

Staatliche Brautechnische Prüf- und Versuchsanstalt

Technische Universität München

Ein neuartiges Kochsystem auf Basis der Dünnschicht-Verdampfung

Matthias Weinzierl

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

**Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. E. Geiger
Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing.habil. H. Miedaner
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. K. Sommer
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing.habil. A. Delgado

Die Dissertation wurde am 25.11.2004 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 25.01.2005 angenommen.

Vorbemerkungen und Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in der Zeit von Juli 1998 bis Oktober 2004 am Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München an der Staatlichen Brautechnischen Prüf- und Versuchsanstalt in Freising – Weihenstephan durchgeführt.

An erster Stelle möchte ich mich bei Professor Heinz Miedaner bedanken, ohne den diese Arbeit nicht zu Stande gekommen wäre. Er hat durch seine Geduld, die wertvollen Tipps und Anregungen zu guter Letzt entscheidend zum Gelingen beigetragen.

Ebenso möchte ich mich bei allen Mitarbeitern der Staatlichen Brautechnischen Prüf- und Versuchsanstalt bedanken, die des öfteren mit einer Flut von Proben überschwemmt wurden und trotzdem Ruhe bewahrt haben.

Mein besonderer Dank gilt Klaus Wasmuht, meinem jetzigen Vorgesetzten, der durch eine seiner unzähligen, teilweise auch gewagten Ideen alles erst möglich gemacht hat. Auch Dr. Stippler hat sehr durch seine Ruhe, sein immer offenes Ohr für Fragen und seine enorme Fachkenntnis entscheidende Hilfe geleistet. Herrn Königer, dem Geschäftsführer der Anton Steinecker Maschinenfabrik, gebührt ebenfalls großer Dank, denn er macht schließlich den Weg frei, dass die Ideen von Klaus Wasmuht auch in der Praxis zum Einsatz kommen. Dank auch unserem Werksleiter Herrn Zilker, der auch immer wieder dazu beiträgt unmögliches möglich zu machen.

Großer Dank geht an Benno Emslander, den Merlin-Pionier, und Erwin Meyer, den Braumeister der Brauerei Hofmühl. Ohne die Brauerei Hofmühl als Partner hätte es die Merlin-Kochung nicht gegeben, und diese Arbeit wäre nicht zu Stande gekommen. Dank auch an alle Mitarbeiter der Brauerei Hofmühl, die stets eine wertvolle Unterstützung waren und vieles in Kauf nehmen mussten.

Bei der Brauerei Scherdel Hof gilt mein Dank vor allem Berend Vasel und Franz Stettner. Auch hier gab es nahezu grenzenlose Unterstützung, und ich konnte ebenfalls viele Versuche durchführen. Den Biersiedern der Brauerei Scherdel möchte ich ebenfalls für ihr Engagement und ihre Aufgeschlossenheit der neuen Kochung gegenüber danken.

Bei der Brauerei Bofferding bedanke ich mich vor allem bei Peter Wagner, Maurice Treinen und Manfred Brengel, bei denen ich immer ein offenes Ohr für neue Versuchsreihen fand und die durch ihre Unterstützung sehr zum Gelingen dieser

Arbeit beigetragen haben. Mein Dank gilt aber auch hier der Sudhauscrew, die durch mich und meine Versuche doch einige graue Haare bekommen hat.

Ebenfalls möchte ich mich bei den Diplomanden bedanken, die im Rahmen des Merlin-Projektes viele wichtige Arbeit geleistet haben. Allen voran gilt mein Dank hier Burchard Neuhaus und Torben Bösch, die mittlerweile zu sehr geschätzten Kollegen geworden sind. Doch auch Stefan Brey, Rupert Dantscher und René Gröger gilt mein Dank.

Mit der größte Dank richtet sich jedoch an meine Mutter, die sich nahezu unermüdlich beim Korrekturlesen durch diese Arbeit gebissen hat. Wenn man ein und dasselbe immer wieder aufs Neue nach Fehlern durchsucht, braucht man schon ein großes Stehvermögen, auch weil ich es ihr mit Sicherheit nicht immer leicht gemacht habe.

Dank auch an meine Frau Sonja, die doch an einigen Abenden und Urlaubstagen auf mich verzichten musste. Es war nicht immer leicht, diese Arbeit neben dem normalen beruflichen Alltag fertig zu stellen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	X
1 Einleitung und Zielsetzung	1
1.1 Vorwort	1
1.2 Problemstellung	2
2 Aufgaben der Würzekochung und Stand der Technik	3
2.1 Die Aufgaben der Würzekochung	3
2.1.1 Physikalische Prozesse.....	3
2.1.1.1 Verdampfen von Wasser.....	3
2.1.1.2 Lösung der Hopfenbestandteile	3
2.1.1.3 Austreiben unerwünschter Aromastoffe	3
2.1.2 Chemische Prozesse.....	4
2.1.2.1 Denaturierung und Koagulation des Eiweißes	4
2.1.2.2 Isomerisierung der Hopfenbitterstoffe.....	4
2.1.2.3 Inaktivierung der Enzyme und Sterilisierung der Würze	5
2.1.2.4 Absenken des pH-Wertes	5
2.1.2.5 Bildung von Farb- und Aromastoffen.....	5
2.1.2.6 Bildung reduzierender Substanzen	5
2.2 Stand der Technik	6
2.2.1 Alte Würzpfannen	6
2.2.1.1 Direkt beheizte Pfannen.....	6
2.2.1.2 Indirekt beheizte Systeme.....	7
2.2.1.3 Heizflächeneinbauten in der Pfanne	9
2.2.1.4 Rechteckpfannen.....	10
2.2.1.5 Die Hochtemperaturwürzekochung.....	10
2.2.2 Moderne Kochsysteme.....	11
2.2.2.1 Systeme mit Innenkocher	11
2.2.2.2 Niederdruckkochung (NDK)	12
2.2.2.3 Systeme mit Außenkocher	13
2.2.3 Maßnahmen zur Verringerung des Energieeinsatzes.....	13
2.2.3.1 Pfannendunstkondensator (PfaDuKo)	13
2.2.3.2 Brüdenverdichtung	14
2.2.3.3 Energiespeichersysteme.....	14
2.2.3.4 Einrichtungen zum Strippen der Würze	15

2.3	Theorie des Wärmeübergangs und der Verdampfung	15
2.3.1	Heizboden des DSVD	15
2.3.2	Grundlagen der Wärmeübertragung	16
2.3.2.1	Wärmestrom	16
2.3.2.2	Wärmeübergang auf der Dampfseite	17
2.3.3	Auswirkungen von Verschmutzungen auf den Wärmeübergang	19
2.3.3.1	Mechanismen des Fouling	19
2.3.3.1.1	Kristallisationsfouling	19
2.3.3.1.2	Partikelfouling	20
2.3.3.1.3	Fouling durch chemische Reaktionen	20
2.3.3.1.4	Korrosionsfouling	20
2.3.3.1.5	Biofouling	20
2.3.3.1.6	Gemischtes Fouling	20
2.3.3.2	Vorgang des Fouling	20
2.3.3.2.1	Initial- oder Verzögerungsphase	20
2.3.3.2.2	Stofftransport	21
2.3.3.2.3	Ablagerungsbildung	21
2.3.3.2.4	Abtragung	21
2.3.3.2.5	Alterung der Ablagerungen	21
2.3.3.3	Foulingwiderstand	21
2.3.4	Beschreibung der Foulingvorgänge	22
2.3.4.1	Lineares Fouling	22
2.3.4.2	Abnehmendes Foulingverhalten	22
2.3.4.3	Asymptotisches Fouling	23
2.3.4.4	Ablagerungsbildung beim Blasensieden	23
2.3.4.5	Fouling mit dem DSVD	24
2.3.5	Homogenität des Pfanneninhaltes	26
2.3.6	Auswirkungen von überhitztem Dampf	28
2.3.7	Verteilung des Heizdampfes	28
3	Analytische Werte und deren Bedeutung im Brauprozess	30
3.1	Probenahme	30
3.1.1	Abweichende Probenahme bei Kühlmitte	30
3.1.1.1.1	Konventionelle Systeme	30
3.1.1.1.2	Dünnschichtverdampfer	30
3.1.2	Ablauf der Probenahme	31

3.2	Durchgeführte Untersuchungen an Würzen.....	31
3.2.1	Konventionelle Würzeanalysen	31
3.2.1.1	Umrechnung der Analysenwerte auf 12 %	31
3.2.1.2	Berechnung der Verdampfung über den Extrakt	32
3.2.1.3	pH-Wert	32
3.2.1.4	Farbe	33
3.2.1.5	Gesamtlöslicher Stickstoff.....	33
3.2.1.6	Noch koagulierbarer Stickstoff.....	33
3.2.1.7	Freier Aminostickstoff.....	34
3.2.1.8	MgSO ₄ -fällbarer Stickstoff.....	34
3.2.1.9	DMS-Precursor und freies DMS	34
3.2.1.10	Bitterstoffe, Iso- α - und α -Säure	35
3.2.1.11	Thiobarbitursäurezahl (TBZ).....	35
3.2.1.12	Reduktionsvermögen	35
3.2.1.13	Jodprobe.....	35
3.2.1.14	Feststoffe.....	35
3.2.1.15	Trübungsmessung	36
3.2.2	Sonderanalytik bei Würzen.....	36
3.2.2.1	Bestimmung der vergärbaren Zucker	36
3.2.2.2	Bestimmung des Aminosäurespektrums.....	36
3.2.2.3	Bestimmung der Würzearomastoffe	37
3.2.2.4	Ausgewählte Aromastoffe	37
3.2.2.4.1	2-me-Butanal und 3-me-Butanal	38
3.2.2.4.2	Methional	38
3.2.2.4.3	Benzaldehyd.....	38
3.2.2.4.4	2-Phenylethanal	39
3.2.2.4.5	Pentanal.....	39
3.2.2.4.6	2-Pentanon	39
3.2.2.4.7	Hexanal	39
3.2.2.4.8	Heptanal	39
3.2.2.4.9	tr-2-cis-6-Nonadienal.....	39
3.2.2.4.10	2-Furfural	39
3.2.2.4.11	2-ac-Furan.....	40
3.2.2.4.12	γ -Nonalacton.....	40
3.2.2.4.13	2-me-Butanol und 3-me-Butanol	40
3.2.2.4.14	1-Pentanol	40
3.2.2.4.15	1-Hexanol.....	40
3.2.2.4.16	1-Octanol	40
3.2.2.4.17	Phenyl-OH	40

3.3	Bieranalysen	40
3.3.1	Konventionelle Analytik.....	40
3.3.1.1	Endvergärungsgrad.....	40
3.3.2	Schaumbestimmung nach Ross & Clark und nach NIBEM.....	41
3.3.2.1	Forciertest.....	41
3.3.2.2	Verkostung	41
3.3.3	Sonderanalytik	41
3.3.3.1	Bieraromastoffe	41
3.4	Sonstige erfasste Werte	41
3.4.1	Erfassung der Brüdenkondensatmenge.....	41
3.4.2	Erfassung der Dampfmenge	42
3.4.3	Erfassung der Dampfkondensatmenge	42
3.5	Statistische Auswertung der Messergebnisse	42
3.5.1	Mittelwert	42
3.5.2	Standardabweichung.....	43
3.5.3	Konfidenzintervall des Mittelwertes.....	43
3.5.4	Wahrer Wert	43
4	Beschreibung des Verfahrens und der untersuchten Anlagen	45
4.1	Verfahren der Würzekochung mit Dünnschichtverdampfer	45
4.1.1	Aufheizen	45
4.1.2	Kochen	46
4.1.3	Whirlpoolrast	46
4.1.4	Strippen	47
4.1.5	Hopfungabe	48
4.2	Beschreibung der untersuchten Anlagen	49
4.2.1	Pilotanlage 1 + 2	49
4.2.2	Erste industrielle Anlage für 110 hl Ausschlagwürze	49
4.2.3	DSVD-System für 160 hl mit Läuterwürzeerhitzung – Vergleichskochung alte Kupferpfanne	51
4.2.4	Anlage für 250 hl mit Whirlpoolpfanne mit Innenkocher als Sammelgefäß	52
5	Versuchsdurchführung	54
5.1	Versuche mit Pilotanlagen	54
5.1.1	Kennzahlen der Pilotanlage	54
5.1.2	Vorversuche	54
5.1.3	Versuche zum Brauen mit hoher Stammwürze	55
5.2	Versuche mit der ersten Industrieanlage	55
5.2.1	Vergleich mit Innenkochsystem	55
5.2.2	Versuche zur Bestimmung der eingesetzten Energiemenge.....	56

5.3	Anlage mit Läuterwürzeerhitzer für 160 hl/Sud	56
5.3.1	Vergleichssude DSVD-System mit einer klassischen offenen Kupferpfanne	56
5.3.2	Versuche zur minimal notwendigen Gesamtverdampfung.....	59
5.4	Vergleich DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich konventioneller Analytik und Würzearomastoffen.....	62
5.4.1	Ablauf der Versuche	62
5.4.2	Kochung mit Innenkocher.....	62
5.4.3	Kochung mit dem DSVD-System.....	62
5.5	Vergleich DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich Gärung, Lagerung und Filtration	63
5.5.1	Ablauf der Versuche	63
5.5.1.1	Gärung und Lagerung der Biere	63
5.5.1.2	Filtration	64
6	Versuchsergebnisse und deren Diskussion.....	65
6.1	Ergebnisse der Vorversuche mit der Pilotanlage.....	65
6.1.1	Extrakt und Gesamtverdampfung	65
6.1.2	Stickstoffverhältnisse	66
6.1.3	Thiobarbitursäurezahl	66
6.1.4	Freies DMS und DMS-P	67
6.1.5	Ergebnisse der Biere	68
6.2	Ergebnisse der Versuche zum Brauen mit hoher Stammwürze	68
6.2.1	Extrakt und Verdampfung.....	68
6.2.2	pH-Wert	69
6.2.3	Farbe nach EBC	69
6.2.4	Stickstoffverhältnisse	70
6.2.4.1	Freier Aminostickstoff.....	70
6.2.4.2	Noch koagulierbarer Stickstoff.....	70
6.2.4.3	Gesamtlöslicher Stickstoff.....	70
6.2.5	Thiobarbitursäurezahl	71
6.2.6	Freies DMS und DMS-P	71
6.2.7	Verhalten der Würzearomastoffe bei der Kochung	72
6.2.7.1	2-me-Butanal und 3-me-Butanal	72
6.2.7.2	Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal	73
6.2.7.3	Summe der Streckeraldehyde	74
6.2.7.4	Pentanal und 2-Pentanon	74
6.2.7.5	Hexanal und Heptanal.....	75
6.2.7.6	tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton	76
6.2.7.7	2-Furfural und 2-ac-Furan	76
6.2.7.8	2-me-Butanol und 3-me-Butanol.....	77

6.2.7.9	1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol	78
6.2.7.10	Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon.....	79
6.2.7.11	Terpineol, Linalool, Nerol und Geraniol.....	80
6.3	Ergebnisse der ersten industriellen Anlage.....	82
6.3.1	Extrakt und Gesamtverdampfung.....	82
6.3.2	Noch koagulierbarer Stickstoff.....	82
6.3.3	Thiobarbitursäurezahl	83
6.3.4	Freies DMS und DMS-P.....	83
6.4	Ergebnisse des Vergleichs DSVD mit klassischer Kupferpfanne	84
6.4.1	Extrakt und Gesamtverdampfung.....	84
6.4.2	Farbe und Thiobarbitursäurezahl.....	85
6.4.3	Stickstoffverhältnisse.....	85
6.4.4	DMS und DMS-P	86
6.4.5	Bitterstoffe	87
6.4.6	Scheinbarer Extrakt und Vergärungsgrad.....	88
6.4.7	Analyse der Biere zu Variationen bei der Kochung.....	89
6.4.7.1	Ergebnisse der Doppelsude mit erhöhtem Münchner Malz-Anteil	89
6.4.7.2	Nachträgliche Hopfung mit Pellets vor der Würzekühlung	89
6.4.7.3	Nachträgliche Hopfung mit Extrakt vor der Würzekühlung	90
6.5	Ergebnisse der Ermittlung der minimal notwendigen Gesamtverdampfung...90	
6.5.1	Verdampfung	90
6.5.2	Verhalten der Würzearomastoffe bei der Kochung.....	91
6.5.2.1	2-me-Butanal und 3-me-Butanal	91
6.5.2.2	Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal.....	92
6.5.2.3	Summe der Streckeraldehyde	92
6.5.2.4	Pentanal, 2-Pentanon, Hexanal und Heptanal	93
6.5.2.5	tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton	94
6.5.2.6	2-Furfural und 2-ac-Furan	95
6.5.2.7	2-me-Butanol und 3-me-Butanol.....	95
6.5.2.8	1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol	96
6.5.2.9	Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon.....	97
6.5.2.10	Geraniol	97
6.5.3	Vergleich der Bieranalysen.....	98
6.5.3.1	Ergebnisse der verbalen Verkostung.....	98
6.5.3.2	Auswertung der Alterungskomponenten.....	99

6.6 Ergebnisse des Vergleichs DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich Gärung, Lagerung und Filtration	99
6.6.1 Würzeanalysen	100
6.6.1.1 Gesamtverdampfung und Extraktgehalt	100
6.6.1.2 pH-Wert	100
6.6.1.3 EBC-Bittereinheiten	101
6.6.1.4 Farbe	102
6.6.1.5 Feststoffe und Trübung.....	103
6.6.1.6 Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen	105
6.6.1.7 DMS-P und freies DMS.....	105
6.6.1.8 Thiobarbitursäurezahl	106
6.6.1.9 Noch koagulierbarer Stickstoff.....	107
6.6.1.10 Zusammensetzung der vergärbaren Kohlenhydrate	108
6.6.1.11 Zusammensetzung des Aminosäurespektrums	108
6.6.1.12 Vitaminausstattung der Würzen.....	110
6.6.2 Verlauf und Analyse der Gärung	110
6.6.2.1 Temperaturverlauf	111
6.6.2.2 Extraktabnahme	111
6.6.2.3 Abbau von Diacetyl	112
6.6.2.4 Hefezellzahl	114
6.6.2.5 pH-Abfall	115
6.6.2.6 Farbaufhellung	115
6.6.3 Filtration	116
6.6.4 Bieranalyse	118
6.6.4.1 Alkoholgehalt und Ausstoßvergärungsgrad	118
6.6.4.2 Bierschaum	118
6.6.4.3 Anthocyanogene und Polyphenole	119
6.6.4.4 Gärungsnebenprodukte	121
6.6.5 Verkostung	122
6.7 Ergebnisse des Vergleichs DSVD mit Innenkocher hinsichtlich der Würzearomastoffe	123
6.7.1 Konventionelle Analytik.....	124
6.7.2 Verhalten der Würzearomastoffe bei der Kochung	124
6.7.2.1 2-me-Butanal und 3-me-Butanal	124
6.7.2.2 Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal	125
6.7.2.3 Summe der Streckeraldehyde	126
6.7.2.4 Pentanal und 2-Pentanon	126
6.7.2.5 Hexanal und Heptanal.....	127
6.7.2.6 tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton	128

6.7.2.7	2-Furfural und 2-ac-Furan	128
6.7.2.8	2-me-Butanol und 3-me-Butanol.....	129
6.7.2.9	1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol	130
6.7.2.10	Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon.....	131
6.7.3	Fazit der Auswertung der Würzearomastoffe.....	131
7	Zusammenfassung und Ausblick	132
7.1	Zusammenfassung	132
7.2	Ausblick.....	133
8	Summary and Prospects	135
8.1	Summary	135
8.2	Prospects.....	136
9	Literaturverzeichnis	138
10	Anhang.....	145
10.1	Vorversuche mit der Pilotanlage.....	145
10.1.1	Analysen der Vergleichskochung.....	145
10.1.2	Analysen mit der Pilotanlage.....	147
10.2	Versuche mit dem DSVD-System zum Brauen mit hoher Stammwürze	150
10.2.1	Sude mit konventioneller Kochung	150
10.2.2	Versuche mit dem DSVD-System mit normaler Verdampfung.....	153
10.2.3	Versuche mit dem DSVD-System mit reduzierter Verdampfung	158
10.3	Versuche mit der ersten Anlage im industriellen Maßstab	163
10.3.1	Analysen mit der Maisch-Würze-Pfanne.....	163
10.3.2	Analysen mit dem DSVD-System	165
10.4	Vergleich DSVD-System mit LWE für 160 hl AW mit klassischer Kupfer-Hochleistungspfanne	167
10.4.1	Einstellungen und Analysen der ersten Versuchsreihe mit dem DSVD-System	167
10.4.2	Analysen der Sude mit der Hochleistungspfanne.....	170
10.4.3	Analysen der Sude mit dem DSVD-System – 1. Versuchsreihe.....	172
10.4.4	Analysen der Sude mit dem DSVD-System – 2. Versuchsreihe.....	175
10.4.5	Analysen der Sude mit dem DSVD-System – Variation der Kochparameter	178
10.4.6	Bieranalysen	180
10.4.6.1	Analysen der konventionellen Kochung	180
10.4.6.2	Analysen der ersten DSVD-Reihe.....	181
10.4.6.3	Analysen der zweiten DSVD-Reihe.....	181
10.4.6.4	Analysen der Biere mit extra Hopfung nach Stripper	182
10.4.6.5	Sondersude	183

10.4.7 Analysen der Versuche zur Ermittlung der minimal notwendigen Gesamtverdampfung	183
10.4.7.1 Analysen der Versuche mit normaler Verdampfung	183
10.4.7.2 Versuche mit reduzierter Verdampfung	188
10.4.7.3 Bieranalysen zu Verdampfungsversuchen	192
10.4.7.4 Bieraromastoffe	193
10.4.7.5 Alterungskomponenten	194
10.5 Analysen zum Vergleich des DSVD-Systems mit einem Innenkocher	195
10.5.1 Analysen der Kochung mit Innenkocher	195
10.5.2 Analysen der Kochung mit DSVD-System	198
10.5.3 Auswirkungen des Kochsystems auf Würzen, Gärung und Filtration	202
10.5.3.1 Würzeanalysen der ersten Versuchsreihe	202
10.5.3.1.1 Innenkocher 1. Reihe	202
10.5.3.1.2 DSVD 1. Reihe	205
10.5.3.2 Würzeanalysen der zweiten Versuchsreihe	207
10.5.3.2.1 Innenkocher 2. Reihe	207
10.5.3.2.2 DSVD 2. Reihe	210
10.5.3.3 Bieranalysen	213
10.5.3.4 Gärungsnebenprodukte	213
Abbildungsverzeichnis	i
Tabellenverzeichnis	vii

Abkürzungsverzeichnis

µg	Mikrogramm
abs.	absolut
ARG	Arginin
Aufl.	Auflage
AW	Ausschlagwürze
BE	Bittereinheiten
bez.	bezogen auf
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
d. h.	das heißt
Dampftemp.	Dampftemperatur
DIN	Deutsche Industrienorm
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft
DMS	Dimethylsufid
DMS-P	Dimethylsulfid-Precursor
DSVD	Dünnschicht-Verdampfer
EBC	European Brewery Convention
EBC-BU	Bittereinheiten nach EBC
el.	elektrisch
EST	Energiespeichertank
fällb.	fällbar
FAN	freier Aminostickstoff
g	Gramm
GAB	γ-Amino-Buttersäure
GC	Gaschromatograph
ges.	gesamt
gesamtlösl.	gesamtlöslich
GG %	Gewichts-Gewichtsprozent
GNP	Gärungsnebenprodukte
GV	Gesamtverdampfung
GV %	Gewichts-Volumenprozent
hl	Hektoliter
HMF	Hydroxy-Methyl-Furfural
HPE	Hallertauer Perle (Hopfensorte)
HPLC	High Pressure Liquid Chromatography
HTW	Hochtemperatur-Würzekochung
IDM	induktiver Durchflussmesser
IGS	Ingenieurbüro Georg Schuh

Interv.	Intervall
ITT	Indicator Time Test
KB	Kochbeginn
KE	Kochende
KM	Kühlmitte
KM NS	Kühlmitte nach Strippen
KM VS	Kühlmitte vor Strippen
koag.	koagulierbar(er)
konv.	konventionell
k-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
LWE	Läuterwürzeerhitzer
max.	maximal
me	Methyl
MEBAK	Mitteleuropäische Brauanalysen Kommission
mg	Milligramm
min.	minimal
min	Minuten
Mittelw.	Mittelwert
MJ	Megajoule
ml	Milliliter
n.	nach
n. a.	nicht analysierbar
n. n.	nicht nachweisbar
NDK	Niederdruck-Kochung
o. V.	ohne Verfasser
P	Leistung
°P	Grad Plato
PfaDuKo	Pfannendunstkondensator
PFV	Pfanne-Voll
pH	pH-Wert
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
PVPP	Polyvinylpolypyrrolidon
R & C	Schaumbestimmung nach Ross & Clark
s	Sekunden
S7	speicherprogrammierbare Steuerung der Fa. Siemens
spez.	spezifisch
Sp.	Spuren
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung

Stabw.	Standardabweichung
TBZ	Thiobarbitursäurezahl
Temp.	Temperatur
TTE	Tettnanger Tettnanger (Hopfensorte)
V°	Vergärungsgrad
Verd.	Verdampfung
Vol.	Volumen
WAT	Wärmeaustauscher
WHP	Whirlpool
z. B.	zum Beispiel
ZHF	Horizontal-Siebfilter der Fa. Seitz-Schenk
ZKG	zylindrokönischer Gärtank
ZKL	zylindrokönischer Lagertank

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Vorwort

Oberflächlich betrachtet ist das Würzekochen ein sehr einfacher Prozess. Bei klassischen Verfahren wird die Würze ca. 75–90 Minuten bei atmosphärischem Druck gekocht. Nach der Heißtrubentfernung wird sie gekühlt, belüftet und mit Hefe versetzt. Im Verlauf der Kochung wird noch der Hopfen zugesetzt, um dem Bier Bittere und ein feines Aroma zu verleihen.

Näher betrachtet ist die Würzekochung aber ein sehr komplexes Gebiet, das einen sehr großen Einfluss auf die Qualität der Biere hat. Der Brauer steht dabei vor einem Dilemma. Er muss einerseits die Würze für eine bestimmte Zeit heiß halten und eine große Wassermenge verdampfen, denn nur so laufen die wichtigen chemischen Reaktionen wie die Isomerisierung der Hopfenbitterstoffe ausreichend schnell ab. Andererseits bedeutet dies eine hohe thermische Belastung der Würze, wodurch wertgebende Inhaltsstoffe, wie schaumpositive Eiweißsubstanzen, geschädigt werden.

Bei zahlreichen Versuchen zur Verbesserung der Würzekochung hat man festgestellt, dass jede Veränderung der Kochbedingungen, der Technik oder der Technologie, wie z. B. Gefäßform, Beheizungsart, Heizmedium, Kochzeit oder -temperatur, zu Veränderungen in der Bierqualität führt, meistens zu Verschlechterungen [44].

In der Zeit nach den Energiekrisen in den 70er-Jahren ging es vor allem darum, den Energieverbrauch bei der Würzekochung zu senken. Es kamen Systeme auf den Markt, die mit deutlichen energetischen Vorteilen aufwarten konnten. Beispiele hierfür sind die Hochtemperaturwürzekochung [81] und die mechanische Brüdenverdichtung [73][60].

Häufig sind die Bestrebungen jedoch im Sande verlaufen, weil immer wieder Probleme, entweder mit der Bierqualität oder der eingesetzten Technik, aufgetreten sind. Als dann Ende des vergangenen Jahrhunderts die Energiepreise erneut stark anstiegen, machte man sich von neuem Gedanken.

Schon die Entwicklung der Energiekosten (Abbildung 1) im Zeitraum dieser Arbeit zeigt, dass Energieeinsparungen im Bereich der Würzekochung meist auch mit einem deutlichen Kostenvorteil verbunden sind. Der spezifische Wärmebedarf bei der Bierherstellung hängt sehr stark von der Größe der Brauerei ab. Im Jahre 1994 wurden zur Bierherstellung insgesamt noch ca. 145–285 MJ/hl benötigt. Die Würzebereitung erforderte dabei mit 81–128 MJ/hl Verkaufsbier den größten Energieaufwand [38]. Davon entfallen auf die Würzekochung 24–54 MJ/hl [54]. In den folgenden Jahren wurden Anstrengungen zur Senkung des Energieverbrauchs unternommen. 1997 betrug der mittlere spezifische Energiebedarf nur noch zwischen 77 MJ/hl bei Brauereien über 500.000 hl/a und 198 MJ/hl bei Brauereien, die weniger als 20.000 hl/a produzierten. Den Löwenanteil von knapp 33 % verschlingt dabei aber nach wie vor das Sudhaus [39][74].

Bei alten Würzekochsystemen waren 12–16 % Gesamtverdampfung keine Seltenheit, und noch Mitte der 90er-Jahre ging man von 8 % als technologisch notwendig aus. Heute

bewegt man sich auch mit konventionellen Systemen zwischen 5 und 6 %. Daraus wird ersichtlich, dass sich allein durch eine Reduzierung der Gesamtverdampfung eine große Energiemenge einsparen lässt.

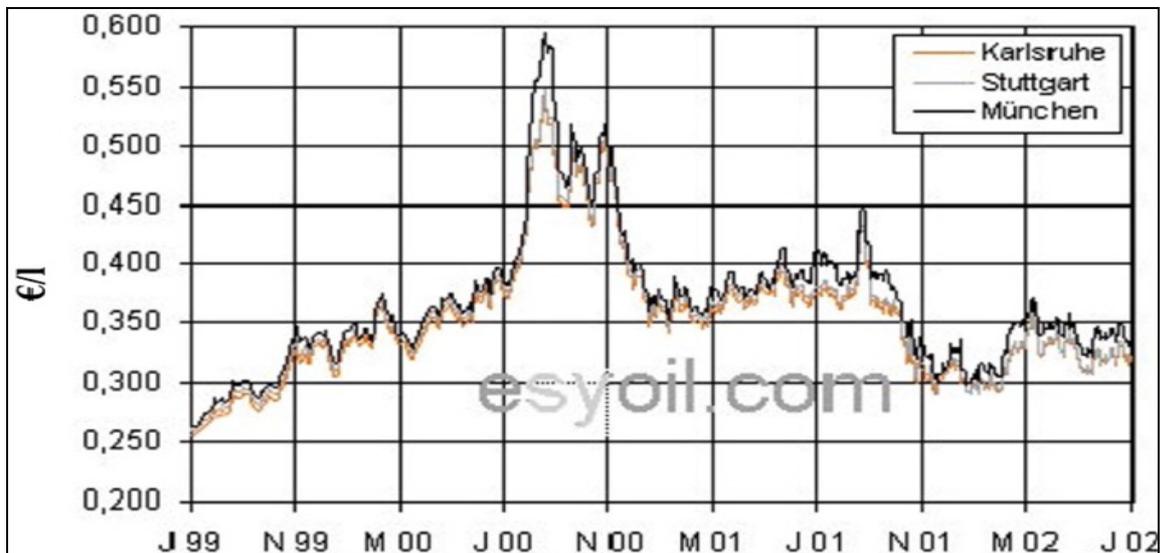


Abbildung 1: Entwicklung des Ölpreises im süddeutschen Raum von 1/99–1/02 [6]

1.2 Problemstellung

Es wird auch versucht, mit herkömmlichen Systemen die Gesamtverdampfung zu senken. Teilweise werden Verfahren eingesetzt, bei denen aus der Würze noch nach der Kochung unedle Aromakomponenten entfernt werden. Diese Verfahrensweisen werden als Stripping bezeichnet. Hier gibt es unter anderem von der Firma Meura aus Belgien ein System zum so genannten „Volatile Stripping“ [80].

1999 wurde ein Verfahren zur Würzekochung vorgestellt, das auf dem Prinzip der Dünnschicht-Verdampfung beruht. Dabei wird die Kochzeit minimiert und im Anschluss auf dem Weg zum Würzekühler gestrippt. Die Kochung erfolgt allerdings in einer ganz anderen Form als bisher. Die Würze wird in einer dünnen Schicht mehrmals über eine dampfbeheizte, kegelförmige Fläche geführt.

Diese Arbeit zeigt nun den Weg von den ersten Versuchen mit einer Pilotanlage im 2,5-hl-Maßstab über die ersten großtechnischen Anlagen bis hin zu den ersten industriellen Installationen. Besonderes Augenmerk lag auf den technologischen Auswirkungen auf die hergestellten Würzen. Mehrere Vergleiche mit konventionellen Kochsystemen führten zu interessanten Ergebnissen, die zu viel Diskussionen angeregt und der gesamten Branche den Anstoß gegeben haben, die Würzekochung neu zu überdenken.

2 Aufgaben der Würzekochung und Stand der Technik

2.1 Die Aufgaben der Würzekochung

Die Würzekochung ist ein Schritt von zentraler Bedeutung bei der Bierbereitung. Zahlreiche physikalische und chemische Prozesse spielen für die Qualität der hergestellten Biere eine entscheidende Rolle. Schon im Sudhaus werden für Geschmack, Bierschaum, chemisch-physikalische und Geschmacksstabilität wichtige Voraussetzungen geschaffen [42][44][51].

2.1.1 Physikalische Prozesse

2.1.1.1 Verdampfen von Wasser

Die Stammwürzekonzentration bei Pfanne-Voll liegt unter dem Wert, der später beim Auschlagen erreicht wird. Die Wassermenge zum Auswaschen der Treber richtet sich einerseits danach, wie lange und intensiv gekocht werden soll. Andererseits spielen wirtschaftliche Aspekte eine Rolle, welche Ausbeuten im Läuterbottich erreicht werden sollen. Malz- und Energiepreise sind hier ausschlaggebend [25].

2.1.1.2 Lösung der Hopfenbestandteile

Beim Kochen erfolgt auch die Zugabe des Hopfens. Neben aufbereiteten und angeereicherten Pellets werden Hopfenextrakte eingesetzt. Das Hopfenprodukt muss zunächst in Lösung gehen. Bei den hohen Temperaturen, die bei der Würzekochung herrschen, werden die α -Säuren isomerisiert. Erst dann haben sie ihre volle bitternde Wirkung. Bei der Hopfung der Würze werden auch Hopfenöle und Mono- und Sesquiterpene eingebracht, die bei der Kochung teilweise wieder ausgetrieben werden [52]. Die Ausnutzung der Hopfenbitterstoffe ist ein entscheidendes Kriterium für die Wirtschaftlichkeit eines Kochsystems, denn Hopfen ist ein sehr teurer Rohstoff.

2.1.1.3 Austreiben unerwünschter Aromastoffe

Im Laufe der Würzekochung werden leichtflüchtige Substanzen, vor allem die wasserdampflichen, ausgeschieden. Ziel ist die Entfernung unedler Geschmacksstoffe, wie z. B. bestimmter Aldehyde, Ketone, Alkohole und Sulfide, um ein Bier mit einem ausgewogenen Aroma zu bekommen. Teilweise geht man davon aus, dass eine Gesamtverdampfung von 2 % schon ausreicht, um Biere mit akzeptablem Aromaprofil herzustellen [58][6]. Bei einer Verdampfung zwischen 3 und 4 % werden die Hopfenölsubstanzen, deren Aromen als „bitter, grassy and grainy“ bezeichnet werden, sowie Schwefelverbindungen weitestgehend ausgedampft. Entscheidend ist die Effizienz, mit der die Aromastoffe vermindert werden, und diese hängt wesentlich vom eingesetzten Kochsystem ab.

Von besonderer Bedeutung sind das freie Dimethylsulfid (DMS) und seine Vorstufen, auch Precursor (DMS-P) genannt. DMS wird als Leitsubstanz zur Beurteilung der Ausdampfung

herangezogen. Es entsteht bei der Spaltung von S-Methyl-Methionin und weist einen Geschmacksschwellenwert von ca. 100–120 µg/l auf. Bei Rohfruchtbieren kann dieser Wert schon bei 40–80 µg/l liegen [25]. DMS wird während der Heißhaltezeit bei Würzekochung und Whirlpoolstandzeit permanent aus dem Precursor nachgebildet. Aus diesem Grund gilt bei herkömmlichen Kochsystemen der Richtwert von 100 µg/l für DMS + DMS-P in der Ausschlagwürze. So kann das freie DMS nach der Kochung nicht über die Geschmacksschwelle ansteigen. Je höher das Temperaturniveau und je höher der pH-Wert der Würze ist, desto schneller läuft die Umsetzung ab [51].

Für eine gute Austreibung des DMS sind die Kochintensität und die Gleichmäßigkeit der Würzebehandlung von entscheidender Bedeutung [92].

2.1.2 Chemische Prozesse

2.1.2.1 Denaturierung und Koagulation des Eiweißes

Die Eiweißausscheidung ist einer der entscheidenden Parameter bei der Würzekochung. Höher molekulare Eiweißverbindungen werden schaumpositive Eigenschaften zugesprochen. Außerdem erhöhen Proteine die Vollmundigkeit der Biere. Allerdings beeinflusst das in der Würze bzw. im Bier verbleibende Eiweiß erheblich die chemisch-physikalische Stabilität der Biere. Eine unzureichende Koagulation kann sich zudem in einer Eiweißbittere negativ bemerkbar machen [52]. Also muss auch hier ein Mittelweg gefunden werden.

Bei der Eiweißausscheidung sind zwei Stufen zu beobachten. Zunächst werden durch die Temperaturen beim Würzekochen u. a. die Wasserstoffbrücken zwischen den Peptidketten gelöst. Die aufgefalteten Ketten treten miteinander in Wechselwirkung und stabilisieren sich. Vor allem freiwerdende Thiolgruppen, die kovalente Bindungen eingehen können, sind hier von Bedeutung. Durch die Auffaltung der Ketten verändern sich die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Proteine wie die Löslichkeit [1].

In der zweiten Stufe, der Koagulation, bilden sich durch kolloidchemische und physikalische Vorgänge größere Eiweißagglomerate, der so genannte Bruch. Die Eiweißausscheidung hängt stark von Kochzeit, -intensität, -temperatur, pH-Wert und Gefäßform ab [52][33].

Für eine ausreichende Eiweißausscheidung benötigt man allerdings keine Verdampfung. Es reicht aus, wenn die Würze über eine gewisse Zeit bei Kochtemperatur gehalten wird. Entscheidend ist, dass Bewegung im Gefäß stattfindet [77].

Zur Beurteilung der Eiweißausscheidung wird der noch koagulierbare Stickstoff in der Ausschlagwürze herangezogen.

2.1.2.2 Isomerisierung der Hopfenbitterstoffe

Durch Variation von Gabezeitpunkten, Menge und eingesetzten Hopfenprodukten kann bei den Bieren gezielt das Hopfenaroma beeinflusst werden. Weil hauptsächlich die

isomerisierten α -Säuren für die Bittere verantwortlich sind, muss die Isomerisierung möglichst vollständig erfolgen [45].

2.1.2.3 Inaktivierung der Enzyme und Sterilisierung der Würze

Bei Temperaturen über 80 °C werden die zum Maischen notwendigen Enzyme denaturiert und so die Würzezusammensetzung fixiert. Durch den Kochprozess werden auch von den Rohstoffen und Geräten eingetragene Mikroorganismen abgetötet [51].

2.1.2.4 Absenken des pH-Wertes

Der Würze-pH sinkt bei der Würzekochung um 0,15–0,25 Einheiten, hervorgerufen durch die Hopfenbittersäuren und die Bildung saurer Melanoidine. Hauptursache ist die aciditätsfördernde Wirkung der Calcium- und Magnesiumionen durch ihre Reaktion mit Polypeptiden und das Ausscheiden tertiärer Phosphate unter Freisetzung von H⁺-Ionen [51].

2.1.2.5 Bildung von Farb- und Aromastoffen

Die Farbe der Würze nimmt abhängig von Intensität und Dauer der Kochung um 1,0–1,5 EBC pro Stunde zu. Die für die Farbzunahme verantwortlichen Reaktionen lassen sich in 3 Kategorien einteilen [51]:

- Maillard-Reaktionen zwischen reduzierenden Zuckern und freiem Aminostickstoff
- Karamellisierung von Zuckern
- Oxidation von Polyphenolen

Die Oxidation der Polyphenole verstärkt nicht nur die Farbe, sondern verringert die Reduktionskraft der Würze und des Bieres. Farb- und Aromastoffe sind meist auch Vorstufen von Alterungscarbonylen und beeinflussen die Geschmacksstabilität negativ. Sauerstoff sollte deshalb bei der Würzekochung unbedingt vermieden werden.

Zur Beurteilung der thermischen Belastung dient u. a. die Thiobarbitursäurezahl (TBZ).

2.1.2.6 Bildung reduzierender Substanzen

Ein Teil der reduzierenden Substanzen, Polyphenole, kommt aus den Rohstoffen Malz und Hopfen. Andere, wie Reduktone und Melanoidine, werden durch Kondensationsreaktionen zwischen Zuckern und Aminosäuren im Laufe des Kochprozesses gebildet. Sie dienen als Antioxidantien für phenolische Verbindungen und Bitterstoffe und fördern so sowohl Geschmacks- als auch kolloidale Stabilität.

Allgemein gelten für die Würzekochung dieselben beeinflussenden Parameter wie für jede chemische Reaktion: Konzentration, Zeit, Druck, Temperatur, Oberfläche [17].

Um die Aufgaben der Würzekochung zu erfüllen und die Würzezusammensetzung zu beeinflussen, stehen bei konventionellen Systemen nur Kochtemperatur und Kochzeit als Werkzeuge zu Verfügung. Das Problem dabei ist, beide Parameter in Einklang zu bringen, denn ihre Auswirkungen sind genau gegenläufig. Wählt man eine hohe Kochtemperatur, erreicht man zwar eine weitreichende Verminderung unerwünschter wasserdampflicher Substanzen wie etwa DMS, muss dabei aber eine starke Reduzierung des noch koagu-

lierbaren Stickstoffs in Kauf nehmen. Dies kann eine verminderte Schaumhaltbarkeit der Biere bewirken. Bei niedrigerer Kochtemperatur werden das hochmolekulare Eiweiß und damit schaumpositive Substanzen geschont, aber das freie DMS nicht mehr ausreichend ausgeschieden. Die gleiche Problematik erwächst aus der Variation der Kochzeit. Bei langen Zeiten erreicht man eine gute Ausdampfung, aber niedrige Werte für den noch koagulierbaren Stickstoff. Bei kurzen Kochzeiten ergeben sich hohe DMS-Werte, dafür aber gute Werte für den noch koagulierbaren Stickstoff.

2.2 Stand der Technik

In diesem Abschnitt wird kurz auf die geschichtliche Entwicklung der Würzekochsysteme eingegangen. Danach werden die heute im Markt befindlichen Systeme zur Würzekochung und Energierückgewinnung vorgestellt. Auch alte Varianten sind hier zu finden, denn sie befinden sich teilweise noch im Einsatz.

2.2.1 Alte Würzpfannen

Das Bierbrauen ist eines der ältesten Handwerke. Im Rahmen der Industrialisierung im vergangenen Jahrhundert gab es verschiedenste Entwicklungen im Bereich der Würzekochung. Einige Konzepte verschwanden sehr schnell wieder, andere waren die Vorläufer unserer heutigen Hochleistungssysteme.

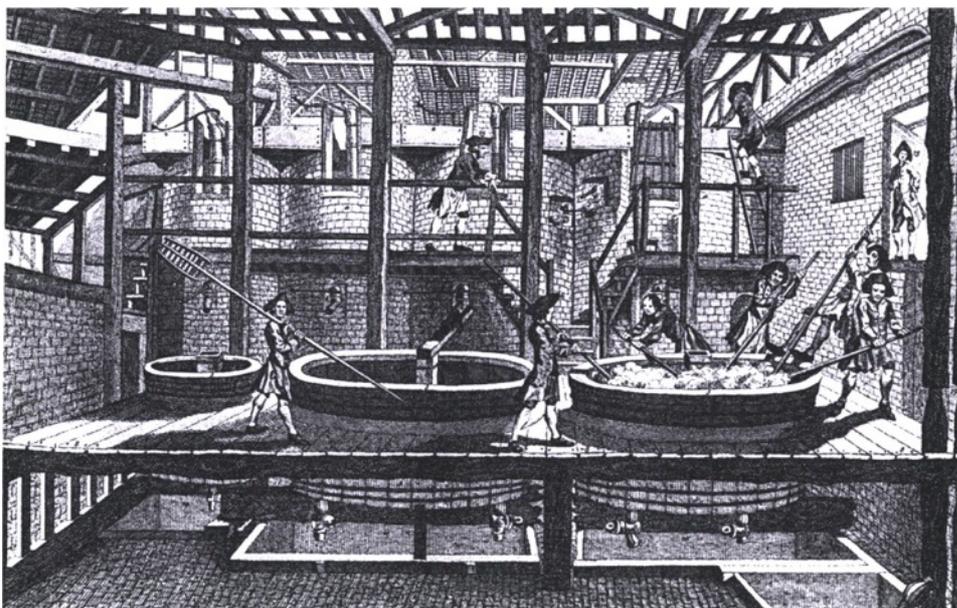


Abbildung 2: Sudhaus Mitte 18. Jh. [7]

Das Bild zeigt ein Sudhaus um 1764. Im Vordergrund sind die Maischbottiche zu sehen, im Hintergrund die Sudpfanne. Kaum vorstellbar, dass das Produkt Bier bis heute nahezu unverändert geblieben ist.

2.2.1.1 Direkt beheizte Pfannen

Direkt beheizte Pfannen (Abbildung 3) sind auch heute noch vereinzelt in kleineren Brauereien zu finden, in denen nur wenige Sude in der Woche gefahren werden. Die

Beheizung erfolgte früher mit Holzfeuern, heute über Öl- und Gasbrenner. Als Werkstoff diente für diesen Pfannentyp Kupfer, welches ein sehr guter Wärmeleiter ist und somit die Wärme gut über das Gefäß verteilt. Wegen des ungünstigen Verhältnisses von Volumen zu Würzeoberfläche sind diese Pfannen nur für kleine Ausschlagsmengen geeignet. Außerdem ist der Wirkungsgrad mit 50–70 %, wegen extrem hoher Abstrahlverluste und sehr hoher Abgastemperaturen von bis zu 350 °C, sehr niedrig [83]. Solche Systeme sind deshalb aus umweltpolitischer und wirtschaftlicher Sicht nicht mehr zeitgemäß.

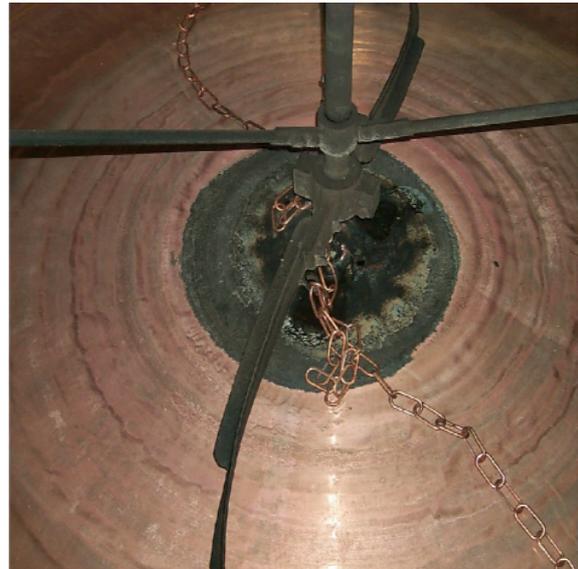
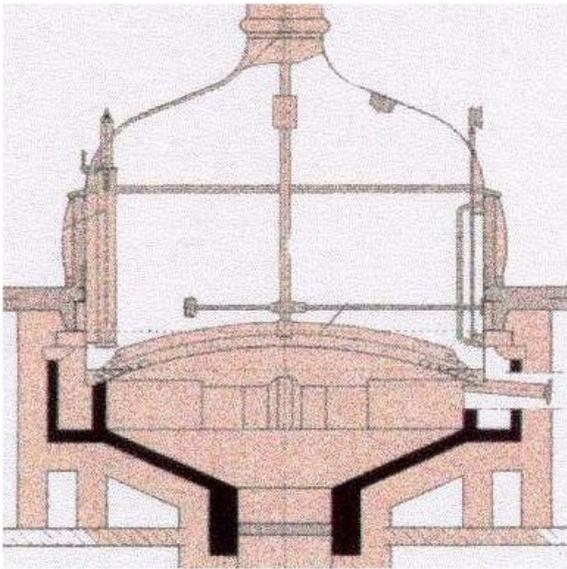


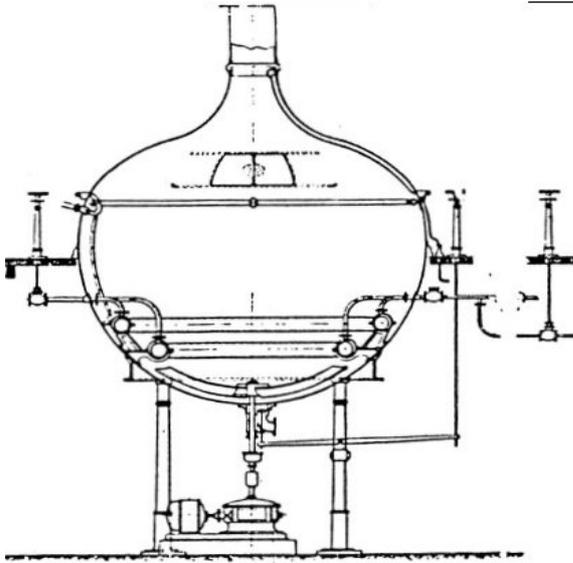
Abbildung 3: Direkt beheizte Pfanne [32] **Abbildung 4: Ketten in direkt beheizter Pfanne [93]**

Wie in Abbildung 4 zu sehen ist, hatten diese Pfannen meistens Schleppketten, um die Heizfläche sauber zu halten und ein Anbrennen der Würze zu vermeiden. Darüber hinaus sollten die Ketten Siedeverzug verhindern.

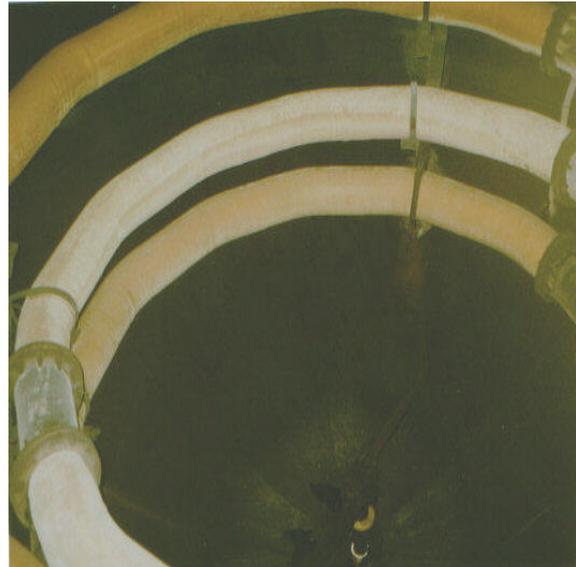
Ein gravierender Nachteil bei diesem Pfannentyp ist, dass in dem Bereich, in dem die Flamme des Brenners auftrifft, häufig Undichtigkeiten entstehen, teure Reparaturen sind die Folge. Aber auch aus technologischer Sicht ist dieser Pfannentyp überholt. Häufig wird mit Schleppluft gekocht und die Würzen sind somit einer starken Sauerstoffbelastung ausgesetzt. Hohe Zufärbungen sind die Folge. Darunter leidet dann letztendlich auch die Geschmacksstabilität der hergestellten Biere.

2.2.1.2 Indirekt beheizte Systeme

Weil immer größere Sudgrößen und wirtschaftlichere Arbeitsweisen gefordert wurden, kamen um 1900 die ersten dampfbeheizten Pfannen auf den Markt. In Abbildung 5 ist eine indirekt beheizte Pfanne zu sehen. Teilweise wurden in diese Pfannen zur Vergrößerung der Heizfläche dampfdurchströmte Rohrschlangen (wie in Abbildung 6) eingebaut, zum Teil auch drehbar in den verschiedensten Formen. Diese Pfannen wurden als Rotationspfannen bezeichnet [56].



**Abbildung 5: Dampfbeheizte Pfanne,
Ziemann 1900 [56]**



**Abbildung 6: Heizschlangen in dampf-
beheizter Pfanne [93]**

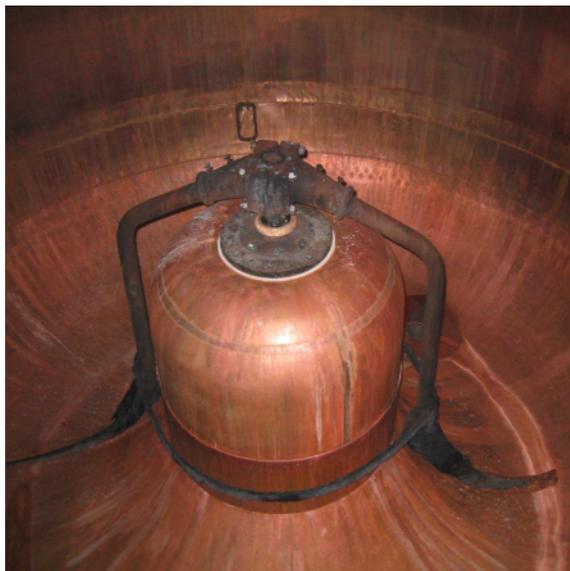


Abbildung 7: Hochleistungspfanne [93]



Abbildung 8: Pfanne mit Perculator [93]

Mit größer werdenden Suden reichte die Heizfläche auf der kugelförmigen Pfanne nicht mehr aus, um befriedigende Kochergebnisse zu erzielen. Aus diesem Grund wurde der Pfannenboden immer mehr nach innen gewölbt, um mehr Heizfläche anzubringen. So entstanden mit der Zeit die so genannten „Pobacken“ oder Hochleistungspfannen, wie eine in Abbildung 7 zu sehen ist.

Die nach innen gezogene Heizfläche half auch durch die auftretenden Strömungen, den Pfanneninhalt zu homogenisieren und eine gute Kochbewegung zu erzeugen. Dieser Pfan-
nentyp wurde in verschiedensten Formen von mehreren Herstellern gebaut und ist heute noch zu finden. Teilweise wurden die Pfannen auch mit Rührwerk ausgestattet.

2.2.1.3 Heizflächeneinbauten in der Pfanne

Schon sehr früh wurden Versuche unternommen, die erforderlichen Heizflächen in der Pfanne unterzubringen. Befindet sich die Heizfläche in der Würze, so sind die Abstrahlverluste zu vernachlässigen und nahezu alle Energie wird an die Würze abgegeben.

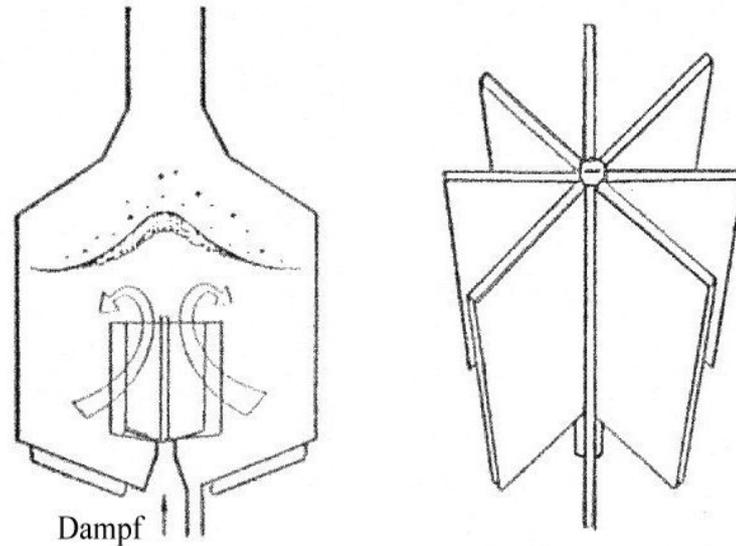


Abbildung 9: Sternkocher

In den Abbildungen 8–11 sind unterschiedliche Heizflächenvarianten zu sehen. Diese Systeme sind die Vorläufer der heutigen Innenkocher und wurden schon etwa ab Mitte der 20er-Jahre des vergangenen Jahrhunderts eingesetzt.



Abbildung 10: Kaskadenkocher [43]



Abbildung 11: Röhrenkocher [43]

2.2.1.4 Rechteckpfannen

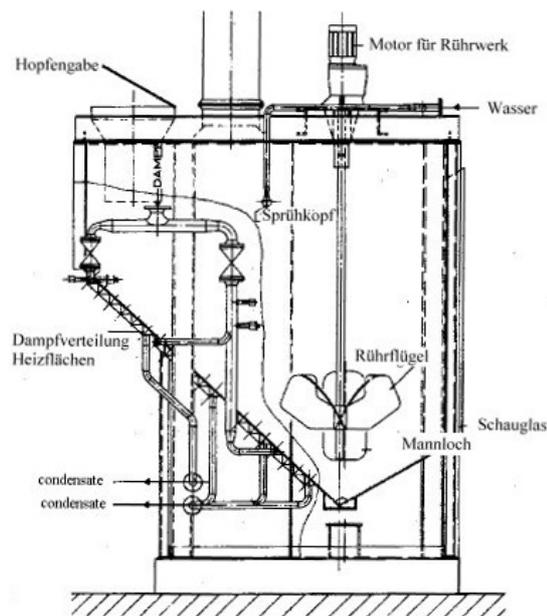


Abbildung 12: Rechteckpfanne [51]

Ende der 50er-Jahre tauchten rechteckige Pfannen auf. Man versprach sich durch diese Bauform die bestmögliche Raumausnutzung im Sudhaus. Allerdings konnten diese Pfannen von der Qualität der Würzekochung häufig nicht überzeugen. Durch die rechteckige Form war es noch schwieriger, den Pfanneninhalt zu homogenisieren als in runden, und bei sehr langen Pfannen, teilweise bis zu 15 m und mehr, war eine gleichmäßige Kochung gänzlich unmöglich. Darüber hinaus gab und gibt es an den rechteckigen Heizflächen häufig Probleme mit den Schweißnähten. Bereits in den 70er-Jahren wurde dieses Konzept dann wieder verworfen und man kehrte zu der runden Gefäßform zurück [43]. Trotzdem arbeiten noch heute viele Brauereien nach wie vor mit solchen Pfannen.

2.2.1.5 Die Hochtemperaturwürzekochung

In den 70er-Jahren wurde, ausgelöst durch die Energiekrisen, vieles unternommen, um den Primärenergieverbrauch beim Würzekochen drastisch zu senken. Bei der Hochtemperaturwürzekochung (HTW) macht man sich zu Nutze, dass chemische Reaktionen bei hohen Temperaturen schneller ablaufen. Bei Kochversuchen mit 110 °C werden für die Isomerisierung 30 Minuten benötigt. Bei 130 °C war der Vorgang bereits nach 6,9 Minuten und bei 150 °C sogar schon nach 1,2 Minuten abgeschlossen. Somit lässt sich also die Würzekochung drastisch verkürzen [81][49]. Der Betrieb dieser Anlagen ist kontinuierlich. Die abgeläuterte Würze wird von einem Vorlaufgefäß aus über zwei Wärmetauscher im Gegenstrom von Läutertemperatur auf 110 °C erwärmt. In einer weiteren, mit Frischdampf beheizten Stufe wird die Würze auf Temperaturen zwischen 120–130 °C gebracht und in der folgenden Heißhaltestrecke bei dieser Temperatur gehalten. Je nach Länge beträgt die Heißhaltezeit bis zu 10 Minuten. Anschließend folgen zwei Entspannungsstufen, in denen die Würze wieder auf atmosphärischen Druck entspannt wird. Die beim Entspannen

gewonnene Abwärme wird den ersten beiden Erhitzerstufe zugeführt. Die Hopfengabe erfolgt entweder über das Vorlaufgefäß oder direkt in die Heißhaltestrecke [76].

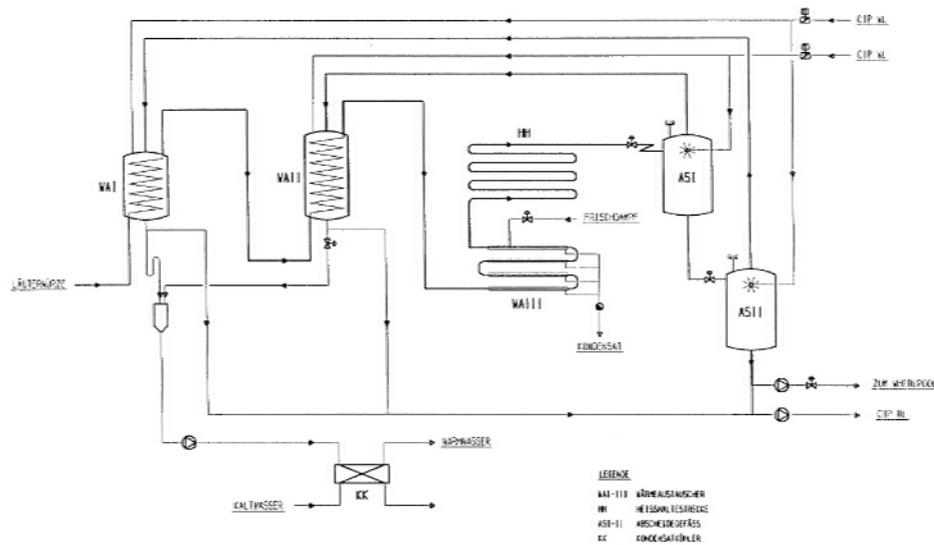


Abbildung 13: Schema einer Anlage zur Hochtemperaturwürzekochung – Kontikochung (Steinecker) [43]

2.2.2 Moderne Kochsysteme

Bei Würzpfannen mit großem Volumen werden heute ausnahmslos zum Aufheizen und Kochen der Würze Rohrbündelwärmetauscher eingesetzt, die entweder in der Würzpfanne in Form eines Innenkochers oder außerhalb als Außenkocher installiert sind [23]. Teilweise finden auch Plattenwärmetauscher als Außenkocher Verwendung. Mit diesen Systemen können alle sinnvollen Abmessungen realisiert werden und auch große Mengen verarbeitet werden. Die Beheizung des Kochers erfolgt entweder über Dampf, der an den Außenseiten der Kocherrohre kondensiert, oder über Hochdruckheißwasser.

2.2.2.1 Systeme mit Innenkocher

Der Innenkocher, wie er heute gebaut wird, ist eigentlich nur die konsequente Weiterentwicklung der Systeme, bei denen Heizflächen in der Pfanne untergebracht werden. Ein moderner Innenkocher ist ein Röhrenpaket. Einige Hersteller montieren darüber ein so genanntes Würzeleitblech. Die Aufgabe des Würzeleitbleches ist es, die Würze auf den Würzeverteilschirm zu bringen, der die Würze oberhalb des Flüssigkeitsspiegels in der Pfanne verteilt. Auf diese Weise sollen die Ausdampfoberfläche vergrößert und so unedle Aromakomponenten effektiver ausgetrieben werden. Pfannen mit Innenkocher kommen heute mit 5,5–6,5 % Gesamtverdampfung aus.



Abbildung 14: Innenkocher [93]



Abbildung 15: Fouling [82]

Die Würze wird bei herkömmlichen Innenkochern in den Rohren so weit erhitzt, bis sich Dampfblasen bilden, die zusammen mit einem thermischen Auftrieb durch die Änderung der Dichte die Würze nach oben beschleunigen und aus den Rohren treiben. Doch auch der Innenkocher ist nicht unproblematisch, obwohl es in den vergangenen Jahrzehnten immer wieder Veränderungen gab, die entscheidende Verbesserungen gebracht haben [8]. Ein Beispiel hierfür ist eine Unterstützung des Naturumlaufs mit einer Pumpe. Dadurch wird vor allem die Aufheizphase entschärft [82][89]. Diese stellt einen kritischen Bereich dar, weil hier die Würze von 72 °C auf Kochtemperatur gebracht werden muss, um nach oben aus den Kocherrohren zu steigen. Bis jedoch der Thermosiphoneffekt eintritt, findet die Wärmeübertragung nur durch Konvektion statt. Durch die hohen Temperaturen der Heizfläche kann die Würze an den Rohren anbrennen und der Wärmeübergang wird durch Beläge verschlechtert. Die Verlegung der Heizflächen wird als Fouling bezeichnet (Abbildung 15). Um die Heizleistung des Kochers über die Sudwoche konstant zu halten, sind Zwischenreinigungen des Heizbündels erforderlich.

2.2.2.2 Niederdruckkochung (NDK)

Auch das Kochen unter Druck hat einige Entwicklungen durchlaufen. Ziel ist dabei die Erhöhung der Kochtemperatur. Dies bietet sich besonders dann an, wenn eine Brauerei von der geografischen Lage her sehr hoch liegt. Eine ausreichende Kochtemperatur kann dann bei atmosphärischer Kochung nicht erreicht werden. Wie schon bei der HTW macht man sich auch hier zu Nutze, dass die Geschwindigkeit chemischer Reaktionen mit steigender Temperatur zunimmt.

Bei der NDK gibt es zwei Arten. Bei der klassischen NDK wird der Druck über die gesamte Kochzeit aufrechterhalten und am Ende der Kochung entspannt. Durch das

Entspannen findet dann die Ausdampfung statt. Allerdings bringt die NDK einen etwas höheren Anstieg beim Hitzeindikator 2-Furfural mit sich [69].

Eine Sonderform bei der Niederdruckkochung stellt die dynamische NDK dar. Dabei wird im Laufe der Kochzeit mehrmals Druck in der Pfanne aufgebaut und wieder entspannt. Beim Entspannen entstehen in der Würze Dampfblasen, die helfen unedle Aromakomponenten auszutreiben. Laut Hersteller sind damit 4,5 % Verdampfung ausreichend, um technologisch einwandfreie Biere zu produzieren [26].

2.2.2.3 Systeme mit Außenkocher

Bei Pfannen mit Außenkochern wird die Würze mit einer Pumpe durch den externen Rohrbündelwärmetauscher geführt und dann über ein Steigrohr wieder auf einen Würzeverteilschirm aufgebracht. Durch die Zwangsdurchströmung der Kocherrohre verlegen diese weit weniger als bei Innenkochern, somit werden höhere Standzeiten erreicht. Es gibt aber auch Außenkocher, die nach dem Prinzip eines Thermosiphons arbeiten und lediglich beim Aufheizen mit einer Pumpe umgewälzt werden. Beim Kochen reicht dann der Naturumlauf zur Umwälzung aus.

2.2.3 Maßnahmen zur Verringerung des Energieeinsatzes

Der Brauprozess selbst ist sehr energieaufwändig. In Abbildung 16 ist der Gesamtenergieverbrauch in die einzelnen Teilbereiche aufgeteilt dargestellt. Die Maßnahmen zur Verringerung des Energieeinsatzes beziehen sich wie angedeutet auf die Verwendung und Rückgewinnung der Energie des bei der Würzekochung anfallenden Wasserdampfes.

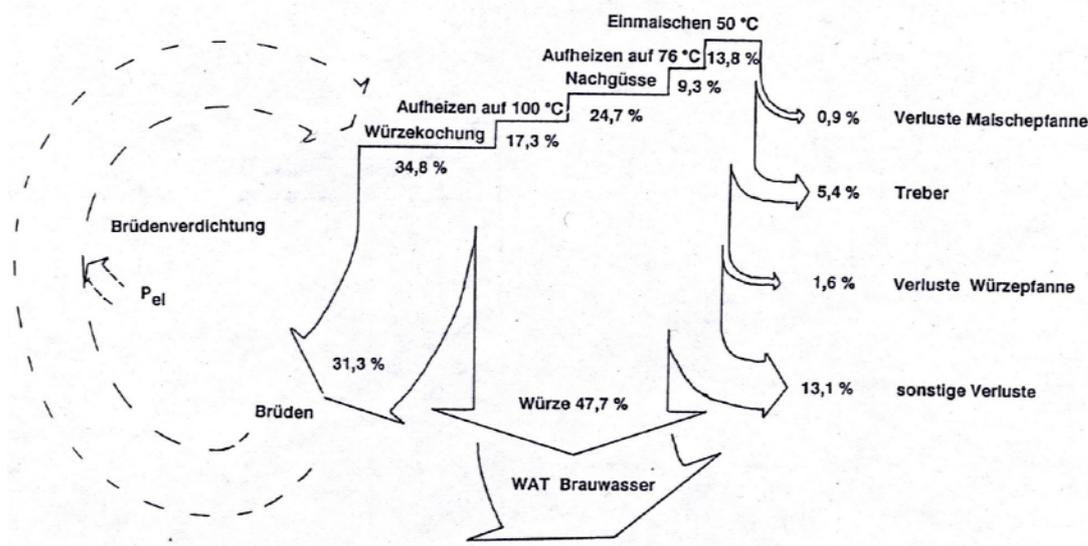


Abbildung 16: Wärmebilanz des Sudhauses einer Brauerei (Energiebedarf ohne Wärmerückgewinnung 88 MJ/hl AW) [75]

2.2.3.1 Pfannendunstkondensator (PfaDuKo)

Beim Pfannendunstkondensator werden über einen Platten- oder Rohrbündelwärmetauscher die Brüden kondensiert und damit im Gegenstrom Wasser erhitzt. Am PfaDuKo fal-

len bei 10 % Verdampfung etwa 0,66 hl Heißwasser an. Der Warmwasserbedarf in der Brauerei liegt aber nur bei ca. 0,4 hl/hl AW [61]. Man sieht also, dass aus energetischer Sicht eine hohe Gesamtverdampfung keinen Sinn macht. Die Brüdenkondensation über einen PfaDuKo ist ein sehr altes Verfahren und wurde schon vor knapp 100 Jahren eingesetzt, wie Abbildung 17 zeigt.

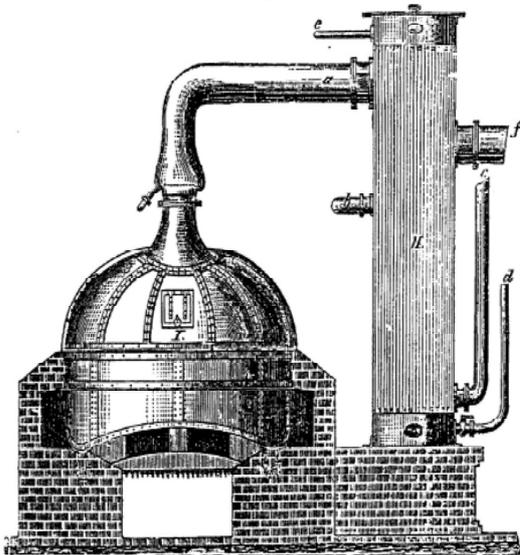


Abbildung 17: PfaDuKo 1908[16]



Abbildung 18: PfaDuKo 2000[93]

2.2.3.2 Brüdenverdichtung

Die beim Kochen entstehenden Brüden werden verdichtet, dabei auf ein höheres Energieniveau gebracht und wieder zum Beheizen des Kochers verwendet. Es kommen thermische und mechanische Brüdenverdichter zum Einsatz. Da aber die so erreichbaren Dampftemperaturen nur bei ca. 106 °C liegen, sind sehr große Heizflächen notwendig. Allerdings hat die geringe Grenzflächentemperatur positive Auswirkungen auf die Qualität der Biere.

Bei der mechanischen Brüdenverdichtung werden Rootsgebläse verwendet. Mechanische Brüdenverdichter sind relativ anfällig und haben einen sehr großen Strombedarf.

Die thermische Brüdenverdichtung arbeitet ohne Mechanik, nur mit Hilfe eines Dampfstrahlverdichters. Doch auch diese Art der Verdichtung ist nicht ganz ohne Nachteile, denn es fällt mehr Brüdenkondensat an, mehr aufbereitetes Kesselspeisewasser wird benötigt und im Betrieb fällt mehr Warmwasser an. Häufig besteht aber schon ein Überschuss an Warmwasser [19][20][91].

