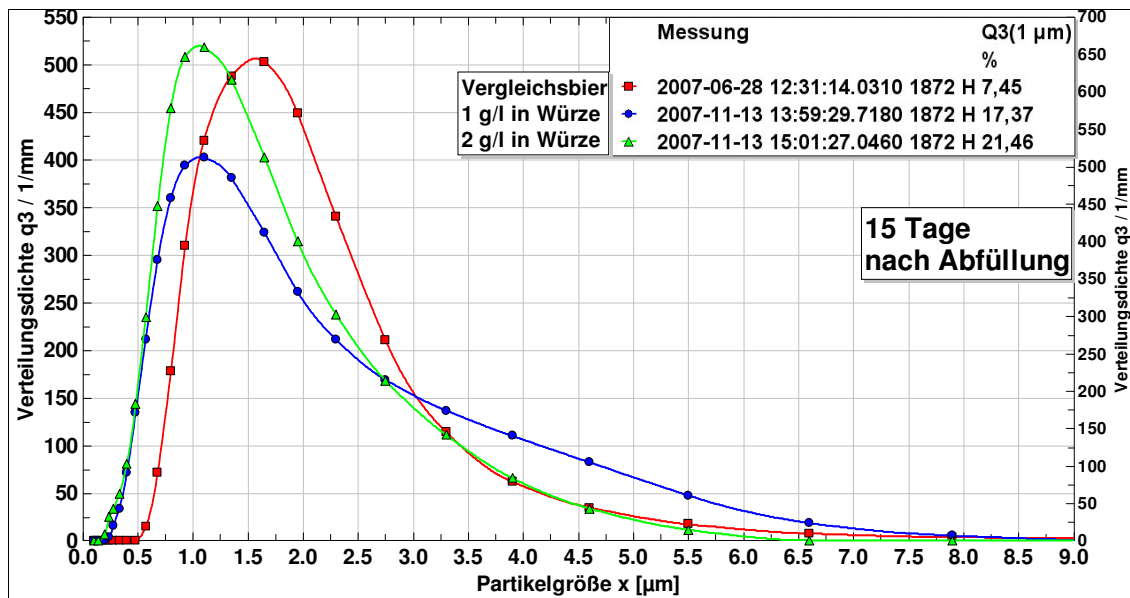


Abbildung A 4.5.2: Vergleich der Partikelgrößenverteilungen der Weizenbiere mit unterschiedlichen Hopfentreberdosagen zur Würze, 15 Tage nach Abfüllung

Anhang Kapitel 4.6.1

Tabelle A 4.6.1: Trübungs- und Partikelmesswerte von Weizenbieren vor und nach KZE

Probe	Bemerkung	V (O ₁ = 1) [µl]	V (x = 1 µm)	V (x = 1,5 µm)	ml V ₈₁	V ₈₁ [µl/ml]	StAbw Ges	StAbw V _{StAbw}	Q _{ges} (%)	Q(x%)	Q ₁ (x=1)	Q ₂ (x=1,5)	sonst.	x ₈₀	x ₀ (= x _{50/2})	Δ t [d]	90°	25°	VZ (90°/25°)	koag. N
26 a	o. KZE	28,5	7,0	14,6	6	0,42	4,38	0,06	0,768	0,836	0,246	0,513		6,32	3,16	14	55	79	0,70	3,2 (Bier)
26 a	o. KZE	14,1	4,4	8,1	5	1,35	0,83	0,08	0,48	0,71	0,31	0,574		6,4	3,2	28	33	31	0,65	
26 a	o. KZE	2,8	0,9	1,8	6	0,11	0,91	0,03	0,77	0,945	0,341	0,652		6,2	3,1	61	18	35	0,51	
26 a	o. KZE															82	12,5	27	0,46	
26 b	m. KZE	63,6	3,1	9,5	6	0,42	9,76	0,06	0,327	0,34	0,048	0,15		6,32	3,16	14	126	200	0,63	2,2 (Bier)
26 b	m. KZE	22,7	1,6	4,1	5	1,35	1,34	0,08	0,416	0,54	0,07	0,18		6,4	3,2	28	96	153	0,63	
26 b	m. KZE	11,1	0,8	2,4	6	0,11	3,66	0,03	0,528	0,568	0,07	0,216		6,2	3,1	61	56	91	0,62	
26 b	m. KZE															82	17	28	0,61	
32 a	o. KZE	24,5	2,4	7,9	5	1,35	1,45	0,08	0,659	0,841	0,1	0,324		6,4	3,2	8	71	113	0,63	3,4 (Bier)
32 a	o. KZE															22	70	122	0,57	
32 a	o. KZE															79	8	19	0,42	
32 b	m. KZE	61,5	1,8	8,0	5	1,35	3,63	0,08	0,564	0,626	0,03	0,13		6,4	3,2	8	103	180	0,57	2,2 (Bier)
32 b	m. KZE															22	97	179	0,54	
32 b	m. KZE															79	5	10	0,50	
53 a	o. KZE	18,2	2,6	15,8	5	0,12	2,63	0,02	0,92	0,96	0,143	0,87		5,5	2,75	9	79	115	0,69	0,8 (Bier)
53 a	o. KZE															31	37	63	0,59	
53 a	o. KZE															46	20	37	0,54	
53 b	m. KZE	8,7	2,0	7,7	5	0,12	1,26	0,02	0,85	0,908	0,227	0,882		5,5	2,75	9	53	62	0,85	2,2 (Bier)
53 b	m. KZE															31	41	50	0,82	
53 b	m. KZE															46	31	40	0,78	
54 a	30', ohne KZE	32,8	3,9	9,0	2,5	1,96	0,91	0,05	0,348	0,4	0,119	0,273		6,25	3,125	13	47	78	0,60	2,6 (Wurze)
54 a	30', ohne KZE	24,1	2,7	6,0	5	0,97	0,00	0,05	0,791	0,95	0,112	0,25		7,5	3,75	43	18,8	41,7	0,45	
54 b	30', mit KZE	44,2	8,1	17,7	2,5	1,96	1,23	0,05	0,504	0,56	0,183	0,4		6,25	3,125	13	69	100	0,69	2,2 (Bier)
54 b	30', mit KZE	44,2	7,3	14,2	10	0,97	0,00	0,05	0,73	0,89	0,165	0,32		7,5	3,75	43	42	57	0,74	
54 b	30', mit KZE															96	24	47,3	0,51	
55 a	60', ohne KZE	32,2	9,5	26,0	2,5	1,96	0,89	0,05	0,577	0,665	0,296	0,87		6,25	3,125	13	57	76	0,75	2,2 (Wurze)
55 a	60', ohne KZE	47,1	15,4	26,5	5	0,97	0,00	0,05	0,645	0,932	0,328	0,562		7,5	3,75	43	53,3	74,9	0,71	
55 b	60', mit KZE	25,9	8,5	19,7	2,5	1,96	0,72	0,05	0,544	0,647	0,327	0,762		6,25	3,125	13	50	60	0,83	2,4 (Bier)
55 b	60', mit KZE	38,3	13,5	24,8	5	0,97	0,00	0,05	0,853	0,961	0,362	0,648		7,5	3,75	43	52,2	66,5	0,78	
55 b	60', mit KZE															96	34,4	42,6	0,81	
56 a	ohne KZE	16,8	3,9	6,3	6	0,72	1,75	0,07	0,47	0,69	0,23	0,372		6,6	3,3	8	21,2	37,1	0,57	3,9 (Bier)
56 a	ohne KZE															21	15	27	0,56	
56 a	ohne KZE															53	13	22	0,59	
56 b	mit KZE	26,9	8,6	15,1	6	0,72	2,79	0,07	0,362	0,42	0,32	0,561		6,6	3,3	8	46,7	50,2	0,93	3,6 (Bier)
56 b	mit KZE															21	37	39	0,95	
56 b	mit KZE															53	25	27	0,93	
57 a	ohne KZE	3,1	0,7	1,2	5	0,89	0,27	0,08	0,32	0,78	0,23	0,37		6,4	3,2	12	8,2	22	0,37	2 (Bier)
57 b	mit KZE	4,0	1,1	1,6	5	0,89	0,35	0,08	0,35	0,74	0,28	0,41		6,4	3,2	12	7,7	19	0,41	2,2 (Bier)
57 c	mit KZE	3,5	0,9	1,5	5	0,89	0,31	0,08	0,31	0,71	0,25	0,42		6,4	3,2	12	7,8	18,3	0,43	3,2 (Bier)
57 d	mit KZE	3,1	1,1	1,2	5	0,89	0,27	0,08	0,28	0,69	0,35	0,4		6,4	3,2	12	8	17,6	0,45	2,5 (Bier)
58 a	ohne KZE	55,4	0,9	5,0	6	1,02	8,48	0,16	0,416	0,462	0,017	0,09		6	3	7	151	200	0,76	3,4 (Bier)
58 a	ohne KZE	13,2	1,7	7,9	6	1,40	2,54	0,27	0,52	0,85	0,13	0,6		6,63	3,315	21	59	88	0,67	
58 a	ohne KZE	16,9	12,9	16,9	5	1,17	2,76	0,19	0,577	0,777	0,76	1		6,88	3,44	36	80	129	0,62	
58 a	ohne KZE	5,5	4,0	5,3	6	1,29	0,84	0,20	0,37	0,89	0,72	0,97		7,07	3,535	41	18	34	0,53	
58 b	mit KZE	58,8	1,2	7,6	6	1,02	9,00	0,16	0,48	0,53	0,02	0,13		6	3	7	170	200	0,85	2,8 (Bier)
58 b	mit KZE	46,5	0,9	6,5	6	1,40	8,92	0,27	0,449	0,53	0,02	0,14		6,63	3,315	21	136	200	0,68	
58 b	mit KZE	65,6	47,2	63,6	5	1,17	10,69	0,19	0,67	0,73	0,72	0,97		6,88	3,44	36	154	200	0,77	
58 b	mit KZE	53,3	1,3	5,8	6	1,29	8,15	0,20	0,6	0,687	0,025	0,108	2:1 verd.	7,07	3,535	41	75	135	0,56	

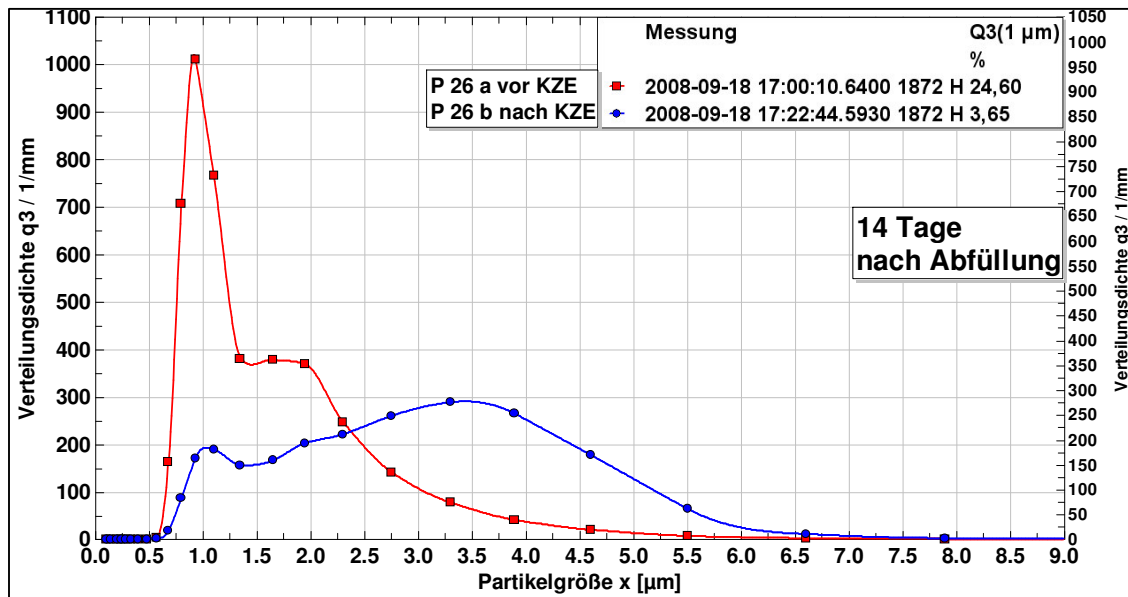


Abbildung A 4.6.1: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 26, 14 Tage nach der Abfüllung

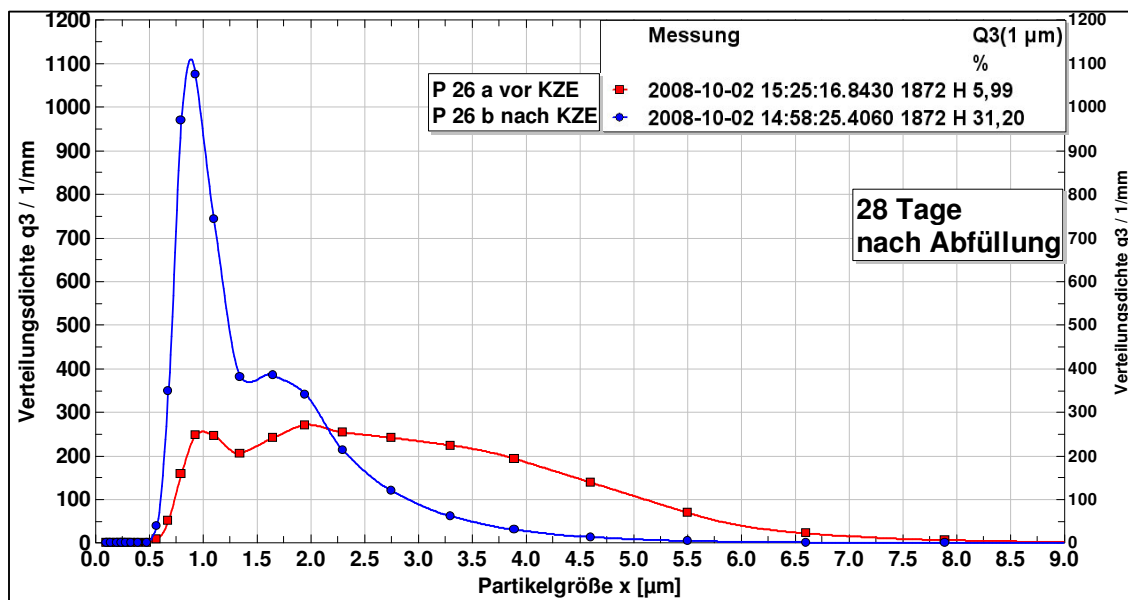


Abbildung A 4.6.2: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 26, 28 Tage nach der Abfüllung

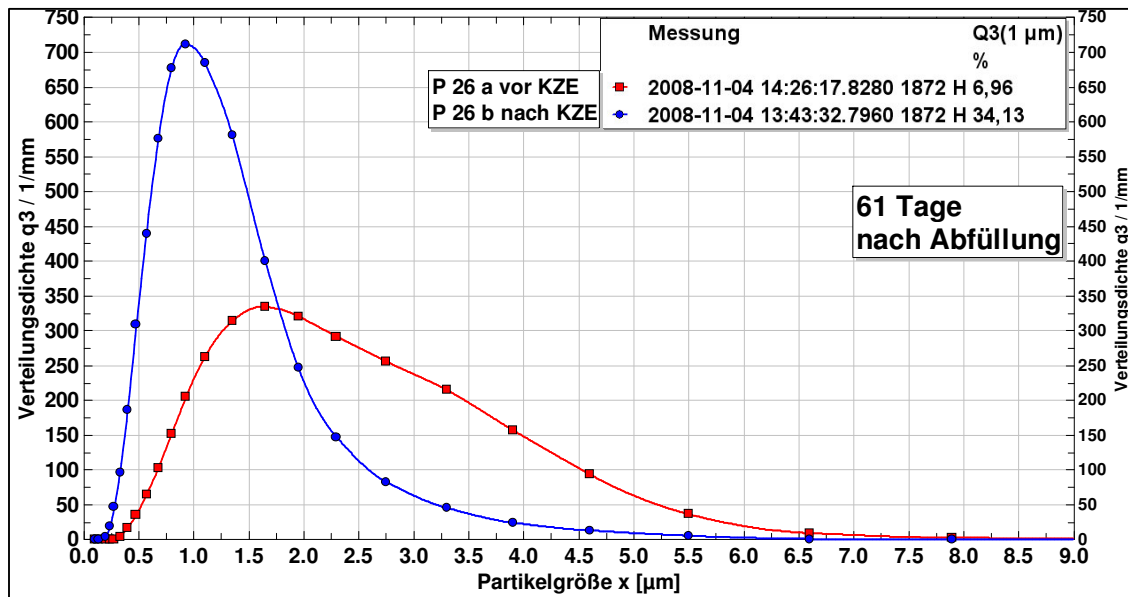


Abbildung A 4.6.3: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 26, 28 Tage nach der Abfüllung

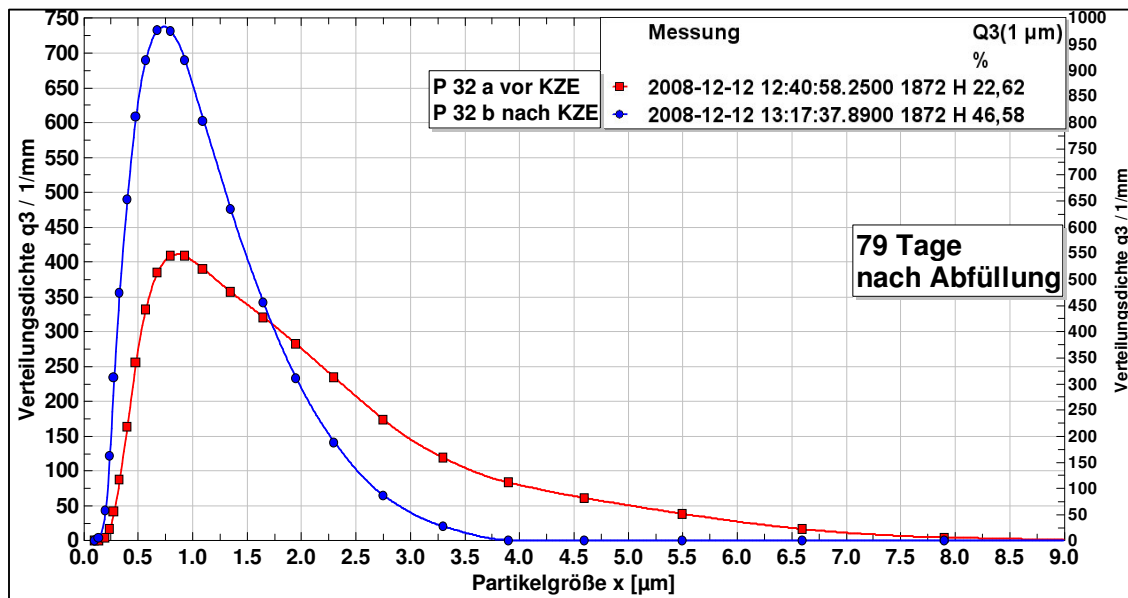


Abbildung A 4.6.4: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 32, 79 Tage nach der Abfüllung

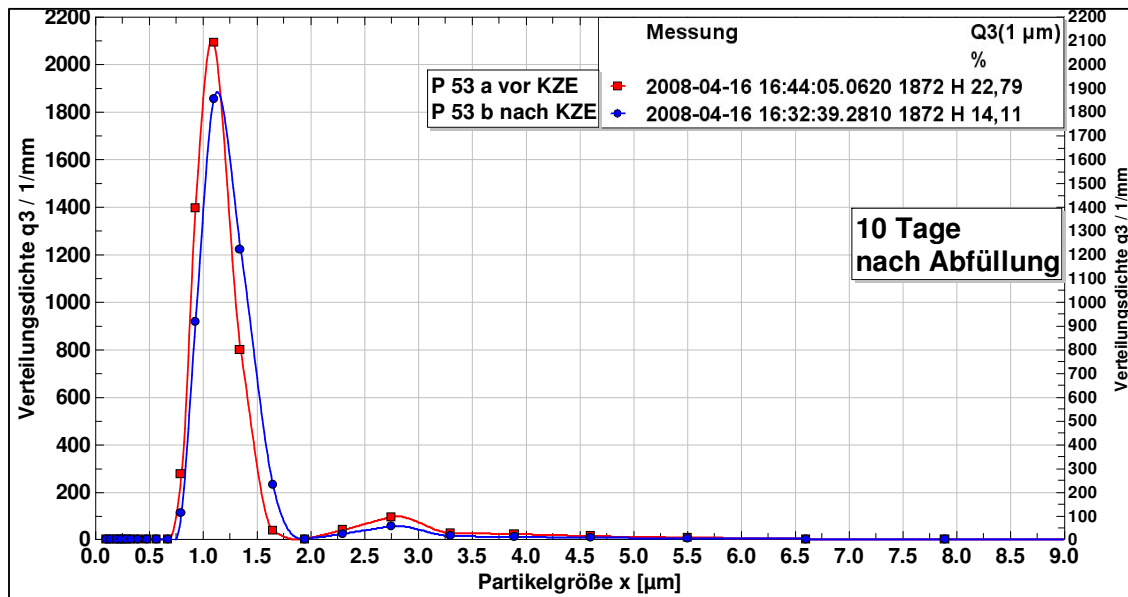


Abbildung A 4.6.5: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 53, 10 Tage nach der Abfüllung

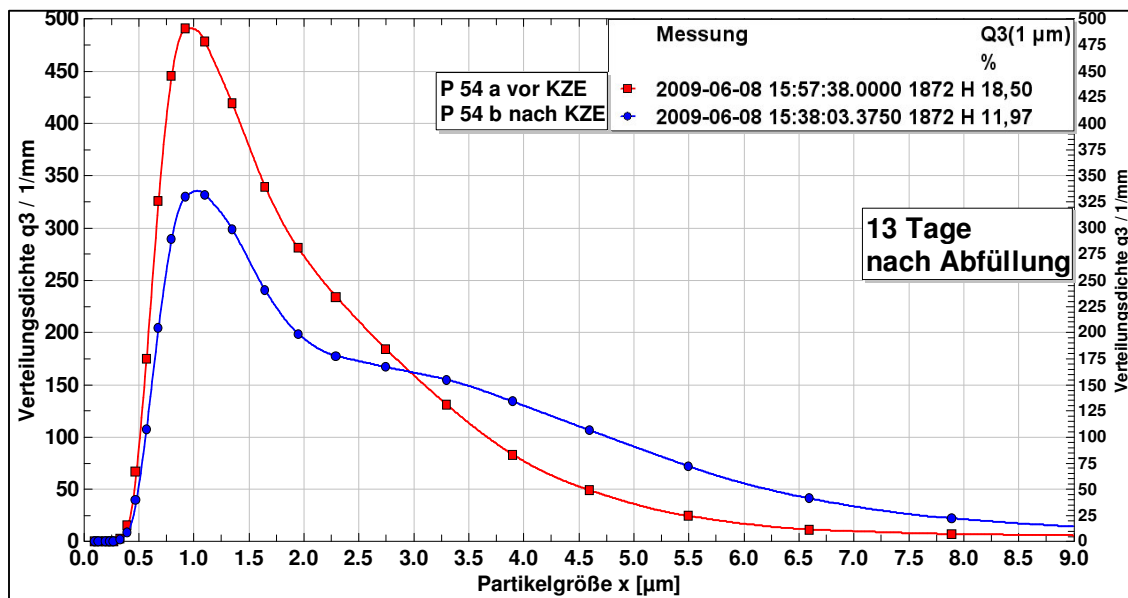


Abbildung A 4.6.6: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 54, 13 Tage nach der Abfüllung

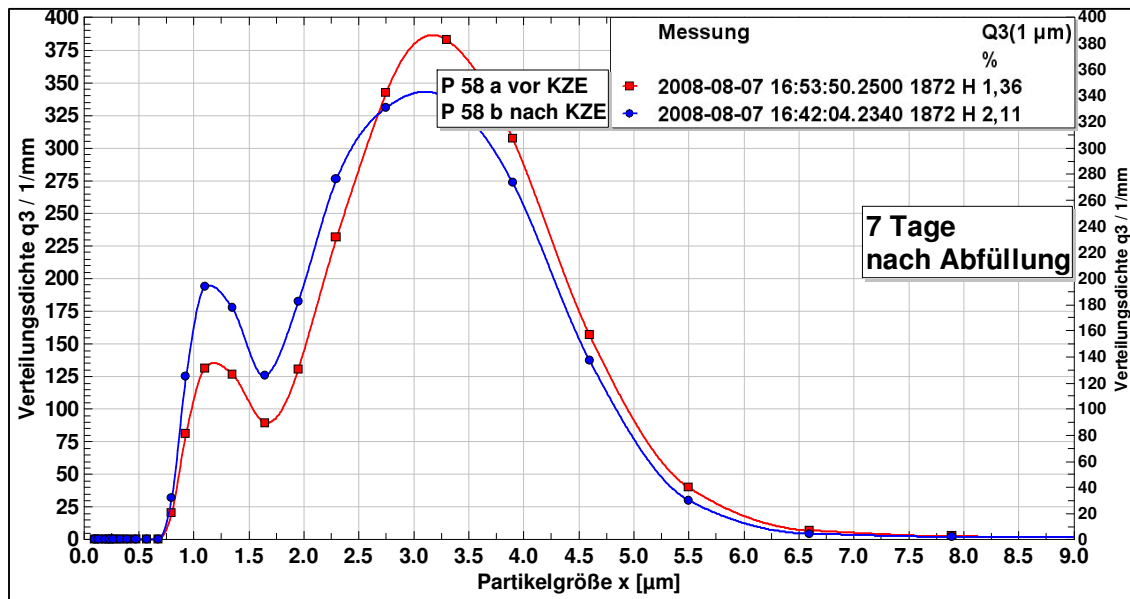


Abbildung A 4.6.7: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 58, 7 Tage nach der Abfüllung

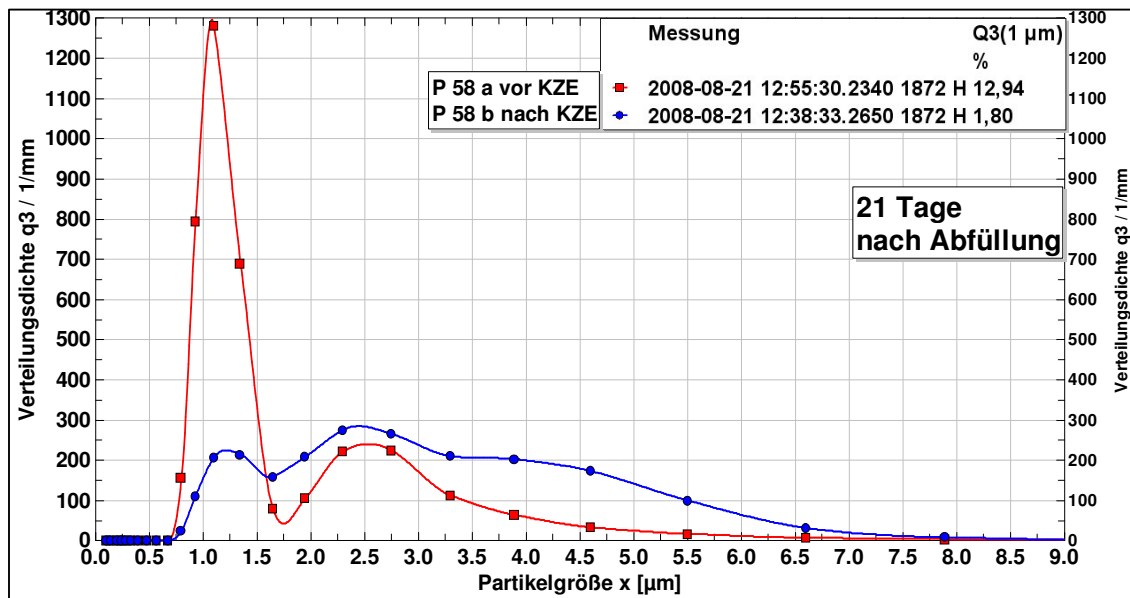


Abbildung A 4.6.8: Vergleich der PGV vor und nach KZE der Probe 58, 21 Tage nach der Abfüllung

Anhang 4.6.2: Vorversuch

Vorversuch:

- Probe A: Würze 10 min nach Kochbeginn
- Probe B: Würzermischung 10 min nach KB (50 %) + Würze KM (50 %)
- Probe C: Würze KM

Die Proben wurden heiß genommen und in 20-l-Cornelius-Behälter abgefüllt. Kühlung erfolgte durch Kaltwasserberieselung (Schlauch) unter wiederholtem Schütteln der Behälter.