2.2.3.3 Energiespeichersysteme

In den letzten Jahren werden Sudhäuser vermehrt mit Energiespeichersystemen ausgestattet. Das bei der Würzekochung über den PfaDuKo gewonnene Heißwasser kann in modernen Brauereien nicht alles verbraucht werden. Bei einem Energiespeichersystem dient ein mit Wasser gefüllter Tank als Speicher. Das Wasser im Tank wird während der Würzekochung auf knapp unter Kochtemperatur erwärmt. Beim Aufheizen der Würze wird

mit diesem Wasser die Würze über einen Plattenwärmetauscher auf nahezu Kochtemperatur gebracht. Das Wasser wird im Gegenstrom wieder auf etwa 80 °C abgekühlt. Wird der Energiespeicher richtig betrieben, so sind die Energiemengen bei etwa 4,5 % Verdampfung ausgeglichen. Der Hauptvorteil eines solchen Systems liegt darin, dass die Würze schonend, mit geringen Temperaturdifferenzen am Plattenwärmetauscher, aufgeheizt wird und sich so die Kocherstandzeiten entscheidend verlängern lassen. Darüber hinaus fällt im Sudhaus kein überschüssiges Heißwasser mehr an.

2.2.3.4 Einrichtungen zum Strippen der Würze

Um die Ausdampfung unedler Würzekomponenten zu verbessern, werden teilweise auch so genannte Stripper eingesetzt, bei denen eine große Oberfläche geschaffen und so das Ausstinken forciert wird. Dieser Schritt findet dann unmittelbar vor der Würzekühlung statt. Auch hier kommen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz.

Ein System ist als Stripping-Säule aufgebaut, in der sich Raschigringe befinden, um eine möglichst große Oberfläche für die Ausdampfung unedler Komponenten zu schaffen. Dabei wird Dampf im Gegenstrom durch die Säule geführt, so werden die Aromakomponenten ausgetrieben [80].

2.3 Theorie des Wärmeübergangs und der Verdampfung

Heute sind Kochsysteme aus Edelstahl gefertigt und meistens dient Dampf als Heizmedium, vereinzelt auch Hochdruckheißwasser. Über die Heizflächen muss der jeweilige Energieträger seine Energie an die Würze abgeben.

Die Heizflächen selbst sehen sehr unterschiedlich aus. So können beispielsweise die Wandungen und/oder Böden der Gefäße als Heizflächen ausgebildet sein. Eine andere Möglichkeit sind Rohrbündelwärmetauscher als Innenkocher in den Pfannen. Als Außenkocher kommen Rohrbündelwärmetauscher oder Plattenapparate in Frage. Bei Maischgefäßen werden seit einiger Zeit auch so genannte Thermobleche oder „Templates“ eingesetzt.

2.3.1 Heizboden des DSVD

Der Heizboden des DSVD besteht aus Templates. Hierbei handelt es sich um zwei Bleche unterschiedlicher Materialstärke, die durch ein Laserschweißverfahren miteinander verbunden werden. Nach dem Schweißen werden die Platten unter hohem Druck aufgeblasen [79]. Das untere, dünne Blech verformt sich etwas, sodass kleine Taschen entstehen, in denen der Dampf kondensieren kann. Die Bleche werden vorher so zugeschnitten und verschweißt, dass sich eine Kegelabwicklung ergibt. Der Kegel wird dann aufgezo-gen und verschweißt. Die Größe der Dampftaschen ergibt sich aus dem Punktraster der Laserschweißungen. Entsprechend der Blechteilung und der Konstruktion des Unterbaus werden möglichst gleichmäßig Dampf- und Kondensatanschlüsse am Boden verteilt. Wird dies nicht beachtet, kann es zu Totzonen kommen, die die Kapazität des Heizbodens herabsetzen.

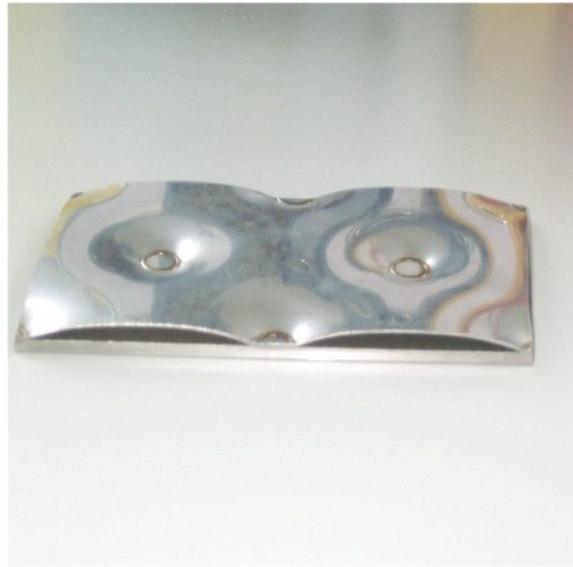


Abbildung 19: Heizboden des DSVD von unten [93] **Abbildung 20: Templates [93]**

2.3.2 Grundlagen der Wärmeübertragung

Für die Effizienz eines Kochsystems sind die Vorgänge bei der Wärmeübertragung von entscheidender Bedeutung. Heizflächen müssen richtig dimensioniert werden, um die notwendigen Aufheiz- und Verdampfungsraten zu erzielen. Die Wärme wird dabei zunächst vom Heizmedium an das Metall der Heizfläche abgegeben, dann durch die Wand hindurch geleitet, und schließlich vom zu beheizenden Medium wieder aufgenommen. Bei diesem Vorgang spricht man von Wärmedurchgang.

2.3.2.1 Wärmestrom

Der Wärmestrom gibt wieder, welche Wärmemenge übertragen wird. Er hängt von den Faktoren Übertragungsfläche, Temperaturdifferenz und dem Wärmedurchgangskoeffizienten ab. Wird der Wärmestrom auf die Fläche bezogen, so erhält man die Wärmestromdichte [87].

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot (\vartheta_{Fl} - \vartheta_W) \quad \text{Gleichung 1: Wärmestrom}$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = k \cdot (\vartheta_{Fl} - \vartheta_W) \quad \text{Gleichung 2: Wärmestromdichte}$$

k = Wärmedurchgangskoeffizient

A = Wärmetauscherfläche

ϑ_{Fl} = Temperatur des Fluids (Würze oder Dampf)

ϑ_W = Temperatur der Wand

Im Wärmedurchgangskoeffizienten spielen der innere und äußere Wärmeübergang, die Dicke und das Material der Übertragungsfläche und eventuelle Beläge eine Rolle.

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{\alpha_a} + \frac{s_w}{\lambda_w} + \frac{s_B}{\lambda_B} + \frac{1}{\alpha_i} \quad \text{Gleichung 3: Wärmedurchgangskoeffizient}$$

α_a = Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite (Dampfseite)

α_i = Wärmeübergangskoeffizient auf der Innenseite (Würzeseite)

s_w = Schichtdicke der Wand

s_B = Schichtdicke eines Belages

λ_w = spez. Wärmeleitfähigkeit der Wand

λ_B = spez. Wärmeleitfähigkeit eines Belages

Der Wärmeübergangskoeffizient ist dabei eine Funktion verschiedener dimensionsloser Kennzahlen [71].

$$\alpha = f(\text{Nu}; \delta; \lambda) \quad \text{Gleichung 4: Wärmeübergangskoeffizient}$$

δ = Grenzschichtdicke

λ = Wärmeleitfähigkeit

Nu = Nusseltzahl

$$\text{Nu} = f(\text{Re}; \text{Pr}) \quad \text{Gleichung 5: Nusseltzahl}$$

Re = Reynoldszahl

Pr = Prandtlzahl

2.3.2.2 Wärmeübergang auf der Dampfseite

Dampf als Heizmedium kondensiert an einer Wand, wenn diese kälter ist als die Satt-dampf-temperatur [87]. Je nachdem, ob das Kondensat in Tropfen oder als geschlossener Film abläuft, unterscheidet man zwischen Tropfen- und Filmkondensation. Die Tropfenkondensation tritt nur selten auf, denn sie lässt sich nur mit bestimmten Maßnahmen, z. B. Entnetzungsmitteln, aufrecht erhalten. Man kann also bei dampfbetriebenen Wärmetauschern für die Berechnung von Filmkondensation ausgehen [85]. Hierfür hat Nusselt die Grundlagen mit seiner Wasserhauttheorie geschaffen. Er berechnete die Dicke des ablaufenden Filmes unter der Annahme einer laminaren Strömung (Abbildung 21) und leitete daraus den Wärmeübergangskoeffizienten ab [53].

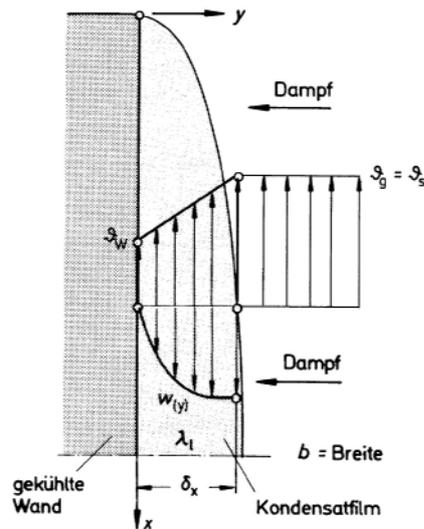


Abbildung 21: Laminarer Kondensatfilm an einer senkrechten Wand [87]

Der Wärmeübergangskoeffizient an der Stelle x berechnet sich wie folgt:

$$\alpha_x = \frac{\lambda_l}{\delta_x} \quad \text{Gleichung 6: Wärmeübergangskoeffizient}$$

λ_l = Wärmeleitfähigkeit des Kondensatfilms

δ_x = Dicke des Kondensatfilms an der Stelle x

Am Flüssigkeitsfilm besteht ein Kräftegleichgewicht zwischen der Schwerkraft F_S und der Reibungskraft F_R . Unter Berücksichtigung der Schubspannung kann man den Geschwindigkeitsverlauf ermitteln. Im Weiteren muss noch der örtliche Massenstrom berechnet werden. Aus diesen Daten ergibt sich die örtliche Filmdicke:

$$\delta_x = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot \nu_l \cdot \lambda_l \cdot (\vartheta_s - \vartheta_W) \cdot x}{\rho_l \cdot g \cdot \Delta h_V}} \quad \text{Gleichung 7: Filmdicke an der Stelle } x$$

δ_x = Dicke des Kondensatfilms an der Stelle x

ν_l = kinematische Viskosität

λ_l = Wärmeleitfähigkeit des Kondensatfilms

ϑ_s = Temperatur des Kondensats (Siedetemperatur)

ϑ_W = Temperatur der Wand

ρ_l = Dichte des Kondensats

g = Erdbeschleunigung

Δh_V = spez. Verdampfungsenthalpie

Mit der Schichtdicke ergibt sich der örtliche Wärmeübergang:

$$\alpha_x = \sqrt[4]{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot \Delta h_v \cdot \lambda_1^3}{4 \cdot \nu_1 \cdot (\vartheta_s - \vartheta_w) \cdot x}} \quad \text{Gleichung 8: Wärmeübergangskoeffizient an der Stelle } x$$

Bildet man den Mittelwert der örtlichen Wärmeübergangskoeffizienten, erhält man:

$$\alpha \cdot L = \int_{L=0}^{x=L} \alpha_x dx \quad \text{Gleichung 9: Wärmeübergangskoeffizient gemittelt}$$

$$\alpha_{lam, senkr.} = \frac{4}{3} \alpha_x = 0,943 \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_1 \cdot g \cdot \Delta h_v \cdot \lambda_1^3}{\nu_1 \cdot (\vartheta_s - \vartheta_w) \cdot L}} \quad \text{Gleichung 10: Mittlerer Wärmeübergangskoeffizient}$$

L = Lauflänge

Die dimensionslose Nusseltzahl ist definiert als:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad \text{Gleichung 11: Definition der Nusseltzahl}$$

Für geneigte Flächen wie im Falle des DSVD gilt:

$$\alpha_\beta = \alpha_{senkr.} \cdot \sqrt[4]{\sin \beta} \quad \text{Gleichung 12: } \alpha \text{ für geneigte Flächen}$$

2.3.3 Auswirkungen von Verschmutzungen auf den Wärmeübergang

Beim Betrieb von Wärmetauschern kommt es zur Verlegung der Heizflächen. Ursache ist, dass organische oder anorganische Stoffe bei Wärmezufuhr ausfallen. Diesen Vorgang nennt man Fouling. Die Verlegung der Heizflächen stellt ein nicht unbedeutendes Problem dar, weil sich spezifische Daten drastisch verändern können. Bei der Auslegung von Anlagen müssen deshalb die Vorgänge des Fouling berücksichtigt werden.

2.3.3.1 Mechanismen des Fouling

Beim Fouling können sechs Mechanismen unterschieden werden, deren Bedeutung allerdings sehr unterschiedlich ist [46].

2.3.3.1.1 Kristallisationsfouling

Gelöste Salze werden durch die Hitze an der Heizfläche ausgeschieden und lagern sich an der Heizfläche an. Der Grund liegt darin, dass an der Heizfläche eine Übersättigung der jeweiligen Salze stattfindet. Ursache kann die Verdampfung des Lösungsmittels sein, im Falle von Bierwürze Wasser. Auch die Erhitzung der Würze über die Löslichkeitsgrenze

der Lösung von Salzen mit umgekehrtem Löslichkeitsverhalten wie CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ kann ausschlaggebend sein. Ebenso spielen verschiedene Magnesium- und Natriumsalze eine Rolle. Der pH-Wert beeinflusst ebenfalls die Löslichkeit [47].

2.3.3.1.2 Partikelfouling

Bei dieser Form des Fouling brennen Partikel regelrecht an der Heizfläche fest. Im Bereich der Würzekochung kann es sich hierbei z. B. um Eiweißkonglomerate oder Hopfenbestandteile handeln.

2.3.3.1.3 Fouling durch chemische Reaktionen

An der Heizfläche können gerade bei Nahrungsmitteln chemische Reaktionen ablaufen, die zu Ablagerungen führen. Als Beispiel sei hier die Denaturierung von Eiweißstoffen genannt. Das Material der Heizfläche ist dabei nicht an den Reaktionen beteiligt.

2.3.3.1.4 Korrosionsfouling

Korrosionsfouling betrifft die Heizfläche direkt. Zwar kommt dieser Typ bei der Verwendung von Edelstahl nur sehr selten vor, allerdings können durch eine Veränderung der Oberflächenstruktur andere Mechanismen gefördert werden. Die Beschaffenheit der Oberfläche der Heizfläche spielt ebenfalls eine große Rolle. So wird auf einer polierten Fläche wesentlich weniger Fouling stattfinden als auf einer sehr rauhen.

2.3.3.1.5 Biofouling

Biofouling kommt im Heißbereich des Sudhauses eigentlich nicht vor, denn dabei lagern sich Mikroorganismen an den Heizflächen ab, die dann schleimige Überzüge auf der Heizfläche verursachen.

2.3.3.1.6 Gemischtes Fouling

Sehr häufig laufen mehrere dieser Mechanismen, die sich auch gegenseitig verstärken oder fördern können, parallel ab.

2.3.3.2 Vorgang des Fouling

Beim Vorgang des Fouling können mehrere Phasen unterschieden werden.

2.3.3.2.1 Initial- oder Verzögerungsphase

Bei frisch gereinigten Heizflächen kann der Wärmeübergang für eine bestimmte Zeit konstant bleiben. In dieser Phase lagern sich die ersten Kristallisationskeime ab. Diese Verzögerung kann von wenigen Minuten bis zu mehreren Tagen dauern, wobei im Sudhaus meist schon nach den ersten Suden ein deutlich sichtbarer Belag zu finden ist. Das Partikelfouling hat keine Verzögerungszeit. Die Oberflächenrauigkeit und die Temperatur der Heizfläche haben einen entscheidenden Einfluss auf die Dauer der Anfangsphase [14].

2.3.3.2.2 Stofftransport

Um eine Ablagerung auf der Heizfläche zu bilden, muss mindestens eine der relevanten Komponenten aus dem Flüssigkeitsstrom zur Heizfläche transportiert werden. Dies geschieht meist durch Diffusion. Ein weiterer Mechanismus ist die so genannte Thermophorese. Die Partikel bewegen sich entlang eines Temperaturgradienten.

2.3.3.2.3 Ablagerungsbildung

Wenn die Komponente, die sich abgelagert, zur Heizfläche transportiert wurde, muss sie dort anhaften. Dies geschieht beim Partikelfouling durch Festbrennen oder im Falle von Kalk (CaCO_3) durch die Fällungsreaktion.

2.3.3.2.4 Abtragung

Generell können die Teilabläufe Aufbau und Abbau der Verschmutzungsschicht unterschieden werden. Je nachdem wie das Verhältnis ist, baut sich die Schicht schnell oder langsam auf. Irgendwann kann auch eine Enddicke beobachtet werden. Hier herrscht dann ein Gleichgewicht zwischen Neubildung und Abtrag vor.

2.3.3.2.5 Alterung der Ablagerungen

Jede Ablagerung unterliegt auch einer Alterung, welche die Festigkeit des Belages beeinflussen kann. Eine wichtige Rolle spielen unter anderem Polymerisation und das Abplatzen von Belägen.

2.3.3.3 Foulingwiderstand

Die Ablagerung an der Heizfläche beeinflusst in entscheidendem Maße den Wärmeübergang. Aus diesem Grund muss der theoretische Wert für den k-Wert mit dem Foulingwiderstand multipliziert werden, um den tatsächlichen Wert zu erhalten [87].

$$k = k_0 \cdot \varphi \quad \text{Gleichung 13: Wahrer k-Wert}$$

k_0 = k-Wert ohne Schmutz- und Schutzschichten

φ = Korrekturfaktor für Verschmutzungen

$$\varphi = \frac{1}{1 + k_0 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{s_i}{\lambda_i}} \quad \text{Gleichung 14: Korrekturfaktor}$$

s_i = Schichtdicke eines Belages

λ_i = spez. Wärmeleitfähigkeit des Belages

Weil die Foulingwiderstände nicht bekannt sind, müssen sie abgeschätzt werden [55].

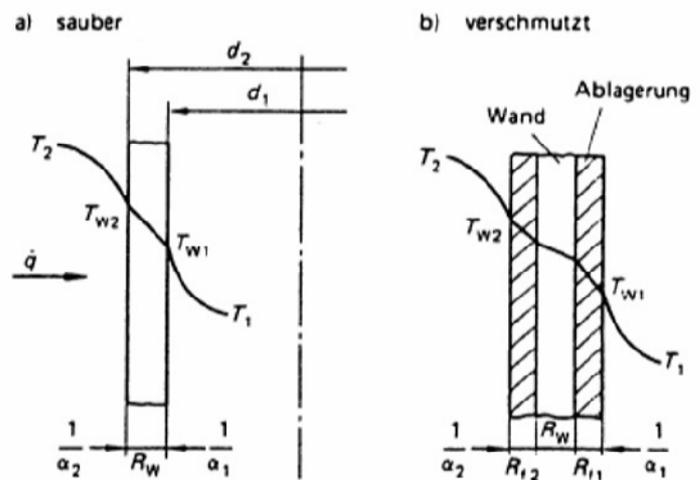


Abbildung 22: Wärmeübergangswiderstände durch eine Wand [48]

2.3.4 Beschreibung der Foulingvorgänge

Drei mögliche Foulingverläufe können unterschieden werden: lineares, abnehmendes und asymptotisches Fouling. Generell wird das Fouling als die Differenz der Stoffströme zur Heizfläche und von der Heizfläche weg beschrieben [28].

$$\frac{dm}{dt} = \dot{m}_d - \dot{m}_r$$

Gleichung 15: Beschreibung des Fouling

\dot{m}_d = Stoffstrom zur Heizfläche hin

\dot{m}_r = Stoffstrom von Heizfläche weg

2.3.4.1 Lineares Fouling

Beim linearen Fouling ist Differenz zwischen Ablagerungs- und Abtragsrate konstant. Dies ist dann gegeben, wenn die Ablagerungen fest an der Heizfläche anhaften und die Abtragsrate vernachlässigt werden kann. Dabei darf die Ablagerung aber keinen Einfluss auf den Wärmeübergang an der Phasengrenze und auf den Ablagerungsvorgang selbst haben.

Eine Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bewirkt beim haftungs- bzw. reaktionskontrollierten Fouling eine verlangsamte Belagsbildung, weil kürzere Kontaktzeiten gegeben sind. Gleiches gilt für niedrigere Heizflächentemperaturen.

2.3.4.2 Abnehmendes Foulingverhalten

Abnehmendes Foulingverhalten liegt dann vor, wenn die Differenz zwischen Aufbau und Abbau ständig abnimmt. Die Differenz wird aber erst nach unendlicher Zeit null. Zu beob-

achten ist dieses Verhalten, wenn die Ablagerungen das Ablagerungsverhalten beeinflussen und abschwächen.

2.3.4.3 Asymptotisches Fouling

Beim asymptotischen Fouling nimmt die Differenz zwischen Ablagerung und Abtragung ebenfalls ständig ab, wird aber schon nach endlicher Zeit null. Die Ablagerungen sind nicht sehr stabil.

2.3.4.4 Ablagerungsbildung beim Blasensieden

Kommt es zum Blasensieden (Abbildung 23), ändern sich die Bedingungen für die Wärme- und Stoffübertragung. Bestimmend sind dann Mikrokonvektion, Blasenabreißdurchmesser und Blasenfrequenz, die selbst wieder eine Funktion der Belastung der Heizfläche und der Stoffwerte sind. Strömungsgeschwindigkeit und Reynoldszahl spielen eine untergeordnete Rolle. Zwischen Blase und Heizfläche existiert ein Mikrofilm, bei dessen Verdampfung die zur Blasenbildung notwendige Wärme übertragen wird. Es kommt zu verstärkter Ablagerungsbildung, die stark von der Heizflächenbelastung und der Dichte der Blasenkeimstellen abhängt. In den Blasen reichern sich die Konzentrationen gelöster Komponenten an, so dass es zu verstärkter Ablagerungsbildung kommt. Die Foulingrate ist abhängig vom Quadrat der Wärmestromdichte und der Verursacherkonzentration [59].

$$R_f = \dot{q}^2 \cdot c_b \quad \text{Gleichung 16: Fouling beim Blasensieden}$$

\dot{q} = Wärmestromdichte

c_b = Verursacherkonzentration

Die Zahl der Blasenkeimstellen nimmt proportional mit dem Quadrat der Wärmestromdichte zu. Bei ausgebildetem Blasensieden ist der Wärmeübergang, und damit auch das Fouling, unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit. Im Bereich des ausgebildeten Filmsiedens (Abbildung 24) kommt es kaum zur Ablagerungsbildung, da die Flüssigkeit durch den Dampffilm an der Benetzung der Heizoberfläche gehindert wird [84].



Abbildung 23: Blasensieden

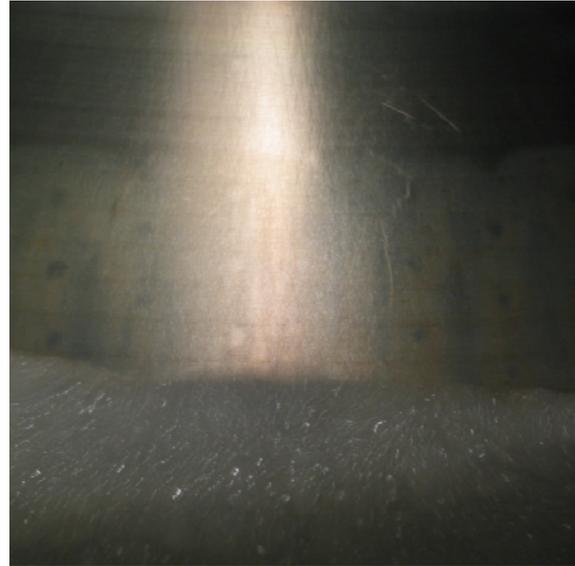


Abbildung 24: Filmsieden

2.3.4.5 Fouling mit dem DSVD

Auch mit dem DSVD-System kommt es zu Fouling. Die Belagsbildung erfolgt jedoch langsamer als beispielsweise beim Innenkocher. Ursache ist die ständige Überströmung der Heizfläche, sowohl beim Aufheizen als auch beim Kochen. Abbildung 25 zeigt die Heizfläche vor dem ersten Sud, sie ist metallisch blank. Bereits nach 3 Suden (Abbildung 26) zeigt sich ein leichter Belag, der dann kontinuierlich zunimmt (Abbildung 27 und Abbildung 28). Ab dem 10. Sud (Abbildung 29 und Abbildung 30) fängt der Belag an wieder von der Heizfläche abzuplatzen, es stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Belagsneubildung und -abbau ein.

Im Verlauf der ersten Sude nimmt auch die Neigung zum Blasensieden zu. Beim ersten Sud ist noch kaum eine Blasenbildung zu beobachten, sie nimmt aber bis etwa zum 10. Sud kontinuierlich zu und bleibt dann konstant. Ursache hierfür ist, dass der raue Belag viele Kondensationskeime verursacht. Entscheidend für die Intensität der Blasenbildung ist die Würzezusammensetzung. Allerdings wurden hierzu keine Versuche gemacht. Es scheint Malzsorten zu geben, die zu verstärkter Blasenbildung neigen. Auch mit Reis hergestellte Würzen zeigen ein solches Verhalten. Das verwendete Läutersystem scheint ebenfalls eine Rolle zu spielen, so zeigten auch Maischefilterwürzen eine stärkere Blasenbildung.



Abbildung 25: Saubere Heizfläche



Abbildung 26: Fouling nach 3 Suden

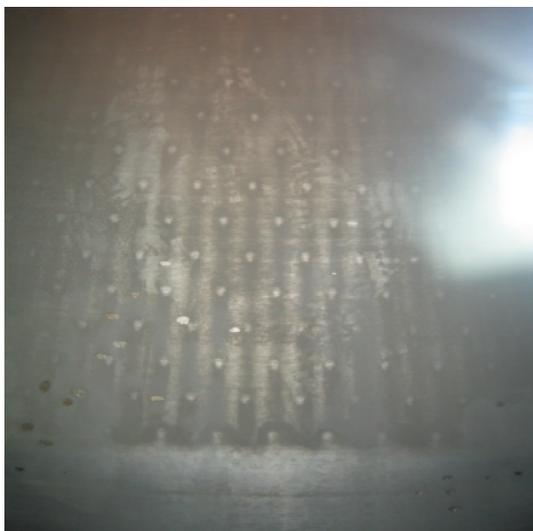


Abbildung 27: Fouling nach 6 Suden



Abbildung 28: Fouling nach 9 Suden

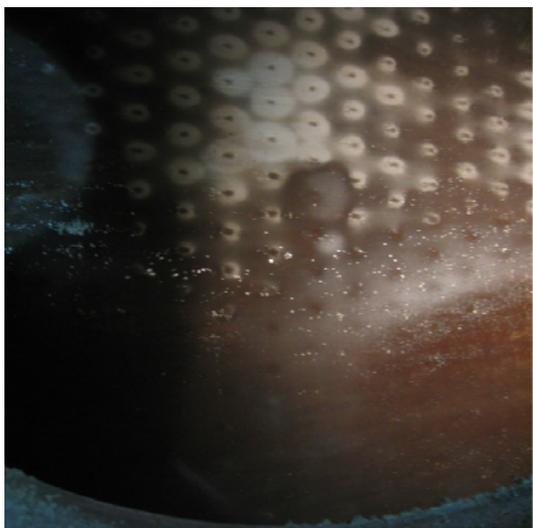


Abbildung 29: Fouling nach 12 Suden



Abbildung 30: Fouling nach 40 Suden

2.3.5 Homogenität des Pfanneninhaltes

Grundvoraussetzung für eine befriedigende Kochung ist die Homogenität der gesamten Würze. Ungünstige Geometrien von Pfannen können dazu führen, dass Teile der Würze tot gekocht werden und andere Bereiche der Pfanne ungekocht bleiben. Auch dieses Thema ist mit dem DSVD-System von großem Interesse, denn die Würze befindet sich ja im Whirlpool und wird von dort aus über die Heizfläche gepumpt. Es muss dabei gewährleistet werden, dass alle Würzeteilchen gleichmäßig behandelt werden. Versuche mit Außen- und Innenkochern haben gezeigt, dass die Durchmischung des Pfanneninhaltes keine triviale Aufgabe ist. Inhomogenitäten lassen sich besonders beim Aufheizen feststellen. So können z. B. bei einer Pfanne mit Innenkocher vertikale Temperaturunterschiede von bis zu 20 °C auftreten (Abbildung 31), d. h. an der Oberfläche kocht die Würze einige Minuten eher als in der Nähe des Pfannenbodens [82]. Ähnliches kann auch bei Pfannen mit Außenkocher beobachtet werden (Abbildung 32). Wenn man nicht auf eine richtige Anströmung achtet, bildet sich hier ein kalter Kern.

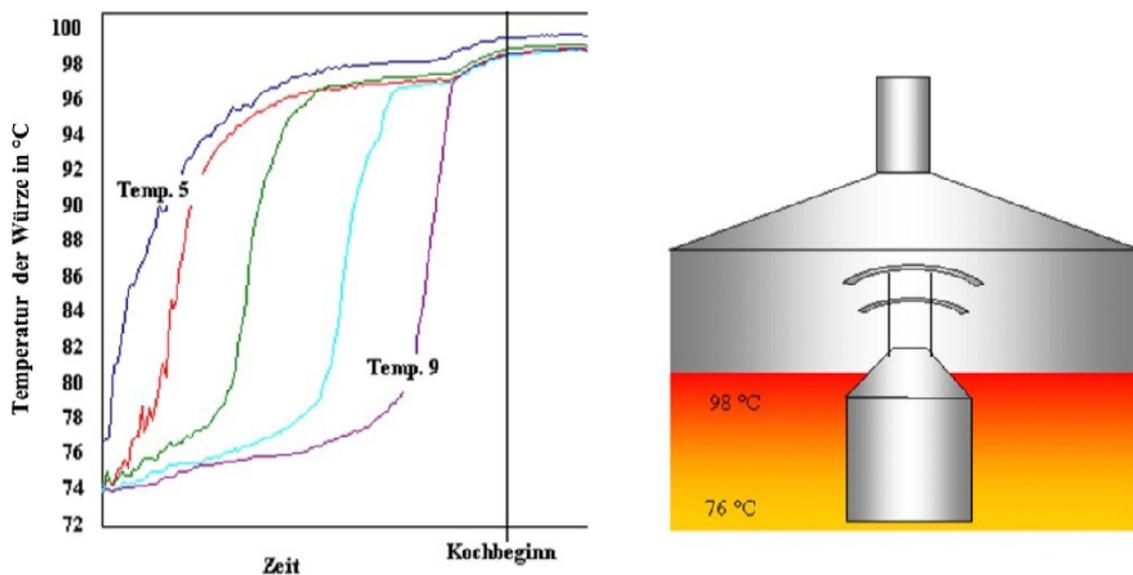


Abbildung 31: Temperaturschichtung bei einer Pfanne mit Innenkocher [82]

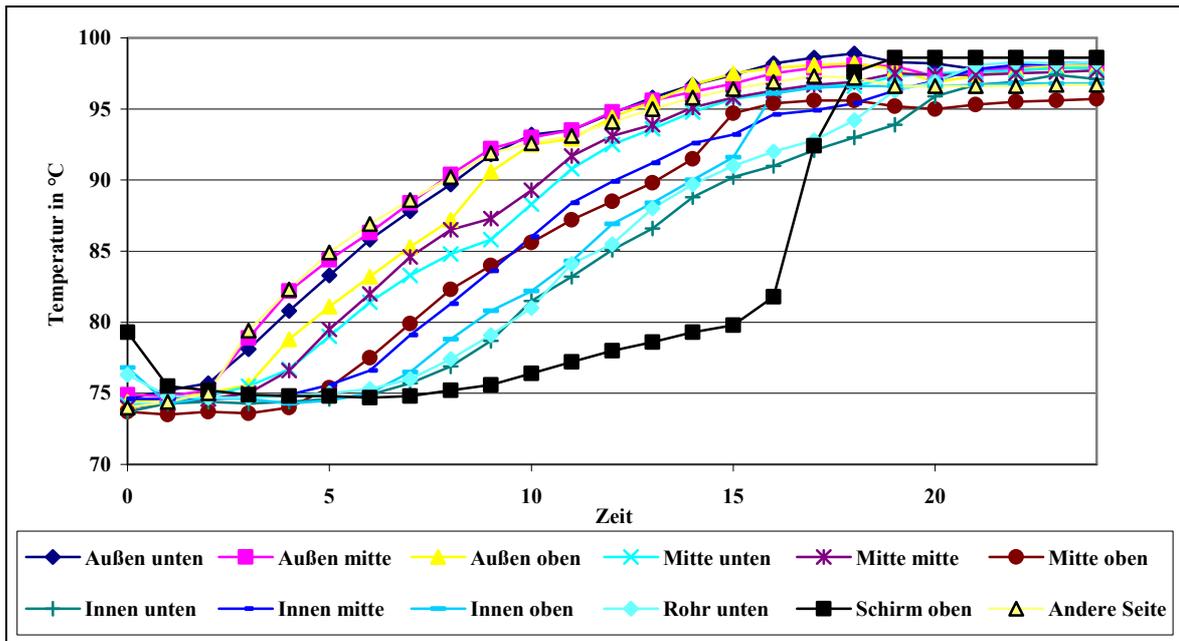


Abbildung 32: Temperaturschichtung bei einer Pfanne mit Außenkocher

Um diese Problematik zu umgehen, gibt es beim DSVD-System drei Rückläufe in den WHP. Einer geht in das Zentrum des Whirlpools und schichtet dort Würze auf (Abbildung 33); damit wird ein kalter Kern verhindert. Ein zweiter Rücklauf (Abbildung 34) bringt die Würze in einem 23°-Winkel zum Radius auf halber Füllhöhe zurück in den Whirlpool; damit wird verhindert, dass die Würze im Whirlpool nur rotiert. Dieser Anstich ist besonders wichtig, denn nur so ist eine gute Durchmischung des Whirlpoolinhalts möglich [9]. Der dritte Anstich führt tangential in das Gefäß und versetzt die Würze nach Kochende in Rotation.



Abbildung 33: Zentraler Einlauf [93]



Abbildung 34: Tangentialer und 23°-Einlauf [93]

2.3.6 Auswirkungen von überhitztem Dampf

Häufig sind in der Praxis nicht ganz optimale Zustände beim Heißdampf vorhanden. Die Qualität des Dampfes ist aber von entscheidender Bedeutung. Heute werden Kochsysteme immer öfter mit einer Dampfmenge messung ausgestattet, die eine exakte Steuerung des Kochprozesses ermöglicht. Ist der Dampf zu nass, kann es zum Versagen oder zumindest zu Fehlmessungen von Messeinrichtungen kommen. Eine exakte Bestimmung der zugeführten Energiemenge ist nicht mehr möglich. Dieser Zustand kann eintreten, wenn entweder die Kondensateinspritzung nicht richtig funktioniert oder der Dampfkessel überfahren wird und permanent Wassertröpfchen mitgerissen werden. Dabei kann es zur Beschädigung an den Messeinrichtungen und Ventilen kommen.

Doch meistens ist der Dampf in der Brauerei überhitzt, was bis zu einem gewissen Grad auch völlig unproblematisch ist, weil der in die Heizfläche eintretende Dampf spontan mit dem in der Heizfläche vorhandenen Kondensat auf Sattdampf temperatur abkühlt. Problematisch wird das Ganze erst bei einer Überhitzung um mehr als ca. 10° , dann reicht die Kondensatmenge in den ersten Dampf taschen nicht aus, und die Heizfläche kann an den Eintrittsstellen des Dampfes überhitzen. Es kommt um die Dampf eintritte zu verstärktem Fouling.

2.3.7 Verteilung des Heißdampfes

Von weitaus größerer Bedeutung für eine gute Kochung sind die Gleichmäßigkeit der Dampfverteilung und die Vermeidung von Totzonen in den Heizflächen. Bei ungünstiger Anordnung der Dampf- und Kondensatanschlüsse kann es zu Kondensatansammlungen im Heizboden kommen.

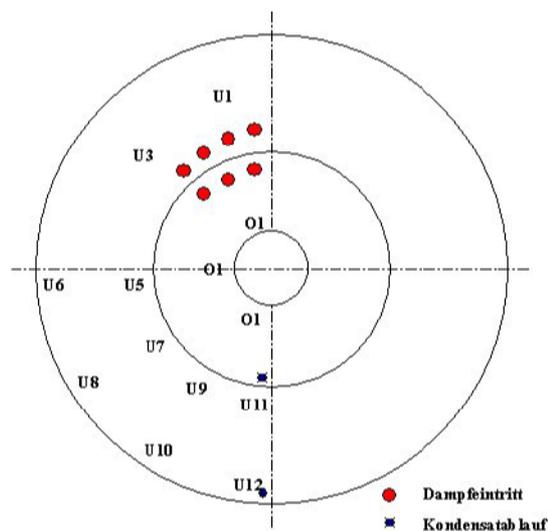


Abbildung 35: Messstellen für die Dampfverteilung [93]

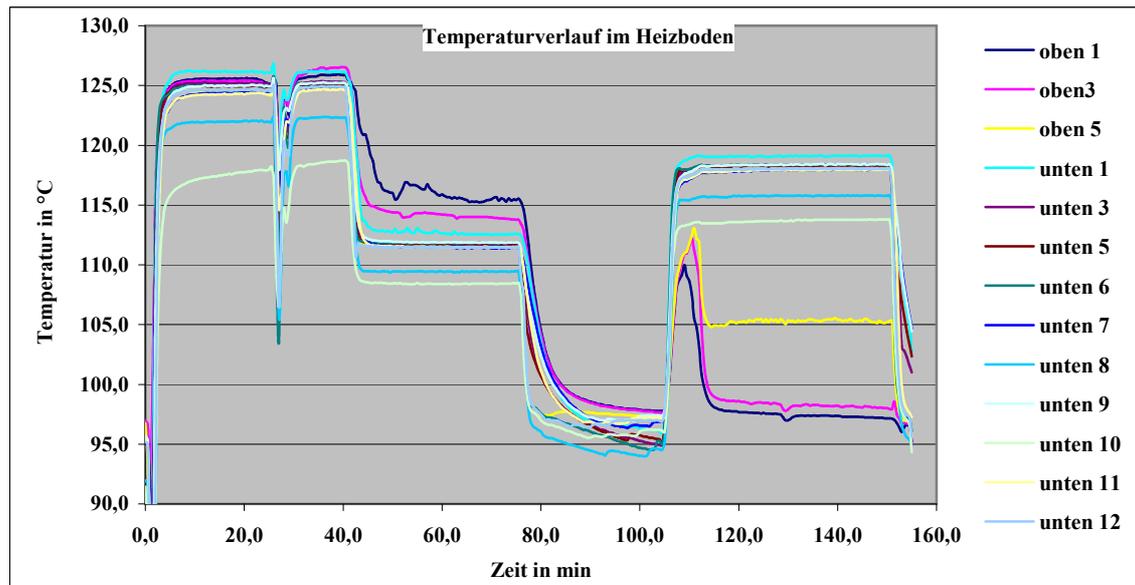


Abbildung 36: Temperaturverteilung im Heizboden [93]

Abbildung 36 zeigt die Temperaturverteilung eines Heizbodens, gemessen an mehreren Stellen (Abbildung 35). Man sieht, dass beim Aufheizen alle Temperaturen weitestgehend gleichmäßig sind. Nur im Bereich der Kondensatauslässe U 12 und U 10 ist die Temperatur niedriger. Die niedrigeren Temperaturen in der Heizzone beim Kochen und Strippen rühren daher, dass in diesen Schritten nur die untere Heizzone verwendet wird.

Abbildung 37 zeigt die Temperaturverteilung in einem Heizboden, bei dem die Kondensatanschlüsse nicht optimal angebracht sind. Die markierten Zonen sind Bereiche, in denen sich Kondensat ansammeln kann. Wenn das geschieht, stehen diese Gebiete nicht mehr als Wärmeübertragungsfläche zur Verfügung. Das kann dann dazu führen, dass höhere Dampfdrücke notwendig sind, um die gewünschten Verdampfungsraten zu erzielen.

Kondensat nach Abscheider:	101,6 °C
Kondensat obere Zone vor Abscheider:	112,7 °C
Kondensat untere Zone vor Abscheider:	112,1 °C
Dampf nach Regelventil:	126,0 °C
Anliegender Dampfdruck:	1,8 barÜ
Korrespondierende Sattdampftemperatur:	123,1 °C
→ Im Heizboden herrschen Sattdampfbedingungen	

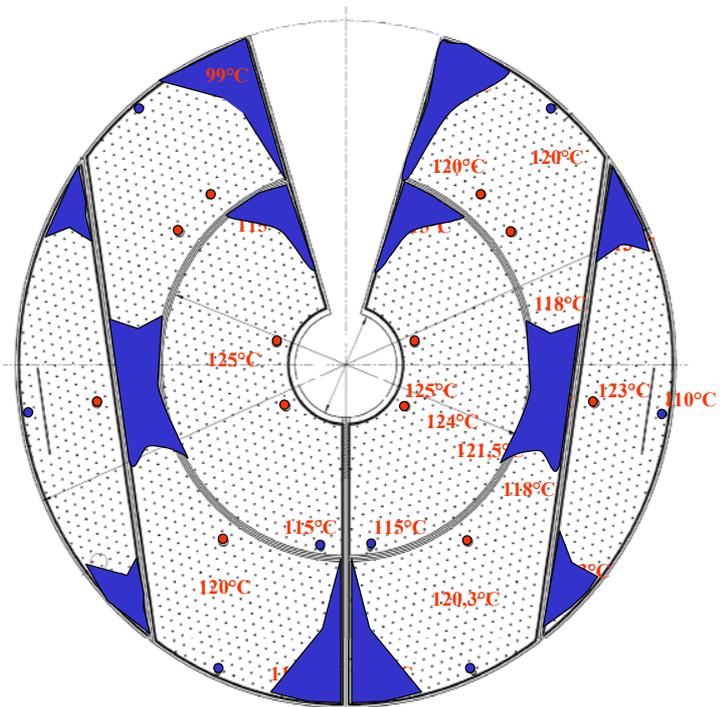


Abbildung 37: Ungünstige Temperaturverteilung im Heizboden [93]

3 Analytische Werte und deren Bedeutung im Brauprozess

3.1 Probenahme

Die Probenahme erfolgte gemäß den Vorschriften der DIN 8777 und der MEBAK Richtlinien [41].

3.1.1 Abweichende Probenahme bei Kühlmitte

3.1.1.1 Konventionelle Systeme

Bei der Kochung mit konventionellen Systemen wird die Probe unmittelbar vor dem Kühler heiß gezogen, um mikrobiologische Kontaminationen auszuschließen.

3.1.1.2 Dünnschichtverdampfer

Beim Dünnschichtverdampfersystem sind bei Kühlmitte je zwei Proben zur Beurteilung erforderlich: Eine wird nach dem Whirlpool gezogen, eine nach dem Verdampfer entnommen. Durch die erste Probe werden die Vorgänge bei der Rast untersucht, mit der zweiten die Wirkung der Ausdampfung. Nur mit der zweiten Probe kann der Vergleich mit anderen Systemen erfolgen, denn erst hier ist der DSVD-Prozess beendet.

3.1.2 Ablauf der Probenahme

Die Proben wurden gekühlt aufbewahrt und so schnell wie möglich weiter verarbeitet, um einer Kontamination vorzubeugen.

Für verlässliche Analysen muss ein Teil der Proben heiß filtriert werden [77].

unfiltrierte Proben:	filtrierte Proben:
Extrakt	Gesamt-N
Dichte	MgSO ₄ -N
Farbe	koag. N
pH	Bitterstoffe
Reduktionsvermögen	FAN
Jodprobe	Iso- α - und α -Säuren
TBZ	
DMS/DMS - P	

Tabelle 1: Behandlung der Proben für die Analysen

3.2 Durchgeführte Untersuchungen an Würzen

3.2.1 Konventionelle Würzeanalysen

Extrakt	MEBAK Band II 2.13.2.3
pH -Wert	MEBAK Band II 2.17.
Farbe	MEBAK Band II 2.16.1
Gesamtlöslicher Stickstoff	MEBAK Band II 2.9.1.
Noch koagulierbarer Stickstoff	MEBAK Band II 2.9.2.
Freier Aminostickstoff	MEBAK Band II 2.9.4.1.1
MgSO ₄ -fällbarer Stickstoff	MEBAK Band II 2.9.3.1
Bitterstoffe, Iso- α - und α -Säure	MEBAK Band II 2.22.
TBZ	MEBAK Band II 2.4.
Reduktionsvermögen	MEBAK Band II 2.20.1
Jodprobe	MEBAK Band II 2.3.2
Feststoffe	MEBAK Band II 2.6.2

Tabelle 2: Übersicht über die konventionelle Analytik

3.2.1.1 Umrechnung der Analysenwerte auf 12 %

Die exakte Ermittlung des Extraktes ist sehr wichtig, denn um die Analysenwerte der einzelnen Versuchsreihen miteinander vergleichen zu können, wurden die Daten auf die gleiche Basis von 12 % bezogen. Extrakt- bzw. konzentrationsbedingte Unterschiede werden somit eliminiert.

Zur Umrechnung auf 12 % wird mit Gewichts-Volumen-% gerechnet.

$$\text{Analysewert (12 \%)} = \frac{\text{Analysewert (x \%)} \cdot 12,56}{\text{GV \% der Probe}}$$

Gleichung 17: Umrechnung der Analysewerte auf 12 % Stammwürze

3.2.1.2 Berechnung der Verdampfung über den Extrakt

Die Berechnung der Verdampfung erfolgt ebenfalls über die ermittelten Extraktwerte.

$$\text{Verdampfung in \%} = \frac{(\text{Extrakt PFV} - \text{Extrakt AW})}{\text{Extrakt PFV}} \cdot 100$$

Gleichung 18: Berechnung der Verdampfung aus den Extraktwerten

Beim DSVD-System werden die Verdampfungen stufenweise ermittelt, denn die Werte, die beim Kochen und Strippen erzielt werden, sind zur Beurteilung der Effizienz der Kochung wichtig. Allerdings ist die Berechnung über den Extrakt mit einem relativ großen Fehler behaftet, sodass die gewonnenen Ergebnisse lediglich einen ungefähren Anhaltspunkt für die Verdampfung liefern. Die Genauigkeit der Berechnung ergibt sich aus der Genauigkeit der Spindelung, hier sind 0,05 °P beim Ablesen die Grenze, d. h. ein abgelesener Wert von 12,0 °P kann 11,95 °P oder auch 12,05 °P sein. Die gleiche Ungenauigkeit kann beim zweiten gemessenen Wert auftreten.

Die folgende Tabelle gibt Aufschluss über die Schwankungsbreite bei den berechneten Verdampfungen.

	gemessen	Min	Max
Gespindeltes Wert PFV	11,5	11,45	11,55
Gespindeltes Wert KM	12,0	11,95	12,05
Berechnete Verdampfung	4,35	3,46	5,24

Tabelle 3: Fehler bei der Berechnung der Verdampfung

Ein weiteres Problem bei dieser Bestimmung der Verdampfung ist, dass Verdünnungen der Würze nicht berücksichtigt werden. Verdünnungen ergeben sich beispielsweise beim Nachspülen der Hopfengabegeräte und Leitungen. Diese Mengen sind nicht unerheblich und können je nach Sudgröße mehrere Hektoliter ausmachen und so die berechneten Werte unbrauchbar machen.

3.2.1.3 pH-Wert

Der pH-Wert ist insbesondere dann wichtig, wenn es um die Beurteilung des Eiweißabbaus, der DMS-P-Spaltung und der Hopfenisomerisierung geht. Die Geschwindigkeit der ablaufenden Reaktionen hängt neben der Temperatur entscheidend vom pH-Wert ab.

Während der Kochung wird die Würze etwas saurer, da die sich bildenden Melanoidine sauer reagieren. Der pH-Wert der Ausschlagwürze soll bei etwa 5,4–5,6 liegen (bei biologischer Säuerung 5,1–5,4). Die MEBAK gibt für helles, untergäriges Vollbier sogar die Spanne von 4,3–4,6 an [63]. Der pH-Wert ist verantwortlich für die Geschwindigkeit folgender Vorgänge bei der Kochung: Ausscheidung von Eiweiß-Gerbstoffverbindungen zur Verbesserung der chemisch-physikalischen Stabilität, Zufärbung der Würze, Charakter der Hopfenbittere und Verbesserung der Resistenz gegen Mikroorganismen bei einem niedrigeren pH [32].

3.2.1.4 Farbe

Die Farbe wird in erster Linie durch das Malz festgelegt. Hier sind die Lösung und die Abdarrtemperatur von entscheidender Bedeutung. Die Farbe nimmt aber auch während des Kochprozesses durch die Bildung von Melanoidinen und durch die Oxidation von Gerbstoffen zu. Hierbei sind die Prozessparameter Kochdauer, Würzetemperatur, pH-Wert, Druck [23] und der Gerbstoffgehalt des eingebrachten Hopfens von Bedeutung [32]. Allerdings wird die spätere Bierfarbe noch nicht während der Kochung festgelegt, sondern sie wird erst nach dem pH-Abfall, welcher während der Gärung erfolgt, fixiert. Durch den pH-Sturz fällt ein Teil der während der Kochung gebildeten Melanoidine wieder aus.

Die Farbzunahme der Würzen im Laufe der Kochung gibt einerseits Aufschluss über die thermische Belastung, andererseits auch über das Maß der Sauerstoffbelastung. Würzen, die einer sehr hohen Temperaturbelastung beim Würzekochen ausgesetzt waren, weisen deutlich höhere Farbzunahmen auf als weniger belastete. Gleichmaßen verhält es sich mit der Sauerstoffbelastung. Eine Kochung unter Luftatmosphäre liefert mehr färbende Substanzen.

3.2.1.5 Gesamtlöslicher Stickstoff

Der Gesamtstickstoff gibt Aufschluss darüber, inwieweit die Proteinbestandteile des Malzes in Lösung gegangen sind.

3.2.1.6 Noch koagulierbarer Stickstoff

Einer der ganz wichtigen Vorgänge beim Kochen der Würze ist das Ausfällen von Eiweiß, auch Bruchbildung genannt. Durch die Ausfällung findet eine Klärung der Würze statt. Dieser Vorgang hat großen Einfluss auf den Geschmack, die Stabilität, die Vollmundigkeit und vor allem auf die Schaumhaltbarkeit. Ziel ist, das Eiweiß so weit auszufällen, dass man keine negativen Auswirkungen beim Gärverlauf durch ein Verschmieren der Hefe hat und auch eine ausreichende kolloidale Stabilität gewährleistet ist.

Der noch koagulierbare Stickstoff dient als Maß dafür, wie weitreichend die Eiweißausscheidung beim Würzekochen stattgefunden hat. Wenn die Werte für den noch koagulierbaren Stickstoff in der kalten Ausschlagwürze zu hoch sind, muss man mit einer niedrigen chemisch-physikalischen Stabilität rechnen. Ist die Ausfällung zu weitreichend, können Schaumprobleme im fertigen Bier die Folge sein [63].

Der Gehalt an noch koagulierbarem Stickstoff gilt als technologische Leitsubstanz. Normwerte sind schwierig festzulegen, da diese immer in Abhängigkeit des verwendeten Malzes und des angewendeten Maischverfahrens zu sehen sind. In der Literatur sind für ungekochte Würze 3,5–7 mg/100ml und 1,5–2,5 mg/100ml für gekochte Würze angegeben [52].

3.2.1.7 Freier Aminostickstoff

Der FAN als niedermolekulare Stickstoffverbindung ist wichtig für die Ernährung der Hefe zum Aufbau neuen Zellmaterials [25].

3.2.1.8 MgSO₄-fällbarer Stickstoff

Der MgSO₄-fällbare Stickstoff repräsentiert den hochmolekularen Anteil der Eiweißfraktionen. Ihm wird ein Zusammenhang mit der Schaumhaltbarkeit im Bier nachgesagt.

3.2.1.9 DMS-Precursor und freies DMS

DMS und DMS-P werden gaschromatographisch bestimmt. Wenn das freie DMS über den Geschmacksschwellenwert kommt, verleiht es dem Bier eine sehr unangenehme kohlarartige Note. Das freie DMS ist als Indikator für die Ausdampfung anzusehen. Im Allgemeinen steht es für eine Vielzahl von Aromastoffen, die ausgetrieben werden müssen.

Dimethylsulfid kommt in Bier und Würze in unterschiedlichen Mengen vor, seine Auswirkungen auf Geruch und Geschmack sind umstritten. Der Geschmacksschwellenwert des DMS wird mit 50–60 µg/l angegeben, dennoch ist teilweise bei Gehalten von 100–120 µg/l im fertigen Bier noch keine Geschmacksbeeinträchtigung zu bemerken.

Die Bildung des DMS erfolgt aus S-Methyl-Methionin, dem so genannten DMS-Precursor, der beim Mälzen entsteht. Seine Menge ist abhängig von der Gerstensorte, dem Mälzungsverfahren und vor allem von der Intensität und Höhe der Abdarrung. Das DMS-P ist hitze-labil und zerfällt deshalb während der Kochung in freies Dimethylsulfid, das dann wiederum bei der Kochung bis unter den Geschmacksschwellenwert ausgedampft werden muss.

DMS-P ist der Vorläufer des freien DMS und wird unter der Einwirkung von Hitze zu freiem DMS gespalten. Bei Temperaturen unter 90 °C ist die Spaltung jedoch deutlich verlangsamt. Die DMS-P-Spaltung ist besonders hinsichtlich der Whirlpoolrast von Interesse. In diesem Schritt steht die Würze je nach Geometrie des Whirlpools, Eintrittsgeschwindigkeit und Whirlpoolfähigkeit der Würze zwischen 15 und 40 Minuten bei nahezu Kochtemperatur. Freies DMS wird gebildet und kann normalerweise nach der Rast nicht mehr ausgetrieben werden [37][80]. Aus diesem Grund sollten bei Kochende mit konventionellen Systemen DMS und DMS-P zusammen 100 µg nicht überschreiten, damit der Geschmacksschwellenwert nicht erreicht werden kann.

DMS-P wird in der kalten Würze nicht weiter umgesetzt und die Stoffzusammensetzung ist fixiert. Aus diesem Grund interessiert bei den Systemen, bei denen die Würze nach der Rast gestrippt werden kann, bei Kühlmittle nur der Wert für das freie DMS.

3.2.1.10 Bitterstoffe, Iso- α - und α -Säure

Die wichtigsten Bitterstoffe von Würze und Bier sind die Iso- α -Säuren. Sie verleihen dem Bier die typische Bittere und das Hopfenaroma. Die Bitterstoffausbeute, d. h. wie viel der eingesetzten α -Säuren tatsächlich in der Würze bzw. im Bier verbleiben, ist im Wesentlichen von der Hopfenkochdauer abhängig. Aber auch eine lange Lagerzeit und eine starke Entbitterung während der Gärung sowie der Druck bei der Kochung und bei dem Gär- und Reifungsverfahren sind ausschlaggebend für die Bitterstoffausbeute [52].

Die Bestimmung der Bitterstoffe, Iso- α - und α -Säuren erfolgt spektralphotometrisch. Die Hopfenisomerisierung spielt für die Beurteilung eines Kochsystems eine wichtige Rolle. Besonders hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit muss die Isomerisierung möglichst weitreichend sein. Das Verhältnis der Iso- α - und α -Säuren gibt hierüber Aufschluss.

3.2.1.11 Thiobarbitursäurezahl (TBZ)

Die TBZ gibt Aufschluss über die thermische Belastung der Würzen. Erfasst werden dabei 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) und Produkte der Maillard-Reaktion, im Besonderen die Stickstoffheterocyclen. Eine intensivere und längere Kochung führt zu einer höheren TBZ und eventuell auch zu einem brotartigen Fehl aroma im Bier. Will man allerdings einen Rückschluss von der TBZ auf die Kochung ziehen, muss man beachten, dass ein Großteil der TBZ schon durch den Rohstoff Malz eingebracht wird. Bei der Bewertung der Ergebnisse ist deshalb nur die Zunahme der TBZ relevant. Hohe thermische Belastungen führen zu einer verschlechterten geschmacklichen Stabilität bei den hergestellten Bieren. Darüber hinaus ist mit einer hohen thermischen Belastung auch immer eine Farbzunahme verbunden [3][4].

3.2.1.12 Reduktionsvermögen

Das Reduktionsvermögen gibt Aufschluss darüber, inwieweit die Würze in der Lage ist, eventuell vorhandenen Sauerstoff abzufangen. Wenn Würzen Sauerstoff ausgesetzt waren, so zeigen sie schlechtere Werte beim Reduktionsvermögen. Besonders im Heißbereich hat Sauerstoff negative Auswirkungen, da es direkt zu Oxidationsvorgängen kommt, die vor allem die Geschmacksstabilität herabsetzen [13].

3.2.1.13 Jodprobe

Mit der photometrischen Jodprobe werden höhermolekulare Dextrine und Stärke erfasst.

3.2.1.14 Feststoffe

Der Gehalt an Feststoffen gibt Aufschluss über die Klärwirkung des Whirlpools. Beim DSVD-System kommt es durch das Strippen kurz vor dem Kühlen nochmals zu einer Eiweißausfällung. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die geforderten Grenzwerte eingehalten werden. Die Abtrennung der Feststoffe vor dem Anstellen der Würzen sollte nach heutiger Meinung vollständig sein. Es gibt zwar Hinweise, dass die aus dem Heißtrub

stammenden Feststoffe eine klärende Wirkung haben, die denen der Biospäne ähnlich ist, allerdings sollen die Nachteile deutlich überwiegen. So geht mit der Anwesenheit des Heißtrubs im gärenden Jungbier immer ein Verschmieren der Hefe einher. Heißtrub kann auch zu Farb- und Geschmacksfehlern führen und die Schaumeigenschaften negativ beeinflussen [52].

Über die Notwendigkeit der Abtrennung des Kühltrubes differieren die Meinungen. Im Allgemeinen herrscht die Ansicht vor, dass auch der Kühltrub möglichst vollständig entfernt werden sollte. Doch bereits früher wurde vor zu weitgehender Abtrennung gewarnt, da sie für einen Mangel an längerkettigen Fettsäuren und damit verbundener schleppender Gärung verantwortlich sein kann. In neueren Publikationen wird sogar dazu geraten, die Kühltrubabtrennung, eine gute Heißtrubabtrennung vorausgesetzt, nicht mehr vorzunehmen. Die Ursache liegt vor allem in den niedrigeren Eiweißgehalten der heutigen Malze [9].

3.2.1.15 Trübungsmessung

Die Trübungen wurden online mit optischen Trübungsmessern unterschiedlicher Hersteller erfasst. Die Würzen sollten möglichst blank sein, damit keine Nachteile bei der Gärung entstehen.

3.2.2 Sonderanalytik bei Würzen

3.2.2.1 Bestimmung der vergärbaren Zucker

Die Bestimmung der vergärbaren Zucker erfolgte mittels HPLC-Analytik nach MEBAK Band III 3.2. Die von der Hefe vergärbaren und in der Bierwürze vorliegenden Kohlehydrate sind als Hexosen Glucose und Fructose, als Disaccharide Saccharose und Maltose sowie als Trisaccharid Maltotriose. Niedere und höhere Dextrine werden von der Hefe nicht aufgenommen und somit auch nicht vergoren. Sie verbleiben im Bier als so genannter Restextrakt.

Normwerte für die Zuckerzusammensetzung einer Würze mit 12 °P sind etwa: 2 g/l Fructose, 11 g/l Maltotriose, 54 g/l Maltose, 11 g/l Glucose, 2 g/l Saccharose.

3.2.2.2 Bestimmung des Aminosäurespektrums

Die Bestimmung der Aminosäuren erfolgte mittels HPLC-Analytik nach MEBAK Band III 3.3. Die Aminosäuren werden durch das Malz in die Würze eingebracht. Sie sind ausschlaggebend für den Aminosäurepool der Hefe, beeinflussen den Ablauf der Gärung und die Bildung von Gärungsnebenprodukten. Weiterhin haben sie Einfluss auf Hefevermehrung, Geschmack und Aroma, Schaum und Stabilität. Normwerte für die Menge an Aminosäuren sind 170–190 mg/100ml. Diese Menge sollte ungefähr 20–25 % des Gesamtstickstoffs betragen.

3.2.2.3 Bestimmung der Würzearomastoffe

Auch die Erfassung der Würzearomastoffe erfolgte mittels GC-Analytik. Diese teilweise flüchtigen Substanzen eignen sich sehr gut, um den Prozess der Würzekochung analytisch zu verfolgen. Durch Maillard-Reaktionen, Streckerabbau und die Karamellisierung von Zuckern erfahren die Würzearomastoffe im Laufe der Kochung starke Veränderungen. Hervorgerufen werden die Reaktionen vor allem durch die thermische Belastung der Würze. Gleichzeitig werden bei der Kochung Aromastoffe ausgetrieben, sodass sich bei einigen Substanzen ein Gleichgewicht zwischen Neubildung und Ausdampfung einstellt [36]. Die Zusammensetzung der Aromastoffe wird neben der thermischen Belastung entscheidend durch die Verdampfung beim Kochen beeinflusst [81]. Ein Stoff, der lediglich ausgedampft wird und nicht während der Kochung nachgebildet wird, ist das Hexanal. Es eignet sich aus diesem Grund sehr gut zur Beurteilung der Ausdampfung bei der Kochung [70]. Etliche Substanzen, die im Verlauf der Würzekochung gebildet werden, sind relevant für die Alterungsbeständigkeit des Bieres. Viele Maillard-Produkte, die bei der Reaktion von Aminosäuren mit Dicarbonylverbindungen entstehen, sind Vorstufen für die Alterungskomponenten im abgefüllten Bier [36]. In Abbildung 38 sind die beim Streckerabbau ablaufenden Reaktionen dargestellt. Die bei diesem Abbau entstehenden Streckeraldehyde tragen wesentlich zum Aroma bei [1].

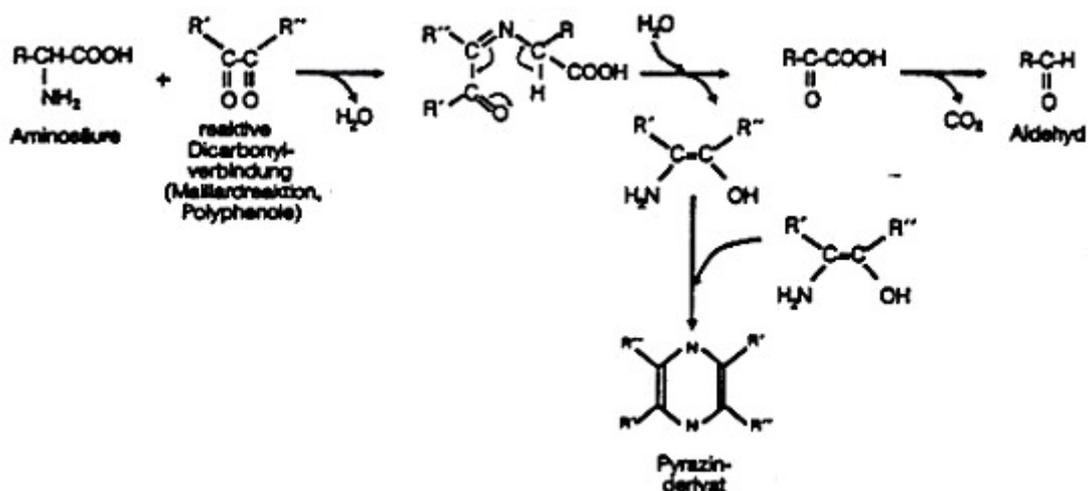


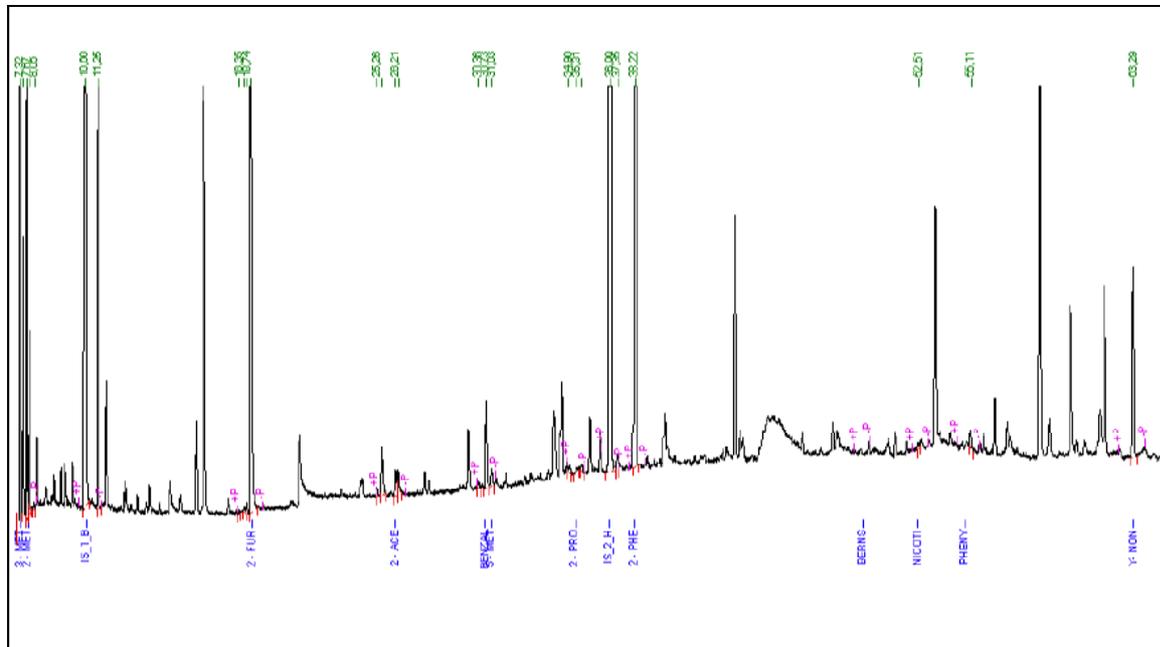
Abbildung 38: Streckerabbau [1]

3.2.2.4 Ausgewählte Aromastoffe

Die Bestimmung der Würzearomastoffe erfolgt gaschromatographisch. Die flüchtigen Würzearomastoffe werden zunächst mittels Wasserdampfdestillation in eine Wasservorlage überführt. Das gewonnene Destillat wird mit Lösungsmittel ausgeschüttelt. Die so gewonnene organische Phase wird dann unter Stickstoffatmosphäre aufkonzentriert. Verschiedenste Arbeiten haben diese Methodik genau beschrieben und verfeinert [11][36].

Im Brauprozess haben sich einige wichtige Aromastoffe herauskristallisiert, die für die Beurteilung der Würzekochung und die dabei ablaufenden Vorgänge relevant sind. Diese sollen nun kurz vorgestellt werden [11].

Die folgende Abbildung zeigt ein Chromatogramm der Würze aromastoffe.



3.2.2.4.4 2-Phenylethanal

2-Phenylethanal entsteht beim thermischen Abbau von Phenylalanin. Es verleiht dem Bier eine veilchen-, honigartige, blumige Note. Die Geruchsschwelle ist mit 4 ppb sehr niedrig. Der Gehalt an Phenylethanal lässt Rückschlüsse auf die Ausdampfung und die thermische Belastung zu.

3.2.2.4.5 Pentanal

Pentanal entsteht bei der Autoxidation der Linolsäure oder aus der Autoxidation von tr-2-Nonenal. Das Aroma ist stechend und bananenartig. Der Schwellenwert in Wasser liegt bei 10 ppb [21].

3.2.2.4.6 2-Pentanon

Bei der Autoxidation der Capronsäure wird 2-Pentanon gebildet. Der Geruch ist fruchtig bananenartig. Die Geschmacksschwelle im Bier liegt bei 30 ppm. 2-Pentanon ist Ausdampfindikator.

3.2.2.4.7 Hexanal

Hexanal ist der klassische Ausdampfindikator, denn es ist leicht wasserdampflich. Vor allem wird es im Laufe der Kochung nicht nachgebildet. Es entsteht bei der Autoxidation der Linolsäure oder durch den enzymatischen Abbau des Hydroperoxids. Die Geruchsschwelle in Wasser liegt bei 4–5 ppb. Der Geschmackseindruck ist der von grünen Blättern, er erscheint talgig.

3.2.2.4.8 Heptanal

Heptanal entsteht bei der Autoxidation von Ölsäure und Linolsäure sowie aus tr-2-Nonenal. Das Aroma ist ölig-fettig. In Wasser ist es ab 50 ppb bemerkbar.

3.2.2.4.9 tr-2-cis-6-Nonadienal

Dieser Stoff ist im Bier für das Cardbordflavor verantwortlich. Er ist bereits in kaum messbaren Bereichen bemerkbar und dient als Ausdampfindikator. Tr-2-cis-6-Nonadienal entsteht aus Linolsäure oder bei der Aldolkondensation von Acetaldehyd und Heptanal [21].

3.2.2.4.10 2-Furfural

Furfural entsteht bei der Maillard-Reaktion und aus Pentosen bei Wärmezufuhr unter Wasserabspaltung. Weil diese Verbindung den Fortschritt der Maillard-Reaktion widerspiegelt, ist sie der klassische Indikator für die Hitzebelastung im Verlauf der Würzekochung [70]. Das Aroma geht in die Richtung von frisch gebackenem Brot oder ins Papierartige. Der Geschmacksschwellenwert ist mit 150 ppm in Wasser relativ hoch [21]. Dunkle oder mit Farbmalz hergestellte Biere weisen von Haus aus höhere Werte auf.

3.2.2.4.11 2-ac-Furan

Das 2-ac-Furan entsteht bei den gleichen Vorgängen wie das Furfural und ist deshalb ebenfalls ein guter Indikator für die Hitzebelastung. Es hat eine brenzlige, phenolische Note und einen Schwellenwert von ca. 80 ppm.

3.2.2.4.12 γ -Nonalacton

γ -Nonalacton entsteht bei der Erhitzung von Fett und weist ein kokosartiges Aroma auf. γ -Nonalacton kann ab ca. 65 ppb in Wasser bemerkt werden.

3.2.2.4.13 2-me-Butanol und 3-me-Butanol

Diese 2 Verbindungen sind mit Siedepunkten von 129 °C bzw. 132 °C hochsiedende Komponenten [85].

3.2.2.4.14 1-Pentanol

Bei der Reduktion von Pentanal entsteht Pentanol. Der Siedepunkt von 1-Pentanol liegt bei 138 °C [85].

3.2.2.4.15 1-Hexanol

Bei der Reduktion von Hexanal entsteht Hexanol. Der Siedepunkt von 1-Hexanol liegt bei 157 °C [85].

3.2.2.4.16 1-Octanol

Der Siedepunkt von 1-Octanol liegt bei 195 °C [85]. Es ist ein Reduktionsprodukt von Octanal und hat ein fruchtiges, öliges Aroma. Der Schwellenwert ist mit 900 ppb relativ hoch.

3.2.2.4.17 Phenyl-OH

Phenylethanol weist ein rosenartiges Aroma auf und entsteht bei der Reduktion von 2-Phenylethanal. 2-Phenyl-OH hat einen Siedepunkt von etwa 220 °C. Der Schwellenwert liegt bei 125 ppm [38].

3.3 Bieranalysen

Zur Analyse der fertigen Biere wurde frisch abgefülltes Flaschenbier herangezogen, um eventuelle Oxidationsvorgänge oder Fehler durch unsachgemäße Lagerung auszuschließen. Die folgenden Analysen wurden zusätzlich zu den Analysen vorgenommen, die schon für die Würze aufgeführt sind.

3.3.1 Konventionelle Analytik

3.3.1.1 Endvergärungsgrad

Der Endvergärungsgrad wurde nach der Gärrohrmethode, MEBAK Band II 2.11.1, ermittelt.

3.3.2 Schaumbestimmung nach Ross & Clark und nach NIBEM

Beide Methoden zur Bestimmung des Schaums erfolgten nach MEBAK Band II 2.23.2 und 2.23.3.

3.3.2.1 Forciertest

Die Vorausbestimmung der chemisch-physikalischen Stabilität erfolgte nach MEBAK Band II 2.19.2.1 als 0/60-°C-Bestimmung.

3.3.2.2 Verkostung

Die Biere wurden nach dem DLG-Schema verkostet (MEBAK Band II 2.10.3).

3.3.3 Sonderanalytik

3.3.3.1 Bieraromastoffe

Um die Biere hinsichtlich ihrer Geschmacksstabilität beurteilen zu können, wurden die Bieraromastoffe bzw. Alterungsindikatoren in den frischen und forciert gealterten Bieren ermittelt. Die Bestimmung erfolgt, wie auch bei den Würzearmstoffen, über GC-Analytik. Die Methodik hierzu war ebenfalls Thema verschiedener Arbeiten [15][36][50].

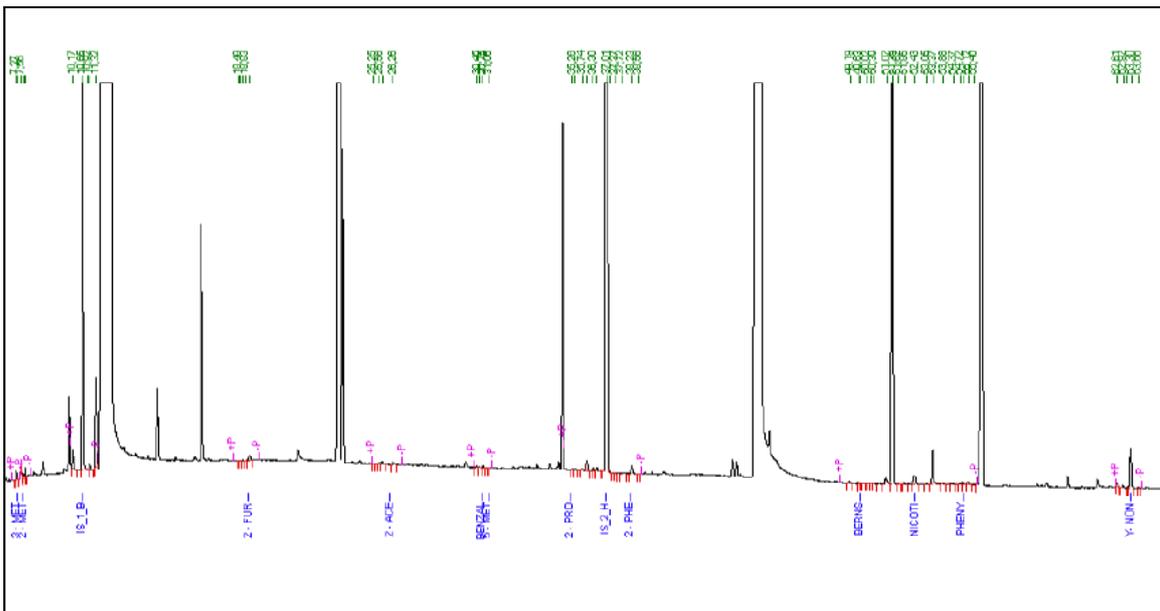


Abbildung 40: Chromatogramm der Bieraromastoffe [22]

3.4 Sonstige erfasste Werte

3.4.1 Erfassung der Brüdenkondensatmenge

Bei den Anlagen, die mit einem Pfannendunstkondensator ausgestattet waren, wurden die Mengen an Brüdenkondensat erfasst. Hierzu wurde das vom Pfannendunstkondensator kommende Brüdenkondensat über eine in die Leitung eingebaute Wasseruhr gemessen. Damit eine einwandfreie Funktion gegeben ist, darf das Kondensat nicht zu heiß sein. War

kein Kondensatkühler vorhanden, wurde ein mobiler Kühler in die Brüdenkondensatleitung integriert. Die Erfassung der Brüdenkondensatmenge ist die genaueste Methode der Bestimmung der Verdampfung. Zwar besteht auch hier die Möglichkeit, dass Restbrüden über Dach gehen, jedoch ist diese Menge im Verhältnis gering.

3.4.2 Erfassung der Dampfmenge

Um die Wirtschaftlichkeit der Systeme zu bestimmen, wurde teilweise auch der Dampfverbrauch ermittelt. Hier ist allerdings der Aufwand etwas größer. Eine Möglichkeit besteht darin, eine Dampfmenagemessung in die Leitung einzubauen. Dies ist mit Sicherheit die eleganteste Lösung und bietet viele Vorteile. Zum einen kann die Kochung über die Energiezufuhr geregelt werden, zum anderen kann die zugeführte Wärmemenge direkt am Gerät abgelesen werden. Eine Steuerung der Kochung über die Dampfmenagemessung bietet sehr konstante Produktionsbedingungen. Der Einfluss einer Verlegung der Heizflächen kann bis zu einem gewissen Grad ausgeglichen werden.

3.4.3 Erfassung der Dampfkondensatmenge

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung der Energiemenge ist, die Menge an Dampfkondensat zu erfassen. Diese Methode ist allerdings mit relativ hohem Aufwand verbunden, denn irgendwo im Kondensatsystem muss die Leitung unterbrochen werden, um das Kondensat aufzufangen. Da das Kondensatsystem meist unter einem leichten Druck steht, ist die Temperatur normalerweise über 100 °C. Um eine vernünftige Messung durchführen zu können, muss das Kondensat deshalb über einen Wärmetauscher gekühlt werden, sodass keine Nachverdampfung stattfindet. Nach der Messung kann das Kondensat dann auf den Gully gefahren werden oder über eine Kondensatpumpe wieder in das System eingespeist werden. Bei der ersten Variante ist das Brüdenkondensat verloren, und der Kessel muss mit frischem Kesselspeisewasser versorgt werden.

3.5 Statistische Auswertung der Messergebnisse

Alle Analysen der Proben wurden mindestens als Doppelbestimmungen durchgeführt. Zur Auswertung der Analysenergebnisse wurde das arithmetische Mittel der Einzelwerte eingesetzt. In einer Versuchsreihe befanden sich zwischen 2 und 5 Sude mit einer gewählten Anlageneinstellung. Innerhalb dieser Reihen wurden aus den Werten der einzelnen Versuchsparameter nach den folgenden Formeln Mittelwert, Standardabweichung und Konfidenzintervall des Mittelwertes bestimmt.

3.5.1 Mittelwert

Der arithmetische Mittelwert der Stichprobenwerte wird auch als Lageparameter bezeichnet und stellt den Wert einer Versuchsreihe dar, der am nächsten am wahren Wert liegt. Er ist definiert als [67]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i .$$

Gleichung 19: Mittelwert

n = Anzahl der Stichproben

x_i = Wert eines unabhängigen Einzelergebnisses

3.5.2 Standardabweichung

Ein Maß für die Streuung um den Mittelwert ist die Varianz. Je näher Einzelwerte am Mittelwert liegen, je kleiner also die Varianz ist, desto größeres Vertrauen kann dem Mittelwert entgegengebracht werden. Die positive Quadratwurzel aus der Varianz s^2 heißt Standardabweichung s und hat die gleiche Dimension wie die Stichprobenwerte. Für die Standardabweichung gilt [90]:

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

Gleichung 20: Standardabweichung

3.5.3 Konfidenzintervall des Mittelwertes

Das Konfidenzintervall a ist ein aus Stichproben berechnetes Intervall, das mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit P % den wahren, jedoch unbekanntem Mittelwert μ überdeckt:

$$a = t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} .$$

Gleichung 21: Konfidenzintervall

t = Wert der Student-t-Verteilung.

3.5.4 Wahrer Wert

$$\mu = \xi \pm a .$$

Gleichung 22: Wahrer Wert

Im Rahmen von Analysen können Aussagen immer nur auf einer begrenzten Anzahl von Resultaten aufbauen. Zur Berechnung des Vertrauensintervalls wird deshalb nicht die Gaußverteilung, sondern die allgemeiner anwendbare t-Verteilung verwendet, da die Verteilungsdichte von den Gesetzen der Normalverteilung abweichen kann. Diese Unsicherheit wird in der modifizierten symmetrischen Verteilung, der t-Verteilung, berücksichtigt. Die Häufigkeitsmaxima von Gauß- und t-Verteilung liegen zwar beim gleichen Abszissenwert, jedoch sind im Gegensatz zur Normalverteilung Höhe und Breite von Kurven der t-Verteilung abhängig vom Freiheitsgrad f der zugehörigen Standardabweichung. Unter einem Freiheitsgrad versteht man die Zahl der frei verfügbaren Beobachtungen, d. h. dem Stichprobenumfang minus der Anzahl der geschätzten Parameter, hier $f = n - 1$. Je niedriger die Zahl der Freiheitsgrade, desto flacher verläuft bei gleicher Standardabweichung die Kurve, und die Integralgrenzen entfernen sich bei vorgegebener statistischer Sicherheit P immer mehr vom Mittelwert [12].

Zur Auswertung der ermittelten Werte wird mit einer statistischen Sicherheit $P = 95\%$ gerechnet, d. h. 5% des Stichprobenumfangs überschreiten das Intervall. Nachfolgend sind die t-Werte bei $P = 95\%$ für den zweiseitigen Test und verschiedene Freiheitsgrade f aufgeführt [68].

Stichprobe	Freiheitsgrad f	t-Wert
3	2	4,303
4	3	3,182
5	4	2,776
6	5	2,571

Tabelle 4: Werte der t-Verteilung

4 Beschreibung des Verfahrens und der untersuchten Anlagen

4.1 Verfahren der Würzekochung mit Dünnschichtverdampfer

Bei dem vorgestellten Kochsystem handelt es um einen Dünnschichtverdampfer mit einer etwas ungewöhnlichen Form. Die Würze wird zum Aufheizen und Kochen mehrmals in dünner Schicht über eine beheizte, konische Fläche gepumpt. Der Whirlpool wird als Sammelgefäß für die Würze umfunktioniert. Beim Kochen wird eine sehr große Ausdampfoberfläche geschaffen, über die alle Würzeteilchen im Verlauf der Kochzeit mehrmals geführt werden. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass die gesamte Würze gleich behandelt wird. Ziel ist, die für das Kochen erforderliche Gesamtverdampfung so gering wie möglich zu halten. Der Prozess der Würzekochung lässt sich in vier Phasen unterteilen.

4.1.1 Aufheizen

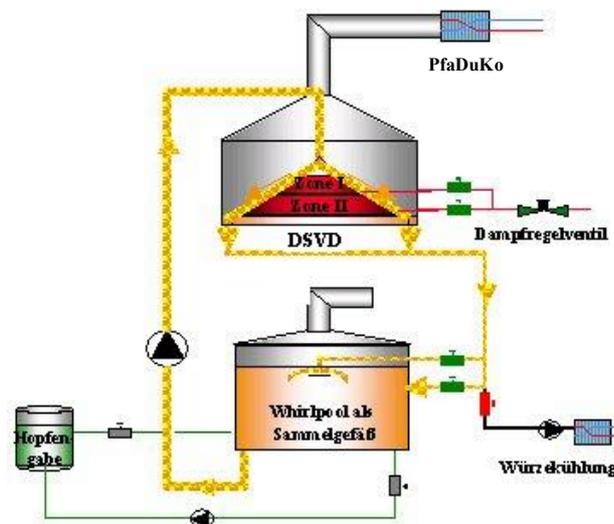


Abbildung 41: Aufheizen

Ohne Vorlaufgefäß wird die Würze direkt in den Whirlpool abgeläutert. Allerdings eignet sich dieser Fall nur für niedrige Sudfolgen, da der Whirlpool während der gesamten Läuterzeit belegt ist. Sobald das Abläutern beendet ist, beginnt das Umwälzen der Würze. Die Läuterwürze kann auch über einen Läuterwürzeerhitzer vorgewärmt werden. Dabei wird sie zunächst in ein Vorlaufgefäß abgeläutert. Nach Läuterende wird die Würze über den LWE gepumpt und auf etwa 6 °C unter Kochtemperatur erwärmt. Im Anschluss daran wird die Würze über die beheizte Fläche des DSVD in den Whirlpool gepumpt. Beim Befüllen ist nur der untere Einlauf des Whirlpools geöffnet, um eine Sauerstoffaufnahme zu vermeiden. Dabei sind beide Heizzonen des Konus mit einem Heißdampfdruck von bis zu 3,0 bar beaufschlagt und die Umwälzpumpe leistet ca. 6 Umwälzungen/h. Die Würze wird beim Überströmen des Heizkegels erhitzt. Etwa 10 Minuten nach Umwälzbeginn herrschen im DSVD Kochbedingungen. Die Aufheizzeit dauert so lange, bis im Whirlpool eine einheitliche und konstante Temperatur, auf 300 m ü. NN etwa 98 °C, erreicht ist. Der

Rücklauf der Würze in den Whirlpool erfolgt über den zentralen Anstich, um die heiße Würze von oben aufzuschichten.

Da sich das Ende des Aufheizvorganges aus der Temperatur im WHP ergibt, kommt es im DSVD schon während der Aufheizphase zu etwas Verdampfung. Um diese so gering wie möglich zu halten, wird die Dampfmenge oder der Dampfdruck gegen Aufheizende leicht abgesenkt.

4.1.2 Kochen

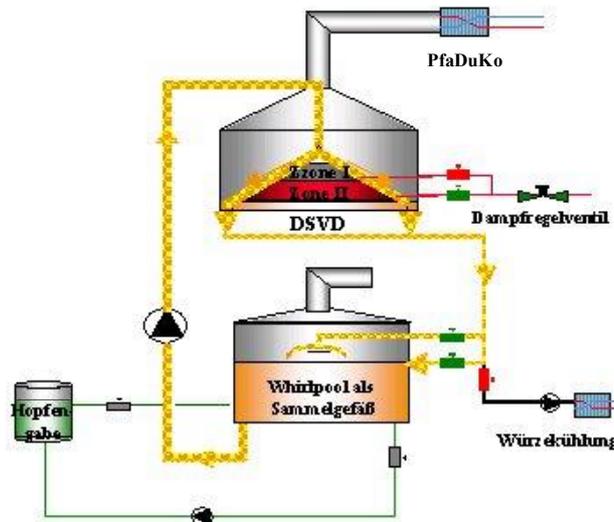


Abbildung 42: Kochen

Das eigentliche Kochen nimmt mit dem DSVD-System nur noch etwa 35 Minuten in Anspruch. Hier kann aber je nach technologischen Vorgaben die Zeit den Erfordernissen angepasst werden. Der Dampfdruck wird abgesenkt, um die Verdampfung zu minimieren. Ziel des Kochens ist, die von der Temperatur abhängigen Umsetzungsvorgänge ablaufen zu lassen. Im Kochverlauf können unterschiedliche Kochphasen eingestellt werden. Dabei werden die Pumpenleistung und die zugeführte Dampfmenge variiert. Die Würze strömt teils über einen Anstich, der mit 23° zum Radius angestellt ist, zurück in den Whirlpool. Teilweise wird auch über den mittleren Anstich gefahren, um eine Homogenisierung des Whirlpoolinhaltes zu erzielen. Die Verdampfung während des Kochens liegt bei etwa 1,5–2,5 %. Dies entspricht bei einer 12 %igen Würze einer Extraktzunahme von etwa 0,2 %. Die Verdampfung kann aber über die eingesetzte Dampfmenge bzw. über die eingesetzten Dampfdrücke variiert werden.

4.1.3 Whirlpoolrast

Nach Ablauf der Kochzeit wird der Whirlpoolinhalt in Rotation versetzt. Dazu wird die Würze noch einige Minuten über die Heizfläche gepumpt, ohne dass Dampf anliegt. Dabei wird die überschüssige Energie aus dem Heizboden abgebaut und so ein Festtrocknen von Würzeresten während der Whirlpoolrast vermieden. Im Anschluss an diesen so genannten

Nachlaufschritt kommt die Rast zur Abscheidung des Heißtrubs. Sie dauert etwa 20 bis 25 Minuten. Die Dauer der Rast richtet sich vor allem nach der Whirlpoolgeometrie.

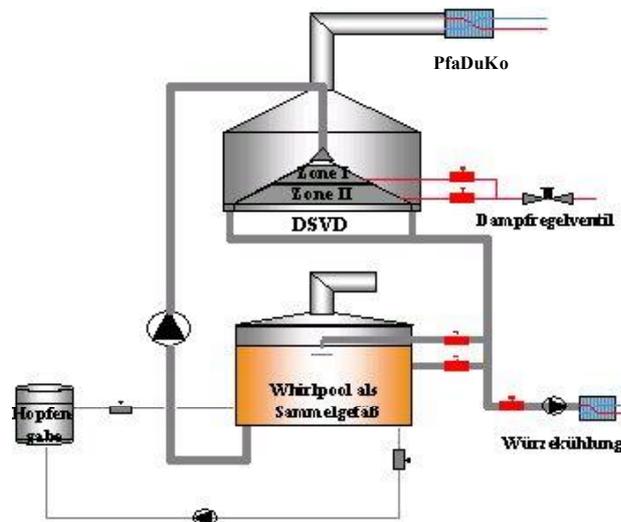


Abbildung 43: Whirlpoolrast

Bei sehr ungünstigen Werten für das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser kann die Rast bis zu 40 Minuten in Anspruch nehmen. Während der Rastzeit werden durch die immer noch hohen Temperaturen unedle Geschmacksstoffe gebildet, die bei herkömmlichen Systemen nicht mehr entfernt werden können. Vornehmlich handelt es sich hier um schwefelhaltige Verbindungen, wie z. B. Dimethylsulfid (DMS), das durch die hohen Temperaturen aus dem Vorläufer DMS-P gebildet wird.

4.1.4 Strippen

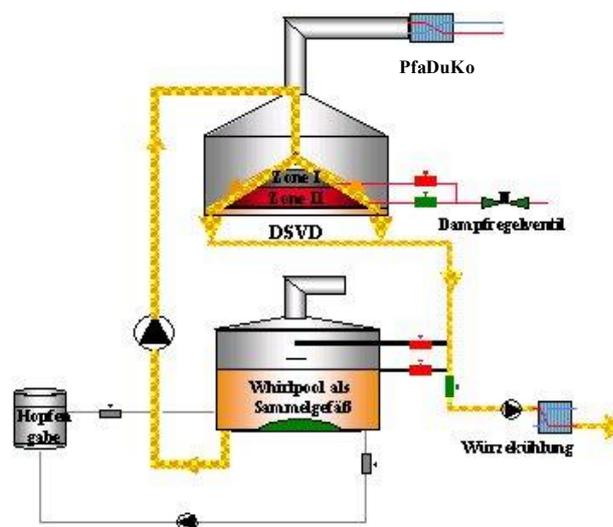


Abbildung 44: Strippen

In diesem Schritt, der in Anlehnung an ein amerikanisches Verfahren Strippen genannt wird, strömt die Würze auf dem Weg vom Whirlpool zur Würzabkühlung noch einmal über

die Heizfläche. Die Leistung der Umwälzpumpe ist dabei auf die der Würzekühlung abgestimmt und die Heizzone mit einem Dampfdruck von 0,5–2 bar beaufschlagt, je nachdem, wie intensiv dieser Vorgang stattfinden soll. Auf diese Weise werden gezielt unedle Aromastoffe, die während der Whirlpoolrast nachgebildet wurden, auf ein Minimum reduziert.

Die Verdampfung während des Strippens liegt bei etwa 1,5–2,0 %. Dies entspricht bei einer 12 %igen Würze einer Extraktzunahme von ebenfalls etwa 0,2 %. Je nach täglicher Sudzahl und der damit verbundenen Auslegung des Würzekühlers liegt die Strippzeit zwischen 25 und 70 Minuten.

4.1.5 Hopfengabe

Mit dem DSVD-System ist die Kochzeit im Vergleich zu konventionellen Kochsystemen stark verkürzt. Um genügend Zeit zur Realisierung mehrerer Hopfengaben zur Verfügung zu haben, kann die erste Gabe bereits beim Befüllen bzw. Heizen erfolgen. Auf diese Weise steht in jedem Fall ausreichend Zeit zur Isomerisierung des Hopfens zur Verfügung. Zum Einsatz kommen die üblichen Hopfengabesysteme wie Hopfengabegeräte oder automatische Extrakt dosagesysteme. An Hopfenprodukten können sowohl Pellets als auch Extrakt verwendet werden. Die Hopfengabe selbst erfolgt direkt in den Whirlpool.

4.2 Beschreibung der untersuchten Anlagen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedenste Anlagen untersucht. Den Anfang machte eine Pilotanlage. Zum Schluss kam eine Anlage für 240 hl heiße Ausschlagwürze.

4.2.1 Pilotanlage 1 + 2



Abbildung 45: Pilotanlage

Um Versuche zur prinzipiellen Eignung des Verfahrens durchzuführen, entstand zunächst eine Pilotanlage. Später wurde eine zweite Anlage gebaut, mit der Versuche in unterschiedlichen Brauereien gefahren wurden. Abbildung 45 zeigt eine der Anlagen. In einem Gestell sind DSVD und Whirlpool installiert. Rechts ist der Whirlpool zu sehen, der bei der ersten Pilotanlage ein Fassungsvermögen von 250 l hatte. Bei der zweiten Pilotanlage wurde der Whirlpool für bis zu 550 l ausgelegt, um auch Grenzfälle simulieren zu können. Ansonsten sind die Anlagen weitestgehend baugleich. Auf der linken Seite befindet sich etwas erhöht der DSVD mit der konischen Heizfläche. Um die Versuche so gut wie möglich reproduzierbar durchführen zu können, wurden beide Systeme mit einer Vollautomatik auf S7-Basis und einem Rezeptmanager ausgestattet. Zur Versuchsdurchführung werden nur die gewünschten Rezepte bzw. Programmabläufe erstellt, die dann vollautomatisch ablaufen.

4.2.2 Erste industrielle Anlage für 110 hl Ausschlagwürze

Mit den aus den Pilotversuchen gewonnenen Erkenntnissen wurde die erste großtechnische Anlage realisiert (Abbildung 46). Der DSVD steht über dem bestehenden Whirlpool, der Rücklauf der Würze erfolgt somit pumpenfrei. Dieses Konzept wurde mittlerweile schon vielfach auch für große Ausschlagmengen umgesetzt und hat sich sehr gut bewährt. Der Whirlpool hat ein Zargenschauglas, um den Trubkegel und die Vorgänge im Laufe des Prozesses begutachten zu können. Im linken Bildrand sind die Hopfengabegefäße zu er-

kennen. Vor dem Whirlpool befindet sich ein Ventilknoten, damit er auch noch herkömmlich genutzt werden kann.



Abbildung 46: Erste industrielle Anlage

Um das DSVD-System auf die Tauglichkeit zur Würzekochung zu überprüfen, wurden in der alten Maisch-Würze-Pfanne mit einem Innenkocher Vergleichssude durchgeführt. Der Kocher wurde mit einem Heizdampfdruck von 4,5 bar betrieben. Das Aufheizen der Würze erfolgte über eine Boden- und Zargenheizfläche. Die Kochzeit betrug 80 Minuten bei einer Gesamtverdampfung von 8–9 %. Leider kam es sehr bald zu technischen Problemen mit dem Innenkocher, sodass er vor Abschluss der geplanten Versuchsreihen entfernt wurde. Durch ein defektes Dampfventil am Kocher brannte die Maische so in den Kocherrohren fest, dass eine Reinigung nicht mehr möglich war.

Die Würze wurde bei dieser ersten Anlage von oben auf die Heizfläche des DSVD aufgebracht (Abbildung 47). Der Abstand zwischen Aufbringtrichter und Heizbodenspitze konnte dabei manuell verstellt werden, um mit unterschiedlichen Schlitzweiten die Würze zu verpressen. Da diese Variante jedoch sehr aufwändig umzusetzen war und auch die Verteilung der Würze ungleichmäßig erfolgte, ist bei allen anderen Anlagen der einfachere Weg von unten durch die Kegelspitze gewählt worden (Abbildung 48).

**Abbildung 47: Verteilung von oben****Abbildung 48: Verteilung von unten**

4.2.3 DSVD-System für 160 hl mit Läuterwürzeerhitzung – Vergleichskochung alte Kupferpfanne

Mit den bei der ersten Großanlage gewonnenen Erfahrungen wurde in einer weiteren Brauerei ein DSVD-System für 160 hl Ausschlagwürze und 7 Sude am Tag realisiert. Das System ist mit einem Energiespeicher mit Läuterwürzeerhitzung kombiniert (Abbildung 49).

Herzstück des alten Sudhauses ist eine dampfbeheizte, kupferne Sudpfanne aus dem Jahr 1936, die seit Abschluss der Modernisierungsmaßnahmen nur noch als Vorlaufgefäß genutzt wird. Die Entnahme der PFV-Probe erfolgt aus dem Vorlaufgefäß, nachdem etwa 5 Minuten mit dem Rührwerk gemischt wurde. Vom Vorlaufgefäß aus wird die Würze über einen Läuterwürzeerhitzer, der über einen Energiespeichertank beheizt wird, von ca. 70 °C auf 90 °C erwärmt. Die vorgewärmte Würze wird über die Heizfläche des DSVD gepumpt und strömt mit nahezu Kochtemperatur (wenn der Energiespeicher aufgeladen war) in den Whirlpool. Nach Beendigung des Transfers vom Vorlaufgefäß wird die Würze auf Kochtemperatur aufgeheizt. Da DSVD und Whirlpool nebeneinander stehen, sind zum Umwälzen zwei Pumpen notwendig. Die Pumpe zum DSVD fördert bei einer vorgegebenen, konstanten Drehzahl Würze über die Heizfläche. Eine zweite Pumpe transportiert die Würze zurück zum Whirlpool und regelt das Niveau in der Sammelrinne des DSVD. Beide Pumpen sind frequenzgeregt, sodass verschiedenste Umwälzleistungen eingestellt werden können. Beim Kochen wird ebenfalls über die Heizfläche zirkuliert. Bei einem kurzen Nachlaufschritt wird bei geschlossener Dampfzufuhr noch etwas weiterzirkuliert, um die überschüssige Energie aus dem Heizboden abzubauen und ein Anbrennen der Würze auf der Heizfläche zu vermeiden. Nach der Whirlpoolrast wird die Würze mit umgekehrter Pumpenregelung gestrippt. Die Pumpe zum Würzekühler läuft mit gleich bleibender Drehzahl, und die zufördernde Pumpe hält das Niveau in der Sammelrinne konstant.

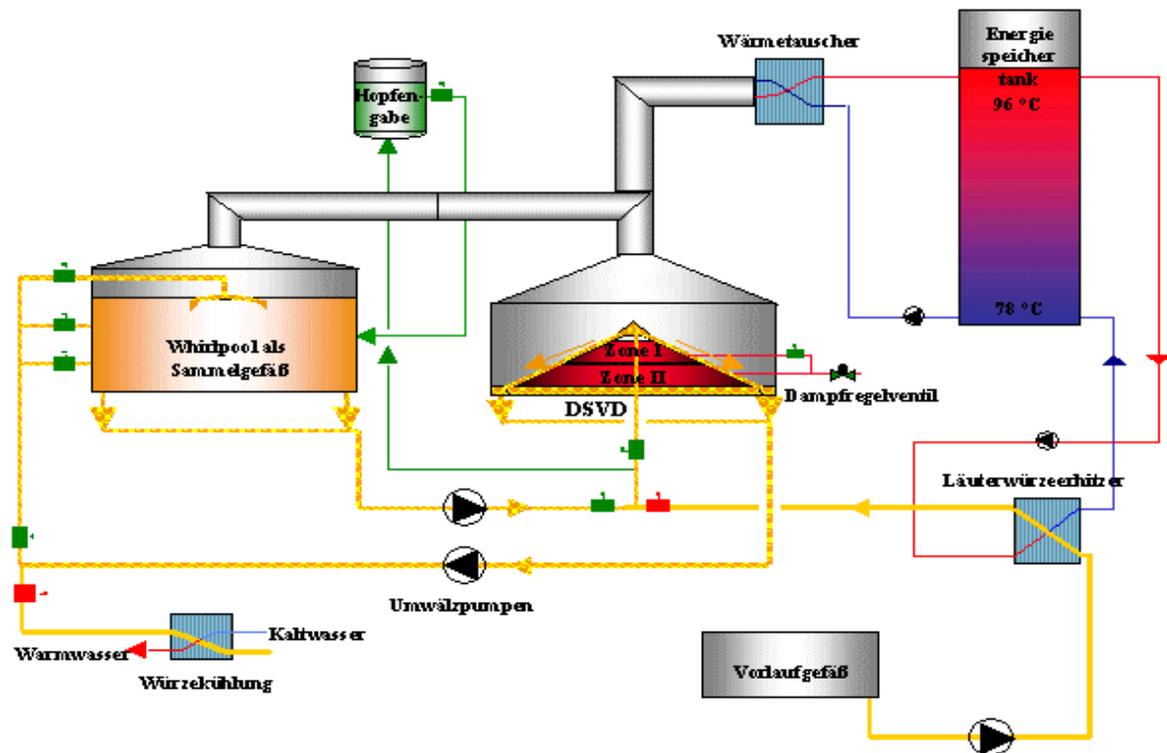


Abbildung 49: DSVD-System mit Energiespeicher

Mit dieser Anlage wurden ein Vergleich mit der alten Kupferpfanne und Versuche zur Ermittlung der minimal notwendigen Gesamtverdampfung durchgeführt. Um die Versuchsreihen abzurunden, wurden die Auswirkungen unterschiedlicher Heißdampftemperaturen untersucht.

4.2.4 Anlage für 250 hl mit Whirlpoolpfanne mit Innenkocher als Sammelgefäß

In einer weiteren Brauerei hatte man erst 1992 ein neues Sudhaus mit Innenkocher gebaut und verfügte somit über ein modernes Würzekochsystem mit einer Whirlpoolpfanne mit Innenkocher. Durch den Einsatz des DSVD-Systems versprach man sich, dem Trend sinkender Schaumzahlen im fertigen Bier entgegenwirken zu können.

Der DSVD steht neben der Whirlpoolpfanne. Die Würze wird in ein Vorlaufgefäß abgeläutert und strömt von dort über den Höhenunterschied in die Whirlpoolpfanne mit Innenkocher. Über das ausgewählte Rezept wird über die Steuerung festgelegt, ob konventionell oder mit dem DSVD gekocht wird. Bei der Malzmischung wird beim DSVD mehr Münchner Malz zugegeben, um einer Farbaufhellung entgegen zu wirken. Beim Läutern muss bei der Kochung mit Innenkocher deutlich mehr angeschwänzt werden, um beim Ausschlagen vergleichbare Würzekonzentrationen zu erhalten.

Ist das Befüllen abgeschlossen, startet entweder der DSVD-Prozess oder die Innenkochung. Bei der herkömmlichen Kochung wird über den Innenkocher aufgeheizt und dann ca. 70 Minuten gekocht. Nach Ablauf der Kochzeit wird der Pfanneninhalt in Rotation versetzt. In der anschließenden Whirlpoolrast setzt sich der Trub ab. Danach wird die Würze auf Anstelltemperatur abgekühlt.

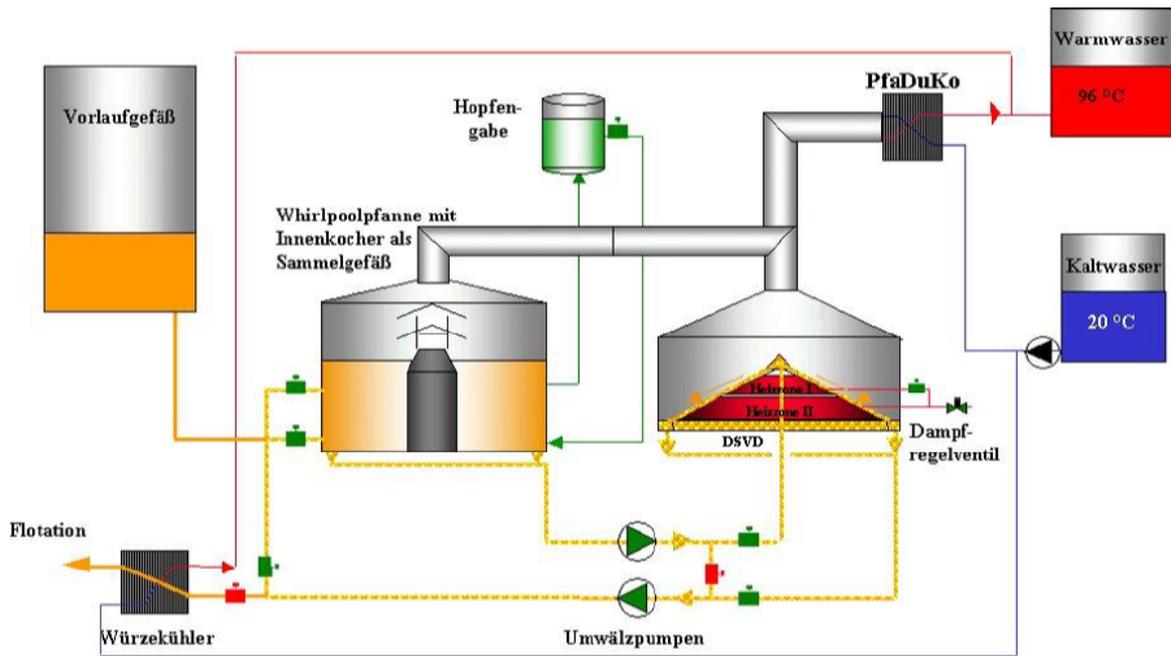


Abbildung 50: Anlage für 250 hl/Sud mit Whirlpoolpfanne und Innkocher

Mit dem DSVD-System erfolgt das Aufheizen und Kochen durch Zirkulation über die Heizfläche. Die Whirlpoolrast findet, wie auch bei der konventionellen Innkochung, in der Whirlpoolpfanne statt. Auf dem Weg zum Würzekühler wird die Würze wie gehabt gestrippt.

Mit dieser Anlage wurde ein Vergleich zwischen beiden Systemen durchgeführt. Um ein umfassendes Bild zu erhalten, wurden neben den Würzen die Auswirkungen auf Gärung und Filtration der Biere untersucht.

5 Versuchsdurchführung

5.1 Versuche mit Pilotanlagen

Mit der ersten Pilotanlage, die für 250 l ausgelegt war, wurden Vorversuche zur Eignung des DSVD-Verfahrens zur Würzekochung gemacht. Weil zahlreiche Brauereien Interesse an den Versuchen zeigten, wurde eine zweite Pilotanlage gebaut. Alle weiteren Versuche wurden mit dieser Anlage, für bis zu 550 l, durchgeführt. Einziger Unterschied der beiden Anlagen ist die Größe des Whirlpools.

5.1.1 Kennzahlen der Pilotanlage

Die Pilotanlagen haben folgende Kennzahlen:

- Würzevolumen 250–550 l
- Durchmesser Heizkonus 80 cm, unterteilt in zwei dampfbeheizte Heizzonen
- Dampfreduzierventil zur Temperatur- und Druckregelung
- frequenzgeregelte Pumpen für 5–15 Umwälzungen/h
- mehrere Temperaturfühler
- IDM zur Überwachung der Pumpenleistung
- SPS auf S7-Basis zur Steuerung von Dampftemperatur und Pumpenleistung und zur Aufzeichnung der Prozessparameter

5.1.2 Vorversuche

Ziel der Vorversuche war das Testen des DSVD-Verfahrens, also quasi der Schritt von der Idee zur Realität. Die erzielten Ergebnisse zeigten den gewünschten Erfolg hinsichtlich Verdampfungsziffer, Aufheizraten und technologischer Werte und so wurde mit diesen Erkenntnissen die erste industrielle Großanlage gebaut.

Um das DSVD-System beurteilen zu können, wurden von den normalen Suden der Brauerei 250 l Würze bei Pfanne-Voll aus der Maisch-Würze-Pfanne entnommen und parallel über die Pilotanlage verarbeitet. Die Hauptschwierigkeit lag bei diesen Versuchen darin, eine repräsentative Würzmenge zu bekommen. Über das Rührwerk in der Maisch-Würze-Pfanne wurde der Pfanneninhalt homogenisiert und erst dann über den Probenahmehahn die Würzmenge entnommen. Trotz größter Sorgfalt gab es aus diesen Vorversuchen jedoch keine statistisch verwertbaren Ergebnisse. Zwar zeigte jeder Sud für sich das erwartete Ergebnis, in der Summe waren die Schwankungen aber zu groß. Die Ursache lag nicht – wie zunächst vermutet – in der unzureichenden Homogenisierung des Pfanneninhaltes vor der Würzeentnahme, sondern in sehr inhomogenen Malzchargen, die eine Reproduzierbarkeit unmöglich machten.

Von den Würzen wurden zu den Zeitpunkten Pfanne-Voll, Kochende und Kühlmitte Proben gezogen und mit konventioneller Analytik untersucht. Von einigen Würzen wurden Kleingärungen durchgeführt, die Biere anschließend filtriert und verkostet.

5.1.3 Versuche zum Brauen mit hoher Stammwürze

Die Versuche zum High Gravity Brewing wurden in einer Pilotbrauerei durchgeführt, und zwar in insgesamt drei Versuchsreihen mit je drei Suden. Nach einem Standard-Maischverfahren wurde gemaischt und geläutert. Die Würzen wurden einerseits mit der bereits vorhandenen Würzpfanne gekocht und andererseits zum Vergleich mit der DSVD-Pilotanlage.

Zur Beurteilung der Unterschiede wurden wieder Proben bei Pfanne-Voll, Kochende und Kühlmitte gezogen.

Die wesentlichen Unterschiede bestanden im Ablauf der Kochung. Mit dem DSVD-System wurde wie auch bei allen anderen Anlagen nur 35 Minuten gekocht und dann eine Whirlpoolrast von 20 Minuten gehalten. Im Anschluss daran wurde die Würze wie gewohnt gestrippt. Hierzu wurde die Würze in etwa 40 Minuten über die Heizfläche des DSVD gepumpt und im Anschluss direkt gekühlt.

Bei der klassischen Kochung wurden die Würzen in einer Pfanne mit Boden und Zargenheizfläche für 90 Minuten offen gekocht, eine 20-minütige Whirlpoolrast gehalten und gekühlt.

Analysiert wurden neben den herkömmlichen Parametern auch die Würzearomastoffe.

5.2 Versuche mit der ersten Industrieanlage

Bei der ersten Großanlage wurden Versuche durchgeführt, die die Tauglichkeit des neuen Verfahrens zur Würzekochung im industriellen Maßstab zeigen. Das Sudhaus ist ein klassisches Zweigerätesudhaus, ausgelegt für 100 hl kalte Ausschlagwürze, bestehend aus einer Maisch-Würze-Pfanne und einem Maisch-Läuter-Bottich.

5.2.1 Vergleich mit Innenkochsystem

Um das DSVD-System mit dem Innenkochsystem vergleichen zu können, wurden jeweils zwei Sude hintereinander durchgeführt, wobei der gesamte Prozessablauf bis zum Läutern identisch war. Das Läutern wurde bei den DSVD-Suden etwas eher beendet, um vergleichbare Ausschlagkonzentrationen zu erhalten. Einer der Sude wurde in der alten Maisch-Würze-Pfanne gekocht, in den Whirlpool gepumpt und nach einer Rast von 30 Minuten gekühlt. Die gesamte Kochzeit betrug 80 Minuten und war in mehrere Phasen unterteilt: 30 Minuten intensiv kochen, Kochpause von 20 Minuten, nochmals für den Rest der Kochzeit intensiv kochen. Die erste Hopfengabe erfolgte zu Kochbeginn, die zweite 10 Minuten vor Kochende.

Der zweite Sud wurde mit dem DSVD-System 35 Minuten gekocht und nach 25 Minuten Whirlpoolrast gestrippt. Die erste Hopfengabe erfolgte bei Erreichen der Kochtemperatur und die zweite 10 Minuten vor Kochende.

Die Schwankungen in den Malzqualitäten waren aber so groß, dass eine Ermittlung der Reproduzierbarkeit der Anlage nicht möglich war.

5.2.2 Versuche zur Bestimmung der eingesetzten Energiemenge

Ein weiteres Augenmerk lag auf der Ermittlung des Energieverbrauchs anhand der eingebrachten Dampfmenge. Hierzu wurden bei beiden Systemen die Dampfmenge über einen fest installierten Wirbelstrommesser und die Kondensatmengen durch Abwiegen ermittelt und innerhalb der einzelnen Prozessschritte miteinander verglichen. Parallel dazu wurde die Gesamtverdampfung über zwei unterschiedliche Ansätze ermittelt. Zum einen wurde sie über die Extraktwerte berechnet, zum anderen wurde die über den PfaDuKo anfallende Brüdenkondensatmenge ermittelt und zur Absicherung der Ergebnisse herangezogen.

Die gravimetrische Messung des Dampfkondensates erfolgte am Kondensatableiter. In der Leitung von Kondensatableiter zu Kondensattank wurde eine Blindscheibe installiert, um eine exakte Erfassung des gesamten Kondensats sicherzustellen. Vor dem Auswiegen wurde das Kondensat über einen Plattenkühler auf unter 30 °C abgekühlt, um Ausdampfverluste während der Messung so gering wie möglich zu halten.

5.3 Anlage mit Läuterwürzeerhitzer für 160 hl/Sud

In diesem Kapitel werden die Versuche beschrieben, die mit dieser Anlage durchgeführt worden sind.

5.3.1 Vergleichssude DSVD-System mit einer klassischen offenen Kupferpfanne

Zunächst wurde das DSVD-System mit der alten Kupferpfanne verglichen. Dazu wurde je eine Versuchsreihe von 5 Suden mit dem DSVD-System und mit der konventionellen, offenen Kochung aufgenommen. Die Kochparameter für den DSVD waren bei der Inbetriebnahme festgelegt worden. Anschließend wurden Doppelsude zur Untersuchung der Einflüsse auf die Würze- und Bierqualität mit folgenden Variationen der Parameter durchgeführt:

- Verlängerung der Kochzeit von 40 Minuten auf 60 Minuten
- Teilung der 40-minütigen Kochzeit in 2 Phasen:
 - intensive Kochung während der ersten 10 Minuten
 - schwache Kochung während der restlichen 30 Minuten
- zusätzliche Hopfung der Würze vor der Würzekühlung
- Zugabe von 200 kg Münchner Malz beim Einmaischen zur Verstärkung der Farbe und der Vollmundigkeit der Biere
- Abnahme des neuen Kochsystems über 3 DSVD-Sude mit optimierter Einstellung
- 5 Sude mit intensiven Aufheizphasen und schonender Kochphase; 2 Sude wurden nochmals nachträglich gehopft
- 1 Versuchssud mit extrem intensiver Aufheiz- und Kochphase mit 60 Minuten Kochdauer

Das Befüllen und Aufheizen nahm in der ersten Versuchsreihe etwa 16 Minuten in Anspruch. Nach dem Befüllen betrug die Temperatur der Würze im WHP durchschnittlich 90,0 °C. Bei dieser Einstellung wurde die Kapazität des Energiespeichers zur Läuterwürzeerhitzung nicht vollständig ausgenutzt, denn die obere Temperatur im Energiespeicher war bis zum Ende des Transfers nicht abgesunken, d. h. die zurückgewonnene Verdampfungswärme des vorherigen Sudes wurde nicht vollständig zum Aufheizen genutzt. Resultierend daraus war der Energiespeicher auch schon nach der Hälfte der Strippzeit wieder aufgeladen und die Brüden gingen über Dach. Nach einer Optimierung konnte die Wärmeenergie der oberen Schicht bis zum Einbrechen nach etwa 20 Minuten optimal zur Läuterwürzeerhitzung auf 93–94 °C genutzt werden. Erst beim Ende des Strippens war der Energiespeicher wieder vollständig geladen, d. h. er hatte die zurückzugewinnende Verdampfungswärme vollständig gespeichert. Abbildung 51 zeigt das Profil der Kochung nach der Optimierung.

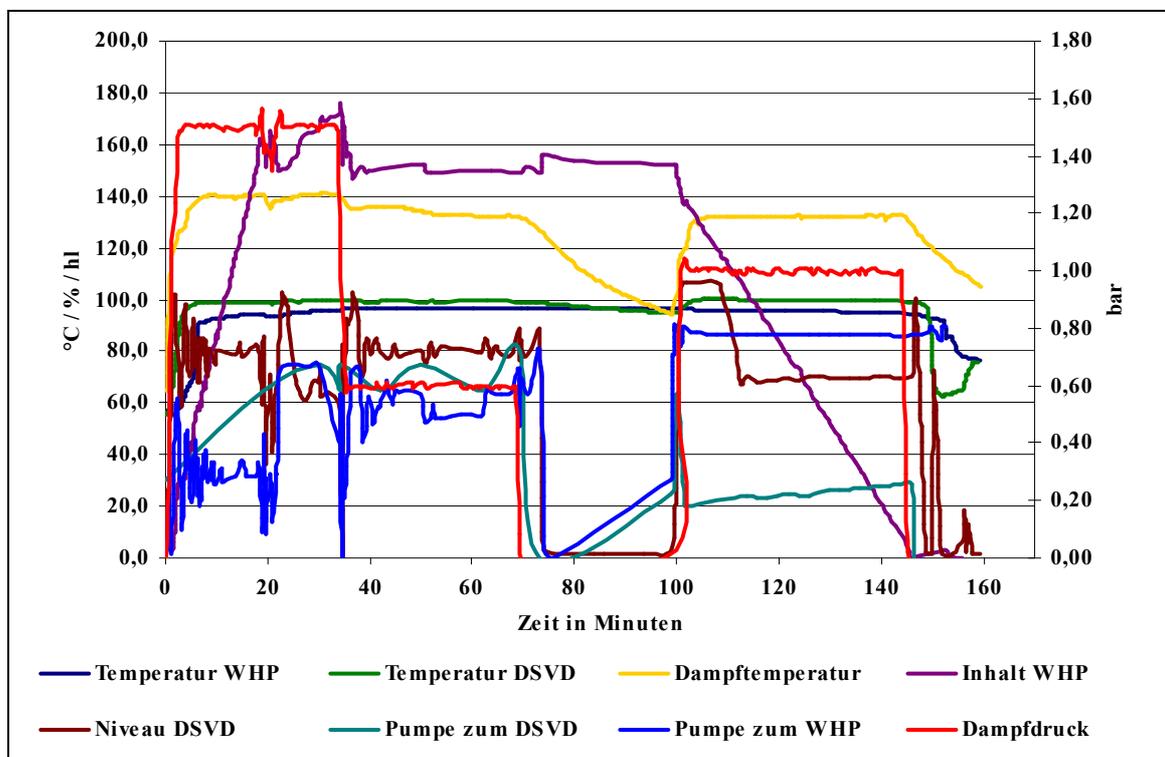


Abbildung 51: Kochprofil der DSVD-Sude nach Optimierung

Das Aufheizen zum Kochen wird in zwei Phasen geteilt. In der ersten Phase wird die Würze erhitzt, bis im DSVD Kochtemperatur erreicht wird. Die zweite Phase endet, wenn im WHP die Kochtemperatur von 95,5 °C erreicht wird. Bei dieser Temperatur erfolgt der Schrittwechsel zum Kochen. Bis zur Optimierung der Läuterwürzeerhitzung wurde sudabhängig in Phase 1 des Aufheizens für 5–10 Minuten mit einem Dampfdruck von bis zu 2,3 bar gefahren, um im WHP die Würze auf 93,5 °C zu erhitzen; in Phase 2 wurde der Dampfdruck auf 1,5 bar reduziert bis zum Erreichen der Kochtemperatur von 95,5 °C. Je nach erreichter Temperatur nach dem Läuterwürzeerhitzer nahm das Aufheizen zum Ko-

chen zwischen 21 und 42 Minuten in Anspruch. Nach der Optimierung sprang das Programm bei Temperaturen von über 93,5 °C im WHP direkt in Phase 2, wodurch sich die Dauer dieses Schrittes auf durchschnittlich 14 Minuten verkürzte.

In der dritten Versuchsreihe wurden die Weiterschaltbedingungen im WHP von 93,5 °C auf 94,1 °C und von 95,5 °C auf 96,1 °C erhöht sowie der Dampfdruck in der zweiten Phase des Aufheizens um 0,2 auf 1,7 bar gesteigert. Zum schnellen Aufheizen betrug der Dampfdruck in der ersten Phase des Aufheizens 2,2 bar. Der Aufheizprozess in dieser Versuchsreihe dauerte etwa 19 Minuten.

Im Schritt Kochen wurde neben Dampfdrücken und Zeit auch die Größe der beheizten Fläche durch Zu- und Abschalten der oberen Heizzone variiert. Tabelle 5 stellt die verschiedenen Einstellungen der Kochphasen dar.

	Heizzonen	Dampfdruck	Dauer
Versuchsreihe 1	beide	0,8 bar	40 min
Versuchsreihe 2	nur untere	0,6 bar	35 min
1. Variation der Kochparameter	beide	1,0 bar	1 h 16 min
2. Variation der Kochparameter	beide	1,2 bar	10 min
	untere	0,6 bar	30 min

Tabelle 5: Variationen der Kochparameter

Die Whirlpoolrast dauerte ca. 25 Minuten. Die Temperatur im WHP sank im Verlauf der Würzekühlung um 2 °C auf 97 °C ab.

Beim Strippen wurde generell nur die untere Heizzone mit einem Dampfdruck von 1,0 bar beaufschlagt. Die Dauer betrug zwischen 47 und 49 Minuten.

Nach den Parametern der ersten Versuchsreihe wurden noch zwei Doppelsude gebraut, von denen allerdings nur das fertige Flaschenbier analysiert wurde. Die ersten beiden Sude wurden dabei vor der Würzekühlung noch einmal gehopft. Dazu wurden jeweils 200 g α -Säure als Pellets der Sorte Hallertauer Perle in einem 50-l-Keg mit heißer Würze, die vor der Kühlung entnommen worden war, für 20 Minuten bewegt und nach der Plattenkühlung wieder zudosiert. Im Unterschied zur ersten Versuchsreihe wurden den zweiten Suden beim Einmaischen 200 kg Münchner Malz zugegeben.

Die konventionelle Würzekochung in der dampfbeheizten, kupfernen Hochleistungspfanne dauerte etwa 2 Stunden. Anschließend wurde die Würze in 15 Minuten in den WHP umpumpt, der ursprünglich nicht isoliert war. Die Whirlpoolrast dauerte etwa 20 Minuten. Die Würzekühlung über den „alten“ Weg erfolgte in 50 Minuten, wobei laut Gutachten der IGS Energie- und Umwelttechnik der Temperaturabfall bis Kühlmitte bei 11 °C lag.

Bei der konventionellen Kochung wurden vier Hopfengaben über das Mannloch in die Pfanne gegeben. Die DSVD-Sude der ersten Versuchsreihe erhielten ebenfalls vier Hopfengaben, die über automatische Gabegefäße mit Würze in den Whirlpool gespült wurden.

Tabelle 6 zeigt die Zeitpunkte und Mengen bei den Hopfengaben der konventionellen Kochung und der ersten Versuchsreihe mit dem DSVD-System.

	Menge α -Säure	Hopfenprodukt	Gabezeitpunkt konventionell	1. Versuchsreihe DSVD
1. Gabe	500 g	Extrakt	Pfanne-Voll	Pfanne-Voll
2. Gabe	300 g	HPE-Pellets	Kochbeginn	Aufheizen zum Kochen
3. Gabe	200 g + 200 g	HPE- + TTE-Pellets	25 min nach KB	Kochbeginn
4. Gabe	400 g	TTE-Pellets	Ausschlagen	15 min vor Kochende

Tabelle 6: Zeitpunkte und Mengen bei den Hopfengaben

Für die Sude 1 und 2 mit veränderter Hopfengabe blieb die Anzahl der Hopfengaben bestehen, doch veränderten sich die Gabezeitpunkte bis auf die Gabe bei Pfanne-Voll. Die zweite Hopfengabe erfolgte 25 Minuten nach dem Befüllen und Aufheizen, die dritte und vierte Gabe folgten jeweils im Abstand von 12 Minuten. Gründe für die Variation der Hopfengabezeitpunkte waren zum einen die schwache Bittere und die fehlende Hopfenblume der ersten DSVD-Biere, zum anderen war die Prozesstechnik ausschlaggebend. Hier verursachte die zweite Hopfengabe im Schritt Aufheizen zum Kochen ein verstärktes Schäumen im DSVD. Deshalb wurden die Hopfengaben auf den Schritt Kochen verlegt.

In dem Bestreben, die oben erwähnten Punkte zu verbessern, wurden die Hopfengaben für die Sude 3 und 4 nach Tabelle 7 verändert.

	Menge α -Säure	Hopfenprodukt	Sude 3 und 4 mit veränderter Hopfengabe
1. Gabe	500 g	Extrakt	Pfanne-Voll
2. Gabe	500 g	HPE-Pellets	2 min nach Befüllen und Aufheizen
3. Gabe	600 g	TTE-Pellets	25 min nach Befüllen und Aufheizen

Tabelle 7: Sude 3 und 4 mit veränderter Hopfengabe

Abschließend wurden die letzten beiden Sude der dritten Versuchsreihe nachträglich mit je 250 g α -Säure als Extrakt nach dem Strippen und vor der Würzekühlung gehopft. Ein T-Stück mit Blindkappe vor der Pumpe zum Plattenkühler ermöglichte es, eine durchlöcherete Dose mit Hopfenextrakt in einem Drahtgestell in den Würzestrom zu bringen. Die gelösten Hopfenöle sollten dem Bier eine Hopfenblume verleihen.

5.3.2 Versuche zur minimal notwendigen Gesamtverdampfung

Im Laufe der Versuche hat sich gezeigt, dass nicht unbedingt hohe Gesamtverdampfungen erforderlich sind, um gute Biere herzustellen. Auch in der Vergangenheit wurden hierzu

immer wieder Versuche unternommen. Nachdem die ersten DSVD-Anlagen mit 4–4,5 % Gesamtverdampfung betrieben worden waren, kam immer wieder die Frage auf, ab wann technologische Nachteile zu erwarten sind.

Zur Ermittlung einer Untergrenze für die Verdampfung wurden zwei Versuchsreihen durchgeführt, die dazu dienen sollten, Unterschiede in der Würze und Bierqualität festzustellen. Jede der beiden Versuchsreihen bestand aus drei Suden, die in einem Tank vergoren und bis zum fertigen Bier verfolgt wurden. Die unterschiedlichen Verdampfungen wurden durch Anpassen der Dampfdrücke erzielt. In Abbildung 52 sind die Trendkurven zu sehen, die sich aus den verschiedenen Verfahrensweisen ergeben. Schon beim Aufheizen wurde der Dampfdruck reduziert, dadurch verlängerte sich die Aufheizzeit um etwa 6 Minuten. Während der Kochzeit wurde der Dampfdruck soweit abgesenkt, dass die Würze nur noch heiß gehalten wurde. Die Verdampfung bei 35 Minuten Kochzeit konnte so von etwa 1,45 % auf nahezu 0 % abgesenkt werden. Insgesamt ergab sich bei den drei Suden mit normaler Verdampfung eine Gesamtverdampfung von durchschnittlich 4,6 %, die Schwankungsbreite lag zwischen 5,0 % und 3,8 %. Die Sude mit reduzierter Verdampfung kamen auf 2,65 % im Durchschnitt, bei einer Schwankungsbreite von 2,4–2,9 %.

Die Sude mit reduzierter Verdampfung dauerten etwa 5 Minuten länger als die Vergleichsude. Der Grund ist, dass hier schon beim Aufheizen mit deutlich niedrigeren Dampfdrücken gearbeitet wurde. Dadurch verlängerte sich die Aufheizzeit etwas, jedoch wurde so verhindert, dass in der Aufheizphase schon eine nennenswerte Verdampfung auftritt. Abbildung 53 zeigt den Verlauf der Würzeaufheizung und die Energierückgewinnung bei den Versuchssuden. Es ist zu sehen, dass in beiden Fällen der Energiespeicher voll war und die Läuterwürze bis zum Schluss auf ca. 90 °C aufgeheizt wurde. Ein deutlicher Unterschied ergibt sich bei der Energierückgewinnung. Mit der hohen Verdampfung steigt schon zur Hälfte der Kochzeit die Temperatur in der Mitte des Energiespeichers wieder an. Bei der niedrigen Verdampfung beginnt die Temperatur erst gegen Ende des Strippens anzusteigen. Damit wird deutlich, dass eine Läutererhitzung mit den niedrigen Verdampfungen auf Dauer nicht sinnvoll zu betreiben ist.

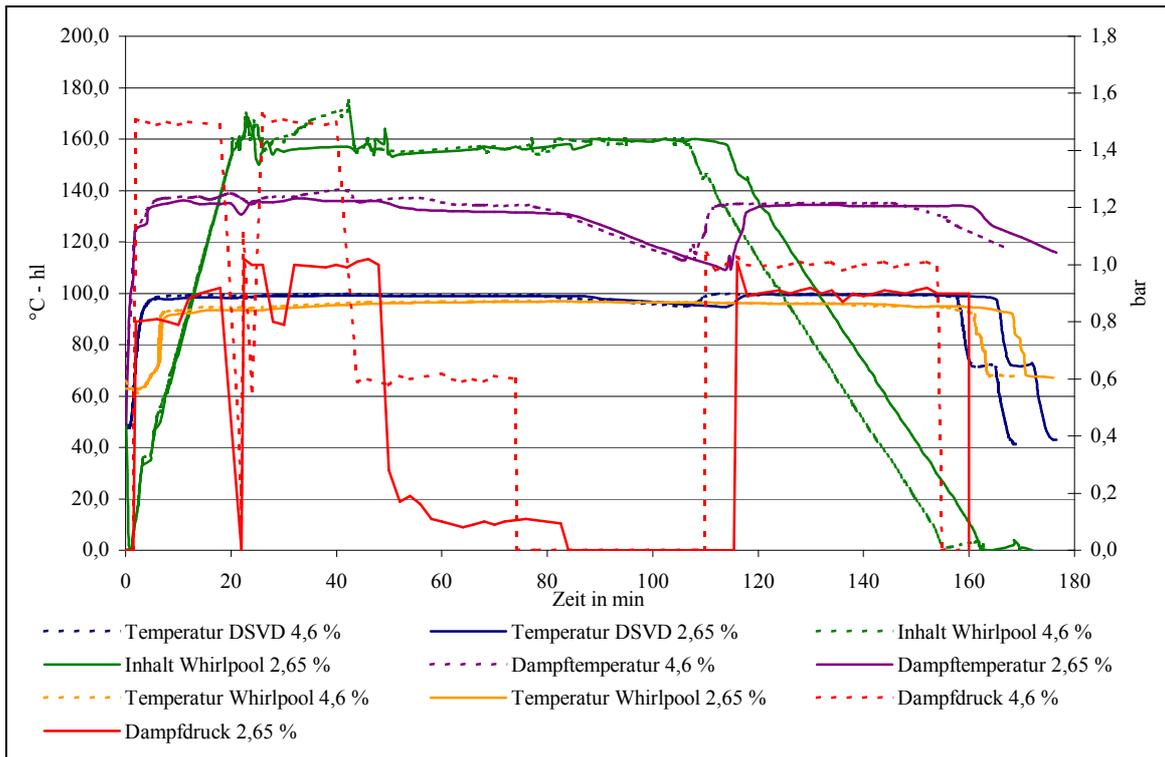


Abbildung 52: Trendkurven bei unterschiedlichen Verdampfungen

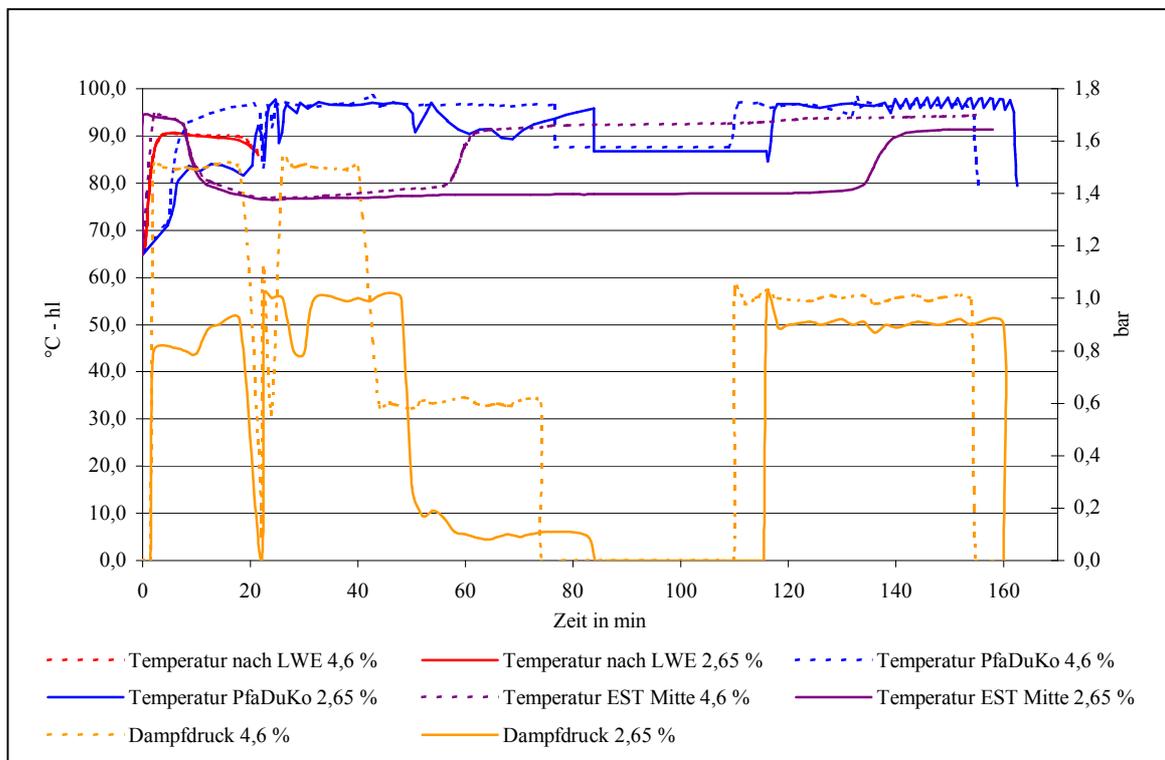


Abbildung 53: Vergleich der Energierückgewinnung bei unterschiedlichen Gesamtverdampfungen

5.4 Vergleich DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich konventioneller Analytik und Würzearomastoffen

Das Ziel dieser Versuche war, das DSVD-System mit einem modernen Innenkochsystem zu vergleichen. Neben der konventionellen Analytik wurden auch die Auswirkungen auf die Würzearomastoffe betrachtet. Hier war es von größtem Interesse, ob mit niedrigen Gesamtverdampfungen auch alle relevanten Stoffe in ausreichendem Maße ausgetrieben werden könnten.

5.4.1 Ablauf der Versuche

Damit die Unterschiede zwischen beiden Systemen herausgearbeitet werden konnten, wurden zwei Versuchsreihen zu je fünf Suden eingebraut. Analysiert wurde jeweils der erste, dritte und fünfte Sud einer Reihe, um einen guten Querschnitt zu bekommen.

5.4.2 Kochung mit Innenkocher

Bei der Kochung mit dem Innenkocher wurde zunächst die gesamte Menge abgeläutert, bevor mit dem Aufheizen begonnen wurde. Dabei lag ein Dampfdruck von 2,5 bar an den Heizrohren an. Sobald die Würze 99 °C erreicht hatte, begann die Kochzeit von 70 Minuten. Auch hier wurde der Kocher mit 2,5 bar Dampfdruck betrieben. Die erste Hopfengabe erfolgte zu Kochbeginn, die zweite nach 30 Minuten und die dritte 15 Minuten vor Kochende.

Im Anschluss an die 30-minütige Whirlpoolrast wurde die Würze in 65 Minuten auf Anstelltemperatur abgekühlt.

5.4.3 Kochung mit dem DSVD-System

Auch bei der Kochung mit dem DSVD-System wurde die Würze zunächst komplett abgeläutert und anschließend im Kreislauf über die Heizfläche des DSVD gepumpt. Dabei lagen zunächst 2,5 bar Dampfdruck an der Heizfläche an. Sobald in der Sammelrinne des DSVD Kochtemperatur erreicht war, wurde der Dampfdruck zur Reduzierung der Verdampfung auf 1,8 bar abgesenkt. Die in zwei Phasen unterteilte Kochzeit von 35 Minuten startete, sobald in der Whirlpoolpfanne 97,5 °C erreicht waren. In den ersten 15 Minuten lagen an der Heizfläche 1,5 bar an, und für den Rest der Kochzeit wurde der Druck auf 1,3 bar abgesenkt. Die erste Hopfengabe erfolgte bei Erreichen der Kochtemperatur in der DSVD-Rinne, die zweite 5 Minuten nach Kochbeginn und die dritte 15 Minuten vor Kochende.

Nach der Kochung schloss sich eine 30 Minuten dauernde Whirlpoolrast an, nach der die Würze bei 0,9 bar Dampfdruck gestrippt wurde.

5.5 Vergleich DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich Gärung, Lagerung und Filtration

Bei den zuvor durchgeführten Versuchsreihen wurden immer nur die Auswirkungen der Kochung auf die produzierten Würzen untersucht. Bei der Weiterverarbeitung der Würzen zeigten sich aber deutliche Unterschiede bei der Gärung und vor allem bei der Filtration. Ziel der nun folgenden Versuche war, die Ursache hierfür zu finden und außerdem die Unterschiede in den jeweiligen Stadien herauszuarbeiten.

5.5.1 Ablauf der Versuche

In zwei Versuchsreihen wurden wieder jeweils fünf Sude mit dem Innenkocher und dem DSVD-System hintereinander hergestellt. Die Würzebereitung erfolgte identisch zu den vorher durchgeführten Versuchsreihen. Die fünf Sude jeder Reihe wurden gemeinsam in einem ZKG angestellt und vergoren.

5.5.1.1 Gärung und Lagerung der Biere

Nach der Kochung und der Heißtrubabscheidung wurde die Würze auf 9 °C gekühlt und zur Kühltrubabscheidung flотиert. Danach wurde die Anstellwürze auf einen ZKG mit einem ungefähren Gesamtfassungsvermögen von 1430 hl gepumpt.

Zum Anstellen wurde die gleiche Hefe verwendet. Diese war bei der ersten Versuchsreihe einmal geführt worden. Auf beide Tanks wurde etwa die gleiche Menge Hefe vor dem Umpumpen des ersten Sudes vorgelegt.

Es wurden immer fünf Sude auf einen ZKG gepumpt, was einer Menge von ca. 1150 bis 1200 hl entspricht. Die Vergärung erfolgte drucklos bei einer Maximaltemperatur von 10,5 °C. Bei Erreichen von einem scheinbaren Extraktgehalt kleiner als vier Prozent wurde die maximale Solltemperatur auf 13 °C angehoben und ein Druck von 0,6 barÜ eingestellt. Temperatur und Druck wurden bis zum Erreichen des scheinbaren Endvergärungsgrades und der Unterschreitung des Geschmacksschwellenwertes des Diacetyl beibehalten. Nach 9 Tagen wurde das Jungbier in einen ZKL geschlaucht, wobei es vorher durch eine Jungbierkühlung auf 0 °C heruntergekühlt und anschließend über einen Separator die Hefezellzahl auf unter 1 Millionen Hefezellen pro Milliliter reduziert wurde. Die Hefe im Gärtank wurde grundsätzlich zu Wochenbeginn geerntet und bei Bedarf noch einmal vor dem Separieren.

Die Gärung wurde kontinuierlich vor Ort verfolgt. Sowohl morgens als auch abends wurde eine Probe des gärenden Jungbieres aus dem Tank entnommen und untersucht.

Die zweite Versuchsreihe erfolgte analog zur ersten, nur wurde hier anstatt bereits geführter Hefe Reinzuchtheffe verwendet. Leider gelang es aus technischen Gründen nicht, eine etwa gleich Hefezellzahl nach dem Anstellen zu erreichen. Diese Tatsache muss bei der Beurteilung des Gärverlaufs berücksichtigt werden.

5.5.1.2 Filtration

Nach weiteren 14 Tagen kalter Lagerung schloss sich die Filtration an. Hierzu wurden ein ZHF sowie ein mit Entkeimungsschichten bestückter Schichtenfilter verwendet. Mit PVPP, Xerogel und Hydrogel wurde eine verlorene Stabilisierung durchgeführt.

Während der Filtration wurden alle relevanten Daten, wie Zusammensetzung der Anschwemmung und der laufenden Dosage, O₂-Gehalte, Trübung im 25°- und 90°-Winkel sowie der kontinuierlich ansteigende Druckunterschied Δp zwischen ZHF-Einlauf und ZHF-Auslauf, verfolgt.

Die Biere wurden noch am selben Tag auf Flaschen gefüllt und kalt gestellt. Die Flaschenbierproben wurden in der staatlichen Prüf- und Versuchsanstalt in Weihenstephan untersucht und sowohl am Lehrstuhl für Brauereitechnologie II als auch in der Brauerei verkostet.

6 Versuchsergebnisse und deren Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Versuche in der gleichen Chronologie wie schon im vorherigen Kapitel dargestellt.

6.1 Ergebnisse der Vorversuche mit der Pilotanlage

Die bei den Vorversuchen gewonnenen Ergebnisse bildeten die Basis für die Entscheidung zum Skale-Up.

6.1.1 Extrakt und Gesamtverdampfung

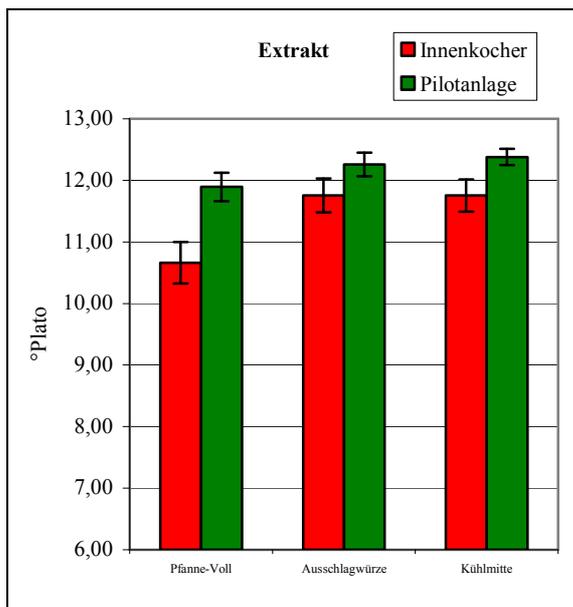


Abbildung 54: Extraktgehalte

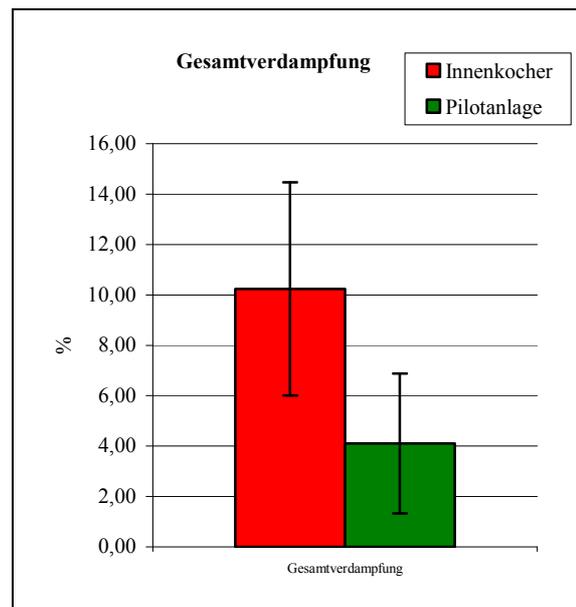


Abbildung 55: Gesamtverdampfung

In Abbildung 54 sieht man, dass die Extraktgehalte sehr unterschiedlich sind. Die Ursache hierfür liegt in der Inhomogenität zum Zeitpunkt der Entnahme der Pfanne-Voll-Würze. Die Läuterwürze wurde von unten in die Pfanne eingebracht, und es treten Schichtungen auf. Die Probenahmestelle lag etwas über der Hälfte des Füllstandes, sodass über den Probenahmehahn immer etwas höher konzentrierte Würzen auf die Pilotanlage gefahren wurden. Die Unterschiede zwischen beiden Systemen rühren daher, dass die Konzentrationsbestimmung erst bei 85 °C erfolgte und somit die Würzmenge in der Pfanne bereits homogenisiert war.

Leider ist bei der Gesamtverdampfung (Abbildung 55) kein signifikanter Unterschied vorhanden, wenngleich doch die Tendenz eindeutig ist. Schon mit der Pilotanlage lag die Gesamtverdampfung nur noch bei etwa 40 % des Wertes der konventionellen Kochung.