Malzanteil: 60 % Weizenmalz, 40 % Gerstenmalz

Würzebehandlung:

- 10 min vor KB: 1. HG (94 °C, 6 kg)
- 35 min nach KB: 2. HG (3 kg)
- Kochzeit: ca. 70 min
- 12 min Ausschlagen
- 30 min Whirlpoolrast
- 60 min Kühlen

Gärung in Gärkeller, 10-l-ZKGs

Hefe: Stamm 68; angestellt mit 3 Mio/ml; Tote Zellen < 1 % (Methylen-Blau-Meth.)

Hauptgärung: 20 °C

Reifung (in Cornelius-Behälter, geschlaucht bei ca. 1 % noch vergärbarem Extrakt) bei 22 °C, 2 Tage

Lagerung: 4 °C, 3 Tage

Abfüllung auf 0,5-l-NRW-Flaschen

Flaschenpasteurisierung:

Nach 33 min – 60,5 °C

Nach 36 min – 65 °C

Nach 39 min – 69 °C

Nach 45 min – 74 °C → aus dem Wasserbad genommen, nach ca. 2 Minuten war die Temperatur unter 60 °C; danach unter laufendem Wasser auf 20 °C gekühlt.

Lagerung der abgefüllten Flaschen bei ca. 20 °C

Tabelle A 4.6.2: Würze- und Bieranalysen der Weizenbierproben mit unterschiedlicher Würzekochzeit

	Probe A	Probe B	Probe C
Würzeanalysen			
Stammwürze [GG-%]	12,33	12,67	12,91
koag. N [mg/l]	42	30,0	23
DMS frei [µg/l]	57	47	37
DMS-P [µg/l]	232	142	51
TBZ	21		54
Bittereinheiten	9		21
Bieranalysen			
Schaum nach Nibem [s]	261		259
90°-Trübung vor Past.	19	24	34
25°-Trübung vor Past.	37	45	58
90°-Trübung nach Past.	21	25	32
25°-Trübung nach Past.	38	44	55

Tabelle A 4.6.3: Trübungsmessungen der Weizenbierproben mit unterschiedlicher Würzekochzeit

Streulichtmessung Vorversuche				
nach Flaschenpasteurisierung				
	Probe	90°	25°	VZ 90°/25°
6 Tage nach der Abfüllung	A I	20	37	0,54
	A II	18	35	0,51
	B I	19	38	0,50
	B II	18	36	0,50
	C I	32	58	0,55
	C II	37	66	0,56
20 Tage nach der Abfüllung	A I	21	39	0,54
	A II	21	38	0,55
	B I	25	44	0,57
	B II	28	45	0,62
	C I	32	55	0,58
	C II	33	61	0,54

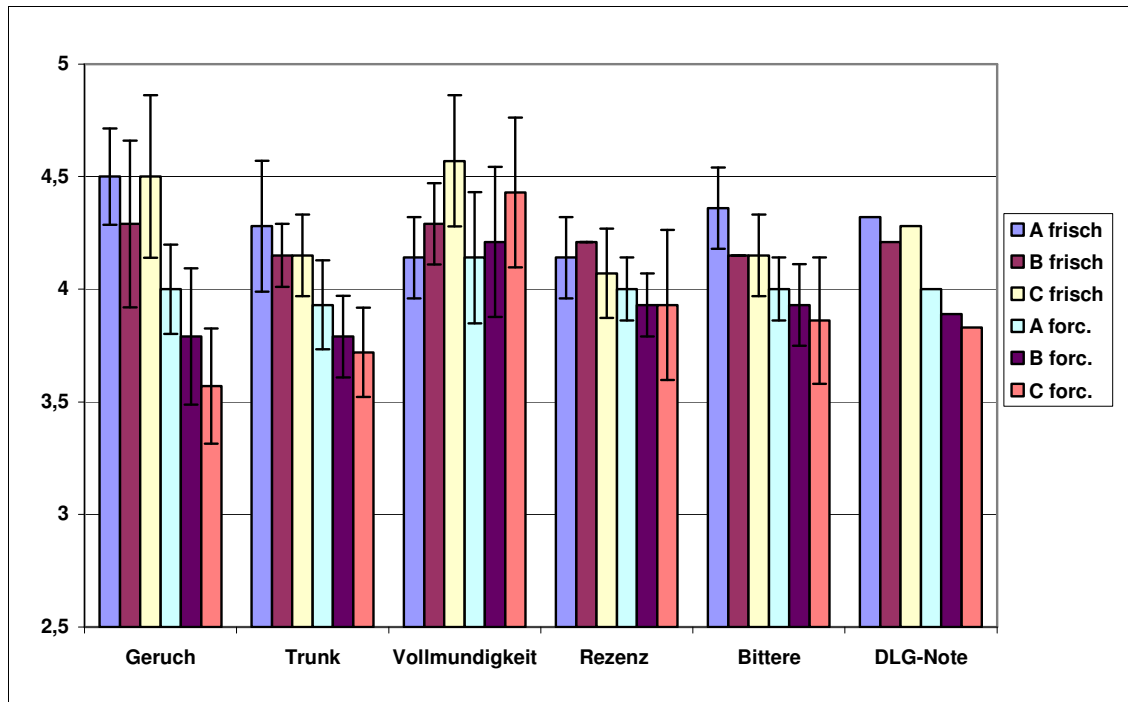


Abbildung A 4.6.9: Sensorische Bewertung der Proben A, B und C nach DLG, in frischem und forciert gealtertem Zustand

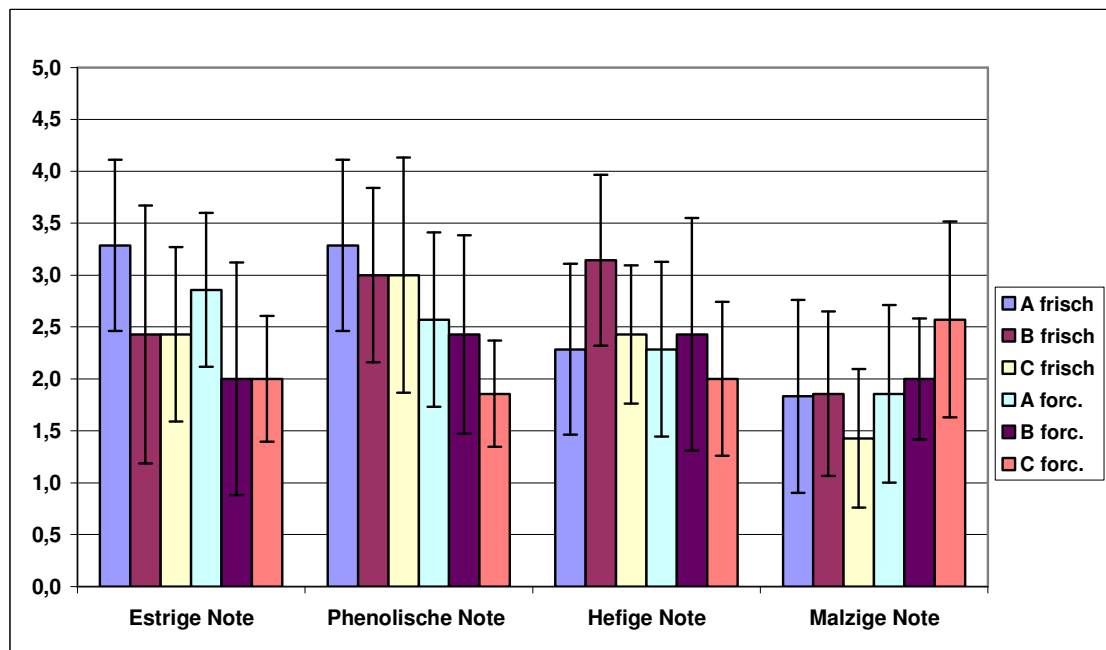


Abbildung A 4.6.10: Bewertung der Intensität von typischen Weizenbieraromen nach HERRMANN der Proben A, B und C, in frischem und forciert gealtertem Zustand

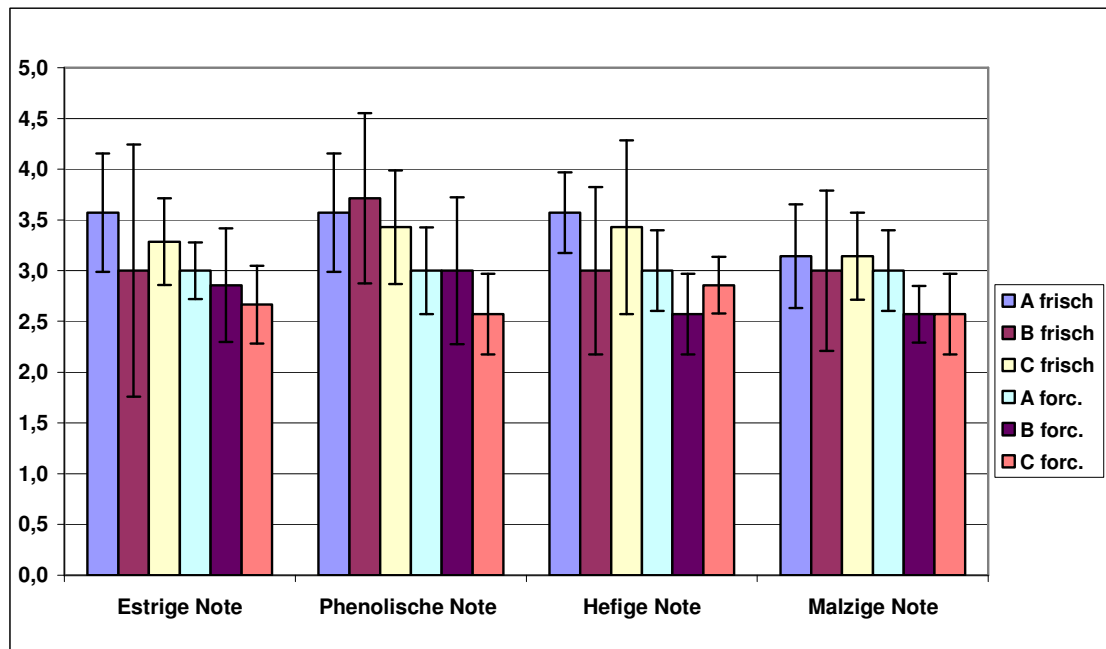


Abbildung A 4.6.10: Bewertung der Qualität von typischen Weizenbieraromen nach HERRMANN der Proben A, B und C, in frischem und forciert gealtertem Zustand

Anhang 4.6.2: Praxisversuch

Tabelle A 4.6.4: Malz-, Würze- und Bieranalysen der Praxisversuche mit 30 und 60 Minuten Würzekochung

Malz:	60 % Weizenmalz, 40 % Gerstenmalzmischung							
	Weizenmalz				Gerstenmalz			
DMS-P [mg/kg]	1,9				2,7			
	30 min Kochzeit				60 min Kochzeit			
	Sud 276		Sud 277		Sud 281		Sud 282	
Würzeanalyse	Pf-Voll	KM	Pf-Voll	KM	Pf-Voll	KM	Pf-Voll	KM
DMS - frei [µg/l]	144	109	135	91	158	53	151	49
DMS-P [µg/l]	220	13	229	38	213	27	217	24
Gesamt-N [mg/100 ml]	127,7	137	119	125	123,1	117	120	111
Koag.-N [mg/l]	103	26	101	25	107	22	107	21
Bittereinheiten		23		23		25		26
TBZ		54		50		57		58
Stammwürze [GG%]	12,35	12,67	12,31	12,61	12,42	12,87	12,37	12,82
Verdampfung [%]		2,5		2,4		3,5		3,5
Bier-vor KZE	Probe 54 a				Probe 55 b			
Schaum Nibem [s]	251				226			
EBC Trübung 90°	47				57			
EBC Trübung 25°	78				76			
VZ 90°/25°	0,60				0,75			
Partikel < 1,5 µm [µl/500 ml]	9,0				28,0			
Gesamtpartikel [µl/500 ml]	32,8				32,2			
Bier-nach KZE	Probe 54 b				Probe 55 b			
Schaum Nibem [s]	236				235			
EBC Trübung 90°	69				50			
EBC Trübung 25°	100				60			
VZ 90°/25°	0,69				0,83			
Partikel < 1,5 µm [µl/500 ml]	17,1				19,7			
Gesamtpartikel [µl/500 ml]	44,2				25,9			

Tabelle A 4.6.5: Trübungsmesswerte und Veränderung des noch koagulierbaren Stickstoffs der Praxisbiere mit 30 und 60 Minuten Würzekochung, vor und nach KZE

Probe	Bemerkung	Tage nach Abfüllung	EBC-Trübung		VZ (90°/25°)	koag. N [mg/100 ml]
			90°	25°		
54 a	30', ohne KZE	13	47	78	0,60	2,6 (Würze)
54 a	30', ohne KZE	43	18,8	41,7	0,45	
54 b	30', mit KZE	13	69	100	0,69	2,2 (Bier)
54 b	30', mit KZE	43	53	75	0,71	
54 b	30', mit KZE	96	42,2	56,8	0,74	
55 a	60', ohne KZE	13	57	76	0,75	2,2 (Würze)
55 a	60', ohne KZE	43	28	53	0,53	
55 b	60', mit KZE	13	50	60	0,83	2,4 (Bier)
55 b	60', mit KZE	43	52,2	66,5	0,78	
55 b	60', mit KZE	96	34,4	42,6	0,81	