6.1.2 Stickstoffverhältnisse

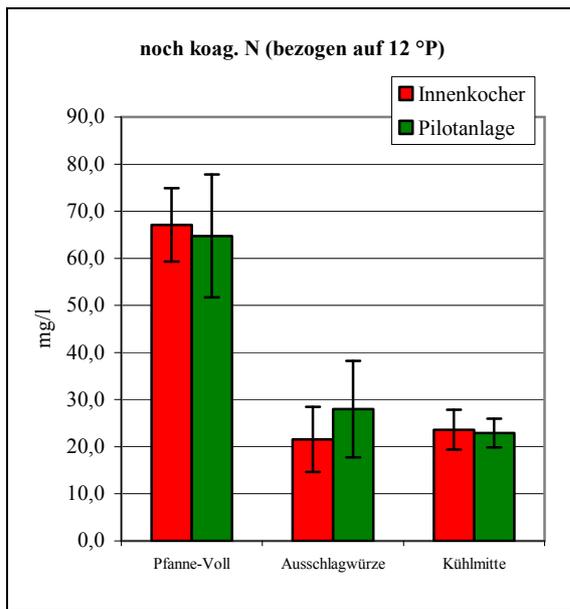


Abbildung 56: Noch koagulierbarer Stickstoff

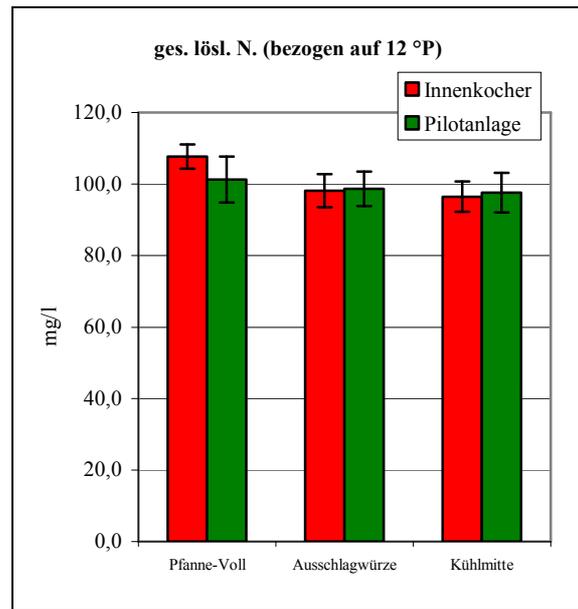


Abbildung 57: Gesamtlöslicher Stickstoff

In Bezug auf die Stickstoffverhältnisse sind keine Unterschiede in den Systemen erkennbar. Bei Kochende zeigt sich bei der Kochung mit dem DSVD-System ein tendenziell höherer Wert des noch koagulierbaren Stickstoffs (Abbildung 56), bei Kühlmitte ist kein Unterschied mehr zu bemerken. Der Anstieg von Kochende nach Kühlmitte bei der konventionellen Kochung kann von Inhomogenitäten in der Pfanne kommen, die erst durch das Ausschlagen in den Whirlpool ausgeglichen wurden. Solche Unterschiede sind bei ungünstigen Pfannengeometrien relativ häufig. Allerdings liegen die Unterschiede innerhalb der Analysengenauigkeit, die beim noch koagulierbaren Stickstoff eine große Bandbreite aufweist.

Beim Gesamtstickstoff (Abbildung 57) lassen sich keinerlei Unterschiede ausmachen.

6.1.3 Thiobarbitursäurezahl

Hinsichtlich der TBZ (Abbildung 58) ergibt sich ebenfalls kein Unterschied, der einer statistischen Absicherung standhält. Allerdings ist doch eine Tendenz zu einem geringeren Anstieg, vor allem bei der Kochung, erkennbar. Die Differenz bleibt bei beiden Systemen von Kochende nach Kühlmitte nahezu unverändert.

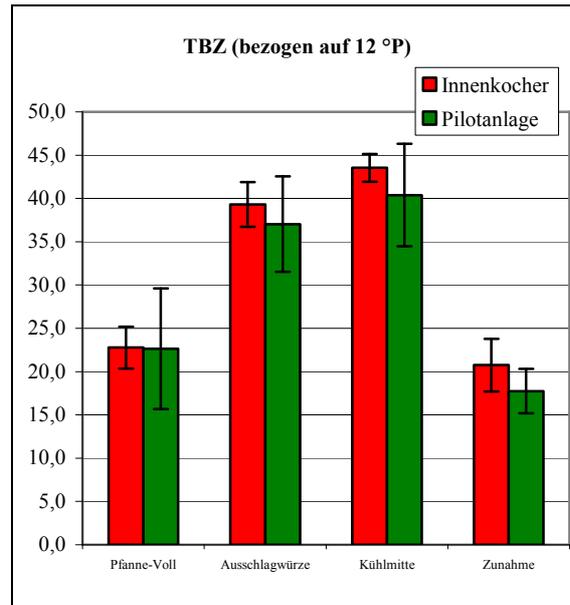


Abbildung 58: Entwicklung der TBZ

6.1.4 Freies DMS und DMS-P

Die Werte für das freie DMS (Abbildung 59) sind bei Pfanne-Voll mit dem DSVD-System deutlich niedriger als mit dem Vergleichssystem. Die Ursache liegt darin, dass die Proben bei 85 °C gezogen wurden. Die Würze wurde also schon einige Zeit umgewälzt, und das freie DMS konnte über die große Oberfläche ausgedampft werden. Bei Kochende ist der Wert beim DSVD tendenziell etwas höher, was normal ist, da das DMS erst beim Strippen eingestellt wird. Die Werte bei Kühlmitte sind dann wieder identisch.

Beim Abbau des DMS-P (Abbildung 60) sind keine Unterschiede zu erkennen.

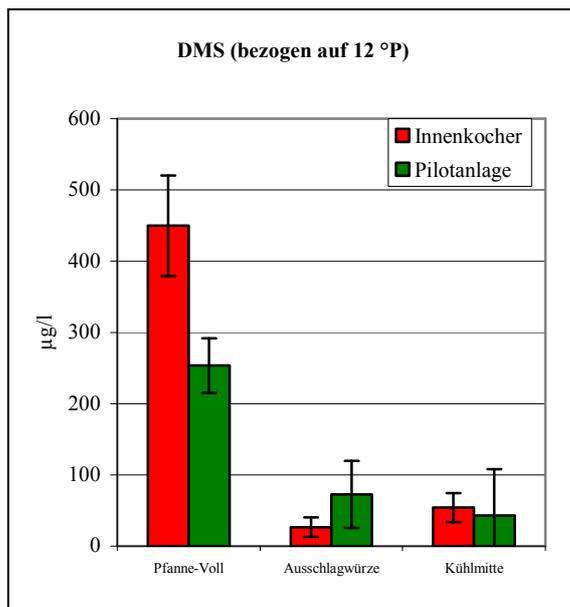


Abbildung 59: Freies DMS

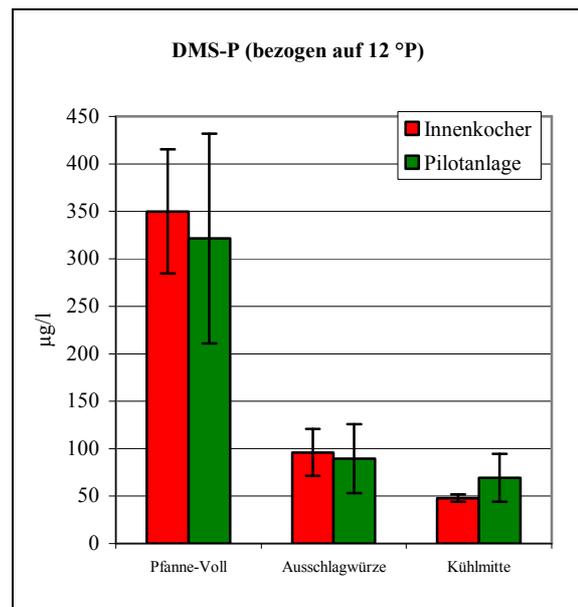


Abbildung 60: DMS-P

6.1.5 Ergebnisse der Biere

Bei der Gärung und Filtration konnten keinerlei Unterschiede zum Vergleichsbier festgestellt werden.

Die Bieranalysen zeigten, dass die nach dem neuen Verfahren gebrauten Biere einen um 8 Punkte nach Ross & Clark besseren Schaum aufgewiesen haben. Bei der Verkostung wurde das Versuchsbier von 11 der 14 Tester bevorzugt.

6.2 Ergebnisse der Versuche zum Brauen mit hoher Stammwürze

In diesem Abschnitt werden die Versuchsergebnisse vom Brauen mit hoher Stammwürze dargestellt. Die Ergebnisse zweier Versuchsreihen mit der DSVD-Pilotanlage werden denen einer klassischen offenen Kochung im 5-hl-Maßstab gegenübergestellt.

6.2.1 Extrakt und Verdampfung

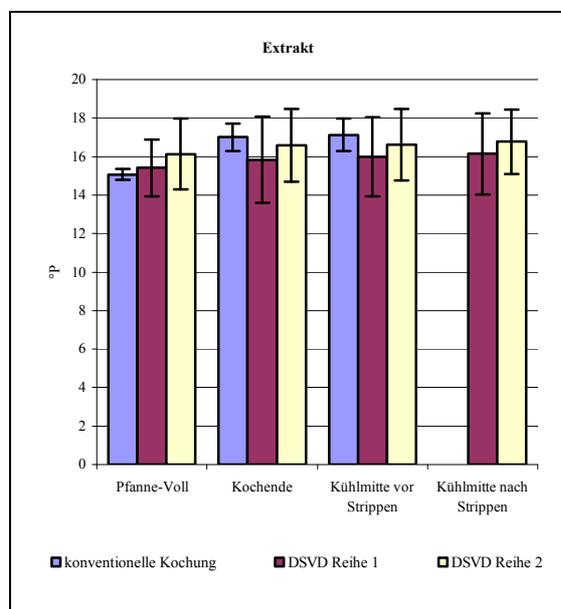


Abbildung 61: Extraktgehalte

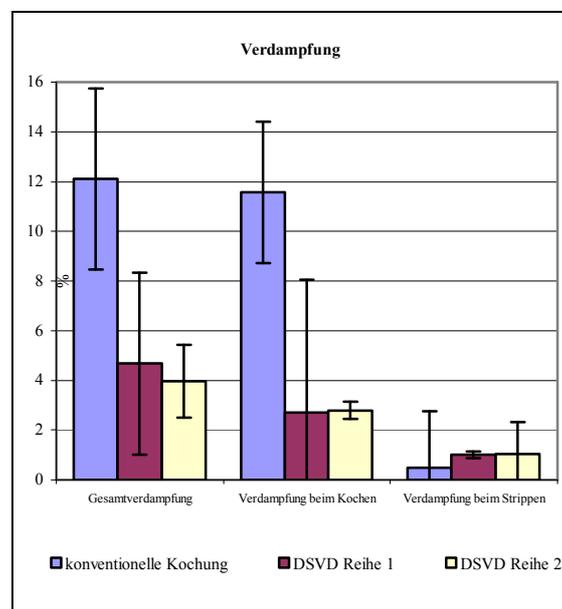


Abbildung 62: Gesamtverdampfung

Bei einer statistischen Auswertung der Versuchsreihen sind hinsichtlich der Stammwürzegehalte (Abbildung 61) keine Unterschiede erkennbar. Der Grund ist, dass die Einzelwerte starken Schwankungen unterworfen sind, deren Ursache darin liegt, dass die Sude jeweils separat durchgeführt wurden. So haben auch die im Rahmen einer normalen Produktion stattfindenden Schwankungsbreiten mit Einfluss genommen.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Gesamtverdampfung (Abbildung 62), die beim DSVD-System signifikant niedriger liegt. Werden im Mittel mit der klassischen offenen Kochung 12 % verdampft, so sind es mit dem DSVD-System bei der ersten Versuchsreihe etwa 4,3 % und bei der zweiten Reihe 4,0 %. Bei der normalen Kochung wird die gesamte Menge beim Kochen eingedampft; beim DSVD-System dagegen werden beim Kochen etwa 3 % Verdampfung erzielt und ein weiteres Prozent beim Strippen.

6.2.2 pH-Wert

Hinsichtlich der pH-Werte, in Abbildung 63 dargestellt, sind statistisch abgesichert keine Unterschiede erkennbar, allerdings wurde bei der ersten Versuchsreihe mit dem DSVD-System die Maische etwas zu wenig gesäuert, wodurch die höheren pH-Werte schon zu Beginn der Kochung resultieren. Tendenziell liegen die Werte bei den DSVD-Suden etwas höher als mit der klassischen Kochung.

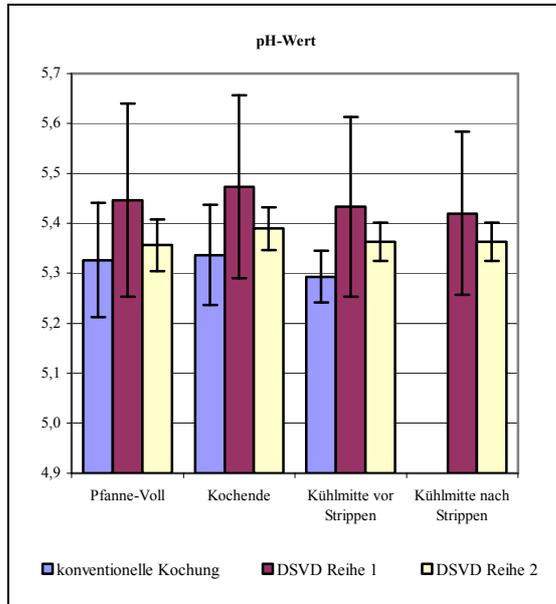


Abbildung 63: pH-Wert

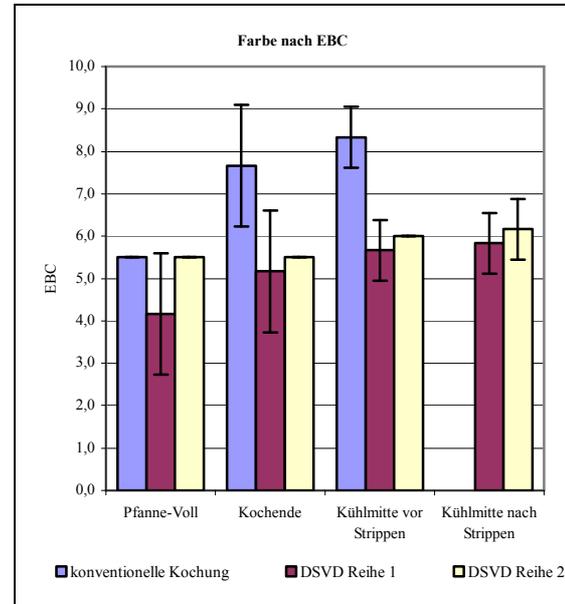


Abbildung 64: Farbe nach EBC

6.2.3 Farbe nach EBC

Deutliche Unterschiede lassen sich hinsichtlich der Farbe (Abbildung 64) erkennen. Liegen die Werte der Versuchsreihen bei Pfanne-Voll noch auf demselben Niveau, so fällt die Zunahme bei der konventionellen Kochung ungleich stärker aus. Bei Pfanne-Voll sind die Versuche mit der konventionellen Kochung und die Sude der zweiten Versuchsreihe mit dem DSVD bei 5,5 EBC gleich. Die erste DSVD-Reihe liegt etwas niedriger, eine mögliche Ursache könnte der leicht höhere pH-Wert sein, wobei der Unterschied als alleinige Ursache allerdings zu deutlich ist. Bis Kochende bleiben die DSVD-Sude in der Farbe nahezu konstant. Die Vergleichskochung nimmt um 2 EBC-Einheiten zu. Die Ursachen hierfür sind klar in der doch deutlich längeren Kochzeit zu suchen. Doch auch die Sauerstoffaufnahme bei der Kochung hat einen erheblichen Einfluss. Die bei Kochtemperatur schnell ablaufenden Oxidationsvorgänge führen zu einer verstärkten Zufärbung der Würzen. Der Einfluss von Sauerstoff hat in diesem Fall größere Auswirkungen auf die Farbe als die Kochzeit. Für den Einfluss von Sauerstoff spricht auch die höhere Zunahme der Farbe im Verlauf der Whirlpoolrast. Bis zur Kühlmitte-Würze nimmt der Unterschied zwischen den beiden Systemen um weitere 0,5 EBC zu.

6.2.4 Stickstoffverhältnisse

Die in diesem Abschnitt dargestellten Werte sind alle auf 12 %ige Ausschlagwürzen bezogen.

6.2.4.1 Freier Aminostickstoff

Bei dieser Versuchsreihe wurde auch der FAN begutachtet (Abbildung 65), weil gerade bei High Gravity Würzen davon für die Gärung eine ausreichende Menge zur Verfügung stehen muss. Bei den Versuchsreihen sind jedoch keine signifikanten Unterschiede auszumachen. Tendenziell weist wieder die erste DSVD-Reihe niedrigere Werte auf. Auch durch das Strippen wird der Gehalt an FAN nicht beeinflusst.

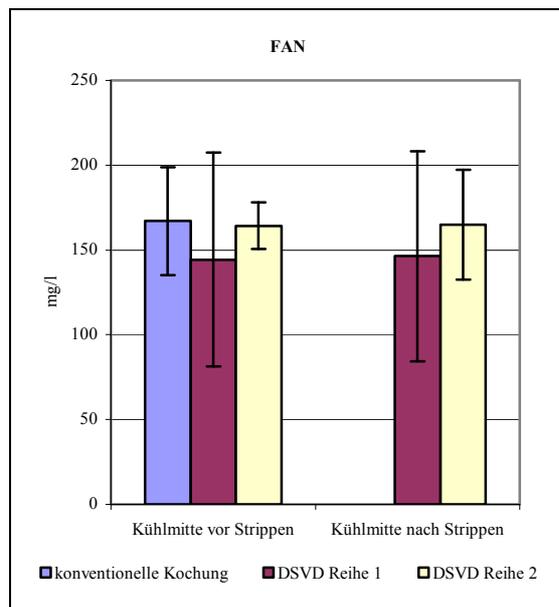


Abbildung 65: Freier Aminostickstoff

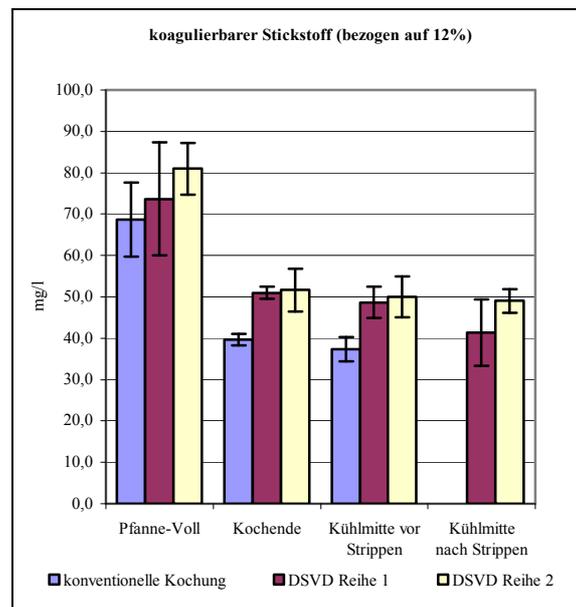


Abbildung 66: Noch koagulierbarer Stickstoff

6.2.4.2 Noch koagulierbarer Stickstoff

Beim noch koagulierbaren Stickstoff (Abbildung 66) zeigt sich, dass die Abnahme mit dem DSVD deutlich geringer ausfällt als mit dem konventionellen System. Es ist zu bemerken, dass in allen drei Fällen die Werte sehr hoch ausfallen. Bei Kochende liegen die mit der DSVD-Anlage hergestellten Würzen um etwa 10 mg/l höher als die der Vergleichssude.

6.2.4.3 Gesamtlöslicher Stickstoff

Die Betrachtung des gesamtlöslichen Stickstoffs ergibt keinerlei Unterschiede bei den Kochverfahren. Alle Werte haben dasselbe Niveau, wie Abbildung 67 zeigt.

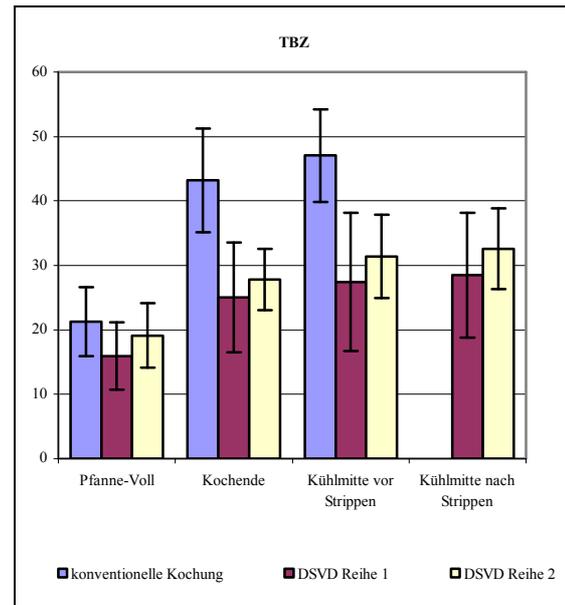
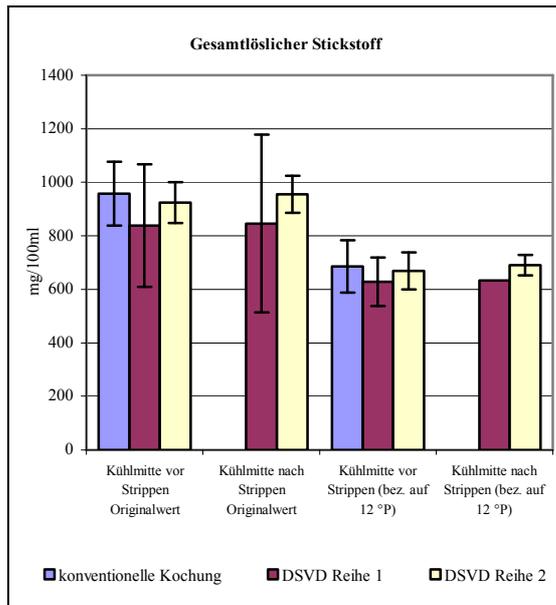


Abbildung 67: Gesamtlöslicher Stickstoff **Abbildung 68: TBZ**

6.2.5 Thiobarbitursäurezahl

Wie durch die unterschiedlich langen Kochzeiten zu erwarten ist, weist die TBZ große Unterschiede auf (Abbildung 68). Der Vorteil ist im Verlauf der Kochung zu sehen. Die TBZ nimmt bei den DSVD-Suden um 12 bzw. 13 Einheiten zu. Bei der konventionellen Kochung ist die Zunahme mit 25 Einheiten doppelt so hoch. Durch das Strippen wird die TBZ auch hier nur unwesentlich erhöht.

6.2.6 Freies DMS und DMS-P

Hinsichtlich des freien DMS ergeben sich kleine Unterschiede (Abbildung 69). Auffällig ist auch hier wieder, dass bei den Pfanne-Voll-Würzen im Mittel beim DSVD-System weniger freies DMS zu finden ist als bei der konventionellen Kochung, wenngleich der Unterschied statistisch nicht belegt werden kann. Die Ursache für die niedrigeren Werte liegt darin, dass beim Aufheizen der Würze mit dem DSVD bereits über die dünne Schicht ausgedampft wird. Die Endwerte sind nahezu gleich, wobei tendenziell mit der konventionellen Kochung niedrigere Werte erzielt werden, was aber in der langen Kochzeit und der hohen Verdampfung begründet ist. Im Allgemeinen können alle Werte als sehr gut angesehen werden, da sie weit unter dem Schwellenwert von 100 µg/l liegen. Ein ähnliches Bild zeigt sich auch beim DMS-P (Abbildung 69). Hier trägt die lange Kochzeit ebenfalls wesentlich zu den niedrigeren Werten bei der konventionellen Kochung bei. Beim DSVD-System ist der Wert allerdings ohne Belang.

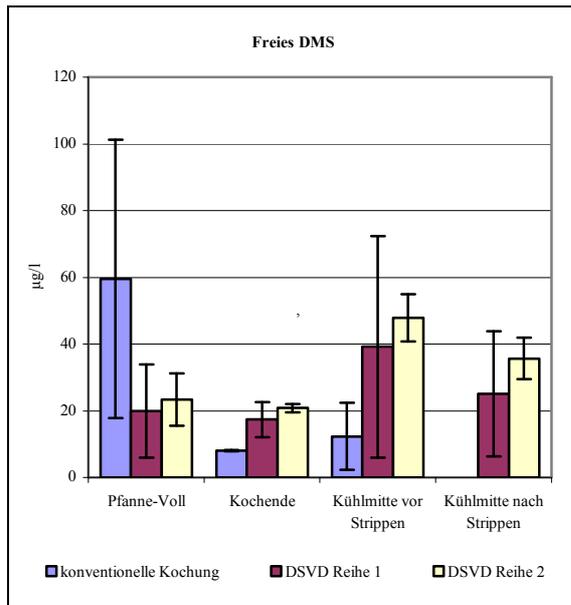


Abbildung 69: Freies DMS

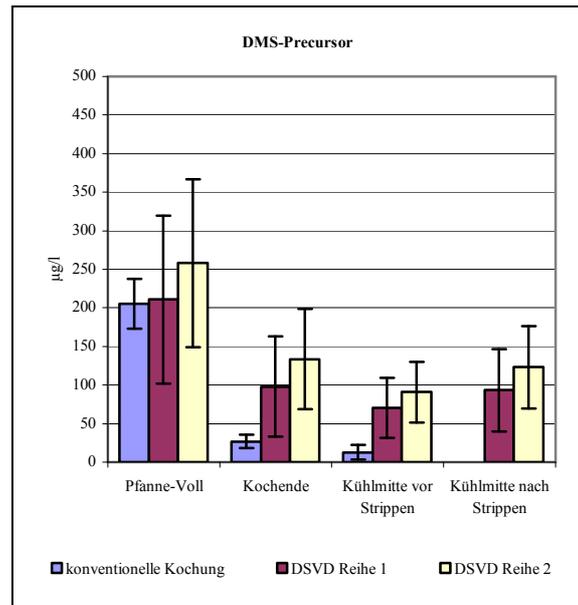


Abbildung 70: DMS-P

6.2.7 Verhalten der Würze aromastoffe bei der Kochung

Die Würze aromastoffe geben einen detaillierten Überblick über den Verlauf der Kochung. Sie eignen sich sehr gut zur Beurteilung von Ausdampfung und thermischer Belastung bei der Kochung. Jedoch muss angemerkt werden, dass die Werte zwischen den einzelnen Suden einer Versuchsreihe so unterschiedlich waren, dass eine statistische Absicherung der Ergebnisse nicht erfolgen konnte. Im Folgenden sind deshalb lediglich die Mittelwerte aus den Versuchsreihen aufgeführt, es werden nur Tendenzen aufgezeigt.

6.2.7.1 2-me-Butanal und 3-me-Butanal

Beide Aromastoffe zeigen ein nahezu identisches Verhalten, wie Abbildung 71 und Abbildung 72 zeigen. Beide Stoffe werden bei der Kochung sehr gut ausgetrieben. Bei der konventionellen Kochung steigen die Werte dann bis Kühlmitte hin wieder leicht an. Zwar ist noch Hitze vorhanden, es wird aber nichts mehr ausgedampft. Beim DSVD-System werden die Werte durch das Strippen niedriger gehalten. Auch hier zeigt sich, dass schon beim Aufheizen eine Austreibung stattfindet. Außerdem kann festgestellt werden, dass für diese beiden Stoffe keine hohe Verdampfung notwendig ist.

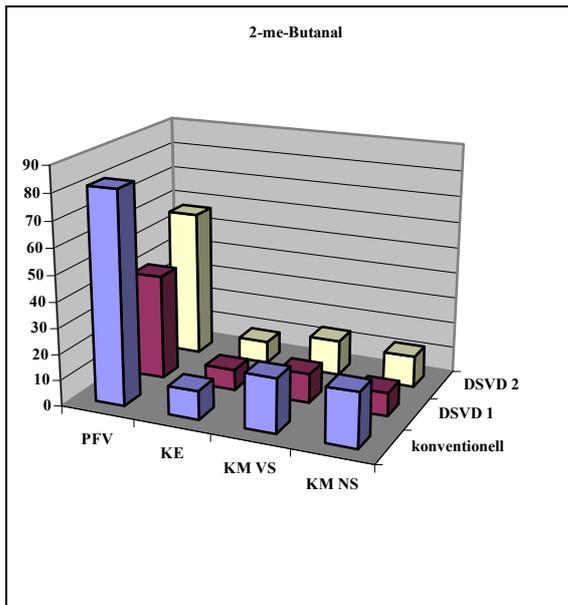


Abbildung 71: 2-me-Butanal

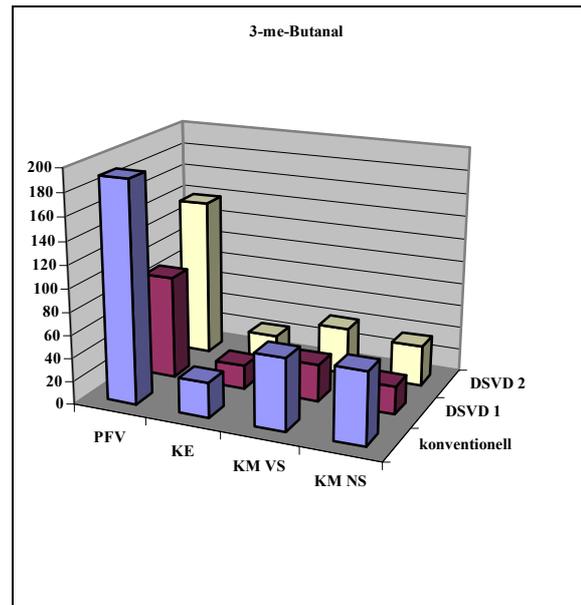


Abbildung 72: 3-me-Butanal

6.2.7.2 Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal

Methional (Abbildung 73) wird bei der konventionellen Kochung zunächst gut ausgetrieben, im Verlauf der Whirlpoolrast steigen die Werte aber fast wieder auf den Ausgangswert an. Bei beiden DSVD-Versuchsreihen sind zwischen Pfanne-Voll und Kühlmitte keinerlei Veränderungen bemerkbar. Neubildung und Ausdampfung stehen also in einem ausgeglichenen Verhältnis.

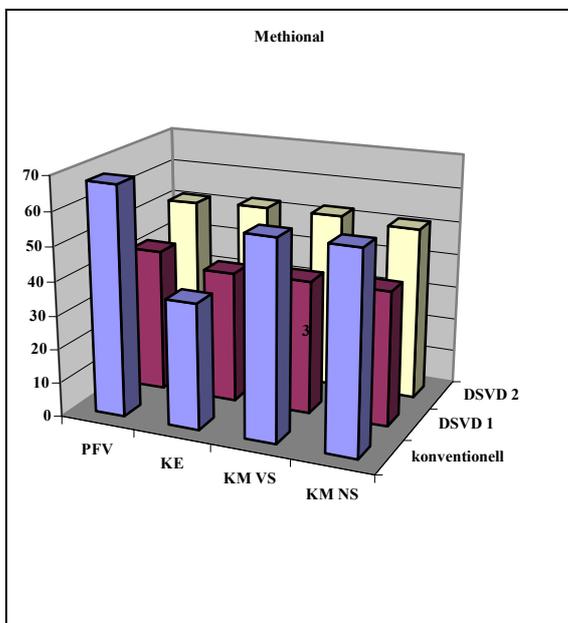


Abbildung 73: Methional

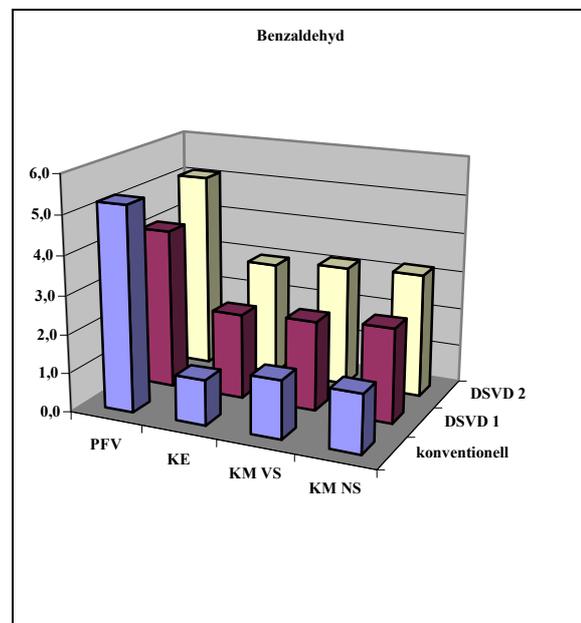


Abbildung 74: Benzaldehyd

Benzaldehyd (Abbildung 74), das wie Methional als Ausdampfindicator geeignet ist, erfährt mit der konventionellen Kochung eine stärkere Abnahme als bei den DSVD-Reihen. Ursache hierfür ist sicherlich die deutlich niedrigere Verdampfung mit dem DSVD-

System. Gleichzeitig hat Benzaldehyd mit 179 °C als Reinstoff eine sehr hohe Siedetemperatur. Es ist aus diesem Grund schwerer flüchtig.

2-Phenylethanal (Abbildung 75) zeigt ebenfalls bei der klassischen Kochung eine deutliche Verminderung auf und steigt dann bis Kühlmitte wieder an. Bei den DSVD-Suden ist auch dieser Ausdampfendikator fast konstant. Zwischen Kochende und Ende der Whirlpoolrast ist zwar ein kleiner Anstieg zu verzeichnen, dieser wird aber durch das Strippen wieder egalisiert.

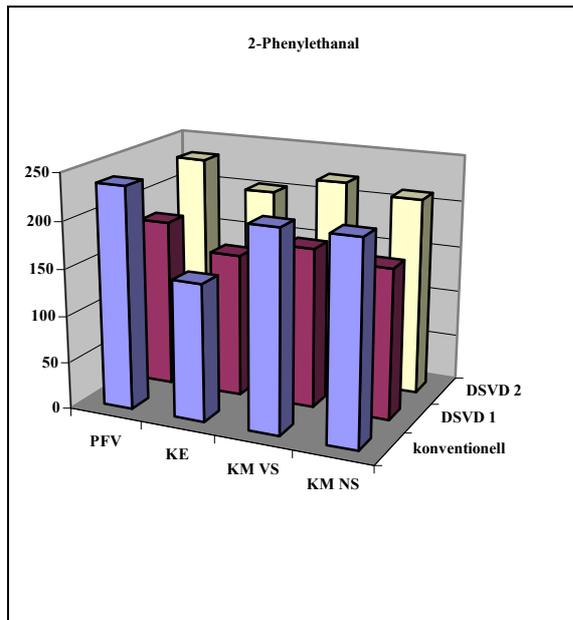


Abbildung 75: 2-Phenylethanal

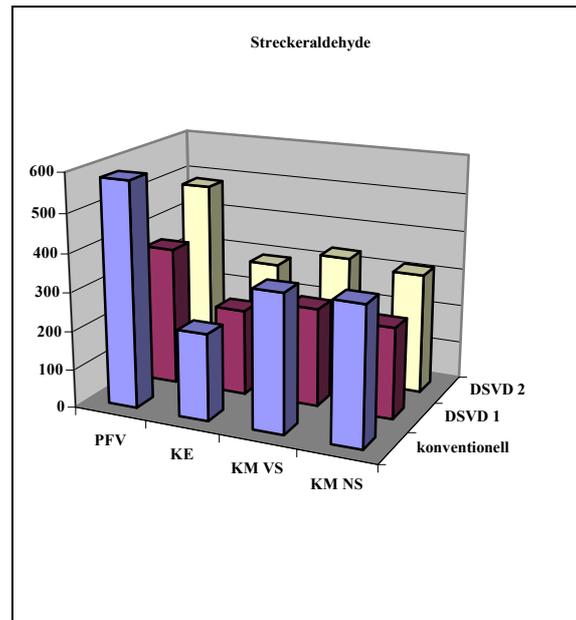


Abbildung 76: Summe der Streckeraldehyde

6.2.7.3 Summe der Streckeraldehyde

Bei Kochende ist die Summe der Streckeraldehyde (Abbildung 76) identisch. Die niedrigeren Werte bei Pfanne-Voll mit dem DSVD-System ergeben sich wieder aus der schon beim Aufheizen stattfindenden Verdampfung. Deutlich ist bei der konventionellen Kochung auch wieder der Anstieg bis Kühlmitte. Die absoluten Werte liegen mit DSVD-System tendenziell unter denen der konventionellen Kochung. Statistisch lässt sich aber auch hier keine gesicherte Aussage treffen.

6.2.7.4 Pentanal und 2-Pentanon

Bei beiden Systemen ist der Ausdampfendikator Pentanal bei Pfanne-Voll und bei Kochende nicht analysierbar. Bis Kühlmitte wird Pentanal nachgebildet, aber nicht mehr ausgedampft. In Abbildung 77 ist gut zu sehen, dass mit DSVD-System durch das Strippen eine deutliche Verminderung zu verzeichnen ist. Die Werte liegen alle weit unter der Geschmacksschwelle von 10 µg/l.

2-Pentanon (Abbildung 78) ist bei der konventionellen Kochung ab Kochende nicht mehr nachweisbar. Bei den DSVD-Suden sind noch Spuren feststellbar, die aber weit unter den Grenzwerten liegen.

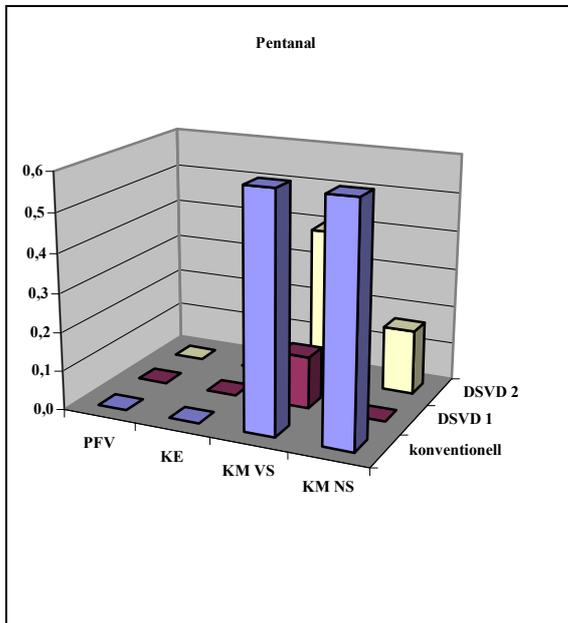


Abbildung 77: Pentanal

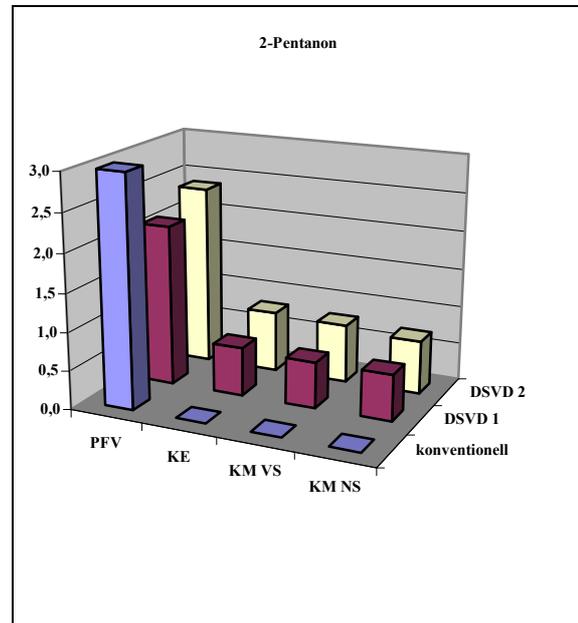


Abbildung 78: 2-Pentanon

6.2.7.5 Hexanal und Heptanal

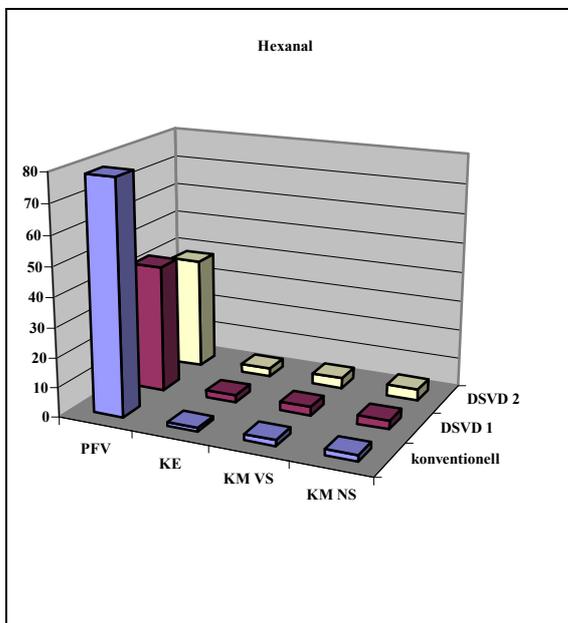


Abbildung 79: Hexanal

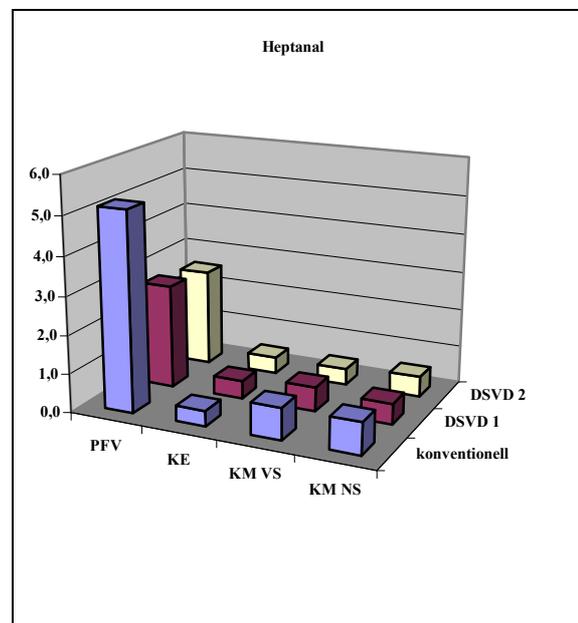


Abbildung 80: Heptanal

Hexanal (Abbildung 79) als der klassische Ausdampfndikator wird in allen drei Versuchsreihen gleichermaßen weit ausgetrieben, sodass bei Kühlmittle zwischen DSVD und klassischer Kochung keine Unterschiede mehr auszumachen sind. Bei Pfanne-Voll liegen die

Werte bei den DSVD-Suden etwas niedriger, weil auch hier schon beim Aufheizen der Würze eine Ausdampfung stattfindet.

Ein ähnliches Bild ergibt sich beim Heptanal (Abbildung 80). Hier ist mit dem Innenkocher ein leichter Anstieg nach Kochende zu verzeichnen; mit dem DSVD-System ist, bedingt durch das Strippen, der Wert bei Kühlmitte identisch mit dem bei Kochende.

6.2.7.6 tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton

tr-2-cis-6-Nonadienal (Abbildung 81) steigt zum Ende der Kochung bei den DSVD-Suden auf etwas höhere Werte als bei den konventionellen. Diese Entwicklung ist so nicht direkt erklärbar, denn eigentlich sollte auch hier eine deutliche Reduzierung durch das Strippen stattfinden. Bei den Vergleichssuden sinkt der Wert bei der Kochung leicht und steigt aber im Verlauf von Whirlpoolrast und Kühlung wieder an.

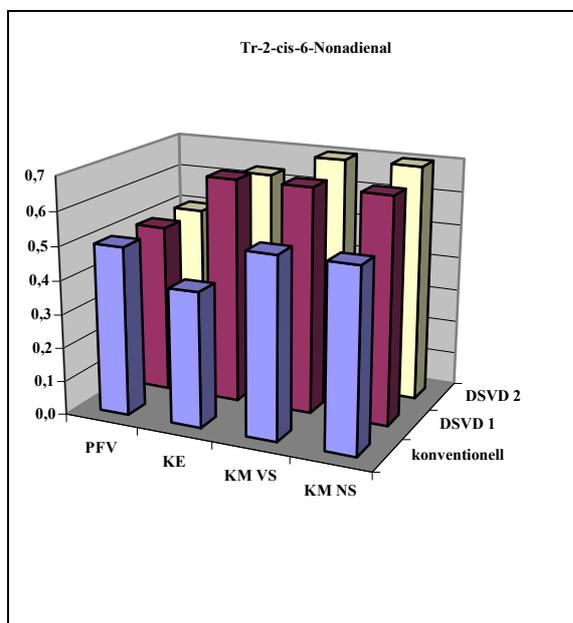


Abbildung 81: tr-2-cis-6-Nonadienal

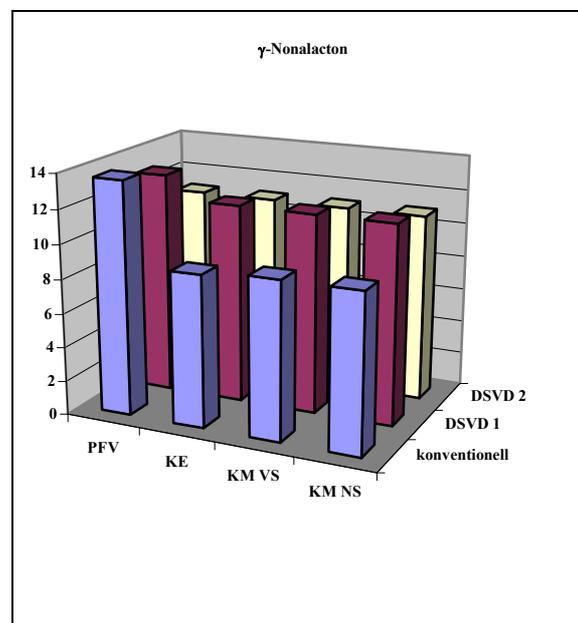


Abbildung 82: γ -Nonalacton

Bei der normalen Kochung nimmt γ -Nonalacton (Abbildung 82) durch die Ausdampfung von Pfanne-Voll bis Kochende ab. Danach bleibt es konstant, weil es im Verlauf der Kochung und Heißhaltezeit nicht mehr nachgebildet wird. Bei den zwei DSVD-Reihen bleiben die Werte über den gesamten Verlauf auf etwas höherem Niveau konstant.

6.2.7.7 2-Furfural und 2-ac-Furan

Wie zu erwarten, steigt die Konzentration des 2-Furfural (Abbildung 83) bei der herkömmlichen Kochung wesentlich stärker an als bei den DSVD-Suden. Die Ursache ist einerseits in der deutlich verlängerten Heißhaltezeit und andererseits in der größeren Gesamtverdampfung begründet. Die konventionell gekochte Würze erfährt eine wesentlich höhere thermische Belastung.

Ein vergleichbares Bild zeigt sich bei dem Hitzeindikator 2-ac-Furan (Abbildung 84). Auch hier weisen die DSVD-Sude bei Kühlmitte niedrigere Werte auf. Der Abstieg bei

Reihe 2 ist nicht zu erklären. Es ist zu sehen, dass das 2-ac-Furan erst nach der Whirlpoolrast mit der konventionellen Kochung einen deutlichen Anstieg erfährt, weil die durch die Hitze nachgebildete Menge nicht mehr ausgedampft wird. Dass Ausdampfung eine Rolle spielt, zeigt auch die Verminderung durch das Strippen in Reihe 2 der DSVD-Sude.

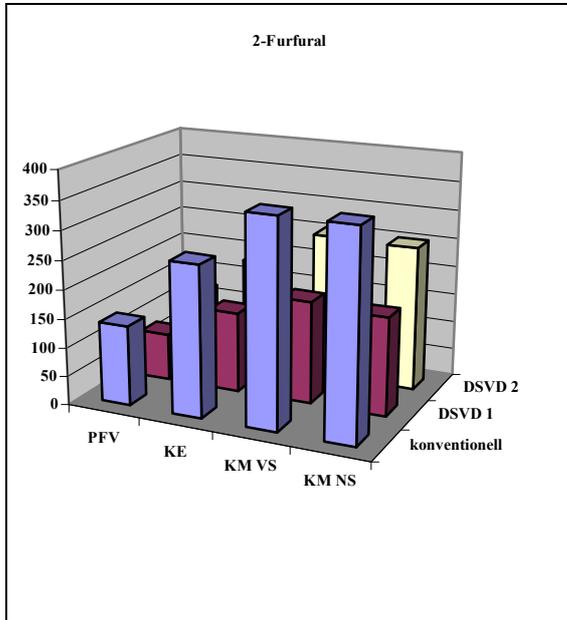


Abbildung 83: 2-Furfural

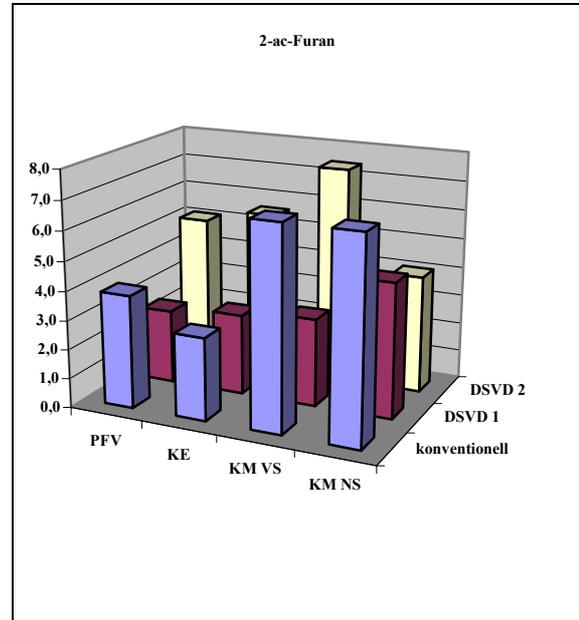


Abbildung 84: 2-ac-Furan

6.2.7.8 2-me-Butanol und 3-me-Butanol

Die beiden hochsiedenden Komponenten 2-me-Butanol (Abbildung 85) und 3-me-Butanol (Abbildung 86) verhalten sich bei der konventionellen Kochung annähernd identisch. Sie werden im Prozessverlauf fast vollständig ausgetrieben. Beim DSVD-System bleibt das 2-me-Butanol relativ konstant, und erst beim Strippen erfährt es eine leichte Verminderung. Das 3-me-Butanol wird hingegen schon in der Kochphase reduziert und verbleibt dann auf niedrigem Niveau. Allerdings liegen alle Werte mit dem DSVD-System deutlich höher.

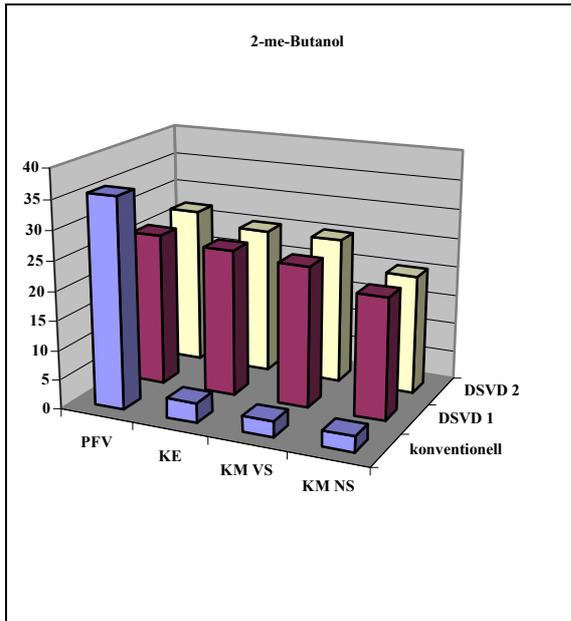


Abbildung 85: 2-me-Butanol

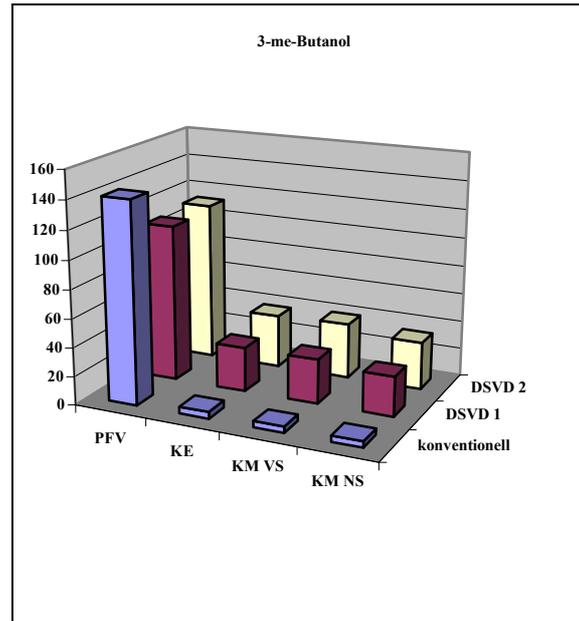


Abbildung 86: 3-me-Butanol

6.2.7.9 1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol

Alle vier Stoffe (Abbildung 87 – Abbildung 90) verhalten sich nahezu identisch. Bei der konventionellen Kochung werden sie bis unter die Nachweisgrenze ausgetrieben. Mit dem DSVD-System erfahren sie, obwohl es sich bei allen vier Komponenten um hochsiedende Stoffe handelt, eine drastische Reduzierung, jedoch verbleiben noch Spuren. Sie verhalten sich somit unterschiedlich zu anderen Stoffen mit einem hohen Siedepunkt. Das legt die Vermutung nahe, dass bei der Ausdampfung die Höhe des Siedepunktes eines Stoffes keine Rolle auf dessen Ausdampfverhalten hat.

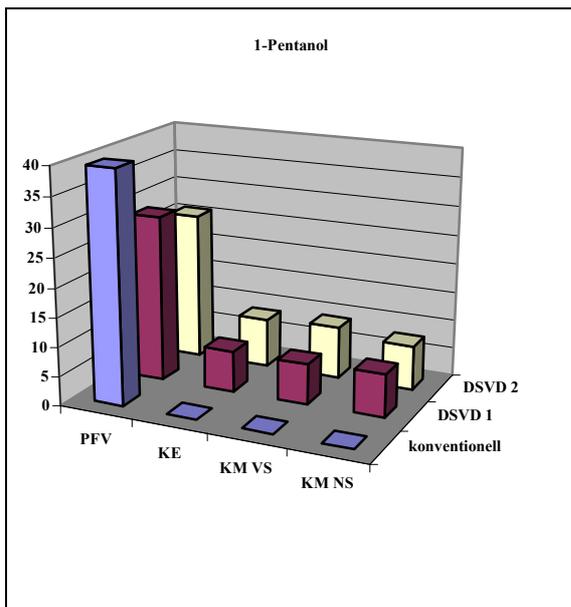


Abbildung 87: 1-Pentanol

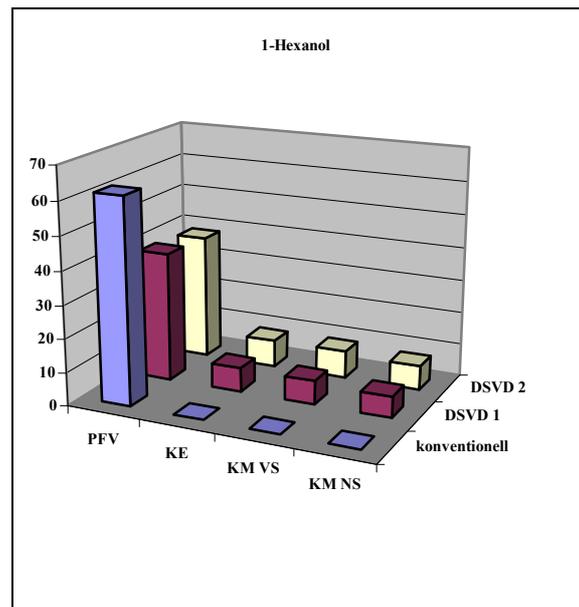


Abbildung 88: 1-Hexanol

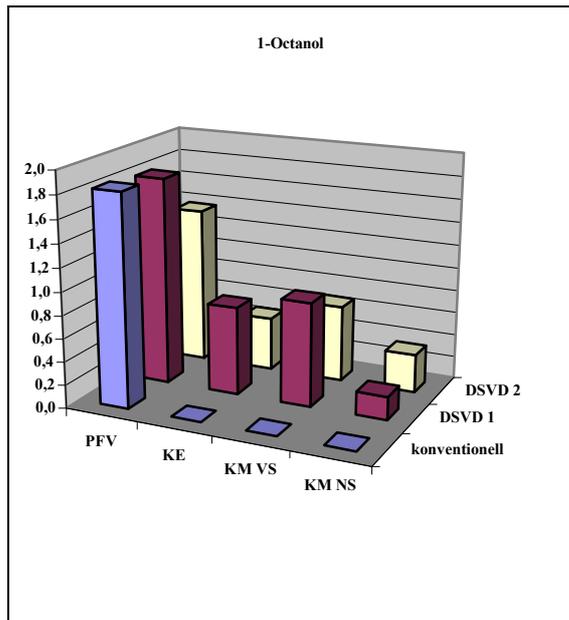


Abbildung 89: 1-Octanol

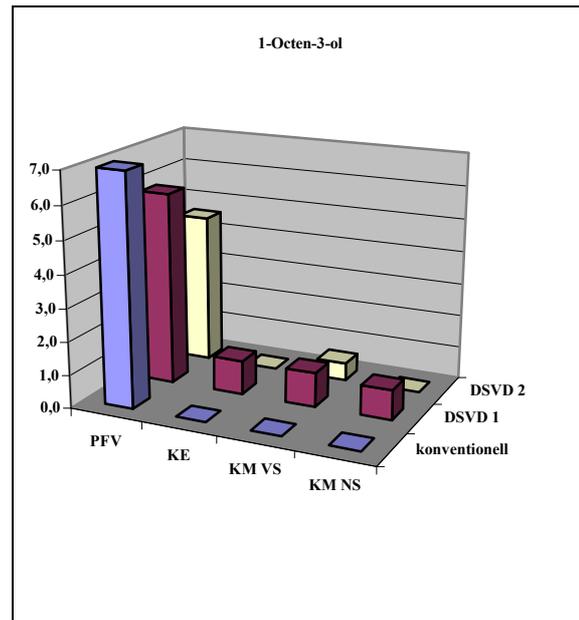


Abbildung 90: 1-Octen-3-ol

6.2.7.10 Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon

Phenyl-OH (Abbildung 91) erfährt im gesamten Prozessverlauf keinerlei nennenswerte Veränderung. Zwar nimmt es bei der normalen Kochung bis Kochende leicht ab, jedoch liegt es dann auf einem mit den DSVD-Suden identischen Niveau.

Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon (Abbildung 92) verhält sich völlig uneinheitlich. Es wird bei der konventionellen Kochung bis unter die Nachweisgrenze vermindert, mit DSVD-System verbleiben Spuren. Bei der ersten DSVD-Reihe ändert sich der Wert im gesamten Prozessverlauf nicht, wohingegen bei der zweiten Reihe bei Pfanne-Voll sehr hohe Werte auftreten, die aber im Verlauf der Kochung stark reduziert werden, allerdings nicht auf das niedrige Niveau der ersten Reihe. Hier aber von einem Einfluss der etwas geringeren Gesamtverdampfung zu sprechen, wäre vermessen.

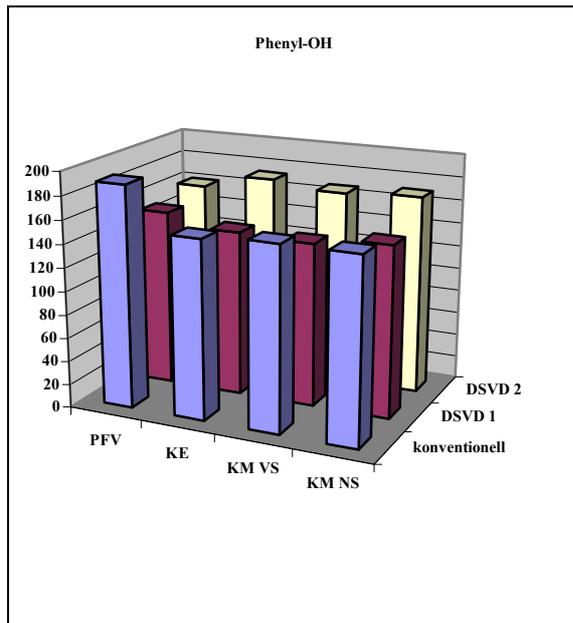
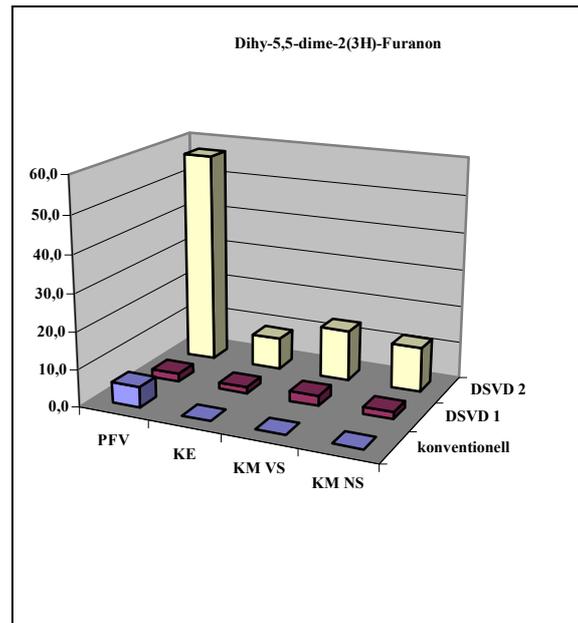


Abbildung 91: Phenyl-OH

Abbildung 92: Dihy-5,5-dime-2(3H)-
Furanon

6.2.7.11 Terpeneol, Linalool, Nerol und Geraniol

Auch die Hopfenbestandteile verhalten sich nicht einheitlich. Terpeneol (Abbildung 93) ist überhaupt nur bei der zweiten DSVD-Reihe bei Kochende und vor dem Strippen nachweisbar.

Linalool (Abbildung 94) wird beim herkömmlichen Verfahren schon während der Kochung restlos ausgetrieben. Mit dem DSVD-System wird es bei der Kochung zwar reduziert, aber bei weitem nicht so weitreichend. Durch das Strippen erfährt es nur bei Reihe 1 eine Verminderung.

Nerol (Abbildung 95) ist wieder nur an einer Stelle nachweisbar, eventuell ist hier die Probenahme zeitlich sehr eng nach der letzten Hopfengabe erfolgt.

Anders verhält sich Geraniol (Abbildung 96). Es ist zwar zum Ende der konventionellen Kochung nicht analysierbar, jedoch sind bei Kühlmittle deutlich höhere Werte als mit dem DSVD-System festzustellen. Geraniol wird auch durch das Strippen deutlich vermindert.

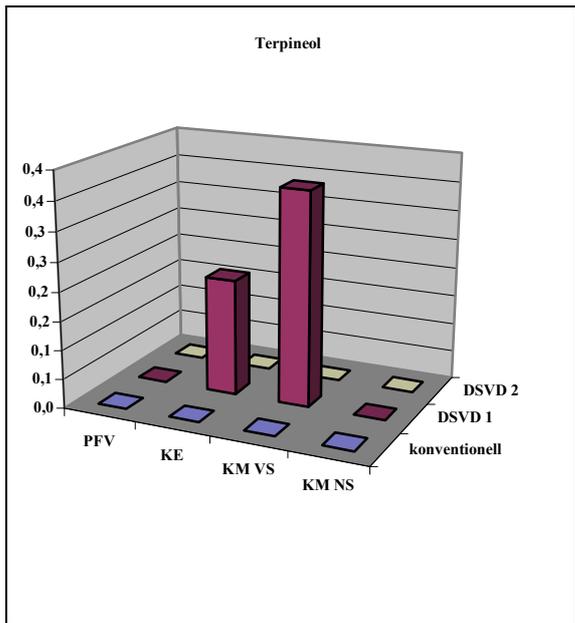


Abbildung 93: Terpineol

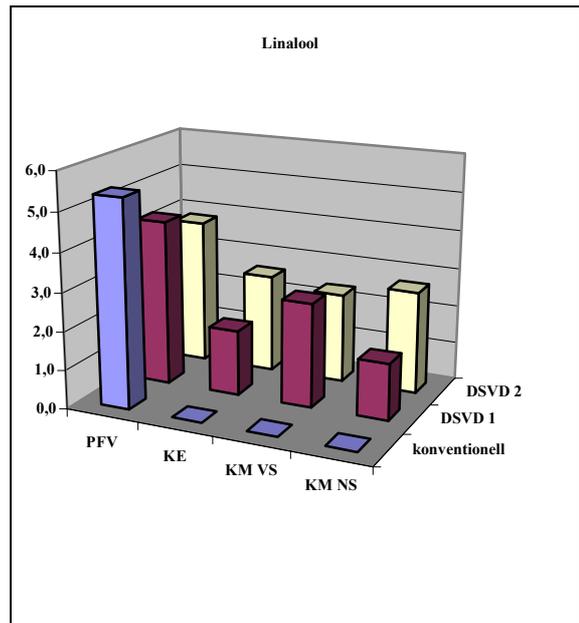


Abbildung 94: Linalool

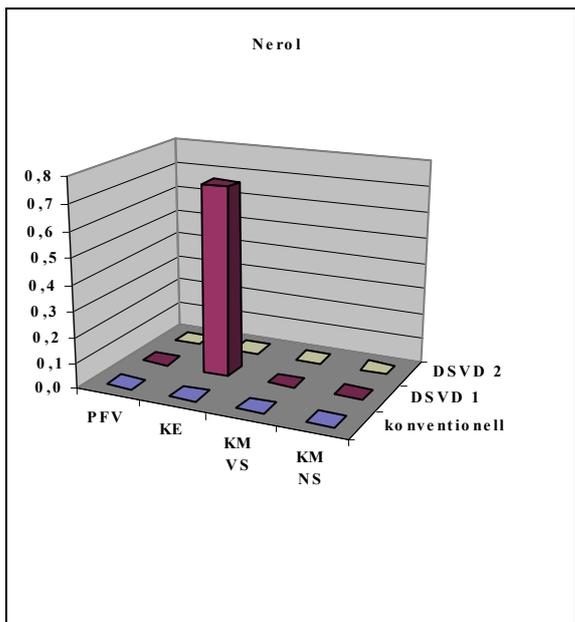


Abbildung 95: Nerol

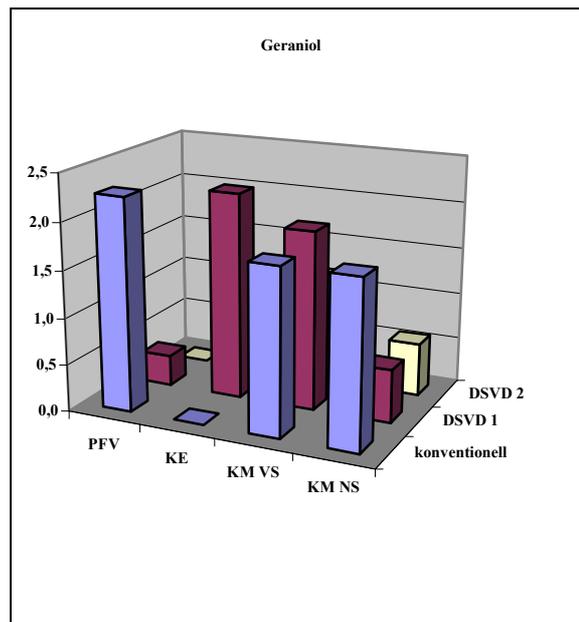


Abbildung 96: Geraniol

6.3 Ergebnisse der ersten industriellen Anlage

Mit den bei den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnissen wurde die erste Anlage im industriellen Maßstab gebaut. In diesem Kapitel sollen die Ergebnisse dargestellt werden, die mit diesem System erzielt worden sind.

6.3.1 Extrakt und Gesamtverdampfung

Bei den Ergebnissen der industriellen Anlage ergibt sich ein anderes Bild als bei den Versuchen mit der Pilotanlage. Die Extraktwerte (Abbildung 97) weisen bei den herkömmlichen Suden eine relativ große Schwankungsbreite auf, sodass hier eine statistisch gesicherte Aussage nicht möglich ist. Das große Vertrauensintervall bei der herkömmlichen Kochung wird durch den letzten Sud in der Versuchsreihe hervorgerufen, der aus unerklärlicher Ursache etwa 0,6 % mehr Extrakt hat als die beiden anderen. Da die Differenz schon beim Zeitpunkt Pfanne-Voll zu finden ist, liegt die Ursache nicht in der Kochung, die bei beiden Systemen sehr gleichmäßig verlief. Bei der Gesamtverdampfung allerdings wird mit dem DSVD-System nur noch die Hälfte der konventionellen Kochung benötigt (Abbildung 98).

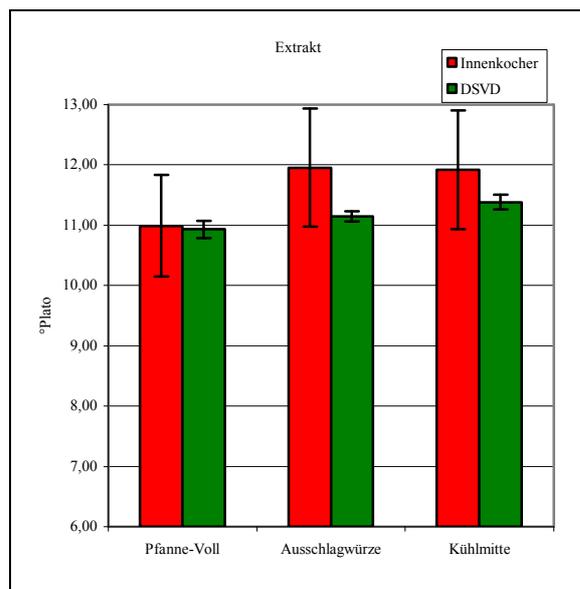


Abbildung 97: Extraktzunahme

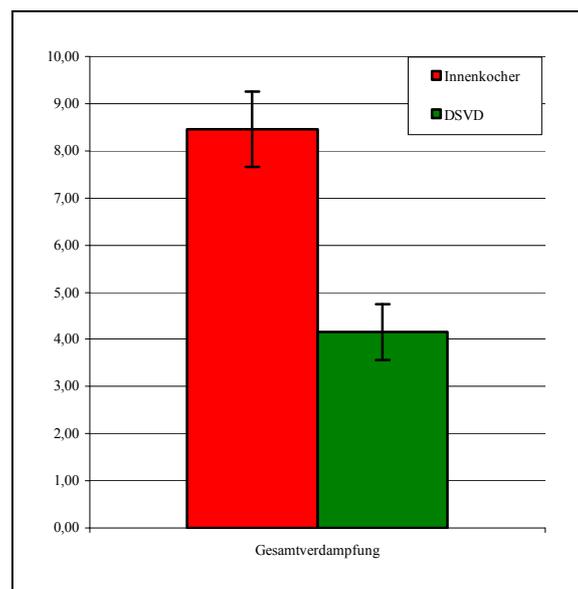


Abbildung 98: Gesamtverdampfung

6.3.2 Noch koagulierbarer Stickstoff

Abbildung 99 zeigt den Verlauf des noch koagulierbaren Stickstoffs während der Kochung. Hier wird deutlich, dass das DSVD-System wesentlich schonender mit dieser Eiweißfraktion umgeht, vor allem der schaumpositive Stickstoff wird geschont. Wenn man auch bei Pfanne-Voll keine statistisch gesicherte Aussage treffen kann, lässt sich zumindest die Tendenz zur Schonung bei der Aufheizphase erkennen. Der Mittelwert bei den Pfanne-Voll-Werten ist mit dem Innenkocher niedriger als mit dem DSVD-System.

Die Ursache liegt in den doch deutlich höheren Dampfdrücken und den damit verbundenen Temperaturen an der Heizfläche.