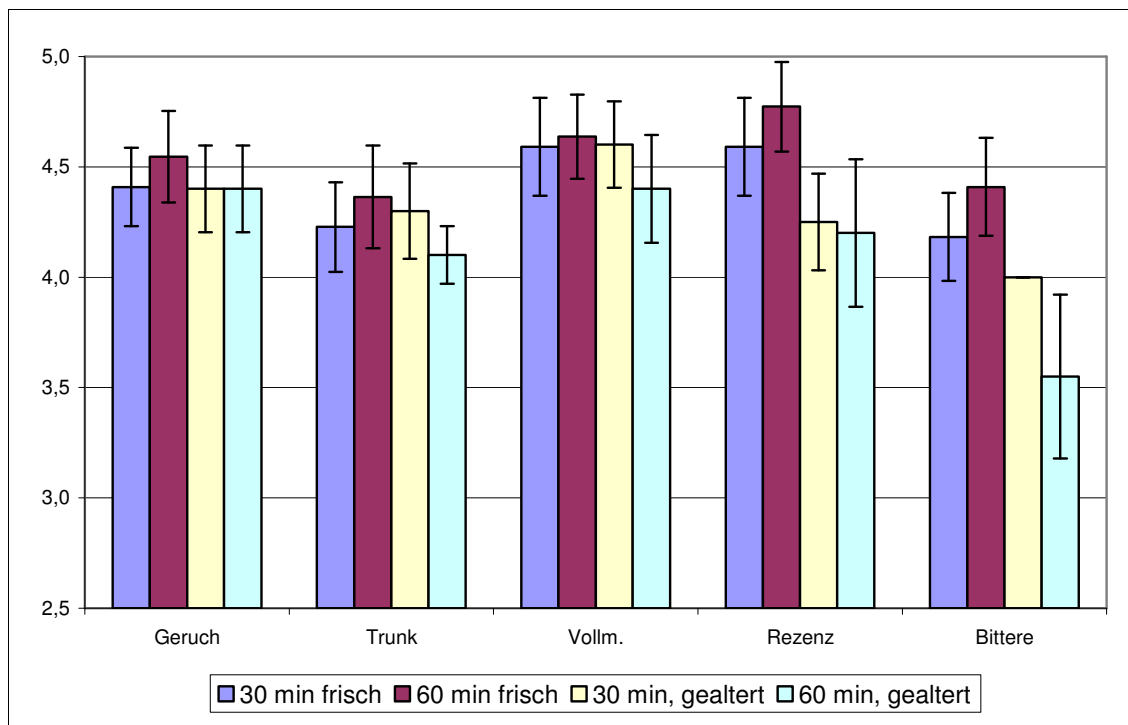


Abbildung A 4.6.11: Vergleichende sensorische Bewertung nach DLG der frischen und 6 Monate alten Praxisbiere mit 30 und 60 Minuten Würzekochung

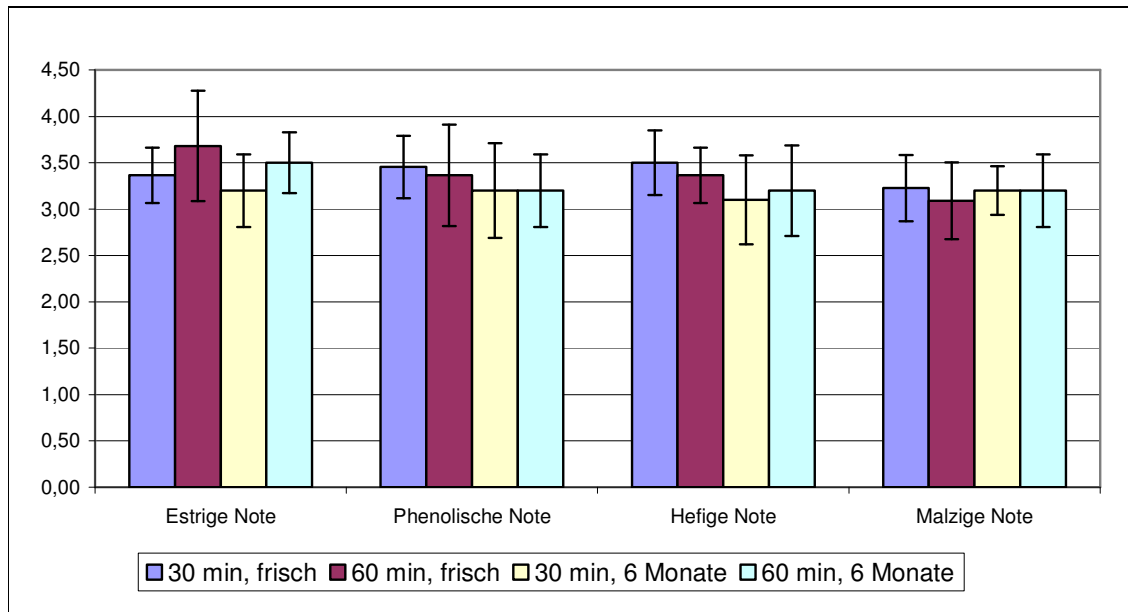


Abbildung A 4.6.12: Qualitative Bewertung typischer Weizenbieraromakomponenten der Praxisbiere nach HERRMANN mit 30 und 60 Minute Würzekochung, frisch und 6 Monaten nach Abfüllung

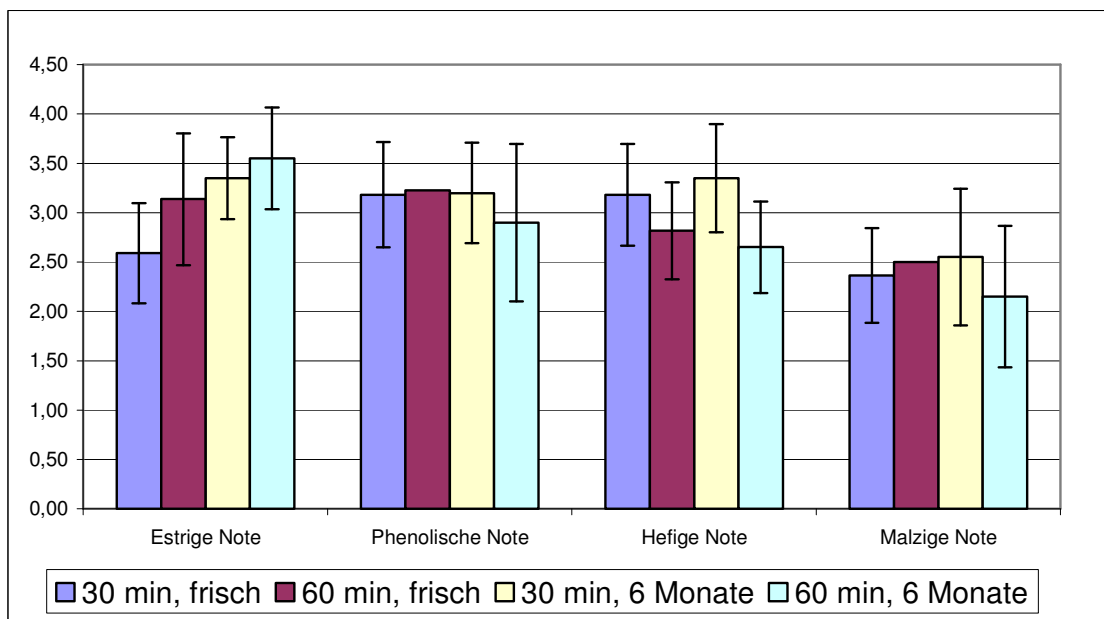


Abbildung A 4.6.13: Bewertung der Intensität typischer Weizenbieraromakomponenten der Praxisbiere nach HERRMANN mit 30 und 60 Minute Würzekochung, frisch und 6 Monaten nach Abfüllung

Tabelle A 4.6.6: Ergebnisse des Dreieckstest der frisch und forciert gealterten Biere mit 30 und 60 Minuten Kochzeit

Dreieckstest Praxisversuche Kochzeitverkürzung				
	Proben 623/601:	30 min	Probe 41:	30 min
	Probe 197:	60 min	Proben564/940:	60 min
	frisch		forciert	
		bevorzugt		bevorzugt
Verkoster 1	197	197	41	564/940
Verkoster 2	601		41	564/940
Verkoster 3	601		564	
Verkoster 4	197	623/601	564	
Verkoster 5	197	623/601	41	564/940
Verkoster 6	601		564	
Verkoster 7	623		41	564/940
Verkoster 8	197	623/601	564	
Verkoster 9	197	623/601	41	564/940
Verkoster 10	197	197	564	
richtig	6 von 10		5 von 10	
		4 von 6		5 von 5
Signifikanzniveau				
95 % (10 Verk.): 7 richtige Antworten				

Tabelle A 4.6.7: Vergleich des Aromastoffspektrums der Pfanne-voll- und Kühlmitte-Würzen mit 30 Minuten (Sud 276) und 60 Minuten (Sud 281) Kochzeit

Würzearomastoffe [µg/l]		Sud 276		Sud 281	
		Pfanne-Voll	Kühlmitte	Pfanne-Voll	Kühlmitte
3-me-Butanal	A, W	289	171	317	134
2-me-Butanal	A, W	198	53	201	42
Methional	A	8,5	14	29	16
Benzaldehyd	A	5	3,9	4,7	2,8
2-Phenylethanal	A, W	124	198	163	196
Σ Streckeraldehyde		625	440	714	391
Pentanal	A	8,4	1,4	10,4	1,1
2-Pentanon	A	1,5	1,1	1,4	0,9
Hexanal	A	25	5	47	3,2
Heptanal	A	1,2	2	4,2	1,7
Hexenal		3,9	0,9	3,2	0,3
Hexadienal		Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
tr,2-cis,6-Nonadienal	A	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
2-Furfural	T	43	215	47	233
2-ac-Furan	T	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
γ-Nonalacton	A, W	7,1	6,8	11	7,6
Damascenon		Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
3-me-Butanol	A	297	62	230	16
2-me-Butanol	A	89	16	69	3,1
1-Pentanol	A	20	5,6	18	2,3
1-Hexanol	A	61	7,4	43	2
1-Octanol	A	1,8	0,5	1,6	0,4
1-Octen-3-ol	A	20	6,5	20	0,4
Phenylethanol	A	127	149	103	107
Geraniol		0,6	3,4	0,7	1,7
α-Terpineol		0,9	3,1	0,8	1,5
Caryophyllen		1,7	4,9	1,5	3,3
Nerol		0,4	0,9	0,4	0,7
Humulen		3,3	19	2	16
Linalool		2,3	9,7	1,9	3,4
A = Indikator für Ausdampfung beim Würzekochen					
W = Indikator für thermische Belastung im Whirlpool					
T = Indikator für thermische Belastung beim Würzekochen und im Whirlpool					
Sp. = Spuren					
n. a. = nicht auswertbar					
n. n. = nicht nachweisbar					

Anhang Kapitel 4.7

Tabelle A 4.7.1: Hefeviabilität und -vitalität der für die Versuche zum Klärungsverhalten eingesetzten Hefepopulationen

Hefezellzahl, Viabilität und Vitalität					
	Hefestamm	ICP	Lebend-tot [%]	HZZ [Mio/ml]	Hefegabe (3 Mio/ml)
I. Führung	34	6,67	1	87	346 ml
	68	6,62	1	78	387 ml
	175	6,52	2	84	356 ml
		ICP	Lebend-tot [%]	HZZ [Mio/ml]	Hefegabe (1,8 Mio/ml)
II. Führung	34	6,69	6,5	53	330 ml
	68	6,61	26,6	79	260 ml
	175	6,45	6,4	84	210 ml

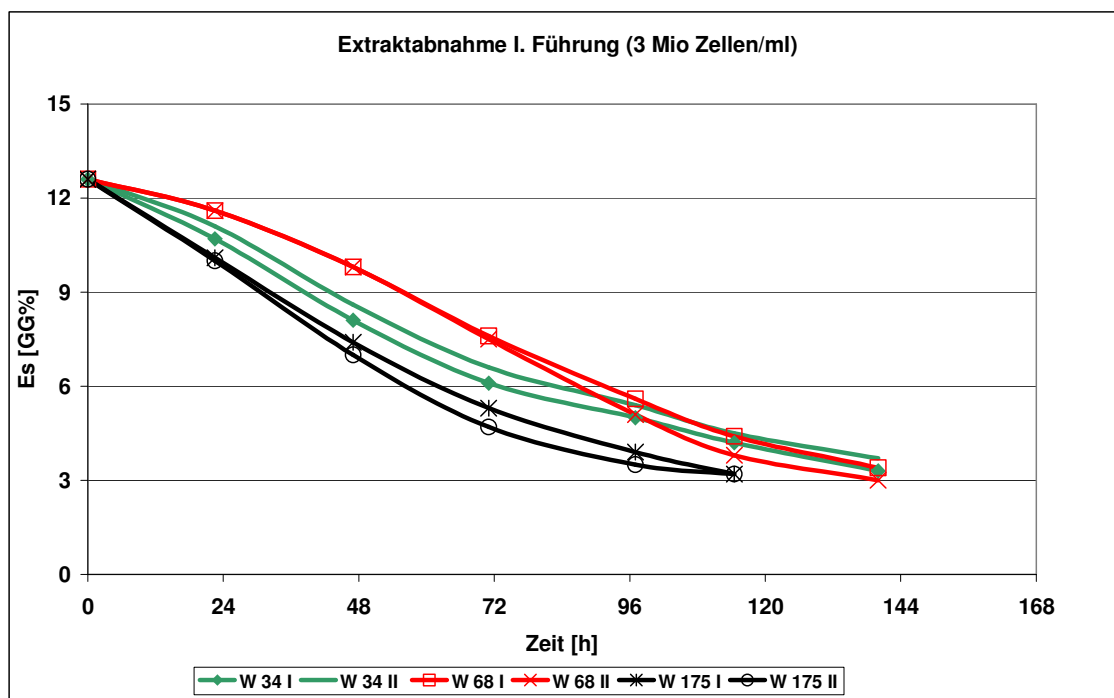


Abbildung A 4.7.1: Vergleich des Extraktabbaus der unterschiedlichen Hefestämme in der ersten Führung, Doppelbestimmung