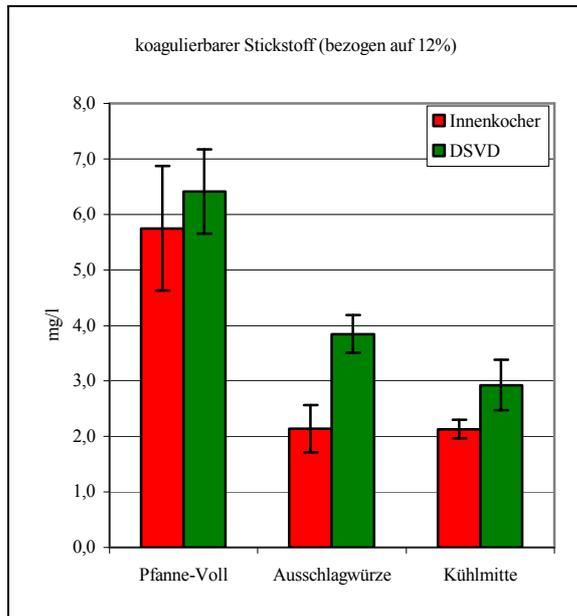


Abbildung 99: Noch koagulierbarer Stickstoff

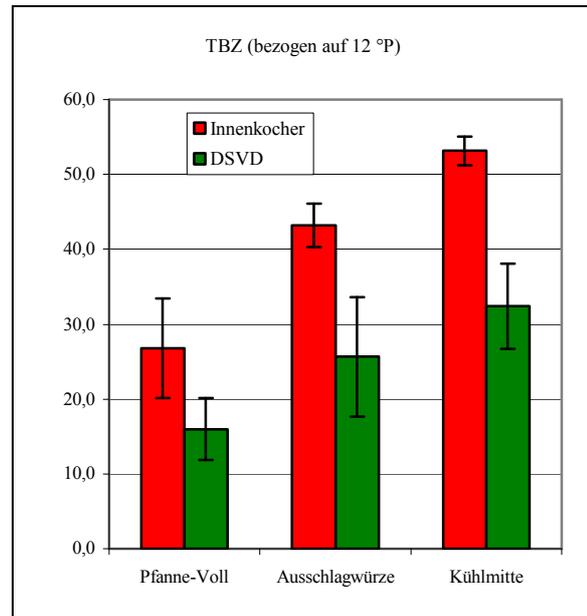


Abbildung 100: TBZ

6.3.3 Thiobarbitursäurezahl

Bei der TBZ in Abbildung 100 wird die geringere thermische Belastung mit dem DSVD-System deutlich, ist doch bereits bei den Pfanne-Voll-Würzen der Wert signifikant niedriger. Durch die geringeren Heizflächentemperaturen wird die Würze geschont. An dieser Stelle wird der Grundstein für die auch am Schluss wesentlich besseren Werte gelegt. Eine niedrige TBZ bedeutet, dass im Verlauf der Kochung weniger Wärme zugeführt wurde. Damit sinkt unter anderem das Fouling an den Heizflächen, und wertvolle Inhaltsstoffe werden geschont.

6.3.4 Freies DMS und DMS-P

Durch das Strippen kann mit der großen Heizfläche das freie DMS (Abbildung 101) sehr gut ausgetrieben werden. Man erreicht problemlos die gewünschten Werte, die in der Tendenz unter denen der Vergleichskochung liegen.

Ein anderes Bild ergibt sich beim Abbau des DMS-Precursors (Abbildung 102). Dieser wird mit dem DSVD-System nicht so weitreichend abgebaut. Die Ursache liegt in der kurzen Kochzeit von nur noch 35 Minuten gegenüber 80 Minuten mit dem Innenkocher. Da jedoch mit der gekühlten Würze die Stoffzusammensetzung fixiert ist und keine weiteren Umsetzungen mehr stattfinden, ist der Wert für das DMS-P letztlich unerheblich.

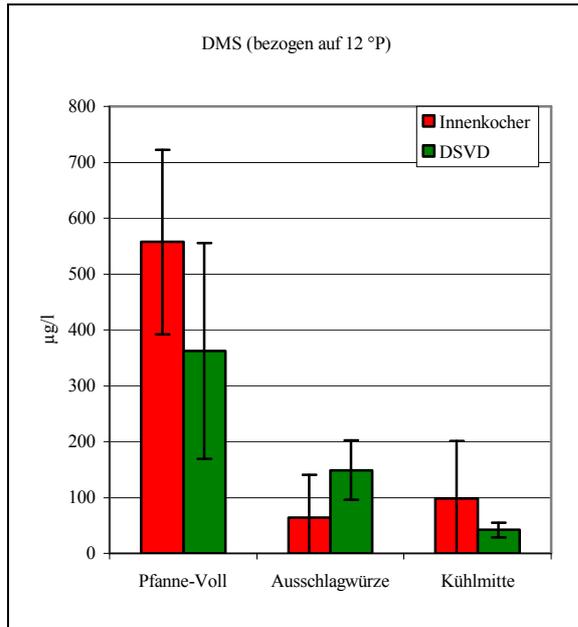


Abbildung 101: Freies DMS

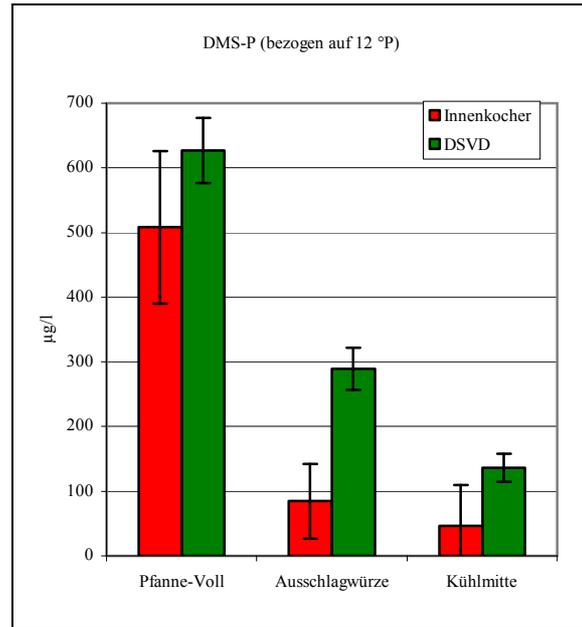


Abbildung 102: DMS-P

6.4 Ergebnisse des Vergleichs DSVD mit klassischer Kupferpfanne

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse des Vergleichs mit einer klassischen Hochleistungspfanne aus Kupfer dargestellt.

6.4.1 Extrakt und Gesamtverdampfung

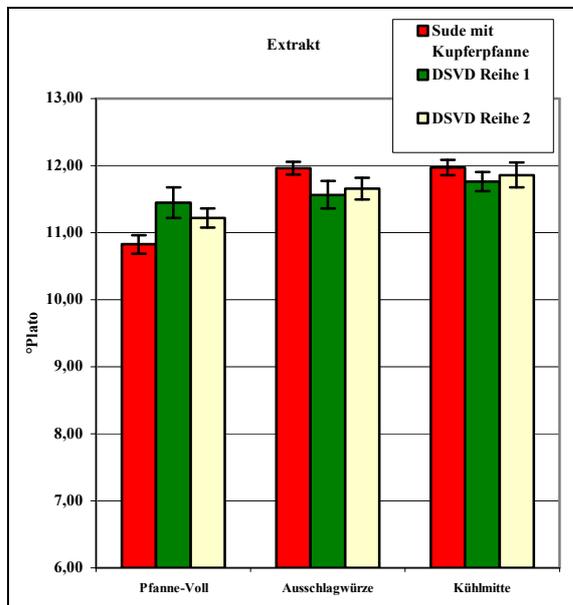


Abbildung 103: Extrakt

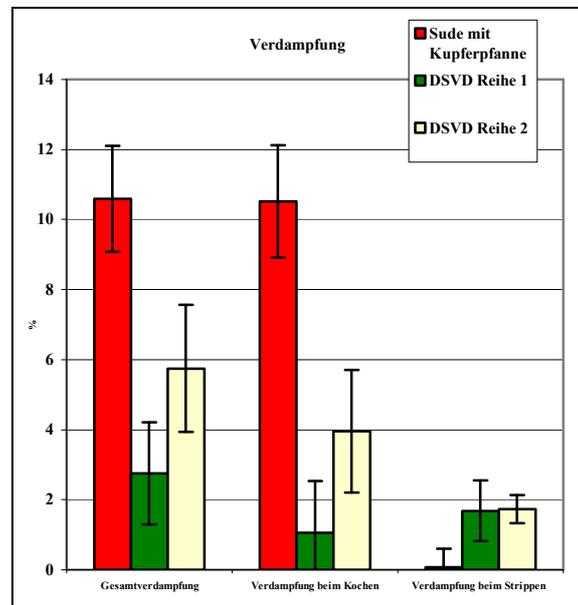


Abbildung 104: Verdampfung

Hinsichtlich der Gesamtverdampfung ergeben sich deutliche Vorteile für die Kochung mit dem DSVD. Es sind hier nur noch zwischen 3 % bei der ersten und 6 % bei der zweiten Versuchsreihe notwendig. Bei der klassischen Kochung werden ca. 11 % verdampft. Der

Unterschied bei den Gesamtverdampfungen (Abbildung 104) spiegelt sich auch bei den Extraktwerten (Abbildung 103) wider. Um gleiche Ausschlagkonzentrationen zu erhalten, ist die Pfanne-Voll-Konzentration mit dem DSVD-System höher als bei den Vergleichssuden.

6.4.2 Farbe und Thiobarbitursäurezahl

Farbzunahme (Abbildung 105) und TBZ (Abbildung 106) korrespondieren sehr gut miteinander. Die Zufärbung bei der Hochleistungspfanne ist mit fast 3 EBC bis Kühlmittle sehr deutlich. Die Ursache hierfür liegt einerseits in der langen Kochdauer mit entsprechend hoher Hitzebelastung, andererseits spielen Oxidationsvorgänge eine Rolle, die durch die offene Kochung mit Schleppluft hervorgerufen werden.

Die Zufärbung und damit die thermische Belastung zeigt sich auch mit der Zunahme der TBZ im Prozessverlauf, die mit der klassischen Pfanne um mehr als 20 Einheiten auf Absolutwerte von über 40 ansteigt.

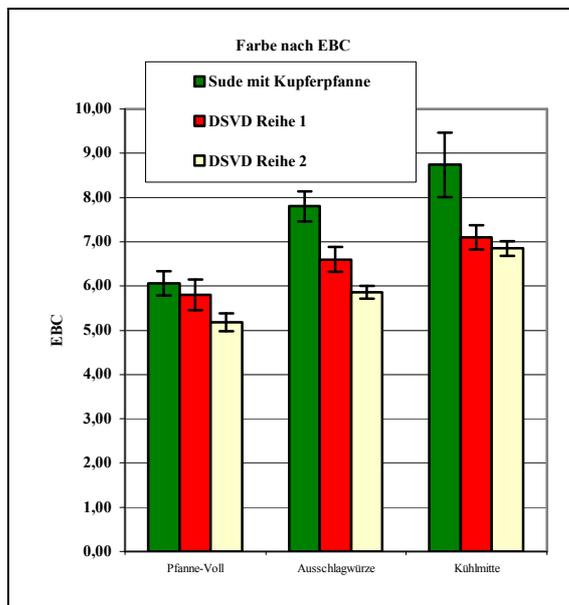


Abbildung 105: Farbe

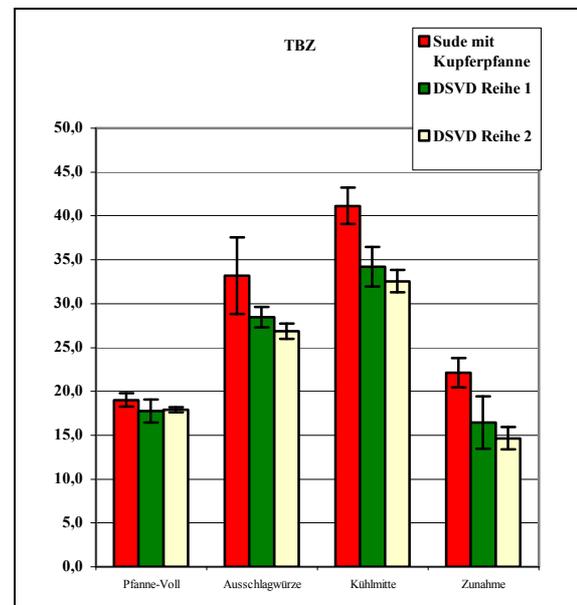


Abbildung 106: TBZ

6.4.3 Stickstoffverhältnisse

Bezüglich des noch koagulierbaren Stickstoffs (Abbildung 107) ergeben sich zwischen den Versuchsreihen keine signifikanten Unterschiede, wohl aber hinsichtlich der Abnahme zwischen Pfanne-Voll und Ausschlagwürze. Auch bei der absoluten Abnahme ist der Unterschied zwischen den beiden Kochverfahren signifikant, mit dem DSVD-System wird diese Eiweißfraktion ebenfalls geschont. Das Strippen hat keinen Einfluss auf den Abbau des koagulierbaren Stickstoffs, da dabei die Dauer der Hitzeeinwirkung zu gering ist.

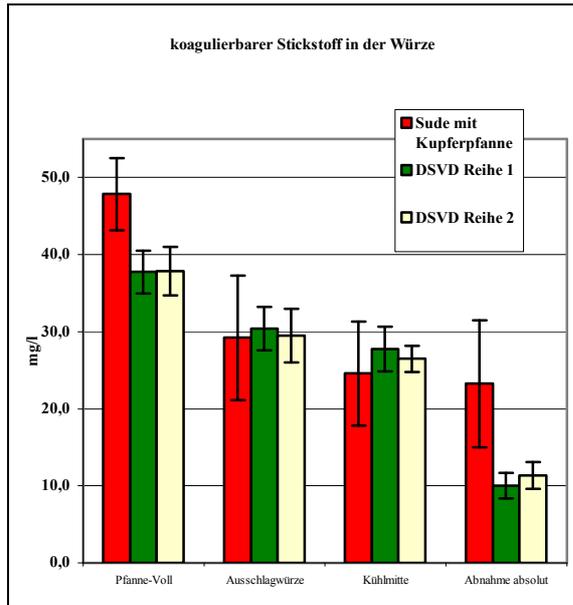


Abbildung 107: Noch koagulierbarer Stickstoff in der Würze

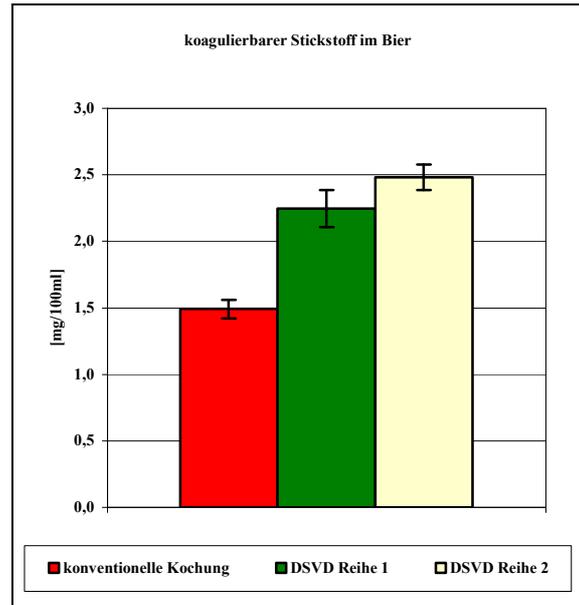


Abbildung 108: Noch koagulierbarer Stickstoff im Bier

Die Werte für den noch koagulierbaren Stickstoff sind bei den Bieren mit dem DSVD-System höher (Abbildung 108). Sie liegen zwischen 20 und 25 mg/l; mit der konventionellen Kochung werden dagegen nur 15 mg/l erreicht.

6.4.4 DMS und DMS-P

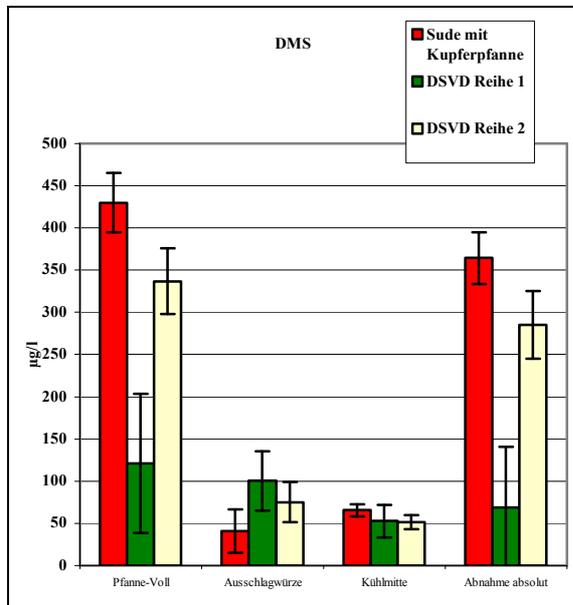


Abbildung 109: Freies DMS

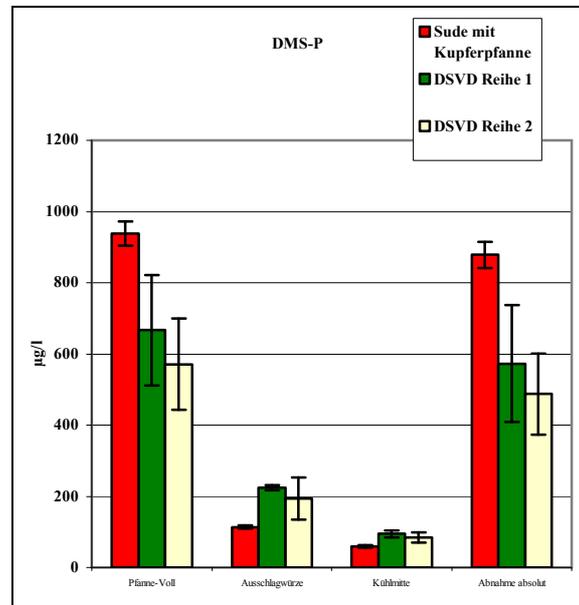


Abbildung 110: DMS-P

Das freie DMS (Abbildung 109) wird mit dem DSVD-System bei der Kochung wieder nicht so weit ausgetrieben wie bei der Hochleistungspfanne. Durch das Strippen sind die Werte bei Kühlmitte dann allerdings identisch.

Durch die deutlich längere Heißhaltezeit wird DMS-P (Abbildung 110) mit der klassischen Kochung bis Kochende wesentlich weiter abgebaut. Doch auch hier gleichen sich die Werte bis Kühlmitte wieder an.

6.4.5 Bitterstoffe

Die Auswertung der Hopfenbitterstoffe (Abbildung 111) und deren Isomerisierung zeigt bei Kühlmitte keine Unterschiede mehr. Bei Pfanne-Voll sind mit dem DSVD-System bereits Hopfenbitterstoffe zu finden, weil die erste Hopfengabe schon bei Pfanne-Voll ins Vorlaufgefäß gegeben wurde. Bei Kochende ist erstaunlicherweise mit dem DSVD-System, trotz wesentlich kürzerer Heißhaltung, eine bessere Isomerisierung zu verzeichnen. Ursache hierfür kann zum Beispiel in einer besseren Homogenisierung des Pfanneninhaltes oder in einem intensiveren Kontakt mit der Heizfläche liegen.

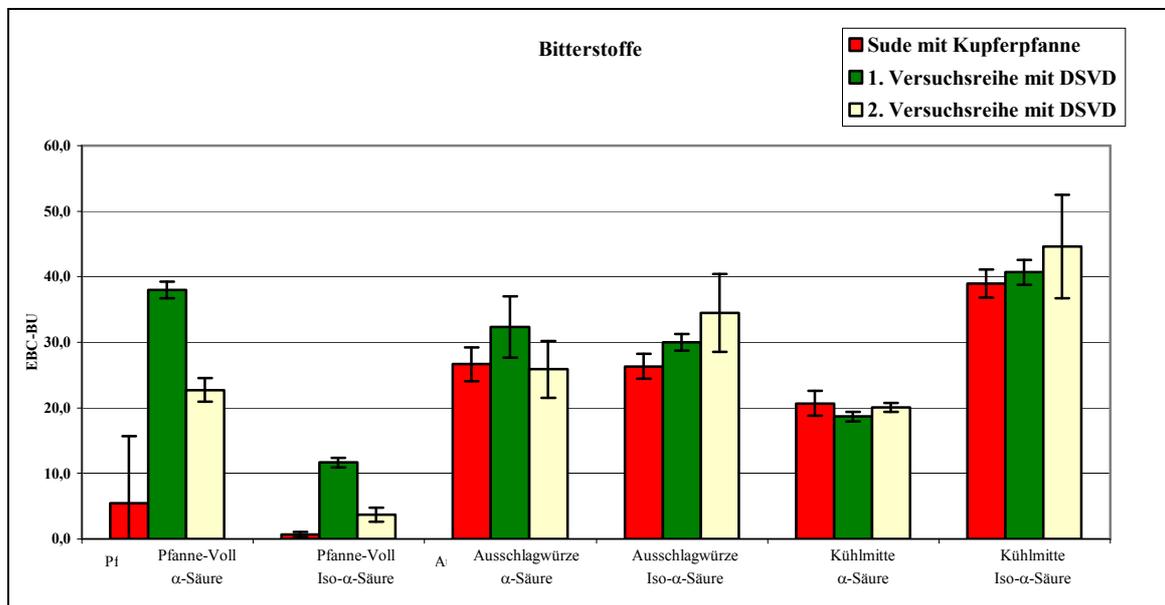


Abbildung 111: Bitterstoffe in den Würzen

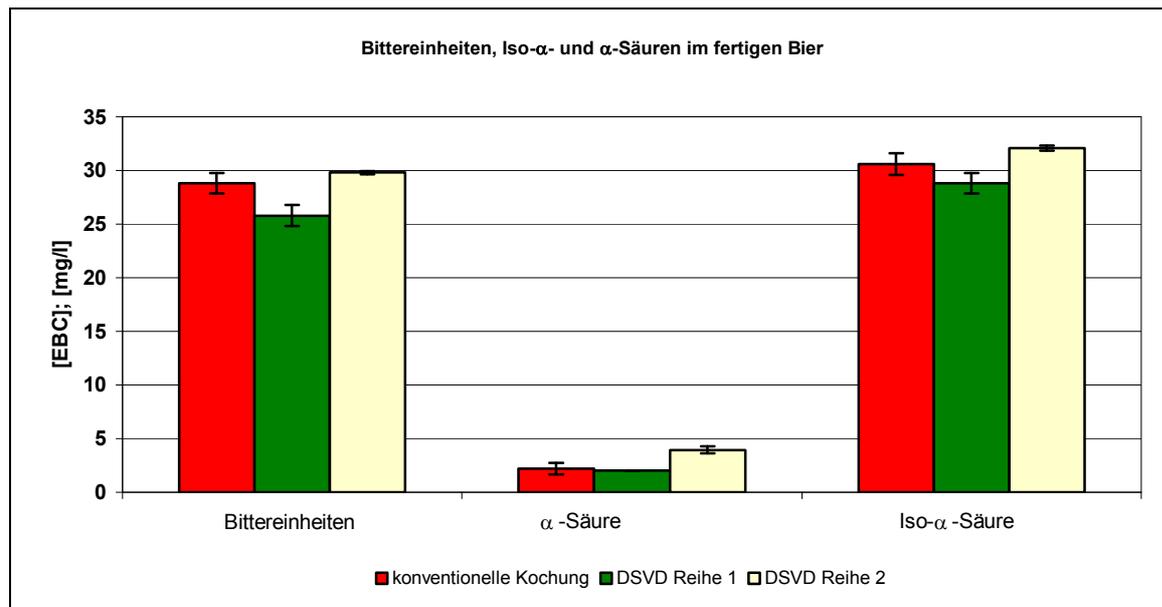


Abbildung 112: Bitterstoffe in den Bieren

Bei den Bieren zeigen sich hinsichtlich der Bittereinheiten Unterschiede (Abbildung 112), obwohl die Ausschlagwürzen identische Werte hatten. Die erste Versuchsreihe mit dem DSVD-System hatte dabei um etwa 3–4 EBC niedrigere Werte. Ursache kann die um 200 g α -Säure geringere Hopfung sein. Auch waren die Hopfungzeitpunkte noch nicht optimiert und orientierten sich an den Gaben für die konventionelle Kochung. Bei der zweiten DSVD-Reihe liegen die Werte für die nicht isomerisierte α -Säure doppelt so hoch wie bei den beiden anderen Reihen. Ursache könnte eine unbefriedigende Abscheidung der Gärdecke sein.

Bei den Iso- α -Säuren wies die zweite DSVD-Reihe ebenfalls die höchsten Werte auf.

6.4.6 Scheinbarer Extrakt und Vergärungsgrad

Abbildung 113 zeigt, dass die Biere, die mit der konventionellen Kochung hergestellt wurden, einen signifikant höheren scheinbaren Extrakt aufweisen und einen um 2 % geringeren Ausstoß- und Endvergärungsgrad haben. Alle Biere sind hoch vergoren, wie die identischen Werte zeigen.

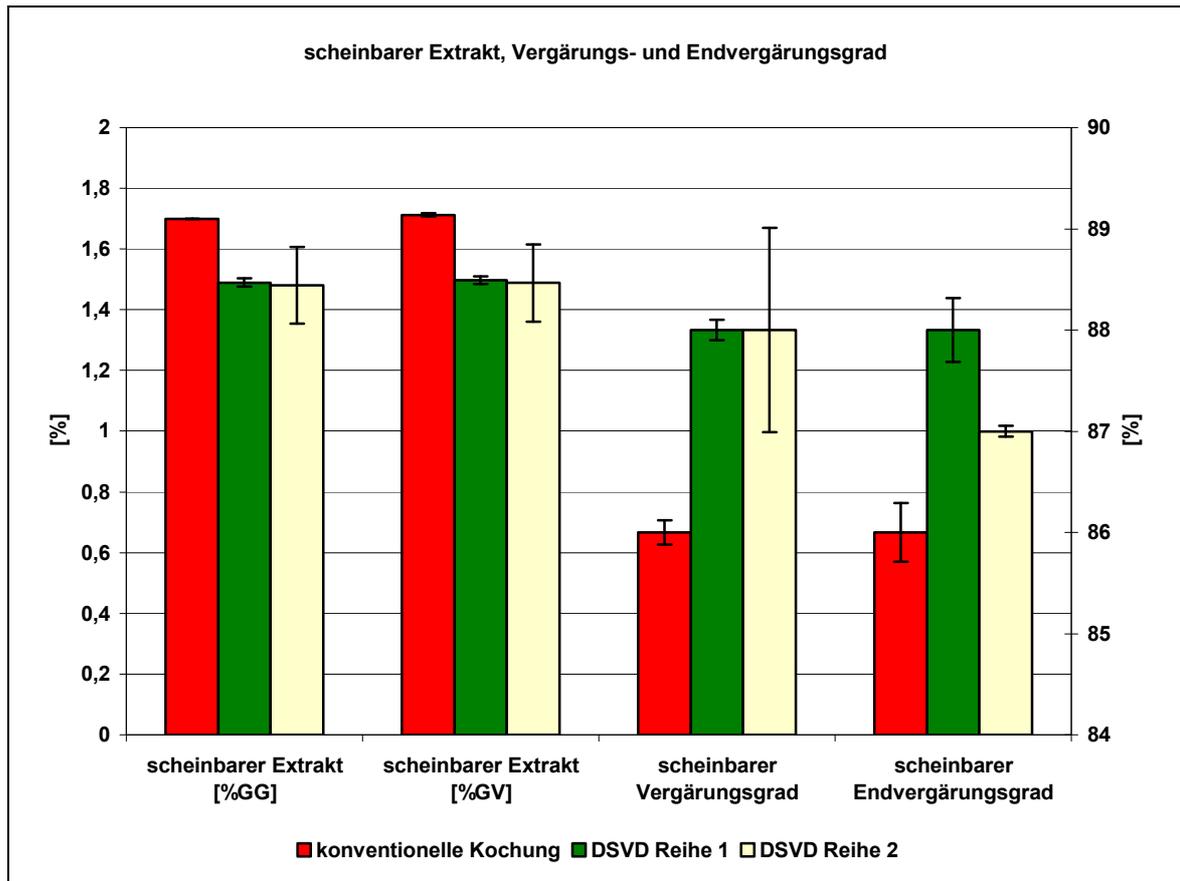


Abbildung 113: Scheinbarer Extrakt und Vergärungsgrade der Biere

6.4.7 Analyse der Biere zu Variationen bei der Kochung

6.4.7.1 Ergebnisse der Doppelsude mit erhöhtem Münchner Malz-Anteil

Diese Biere zeigen wie gewünscht eine etwas dunklere Farbe. Ziel war es, die Farbwerte der klassischen offenen Kochung auch mit dem DSVD-System zu erreichen. Die Farbe konnte im Vergleich zu den anderen DSVD-Bieren um 0,6 EBC auf einen Wert von 5,8 EBC gesteigert werden. Die konventionell gekochten Biere sind somit nur noch 0,3 EBC dunkler, was innerhalb der Schwankungsbreite der Analytik und auch der Produktion liegt.

6.4.7.2 Nachträgliche Hopfung mit Pellets vor der Würzekühlung

In einem Keg vorgelöste Pellets sind nach dem Plattenkühler zudosiert worden, um dem Bier eine Hopfennote zu verleihen. Das Bier unterschied sich mit 26 Bittereinheiten nicht von den Vergleichsbieren. Der Anteil an Iso- α -Säuren liegt leicht unter dem normalen Durchschnitt. Es zeigt sich hier, dass die zudosierten Pellets nicht mehr isomerisiert wurden.

Die Biere mit der nachträglichen Hopfung weisen mit 271 Sekunden nach NIBEM um etwa 40 Sekunden niedrigere Werte beim Schaum auf als der Rest der DSVD-Biere. Als Ursache kommen die Hopfenöle in Frage.

6.4.7.3 Nachträgliche Hopfung mit Extrakt vor der Würzekühlung

Ziel auch bei diesem Versuch war, den Bieren eine Hopfenblume zu verleihen. Durch den Ort der Dosage können leichtflüchtige Komponenten des Hopfenaromas nicht ausdampfen. In der Verkostung hat sich gezeigt, dass die Biere vom Hopfenaroma als streng und unangenehm beurteilt wurden. Hinsichtlich der Bittere wurden keine Unterschiede ausgemacht. Mit 297 Sekunden nach NIBEM und 120 Punkten nach R & C zeigt die späte Hopfung auch hier einen merkbar schlechteren Schaum als bei den Vergleichsbieren. Ursache könnten wieder die nicht ausgedampften Hopfenöle sein. In der Höhe der Bittereinheiten und auch im Gehalt an Iso- α -Säuren sind die Biere vergleichbar.

6.5 Ergebnisse der Ermittlung der minimal notwendigen Gesamtverdampfung

In diesem Abschnitt wird besonderes Augenmerk auf die Unterschiede bei den Würze-aromastoffen im Verlauf der Kochung gelegt. Die konventionelle Analytik zeigte keinerlei signifikante Unterschiede. Alle Werte liegen in den schon im vorigen Kapitel aufgezeigten Grenzen, sodass hier auf eine weitere Darstellung verzichtet wird. Der Vollständigkeit halber sind die Werte im Anhang aufgeführt.

6.5.1 Verdampfung

Um Schwankungen auszuschließen, wird die aus der Brüdenkondensatmenge berechnete Verdampfung herangezogen. Die über die Extraktwerte ermittelten Verdampfungen weisen einen sehr großen Fehler auf.

In Abbildung 114 ist zu sehen, dass bei der Versuchsreihe mit reduzierter Gesamtverdampfung nur noch etwas mehr als 2,5 % verdampft worden sind; bei den Suden mit normaler Einstellung waren es knappe 5 %. Der Unterschied zwischen den Verdampfungen wird beim Kochen festgelegt, dabei wird durch eine fast vollständig geschlossene Dampfzufuhr die Würze nur noch heißgehalten und nahezu nichts mehr verdampft. Das Strippen ist in beiden Fällen gleich stark, denn unerwünschte Aromastoffe sollen möglichst weitreichend ausgetrieben werden.

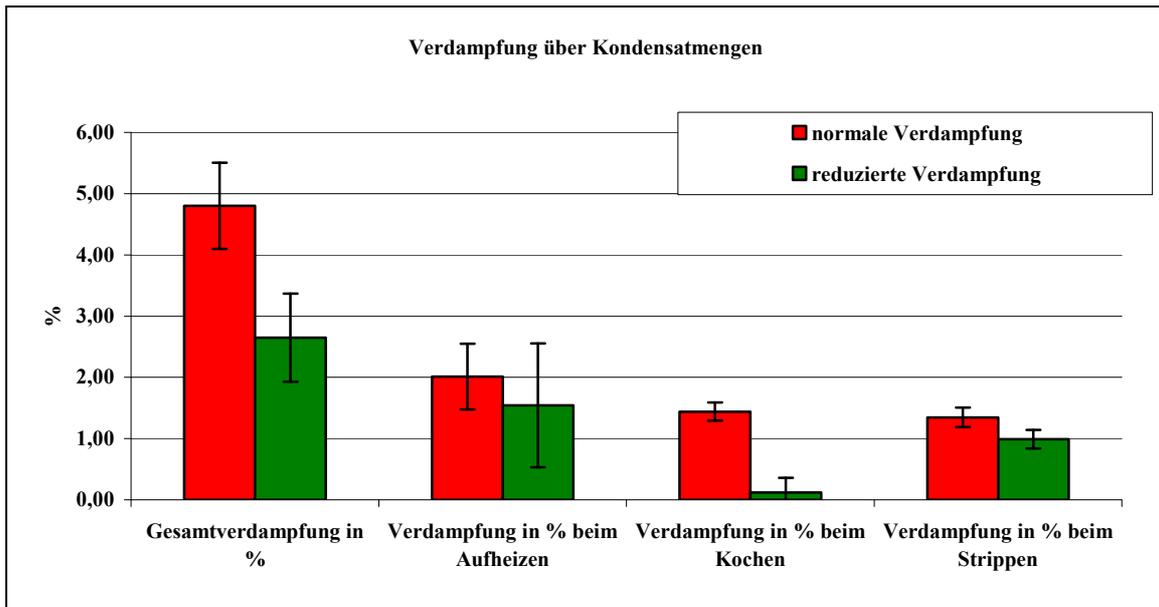


Abbildung 114: Verdampfung über Kondensatmengen

6.5.2 Verhalten der Würzearomastoffe bei der Kochung

Mit der Untersuchung der Würzearomastoffe soll aufgezeigt werden, ob es notwendig ist, eine bestimmte Menge zu verdampfen, um sie in ausreichendem Maße zu reduzieren. Auch an dieser Stelle ist zu bemerken, dass die Auswertung keine statistisch abgesicherten Ergebnisse lieferte und so hier wieder nur Tendenzen aufgezeigt werden. Die natürlichen Schwankungsbreiten bei den Rohstoffen zu sind groß.

6.5.2.1 2-me-Butanal und 3-me-Butanal

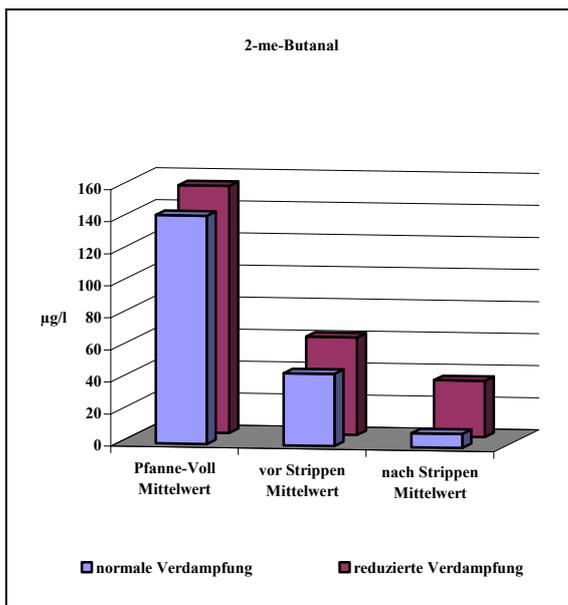


Abbildung 115: 2-me-Butanal

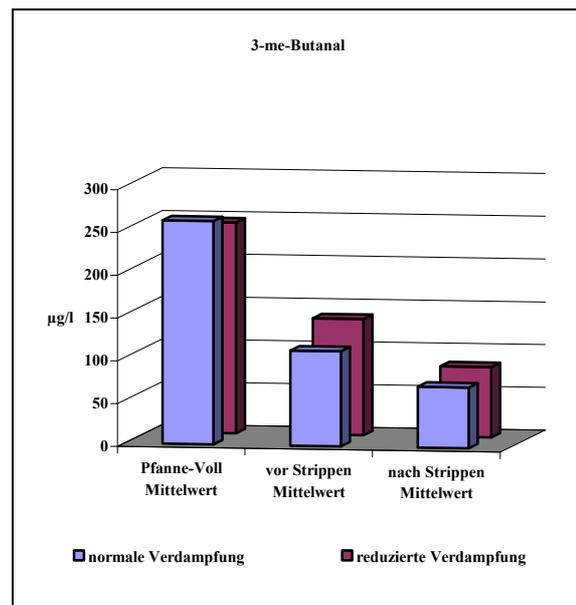


Abbildung 116: 3-me-Butanal

Das Ausdampfverhalten der beiden Stoffe ist leicht unterschiedlich, wie Abbildung 115 und Abbildung 116 zeigen. 2-me-Butanal wird stärker reduziert als 3-me-Butanal. Die größte Verminderung findet beim Kochen statt. Das Strippen vermindert vor allem das 2-me-Butanal bei den Versuchen mit normaler Verdampfung. Bei der Reihe mit reduzierter Verdampfung liegt der Wert etwas höher. Beim 3-me-Butanal zeigt die Verdampfung keine Auswirkungen.

6.5.2.2 Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal

Methional (Abbildung 117) wird in beiden Fällen gleich weit ausgetrieben. Bei Benzaldehyd (Abbildung 118) ist ein leichter Einfluss der höheren Verdampfung erkennbar.

2-Phenylethanal (Abbildung 119) steigt bei den Suden mit reduzierter Verdampfung von Pfanne-Voll bis zum Strippen an. Bei den Suden mit normaler Verdampfung ist dieser Anstieg nicht auszumachen. Durch das Strippen wird das 2-Phenylethanal vermindert, bleibt aber bei der geringeren Verdampfung auf etwas höherem Niveau.

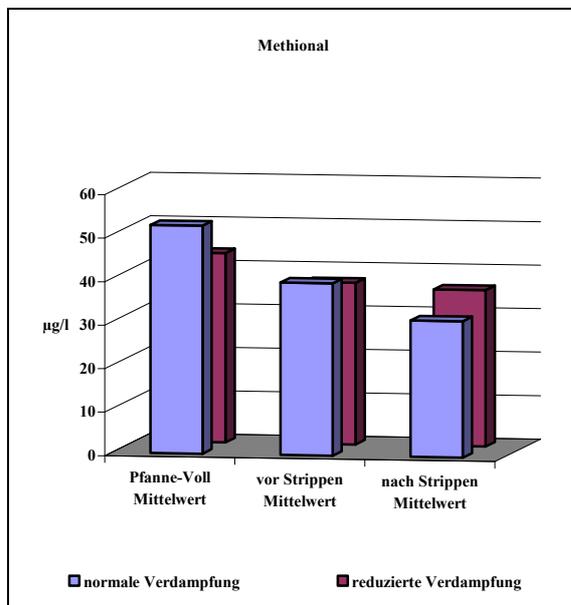


Abbildung 117: Methional

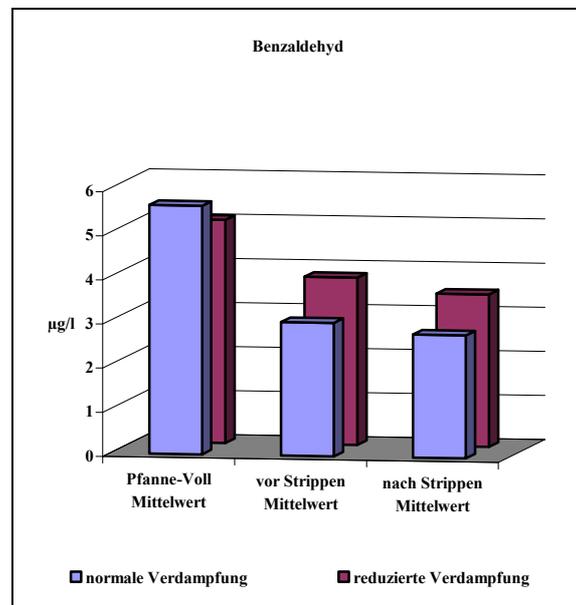


Abbildung 118: Benzaldehyd

6.5.2.3 Summe der Streckeraldehyde

Die Streckeraldehyde (Abbildung 120) zeigen keinerlei Unterschiede. Es wäre zu erwarten gewesen, dass bei der geringeren Verdampfung wegen der geringeren thermischen Belastung der Würze niedrigere Werte erreicht werden. Offensichtlich hat hier aber die Heizhaltezeit einen größeren Einfluss als die Verdampfung.

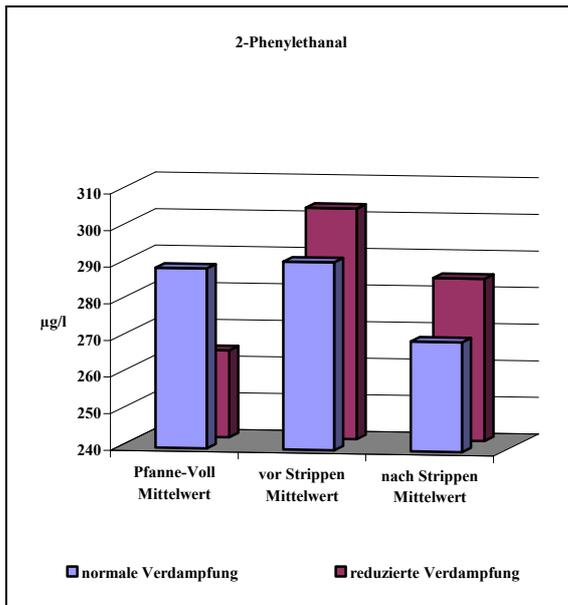


Abbildung 119: 2-Phenylethanal

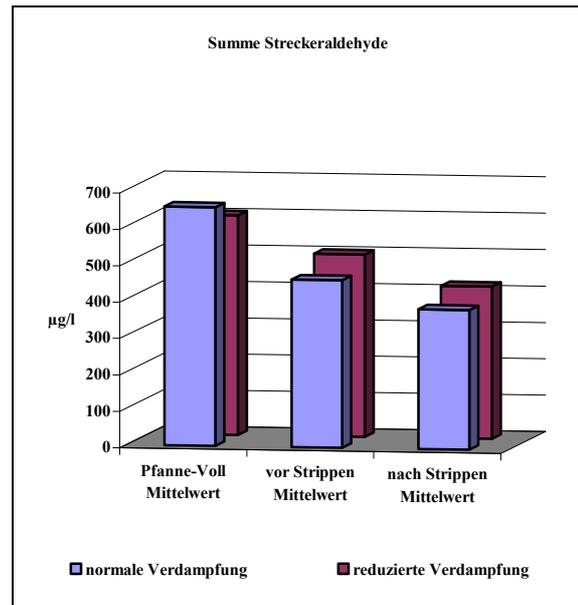


Abbildung 120: Summe der Streckeraldehyde

6.5.2.4 Pentanal, 2-Pentanon, Hexanal und Heptanal

Auch beim Pentanal (Abbildung 121) und 2-Pentanon (Abbildung 122) ergeben sich keinerlei Auswirkungen auf die Werte. Hier sind nicht einmal Unterschiede in der Kochphase auszumachen.

Hexanal (Abbildung 123) und Heptanal (Abbildung 124) werden im Verlauf der Kochung mit niedriger Gesamtverdampfung eine Idee schlechter ausgedampft, durch das Strippen wird der Unterschied aber wieder egalisiert.

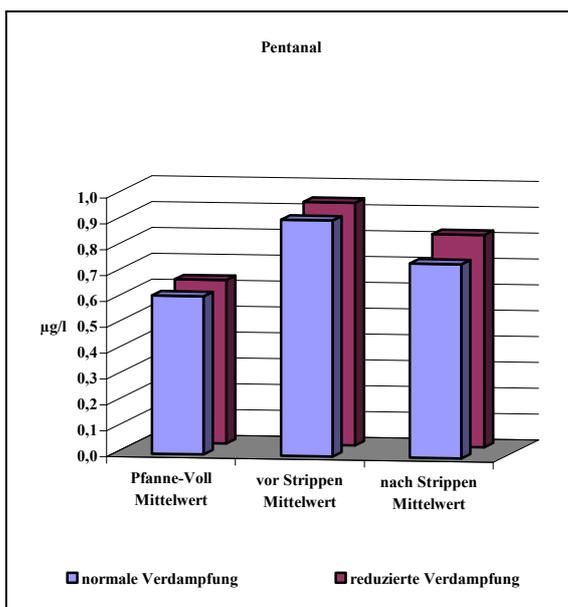


Abbildung 121: Pentanal

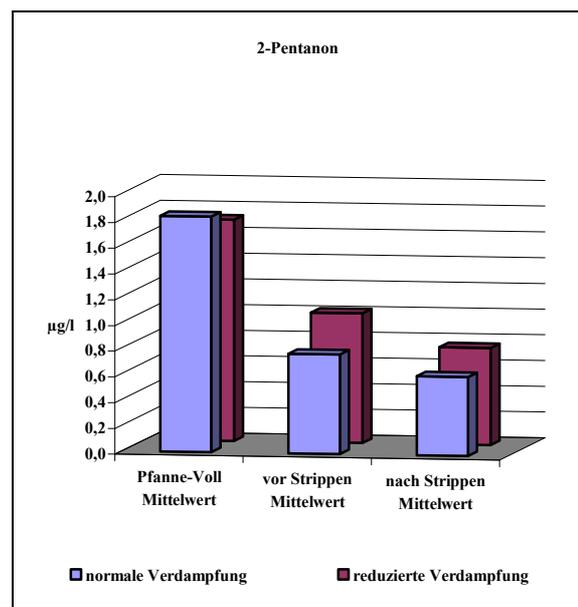


Abbildung 122: 2-Pentanon

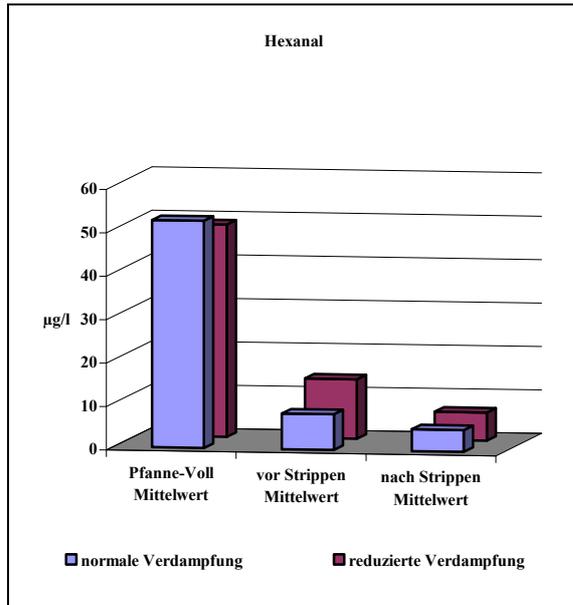


Abbildung 123: Hexanal

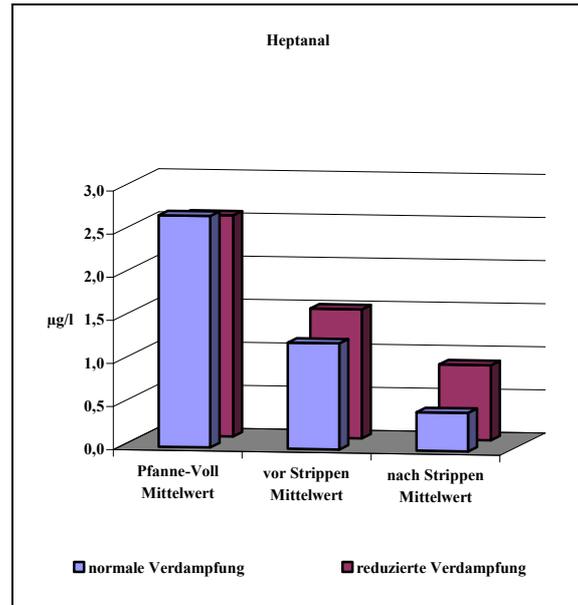


Abbildung 124: Heptanal

6.5.2.5 tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton

tr-2-cis-6-Nonadienal (Abbildung 125) steigt bei den Suden mit geringer Verdampfung zum Strippen an. Auch nach dem Strippen werden die Werte der Vergleichskochung nicht erreicht.

γ -Nonalacton (Abbildung 126) verhält sich beim Kochen bei beiden Gesamtverdampfungen identisch, allerdings liegt der Wert nach dem Strippen bei der geringeren Verdampfung etwas höher.

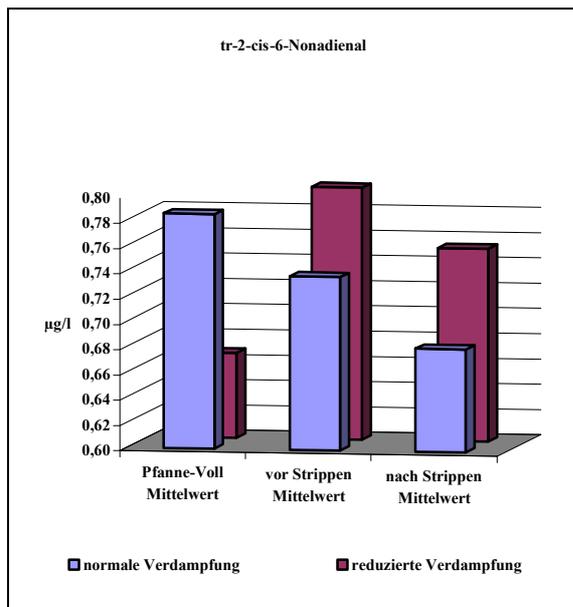
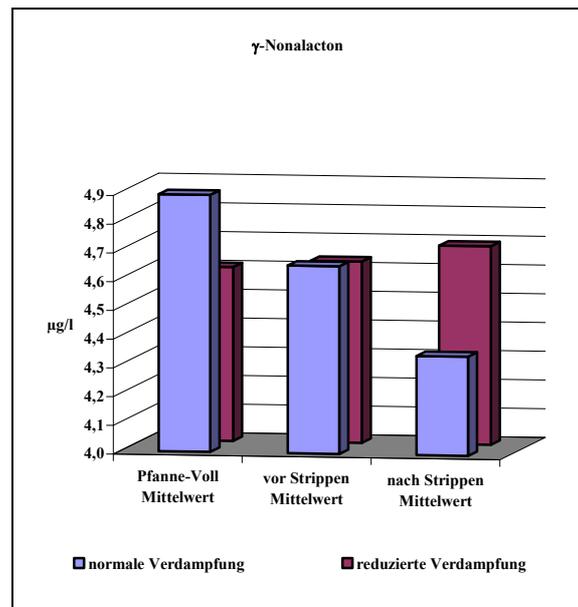


Abbildung 125: tr-2-cis-6-Nonadienal

Abbildung 126: γ -Nonalacton

6.5.2.6 2-Furfural und 2-ac-Furan

Beim 2-Furfural (Abbildung 127) hätte man erwarten können, dass ein geringerer Anstieg durch die niedrigere Wärmezufuhr bei den Suden mit nur 2,6 % Verdampfung erfolgt. Wie schon bei den Streckeraldehyden zeigt sich jedoch auch hier der Vorteil nicht.

Beim 2-ac-Furan (Abbildung 128) sieht man, dass der Stoff im Laufe der Kochung nicht so gut ausgetrieben wird, jedoch bei beiden Reihen durch das Strippen wieder gleiche Endwerte erzielt werden.

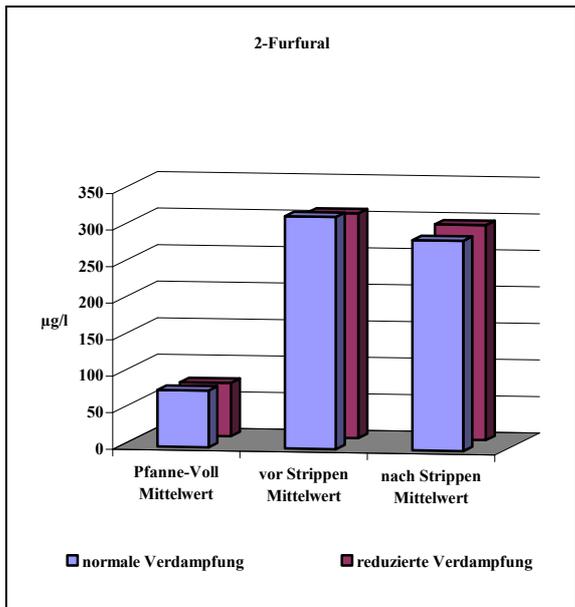


Abbildung 127: 2-Furfural

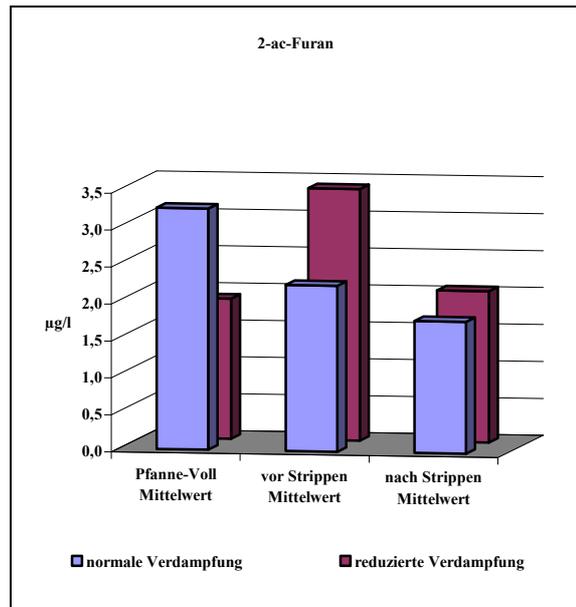


Abbildung 128: 2-ac-Furan

6.5.2.7 2-me-Butanol und 3-me-Butanol

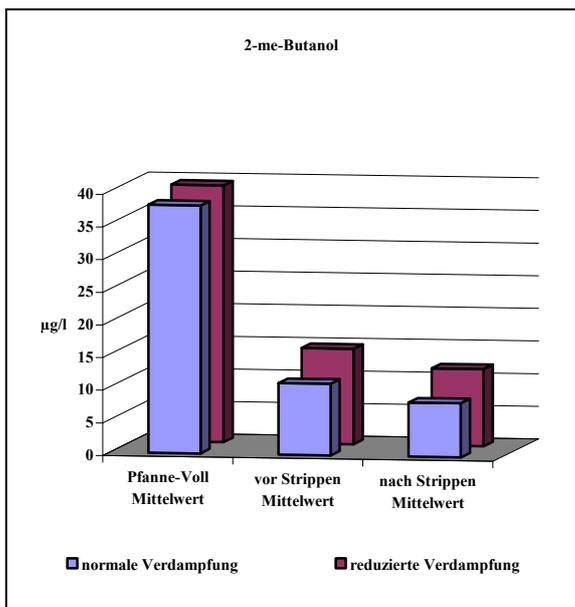


Abbildung 129: 2-me-Butanol

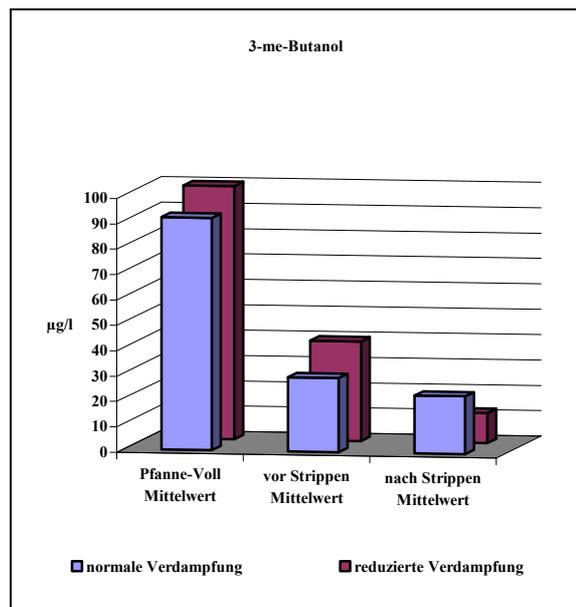


Abbildung 130: 3-me-Butanol

2-me-Butanol (Abbildung 129) und 3-me-Butanol (Abbildung 130) zeigen bei diesen Versuchen ebenfalls wieder eine gute Reduktion im Prozessverlauf. Auch hier kann kein Zusammenhang zwischen Höhe der Gesamtverdampfung und dem Endwert hergestellt werden.

6.5.2.8 1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol

1-Pentanol (Abbildung 131) nimmt im Verlauf der Kochung bei der niedrigen Verdampfung nicht so gut ab und steigt beim Strippen sogar wieder an.

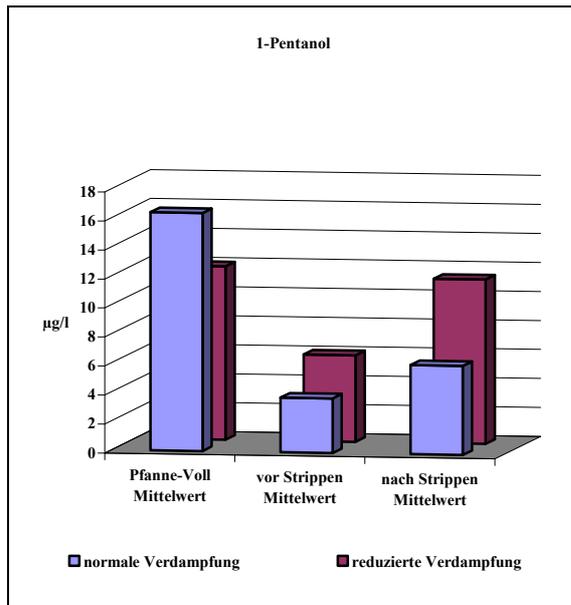


Abbildung 131: 1-Pentanol

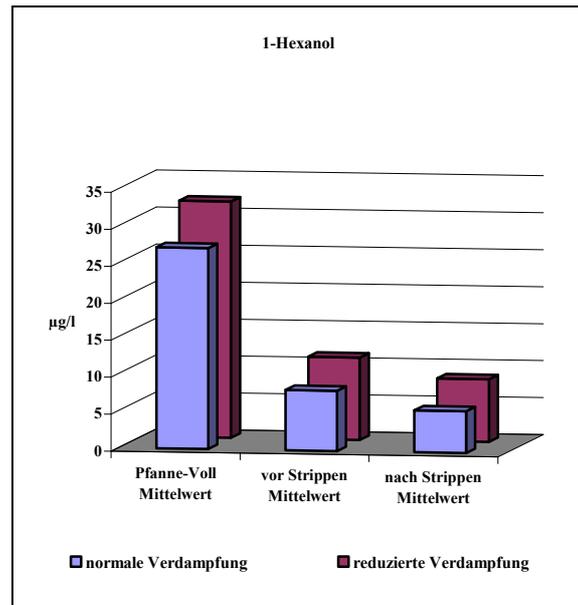


Abbildung 132: 1-Hexanol

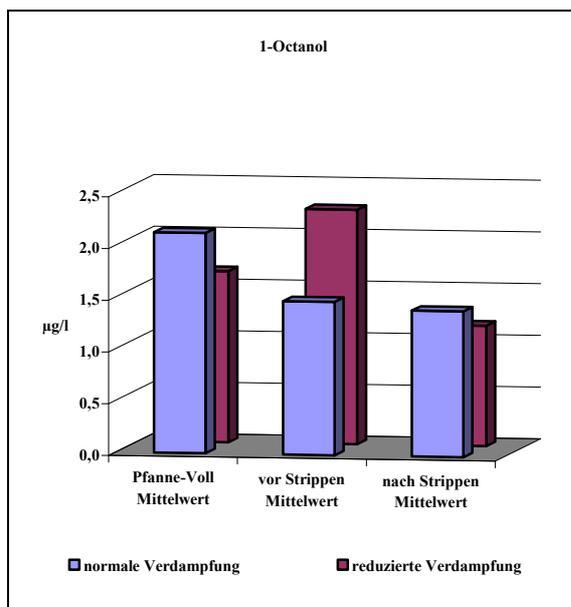


Abbildung 133: 1-Octanol

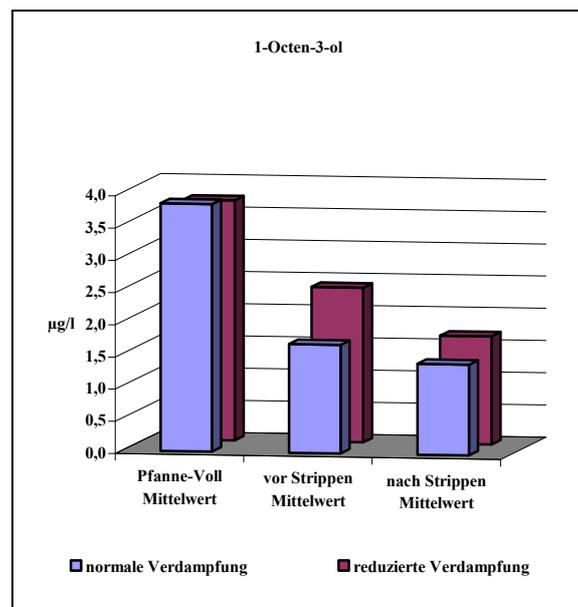


Abbildung 134: 1-Octen-3-ol

1-Hexanol (Abbildung 132), 1-Octanol (Abbildung 133) und 1-Octen-3-ol (Abbildung 134) zeigen nahezu identisches Verhalten. Alle drei Stoffe werden auch bei der niedrigen Verdampfung auf fast das gleiche Niveau ausgedampft.

6.5.2.9 Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon

Phenyl-OH (Abbildung 135) zeigt zu Pfanne-Voll bei den Versuchen mit der niedrigen Verdampfung höhere Werte, vor dem Strippen sind dann keine Unterschiede mehr zu erkennen. Nach dem Strippen ist der Wert allerdings wieder höher als beim Vergleich. Hierfür gibt es keine Erklärung.

Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon (Abbildung 136) verhält sich – wie schon die meisten anderen Stoffe – in beiden Fällen gleich, und es gibt auch keine Unterschiede.

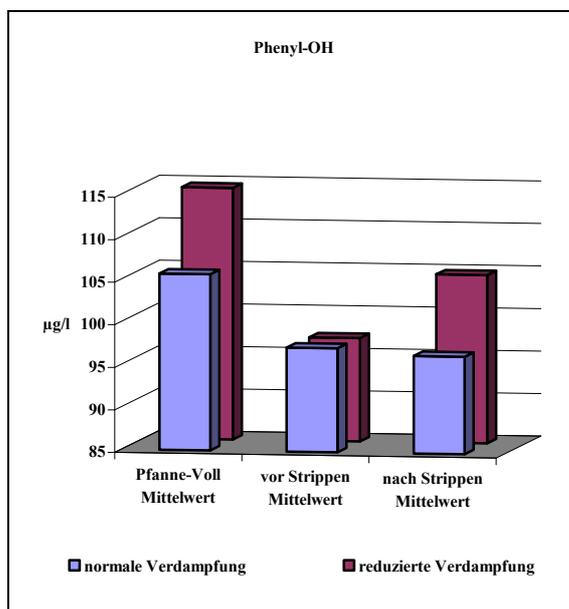


Abbildung 135: Phenyl-OH

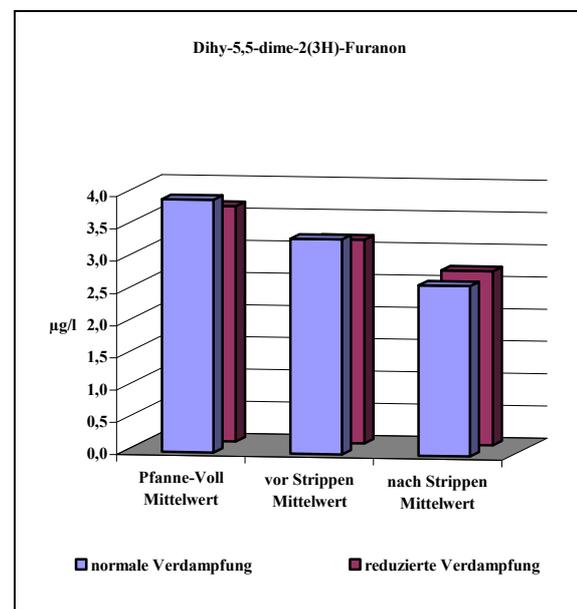


Abbildung 136: Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon

6.5.2.10 Geraniol

Der Hopfenbestandteil Geraniol (Abbildung 137) wird durch die niedrige Verdampfung beim Kochen deutlich weniger ausgetrieben. Das Strippen bringt aber beide Versuchsreihen wieder auf den selben Endwert, sodass auch hier der Einfluss der Verdampfung als nachrangig eingestuft werden kann.

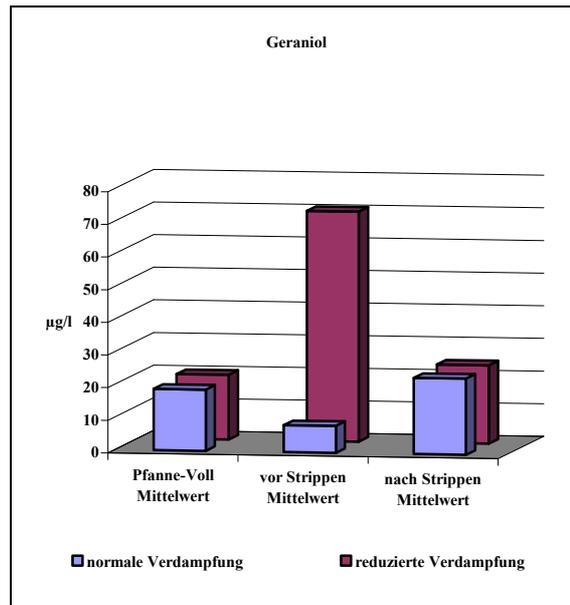


Abbildung 137: Geraniol

6.5.3 Vergleich der Bieranalysen

Die beiden Biere sind von der konventionellen Analytik her nur marginal unterschiedlich. Beim Schaum liegt das Bier mit der höheren Verdampfung um 2 Punkte nach R & C höher. Bei der Haltbarkeit weist das schonender gekochte Bier einen Punkt mehr auf. In beiden Fällen ist jedoch keinesfalls eine Signifikanz gegeben, die es erlauben würde, von Unterschieden zu sprechen.

6.5.3.1 Ergebnisse der verbalen Verkostung

Bewertung nach DLG, frische Biere		
	normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Farbe	typgerecht	typgerecht
Schaum	visuell sehr gut	visuell sehr gut
Geruch	Spur roh, etwas spelzenartig	rein
Geschmack	Spur roh, etwas spelzenartig, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, Spur anhängend	rein, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, im Abtrunk normal
Wertung	2	1
Bewertung nach DLG, forciert gealterte Biere		
	normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Farbe	typgerecht	typgerecht
Schaum	visuell sehr gut	visuell sehr gut
Geruch	rein, etwas spelzenartig	rein
Geschmack	Spur roh, etwas gemüseartig, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, Spur anhängend	rein, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, im Abtrunk normal
Wertung	4	3

Tabelle 8: Verbale Verkostung der frischen und der forciert gealterten Biere

Bei der verbalen Verkostung wurde das Bier mit der niedrigeren Verdampfung sowohl frisch als auch forciert gealtert bevorzugt. Tabelle 8 zeigt die Bewertung.

6.5.3.2 Auswertung der Alterungskomponenten

Das gleiche Bild wie schon bei den Würzearomastoffen zeigt sich bei den Bieraromastoffen und auch bei den Alterungskomponenten (Abbildung 138). Die Bieraromastoffe werden hier nicht dargestellt, die Analysen dazu befinden sich aber im Anhang, ebenso die einzelnen Komponenten der Alterungsindikatoren.

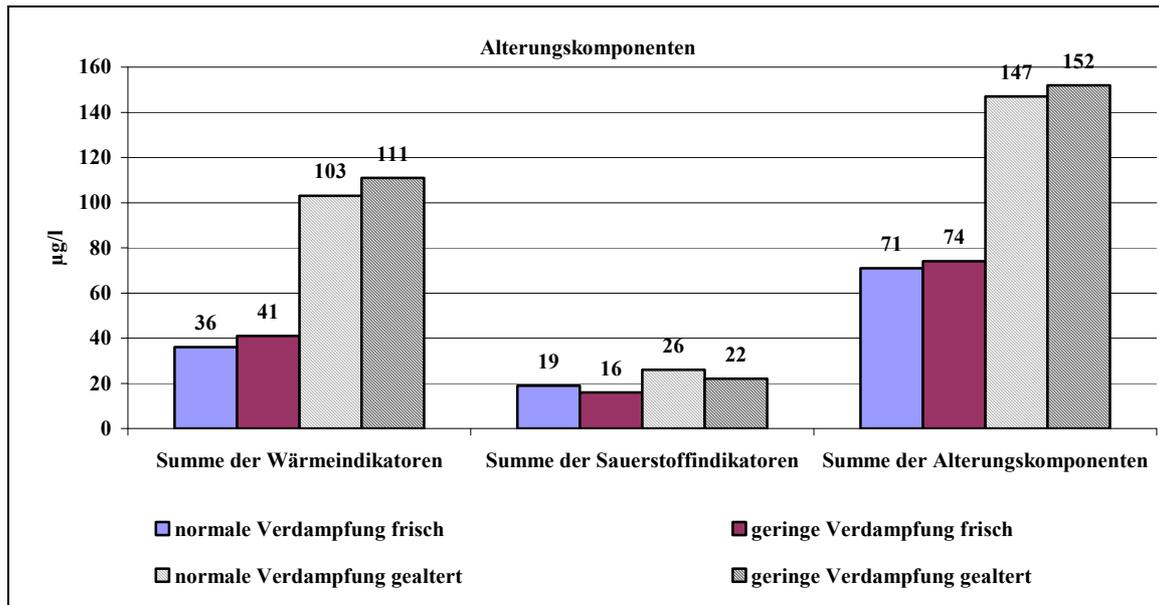


Abbildung 138: Alterungskomponenten

Als Fazit bleibt somit zu sagen, dass die Biere, die mit nur 2,65 % Gesamtverdampfung im Mittel hergestellt worden sind, analytisch in keinem Punkt von denen mit fast 5 % Gesamtverdampfung nennenswert abweichen. Bei der Verkostung wurde sogar das Bier mit der geringeren Verdampfung bevorzugt.

6.6 Ergebnisse des Vergleichs DSVD-System mit Innenkocher hinsichtlich Gärung, Lagerung und Filtration

In der Beschreibung der Versuchsergebnisse werden die erste und zweite Versuchsreihe getrennt behandelt. Bei den Versuchsergebnissen lassen nur die Würzeanalysen eine statistisch gesicherte Aussage zu, da nur hier drei Sude pro Versuchsreihe untersucht wurden.

Die Daten, die während der Gärung und der Filtration erfasst wurden, können wie die Analysen der fertigen Flaschenbiere ebenfalls nicht statistisch ausgewertet werden, da sie nur in einer einfachen Analyse untersucht wurden. Diese Ergebnisse sind lediglich als Trendaussagen zu verstehen.

6.6.1 Würzeanalysen

6.6.1.1 Gesamtverdampfung und Extraktgehalt

Die Gesamtverdampfung lässt sich im vorliegenden Fall nur über die einzelnen Extraktgehalte bestimmen. Zum einen war die Messung der Pfanneninhalte durch einen Peilstab sehr ungenau, zum anderen wird während des Strippens eine nicht unerhebliche Menge verdampft. Eine Erfassung des Brüdenkondensates wie bei anderen Anlagen war technisch nicht möglich.

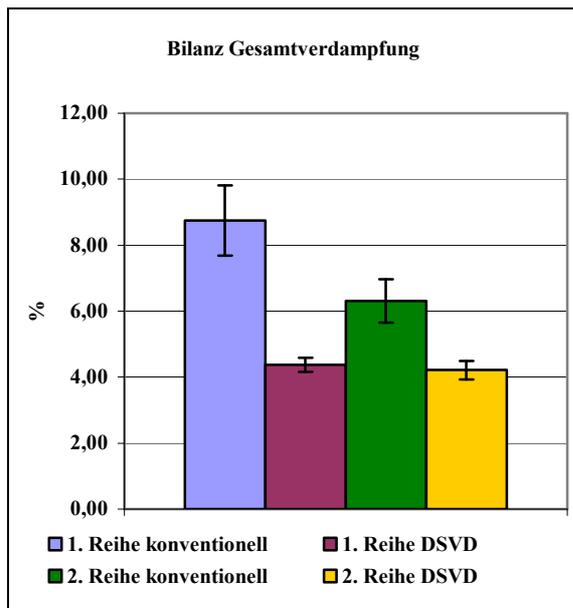


Abbildung 139: Gesamtverdampfung

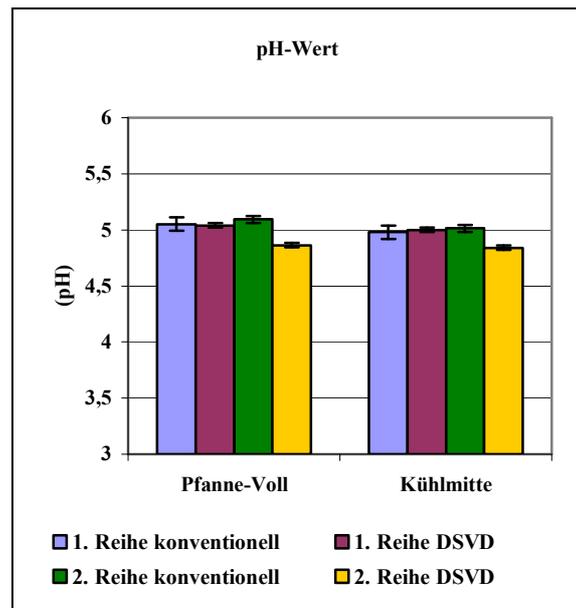


Abbildung 140: pH-Werte

Im vorliegenden Fall ist auffällig, dass die Gesamtverdampfung (Abbildung 139) mit dem Innenkocher bei der zweiten Versuchsreihe signifikant niedriger ist, ohne dass bewusst Kochparameter verändert wurden. Allerdings waren bei dieser Versuchsreihe schon fünf Sude über den Innenkocher gefahren worden, während bei der ersten Versuchsreihe der Innenkocher frisch gereinigt war. Es kann also davon ausgegangen werden, dass Fouling in den Kocherrohren zu einer Verschlechterung des Wärmeüberganges geführt hat. Das Resultat sind dann dementsprechend unterschiedliche Verdampfungen. Hier wird die Problematik bei Systemen mit Innenkocher deutlich.

Die Unterschiede bei den beiden DSVD-Reihen sind unerheblich und liegen mit ca. 4,2–4,3 % im gewünschten Bereich.

6.6.1.2 pH-Wert

Die Abnahme des pH-Wertes (Abbildung 140) ist bei dem DSVD-System geringer als bei der konventionellen Kochung. Der Grund dafür liegt in der längeren Kochdauer und der damit verbundenen stärkeren Melanoidinbildung. Melanoidine reagieren in der Würze sauer.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle untersuchten Würzen innerhalb der Normwerte liegen. Es sind, abgesehen von der zweiten DSVD-Versuchsreihe, keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Bei der zweiten Versuchsreihe ist der niedrige pH-Wert auf eine Überdosierung der Sauergutgabe zurückzuführen, da der Pfanne-Voll-pH-Wert ebenfalls sehr niedrig ist.

6.6.1.3 EBC-Bittereinheiten

Bei der Betrachtung der Bittereinheiten fällt auf, dass die konventionell hergestellten Würzen sich in ihrem Bitterwert kaum unterscheiden, die DSVD-Würzen hingegen schon (Abbildung 141). Bei der Diskussion der Ergebnisse müssen die bei der ersten Versuchsreihe hohe Standardabweichung und der nicht nachvollziehbare Zeitpunkt der Wiederverwendung des Trubs beim Läutern berücksichtigt werden. Gerade der zweite Punkt kann erhebliche Auswirkungen auf die Bitterstoffausbeute haben, da ein großer Teil der eingesetzten Hopfeninhaltsstoffe sich nach der Heißtrubabscheidung im Trubkegel wiederfindet. Möglich ist aber, dass durch einen erst nach dem Sieden der Versuchssude festgestellten Fehler in der Steuerung die Trubgabe schon während der Abläuterung der Vorderwürze erfolgte.

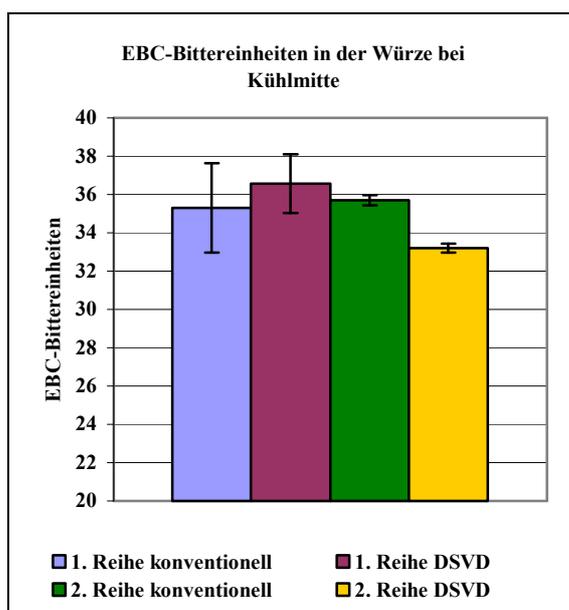


Abbildung 141: EBC-Bittereinheiten in der Würze

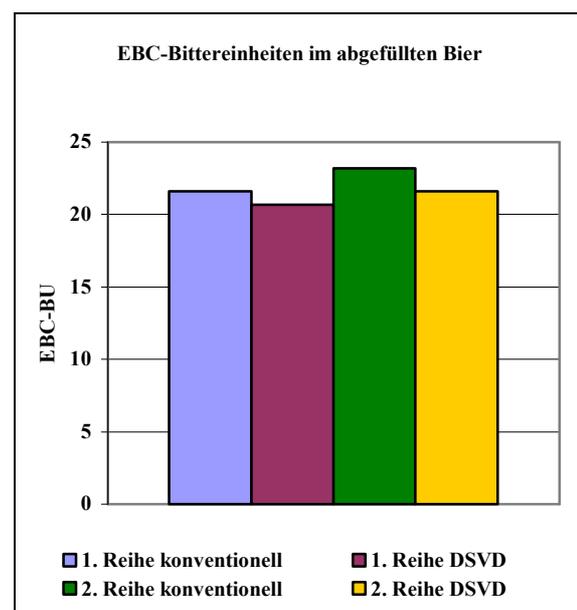


Abbildung 142: EBC-Bittereinheiten im abgefüllten Bier

Bei den abgefüllten Bieren liegen nur Einzelergebnisse vor, eine statistische Auswertung ist deshalb nicht möglich. Allerdings fällt auf, dass bei jeder der beiden Versuchsreihen die konventionellen Biere die höhere Bitterstoffausbeute haben (Abbildung 142). Das ist wahrscheinlich auf die längere Kochdauer zurückzuführen, aber man muss hier sowohl die geringe Differenz, speziell bei der ersten Versuchsreihe, als auch die oben beschriebene Art der Trubwiederverwendung beachten. Weiterhin muss die Genauigkeit der Analyse berücksichtigt werden.

6.6.1.4 Farbe

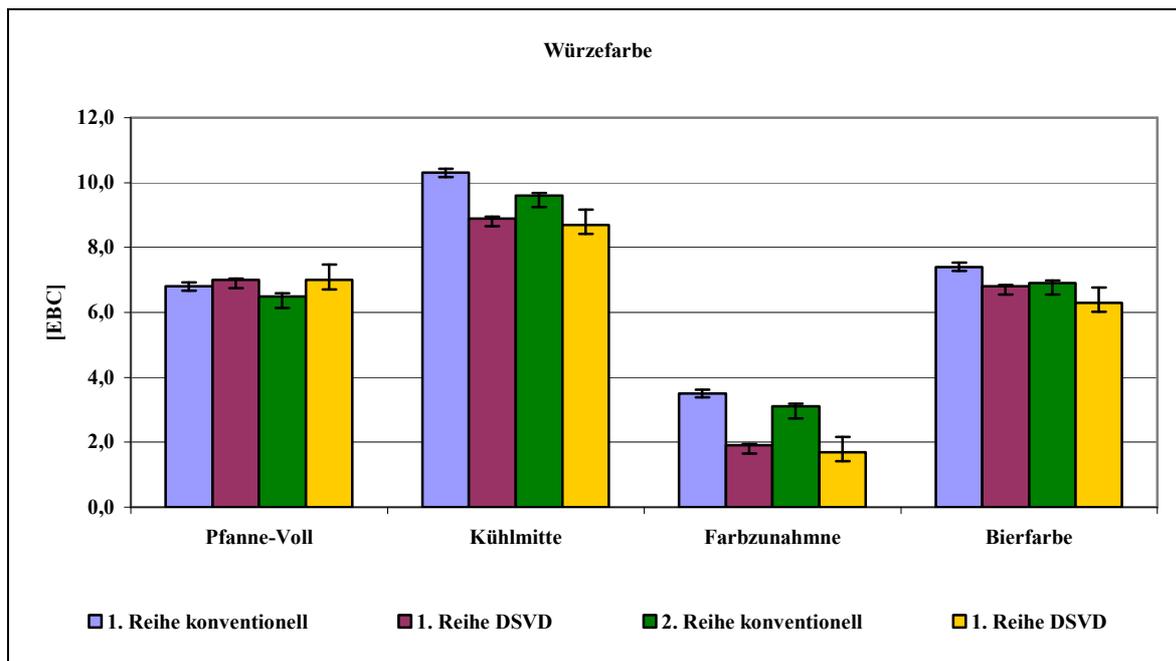


Abbildung 143: Farbe nach EBC

Bei der Diskussion der Ergebnisse (Abbildung 143) muss man die Reduzierung der Schüttung des Münchener Malzes um 25 kg bei den DSVD-Suden der ersten Versuchsreihe beachten.

Die Farbdifferenz zur Kühlmitte ist bei der ersten Versuchsreihe mit 1,4 EBC signifikant höher als bei der zweiten Versuchsreihe, wo sie lediglich 0,9 EBC beträgt. Das ist wohl auf die oben beschriebene Tatsache zurückzuführen.

Die Farbzunahmen während der Kochung zeigen einen einheitlichen Trend. Bei den gefundenen Ergebnissen kann man deutlich erkennen, dass die konventionell hergestellte Würze wesentlich stärker an Farbe zunimmt als die mit dem DSVD-System gebraute. Das resultiert aus der intensiveren und weniger schonenden Kochung des Innenkochers sowie der größeren Gesamtverdampfung.

Dieser Trend setzt sich dann auch im fertigen Bier fort. Hier liegt die Differenz der DSVD-Biere im Vergleich zu den herkömmlich hergestellten Bieren trotz der bei der ersten Versuchsreihe leicht unterschiedlichen Schüttung konstant bei 0,6 EBC. Die Farbaufhellung fand bei den konventionellen Bieren leicht stärker statt, gleich aber die erheblich größere Farbzunahme während der Kochung bei weitem nicht aus.

6.6.1.5 Feststoffe und Trübung

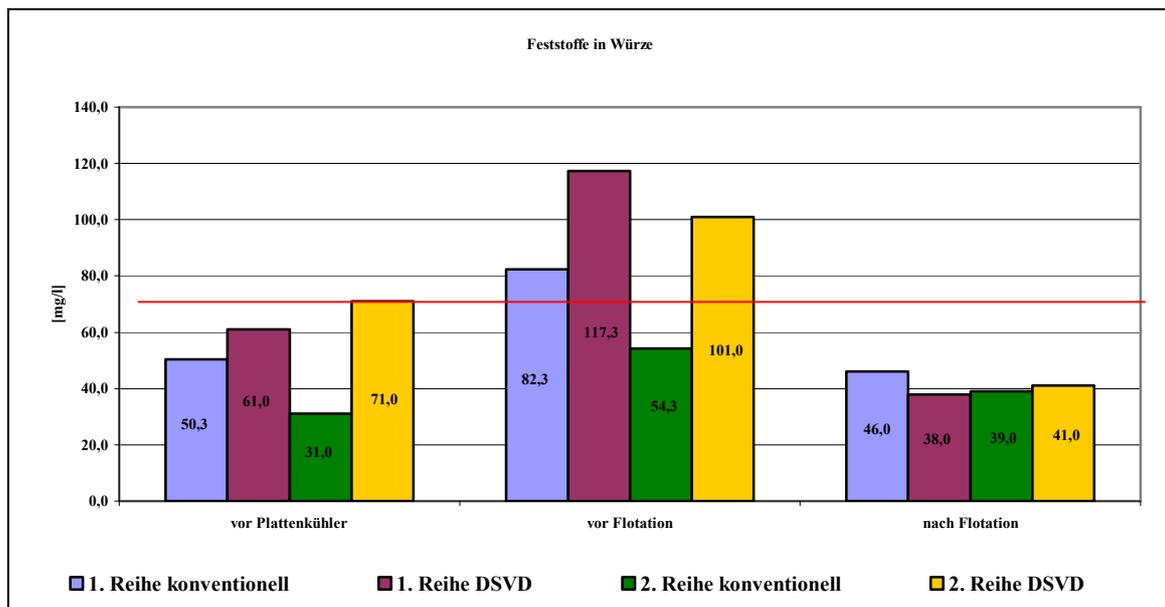


Abbildung 144: Feststoffe in der Würze

Bei der Betrachtung der Ergebnisse der Feststoffanalysen (Abbildung 144) fallen die erhöhten Feststoffgehalte der DSVD-Würzen auf. Im Heißwürzebereich sind durchschnittlich 26 mg/l und im Kaltwürzebereich sogar 40 mg/l mehr Feststoffe vorhanden. Allerdings sind die Gehalte nach der Flotation annähernd wieder gleich und in allen Fällen deutlich unter dem in der DIN 8777 angegebenen Richtwert von < 70 mg/l (rote Linie im Diagramm). In der Grafik werden auch die Entstehung des Kühltrubs und die Wirkung der Flotation deutlich.

Abbildung 145 zeigt den Vergleich der Trübungskurven von Innenkocher und DSVD-System. Aus technischen Gründen konnte nur die Trübung der heißen Würze bei der zweiten Versuchsreihe verfolgt werden. Dies geschah mit Hilfe eines Trübungsmessgerätes, das in die Leitung zum Plattenkühler eingebaut wurde.

Die drei linken Trübungskurven stammen von den Suden, die mit dem Innenkocher gekocht wurden. Bei den Kurven fallen drei Peaks auf: Der erste ist durch das Anfahren bedingt, der zweite kommt durch das Umstellen vom oberen auf den unteren Anstich am Whirlpool, und der letzte Peak, der mehr oder weniger stark ausgeprägt ist, kommt durch das Nachschieben von Wasser. Der kurzzeitige Abfall auf Null bei der ersten Kurve hat keine Bedeutung, da er durch einen partiellen Stromausfall hervorgerufen wurde. Von den Peaks abgesehen, laufen alle Kurven relativ konstant bei rund 10 EBC Trübung und zeigen keinen besonderen Anstieg oder Abfall.

Die drei rechten Trübungskurven stammen von den DSVD-Suden der zweiten Versuchsreihe. Man erkennt sofort signifikante Unterschiede zu den vorangegangenen Trübungskurven. Zu Beginn des Kühlens liegt eine Trübung von etwa 20 EBC vor, die dann

während des Kühlens auf kontinuierlich ca. 50 EBC ansteigt. Dieser Anstieg wurde auch bei anderen Anlagen beobachtet, konnte aber schon dort nicht schlüssig erklärt werden. Die erhöhte Trübung verläuft hier analog zu den erhöhten Feststoffwerten. Eventuelle Folgen werden bei den Bieranalysen besprochen.

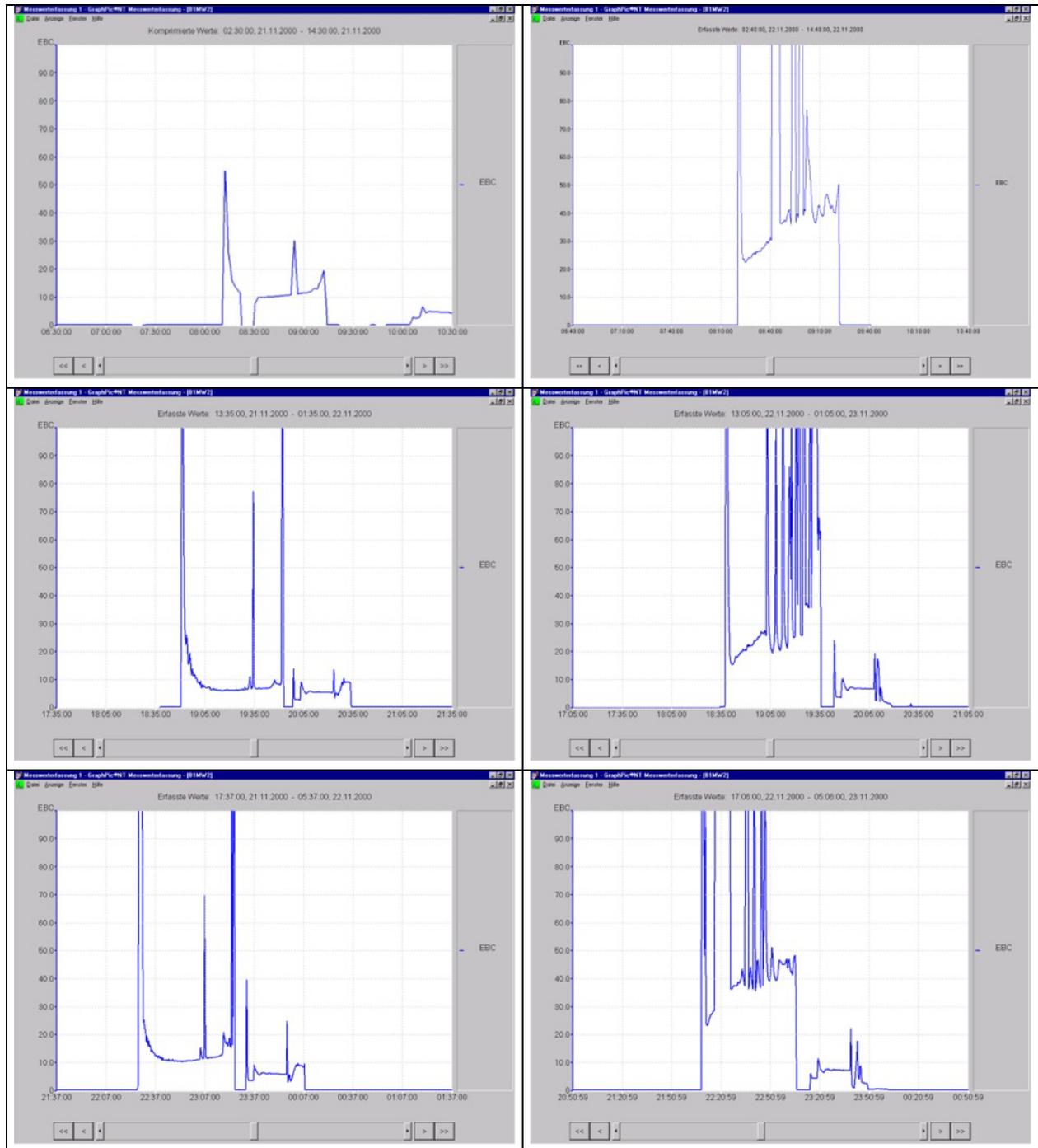


Abbildung 145: Vergleich der Trübungskurven von Innenkocher und DSVD

Um die Herkunft der Feststoffe zu klären, wurden während der zweiten Versuchsreihe auch die Feststoffgehalte in der Vorderwürze und in den Nachgüssen untersucht. Dabei wurden Gehalte von durchschnittlich 34 mg/l in der Vorderwürze und 22 mg/l in den Nachgüssen entdeckt. Diese Gehalte liegen deutlich unter denen in der Literatur angege-

benen Werten von 100 mg/l, daher liegt der Grund für die teilweise erhöhten Feststoffgehalte nicht in der Läuterarbeit.

Die Menge und die außergewöhnliche Höhe der Peaks deuten auf eine nicht vollständige Heißtrubabscheidung hin. Bei späteren Untersuchungen wurde herausgefunden, dass die unkontrollierte und viel zu frühe Trubgabe auf den Läuterbottich eine besondere Rolle spielte, allerdings nicht einziger Auslöser für die Peaks war.

6.6.1.6 Bestimmung der Partikelgrößenverteilungen

Da die Untersuchung der Trübungen hinsichtlich der Menge und in Bezug auf die Eiweißzusammensetzung mit der konventionellen Analytik keine Erklärung für die Opaleszenz der Würzen gab, wurden die Partikelgrößenverteilungen (Abbildung 146) betrachtet. Doch auch hier gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Kochverfahren. Damit kann ausgeschlossen werden, dass die Trübung mit dem DSVD-System auf eine feinere Verteilung der Feststoffe zurückzuführen ist. Allerdings wurden die Proben kalt analysiert, sodass also auch der Kühltrub mit erfasst wurde.

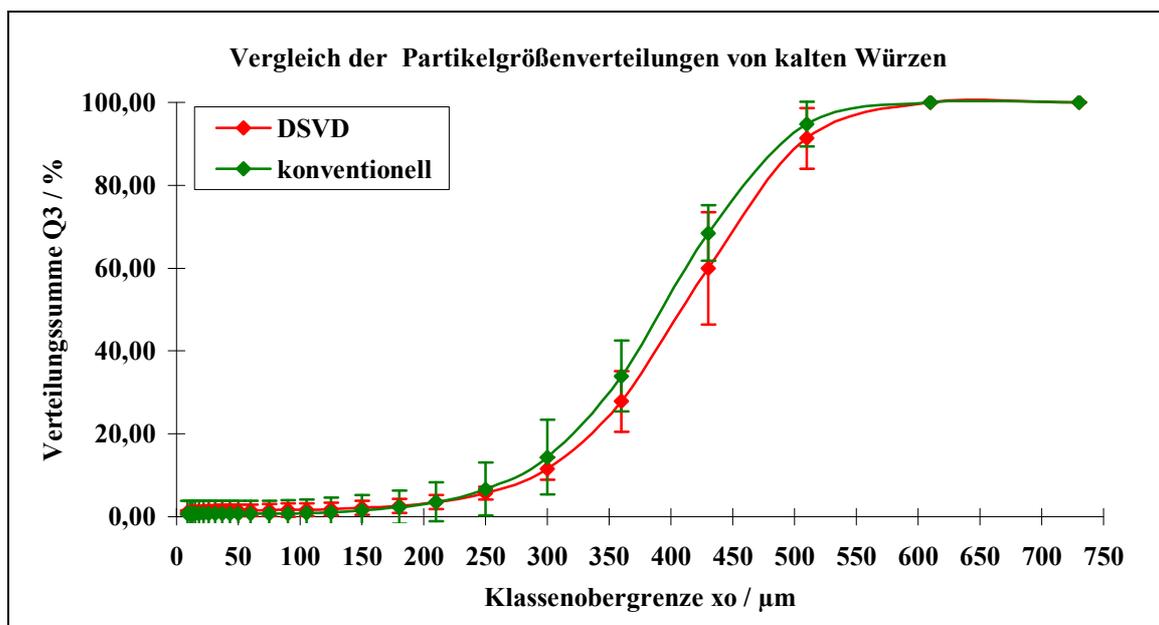


Abbildung 146: Vergleich der Partikelgrößen in den Würzen

6.6.1.7 DMS-P und freies DMS

Der Abbau des DMS-P (Abbildung 147) ist sehr deutlich. Bei der ersten Versuchsreihe sind die Pfanne-Voll-Gehalte bedingt durch das Malz etwas höher. Der Abbau des Precursors ist bei der konventionellen Kochung auf Grund der längeren Kochdauer stärker ausgeprägt. Die Höhe des DMS-Vorläufers ist aber nicht relevant, da er nicht von der Hefe metabolisiert werden kann. Bei beiden Versuchsreihen ist der Abbau mit dem Innenkocher signifikant höher.

Betrachtet man in Abbildung 148 die Reduzierung der DMS-Gehalte, so fällt auf, dass das Ausdampfen bei den DSVD-Würzen effektiver ist. Ursache hierfür ist das Strippen. Dabei

wird ein Großteil des während der Whirlpoolrast neu gebildeten DMS ausgetrieben. Deutlich wird diese Tatsache, wenn man beachtet, dass die Reduzierung des DMS-Gehaltes von Pfanne-Voll bis Kühlmitte bei der konventionellen Kochung 59 % bzw. 63 % beträgt und sich bei den Würzen, die mit dem DSVD-System hergestellt worden sind, auf 83 % bzw. 86 % beläuft. Dieser Trend ist im abgefüllten Bier weiter zu verfolgen, wenn auch nicht mehr so ausgeprägt. Allerdings muss man sagen, dass keiner der vorliegenden Werte als kritisch zu bezeichnen ist. Signifikant ist der Unterschied jedoch nur bei der zweiten Versuchsreihe. Bei der ersten Reihe waren die Schwankungsbreiten und damit die Fehler zu groß.

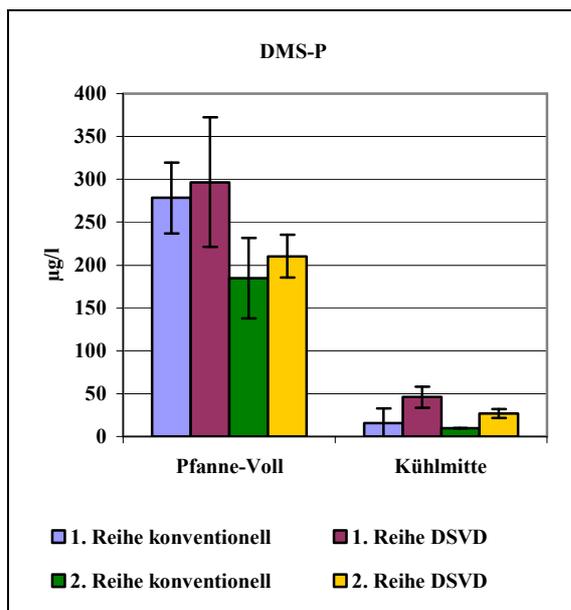


Abbildung 147: DMS-P-Gehalte

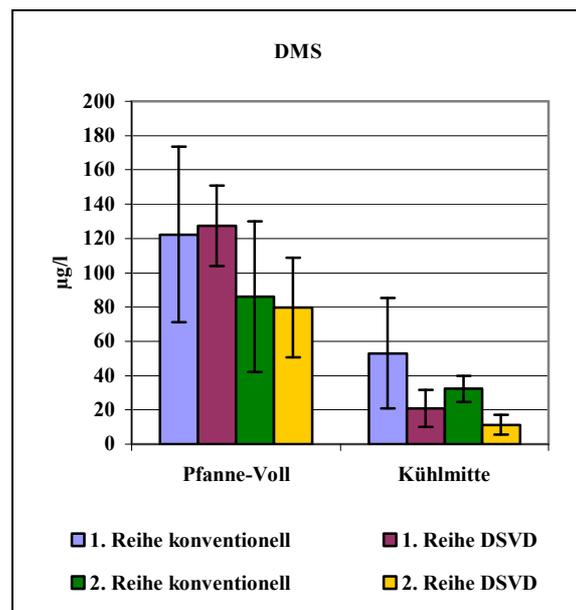


Abbildung 148: Freies DMS

6.6.1.8 Thiobarbitursäurezahl

Bei der Diskussion der Ergebnisse (Abbildung 149) muss man beachten, dass bei der ersten Versuchsreihe die Malzschüttung um 25 kg Münchner Malz zu Gunsten von hellem Malz verändert wurde. Daher ist die deutlich höhere TBZ bei der konventionellen Kochung in der ersten Versuchsreihe nur eingeschränkt zu beurteilen. Bei der zweiten Versuchsreihe ist der Unterschied zur Kühlmitte von 1,2 Einheiten ebenso geringfügig wie das Delta bei der Zunahme, wo die konventionelle Kochung 1,3 Einheiten mehr zulegt. Der Trend zeigt zwar Vorteile bei der Kochung mit dem DSVD-System, allerdings sind diese nicht sonderlich groß. Der Vergleich der abgefüllten Biere bestätigt die bei der Würze gefundenen Daten auf einem etwas niedrigeren Niveau.

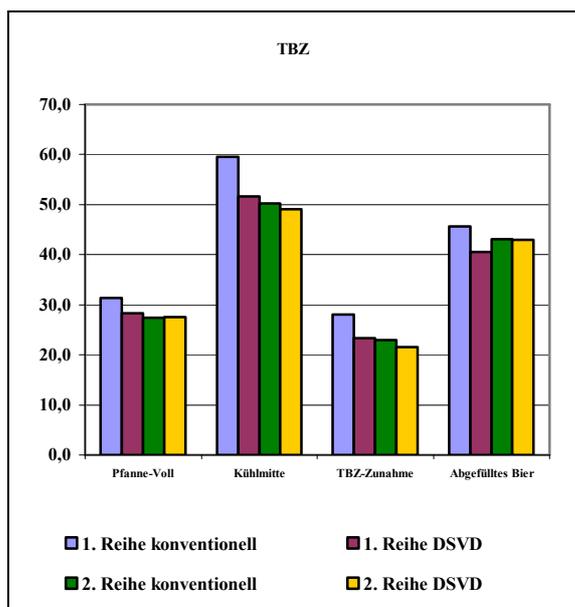


Abbildung 149: Vergleich der TBZ

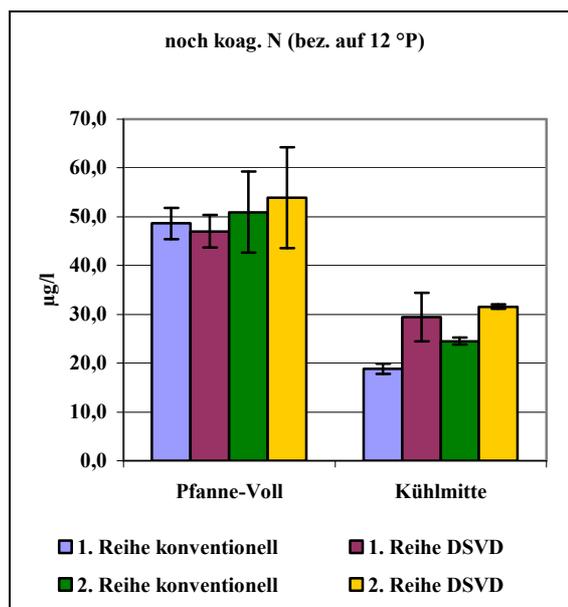


Abbildung 150: Noch koagulierbarer Stickstoff

6.6.1.9 Noch koagulierbarer Stickstoff

Berücksichtigt werden muss bei der Betrachtung der Ergebnisse, dass die Analytik des koagulierbaren Stickstoffs einen großen Vertrauensbereich hat. So wird bei der Analysenbeschreibung der MEBAK eine Genauigkeit von $r = 8$ angegeben [63]. Auch in einem Brauweltartikel werden die Schwierigkeiten der Analyse beschrieben. Dort wird festgestellt, dass die Analysenergebnisse der gleichen Probe in zwei unterschiedlichen Labors um bis zu 60 % von einander abweichen können [5].

Bei den vorliegenden Ergebnissen (Abbildung 150) fällt im Gegensatz zu der oben beschriebenen Problematik die sehr geringe Standardabweichung von maximal 3 mg/l auf.

Die Ergebnisse zeigen einen signifikanten Unterschied zwischen den Kochsystemen. Die DSVD-Sude haben einen Gehalt an koagulierbarem Stickstoff von etwa 30 mg/l, während die konventionell gekochten Würzen einen Gehalt von 1,9 bis 2,5 mg/l aufweisen. Die schaumpositiven Eiweißsubstanzen werden geschont. Man sieht hier, dass auf Grund der unterschiedlichen Kochung die Abnahme des koagulierbaren Stickstoffs unterschiedlich verläuft. Mit dem DSVD-System hat man die Möglichkeit, diesen Würzparameter wesentlich besser zu steuern.

6.6.1.10 Zusammensetzung der vergärbaren Kohlenhydrate

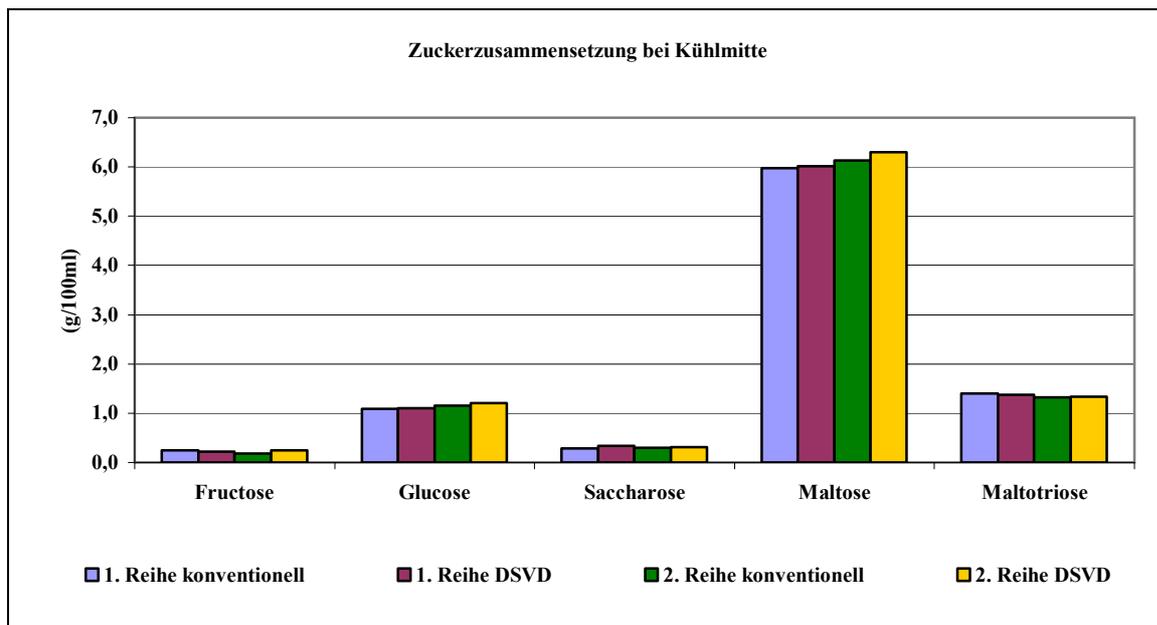


Abbildung 151: Vergleich Zuckerzusammensetzung bei Kühlmitte

In der Zuckerzusammensetzung (Abbildung 154) fällt kaum ein Unterschied zwischen den beiden Kochsystemen auf. Da in der Summe der vergärbaren Kohlenhydrate die Versuchsreihen annähernd identisch waren, ist das nicht weiter überraschend.

Da zwar bei der Farbbildung, speziell der Maillard-Reaktion, Zucker eine Rolle spielen und die Farbzunahmen zwischen den Systemen unterschiedlich sind, lag hier anfangs die Vermutung vor, dass sich diese Tatsache auf die Kohlenhydratzusammensetzung auswirkt. Allerdings konnte diese These durch die Versuchsergebnisse nicht bestätigt werden.

6.6.1.11 Zusammensetzung des Aminosäurespektrums

Zu beachten ist in diesem Fall, dass die Aminosäuren γ -amino-Buttersäure und Arginin nur in der Summe zu bewerten sind. Die Peaks bei der HPLC-Analyse sind bei diesen beiden Aminosäuren nicht eindeutig zu trennen. Norvalin ist der bei der Bestimmung verwendete interne Standard.

Abgesehen von Arginin bzw. der Summe von Arginin und γ -amino-Buttersäure bei der ersten Versuchsreihe, gibt es bei den Aminosäuren keine signifikanten Unterschiede. Das ist eher ungewöhnlich, da bei den konventionellen Würzen geringfügig mehr Münchner Malz verwendet wurde und Arginin bei einem ausgedehnten Schwelkprozess entsteht, wie er bei der Produktion von Münchner Malz üblich ist. Arginin gehört zu der Gruppe der Aminosäuren, welche Oxysäuren liefern, die nicht aus dem Kohlenhydratstoffwechsel gebildet werden können. Ein Mangel an Aminosäuren dieser Gruppe (Lysin, Histidin und Leucin gehören ebenfalls dazu) kann sich negativ auf den Eiweißstoffwechsel der Hefe und somit auf die Bierqualität auswirken.

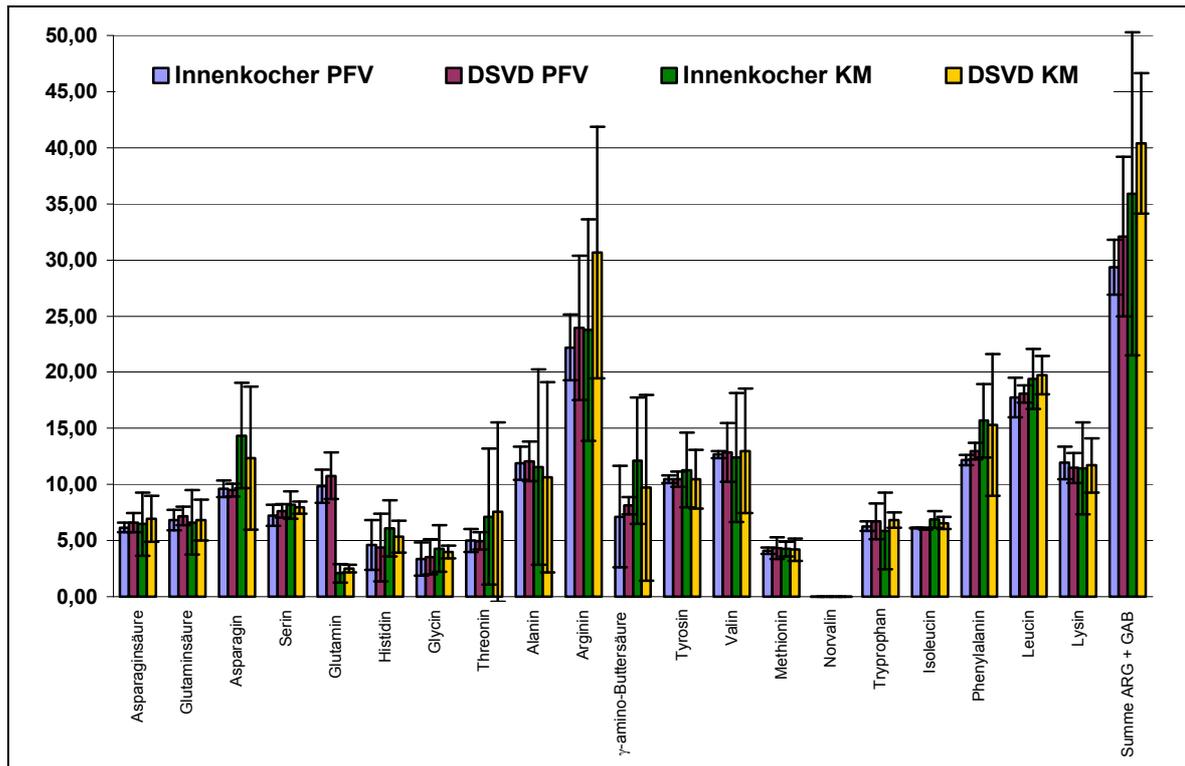


Abbildung 152: Vergleich der Aminosäuren im Verlauf der Kochung

Ob diese Differenz nun auf das DSVD-System zurückzuführen ist, muss an dieser Stelle bezweifelt werden, da sie in der zweiten Versuchsreihe nicht mehr aufgetreten ist. Des weiteren war in der Pfanne-Voll-Würze schon in der Summe von Arginin und γ -amino-Buttersäure eine ähnliche Differenz aufgetreten, daher ist diese Tatsache offensichtlich durch die Rohstoffe bedingt. In Abbildung 152 ist die Veränderung der Aminosäuren von Pfanne-Voll nach Kühlmitte aufgetragen. Da die Schwankungsbreiten zwischen den einzelnen Suden so groß sind, ist eine statistisch gesicherte Aussage nicht möglich.

6.6.1.12 Vitaminausstattung der Würzen

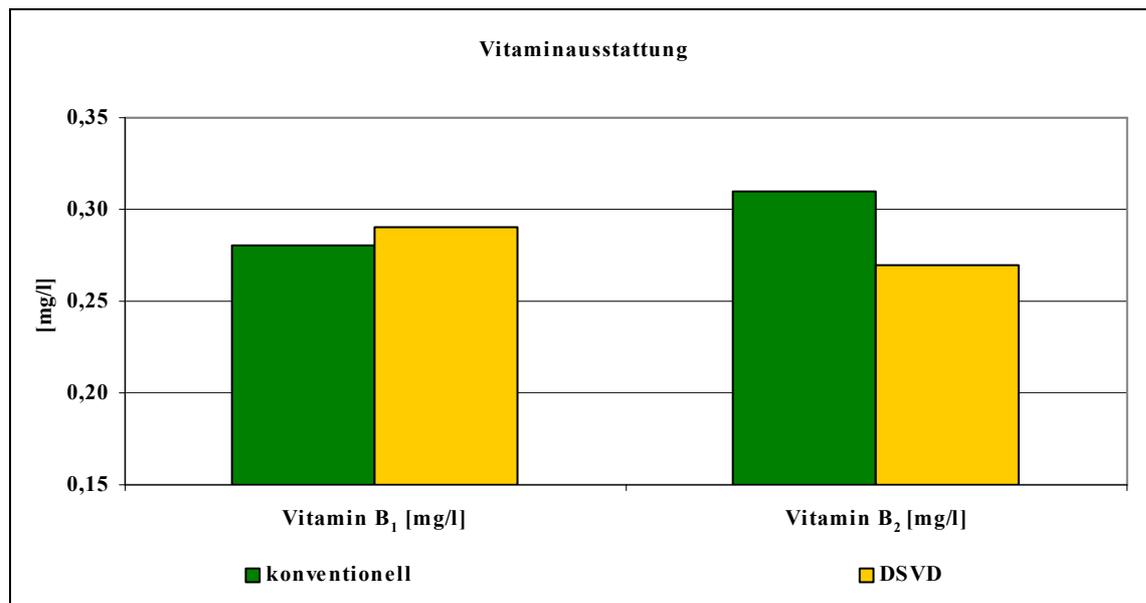


Abbildung 153: Vitaminausstattung der Würzen

Im Bier sind hauptsächlich die Vitamine des B-Komplexes vorhanden. Da die Vitamine für die Stoffwechselfunktionen der Hefe eine entscheidende Funktion haben, wurde die gekochte Würze entsprechend untersucht, um Unterschiede in der Gärung zu begründen. Vitamine sind thermolabil, daher ist die Auswirkung des Kochsystems interessant. Zur Analyse wurden die Vitamine B₁ und B₂ herangezogen; mengenmäßig ist das B₁ neben der Nikotinsäure das bedeutendste.

Aus den vorliegenden Ergebnissen (

Abbildung 153) lässt sich kein Trend ablesen. Ist von Vitamin B₁ leicht mehr in der DSVD-Würze vorhanden, so ist das Ergebnis bei Vitamin B₂ umgekehrt. Auffällig ist allerdings, dass die Werte deutlich über denen liegen, die in der Literatur angegeben sind [31]. Offensichtlich wirkt sich die Wahl des Kochsystems nicht relevant auf die Vitaminausstattung aus.

6.6.2 Verlauf und Analyse der Gärung

Bei der Analyse des Gärungsverlaufs werden die einzelnen Parameter in Form von Kurven dargestellt und diskutiert.

6.6.2.1 Temperaturverlauf

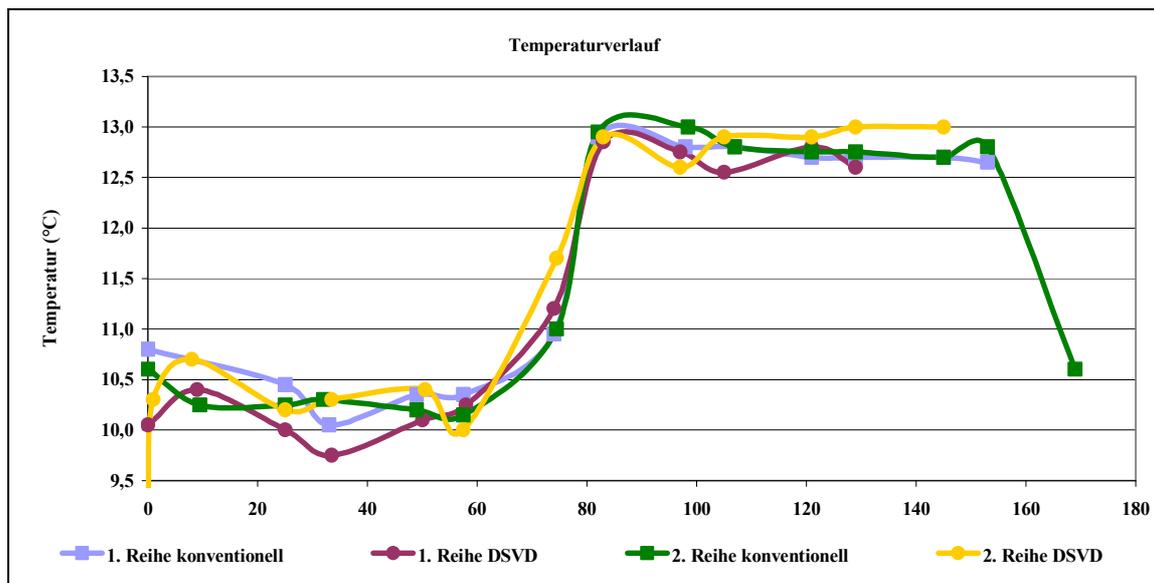


Abbildung 154: Vergleich des Temperaturverlaufs

Die Temperatur im Gärtank wurde an zwei verschiedenen Stellen gemessen, aus beiden Werten dann der Mittelwert bestimmt. An der Temperaturführung wird deutlich, dass eine kalte Hauptgärung mit einem anschließenden Reifungsschritt durchgeführt wird. Beim Anstieg der Temperatur steigt der Druck im Tank auf 1,6 bar absolut.

Der Verlauf der Temperaturkurven (Abbildung 154) zeigt, dass alle Vergleichsreihen bezüglich der Temperatur annähernd gleiche Bedingungen hatten, sodass eventuelle Unterschiede bei der Gärung nicht auf die Temperatur zurückzuführen sind.

6.6.2.2 Extraktabnahme

Über die Extraktabnahme kann der Verlauf der Verwertung der vergärbaren Zucker über die Zeit verfolgt werden. Das Erreichen des scheinbaren Endvergärungsgrades ist aber nicht das Kriterium, das man heranzieht, um vom Gär- in den Lagerkeller zu gehen. Hierfür ermittelt man den Gehalt an vicinalen Diketonen, um den Reifegrad des Bieres zu beurteilen.

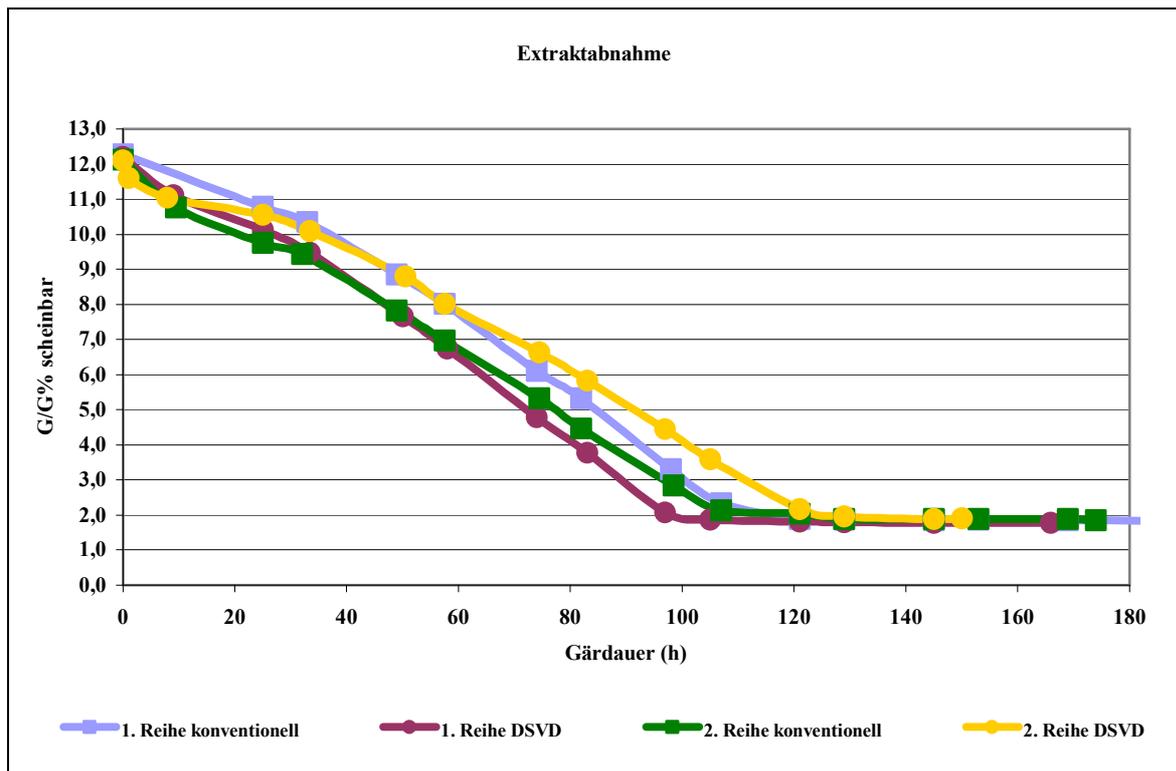


Abbildung 155: Vergleich der Extraktabnahme

Bei der Beurteilung der Kurven (Abbildung 155) muss man beachten, dass bei der zweiten Versuchsreihe der Tank mit den DSVD-Suden aus betrieblichen Gründen deutlich weniger Hefe bekommen hat als die anderen Versuchstanks. Darum erreicht die zweite Reihe mit dem DSVD-System als letzte den scheinbaren Endvergärungsgrad. Bei der ersten Versuchsreihe ist der DSVD-Tank während der gesamten Gärung im Extraktabbau immer etwas weiter. Dies kann mit den erhöhten Trübungs- und Feststoffwerten zusammenhängen. Die Hefe hat einen größeren Pool an Eiweißstoffen zur Verfügung und kann somit einen besseren Stoffumsatz erzielen. Die beiden konventionell gebrauten Versuchsreihen erreichen den scheinbaren Endvergärungsgrad etwa gleichzeitig, aber ca. 10 Stunden später als die erste DSVD-Reihe.

6.6.2.3 Abbau von Diacetyl

Diacetyl (2,3-Butandion) (Abbildung 156) und 2,3-Pentandion sind Folgeprodukte des Hefestoffwechsels. Wegen des niedrigen Geschmacksschwellenwertes von 0,10–0,12 mg/l hat Diacetyl einen negativen Einfluss auf den Biergeschmack. Es wird extrazellulär aus 2-Acetylactat gebildet. Nach drei normalen Gärtagen ist der Höhepunkt erreicht, dann wird das Diacetyl über Acetoin zu 2,3-Butandiol abgebaut. Einflussfaktoren bei der Umsetzung sind neben der Temperatur und dem Druck auch der Valingehalt der Würze [52]. Dieser war bei allen Versuchsreihen annähernd identisch.

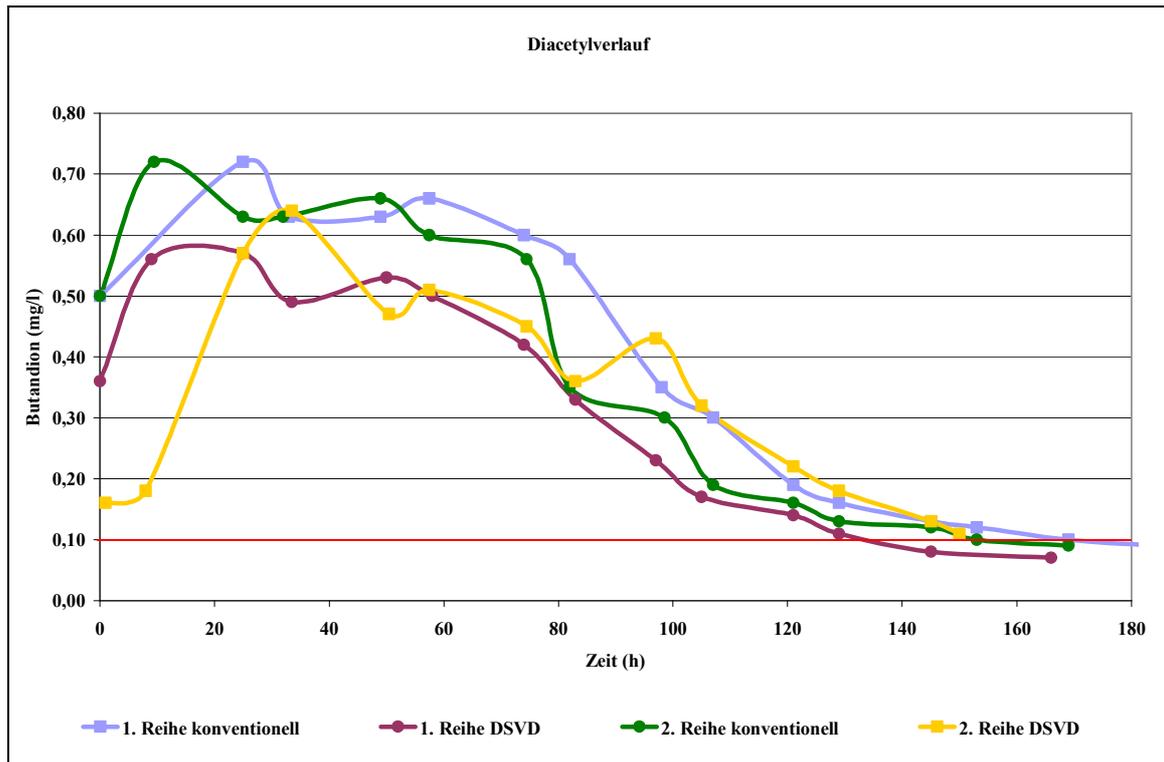


Abbildung 156: Verlauf des Butandion

Bei der ersten Versuchsreihe ist auffällig, dass das Maximum beim konventionellen Tank um 0,15 mg/l höher ist. Vor allem wird hier der Geschmacksschwellenwert (rote Linie) erst 24 Stunden später als beim DSVD-Tank unterschritten. Dies hat automatisch eine geringere Gärkellerbelegungszeit zur Folge. Bei der zweiten Versuchsreihe muss man wiederum die unterschiedliche Hefemenge beachten. Aber auch hier bestätigt sich, dass der konventionelle Tank ein um 0,10 mg/l höheres Maximum hat. Sehr interessant ist, dass bei der zweiten Reihe mit dem DSVD-System trotz der geringeren Hefegabe und des daraufhin verlangsamten Extraktabbaus die Reifung zeitgleich mit dem konventionellen Vergleichsud beendet ist. Die Wellen in den Kurven sind wahrscheinlich auf Messungenauigkeiten zurückzuführen.

Für den Gärverlauf lässt sich zusammenfassend sagen, dass die Verwendung des DSVD-Systems auf keinen Fall nachteilig ist, sondern im Gegenteil sogar die Diacetylentwicklung bei den DSVD-Suden nicht so ausgeprägt ist und daher der Abbau zügiger vorangeht.

6.6.2.4 Hefezellzahl

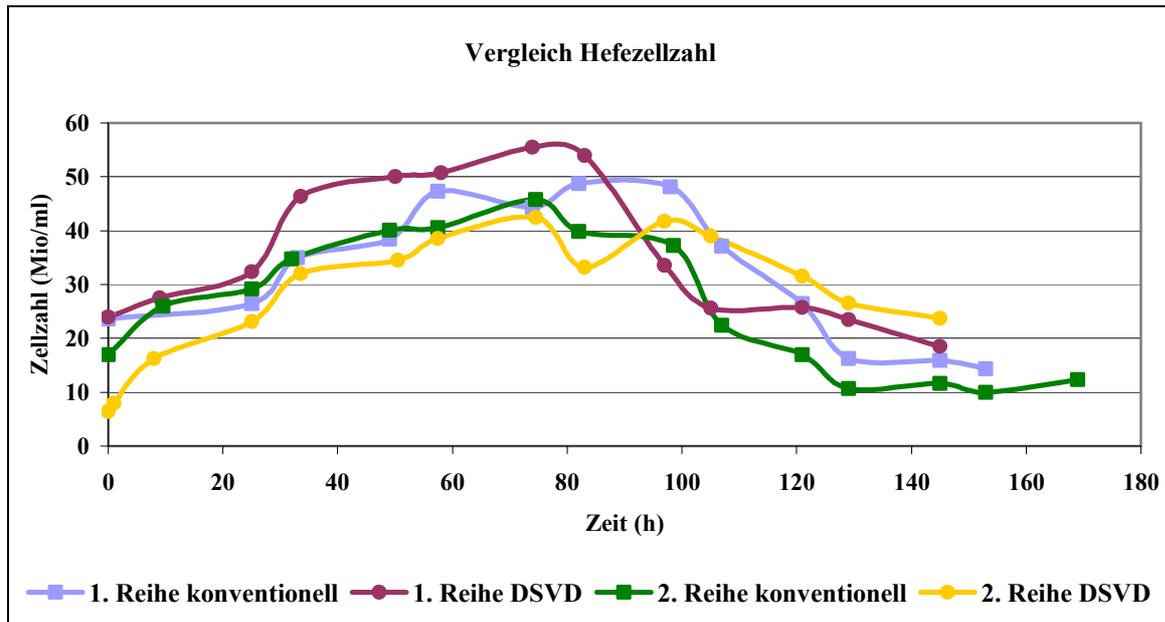


Abbildung 157: Verlauf der Hefezellzahl

In Abbildung 157 sind Hefezellzahlen zu sehen. Bei der Betrachtung der Ergebnisse muss man allerdings beachten, dass bei der zweiten Versuchsreihe mit dem DSVD-System die Anstellzellzahl deutlich unter der der anderen Versuchsreihen gelegen hat. Darauf ist, wie bereits erwähnt, auch der verlangsamte Extraktabbau zurückzuführen. Des Weiteren ist das leicht geringere Maximum der Zellzahl bei der zweiten Versuchsreihe auf diese Tatsache zurückzuführen. Vergleicht man allerdings nur die Tanks der ersten Versuchsreihe miteinander, erkennt man deutlich, dass es beim DSVD-Tank ein größeres exponentielles Wachstum, eine höhere maximale Zellzahl und ein rascheres Absetzen bzw. eine schnellere Absterbephase gibt. Diese Beobachtung ist konform mit dem Extraktabbau. Da die Wachstumsfaktoren Temperatur und Druck bei den Versuchsreihen konstant waren und innerhalb der ersten Versuchsreihe die Anstellmenge auch vergleichbar war, bleibt als Erklärung nur noch der Wachstumsfaktor Nährstoffangebot übrig. Hierbei muss man beachten, dass die DSVD-Würzen eine andere Zusammensetzung an Eiweiß, speziell an koagulierbarem Stickstoff, vorweisen.

Weiterhin erkennt man in der Grafik, dass bei beiden DSVD-Versuchsreihen eine etwas größere Zahl an Hefezellen in Schwebelagerung bleibt. Hiermit ist das beschleunigte Reifungsverhalten der DSVD-Sude zu erklären.

Der Einsatz des DSVD-Systems bringt also keinerlei Nachteile für die Hefe mit sich, sondern durch die geänderte Substratzusammensetzung sogar Vorteile für die Hefevermehrung.

6.6.2.5 pH-Abfall

Bei der Gärung verschiebt sich der pH-Wert um ca. 0,8–1,0 Einheiten in den sauren Bereich. Diese Abnahme wird durch Bildung von fixen und flüchtigen organischen Säuren hervorgerufen. Weiterhin wird der Wert durch eine Verschiebung der Pufferung zur sauren Seite beeinflusst. In der Hefezelle bleibt der pH-Wert allerdings konstant bei ca. 6,0. Der stärkste pH-Abfall fällt zusammen mit der Vermehrung der Hefe, was durch den Entzug von sauren Phosphaten als Puffersubstanz und die Assimilation von Ammoniak erklärt werden kann. Gibt es während der Gärung eine Zunahme des pH-Wertes, so ist dies eine Folge von Autolyse der Hefe [52].

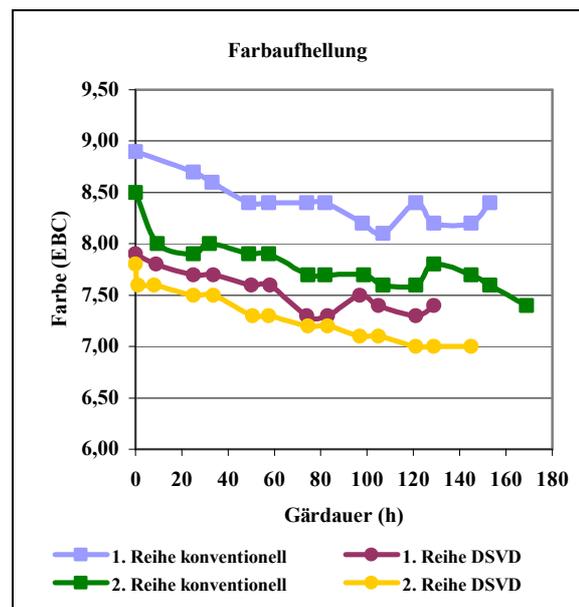
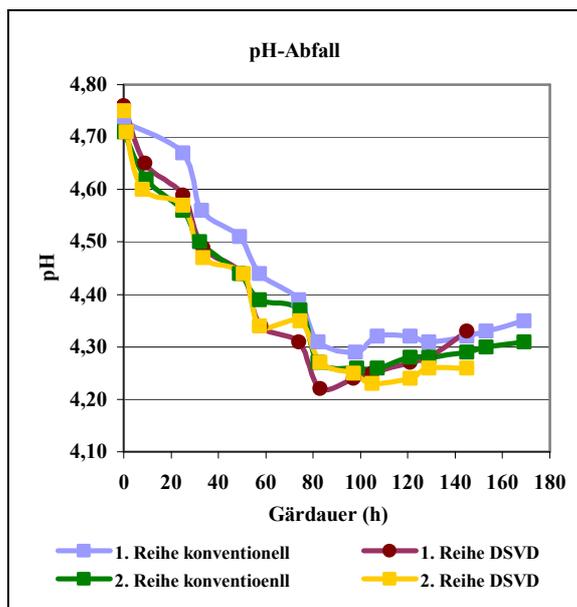


Abbildung 158: Verlauf der pH-Werte

Abbildung 159: Farbaufhellung

Man sieht bei der Betrachtung der pH-Werte vier relativ kongruent verlaufende Kurven (Abbildung 158). Hier gibt es keine signifikanten Unterschiede. Auffällig sind lediglich die schon zu Beginn der Gärung recht niedrigen pH-Werte. Das liegt aber an der im Sudhaus vorgenommenen biologischen Säuerung.

6.6.2.6 Farbaufhellung

Die Farbe des Bieres wird durch Melanoidine geprägt, die beim Darren und beim Würzekochen entstehen. Die Lösung dieser Farbstoffe ist stark pH-Wert abhängig, daher kommt es durch den pH-Abfall auch zu einer Aufhellung der Farbe während der Gärung.

Auch bei der Farbaufhellung (Abbildung 159) sind keine wesentlichen Unterschiede festzustellen. Alle Versuchsreihen haben in etwa die gleiche Intensität bei der Aufhellung. Natürlich sind die Ausgangswerte zwischen den konventionell und denen mit dem DSVD-System gebrauten Bieren unterschiedlich. Man sieht bei allen Versuchsreihen, dass die Farbaufhellung parallel zum pH-Abfall verläuft.

6.6.3 Filtration

Vom fertigen Bier wird nicht nur ein einwandfreier Geschmack, sondern auch Glanzfeinheit verlangt, die über den natürlichen Weg der Sedimentation im Lagertank nicht erreicht werden kann. Daher wird das Bier durch eine Filtration geklärt. Bei diesem Vorgang werden nicht nur Hefen, sondern auch Trübungsbildner wie Eiweißgerbstoffverbindungen oder Hopfenharze und, je nach Vorgehensweise, eventuell vorhandene biologische Kontaminationen entfernt.

Die Filtration beeinflusst nicht nur Glanzfeinheit und Stabilität des Bieres, sondern sie ist auch ein erheblicher Zeit- und vor allem Kostenfaktor.

Die Menge der eingebrachten Kieselgur ist mit 700–1000 g/m² relativ konstant. Da die laufende Dosage mit 60–100 g/hl von der filtrierte Menge und von der Filtrierbarkeit abhängig ist, wirkt sich eine bessere Filtrierbarkeit über eine längere Standzeit des Filters positiv auf den spezifischen Kieselgurverbrauch aus. Weil sich auch die Rüstzeiten auf mehr filtriertes Bier verteilen, ist eine längere Standzeit somit wirtschaftlicher.

Neben Hefe und vor allem Eiweißstoffen wirken sich β -Glucane negativ auf die Filtrierbarkeit des Bieres aus.

Probe	1. Reihe konventionell	1. Reihe DSVD	2. Reihe konventionell	2. Reihe DSVD
β -Glucan (mg/l)	107	105	112	105

Tabelle 9: Vergleich β -Glucane im Unfiltrat

Die Daten zeigen relativ eindeutig, dass das β -Glucan nicht die Ursache für eventuelle Leistungsdifferenzen in der Filtration sein kann. Sollten also Unterschiede auftreten, hat dies andere Gründe.

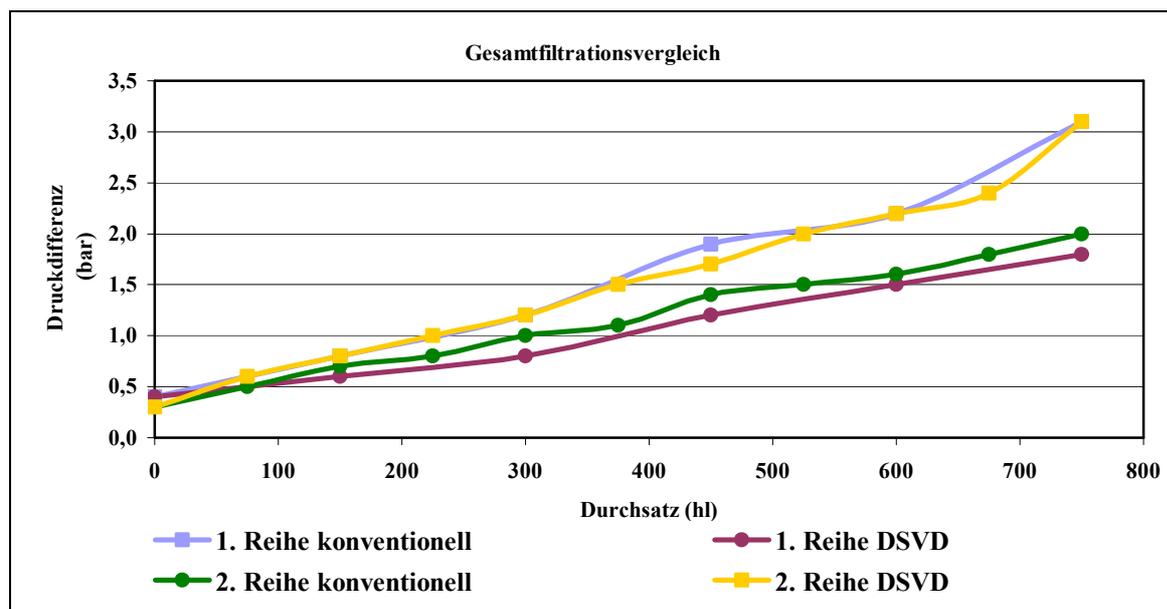


Abbildung 160: Vergleich des Druckanstiegs während der Filtration

Zu diesem Diagramm sind die folgenden Daten wichtig:

Probe	1. Reihe konventionell	1. Reihe DSVD	2. Reihe konventionell	2. Reihe DSVD
Trübung bei 90° [EBC]	0,47	0,39	0,60	0,31
Hefezellzahl [Zellen/ml]	160.000	400.000	50.000	100.000

Tabelle 10: Trübung und Zellzahl

Bei den in Tabelle 10 angegebenen Daten muss man zur Trübung erläutern, dass diese Daten kontinuierlich in der Leitung vom ZHF zum Schichtenfilter genommen wurden. Die angegebenen Werte sind ein Durchschnitt der gesamten Vergleichsfiltrationsdauer.

Bei den Angaben zur Hefekonzentration ist zu berücksichtigen, dass die Daten der ersten Versuchsreihe mit einem Cellcounter ermittelt wurden. Da aber diese Methode im niederen Bereich recht ungenau ist, wurden die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe mit der Thoma-Zählkammer bestimmt.

Sowohl bei der ersten als auch bei der zweiten Versuchsreihe fiel der Druckanstieg bei den DSVD-Bieren deutlich geringer aus (Abbildung 160). Bei der ersten Versuchsreihe liegt nach Ende der Vergleichsfiltration, die eine Menge von 800 hl umfasste, eine Druckdifferenz zwischen Filterein- und -auslauf von 1,3 bar vor. Die Filtration wird normalerweise bei einer Druckdifferenz von 3 bar beendet. Das bedeutet, dass bei den DSVD-Bieren mit einem durchschnittlichen Druckanstieg von 0,4 bar/h mindestens 3 Stunden bei maximalem Durchfluss hätte filtriert werden können. Auch die Trübungswerte sprechen für das DSVD-System, waren sie doch im Gegensatz zu den Vergleichsfiltrationen deutlich geringer, bei der zweiten Versuchsreihe sogar nur halb so hoch. Das spricht dafür, dass die Unterschiede in der Filtrationsleistung in der Zusammensetzung der Eiweißstoffe begründet sind, weil mit der Trübungsmessung im 90°-Winkel hauptsächlich Eiweiße erfasst werden. Die Hefekonzentration ist durch die Separation beim Schlauchen bei allen vier Versuchsreihen so niedrig, dass sie kaum einen Einfluss auf die Filtrationsleistung hat. Außerdem sind die Zellzahlen bei den konventionell hergestellten Bieren niedriger als bei den DSVD-Bieren. Dass bei diesen aber die größere Filtrationsleistung vorhanden war, spricht gegen einen Einfluss der Hefe. Zusätzlich wurden die Unfiltrate der konventionell gebrauten Biere trotz der geringeren Hefekonzentration bei der visuellen Überprüfung als trüber empfunden. Auch dies deutet auf den Einfluss von Eiweiß auf die Filtrationsleistung hin. Auf die Eiweißzusammensetzung wiederum hat das verwendete Kochsystem direkten Einfluss. Die genauen Zusammenhänge bleiben hier allerdings ungeklärt, da eine befriedigende Analyse zur Bestimmung der Eiweißzusammensetzung im Brauwesen nicht bekannt ist.

6.6.4 Bieranalyse

Bei der Bieranalyse kann keine statistisch Auswertung erfolgen, da immer nur Einzelflaschen der fertig abgefüllten Versuchsreihen zur Analyse herangezogen wurden. Die folgenden Ergebnisse sind also nur als Trend zu bewerten.

6.6.4.1 Alkoholgehalt und Ausstoßvergärungsgrad

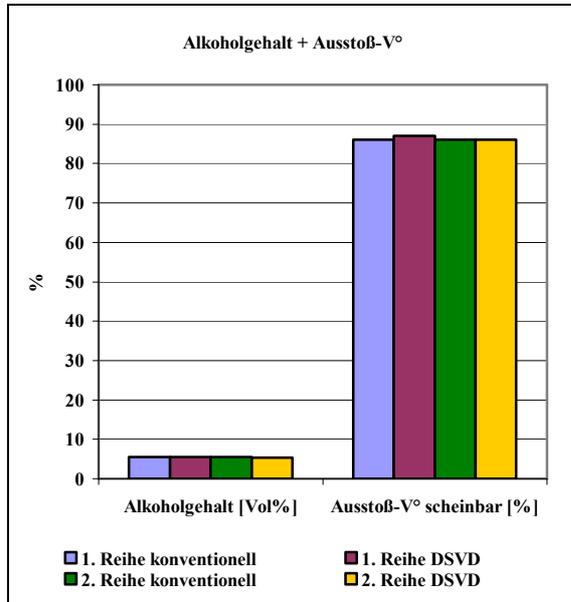


Abbildung 161: Alkoholgehalt und Ausstoßvergärungsgrade

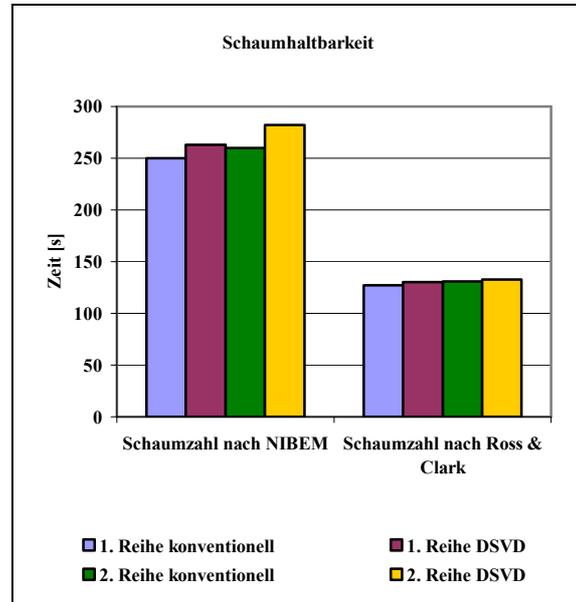


Abbildung 162: Vergleich der Schaumzahlen

Der Alkohol ist im Bier ein wichtiger Geschmacksträger. Sowohl Alkohol als auch Stammwürze werden mit dem Analysenautomat SCABA bestimmt. Aus diesen Daten kann man dann den Vergärungsgrad ermitteln.