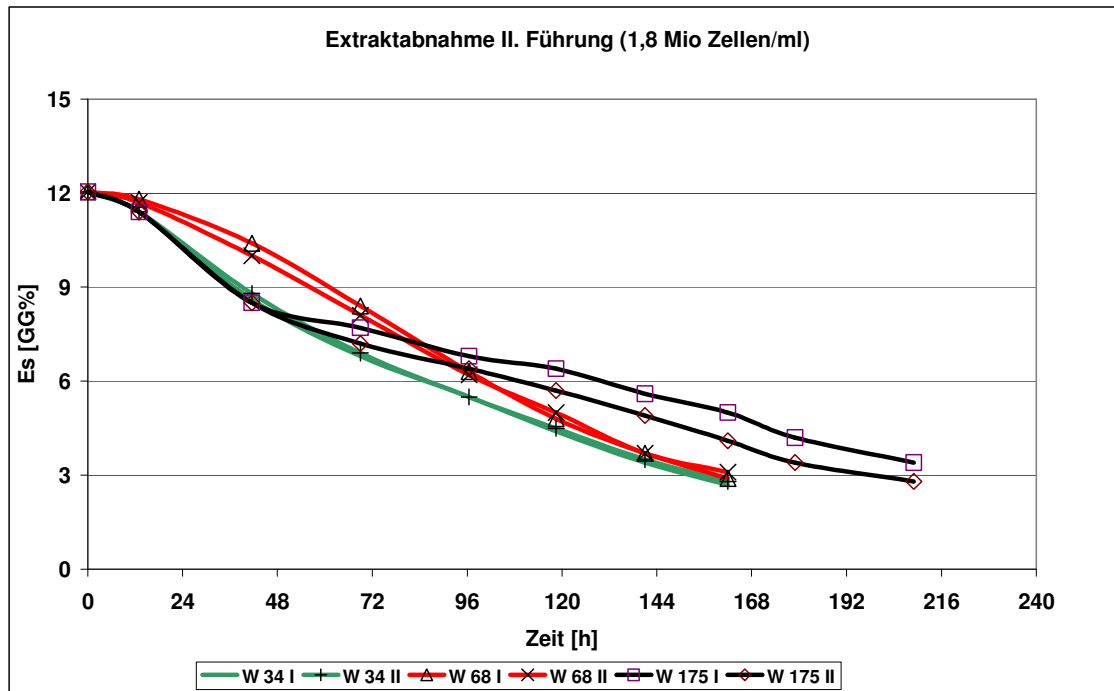


Abbildung A 4.7.2: Vergleich des Extraktabbaus der unterschiedlichen Hefestämme in der zweiten Führung, Doppelbestimmung

Tabelle A 4.7.2: Trübungswerte der Weizenbiere mit unterschiedlichen Hefestämmen, nach der ersten Führung

Streulichtmessung, 1. Führung				
		90°	25°	VZ 90°/25°
Würze (2:1verd.)		99	153	0,65
4 Tage nach der Abfüllung	W 34 I	22	42	0,52
	W 34 II	23	43	0,53
	W 68 I	34	60	0,57
	W 68 II	40	65	0,62
	W 175 I	58	91	0,64
	W 175 II	32	58	0,55
15 Tage nach der Abfüllung	W 34 I	9	21	0,43
	W 34 II	8	18	0,44
	W 68 I	11	24	0,46
	W 68 II	12	25	0,48
	W 175 I	32	60	0,53
	W 175 II	6	17	0,35
27 Tage nach der Abfüllung	W 34 I	6	15	0,40
	W 34 II	6	14	0,43
	W 68 I	7	16	0,44
	W 68 II	8	16	0,50
	W 175 I	5	15	0,33
	W 175 II	4	11	0,36

Tabelle A 4.7.3: Trübungswerte der Weizenbiere mit unterschiedlichen Hefestämmen, nach der zweiten Führung

Streulichtmessung, 2. Führung				
		90°	25°	VZ 90°/25°
	Würze (5:1 verd)	9	22	0,41
	W 34 I	19	38	0,50
4 Tage	W 34 II	21	42	0,50
nach der	W 68 I	25	44	0,57
Abfüllung	W 68 II	26	44	0,59
	W 175 I	44	67	0,66
	W 175 II	22	41	0,54
	W 34 I	6	15	0,40
15 Tage	W 34 II	6	15	0,40
nach der	W 68 I	9	19	0,47
Abfüllung	W 68 II	8	16	0,50
	W 175 I	9	21	0,43
	W 175 II	7	17	0,41

Anhang Kapitel 4.8

Tabelle A 4.8.1: Trübungsmesswerte zum Einfluss von Hefebier auf die Trübungsstabilität

Probe	Bemerkung	Datum	Uhrzeit	Δt [d]	90°	25°	VZ 90°/25°
VR 1-WL	ohne Hefebier	20080918	17:00	14	55	79	0,70
VR 1-WL	ohne Hefebier	20081002	14:58	35	33	51	0,65
VR 1-WL	ohne Hefebier	20081104	13:43	84	18	35	0,51
VR 2-WL	5 % Hefebier A	20080918	17:08	14	64	87	0,74
VR 2-WL	5 % Hefebier A	20081002	15:06	35	37	53	0,70
VR 2-WL	5 % Hefebier A	20081104	14:03	84	19	34	0,56
VR 3-WL	10 % Hefebier A	20080918	17:15	14	77	97	0,79
VR 3-WL	10 % Hefebier A	20081002	15:15	35	47	63	0,75
VR 3-WL	10 % Hefebier A	20081104	14:16	84	23	37	0,62
VR 4-WL	ohne Hefebier	20080918	17:22	14	126	200	0,63
VR 4-WL	ohne Hefebier	20081002	15:25	28	96	153	0,63
VR 4-WL	ohne Hefebier	20081125	16:18	82	17	28	0,61
VR 5-WL	5 % Hefebier A	20080918	17:32	14	131	200	0,66
VR 5-WL	5 % Hefebier A	20081002	15:34	28	99	153	0,65
VR 5-WL	5 % Hefebier A	20081125	16:26	82	19	29	0,66
VR 6-WL	10 % Hefebier A	20080918	17:40	14	132	200	0,66
VR 6-WL	10 % Hefebier A	20081002	15:43	28	107	164	0,65
VR 6-WL	10 % Hefebier A	20081125	16:48	82	20	30	0,67
VR 9-WL	ohne Hefebier	20081002	16:21	8	71	113	0,63
VR 9-WL	ohne Hefebier	20081016	16:18	22	70	122	0,57
VR 9-WL	ohne Hefebier	20081212	12:40	79	8	19	0,42
VR 10-WL	5 % Hefebier B	20081002	16:23	8	77	125	0,62
VR 10-WL	5 % Hefebier B	20081016	16:31	22	100	180	0,56
VR 10-WL	5 % Hefebier B	20081212	12:52	79	7	17	0,41
VR 11-WL	10 % Hefebier B	20081002	16:43	8	76	106	0,72
VR 11-WL	10 % Hefebier B	20081016	16:40	22	97	179	0,54
VR 11-WL	10 % Hefebier B	20081212	13:04	79	8	18	0,44
VR 12-WL	ohne Hefebier	20081002	16:53	14	103	180	0,57
VR 12-WL	ohne Hefebier	20081016	16:48	35	97	179	0,54
VR 12-WL	ohne Hefebier	20081212	13:17	84	5	10	0,50
VR 13-WL	5 % Hefebier C	20081002	17:05	14	99	165	0,6
VR 13-WL	5 % Hefebier C	20081016	16:59	35	92	157	0,58
VR 13-WL	5 % Hefebier C	20081212	13:27	84	6	12	0,48
VR 14-WL	10 % Hefebier C	20081002	17:14	14	106	174	0,61
VR 14-WL	10 % Hefebier C	20081016	17:06	35	93	160	0,58
VR 14-WL	10 % Hefebier C	20081212	13:37	84	11,1	15,6	0,71
VR 18-WL	ohne Hefebier	20081120	16:53	14	101	170	0,59
VR 18-WL	ohne Hefebier	20081212	13:56	32	15	29	0,52
VR 18-WL	ohne Hefebier	20090122	15:31	77	6	13	0,46
VR 19-WL	5 % Hefebier D	20081120	17:03	14	165	200	0,83
VR 19-WL	5 % Hefebier D	20081212	14:09	32	45	62	0,73
VR 19-WL	5 % Hefebier D	20090122	15:22	77	17	27	0,63
VR 20-WL	10 % Hefebier D	20081120	17:13	14	200	200	1,00
VR 20-WL	10 % Hefebier D	20081212	14:19	32	41	49	0,84
VR 20-WL	10 % Hefebier D	20090122	15:13	77	24	31	0,77
VR 7	Hefebier A	20080918	17:49	14	144	125	1,15
VR 8	Hefebier B	20080918	17:57	14	110	122	0,90
VR 15	Hefebier C	20081002	17:24	14	133	154	0,86
VR 21	Hefebier D	20081120	17:23	14	200	200	1,00

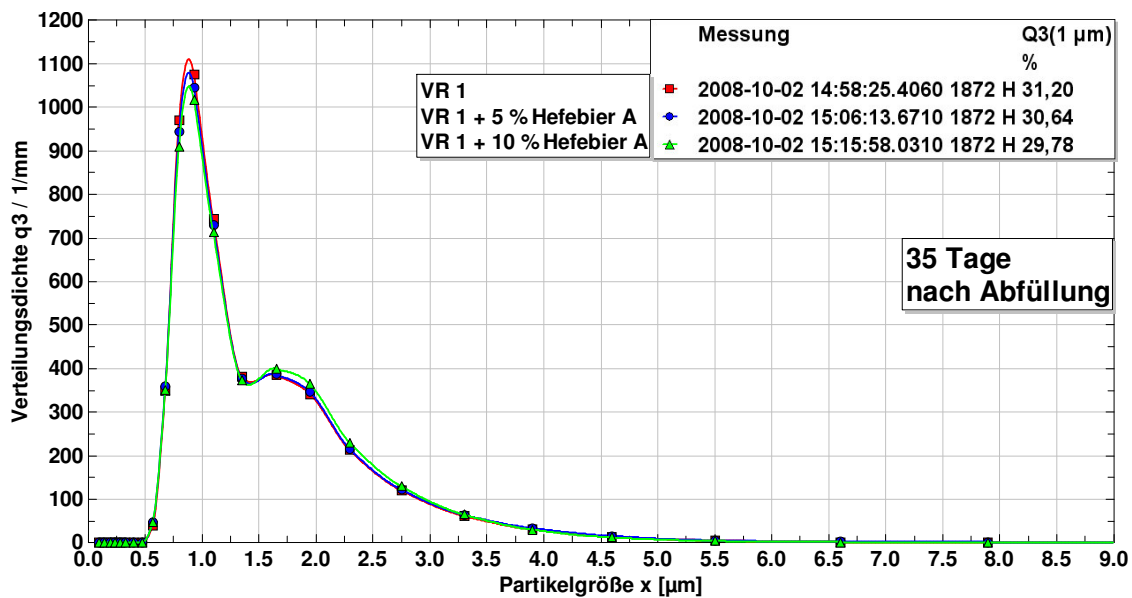


Abbildung A 4.8.1: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 1, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 35 Tage nach Abfüllung

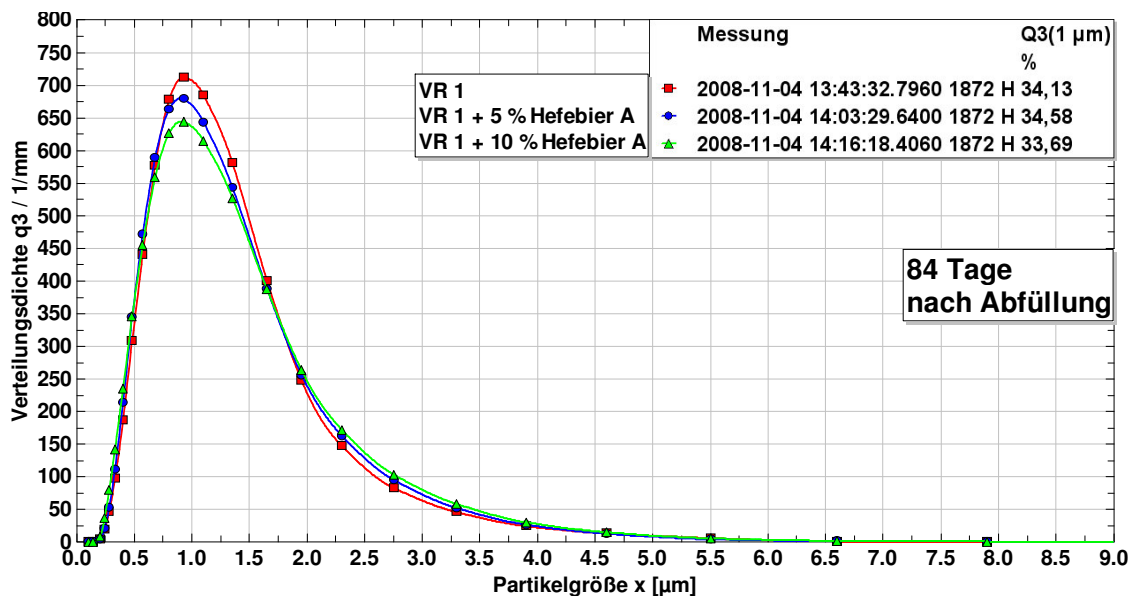


Abbildung A 4.8.2: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 1, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 84 Tage nach Abfüllung

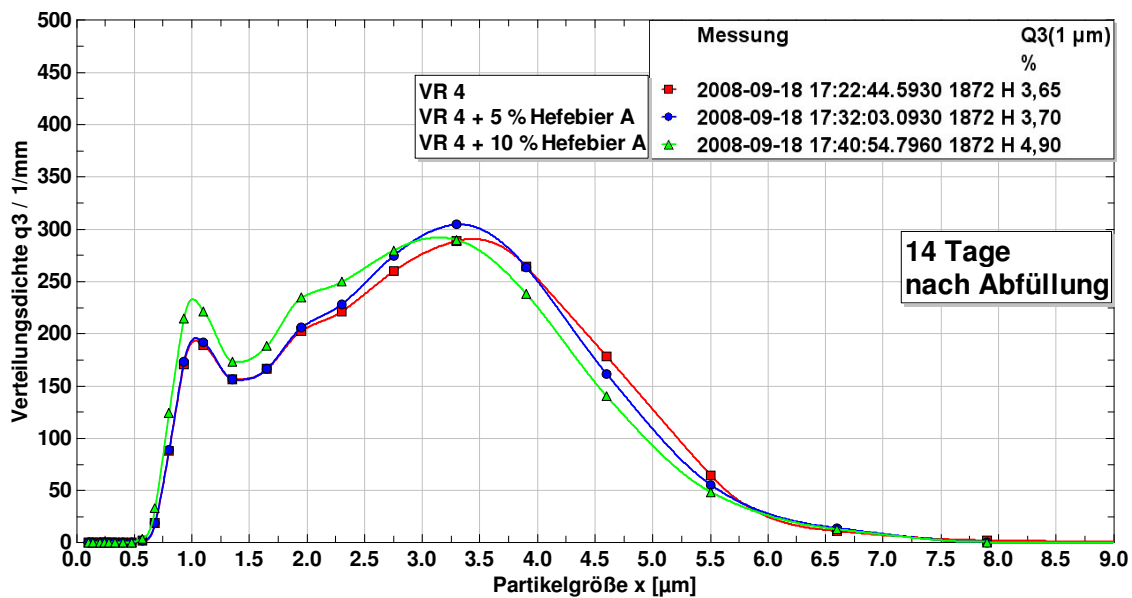


Abbildung A 4.8.3: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 4, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 14 Tage nach Abfüllung

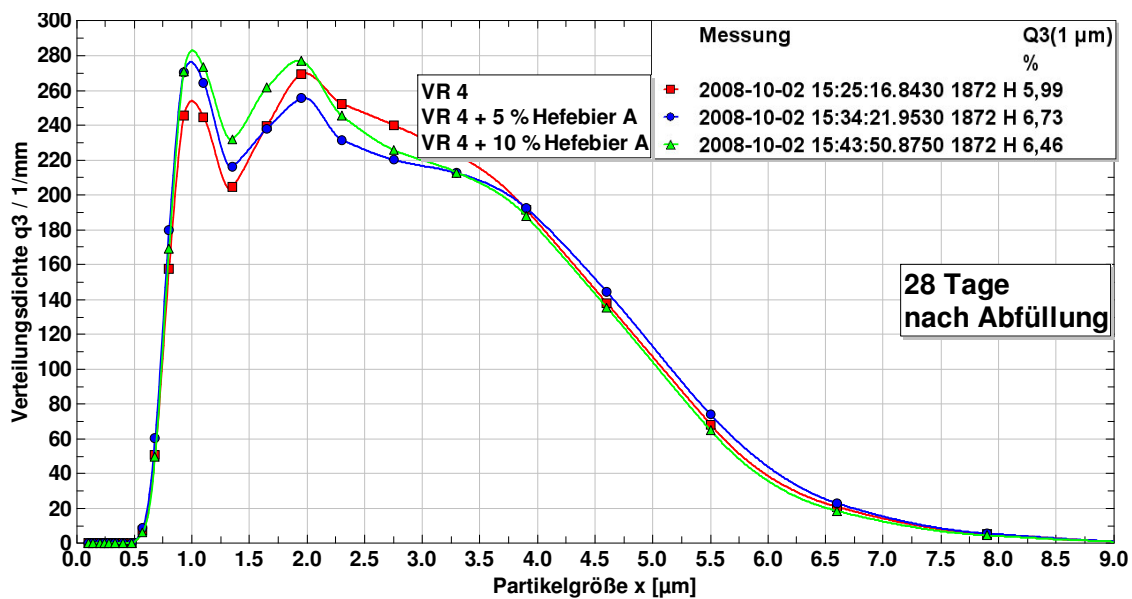


Abbildung A 4.8.4: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 4, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 28 Tage nach Abfüllung

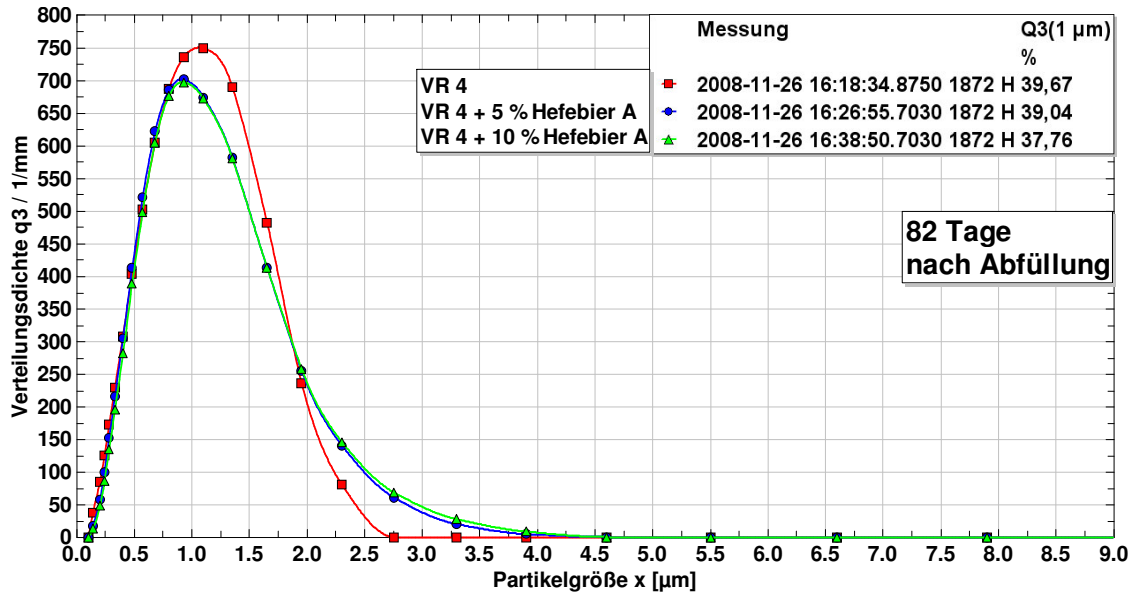


Abbildung A 4.8.5: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 4, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 82 Tage nach Abfüllung

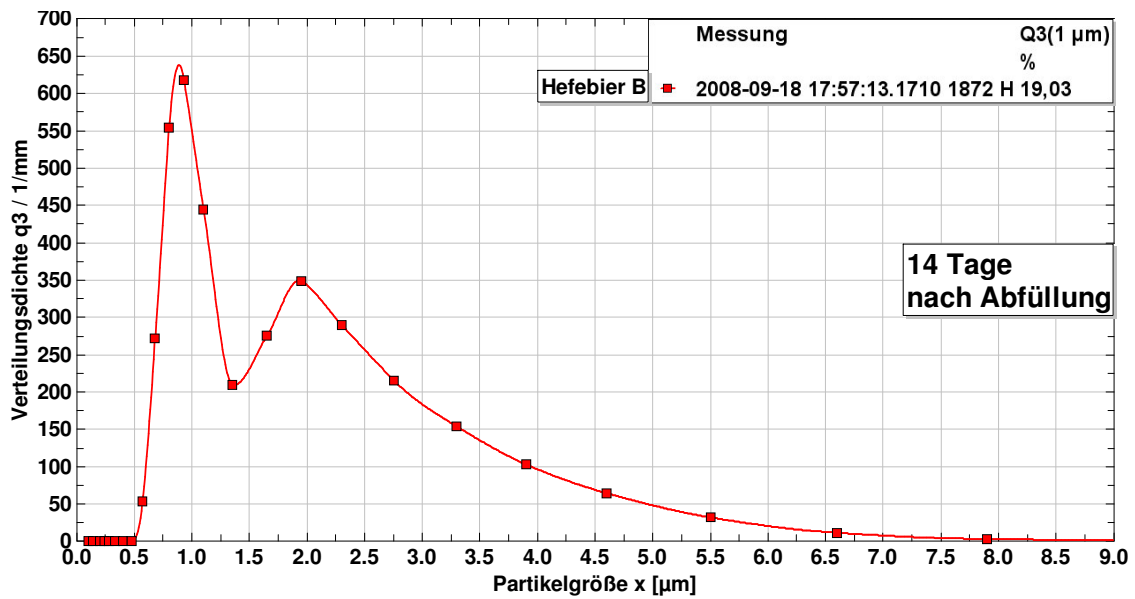


Abbildung A 4.8.6: Partikelgrößenverteilungen von Hefebier B, gemessen 14 Tage nach Abfüllung

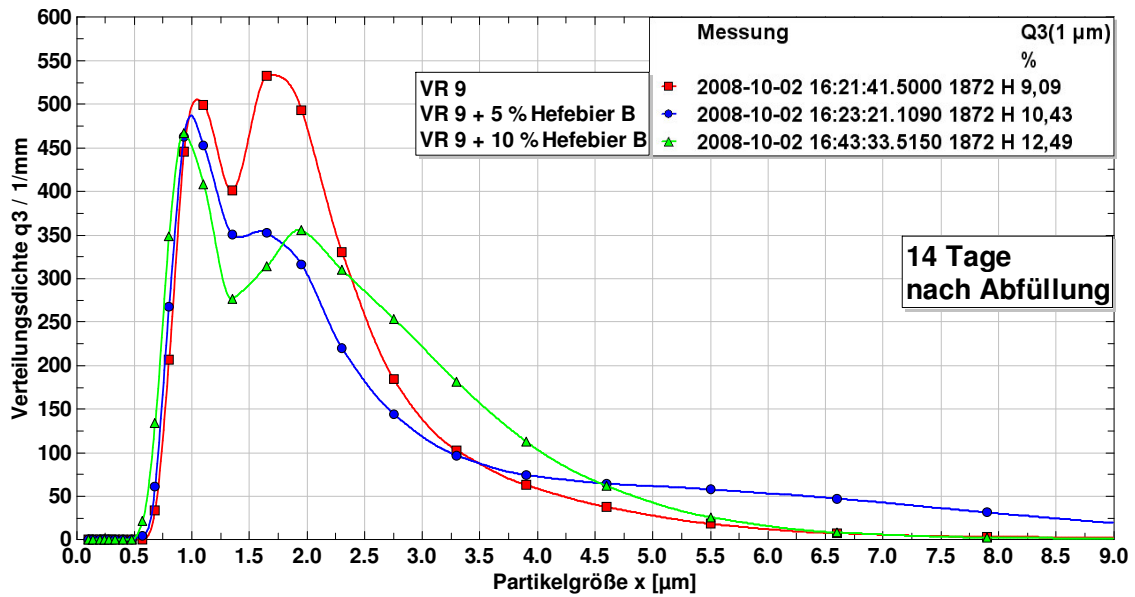


Abbildung A 4.8.7: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 9, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 14 Tage nach Abfüllung

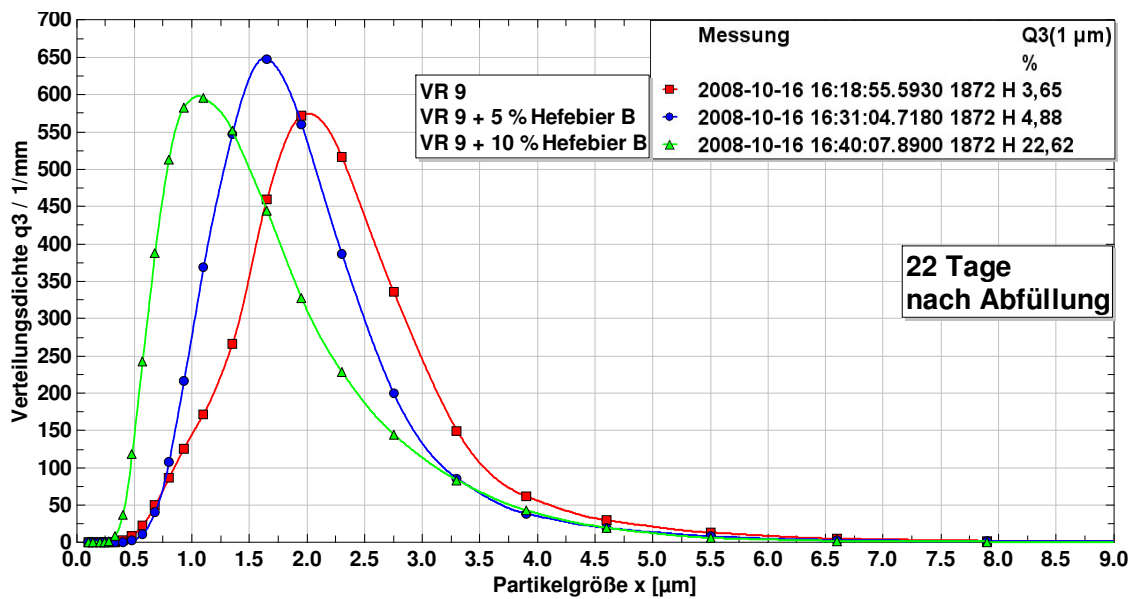


Abbildung A 4.8.9: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 9, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 22 Tage nach Abfüllung

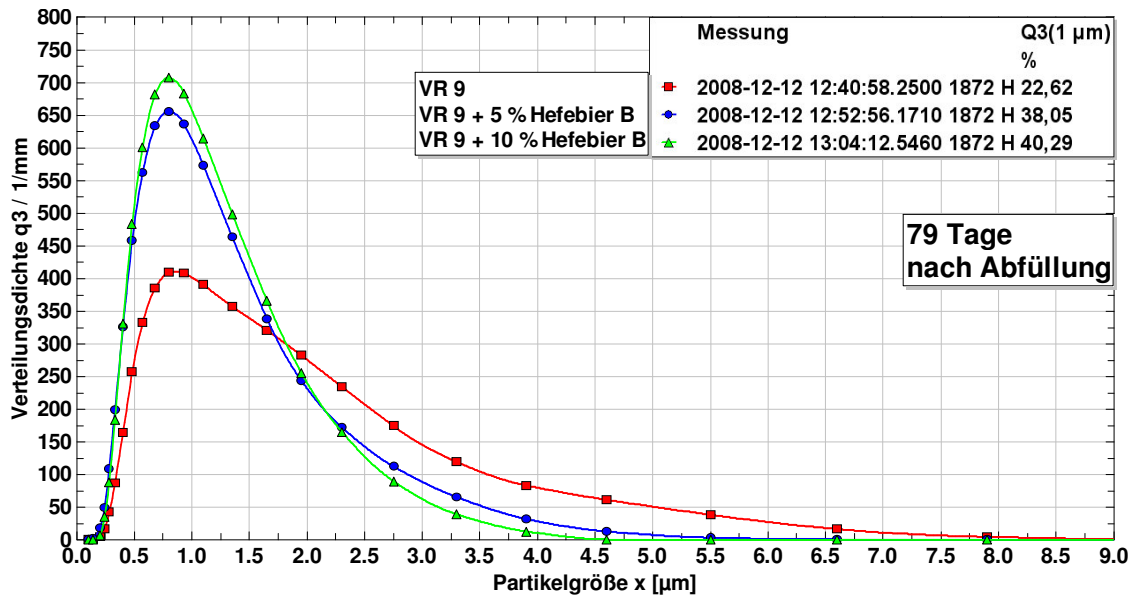


Abbildung A 4.8.10: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 9, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 79 Tage nach Abfüllung