Auf den Alkoholgehalt und somit auf die Vergärungsgrade hat das verwendete Kochsystem keinen Einfluss, wie Abbildung 161 zeigt. Die erzielten Alkoholgehalte liegen am Ende der oberen Spanne der Richtwerte für Pilsener Biere von 4,4–5,7 Vol% [32].

6.6.4.2 Bierschaum

Der Bierschaum ist ein qualitätsbestimmendes Merkmal. Es handelt sich um Gasblasen aus CO₂, welches während der Gärung entstanden ist bzw. in der Schankanlage zugesetzt wurde. Schaumträger sind ionische Stoffe wie Polypeptide und Polysaccharide, die sich als Film um die Gasblasen legen, sowie die Flüssigkeit zwischen den Gasblasen, die viskositätserhöhende, nichtionische Stoffe wie α -Glucane, β -Glucane und Mannane (aus der Hefe) enthält.

Koagulierbarem und Tannin-fällbarem Stickstoff werden ein Zusammenhang zur Schaumhaltbarkeit nachgesagt. Negativ auf den Schaum wirkt sich ein großes Δ -TBZ aus, also die Hitzebelastung, die auf die Würze einwirkt, während aufgeheizt oder gekocht wird. Weite-

re für den Schaum negative Einflüsse sind z. B. Reinigungsmittelrückstände im Produkt oder schlechtes Hefemanagement.

Im vorliegenden Fall wurden, wie bereits erwähnt, nur abgefüllte Flaschenbiere untersucht. Auf Grund einer etwas überholten Flaschenwaschmaschine in der Versuchsbrauerei ist die Schaumhaltbarkeit im Gegensatz zu analogen Fassbieren leicht reduziert.

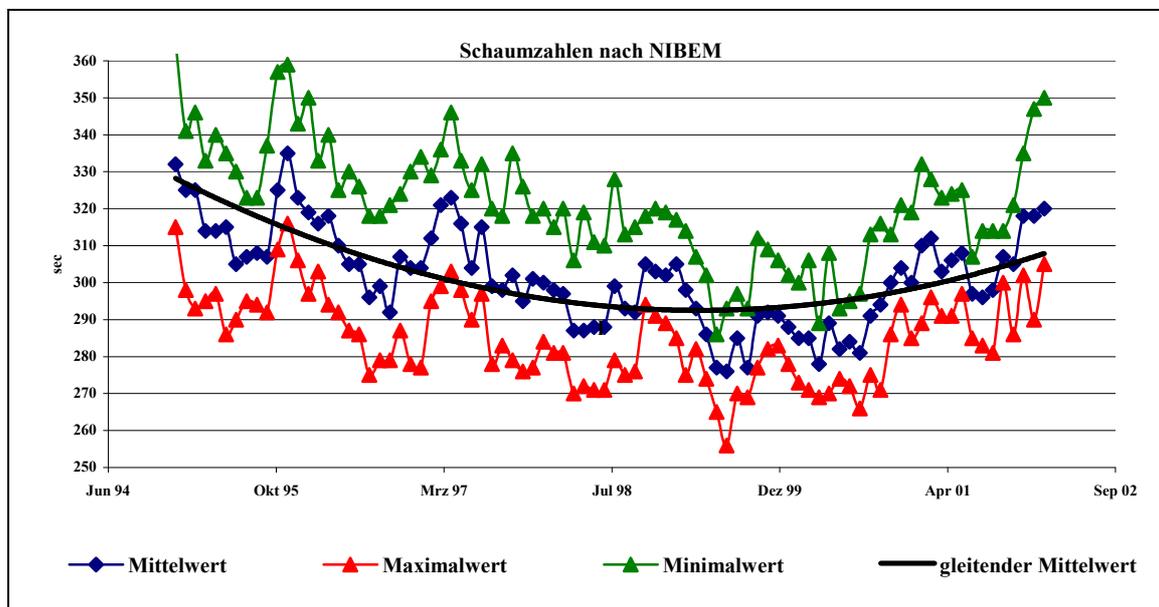


Abbildung 163: Langfristiger Trend der Schaumhaltbarkeit [85]

Abbildung 162 zeigt den Vergleich der Schaumzahlen. Man erkennt bei der Betrachtung der ermittelten Werte geringe Unterschiede. Bei der Methode nach Ross & Clark ergaben sich mit 2 bzw. 3 Punkten Differenz zu Gunsten der DSVD-Biere zu vernachlässigende Unterschiede. Bei der Methode nach NIBEM hingegen wurden mit 13 bzw. 22 Sekunden mehr schon höhere Werte gefunden. Hier machen sich die kürzere Kochzeit und der damit höhere Gehalt an noch koagulierbarem Stickstoff bemerkbar. Die Werte nach Ross & Clark liegen aber allesamt in dem von der MEBAK als sehr gut eingestuftem Bereich (>125). Als Ergebnis muss festgehalten werden, dass das DSVD-System trotz der geringen Unterschiede bei R & C einen positiven Einfluss auf den Schaum hat. Belegt wird das nicht nur durch die Untersuchung nach NIBEM, sondern auch durch eine brauereinterne Ermittlung. In einer langfristigen Trendkurve (Abbildung 163) hat man die Schaumhaltbarkeit verfolgt, und es zeigt sich, dass diese mit Installation des DSVD eine Trendwende zum Anstieg vollzieht.

6.6.4.3 Anthocyanogene und Polyphenole

Anthocyanogene und Polyphenole gelangen vor allem aus den Spelzen des Malzes und aus den verwendeten Hopfenprodukten ins Bier, sofern nicht ausschließlich Hopfenextrakt verwendet wird. Sie beeinflussen in gelöster Form Farbe und Geschmack des Bieres und besitzen eine gerbende und eiweißfällende Wirkung, was sich auf die chemisch-physikalische Haltbarkeit der Biere auswirkt. Andererseits wird den Polyphenolen, speziell denen,

die aus dem Hopfen stammen, eine Reihe von positiven Eigenschaften nachgesagt. So wirken verschiedene Flavanoide antikanzerogen, indem sie das Wachstum von Krebszellen hemmen. Hopfenpolyphenole wirken antimikrobiell. Beispielsweise werden die Bildung von Zahnkaries hinausgezögert und das Wachstum von diversen Clostridien und *Helicobacter pylori* gehemmt. Etliche Arten von Pilzen können ebenfalls bei Anwesenheit von Humolonen, Lupulonen und Bestandteilen der Hartharze nicht wachsen [66].

Da die Alterung des Bieres nachweislich mit oxidativen Vorgängen in Verbindung steht, sind die Polyphenole mit ihren antioxidativen Eigenschaften von besonderer Bedeutung. Sie verlangsamen nicht nur die Alterung des Bieres, sondern hemmen die Bildung kanzerogener Nitrosamine, binden freie, für den menschlichen Organismus gefährliche Radikale und beugen durch den Schutz der Low-Density-Lipoproteine langfristig Herz-Kreislauf-Erkrankungen vor.

In der Literatur finden sich noch zahlreiche weitere positive Eigenschaften, auf die hier jedoch nicht näher eingegangen werden soll [66].

Da im vorliegenden Fall während der Filtration mit PVPP stabilisiert wurde, werden auch die Gehalte im Unfiltrat bei der Diskussion berücksichtigt.

Beim Vergleich der Anthocyanogen- und Polyphenolgehalte (Abbildung 164) fällt auf, dass bei den Polyphenolen nur im Unfiltrat ein deutlicher Unterschied zu Gunsten der konventionell gebrauten Biere vorhanden ist. Dieser Unterschied wird aber durch die Stabilisierung während der Filtration angeglichen. Bei der Untersuchung des abgefüllten Bieres sind daher keine signifikanten Unterschiede zwischen den Versuchsreihen zu vermerken.

Anders ist die Lage bei den Anthocyanogengehalten. Hier schneiden die konventionell gebrauten Biere deutlich besser ab. Der Unterschied nimmt zwar im Zuge der Stabilisierung leicht ab, ist aber dennoch vorhanden und beläuft sich etwa zwischen 5 und 15 %.

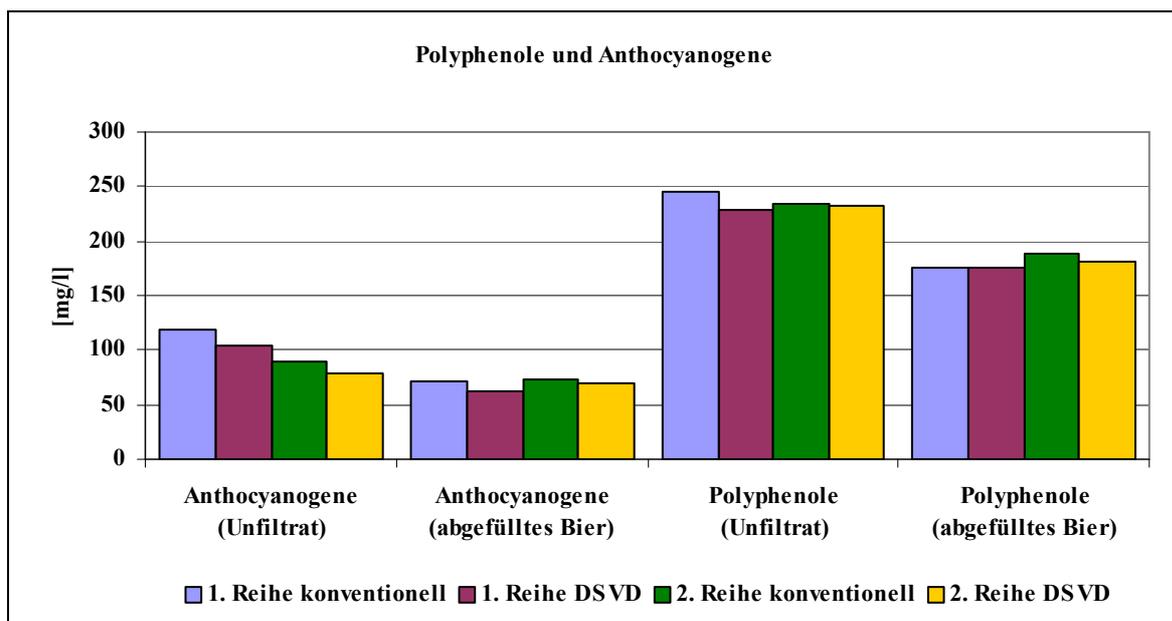


Abbildung 164: Vergleich der Anthocyanogen- und Polyphenolgehalte

6.6.4.4 Gärungsnebenprodukte

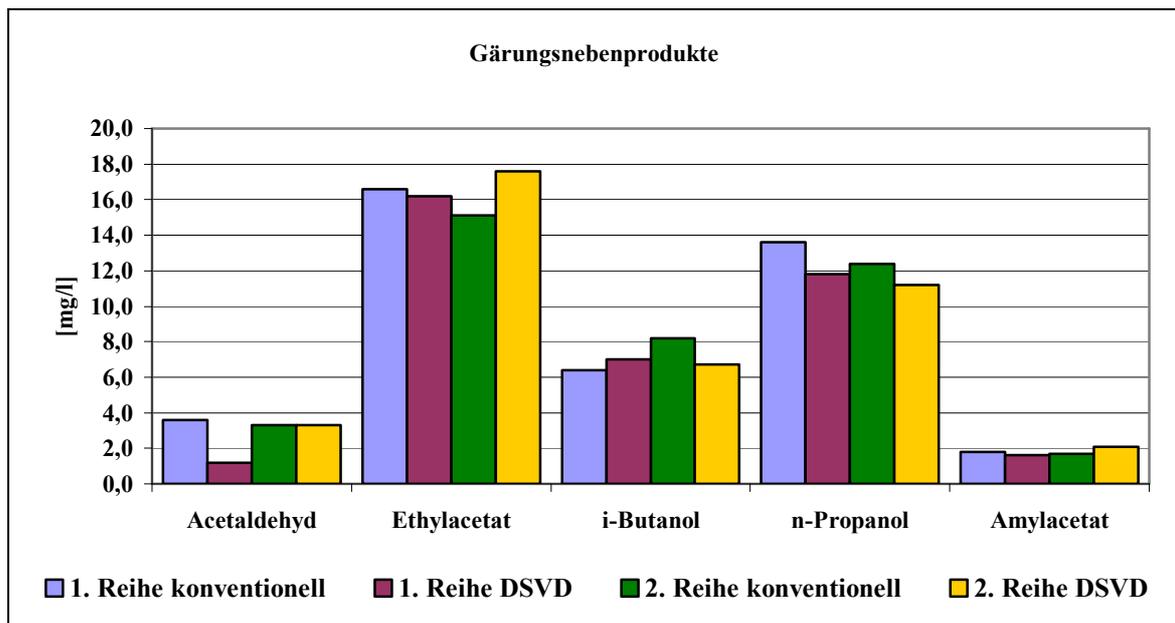


Abbildung 165: Vergleich der Gärungsnebenprodukte I

Die Gärungsnebenprodukte (Abbildung 165) sind entscheidend für den Charakter eines Bieres, denn Bier ist mehr als nur Dextrine, Alkohol, Hopfen und Wasser. Allerdings können GNP auch zu erheblichen Geschmacksbeeinträchtigungen führen, wenn sie in einer zu hohen Konzentration vorliegen. Man unterscheidet beim Bier die flüchtigen GNP, wie zum Beispiel die Schwefelverbindungen, oder die nicht flüchtigen wie die Ester und höheren Alkohole. Weiterhin muss man beachten, dass die Hefe einen Teil der gebildeten Nebenprodukte selbst wieder verstoffwechselt. Dieses geschieht zum Beispiel mit den vicinalen Diketonen.

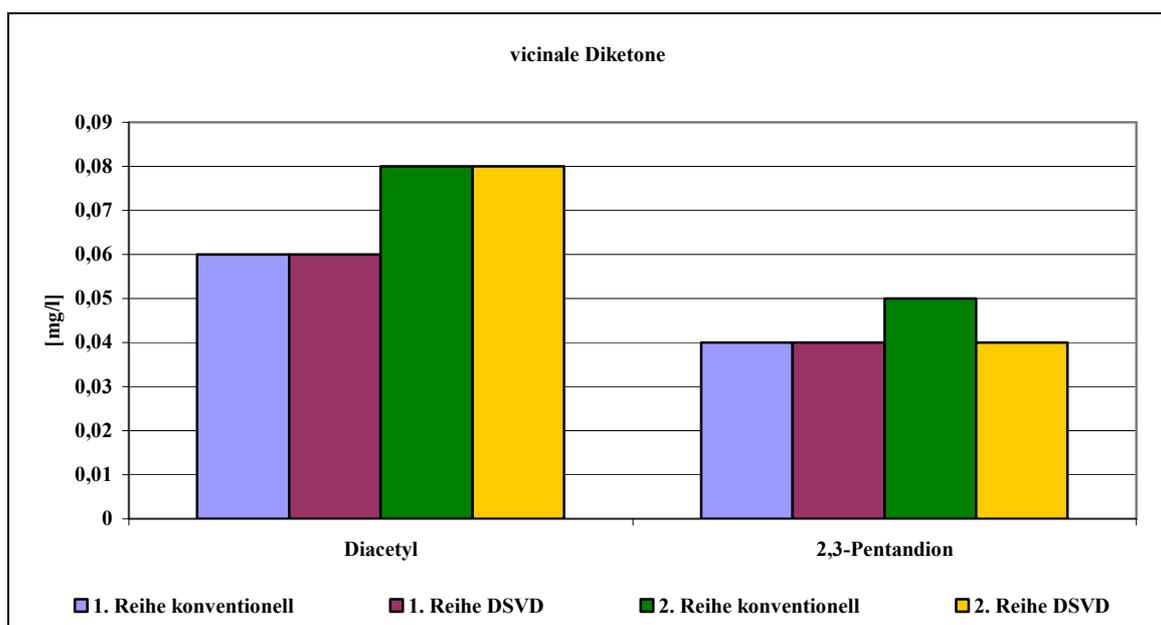


Abbildung 166: Vergleich der Gärungsnebenprodukte II

Keines der aufgeführten Gärungsnebenprodukte überschreitet den Geschmacksschwellenwert. Auffällig ist bei der ersten Versuchsreihe, dass das Acetaldehyd im konventionellen Bier in der dreifachen Konzentration vorhanden ist. Acetaldehyd verursacht das typische „Jungbieraroma“. Offensichtlich ist es mit dem DSVD-System durch den beschleunigten Extraktabbau bei der ersten Versuchsreihe zu einer Reduzierung dieser Substanz gekommen.

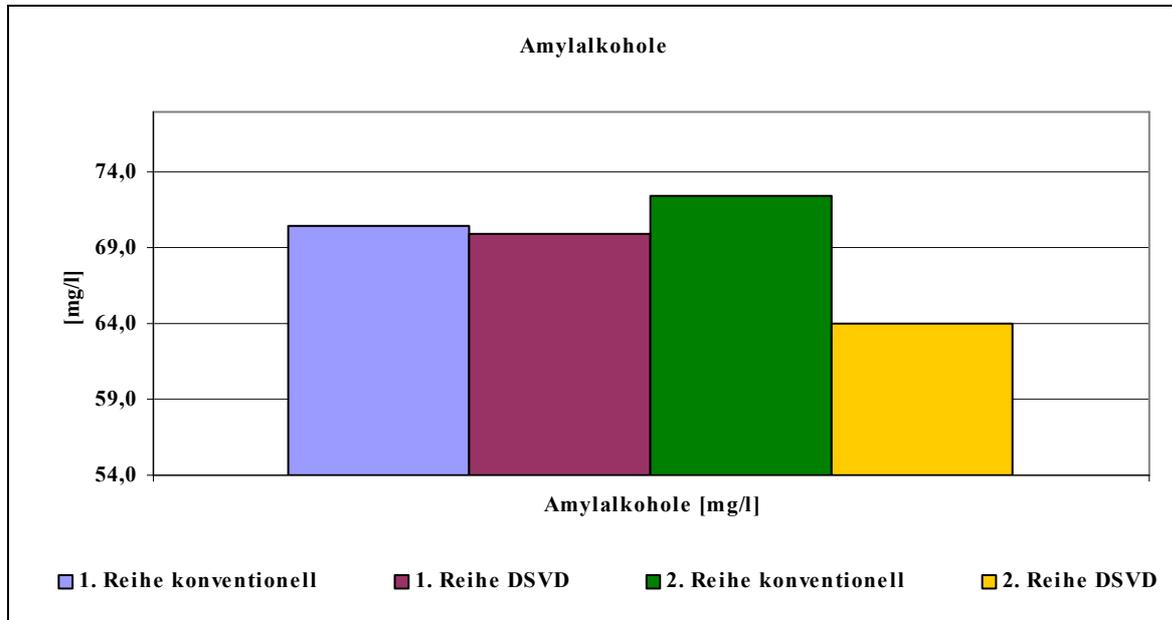


Abbildung 167: Vergleich der Gärungsnebenprodukte III

Bei Ethylacetat, iso-Butanol und Amylacetat sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. N-Propanol ist bei den DSVD-Bieren um ca. 1 bis 2 mg/l niedriger als bei den konventionellen Bieren. Diese Unterschiede sind aber nicht auffallend.

Auch hinsichtlich der vicinalen Diketone (Abbildung 166) gab es im abgefüllten Bier keine Unterschiede.

Bei den Amylalkoholen (Abbildung 167) fällt erneut ein geringer Unterschied zu Gunsten der DSVD-Biere auf, doch hier ist ebenfalls keine schlüssige Erklärung möglich.

Zusammenfassend kann man sicherlich bei den Gärungsnebenprodukten keinen Nachteil bei der Verwendung des DSVD-Systems feststellen. Die leicht verringerten Anteile an höheren Alkoholen sind im Gegenteil eher positiv für die Bekömmlichkeit der Biere.

6.6.5 Verkostung

Die Verkostung der Vergleichsbiere wurde hauptsächlich durch geschulte Verkoster vorgenommen, und besonderes Augenmerk wurde auf die Dreiecksverkostung gelegt.

Die Verkostung der ersten Versuchsreihe fand eine Woche nach der Abfüllung statt. Bei der zweiten Versuchsreihe wurde die Verkostung 14 Tage nach der Abfüllung durchgeführt. In der Zwischenzeit wurden die Biere kalt gelagert, um eine eventuelle forcierte Alterung zu vermeiden. Bei der ersten Versuchsreihe wurde zusätzlich noch eine Drei-

ecksverkostung mit gealtertem Bier durchgeführt. Hierzu wurde nach der ersten Verkostung das Bier vier Wochen bei 20 °C aufbewahrt und dann verkostet.

Das Ergebnis der Verkostung der ersten, nicht gealterten Versuchsreihe (Tabelle 11) zeigt, dass nur 4-mal die richtige Zuordnung im Dreieckstest erfolgt ist. Bei der zweiten Reihe ergab sich ein ähnliches Bild (Tabelle 12).

Anzahl der Verkoster	richtig	falsch
11	4	7

Tabelle 11: Dreiecksverkostung der frischen Biere der ersten Reihe

Anzahl der Verkoster	richtig	falsch
7	2	5

Tabelle 12: Dreiecksverkostung der frischen Biere der zweiten Reihe

Bei der Verkostung der frischen, nicht gealterten Biere war statistisch überhaupt kein Unterschied festzustellen. Die beiden Verkoster, die die Biere unterscheiden konnten, bevorzugten allerdings die DSVD-Biere. Das Hauptziel bei Installation eines neuen Würzekochsystems, das Bier im Geschmack nicht signifikant zu verändern, ist nach den vorliegenden Verkostungsergebnissen gelungen.

Weiterhin ist zu erwähnen, dass die Verkoster die Biere als typgerecht empfanden und keine Geschmacksfehler bemerkten, abgesehen von vereinzelt Hinweisen auf einen ganz leichten Oxidationsgeschmack, der auf eine etwas überalterte Flaschenabfüllanlage zurückzuführen ist.

Anzahl der Verkoster	richtig	falsch
7	5	2

Tabelle 13: Dreiecksverkostung der gealterten Biere der ersten Reihe

Bei der Alterungsverkostung (Tabelle 13) ergibt sich allerdings ein anderes Bild. Hier wurde mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % oder einer 1*-Signifikanz der Unterschied zwischen den Bieren herausgeschmeckt. Hinsichtlich der Bevorzugung der Biere ergab sich aber kein klarer Trend, da sich zwei der Verkoster für die DSVD-Biere entschieden und drei Tester für die konventionellen Biere. Das unterschiedliche Alterungsverhalten kann entweder auf das Kochsystem zurückgeführt werden oder aber auf die etwas höheren Heißtrubgehalte bei den DSVD-Bieren.

6.7 Ergebnisse des Vergleichs DSVD mit Innenkocher hinsichtlich der Würzearomastoffe

In einer weiteren Versuchsreihe wurden die Auswirkungen auf die Würzearomastoffe untersucht. Von Interesse ist dabei im Besonderen, ob es Unterschiede vor allem bei den

hochsiedenden Komponenten gibt. Hier war die Vermutung, dass beim DSVD-System wegen der geringen Gesamtverdampfung gerade diese Stoffe nicht so weitreichend ausgetrieben werden.

6.7.1 Konventionelle Analytik

Bei diesen Suden wurden ebenfalls die konventionellen Analysen durchgeführt. Da sie aber keine großen Unterschiede zu den im vorherigen Kapitel schon dargestellten Werte zeigen, wird an dieser Stelle auf eine ausführliche Betrachtung verzichtet. Der Vollständigkeit halber sind die Analysenwerte im Anhang zu finden.

6.7.2 Verhalten der Würze aromastoffe bei der Kochung

Auch hier können wegen der großen Schwankungen der Analysenwerte zwischen den einzelnen Suden keine statistisch abgesicherten Aussagen getroffen werden. Es lassen sich also nur Tendenzen ableiten.

6.7.2.1 2-me-Butanal und 3-me-Butanal

2-me-Butanal war leider bei keinem der Sude analysierbar. Der Grund hierfür liegt wahrscheinlich in der Analytik.

3-me-Butanal (Abbildung 168) zeigt den erwarteten Verlauf. Bei den Innenkocher-Suden nimmt die Konzentration von Pflanne-Voll bis Kochende stark ab. Im Laufe der Whirlpoolrast steigt der Wert wieder an. Der Stoff wird nachgebildet, aber nicht mehr ausgedampft.

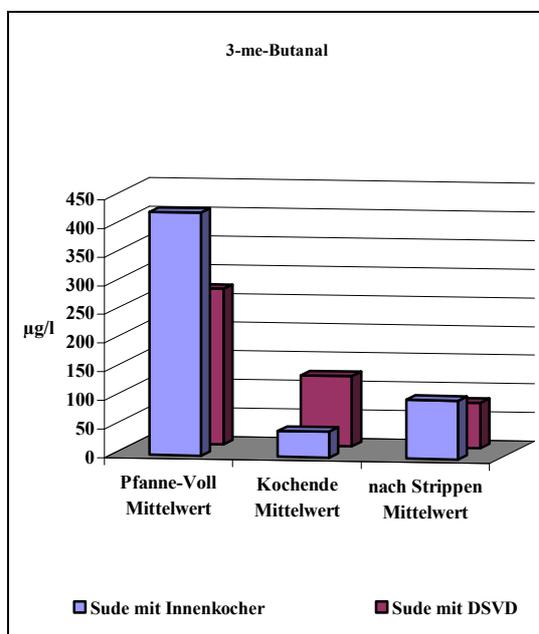


Abbildung 168: 3-me-Butanal

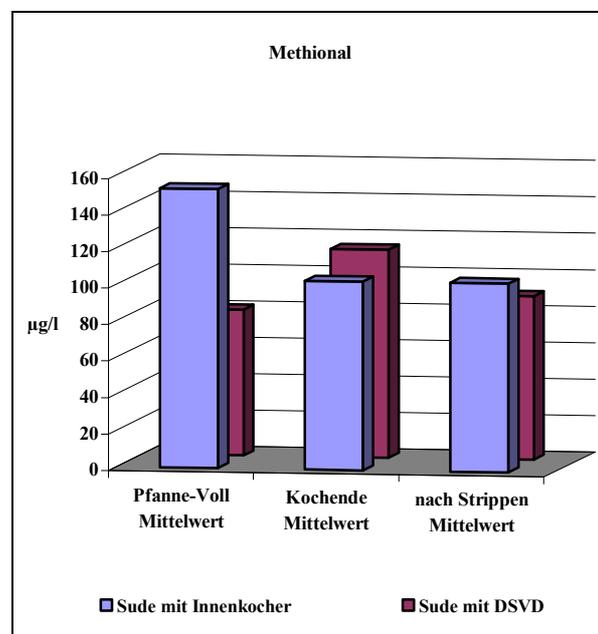


Abbildung 169: Methional

Weil 3-me-Butanal relativ leicht flüchtig ist, ist mit dem DSVD-System der Wert schon bei Pflanne-Voll niedriger, denn beim Aufheizen bis 85 °C findet bereits eine Ausdampfung

statt. Bei Kochende ist zwar eine höhere Konzentration zu sehen, aber der Endwert, der in etwa auf dem Niveau der Vergleichssude liegt, wird erst durch das Strippen erreicht.

6.7.2.2 Methional, Benzaldehyd und 2-Phenylethanal

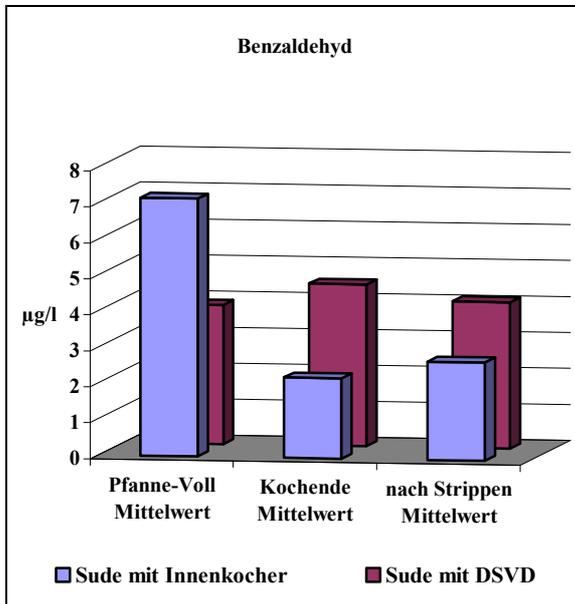


Abbildung 170: Benzaldehyd

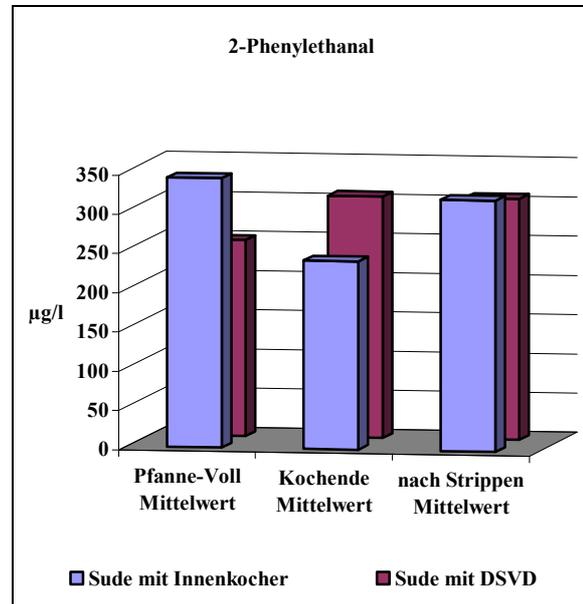


Abbildung 171: 2-Phenylethanal

Bei den konventionell gekochten Suden zeigt Methional (Abbildung 169) von Pfanne-Voll bis Kochende eine Abnahme. Bis Kühlmitte verändert sich der Wert nicht mehr. Beim DSVD-System steigt der Wert zunächst von Pfanne-Voll bis Kochende an. Die Ursache liegt wahrscheinlich darin, dass Methional zwar bis Kochende nachgebildet, aber nicht richtig ausgedampft wird. Nach dem Strippen ist der Wert allerdings etwas niedriger als beim Innenkocher.

Benzaldehyd (Abbildung 170) verhält sich beim Innenkocher wie das Methionin, nur dass es im Laufe der Kochung intensiver ausgedampft wird. Mit dem DSVD-System bleibt der Wert von Pfanne-Voll bis nach dem Strippen relativ konstant.

Bei der klassischen Kochung wird 2-Phenylethanal (Abbildung 171) bis Kochende leicht verringert, um dann bis Kühlmitte wieder auf den Ausgangswert anzusteigen. Mit dem DSVD-System steigt der Wert von Pfanne-Voll bis Kochende, hat dort dasselbe Niveau wie die Vergleichskochung und wird auch durch das Strippen nicht verändert.

6.7.2.3 Summe der Streckeraldehyde

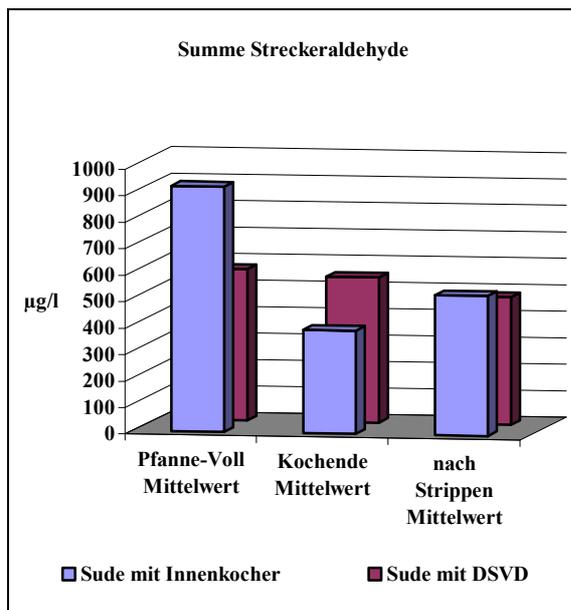


Abbildung 172: Summe der Streckeraldehyde

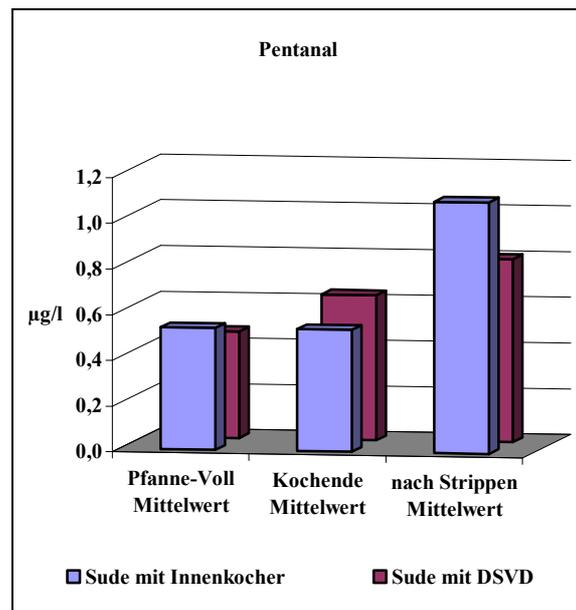


Abbildung 173: Pentanal

Auch die Summe der Streckeraldehyde (Abbildung 172) verhält sich mit dem Innenkocher wie zu erwarten. Im Verlauf der Kochung nimmt der Wert durch die Ausdampfung deutlich ab. Im Laufe der Whirlpoolrast werden Streckeraldehyde nachgebildet, aber nicht mehr ausgedampft. Mit dem DSVD-System findet im gesamten Prozessverlauf Ausdampfung statt. Die Konzentration ist deshalb schon bei Pfanne-Voll geringer und bleibt bis Kochende konstant. Durch das Strippen findet nochmals eine Ausdampfung statt und der Wert nimmt ab.

6.7.2.4 Pentanal und 2-Pentanon

Pentanal (Abbildung 173) verhält sich bei beiden Systemen nicht ganz so, wie man es erwarten würde. Die Werte sind schon zum Zeitpunkt Pfanne-Voll recht niedrig und bleiben bis Kochende nahezu unverändert. Bis Kühlmitte findet bei beiden Systemen ein starker Anstieg statt. Hier wäre zu erwarten gewesen, dass das Strippen eine merkliche Reduktion mit sich bringt.

2-Pentanon (Abbildung 174) dagegen erfüllt die Erwartungen. Von Prozessbeginn bis Kochende wird es bei der klassischen Kochung drastisch reduziert. Mit dem DSVD-System wäre vor allem beim Strippen eine stärkere Abnahme zu erwarten gewesen.

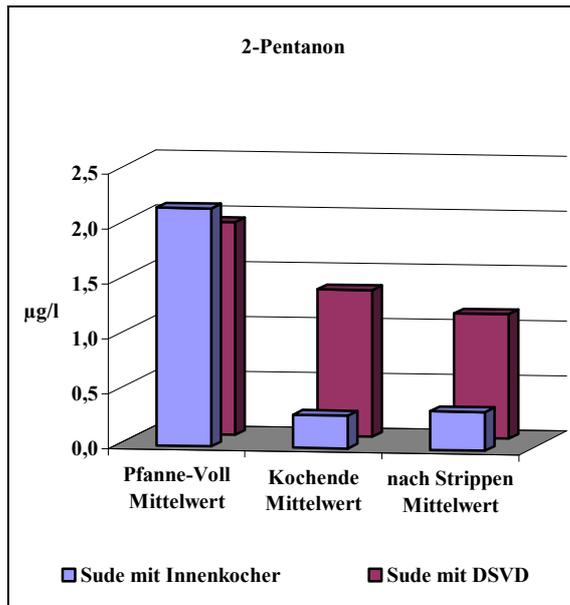


Abbildung 174: 2-Pentanon

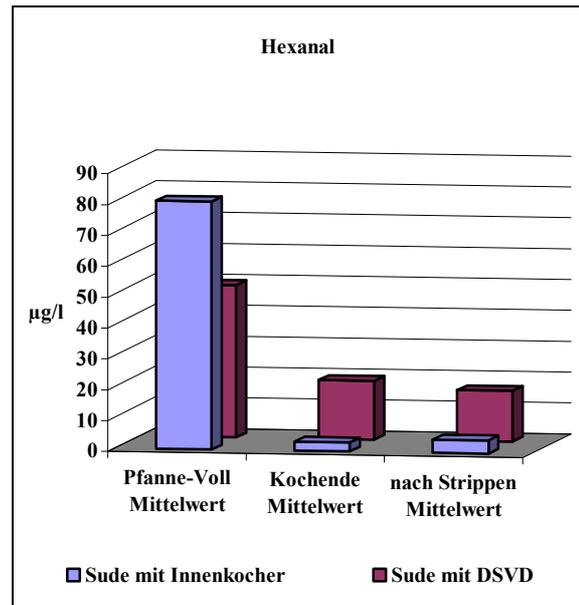


Abbildung 175: Hexanal

6.7.2.5 Hexanal und Heptanal

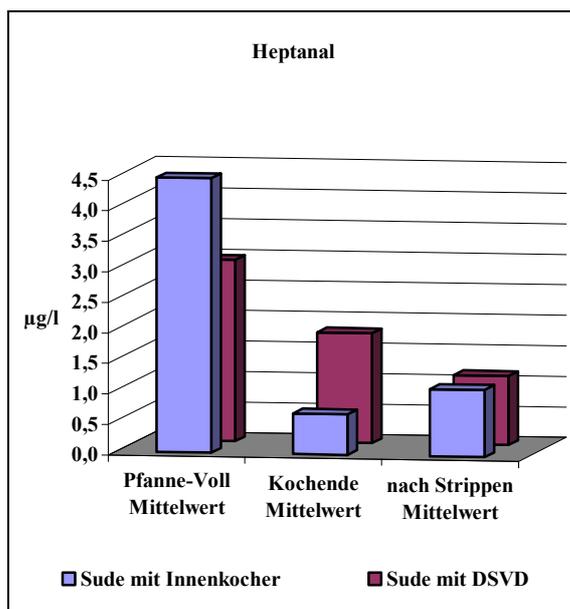


Abbildung 176: Heptanal

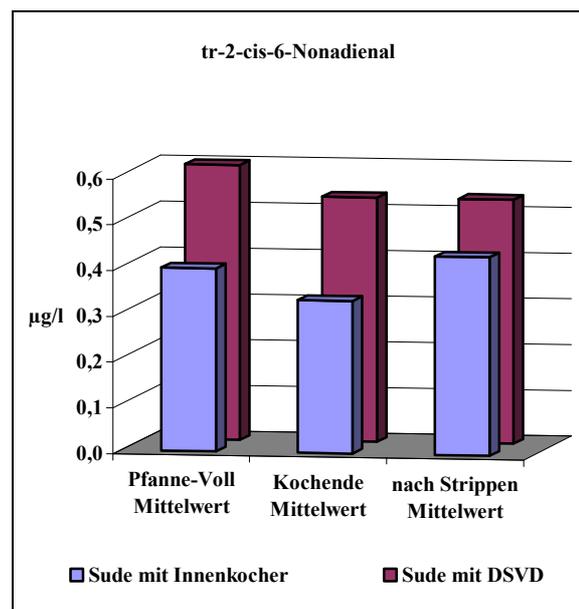


Abbildung 177: tr-2-cis-6-Nonadienal

Der Ausdampfindicator Hexanal (Abbildung 175) erfährt mit dem Innenkocher eine sehr effiziente Ausdampfung. Mit dem DSVD-System wird dieser Stoff nicht so weitreichend reduziert, liegt aber generell im erwarteten Bereich, wenn auch durch das Strippen mit einer stärkeren Ausdampfung zu rechnen gewesen wäre.

Heptanal (Abbildung 176) hingegen wird durch das Strippen gut reduziert und erreicht dann auch die Werte des Innenkochers, dessen Werte bis Kühlmitte wieder leicht ansteigen.

6.7.2.6 tr-2-cis-6-Nonadienal und γ -Nonalacton

tr-2-cis-6-Nonadienal (Abbildung 177) sinkt bei beiden Kochverfahren leicht von Pfanne-Voll bis Kochende, um dann bei der konventionellen Kochung bis auf über das Ausgangsniveau anzusteigen. Mit dem DSVD-System bleibt zwar der Wert von Kochende bis nach dem Strippen konstant, er liegt aber auf höherem Niveau als mit der Vergleichskochung.

Beim Innenkocher nimmt γ -Nonalacton (Abbildung 178) durch die Ausdampfung von Pfanne-Voll bis Kochende ab. Danach bleibt es konstant. Beim DSVD-System bleiben die Werte über den gesamten Verlauf mehr oder weniger konstant, liegen aber etwas höher.

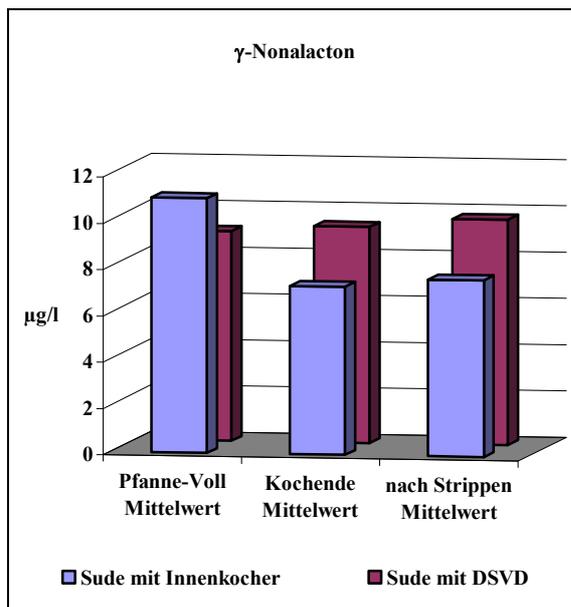


Abbildung 178: γ -Nonalacton

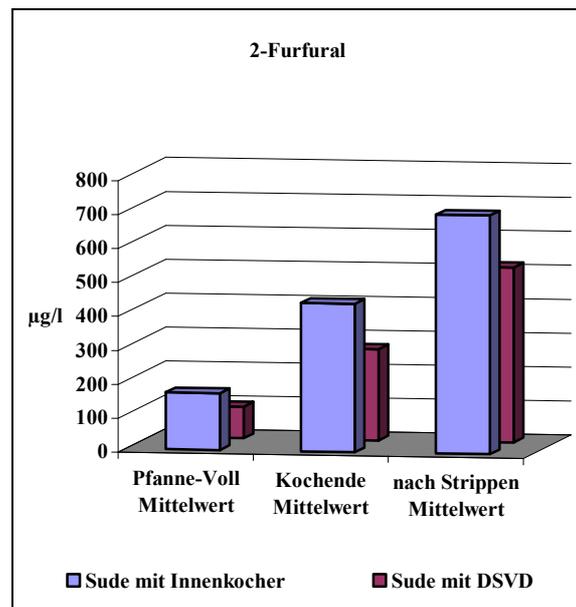


Abbildung 179: 2-Furfural

6.7.2.7 2-Furfural und 2-ac-Furan

Durch die höhere thermische Belastung beim Innenkocher steigt auch bei diesen Suden die Konzentration des 2-Furfural (Abbildung 179) wesentlich stärker an als bei den DSVD-Suden. Hier wird wieder die schonende Kochung deutlich: Schon beim Aufheizen sind die Werte geringer, und auch der Anstieg erfolgt moderater.

2-ac-Furan (Abbildung 180) verhält sich identisch zum 2-Furfural, es unterstreicht somit nochmals die schonende DSVD-Kochung. Allerdings steigt es im Vergleich zu den vorherigen Versuchen kontinuierlich von Pfanne-Voll bis Kühlmitte an. Vorher erfolgte der Anstieg erst nach Kochende, und auch das Strippen zeigte eine Verminderung der Werte.

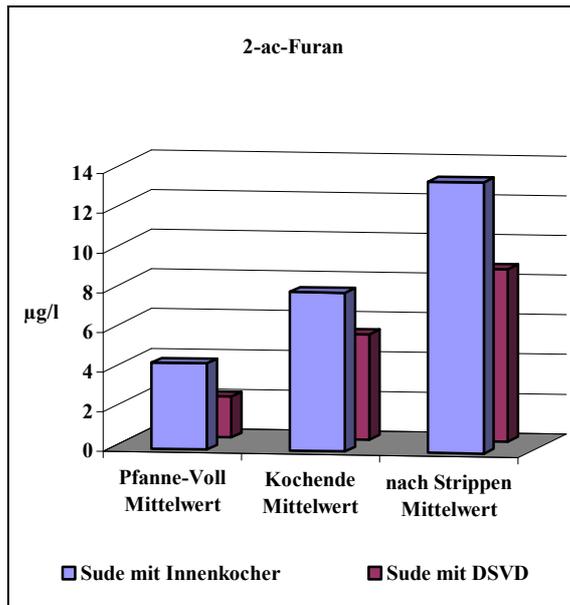


Abbildung 180: 2-ac-Furan

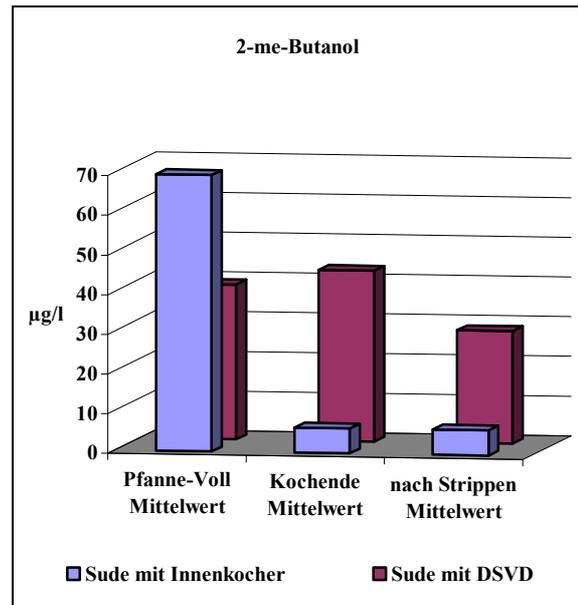


Abbildung 181: 2-me-Butanol

6.7.2.8 2-me-Butanol und 3-me-Butanol

Die beiden hochsiedenden Komponenten 2-me-Butanol (Abbildung 181) und 3-me-Butanol (Abbildung 182) verhalten sich bei der konventionellen Kochung, wie schon bei den Versuchen vorher, gleich. Sie werden im Prozessverlauf fast vollständig ausgetrieben. Auch beim DSVD-System ist das Verhalten vergleichbar. 2-me-Butanol bleibt im Prozessverlauf annähernd konstant, und erst beim Strippen erfährt es eine leichte Verminderung. 3-me-Butanol wird schon in der Kochphase etwas reduziert; nach dem Strippen wird fast der Wert der konventionellen Kochung erreicht.

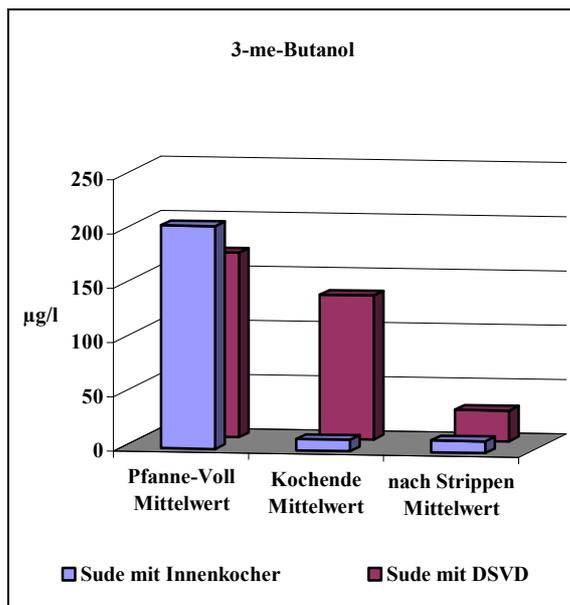


Abbildung 182: 3-me-Butanol

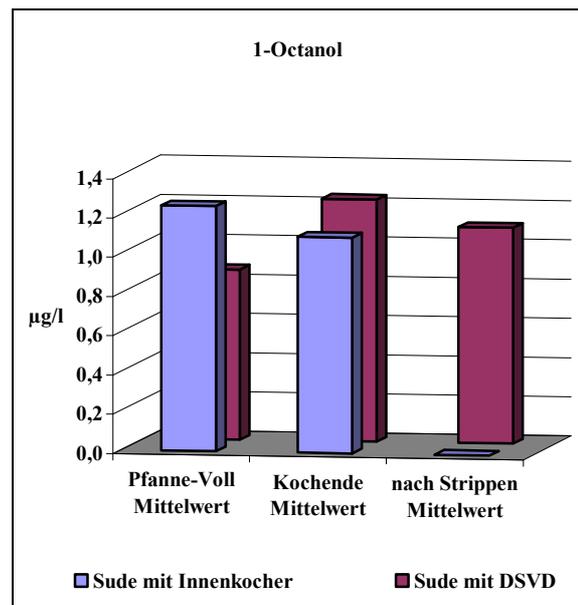


Abbildung 183: 1-Octanol

6.7.2.9 1-Pentanol, 1-Hexanol, 1-Octanol und 1-Octen-3-ol

1-Pentanol und 1-Hexanol waren leider bei einigen Proben nicht analysierbar, sodass eine Auswertung hier keinen Sinn macht.

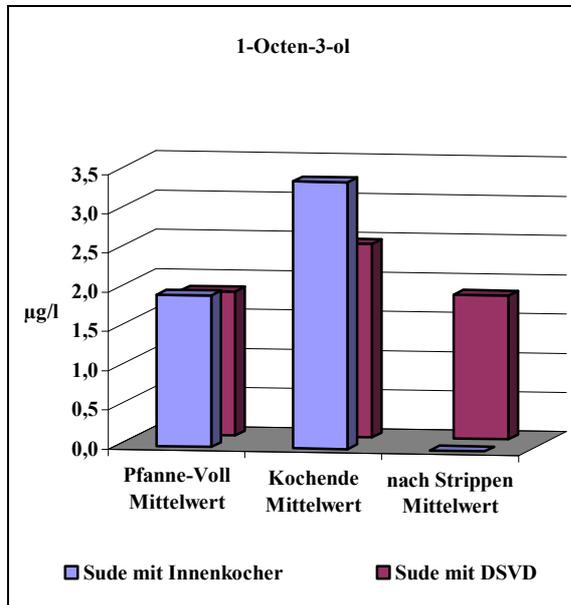


Abbildung 184: 1-Octen-3-ol

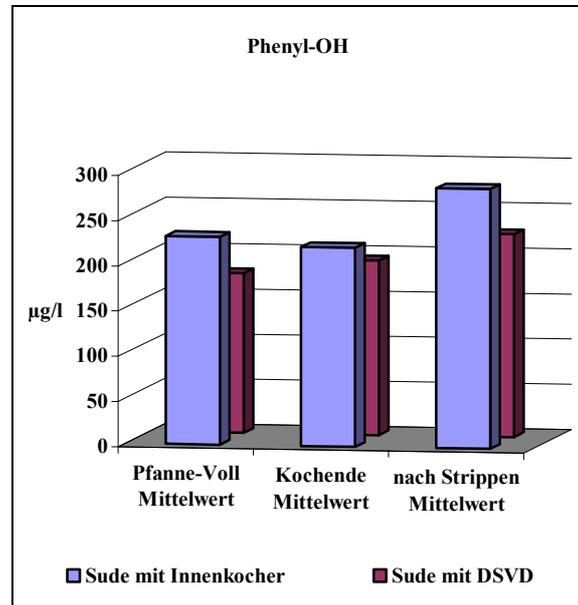


Abbildung 185: Phenyl-OH

1-Octanol (Abbildung 183) konnte zwar bei der konventionellen Kochung zu Kühlmitte nicht analysiert werden, es kann aber davon ausgegangen werden, dass von Kochende an keine nennenswerte Veränderung mehr stattfindet. Mit dem DSVD-System zeigt dieser Stoff einen Anstieg bei der Kochung und eine leichte Abnahme durch das Strippen.

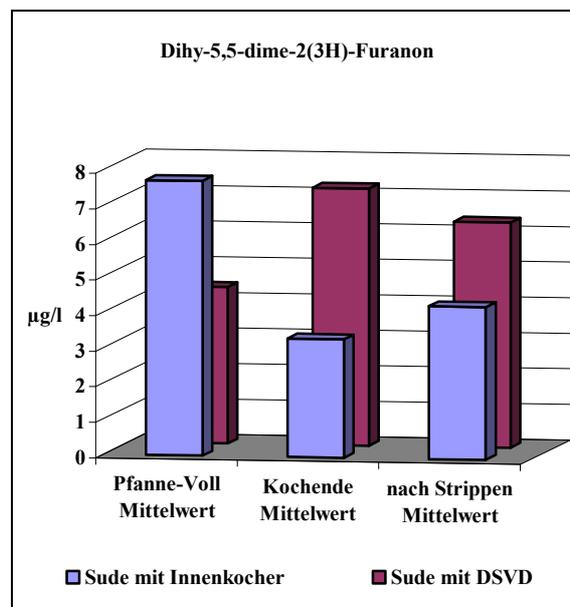


Abbildung 186: Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon

1-Octen-3-ol (Abbildung 184) verhält sich mit dem DSVD-System identisch, erfährt aber bei der konventionellen Kochung einen Anstieg. Allerdings ist auch hier wieder bei Kühlmittel mit der konventionellen Kochung keine Auswertung möglich.

6.7.2.10 Phenyl-OH und Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon

Phenyl-OH (Abbildung 185) verändert sich mit dem DSVD-System im Prozessverlauf nicht wesentlich. Bei der normalen Kochung nimmt es bis Kochende leicht ab, steigt jedoch danach auf einen höheren Wert als bei den DSVD-Suden an.

Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon (Abbildung 186) nimmt beim Innenkocher bis Kochende ab und steigt dann leicht wieder an. Beim DSVD-System steigt es bis Kochende etwas an, wird dann beim Strippen zwar vermindert, bleibt aber auf höherem Niveau als bei den Innenkocher-Suden.

6.7.3 Fazit der Auswertung der Würze aromastoffe

Zusammenfassend kann bei der Auswertung der Würze aromastoffe gesagt werden, dass kein einheitliches Ergebnis erzielt wurde. Einige der hochsiedenden Komponenten zeigen bei den Innenkocher-Suden Vorteile, es gibt aber auch andere Stoffe, die wiederum mit dem DSVD-System etwas besser abschneiden. Eine klare Aussage lässt sich eigentlich nur bezüglich der Hitzeindikatoren wie 2-Furfural treffen. Hier hat das DSVD-System klare Vorteile. Bei den meisten Ausdampfendikatoren liegt zwar die konventionelle Kochung bei Kochende besser, nach dem Strippen, welches ja unbedingt zur Auswertung mit herangezogen werden muss, erreicht das DSVD-System jedoch absolut vergleichbare Werte.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Ende 1998 wurde ein Kochsystem präsentiert, das nach dem Prinzip der Dünnschicht-Verdampfung arbeitet. Das System besteht aus einem Sammelgefäß, das als Whirlpool ausgeführt ist, und dem eigentlichen Kochgefäß, einem Dünnschicht-Verdampfer. Der Dünnschicht-Verdampfer übernimmt quasi die Funktion eines Außenkochers, wobei die Heizfläche kegelförmig ausgebildet ist. Die Würze wird im Whirlpool gesammelt und dann im Kreislauf über die Heizfläche gepumpt. Dabei wird sie zunächst auf Kochtemperatur erwärmt und dann für die Kochzeit zirkuliert. Im Anschluss an die Kochzeit folgt die Whirlpoolrast zur Heißtrubabscheidung, bevor die Würze auf Anstelltemperatur abgekühlt wird. Auf dem Weg zum Plattenkühler wird die Würze beim DSVD-System nochmals über die Heizfläche gepumpt, sie kocht am Ende der Lauflänge kurz auf, und eine Ausdampfung der während der Heißhaltung gebildeten unerwünschten Aromastoffe findet statt. Dieser Schritt wird Stripping genannt.

Bevor jedoch das DSVD-System in die Praxis umgesetzt wurde, wurde eine Pilotanlage für 250 l gebaut, um die Eignung dieser neuartigen Art der Würzekochung zu testen. Im Parallelbetrieb wurden in einer süddeutschen Brauerei mit einer Maischwürzepfanne mit Innenkocher die Würzen beider Kochungen miteinander verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass die Dünnschicht-Verdampfung hinsichtlich der Würzequalität technologische Vorteile hatte. Der noch koagulierbare Stickstoff, dem positive Eigenschaften für die Schaumhaltbarkeit des Bieres zugesprochen werden, wurde nicht so weitreichend reduziert, wie das mit dem Innenkocher der Fall war. Dabei besonders interessant und wichtig für die Wirtschaftlichkeit der Würzekochung war allerdings die niedrige erforderliche Gesamtverdampfung von nur etwa 4–5 %. Bis zu diesem Zeitpunkt waren etwa 6–6,5 % Stand der Technik.

Auf Basis der in der Pilotanlage gewonnenen Erkenntnisse wurde die erste industrielle Anlage für 110 hl Ausschlagwürze gebaut. Auch hier wurden Vergleiche mit dem bestehenden System durchgeführt. In diesem Maßstab zeigte sich endgültig, dass das DSVD-System bei nur 4–4,5 % Gesamtverdampfung hervorragende Würze- und Bierqualitäten produzierte.

Parallel wurden mit der Pilotanlage weitere Versuche unternommen. Weil International High Gravity Brewing Stand der Technik ist, wurden auch dazu Versuche durchgeführt. Dabei wurden neben der konventionellen Analytik vor allem die Auswirkungen auf die Würzearomastoffe untersucht, da sich hier sehr gut Ausdampfung und auch thermische Belastung verfolgen lassen. Bei diesen Versuchen hat sich bestätigt, dass bei einer deutlich reduzierten Gesamtverdampfung Verbesserungen der Würzequalität erreicht wurden.

Ende 1999 wurde die zweite Anlage für 160 hl heiße Ausschlagwürze in Betrieb genommen. Hier wurde wieder das DSVD-System zunächst mit dem alten Kochsystem der

Brauerei, einer kupfernen Hochleistungspfanne, verglichen. Auch in diesem Fall konnte die Verdampfung auf etwas über 4 % reduziert werden, ohne die Bierqualität negativ zu beeinflussen. Es wurden hier Versuche zur Hopfung und zur Variation der Kochparameter, Zeit und Heizfläche, durchgeführt. Dabei hat sich herausgestellt, dass eine nachträgliche Hopfung der Biere vor der Würzekühlung die Hopfennote eher verschlechtert. Auch eine Verlängerung der Kochzeit zeigte keine Verbesserung bei den Würzequalitäten. Ein weiterer Schwerpunkt bei dieser Anlage war die Ermittlung einer minimal notwendigen Gesamtverdampfung. Dazu wurden mit dem DSVD-System zwei Sudreihen mit je drei Suden hergestellt und bis zum fertigen Bier verfolgt. Zur Herausarbeitung der Unterschiede wurden neben der konventionellen Analytik auch die Würzearomastoffe untersucht. Die Biere wurden einer Verkostung nach dem DLG-Schema unterzogen. Hinsichtlich der Analytik konnten keinerlei Unterschiede ausgemacht werden. Bei der Verkostung schnitt das Bier mit nur 2,65 % Gesamtverdampfung tendenziell besser ab als das mit fast 5 %.

Als nächstes wurde das DSVD-System in ein modernes Sudhaus aus dem Jahre 1992, parallel zu einer Whirlpoolpfanne mit Innenkocher, eingebaut. Das DSVD-System konnte so mit diesem neueren System verglichen werden. Dabei bestätigte sich, was sich schon bei den vorangegangenen Versuchen abgezeichnet hatte: Mit der Dünnschicht-Verdampfung können Würzen mit etwa 4 % Gesamtverdampfung hergestellt werden, ohne qualitative Nachteile in Kauf nehmen zu müssen. Erstaunlicherweise waren hier nun positive Auswirkungen auf Gärung und Filtration zu beobachten.

Um die Untersuchungen abzurunden, wurden mit diesem System ebenfalls die Würzearomastoffe untersucht. Auch hier zeigte sich, dass die Würze eine deutlich verminderte thermische Belastung, bedingt durch die kürzere Heißhaltung, aufwies. Hinsichtlich der Ausdampfung von Aromastoffen konnten keine gravierenden Unterschiede zwischen beiden Systemen ausgemacht werden.

Im Laufe der Versuche hat sich gezeigt, dass mit dem DSVD-System Biere mit nur 3–4,5 % Gesamtverdampfung hergestellt werden können, die von den Würze- und Bierqualitäten voll und ganz überzeugen. Besonders der Bierschaum konnte in allen Brauereien verbessert werden, ohne Abstriche bei der chemisch-physikalischen Stabilität hinnehmen zu müssen.

7.2 Ausblick

Mittlerweile wurden fast 40 DSVD-Anlagen in Betrieb genommen, mit den größten werden momentan 800 hl/Sud produziert. Je größer die Anlage ist, desto besser ist sie zu steuern und desto weniger Gesamtverdampfung ist notwendig. Kritiker hatten bei der Vorstellung des Systems gemutmaßt, dass eine Obergrenze für diese Form der Würzekochung schnell erreicht sei. Man vermutete, dass der Würzefilm auf der Heizfläche aufreißen könnte und trockene Stellen entstehen könnten. Nichts davon ist eingetreten, im Gegenteil.

Interessant ist auch, dass das DSVD-System den Weg frei gemacht hat für eine ganze Reihe von Kochsystemen, die nun auf dem Markt sind und allesamt nicht mehr als 5 % Gesamtverdampfung benötigen. Diese Entwicklung wäre zuvor undenkbar gewesen.

Trotz aller Versuche, die bisher durchgeführt wurden, bleiben doch viele Fragen offen:

- Welche Eiweiße sind verantwortlich für die bessere Schaumhaltbarkeit?
- Wieso wirkt sich ein hoher noch koagulierbarer Stickstoff nicht negativ auf die chemisch-physikalische Stabilität aus?
- Welche Ursachen haben die verbesserte Gärung und Filtration?
- Wie werden Aromastoffe ausgedampft, wenn es zwischen 8 % und 4 % Gesamtverdampfung nur geringfügige Unterschiede gibt?
- Wieso ist die Bitterstoffausbeute trotz kurzer Kochzeit etwas besser als bei den konventionellen Systemen?
- Wieso hat das Strippen keine gravierenden Auswirkungen auf die Hopfennote?
- Wieso funktioniert die Kochung mit dem DSVD-System auch auf 1600 m Höhe atmosphärisch?
- Wieso zeigt sich in einigen Brauereien eine deutlich verbesserte Geschmacksstabilität?

Man sieht, es gibt ein weites Gebiet, das bislang nicht betrachtet wurde und Stoff für weitere Arbeiten bietet.

8 Summary and Prospects

8.1 Summary

At the end of 1998 a novel boiling system which works on the principle of thin layer evaporation was presented. The system consists of a collecting tank executed as whirlpool and the actual boiling vessel, a thin layer evaporator. This thin layer evaporator quasi adopts the function of an external boiler with a cone-shaped heating surface. The wort is collected in the whirlpool and then pumped over the heating surface in circular flow. In this process, it is heated to boiling temperature first and then circulated for the time of boiling. Following the boiling time is the whirlpool rest for hot trub removal before the wort is cooled to pitching temperature. With the thin layer evaporator, the wort is pumped once again over the heating surface on its way to the plate cooler. At the end of the step it is boiled up briefly and the unwanted flavouring substances formed when keeping it hot are evaporated. This step is called stripping.

But before the thin layer evaporator was realised a pilot plant for 250 l was built to test the aptitude of this novel method of wort boiling. In a Southern German brewery with a mash and wort kettle with internal boiler the worts of both boils were compared. This showed that the thin layer evaporation has technological advantages in terms of wort quality. The coagulable nitrogen which is believed to positively influence the foam stability was not reduced as significantly as in the internal boiler. Especially interesting and important for the economic efficiency of wort boiling was, however, the low total evaporation of only 4–5 % this method required. By the time, 6–6.5 % were state-of-the-art.

Based on the findings gained with the pilot plant the first industrial plant for 110 hl cast wort was built. Here too, comparisons with the existing system were made. This scale definitely showed that the thin layer evaporator produces excellent wort and beer qualities at a total evaporation of only 4–4.5 %.

At the same time, additional tests were made with the pilot plant. As high gravity brewing is the international state-of-the-art, tests were also made in this respect, analysing in addition to the conventional chemical analysis the effects on the flavouring substances of the wort as the evaporation and the thermal load can be well observed here. These tests confirmed that, along with a considerable reduction of the total evaporation, improvements in wort quality were achieved.

At the end of 1999, the second plant for 160 hl hot cast wort was put into operation after comparing the thin layer evaporator again with the old boiling system of the brewery, a high-performance copper kettle. In this case too, the evaporation was reduced to slightly over 4 % without effecting the beer quality in a negative way. Tests were made with respect to hops dosing and variations in the boiling parameters time and heating surface which showed that any subsequent hops addition to the beers prior to cooling the wort rather spoils the hop note. Extending the boiling time entailed no improvement of the wort

qualities either. Another focal point of this plant was to determine the required minimum total evaporation. For that purpose, two brewing sequences with three brews each were carried out and tracked to the finished beer. To work out the differences, the flavouring substances of the wort were analysed in addition to the conventional chemical analysis. The beers were tasted according to the DLG scheme. The chemical analysis did not show any differences. In the tasting test, the beer with a total evaporation of only 2.65 % performed better than the one with nearly 5 %.

The System was next installed in parallel to a whirlpool kettle with internal boiler in a modern brewhouse built in 1992. This allowed to compare the thin layer evaporation to this newer system confirming what became apparent in the previous tests already. With thin layer evaporation, worts can be produced with a total evaporation of about 4 % without having to take a loss in quality. Surprisingly, positive effects on fermentation and filtration became evident now.

To round off the tests with this system, the flavouring substances of the wort were analysed as well. They showed that the wort had undergone much less thermal load due to the shorter hot keeping time. As to the evaporation, no significant differences could be established between the two systems.

The course of the test showed that beers can be produced with thin layer evaporation with just 3–4.5% total evaporation which are outright convincing in terms of wort and beer qualities. Especially the beer foam could be improved in all breweries without having to cut back on the chemo-physical stability.

8.2 Prospects

In the meantime, nearly 40 plants have been put into operation, the largest ones producing 800 hl/brew at present. The larger the plant the better to control and the less total evaporation is required. When presenting the system, critics presumed that the upper limit for this type of wort boiling would be reached fast supposing that the wort film on the heating surface would lacerate and dry areas could develop. All this did not happen. Quite the contrary.

Also interesting is that the thin layer evaporation system has prepared the ground for a whole range of boiling systems now on the market, all of them needing less than 5 % total evaporation. This development would have been unthinkable without this system.

Despite all tests carried out so far many question remain open:

- Which proteins are responsible for the improved foam stability?
- Why doesn't a high content of still coagulable nitrogen effect the chemo-physical stability negatively?
- What are the causes of the improved fermentation and filtration?
- How are flavours evaporated if there is only little difference between a total evaporation of 8 % and one of 4 %?
- Why is the yield of bitter substances slightly better than in conventional systems in spite of the short boiling time?
- Why doesn't stripping effect the hop note seriously?
- Why does boiling with the DSVD system work atmospherically even on an altitude of 1600 m?
- Why is the stability in taste clearly improved in some breweries?

It is obvious that there is a vast field which has not yet been scrutinized holding material for further work.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Belitz, H.-D., Grosch, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie, 4. Auflage, S. 54 ff. 1992.
- [2] Belitz, H.-D., Grosch, W.: Lehrbuch der Lebensmittelchemie, 4. Auflage, S. 186 ff. 1992.
- [3] Back, W. et al.: Neue Forschungsergebnisse zur Verbesserung der Geschmacksstabilität. In: Brauwelt Nr. 38, S. 1677 ff., 1997.
- [4] Birkenstock, B., Thalacker, R.: Eine neue Kennzahl in der brautechnischen Analyse – Die Thiobarbitursäurezahl (TBZ). In: Brauwissenschaft 35, Nr. 6, S. 133 ff., 1982.
- [5] Breywisch, D.: Die Würzekochung und der koagulierbare Stickstoff. In: Brauwelt Nr. 15, S. 541 ff., 1997.
- [6] Buckee, G. K., Barret, J.: Effect of Wortevaporation on Flavour and other Beer-qualities. In: Journal of Institute of Brewing 88, Nr. 5, S. 329 ff., 1982.
- [7] Dehne, G.: Bier und Hopfen im Bild: Eine Dokumentation der Stadtgeschichtlichen Museen Nürnberg, S. 96 ff., 1986.
- [8] Delgado, A., Nirschl, H., Denk, V.: Der Innenkocher – ein heißes Thema. In: Brauwelt Nr.7/8, S. 233 ff., 1997.
- [9] Denk, V.: Remarks on the Fluid Mechanics of the Wort Kettle with External Heater. In: EBC Monograph XVII – Symposium on Wortboiling and Clarification, S. 191 ff., 1991.
- [10] Dickel, T.: Untersuchung zum Einfluss des Kühltrubeintrages auf die Bierqualität. In: Brauwelt Nr. 33/34, S. 1130 ff., 2000.
- [11] Dietschmann, J.-E.: Entwicklung einer Methode mit Serieneignung zur brautechnologischen Differenzierung von Gerstensorten in frühem Züchtungsstadium, Dissertation, TU München, 1989.
- [12] Dörfel, K.: Statistik in der analytischen Chemie, 4. Aufl., 1987.
- [13] Dupire, S., Bonte, S., Eyben, D.: Influence of Oxygen during Wortboiling and Clarification. In: EBC Monograph XVIII – Symposium on Wortboiling and Clarification, S. 45 ff., 1991.

-
- [14] Epstein, N.: Fouling in Heat Exchangers. In: Heat Exchanger Theory and Practice, Hrsg. J. Taborek and G. Hewitt, 1983.
- [15] Eichhorn, P.: Untersuchungen zur Geschmacksstabilität von Bieren. Dissertation, TU München, 1991.
- [16] Fasbender, F.: Die mechanische Technologie der Bierbrauerei und Malzfabrikation, III. Band, 1885.
- [17] Felgentraeger, W.: Numerische Modellierung des Ab- bzw. Aufbaues der wichtigsten Leitsubstanzen des Bieres während der Produktion, Dissertation, TU München, 1993.
- [18] Felgentraeger, W.: Energiekosteneinsparung in Brauereien. In: Brauwelt Nr. 1/2, S. 23 ff., 2000.
- [19] Fohr, M.: Weiterentwicklung der thermischen Brüdenverdichtung, Fortschritt-Berichte VDI, 1998.
- [20] Fohr, M., Meyer-Pittroff, R.: Würzekochung mit thermischer Brüdenverdichtung. In: Brauwelt Nr. 1/2, S. 27 ff., 1996.
- [21] Graf, H.: Carbonyle und die Alterung des Bieres. Dissertation, TU München, 1984.
- [22] Glas, K.: Chromatogramme, Staatliche Brautechnische Prüf und Versuchsanstalt Weihenstephan, 2004.
- [23] Hackensellner, T.: Dynamische Niederdruckkochung – Optimierte Energie und Verfahrenstechnik. In: Brauwelt Nr. 1/2, S. 17 ff., 2001.
- [24] Hackensellner, T.: Energie- und strömungstechnische Betrachtungen zur Aufheizung und Kochung von Bierwürze. In: Brauwelt Nr. 46/47, S. 2282 ff., 1998.
- [25] Heyse, K. U.: Handbuch der Brauereipraxis, 3. Aufl., 1995.
- [26] Huppmann Firmenbroschüre – Alles, was gute Brauer brauchen.
- [27] Judd, R. L., Hwang, K. S.: A Comprehensive Model for Nucleate Pool Boiling Heat Transfer Including Microlayer Evaporation. In: Journal of Heat Transfer, S. 623 ff., 1976.
- [28] Kern, D. Q., Suitor, J. W.: A Theoretical Analysis of Thermal Surface Fouling. In: Brit. Chem. Eng., Vol. 4, No. 5, S. 2258 ff., 1959.