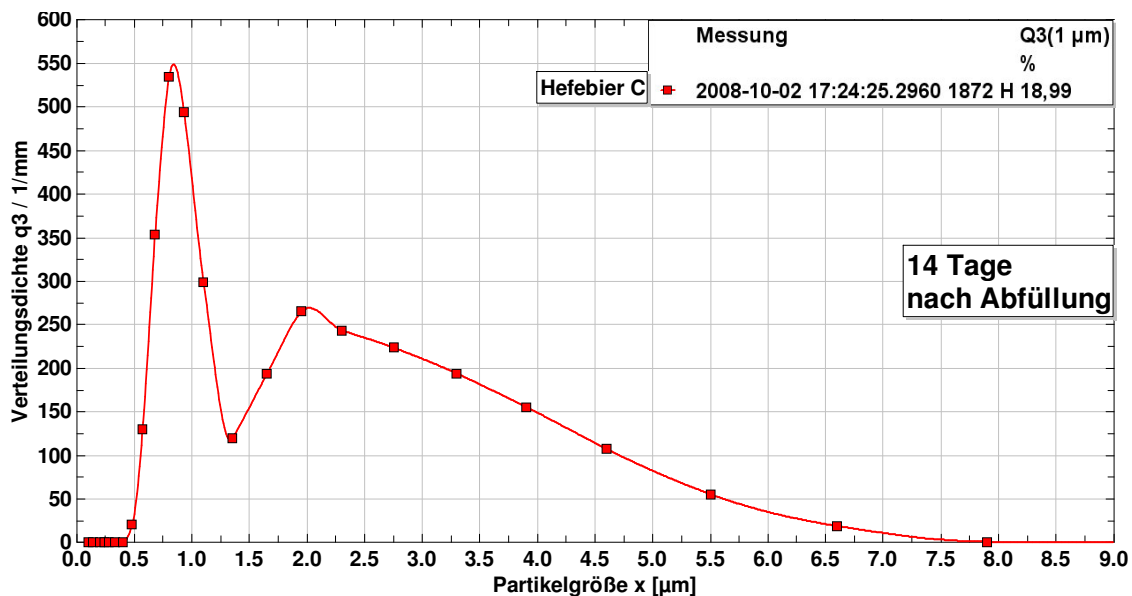


Abbildung A 4.8.11: Partikelgrößenverteilungen von Hefebier C, gemessen 14 Tage nach Abfüllung

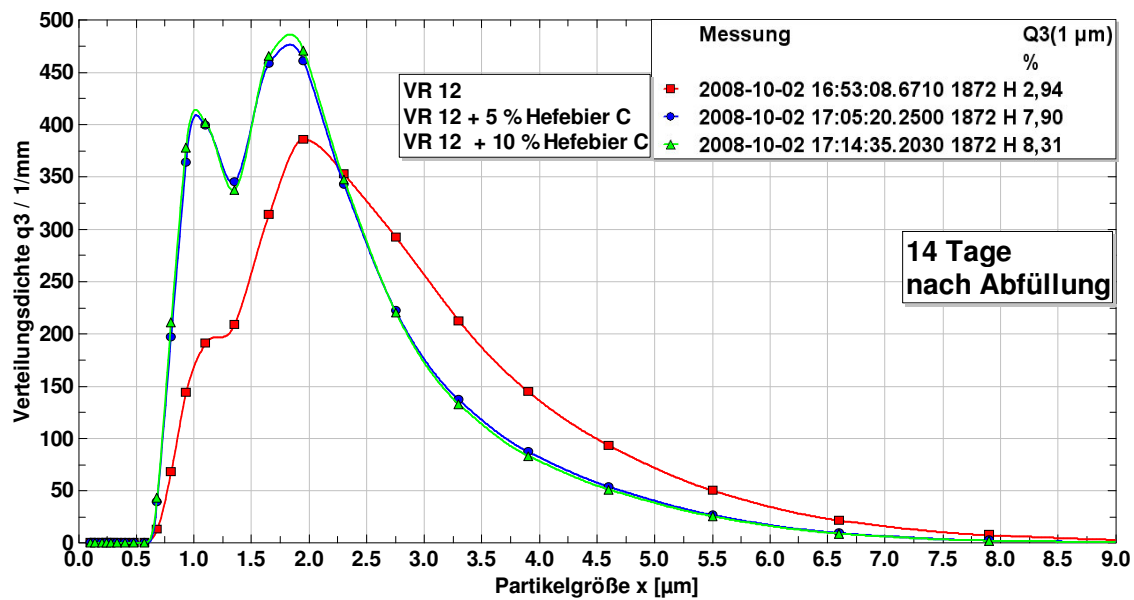


Abbildung A 4.8.12: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 12, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 14 Tage nach Abfüllung

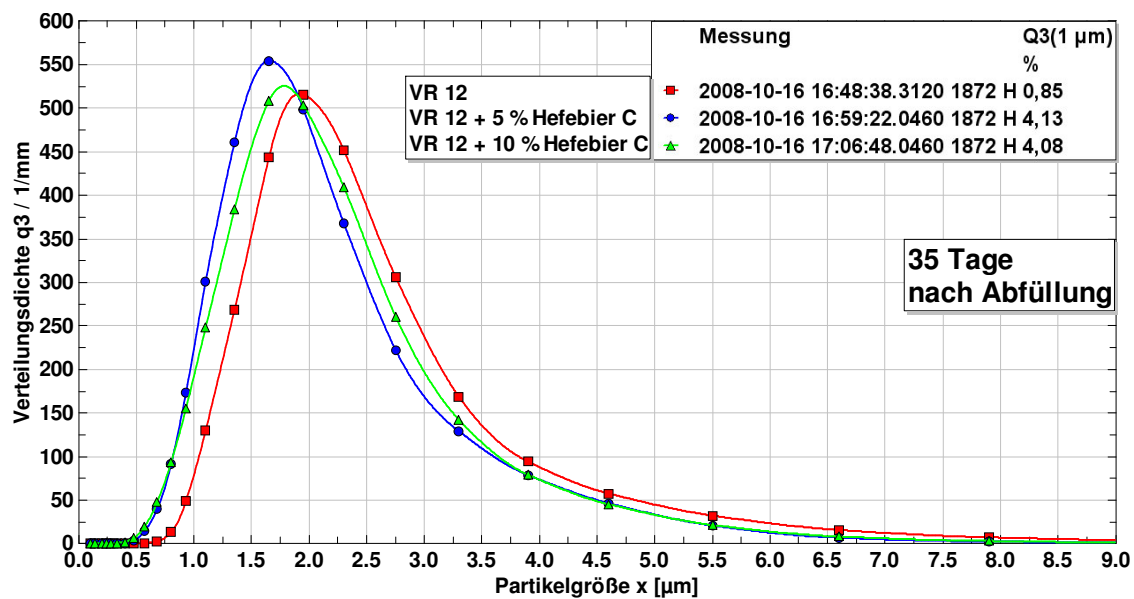


Abbildung A 4.8.13: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 12, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 35 Tage nach Abfüllung

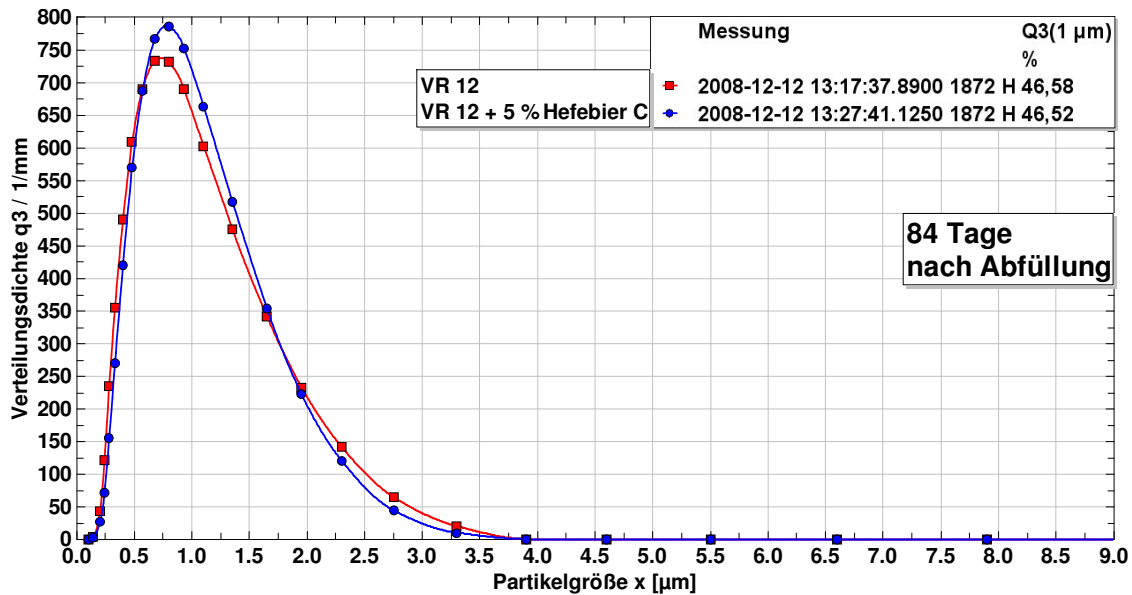


Abbildung A 4.8.14: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 12, ohne und mit 5 %, gemessen 84 Tage nach Abfüllung

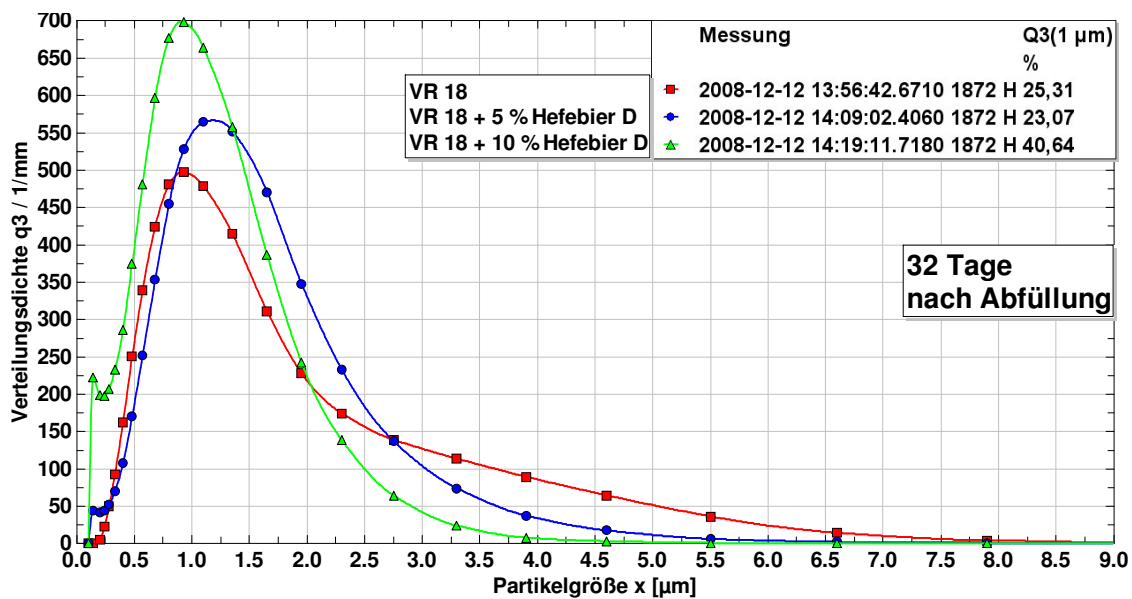


Abbildung A 4.8.15: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 18, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 32 Tage nach Abfüllung

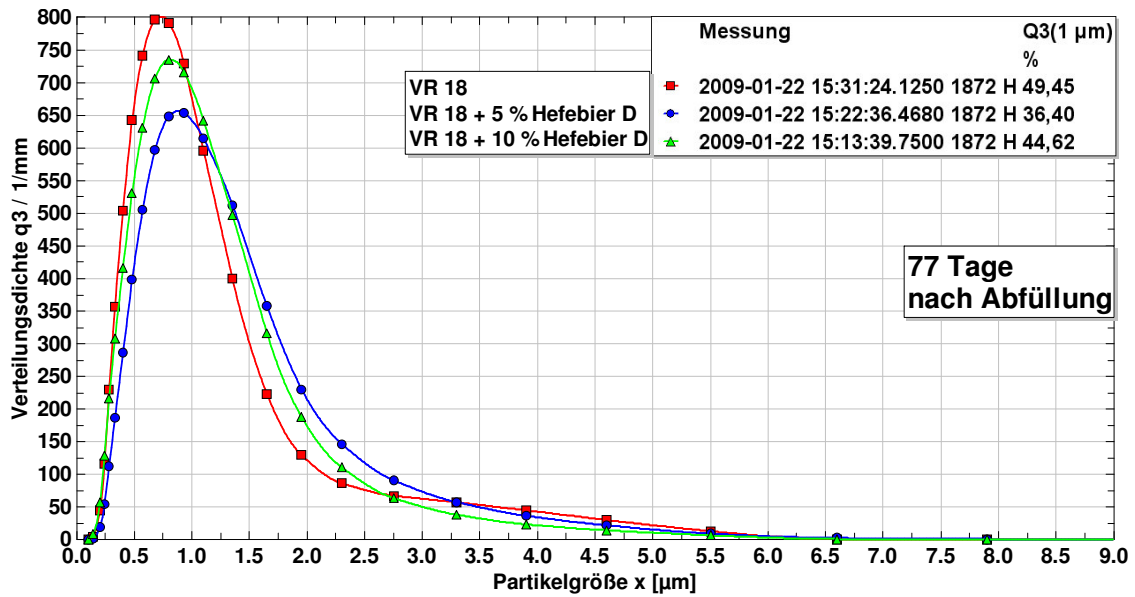


Abbildung A 4.8.15: Partikelgrößenverteilungen der Probe VR 18, ohne, mit 5 % und 10 % Hefebieranteil, gemessen 77 Tage nach Abfüllung

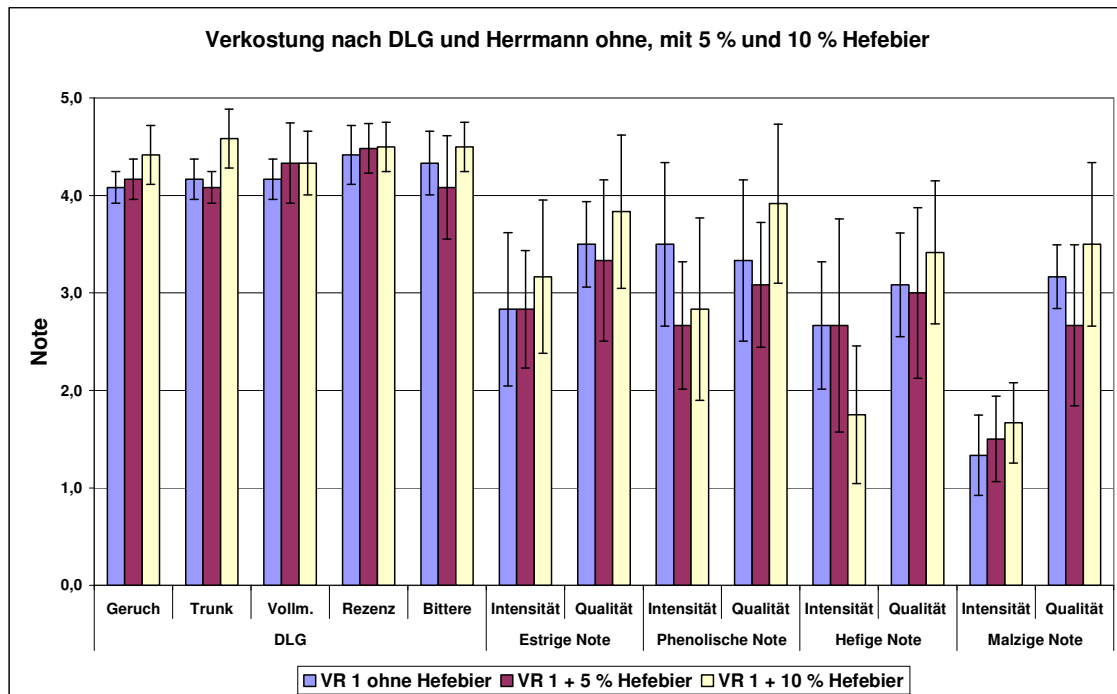


Abbildung A 4.8.16: Sensorische Bewertung der Weizenbierprobe VR 1 ohne, mit 5 und 10 % Hefebieranteil nach DLG und HERRMANN

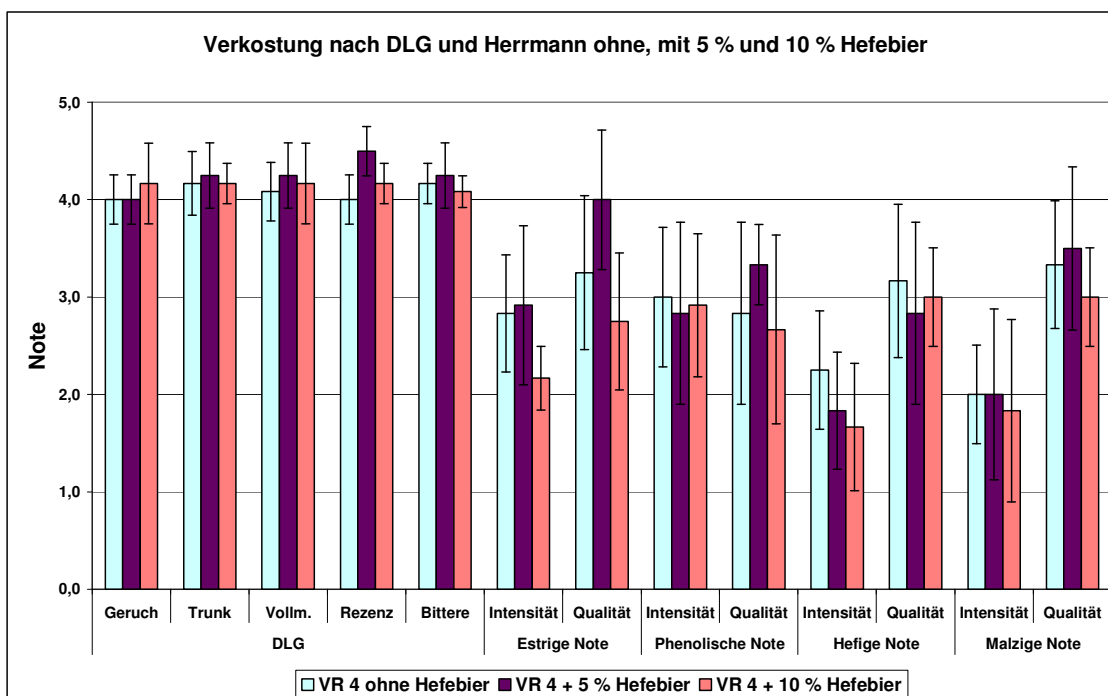


Abbildung A 4.8.17: Sensorische Bewertung der Weizenbierprobe VR 4 ohne, mit 5 und 10 % Hefebieranteil nach DLG und HERRMANN

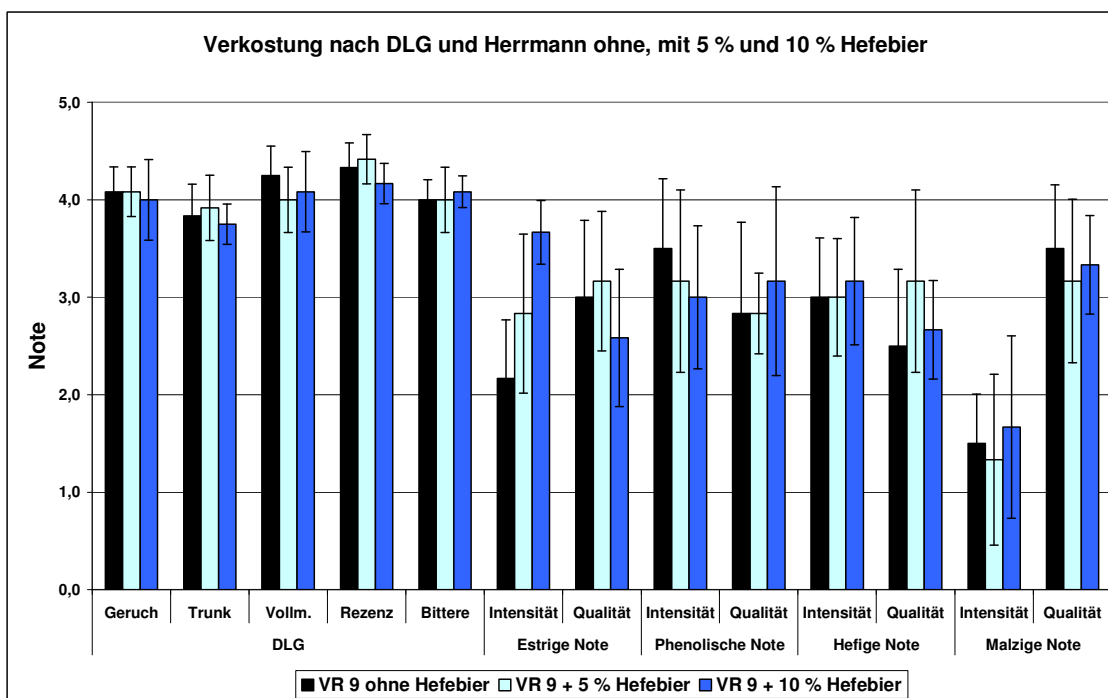


Abbildung A 4.8.18: Sensorische Bewertung der Weizenbierprobe VR 9 ohne, mit 5 und 10 % Hefebieranteil nach DLG und HERRMANN

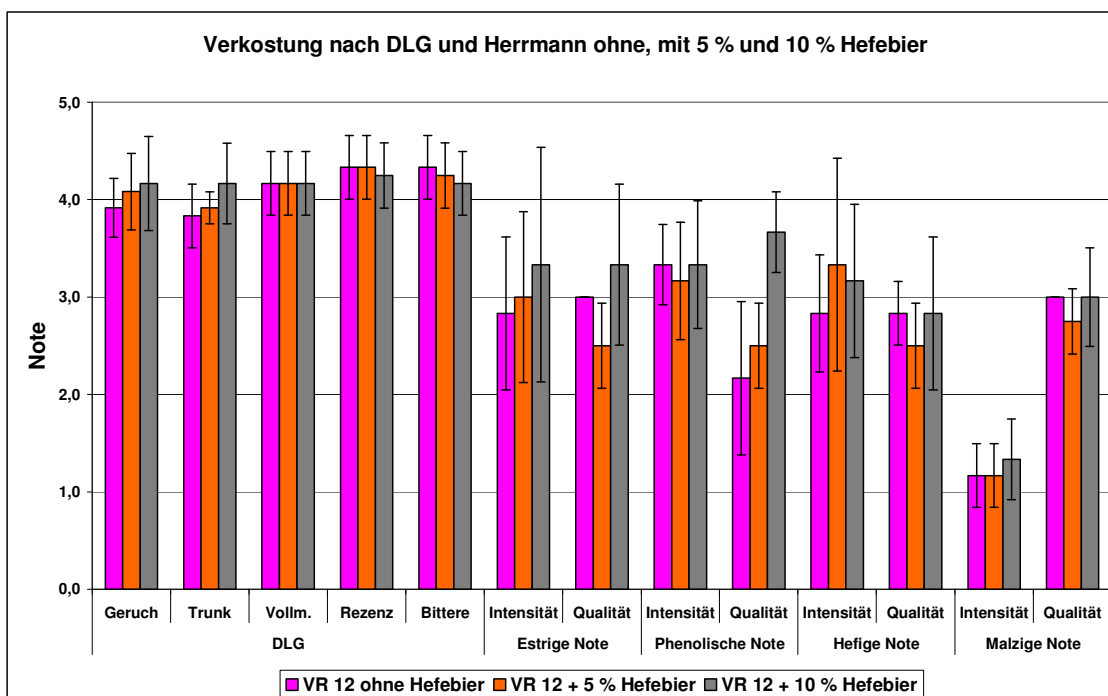


Abbildung A 4.8.19: Sensorische Bewertung der Weizenbierprobe VR 12 ohne, mit 5 und 10 % Hefebieranteil nach DLG und HERRMANN

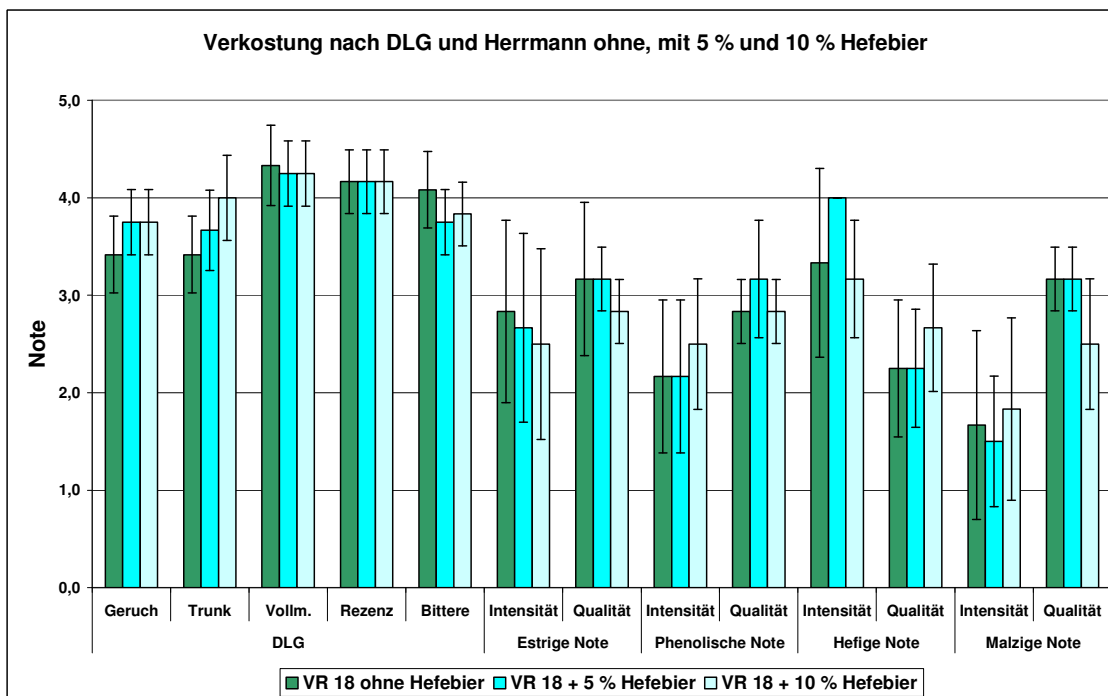


Abbildung A 4.8.20: Sensorische Bewertung der Weizenbierprobe VR 18 ohne, mit 5 und 10 % Hefebieranteil nach DLG und HERRMANN

Lebenslauf

Name: Cem Schwarz
Geburtstag: 20. Januar 1975
Geburtsort: München
Staatsangehörigkeit: Deutsch

Bildung und Werdegang

Seit Jan 11 Projektmanager bei PALL GmbH in Bad Kreuznach/Germany
Abt. Technical and Process Services im Bereich
Filtrationstechnologie

Sep 08–Apr 09 Leitung des Bierlabors am Lst. für Technologie der Brauerei I (bis
04/2009 Lst. für Brau- und Getränketechnologie).

Jan 05–Jul 10 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Brau- und
Getränketechnologie, TU München-Weihenstephan, Prof. T.
Becker (bis 04/2009 Lehrstuhl für Technologie der Brauerei I,
Prof. W. Back).
Promotionsthema:
„Einflussfaktoren auf die kolloidale Stabilität von Weizenbier“.
Abschluss der Promotion voraussichtlich im Juni 2010.

May 04–Nov 04 Diplomarbeit: „Einfluss von Bierinhaltsstoffen auf die Cross Flow
Membranfiltration von Lagerbier“;
in Zusammenarbeit mit NORIT P. T., Enschede/NL und der
Oettinger Brauerei in D-86732 Oettingen.

Nov 99–Nov 04 Technische Universität München-Weihenstephan:
Studium der Brau- und Getränketechnologie mit Abschluss
Dipl.-Ing. (Note: 2,1).

Nov 97–May 98 Praktikum in der Brauerei Maisach in D-82216 Maisach.

Sep 96–Okt 97 Zivildienst im mobilen sozialen Hilfsdienst (MSHD), Rotes Kreuz
München.

Sep 87–Jun 96 Gymnasium Landschulheim Schloss Ising am Chiemsee ,
D-83339 Ising, mit Abschluss der allgemeinen Hochschulreife
(Abitur).