- [29] Kleber, W., Franke, G., Randel, H.: Besondere Probleme bei der Bestimmung des koagulierbaren Stickstoffes in Würze. In: Brauwelt Nr. 94, S. 1789 ff., 1965.
- [30] Krottenthaler, M. et al.: Aromastoffausdampfung beim Würzekochen, Vortrag zum 35. Technologischen Seminar – Weihenstephan, 2002.
- [31] Krüger, E., Anger, H.-M.: Kennzahlen zur Betriebskontrolle und Qualitätsbeschreibung in der Brauwirtschaft: Daten über Roh- und Hilfsstoffe, Halbfertig- und Fertigprodukte bei der Bierbereitung, 1990.
- [32] Kunze, W.: Technologie Brauer und Mälzer, 8. Auflage, 1998.
- [33] Leberle, H., Schuster, K.: Die Technologie des Sudhauses, 1956.
- [34] Lambeck, R.: Brüdenverdichtung bei der Würzekochung. In: Brauwelt Nr. 9, S. 423 ff., 1996.
- [35] Lenz, B.: Energiekosteneinsparung in Brauereien. In: Brauwelt Nr. 1/2, S. 24 ff., 2000.
- [36] Lustig, S.: Das Verhalten flüchtiger Aromastoffe bei der Lagerung von Flaschenbier und deren technologische Beeinflussung im Brauprozess, Dissertation, TU München, 1994.
- [37] Lustig, S., Kunst, T., Hill, P.: Einfluss der Vakuumverdampfung vor der Würzekühlung auf die Bierqualität und Geschmacksstabilität, EBC-Proceedings of the 26th Congress – Maastricht, 1997.
- [38] Mailgaard, M. C.: In: Drawert, F.: Geruch- und Geschmacksstoffe, int. Symposium – Bad Pyrmont, 1975.
- [39] Manger, H.-J.: Wasser-, Wärme und Kältebedarf in den Prozessstufen Maischen, Aufheizen der Würze, Kochen der Würze und Würzekühlung. In: Brauwelt Nr. 42, S. 1929 ff., 1997.
- [40] Mayer, A.: Richtzahlen für Brauerei und Mälzerei – Stand 1994. In: Brauwelt Brevier, S. 384, 1996.
- [41] MEBAK Mindestangaben für Sudhausanlagen – DIN 8777, 1996.
- [42] Michel, R.: Würzekochsysteme mit Varianten der Energierückgewinnung. In: Brauwelt Nr. 27, S. 1170 ff., 1991.

-
- [43] Miedaner, H.: 125 Jahre Steinecker-Sudhaustechnologie. In: Steinecker 1875 – 2000, 2000.
- [44] Miedaner, H.: Centenary Review: Wortboiling Today – Old and New Aspects. In: Journal Institute of Brewing 92, Nr. 4, 330 ff., 1986.
- [45] Mitter, W., Kessler, H., Biendl, M.: Beobachtung einer Verwandlung. In: Brauindustrie, S. 142 ff., 2000.
- [46] Müller-Steinhagen, H. (Hrsg.): Heat Exchanger Fouling – Mitigation and Cleaning Technologies, S. 1 ff., 2000.
- [47] Müller-Steinhagen, H.: Methoden zur Verminderung der Ablagerungsbildung in Wärmeübertragern, In: Wärmeaustauscher – Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen, S. 250 ff., 1994.
- [48] Müller-Steinhagen, H.: Verschmutzung von Wärmeübertragerflächen, In: VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 6. Aufl., 1991.
- [49] Narziss, L., Miedaner, H., Schneider, F. P.: Weiterführende Untersuchungen zur Technologie der Würzekochung unter besonderer Berücksichtigung energiesparender Maßnahmen. Teil 3, Hochtemperaturwürzekochungen im semitechnischen und großindustriellen Maßstab. In: Monatsschrift für Brauwissenschaft 44, Nr. 9, S. 296 ff., 1991.
- [50] Narziss, L., Miedaner, H., Schöndorfer, H.: Gaschromatische Bestimmung von Bieraromastoffen. In: Monatsschrift für Brauwissenschaft 35, Nr. 5, S. 109 ff., 1982.
- [51] Narziss, L.: Die Technologie der Würzebereitung, 7. Auflage, 1992.
- [52] Narziss, L.: Abriss der Bierbrauerei, 6. Aufl., 1995.
- [53] Nusselt, W.: Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes. In: VDI-Zeitschrift 60, S. 541 ff. u. 569 ff., 1916.
- [54] o. V.: Spezifischer Energieverbrauch in der Brauerei und Mälzerei. In: Brauwelt Brevier 1985, S. 268.
- [55] o. V.: Standards of the Tubular Exchangers Manufacturers Association, 6th ed., Tubular Exchangers Manufacturers Association, 1978.
- [56] o. V.: Würzekochung – Hopfengabe. In: Der Doemensianer, S. 93 ff.

- [57] o. V: Entwicklung des Ölpreises im süddeutschen Raum im Zeitraum von Jan. 1999 bis Jan. 2002, www.esyoil.com, 2002.
- [58] O'Rourke, T.: Wort boiling part 1. In: Brewer's Guardian, S. 34 ff., 1999.
- [59] Palen, J. W., Westwater, J. W.: Heat Transfer and Fouling Rates During Pool Boiling of Calcium Sulfate Solutions. In: Chem. Eng. Progr. Symp. Series, Vol. 62, No. 64, S. 77, 1966.
- [60] Pensel, S.: Bis 80% Primärenergie-Einsparung durch Brüdenverdichtung beim Würzekochen. In: Brauwelt 119, Nr. 27, S.968 ff., 1979.
- [61] Pensel, S.: Würzekochsysteme und Warmwasserversorgung des Brauereibetriebes. In: Brauwelt Nr. 37, S. 1843 ff. und S. 1848 ff., 1985.
- [62] Pfenninger, H. (Hrsg): Brautechnische Analysenmethoden, Band I, 3. Aufl., 1997.
- [63] Pfenninger, H. (Hrsg): Brautechnische Analysenmethoden, Band II, 3. Aufl., 1993.
- [64] Pfenninger, H. (Hrsg): Brautechnische Analysenmethoden, Band III, 3. Aufl., 1996.
- [65] Piendl, A.: Physiologische Bedeutung der Eigenschaften des Bieres, 1999.
- [66] Piendl, A: Studien zum Thema Polyphenole und Hopfenbitterstoffe. In: Brauwelt Nr. 6/7, S. 216, 2001.
- [67] Precht, M.: Angewandte Statistik 1, 6. Aufl., 1995.
- [68] Sachs, L.: Angewandte Statistik, 8. Aufl., 1997.
- [69] Samp, E. J., Foster II, R. T.: A Study of Wort Pressure Boiling Using a Mixture Design Method to Optimize Dimethyl Sulfide and 2-Furfural Wort Levels. In: MBAA Technical Quaterly, Vol. 39, S. 203 ff., 2002.
- [70] Schneider, F. P.: Weiterführende Untersuchungen zur Technologie der Würzekochung unter besonderer Berücksichtigung energiesparender Maßnahmen. Dissertation, TU München, 1989.
- [71] Schnell, H.: Wärmetauscher: Überblick und Anwendung. In: Wärmeaustauscher – Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen, S. 2 ff., 1994.
- [72] Schnell, H., Thier, B.: Wärmeaustauscher – Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen, 1994.

-
- [73] Schropp, H. P.: Energieeinsparende Maßnahmen beim Würzekochen. In: EBC-Proceedings of the 18th Congress – Kopenhagen, S. 669 ff. 1981.
- [74] Schuh, G. F., Stolz, F., Jordan, U.: Betriebsvergleich Energie 1997. In: Brauwelt Nr. 26, S. 1182 ff., 1999.
- [75] Schuh, G.: 6. energietechnisches Seminar – Thema: Würzekochung, Ingenieurbüro Georg Schuh – Hallbergmoos, 2002.
- [76] Schwill, A.: Untersuchungen zur Hochtemperaturwürzekochung unter Berücksichtigung der flüchtigen Würzeinhaltsstoffe. Dissertation, TU München, 1983.
- [77] Schwill-Miedaner, A.: Würzekochung heute – wie heiß muss das Thema diskutiert werden?, Vortrag zum 35. Technologischen Seminar – Weihenstephan, 2002.
- [78] Schwill-Miedaner, A., Sommer, K.: Probennahme im Sudhaus. In: Brauwelt Nr. 34/35, S. 1607 ff., 1996.
- [79] Seinsche, H.: Kompaktes Wärmeübertragungssystem aus Edelstahl. In: Wärmeaustauscher – Energieeinsparung durch Optimierung von Wärmeprozessen, S. 200 ff., 1994.
- [80] Seldeslachts, D., Van den Eynde, E., Degelin, L.: Wortstripping, EBC-Proceedings of the 26th Congress – Maastricht, S. 323, 1997.
- [81] Sommer, G., Schilfarth, H.: Abkürzung des Würzekochens durch Anwendung hoher Temperaturen. EBC-Proceedings of the 15th Congress – Nizza, S. 233 ff., 1975.
- [82] Stippler, K., Wasmuht, K., Gattermeyer, P.: Generationswechsel beim Innenkocher, Teil I + II, In: Brauwelt Nr. 31/32, S. 1265 ff. und Nr. 35/36, S. 1386 ff., 1997.
- [83] Stolz, F.: Persönliche Auskunft. IGS – Hallbergmoos, 2001.
- [84] Thomas, D. und Grigull, U.: Experimentelle Untersuchung über die Ablagerung von suspendiertem Magnetit bei Rohrströmungen in Dampferzeugern. In: Brennstoff – Wärme – Kraft, Vol. 26, No. 3, S. 103 ff., 1974.
- [85] Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): In: VDI-Wärmeatlas – Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, 6. Aufl., 1991.
- [86] Wagner, P.: Langfristiger Trend der Schaumzahlen bei der Brauerei Bofferding, Vortrag zur VLB Frühjahrstagung, 2002.

- [87] Wagner, W.: Wärmeübertragung: Grundlagen, 5. Aufl., 1998.
- [88] Wasmund, R.: Überarbeitete und erweiterte Reihen der mechanischen und thermischen Stoffwerte von Würze und Bier im Temperaturbereich zwischen 0 und 75 °C, Monatsschrift für Brauerei 29, Nr. 7, S. 294 ff., 1976.
- [89] Wasmuht, K., Gattermeyer, P.: Details eines neuen phasenoptimierten Kochsystems. In: Brauwelt Nr. 12, S. 472 ff., 1998.
- [90] Weisser, H.: Statistik. In: Praktikumsvorschriften Verpackungstechnisches Praktikum, S. 7 ff., 1999.
- [91] Wolfseder, A.: Würzekochsystem mit thermischer Brüdenverdichtung. In: Brauwelt Nr. 19, S. 869, 1998.
- [92] Zürcher, C., Gruß, R., Kleber, K.: Technologische Maßnahmen zur Reduzierung des Dimethylsulfidgehaltes im Bier. In: EBC-Proceedings of the 17th Congress – Berlin, 175 ff., 1979.
- [93] Eigenes Photo.

10 Anhang

10.1 Vorversuche mit der Pilotanlage

10.1.1 Analysen der Vergleichskochung

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Befüllen + Heizen in bar	4,5	4,5	4,5			
Dampfdruck Kochen in bar	0,6	4,5	4,5			
Dauer Kochen in min	80	80	80			
Kochpause in min	20	20	20			
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	10,59	10,58	10,82	10,66	0,14	0,34
Ausschlagwürze	11,87	11,65	11,75	11,76	0,11	0,27
Kühlmitte	11,86	11,65	11,75	11,75	0,11	0,26
Extraktzunahme in °P	1,27	1,07	0,93	1,09	0,17	0,42
Gesamtverdampfung	11,99	10,11	8,60	10,23	1,70	4,23
Verdampfung beim Kochen	12,09	10,11	8,60	10,27	1,75	4,35
Verdampfung beim Strippen	-0,08	0,00	0,00	-0,03	0,05	0,12
Extrakt % GV						
Pfanne-Voll	11,02	11,01	11,28	11,10	0,15	0,38
Ausschlagwürze	12,30	12,17	12,28	12,25	0,07	0,17
Kühlmitte	12,29	12,13	12,28	12,23	0,09	0,22
gesamtlösl. N (Originalwert) in mg/100 ml						
Pfanne-Voll	93,1	95,2	97,3	95,2	2,1	5,22
Ausschlagwürze	95,2	93,8	98,0	95,7	2,1	5,31
Kühlmitte	95,6	93,8	92,4	93,9	1,6	3,99
Abnahme absolut	-2,5	1,4	4,9	1,3	3,7	9,20
Abnahme in %	-2,7	1,5	5,0	1,3	3,9	9,60
gesamtlösl. N (bezogen auf 12 °P) in mg/100ml						
Pfanne-Voll	106,1	108,6	108,3	107,7	1,4	3,40
Ausschlagwürze	97,2	96,8	100,2	98,1	1,9	4,65
Kühlmitte	97,7	97,1	94,5	96,4	1,7	4,23
Abnahme absolut	8,4	11,5	13,8	11,2	2,7	6,76
Abnahme in %	7,9	10,6	12,8	10,4	2,4	6,02
noch koag. N (Originalwert) in mg/l						
Pfanne-Voll	59,0	56,0	63,0	59,3	3,5	8,72
Ausschlagwürze	22,0	23,0	18,0	21,0	2,6	6,57
Kühlmitte	22,0	22,0	25,0	23,0	1,7	4,30
Abnahme absolut	37,0	34,0	38,0	36,3	2,1	5,17
Abnahme in %	62,7	60,7	60,3	61,2	1,3	3,19

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	67,2	63,9	70,1	67,1	3,1	7,79
Ausschlagwürze	22,5	23,7	18,4	21,5	2,8	6,91
Kühlmitte	22,5	22,8	25,6	23,6	1,7	4,23
Abnahme absolut	44,8	41,1	44,6	43,5	2,1	5,12
Abnahme in %	66,6	64,3	63,5	64,8	1,6	3,88
MgSO₄-fällb. N (Originalwert) in mg/l						
Pfanne-Voll	19,6	26,6	24,9	23,7	3,7	9,07
Ausschlagwürze	17,9	22,4	22,4	20,9	2,6	6,45
Kühlmitte	17,5	23,8	23,1	21,5	3,5	8,58
Abnahme absolut	2,1	2,8	1,8	2,2	0,5	1,27
Abnahme in %	10,7	10,5	7,2	9,5	2,0	4,87
MgSO₄-fällb. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	22,3	30,3	27,7	26,8	4,1	10,14
Ausschlagwürze	18,3	23,1	22,9	21,4	2,7	6,80
Kühlmitte	17,9	24,6	23,6	22,1	3,6	9,05
Abnahme absolut	4,5	5,7	4,1	4,8	0,8	2,09
Abnahme in %	19,9	18,8	14,8	17,8	2,7	6,72
Verhältnis des MgSO ₄ -fällb. N am ges. N	16,9	22,7	21,8	20,5	3,1	7,82
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	19,8	20,9	19,7	20,1	0,7	1,65
Ausschlagwürze	39,4	37,0	38,6	38,3	1,2	3,04
Kühlmitte	41,9	42,2	43,1	42,4	0,6	1,55
Zunahme	22,1	21,3	23,4	22,27	1,06	2,63
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	22,6	23,8	21,9	22,8	1,0	2,41
Ausschlagwürze	40,2	38,2	39,5	39,3	1,0	2,57
Kühlmitte	42,8	43,7	44,1	43,5	0,6	1,61
Zunahme	20,3	19,9	22,1	20,75	1,23	3,04
freies DMS (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	423	377	392	397	23	58,28
Ausschlagwürze	20	28	30	26	5	13,15
Kühlmitte	55	59	44	53	8	19,30
Abnahme absolut	368	318	348	345	25	62,52
Abnahme in %	87	84	89	87	2	5,53
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	482	430	436	450	28	70,50
Ausschlagwürze	20	29	31	27	5	13,62
Kühlmitte	56	61	45	54	8	20,49
Abnahme absolut	426	369	391	395	29	71,22
Abnahme in %	88	86	90	88	2	4,91

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
DMS-P (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	310	328	289	309	20	48,49
Ausschlagwürze	102	96	83	94	10	24,13
Kühlmitte	46	48	46	47	1	2,87
Abnahme absolut	264	280	243	262	19	46,10
Abnahme in %	85	85	84	85	1	1,71
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	353	374	322	350	26	65,52
Ausschlagwürze	104	99	85	96	10	24,80
Kühlmitte	47	50	47	48	2	3,83
Abnahme absolut	306	324	275	302	25	62,52
Abnahme in %	87	87	85	86	1	1,90

10.1.2 Analysen mit der Pilotanlage

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampftemp. Aufheizen in °C	125	125	125			
Dampftemp. Kochen in °C	115	115	115			
Dauer Kochen in min	35	35	35			
Dampftemp. Strippen in °C	110	110	110			
Dauer Strippen in min	15	15	15			
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	11,75	11,77	12,16	11,89	0,23	0,57
Ausschlagwürze	12,29	12,05	12,43	12,26	0,19	0,48
Kühlmitte	12,36	12,26	12,52	12,38	0,13	0,33
Extraktzunahme in °P	0,61	0,49	0,36	0,49	0,13	0,31
Gesamtverdampfung	5,19	4,16	2,96	4,11	1,12	2,77
Verdampfung beim Kochen	4,60	2,38	2,22	3,07	1,33	3,30
Verdampfung beim Strippen	0,57	1,74	0,72	1,01	0,64	1,58
gesamtlösl. N (Originalwert) in mg/100ml						
Pfanne-Voll	101,9	98,0	100,1	100,0	2,0	4,85
Ausschlagwürze	99,8	101,2	101,5	100,8	0,9	2,25
Kühlmitte	100,1	102,2	100,1	100,8	1,2	3,01
Abnahme absolut	1,8	-4,2	0,0	-0,8	3,1	7,65
Abnahme in %	1,8	-4,3	0,0	-0,8	3,1	7,73
gesamtlösl. N (bezogen auf 12 °P) in mg/100ml						
Pfanne-Voll	104,2	100,0	99,5	101,3	2,6	6,41
Ausschlagwürze	97,3	100,9	97,8	98,7	1,9	4,82
Kühlmitte	97,1	100,0	95,7	97,6	2,2	5,54
Abnahme absolut	7,1	-0,1	3,9	3,6	3,6	8,95
Abnahme in %	6,8	-0,1	3,9	3,6	3,5	8,61

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
noch koag. N (Originalwert)						
Pfanne-Voll	64,0	58,0	70,0	64,0	6,0	14,91
Ausschlagwürze	26,0	26,0	34,0	28,7	4,6	11,47
Kühlmitte	24	22	25	23,7	1,5	3,79
Abnahme absolut	40,0	36,0	45,0	40,3	4,5	11,20
Abnahme in %	62,5	62,1	64,3	63,0	1,2	2,92
noch koag. N (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	65,5	59,2	69,6	64,7	5,3	13,05
Ausschlagwürze	25,4	25,9	32,7	28,0	4,1	10,23
Kühlmitte	23,3	21,5	23,9	22,9	1,2	3,04
Abnahme absolut	42,2	37,6	45,7	41,8	4,0	10,06
Abnahme in %	64,4	63,6	65,7	64,6	1,0	2,58
MgSO₄-fällb. N (Originalwert)						
Pfanne-Voll	27,0	20,0	28,7	25,2	4,6	11,46
Ausschlagwürze	23,8	19,6	25,2	22,9	2,9	7,24
Kühlmitte	23,5	20	26,3	23,3	3,2	7,84
Abnahme absolut	3,5	0,0	2,4	2,0	1,8	4,45
Abnahme in %	13,0	0,0	8,4	7,1	6,6	16,33
MgSO₄-fällb. N (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	27,6	20,4	28,5	25,5	4,5	11,06
Ausschlagwürze	23,2	19,5	24,3	22,3	2,5	6,17
Kühlmitte	22,8	19,6	25,1	22,5	2,8	6,93
Abnahme absolut	4,8	0,8	3,4	3,0	2,0	5,03
Abnahme in %	17,5	4,1	11,9	11,1	6,7	16,74
Verhältnis des MgSO ₄ -fällb. N am ges. N	21,9	19,6	25,3	22,2	2,9	7,09
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	23,0	24,4	19,6	22,3	2,5	6,13
Ausschlagwürze	37,7	39,5	36,3	37,8	1,6	3,99
Kühlmitte	41,4	43,8	39,9	41,7	2,0	4,89
Zunahme	18,4	19,4	20,3	19,4	1,0	2,36
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	23,5	24,9	19,5	22,6	2,8	6,98
Ausschlagwürze	36,8	39,4	35,0	37,0	2,2	5,51
Kühlmitte	40,2	42,9	38,1	40,4	2,4	5,91
Zunahme	16,6	18,0	18,6	17,8	1,0	2,56
freies DMS (Originalwert)						
Pfanne-Voll	235	245	272	251	19	47,55
Ausschlagwürze	55	73,0	95	74	20	49,77
Kühlmitte	13	61	59	44	27	67,46
Abnahme absolut	222	184	213	206	20	49,33
Abnahme in %	94	75	78	83	10	25,79

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	240	250	270	254	15	38,24
Ausschlagwürze	54	73	92	73	19	47,04
Kühlmitte	13	60	56	43	26	65,32
Abnahme absolut	228	190	214	211	19	47,14
Abnahme in %	95	76	79	83	10	24,85
DMS-P (Originalwert)						
Pfanne-Voll	264	339	350	318	47	116,27
Ausschlagwürze	87	78,0	110	92	17	41,00
Kühlmitte	62	69	84	72	11	27,92
Abnahme absolut	202	270	266	246	38	94,80
Abnahme in %	77	80	76	77	2	4,90
DMS-P (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	270	346	348	321	44	110,41
Ausschlagwürze	85	78	106	90	15	36,44
Kühlmitte	60	68	80	69	10	25,33
Abnahme absolut	210	278	268	252	37	91,55
Abnahme in %	78	80	77	78	2	4,61

10.2 Versuche mit dem DSVD-System zum Brauen mit hoher Stammwürze

10.2.1 Sude mit konventioneller Kochung

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	14,87	15,07	14,89	14,94	0,11	0,27
Kochende	16,56	17,00	16,46	16,67	0,29	0,71
Kühlmitte	16,47	17,13	16,66	16,75	0,34	0,84
Zunahme °P	1,60	2,06	1,77	1,81	0,23	0,58
Gesamtverdampfung	10,76	13,67	11,89	12,11	1,47	3,64
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,30	5,30	5,38	5,33	0,05	0,11
Kochende	5,30	5,33	5,38	5,34	0,04	0,10
Kühlmitte	5,30	5,27	5,31	5,29	0,02	0,05
Farbe in EBC						
Pfanne-Voll	5,50	5,50	5,50	5,50	0,00	0,00
Kochende	8,00	7,00	8,00	7,67	0,58	1,43
Kühlmitte	8,50	8,00	8,50	8,33	0,29	0,72
Zunahme in EBC	3,00	2,50	3,00	2,83	0,29	0,72
FAN in mg/l						
Kühlmitte	181	164	156	167	13	31,72
Pfanne-Voll	63,0	73,0	70,0	68,7	5,1	12,7
Kochende	40,0	41,0	38,0	39,7	1,5	3,8
Kühlmitte	36,0	40,0	36,0	37,3	2,3	5,7
Abnahme in mg/l	27,0	33,0	34,0	31,3	3,8	9,4
Abnahme in %	42,9	45,2	48,6	45,5	2,9	7,1
noch koag. N (bez. auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	51,0	58,0	56,0	55,0	3,6	9,0
Kochende	29,0	29,0	28,0	28,7	0,6	1,4
Kühlmitte	26,0	28,0	26,0	26,7	1,2	2,9
Abnahme in mg/l	25,0	30,0	30,0	28,3	2,9	7,2
Abnahme in %	49,0	51,7	53,6	51,4	2,3	5,7
MgSO₄-fällb. N in mg/l						
Kühlmitte (Originalwert)	177	182	179	179	3	6,3
Kühlmitte (bez. auf 12 °P)	129	127	129	128	1	2,9
Anteil in % am gesamtlösl. Stickstoff	18	19	20	19	1	2,6
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	29,4	24,6	25,5	26,5	2,6	6,3
Kochende	64,7	59,4	56,0	60,0	4,4	10,9
Kühlmitte	68,9	63,5	64,5	65,6	2,9	7,1
Zunahme	39,5	38,9	39,0	39,1	0,3	0,8
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	23,7	19,6	20,6	21,3	2,2	5,4
Kochende	46,9	41,9	40,8	43,2	3,2	8,0
Kühlmitte	50,2	44,5	46,5	47,0	2,9	7,2
Zunahme	26,5	24,9	25,9	25,8	0,8	2,0

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS in µg/l (Originalwert)						
Pfanne-Voll	73	54	95	74	21	51
Kochende	10	10	10	10	0	0
Kühlmitte	10	16	20	15	5	13
Abnahme in µg/l	63	38	75	59	19	47
Abnahme in %	86	70	79	79	8	20
freies DMS in µg/l (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	59	43	77	59	17	42
Kochende	8	8	8	8	0	0
Kühlmitte	8	13	16	12	4	10
Abnahme in µg/l	51	30	60	47	15	38
Abnahme in %	86	70	79	79	8	20
DMS-P in µg/l (Originalwert)						
Pfanne-Voll	271	242	255	256	15	36
Kochende	37	29	34	33	4	10
Kühlmitte	21	14	12	16	5	12
Abnahme in µg/l	250	228	243	240	11	28
Abnahme in %	92	94	95	94	2	4
DMS-P in µg/l (bez. auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	219	193	206	206	13	32
Kochende	30	23	27	27	3	9
Kühlmitte	17	11	10	13	4	10
Abnahme in µg/l	202	182	196	193	10	26
Abnahme in %	92	94	95	94	2	4
gesamtlösl. N in mg/l						
Kühlmitte (Originalwert)	1002,0	964,0	907,0	957,7	47,8	118,8
Kühlmitte (bez. auf 12 °P)	730,0	675,0	653,0	686,0	39,7	98,5
Bittereinheiten in EBC-BU						
Kochende	24,2	28,0	27,3	26,5	2,0	5,0
Kühlmitte	23,9	29,1	28,1	27,0	2,8	6,9
Würzaromastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	185	200	189	191	7,8	19,3
2-me-Butanal	78	85	82	82	3,5	8,7
Methional	66	70	67	68	2,1	5,2
Benzaldehyd	4,9	5,6	5,3	5,3	0,4	0,9
2-Phenylethanal	200	274	236	237	37	91,9
Streckerlaldehyd	540	625	581	582	43	105,6
Pentanal	0	0	0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	2,7	3,2	3,1	3,0	0,3	0,7
Hexanal	90	67	79	79	12	28,6
Heptanal	4,7	5,6	5,2	5,2	0,5	1,1
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,4	0,6	0,5	0,5	0,1	0,2
2-Furfural	115	170	133	139	28	69,7
2-ac-Furan	3,4	4,2	4	3,9	0,4	1,0
γ-Nonalacton	12	16	13	14	2,1	5,2

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
3-me-Butanol	124	152	146	141	15	36,6
2-me-Butanol	34	35	38	36	2,1	5,2
1-Pentanol	36	44	39	40	4,0	10,0
1-Hexanol	54	68	63	62	7,1	17,6
1-Octanol	1,8	2,4	1,3	1,8	0,6	1,4
1-Octen-3-ol	5,8	8,7	6,5	7,0	1,5	3,8
Phenyl-OH	177	201	191	190	12	29,9
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	4,3	6,5	5,9	5,6	1,1	2,8
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	4,9	5,9	5,3	5,4	0,5	1,3
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0	3,6	3,2	2,3	2,0	4,9
Würzearomastoffe – Kochende						
3-me-Butanal	26	34	31	30	4,0	10,0
2-me-Butanal	11	15	7	11	4,0	9,9
Methional	31	46	34	37	7,9	19,7
Benzaldehyd	0,7	1,6	1,2	1,2	0,5	1,1
2-Phenylethanal	131	169	139	146	20	49,8
Streckeraldehyde	185	258	230	224	37	91,5
Pentanal	0	0	0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Hexanal	0,9	2	0,6	1	1	1,8
Heptanal	0,3	0,5	0,4	0,4	0,1	0,2
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,3	0,6	0,3	0,4	0,2	0,4
2-Furfural	229	290	265	261	31	76,2
2-ac-Furan	1,2	4,7	2,6	2,8	1,8	4,4
γ -Nonalacton	7,6	10	9,1	9	1,2	3,0
3-me-Butanol	2,9	7,2	4,1	5	2	5,5
2-me-Butanol	1,8	5,1	3,1	3	1,7	4,1
1-Pentanol	0	0	0	0	0,0	0,0
1-Hexanol	0	0	0	0	0,0	0,0
1-Octanol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
1-Octen-3-ol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Phenyl-OH	150	166	142	153	12	30,4
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Würzearomastoffe – Kühlmitte						
3-me-Butanal	55	72	61	63	8,6	21,4
2-me-Butanal	17	27	19	21	5,3	13,1
Methional	52	63	60	58	5,7	14,1
Benzaldehyd	0,6	2,6	1,3	1,5	1,0	2,5

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
2-Phenylethanal	199	230	210	213	16	39,0
Streckeraldehyde	337	375	355	356	19	47,2
Pentanal	0,5	0,7	0,6	0,6	0,1	0,2
2-Pentanon	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Hexanal	1,8	2,4	2	2	0	0,8
Heptanal	0,6	1	0,9	0,8	0,2	0,5
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,4	0,6	0,6	0,5	0,1	0,3
2-Furfural	320	385	360	355	33	81,5
2-ac-Furan	5,6	8,4	6,7	6,9	1,4	3,5
γ -Nonalacton	8,1	11	8,6	9	1,6	3,9
3-me-Butanol	3,6	5,2	3,9	4	1	2,1
2-me-Butanol	2,1	3,5	2,3	3	0,8	1,9
1-Pentanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-Hexanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-Octanol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1-Octen-3-ol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Phenyl-OH	144	167	159	157	12	29,0
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Terpineol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Linalool	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Nerol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	1,5	2	1,8	1,8	0,3	0,6

10.2.2 Versuche mit dem DSVD-System mit normaler Verdampfung

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	15,05	15,09	16,09	15,41	0,59	1,46
Kochende	15,11	15,55	16,84	15,83	0,90	2,23
Kühlmitte vor Strippen	15,43	15,57	16,93	15,98	0,83	2,06
Kühlmitte nach Strippen	15,58	15,72	17,11	16,14	0,85	2,10
Zunahme °P	0,38	0,48	0,84	0,57	0,24	0,60
Gesamtverdampfung	3,52	4,17	6,34	4,68	1,47	3,66
Verdampfung beim Kochen	0,40	3,05	4,66	2,70	2,15	5,35
Verdampfung beim Strippen	0,97	0,96	1,06	1,00	0,06	0,14
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,47	5,51	5,36	5,45	0,08	0,19
Kochende	5,53	5,50	5,39	5,47	0,07	0,18
Kühlmitte vor Strippen	5,48	5,47	5,35	5,43	0,07	0,18
Kühlmitte nach Strippen	5,43	5,48	5,35	5,42	0,07	0,16
Farbe in EBC						
Pfanne-Voll	3,50	4,50	4,50	4,17	0,58	1,43
Kochende	4,50	5,50	5,50	5,17	0,58	1,43
Kühlmitte vor Strippen	5,50	5,50	6,00	5,67	0,29	0,72
Kühlmitte nach Strippen	5,50	6,00	6,00	5,83	0,29	0,72
Zunahme in EBC	2,00	1,50	1,50	1,67	0,29	0,72

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
FAN in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen	115	159	159	144	25	63,11
Kühlmitte nach Strippen	118	156	165	146	25	61,98
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	65,0	72,0	84,0	73,7	9,6	23,9
Kochende	49,0	49,0	55,0	51,0	3,5	8,6
Kühlmitte vor Strippen	45,0	48,0	53,0	48,7	4,0	10,0
Kühlmitte nach Strippen	49,0	43,0	32,0	41,3	8,6	21,4
Abnahme in mg/l	16,0	29,0	52,0	32,3	18,2	45,3
Abnahme in %	24,6	40,3	61,9	42,3	18,7	46,5
noch koag. N (bez. auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	52,0	57,0	63,0	57,3	5,5	13,7
Kochende	39,0	38,0	39,0	38,7	0,6	1,4
Kühlmitte vor Strippen	35,0	37,0	38,0	36,7	1,5	3,8
Kühlmitte nach Strippen	38,0	33,0	32,0	34,3	3,2	8,0
Abnahme in mg/l	14,0	24,0	31,0	23,0	8,5	21,2
Abnahme in %	26,9	42,1	49,2	39,4	11,4	28,3
MgSO₄-fällb. N in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen (Originalwert)	156	185	183	175	16	40,2
Kühlmitte nach Strippen (Originalwert)	159	160	193	171	19	48,1
Kühlmitte vor Strippen (bez. auf 12 °P)	121	143	130	131	11	27,5
Kühlmitte nach Strippen (bez. auf 12 °P)	122	122	135	126	8	18,6
Anteil in % am gesamtflösl. Stickstoff	22	19	20	20	1	3,6
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	17,0	20,9	23,6	20,5	3,3	8,2
Kochende	26,6	34,4	38,6	33,2	6,1	15,1
Kühlmitte vor Strippen	29,0	37,8	43,3	36,7	7,2	17,9
Kühlmitte nach Strippen	30,9	39,0	44,2	38,0	6,7	16,7
Zunahme	13,9	18,1	20,6	17,5	3,4	8,4
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	13,6	16,6	17,6	15,9	2,1	5,2
Kochende	21,1	26,5	27,5	25,1	3,4	8,5
Kühlmitte vor Strippen	22,6	29,1	30,7	27,5	4,3	10,7
Kühlmitte nach Strippen	24,0	30,1	31,3	28,5	3,9	9,7
Zunahme	17,3	22,4	26,6	22,1	4,6	11,5
freies DMS in µg/l (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	30	17	30	26	8	19
Kochende	19	22	26	22	4	9
Kühlmitte vor Strippen	33	48	71	51	19	48
Kühlmitte nach Strippen	24	33	18	25	8	19
Abnahme in µg/l	6	-16	12	1	15	37
Abnahme in %	20	-94	40	-11	72	180

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS in µg/l (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	24	14	22	20	6	14
Kochende	15	17	19	17	2	5
Kühlmitte vor Strippen	26	38	53	39	13	33
Kühlmitte nach Strippen	24	33	18	25	8	19
Abnahme in µg/l	0	-19	4	-5	13	32
Abnahme in %	0	-144	20	-42	89	222
DMS-P in µg/l (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	203	282	330	272	64	159
Kochende	89	126	165	127	38	94
Kühlmitte vor Strippen	66	95	111	91	23	57
Kühlmitte nach Strippen	71	95	114	93	22	54
Abnahme in µg/l	132	187	216	178	43	106
Abnahme in %	65	66	65	66	1	2
DMS-P in µg/l (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	162	224	246	211	44	109
Kochende	71	100	123	98	26	65
Kühlmitte vor Strippen	53	76	83	70	16	39
Kühlmitte nach Strippen	71	95	114	93	22	54
Abnahme in µg/l	91	129	132	117	23	57
Abnahme in %	56	58	54	56	2	5
gesamtlösl. N in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen (Originalwert)	766,0	806,0	942,0	838,0	92,3	229,2
Kühlmitte nach Strippen (Originalwert)	722,0	827,0	987,0	845,3	133,4	331,5
Kühlmitte vor Strippen (bez. auf 12 °P)	595,7	621,2	667,7	628,2	36,5	90,7
Kühlmitte nach Strippen (bez. auf 12 °P)	561,5	637,4	699,6	632,8	69,2	171,8
Bittereinheiten in EBC-BU						
Kochende	26,3	27,5	26,8	26,9	0,6	1,5
Kühlmitte	24,8	27,8	28,3	27,0	1,9	4,7
Würzearomastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	53	84	132	90	39,8	98,9
2-me-Butanal	30	37	55	41	12,9	32,0
Methional	32	42	53	42	10,5	26,1
Benzaldehyd	3,7	3,8	4,9	4,1	0,7	1,7
2-Phenylethanal	144	179	215	179	36	88,2
Streckeraldehyde	273	346	460	360	94	234,1
Pentanal	0	0	0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	2,1	1,9	2,3	2,1	0,2	0,5
Hexanal	37	40	52	43	8	19,7
Heptanal	2,7	2,5	2,9	2,7	0,2	0,5
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,6	0,5	0,4	0,5	0,1	0,2
2-Furfural	57	76	112	82	28	69,4
2-ac-Furan	2,1	3,9	1,6	2,5	1,2	3,0
γ-Nonalacton	14	13	12	13	1,0	2,5
3-me-Butanol	104	107	119	110	8	19,7

2-me-Butanol	26	24	28	26	2,0	5,0
	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
1-Pentanol	32	26	28	29	3,1	7,6
1-Hexanol	35	39	43	39	4,0	9,9
1-Octanol	2,7	1,5	1,2	1,8	0,8	2,0
1-Octen-3-ol	8,5	4,8	4,2	5,8	2,3	5,8
Phenyl-OH	128	160	166	151	20	50,8
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	0,0	3,5	3,1	2,2	1,9	4,8
Terpineol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Linalool	4,9	4,2	3,8	4,3	0,6	1,4
Nerol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0,0	0,0	1,0	0,3	0,6	1,4
Würzearomastoffe – Kochende						
3-me-Butanal	14	19	29	21	7,6	19,0
2-me-Butanal	5,6	7,1	11	8	2,8	6,9
Methional	27	38	51	39	12,0	29,8
Benzaldehyd	2	2,1	2,5	2,2	0,3	0,7
2-Phenylethanal	121	158	181	153	30	75,2
Streckeraldehyde	170	224	275	223	53	130,4
Pentanal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	0,6	0,6	0,7	0,6	0,1	0,1
Hexanal	1,8	2,2	3,6	3	1	2,3
Heptanal	0,3	0,6	0,5	0,5	0,2	0,4
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,6	0,7	0,7	0,1	0,1
2-Furfural	108	134	177	140	35	86,6
2-ac-Furan	1,3	2,2	4,8	2,8	1,8	4,5
γ -Nonalacton	12	12	11	12	0,6	1,4
3-me-Butanol	29	33	32	31	2	5,2
2-me-Butanol	24	22	29	25	3,6	9,0
1-Pentanol	7,7	8,2	5,3	7	1,6	3,9
1-Hexanol	6,7	7,9	7,2	7	0,6	1,5
1-Octanol	0,7	0,7	0,9	0,8	0,1	0,3
1-Octen-3-ol	1,5	0,0	1,6	1,0	0,9	2,2
Phenyl-OH	121	149	155	142	18	45,1
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	0,0	2,4	2,8	1,7	1,5	3,8
Terpineol	0,0	0,0	0,6	0,2	0,3	0,9
Linalool	0,0	2,5	2,6	1,7	1,5	3,7
Nerol	0,0	0,0	2,2	0,7	1,3	3,2
Geraniol	1,9	2,8	1,9	2,2	0,5	1,3
Würzearomastoffe – Kühlmitte vor Strippen						
3-me-Butanal	23	31	43	32	10,1	25,0
2-me-Butanal	8,8	11	14	11	2,6	6,5
Methional	30	37	51	39	10,7	26,6
Benzaldehyd	1,9	2,3	2,7	2,3	0,4	1,0
2-Phenylethanal	141	175	196	171	28	69,0

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Streckerlaldehyde	204	256	307	256	52	127,9
Pentanal	0,0	0,0	0,4	0,1	0,2	0,6
2-Pentanon	0,5	0,6	0,7	0,6	0,1	0,2
Hexanal	1,9	2,8	4,2	3	1	2,9
Heptanal	0,6	0,6	0,7	0,6	0,1	0,1
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,6	0,7	0,7	0,1	0,1
2-Furfural	139	163	233	178	49	121,3
2-ac-Furan	2,5	2,8	3,7	3,0	0,6	1,6
γ -Nonalacton	12	12	11	12	0,6	1,4
3-me-Butanol	28	34	32	31	3	7,6
2-me-Butanol	22	22	28	24	3,5	8,6
1-Pentanol	8,6	6,4	5,9	7,0	1,4	3,6
1-Hexanol	6,4	7,7	7,4	7,0	0,7	1,7
1-Octanol	0,8	0,7	1,2	0,9	0,3	0,7
1-Octen-3-ol	0,0	1,5	1,6	1,0	0,9	2,2
Phenyl-OH	122	149	149	140	16	38,7
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	2,5	2,8	2,9	2,7	0,2	0,5
Terpineol	0,0	0,0	1,1	0,4	0,6	1,6
Linalool	3,1	2,0	3,0	2,7	0,6	1,5
Nerol	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	2,2	1,3	2,2	1,9	0,5	1,3
Würzaromastoffe – nach Strippen						
3-me-Butanal	19	31	23	24	6,1	15,2
2-me-Butanal	7,5	11	8,5	9	1,8	4,5
Methional	31	42	46	40	7,8	19,3
Benzaldehyd	2,3	2,7	2,3	2,4	0,2	0,6
2-Phenylethanal	135	174	173	161	22	55,2
Streckerlaldehyde	195	260	253	236	36	88,6
Pentanal	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	0,8	0,6	0,4	0,6	0,2	0,5
Hexanal	2,6	3,8	2,5	3,0	1,0	1,8
Heptanal	0,4	0,7	0,5	0,5	0,2	0,4
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,7	0,6	0,7	0,1	0,1
2-Furfural	124	165	222	170	49	122,3
2-ac-Furan	2,9	4,1	6,8	4,6	2,0	5,0
γ -Nonalacton	12	12	11	12	0,6	1,4
3-me-Butanol	31	33	20	28	7	17,4
2-me-Butanol	24	21	17	21	3,5	8,7
1-Pentanol	8,1	8,5	5,6	7	1,6	3,9
1-Hexanol	7	7,9	4,2	6	1,9	4,8
1-Octanol	0,0	0,0	0,6	0,2	0,3	0,9
1-Octen-3-ol	0,0	1,5	1,2	0,9	0,8	2,0
Phenyl-OH	129	150	161	147	16	40,4
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	0,0	3,3	2,2	1,8	1,7	4,2

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	2,4	0	2	1,5	1,3	3,2
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0	0	1,7	0,6	1,0	2,4

10.2.3 Versuche mit dem DSVD-System mit reduzierter Verdampfung

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	16,99	15,76	15,65	16,13	0,74	1,85
Kochende	17,46	16,18	16,11	16,58	0,76	1,89
Kühlmitte vor Strippen	17,46	16,26	16,09	16,60	0,75	1,86
Kühlmitte nach Strippen	17,55	16,42	16,34	16,77	0,68	1,68
Zunahme °P	0,47	0,50	0,44	0,47	0,03	0,07
Gesamtverdampfung	3,30	4,19	4,41	3,96	0,59	1,46
Verdampfung beim Kochen	2,77	2,66	2,94	2,79	0,14	0,34
Verdampfung beim Strippen	0,52	0,98	1,55	1,02	0,52	1,29
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,35	5,38	5,34	5,36	0,02	0,05
Kochende	5,38	5,41	5,38	5,39	0,02	0,04
Kühlmitte vor Strippen	5,35	5,38	5,36	5,36	0,02	0,04
Kühlmitte nach Strippen	5,36	5,38	5,35	5,36	0,02	0,04
Farbe in EBC						
Pfanne-Voll	5,50	5,50	5,50	5,50	0,00	0,00
Kochende	5,50	5,50	5,50	5,50	0,00	0,00
Kühlmitte vor Strippen	6,00	6,00	6,00	6,00	0,00	0,00
Kühlmitte nach Strippen	6,00	6,00	6,50	6,17	0,29	0,72
Zunahme in EBC	0,50	0,50	1,00	0,67	0,29	0,72
FAN in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen	170	164	159	164	6	13,68
Kühlmitte nach Strippen	180	158	157	165	13	32,30
noch koag. N in mg/l (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	89,0	79,0	75,0	81,0	7,2	17,9
Kochende	57,0	51,0	47,0	51,7	5,0	12,5
Kühlmitte vor Strippen	53,0	51,0	46,0	50,0	3,6	9,0
Kühlmitte nach Strippen	52,0	49,0	46,0	49,0	3,0	7,5
Abnahme in mg/l	37,0	30,0	29,0	32,0	4,4	10,8
Abnahme in %	41,6	38,0	38,7	39,4	1,9	4,7
noch koag. N (bez. auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	63,0	60,0	58,0	60,3	2,5	6,3
Kochende	39,0	38,0	35,0	37,3	2,1	5,2
Kühlmitte vor Strippen	36,0	38,0	34,0	36,0	2,0	5,0
Kühlmitte nach Strippen	36,0	36,0	34,0	35,3	1,2	2,9
Abnahme in mg/l	27,0	24,0	24,0	25,0	1,7	4,3
Abnahme in %	42,9	40,0	41,4	41,4	1,4	3,5

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
MgSO₄-fällb. N in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen (Originalwert)	213	186	182	194	17	41,9
Kühlmitte nach Strippen (Originalwert)	196	185	191	191	6	13,7
Kühlmitte vor Strippen (bez. auf 12 °P)	146	137	136	140	6	13,7
Kühlmitte nach Strippen (bez. auf 12 °P)	134	135	140	136	3	8,0
Anteil in % am gesamtlösl. Stickstoff	20	20	20	20	0	0,2
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	24,4	24,8	27,7	25,6	1,8	4,5
Kochende	37,4	37,9	39,6	38,3	1,2	2,9
Kühlmitte vor Strippen	41,9	42,6	45,6	43,4	2,0	4,9
Kühlmitte nach Strippen	43,4	45,0	46,6	45,0	1,6	4,0
Zunahme	19,0	20,2	18,9	19,4	0,7	1,8
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	17,2	18,9	21,2	19,1	2,0	5,0
Kochende	25,7	28,1	29,5	27,8	1,9	4,8
Kühlmitte vor Strippen	28,8	31,4	34,0	31,4	2,6	6,5
Kühlmitte nach Strippen	29,8	33,2	34,8	32,6	2,5	6,3
Zunahme	26,2	26,1	25,4	25,9	0,5	1,1
freies DMS in µg/l (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	26	30	38	31	6	15
Kochende	23	30	31	28	4	11
Kühlmitte vor Strippen	50	73	70	64	13	31
Kühlmitte nach Strippen	33	36	38	36	3	6
Abnahme in µg/l	-7	-6	0	-4	4	9
Abnahme in %	-27	-20	0	-16	14	35
freies DMS in µg/l (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	26	23	29	23	3	8
Kochende	23	23	24	21	0	1
Kühlmitte vor Strippen	50	56	54	48	3	7
Kühlmitte nach Strippen	33	36	38	36	3	6
Abnahme in µg/l	-7	-13	-9	-10	3	8
Abnahme in %	-27	-58	-30	-38	17	42
DMS-P in µg/l (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	360	332	348	347	14	35
Kochende	189	168	181	179	11	26
Kühlmitte vor Strippen	146	105	116	122	21	53
Kühlmitte nach Strippen	138	111	120	123	14	34
Abnahme in µg/l	222	221	228	224	4	9
Abnahme in %	62	67	66	65	3	6
DMS-P in µg/l (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	254	253	267	258	8	19
Kochende	133	128	139	133	5	14
Kühlmitte vor Strippen	103	80	89	91	12	29
Kühlmitte nach Strippen	138	111	120	123	14	34
Abnahme in µg/l	116	142	147	135	16	41
Abnahme in %	46	56	55	52	6	14

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
gesamtlösl. N in mg/l						
Kühlmitte vor Strippen (Originalwert)	945	889	939	924	30	76
Kühlmitte nach Strippen (Originalwert)	986	930	949	955	27	68
Kühlmitte vor Strippen (bez. auf 12 °P)	649	656	700	668	27	68
Kühlmitte nach Strippen (bez. auf 12 °P)	677	687	707	691	15	38
Bittereinheiten in EBC-BU						
Kochende	28,7	27,7	24,2	26,9	2,4	5,9
Kühlmitte	29,2	28,9	27,1	28,4	1,1	2,8
Würzearomastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	126	145	145	139	11,0	27,3
2-me-Butanal	53	60	58	57	3,6	9,0
Methional	52	50	52	51	1,2	2,9
Benzaldehyd	4,9	5,2	5,2	5,1	0,2	0,4
2-Phenylethanal	219	237	238	231	11	26,6
Streckeraldehyde	454	497	498	483	25	62,4
Pentanal	0	0	0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	2,4	2,4	2,3	2,4	0,1	0,1
Hexanal	4,8	5,5	5,4	3,8	2,9	71,3
Heptanal	2,4	2,7	2,5	2,5	0,2	0,4
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,5	0,5	0,5	0,5	0,0	0,0
2-Furfural	107	121	132	120	13	31,1
2-ac-Furan	3,5	1,8	10	5,1	4,3	10,8
γ-Nonalacton	11	11	11	11	0,0	0,0
3-me-Butanol	124	112	101	112	12	28,6
2-me-Butanol	30	26	25	27	2,6	6,6
1-Pentanol	29	25	23	26	3,1	7,6
1-Hexanol	42	37	35	38	3,6	9,0
1-Octanol	1,2	1,6	1,3	1,4	0,2	0,5
1-Octen-3-ol	4,6	4,2	4,9	4,6	0,4	0,9
Phenyl-OH	163	161	157	160	3	7,6
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	4,2	4,6	4,6	4,5	0,2	0,6
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	3,8	4,6	3	3,8	0,8	2,0
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Würzearomastoffe – Kochende						
3-me-Butanal	25	23	25	24	1,2	2,9
2-me-Butanal	8,9	8,5	8,5	9	0,2	0,6
Methional	59	48	50	52	5,9	14,6
Benzaldehyd	2,7	3,1	3,1	3,0	0,2	0,6
2-Phenylethanal	195	205	209	203	7	17,9
Streckeraldehyde	290	287	295	291	4	10,0
Pentanal	0	0	0	0,0	0,0	0,0
2-Pentanon	0,8	0,8	0,8	0,8	0,0	0,0

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Hexanal	2,7	2,9	3,2	3	0	0,6
Heptanal	0,4	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,6	0,6	0,6	0,1	0,1
2-Furfural	182	188	204	191	11	28,3
2-ac-Furan	3,5	12	1,2	5,6	5,7	14,1
γ -Nonalacton	11	11	11	11	0,0	0,0
3-me-Butanol	38	39	36	38	2	3,8
2-me-Butanol	24	26	25	25	1,0	2,5
1-Pentanol	8,2	8,2	9,1	9	0,5	1,3
1-Hexanol	8,5	8,6	7,5	8	0,6	1,5
1-Octanol	0	0,8	0,6	0,5	0,4	1,0
1-Octen-3-ol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Phenyl-OH	174	181	163	173	9	22,5
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3	2,6	3,2	2,9	0,3	0,8
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	3	2,3	2,4	2,6	0,4	0,9
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	1,5	0	0	0,5	0,9	2,2
Würzearomastoffe – vor Strippen						
3-me-Butanal	40	41	42	41	1,0	2,5
2-me-Butanal	13	14	14	14	0,6	1,4
Methional	52	52	53	52	0,6	1,4
Benzaldehyd	3,2	3,2	3	3,1	0,1	0,3
2-Phenylethanal	214	221	230	222	8	19,9
Streckeraldehyde	323	332	342	332	10	23,6
Pentanal	0,4	0,4	0,4	0,4	0,0	0,0
2-Pentanon	0,7	0,8	0,8	0,8	0,1	0,1
Hexanal	3,4	3,5	4	4	0	0,8
Heptanal	0,4	0,3	0,6	0,4	0,2	0,4
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,7	0,7	0,7	0,0	0,0
2-Furfural	235	252	276	254	21	51,2
2-ac-Furan	14	5,4	2,9	7,4	5,8	14,5
γ -Nonalacton	11	11	11	11	0,0	0,0
3-me-Butanol	41	39	37	39	2	5,0
2-me-Butanol	25	25	25	25	0,0	0,0
1-Pentanol	9,9	9	8,2	9	0,9	2,1
1-Hexanol	8,5	8,3	8,5	8	0,1	0,3
1-Octanol	1	1	0	0,7	0,6	1,4
1-Octen-3-ol	1,6	0	0	0,5	0,9	2,3
Phenyl-OH	172	172	158	167	8	20,1
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3,8	3,7	3,4	3,6	0,2	0,5
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	2,4	2,1	2,5	2,3	0,2	0,5
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Würzearomastoffe – nach Strippen						
Geraniol	1,6	1,9	0	1,2	1,0	2,5
3-me-Butanal	38	32	36	35	3,1	7,6
2-me-Butanal	13	11	12	12	1,0	2,5
Methional	54	49	50	51	2,6	6,6
Benzaldehyd	3,7	2,8	3,1	3,2	0,5	1,1
2-Phenylethanal	215	205	216	212	6	15,1
Streckerlaldehyde	325	300	316	314	13	31,5
Pentanal	0	0	0,5	0,2	0,3	0,7
2-Pentanon	0,8	0,6	0,7	0,7	0,1	0,2
Hexanal	4,6	3	4	4	1	2,0
Heptanal	0,6	0,5	0,5	0,5	0,1	0,1
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,7	0,7	0,7	0,0	0,0
2-Furfural	238	253	264	252	13	32,4
2-ac-Furan	4,6	4	3,5	4,0	0,6	1,4
γ -Nonalacton	11	11	11	11	0,0	0,0
3-me-Butanol	39	29	33	34	5	12,5
2-me-Butanol	22	18	21	20	2,1	5,2
1-Pentanol	8,1	8,4	6,5	8	1,0	2,5
1-Hexanol	8,3	6,5	7,4	7	0,9	2,2
1-Octanol	0	0	1	0,3	0,6	1,4
1-Octen-3-ol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Phenyl-OH	167	178	166	170	7	16,5
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3,2	3,5	3,4	3,4	0,2	0,4
Terpineol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Linalool	3,5	2,4	2,1	2,7	0,7	1,8
Nerol	0	0	0	0,0	0,0	0,0
Geraniol	0	1,7	0	0,6	1,0	2,4

10.3 Versuche mit der ersten Anlage im industriellen Maßstab

10.3.1 Analysen mit der Maisch-Würze-Pfanne

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Befüllen + Heizen	4,5	4,5	4,5			
Dampfdruck Kochen in bar	0,6	4,5	4,5			
Dauer Kochen in min	80	80	80			
Kochpause in min	20	20	20			
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	10,78	10,81	11,38	10,99	0,34	0,84
Ausschlagwürze	11,75	11,71	12,41	11,96	0,39	0,98
Kühlmitte	11,69	11,69	12,38	11,92	0,40	0,99
Extraktzunahme in °P	0,91	0,88	1,00	0,93	0,06	0,16
Gesamtverdampfung	8,44	8,14	8,79	8,46	0,32	0,80
Verdampfung beim Kochen	9,00	8,33	9,05	8,79	0,40	1,00
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,56	5,59	5,52	5,6	0,0	0,09
Ausschlagwürze	5,45	5,44	5,35	5,4	0,1	0,14
Kühlmitte	5,41	5,42	5,33	5,4	0,0	0,12
Farbe in EBC						
Pfanne-Voll	5,50	5,75	6,00	5,8	0,3	0,62
Ausschlagwürze	7,75	6,75	8,50	7,7	0,9	2,18
Kühlmitte	8,25	7,75	9,25	8,4	0,8	1,90
Zunahme absolut	2,8	2,0	3,3	2,7	0,6	1,56
noch koag. N (Originalwert) in mg/l						
Pfanne-Voll	56	50	52	52	3	8,3
Ausschlagwürze	19	22	23	21	2	5,2
Kühlmitte	20	21	23	21	1	3,1
Abnahme absolut	36	29	29	31	4	10,4
Abnahme in %	64,3	57,6	56,3	59,4	4,3	10,65
noch koag. N (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	63	55	54	57	5	11,2
Ausschlagwürze	19	23	22	21	2	4,2
Kühlmitte	21	22	22	21	1	1,7
Abnahme absolut	42	34	33	36	5	12,9
Abnahme in %	67,2	60,9	60,0	62,7	3,9	9,76
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	24,4	21,4	27,6	24,5	3,1	7,70
Ausschlagwürze	42,2	43,2	43,5	43,0	0,7	1,69
Kühlmitte	52,6	51,4	54,3	52,8	1,5	3,62
Zunahme	28,2	30,0	26,7	28,30	1,65	4,10

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	27,3	23,9	29,2	26,8	2,7	6,69
Ausschlagwürze	43,2	44,3	42,0	43,2	1,2	2,90
Kühlmitte	54,0	52,8	52,6	53,1	0,8	1,91
Zunahme	26,7	28,9	23,4	26,34	2,80	6,95
freies DMS (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	547	516	457	507	46	113,58
Ausschlagwürze	97	44	49	63	29	72,70
Kühlmitte	142	67	84	98	39	97,69
Abnahme absolut	405	449	373	409	38	94,80
Abnahme in %	74	87	82	81	7	16,19
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	612	576	484	557	66	164,96
Ausschlagwürze	99	45	47	64	31	76,16
Kühlmitte	146	69	81	99	41	102,62
Abnahme absolut	466	507	402	459	53	131,52
Abnahme in %	76	88	83	82	6	14,81
DMS-P (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	484	474	429	462	29	72,78
Ausschlagwürze	106	81	64	84	21	52,49
Kühlmitte	70	46	22	46	24	59,62
Abnahme absolut	414	428	407	416	11	26,56
Abnahme in %	86	90	95	90	5	11,60
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	542	529	454	508	48	118,03
Ausschlagwürze	109	83	62	84	23	58,11
Kühlmitte	72	47	21	47	25	62,84
Abnahme absolut	470	482	433	461	26	63,84
Abnahme in %	87	91	95	91	4	10,65

10.3.2 Analysen mit dem DSVD-System

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	10,78	10,95	11,06	10,93	0,14	0,35
Ausschlagwürze	11,09	11,1	11,25	11,15	0,09	0,22
Kühlmitte	11,25	11,41	11,49	11,38	0,12	0,30
Extraktzunahme in °P	0,47	0,46	0,43	0,45	0,02	0,05
Gesamtverdampfung	4,36	4,20	3,89	4,15	0,24	0,60
Verdampfung beim Kochen	2,88	1,37	1,72	1,99	0,79	1,96
Verdampfung beim Strippen	1,44	2,79	2,13	2,12	0,68	1,68
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,64	5,61	5,57	5,6	0,0	0,09
Ausschlagwürze	5,39	5,46	5,4	5,4	0,0	0,09
Kühlmitte	5,36	5,41	5,39	5,4	0,0	0,06
Farbe in EBC						
Pfanne-Voll	7,00	5,50	6,75	6,4	0,8	2,00
Ausschlagwürze	8,00	6,75	7,25	7,3	0,6	1,56
Kühlmitte	8,00	7,25	7,50	7,6	0,4	0,95
Zunahme absolut	1,0	1,8	0,8	1,2	0,5	1,29
noch koag. N (Originalwert) in mg/l						
Pfanne-Voll	55	61	58	58	3	7,8
Ausschlagwürze	34	36	37	36	1	3,6
Kühlmitte	28	29	26	28	2	3,9
Abnahme absolut	27	32	32	30	3	7,3
Abnahme in %	49,1	52,5	55,2	52,3	3,0	7,58
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	62	67	63	64	3	7,6
Ausschlagwürze	37	39	39	39	1	3,4
Kühlmitte	30	31	27	29	2	4,6
Abnahme absolut	32	37	36	35	3	6,9
Abnahme in %	51,3	54,5	56,9	54,3	2,8	6,96
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	15,4	12,8	15,3	14,5	1,5	3,6
Ausschlagwürze	27,0	21,5	22,7	23,7	2,9	7,1
Kühlmitte	31,9	31,6	28,5	30,7	1,9	4,6
Zunahme	16,5	18,8	13,2	16,2	2,8	6,9
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	17,2	14,1	16,7	16,0	1,7	4,1
Ausschlagwürze	29,3	23,3	24,3	25,7	3,2	8,0
Kühlmitte	34,1	33,3	29,8	32,4	2,3	5,6
Zunahme	16,9	19,2	13,2	16,4	3,1	7,6

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	393	329	261	328	66	163
Ausschlagwürze	118	136	160	138	21	51
Kühlmitte	36	37	46	40	5	13
Abnahme absolut	357	292	215	288	71	176
Abnahme in %	91	89	82	87	4	10
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	440	362	284	362	78	193
Ausschlagwürze	128	148	171	149	21	52
Kühlmitte	39	39	48	42	5	13
Abnahme absolut	401	323	236	320	83	205
Abnahme in %	91	89	83	88	4	10
DMS-P (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	540	585	580	569	25	61
Ausschlagwürze	280	260	263	268	11	27
Kühlmitte	118	133	136	129	10	24
Abnahme absolut	422	452	444	440	16	38
Abnahme in %	78	77	76	77	1	2
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	605	644	632	627	20	50
Ausschlagwürze	304	282	281	289	13	32
Kühlmitte	126	140	143	136	9	22
Abnahme absolut	479	504	489	491	13	31
Abnahme in %	79	78	77	78	1	2

10.4 Vergleich DSVD-System mit LWE für 160 hl AW mit klassischer Kupfer-Hochleistungspfanne

10.4.1 Einstellungen und Analysen der ersten Versuchsreihe mit dem DSVD-System

Befüllen + Aufheizen						
	Einheit	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5
Einlaufregelventil	[%]	55	55	55	55	55
Pumpendrehzahl zum Merlin	[%]	65	65	65	65	65
Dampfdruck (abs.)	[bar]	1,7	1,9	2,0	2,0	2,0
Dampftemperatur	[°C]	110,4	142,2	137,1	118,4	136,7
Temp. DSVD	[°C]	96,3	98,3	98,9	98,9	99,0
Temp. WHP	[°C]	84,9	90,3	91,8	91,3	91,3
Dauer	[min:s]	16:12	16:10	15:54	15:54	16:15
Aufheizen zum Kochen						
Dampfdruck (abs.) Phase 1:	[bar]	2,18	2,16	1,49	1,5	1,50
Dampfdruck (abs.) Phase 2:		1,49	1,50			
Dampftemperatur Phase 1:	[°C]	142,7	139,1	140,2	136,9	138,1
Dampftemperatur Phase 2:		137,1	138,5			
Temp. DSVD Phase 1	[°C]	98,7	98,7	99,1	99,3	99,3
Temp. DSVD Phase 2		99,0	99,0			
Temp. WHP Phase 1	[°C]	91,0	90,0	95,5	95,5	95,5
Temp. WHP Phase. 2		95,5	95,5			
Dauer Phase 1	[min]	11:47	03:11	23:23	21:12	21:26
Dauer Phase 2		21:40	23:37			
Kochen						
Dampfdruck (abs.)	[bar]	0,80	0,80	0,80	0,79	0,80
Dampftemperatur	[°C]	134,2	134,7	134,3	134,6	134,6
Temp. DSVD	[°C]	98,9	99,0	99,1	99,2	99,2
Temp. WHP	[°C]	96,6	96,6	96,6	96,8	96,8
Dauer	[min]	39:48	39:45	39:49	39:51	39:51
Whirlpoolrast:	[min:s]	24:51	24:52	24:52	24:53	24:56
Strippen: nur untere Heizzone						
Dampfdruck (abs.)	[bar]	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Dampftemperatur	[°C]	126,9	127,1	128,8	128,5	128,5
Temp. DSVD	[°C]	99,1	99,1	99,1	99,1	99,1
Dauer	[min]	56:28	48:18	47:49	48:15	48:15
Gesamtbelegungszeit	[h:min:s]	03:07:51	02:53:14	02:48:26	02:46:45	02:48:13

	Analysen					Mittelw.	Stabw.	Stabw.
	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5			
abgeläuterte Menge	164	164	165	164	166	165	0,89	1,11
Extrakt in % GG								
Pfanne-Voll	11,19	11,22	11,60	11,52	11,70	11,45	0,23	0,28
Ausschlagwürze	11,53	11,25	11,75	11,57	11,73	11,57	0,20	0,25
Kühlmitte	11,72	11,55	11,83	11,77	11,93	11,76	0,14	0,18
Extraktzunahme	0,53	0,33	0,23	0,25	0,23	0,31	0,13	0,16
Gesamtverdampfung in %	4,74	2,94	1,98	2,17	1,97	2,76	1,17	1,46
Verd. in % beim Kochen	3,04	0,27	1,29	0,43	0,26	1,06	1,19	1,47
Verd. in % beim Strippen	1,65	2,67	0,68	1,73	1,71	1,69	0,70	0,87
pH – Wert								
Pfanne-Voll	5,68	5,67	5,60	5,67	5,63	5,65	0,03	0,04
Ausschlagwürze	5,59	5,60	5,55	5,58	5,55	5,57	0,02	0,03
Kühlmitte	5,53	5,71	5,55	5,51	5,49	5,56	0,09	0,11
Farbe nach EBC								
Pfanne-Voll	5,50	6,00	5,50	6,00	6,00	5,80	0,27	0,34
Ausschlagwürze	6,50	6,50	6,50	6,50	7,00	6,60	0,22	0,28
Kühlmitte	7,00	7,00	7,00	7,00	7,50	7,10	0,22	0,28
Zunahme	1,50	1,00	1,50	1,00	1,50	1,30	0,27	0,34
gesamtlöslicher N in mg/l								
Pfanne-Voll	970	938	938	943	966	951	16	20
Ausschlagwürze	960	931	952	932	958	947	14	18
Kühlmitte	938	938	949	923	940	938	9	12
noch koag. N in mg/l								
Pfanne-Voll	33	34	33	38	34	34	2	3
Ausschlagwürze	28	28	26	31	27	28	2	2
Kühlmitte	26	25	23	29	27	26	2	3
Abnahme absolut	7	9	10	9	7	8	1	2
Abnahme in %	21	26	30	24	21	24	4	5
MgSO₄-fällb. N in mg/100ml								
Pfanne-Voll	20,0	19,3	20,1	19,4	20,7	19,9	0,6	0,7
Ausschlagwürze	19,8	19,1	19,3	20,7	20,8	19,9	0,8	1,0
Kühlmitte	20,1	20,1	20,3	19,8	19,4	19,9	0,4	0,4
TBZ								
Pfanne-Voll	15,0	16,0	18,0	16,0	16,0	16,2	1,1	1,4
Ausschlagwürze	27,0	26,0	27,0	25,0	26,0	26,2	0,8	1,0
Kühlmitte	34,0	33,0	31,0	31,0	31,0	32,0	1,4	1,8
freies DMS in µg/l								
Pfanne-Voll	65	67	66	167	191	111	62	78
Ausschlagwürze	82	74	65	121	121	93	27	33
Kühlmitte	47	52	27	67	54	49	15	18
Abnahme absolut	18	15	39	100	137	62	54	67
Abnahme in %	28	22	59	60	72	48	22	27

DMS-P in µg/l								
Pfanne-Voll	698	610	494	891	941	727	188	234
Ausschlagwürze	200	202	214	310	308	247	57	71
Kühlmitte	81	87	96	131	133	106	25	31
Abnahme absolut	617	523	398	760	808	621	169	209
Abnahme in %	88	86	81	85	86	85	3	4
ITT 80 % Entfärbung in s								
Pfanne-Voll	31	33	30	33	26	31	3	4
Ausschlagwürze	35	34	34	34	28	33	3	4
Kühlmitte	41	43	41	39	34	40	3	4
Bittereinheiten in EBC								
Pfanne-Voll	21,0	23,0	22,0	26,0	24,0	23,2	1,9	2,4
Ausschlagwürze	46,0	44,0	45,0	44,0	43,0	44,4	1,1	1,4
Kühlmitte	49,0	49,0	49,0	50,0	45,0	48,4	1,9	2,4
α-Säuren in mg/l								
Pfanne-Voll	38,0	39,0	37,0	32,0	27,0	34,6	5,0	6,2
Ausschlagwürze	34,0	35,0	28,0	24,0	22,0	28,6	5,8	7,2
Kühlmitte	19,0	18,0	19,0	18,0	14,0	17,6	2,1	2,6
Iso-α-säuren in mg/l								
Pfanne-Voll	12,0	11,0	12,0	7,0	6,0	9,6	2,9	3,6
Ausschlagwürze	31,0	30,0	29,0	34,0	30,0	30,8	1,9	2,4
Kühlmitte	42,0	41,0	39,0	43,0	38,0	40,6	2,1	2,6
gesamtlösl. N in mg/l bezogen auf 12 °P								
Pfanne-Voll	1089	1050	1016	1028	1037	1043,9	28,0	34,8
Ausschlagwürze	1046	1039	1018	1012	1026	1028,1	14,3	17,8
Kühlmitte	1005	1020	1008	985	990	1001,5	14,2	17,6
noch koag. N in mg/l bezogen auf 12 °P								
Pfanne-Voll	37,0	38,1	35,7	41,4	36,5	37,8	2,2	2,8
Ausschlagwürze	30,5	31,3	27,8	33,7	28,9	30,4	2,3	2,8
Kühlmitte	27,9	27,2	24,4	30,9	28,4	27,8	2,4	2,9
Abnahme absolut	9	11	11	10	8	10		
Abnahme in %	24,8	28,6	31,7	25,3	22,1	26,5		
MgSO₄-fällb. N in mg/100ml								
Pfanne-Voll	22,4	21,6	21,8	21,2	22,2	21,8	0,5	0,6
Ausschlagwürze	21,6	21,3	20,6	22,5	22,3	21,7	0,7	0,9
Kühlmitte	21,5	21,9	21,6	21,1	20,4	21,3	0,6	0,7
Kondensatmenge in l								
Gesamt	594	589	597	585	598	592	9	11
Gesamtverdampfung in %	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	0,02	0,0

10.4.2 Analysen der Sude mit der Hochleistungspfanne

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Abgeläuterte Menge in hl	157	157	157	157	157			
Temperatur Kochen	120	120	120	120	120			
1. Hopfengabe	500g α -Säure, Extrakt, 10 Min vor PFV im Vorlaufgefäß							
2. Hopfengabe	200g α -Säure, HPE Pellets, 60 Min n. Kochbeginn							
3. Hopfengabe	400g α -Säure, HPE Pellets, 90 Min n. Kochbeginn							
4. Hopfengabe	600g α -Säure, TTE Pellets, 10 Min vor Kochende							
Extrakt % GG								
Pfanne-Voll	10,91	10,78	10,96	10,69	10,78	10,82	0,11	0,14
Ausschlagwürze	12,08	11,98	11,89	11,97	11,89	11,96	0,08	0,10
Kühlmitte	12,13	11,90	11,92	11,98	11,92	11,97	0,09	0,12
Extraktzunahme in °P	1,22	1,12	0,96	1,29	1,14	1,15	0,12	0,15
Gesamtverdampfung	11,18	10,39	8,76	12,07	10,58	10,59	1,22	1,51
Verdampfung beim Kochen	10,72	11,13	8,49	11,97	10,30	10,52	1,30	1,61
Verdampfung beim Strippen	0,41	-0,67	0,25	0,08	0,25	0,07	0,43	0,53
pH-Wert								
Pfanne-Voll	5,63	5,63	5,64	5,64	5,62	5,63	0,01	0,01
Ausschlagwürze	5,49	5,46	5,48	5,48	5,48	5,56	0,01	0,01
Kühlmitte	5,43	5,37	5,41	5,40	5,40	5,44	0,02	0,03
Farbe nach EBC								
Pfanne-Voll	6,30	5,90	6,30	5,90	5,90	6,06	0,22	0,27
Ausschlagwürze	8,00	7,50	7,50	8,00	8,00	7,80	0,27	0,34
Kühlmitte	9,30	8,80	8,00	8,30	9,30	8,74	0,59	0,73
Zunahme in EBC	3,00	2,90	1,70	2,40	3,40	2,68	0,65	0,81
gesamtlösl. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	954	959	956	938	935	948	11	14
Ausschlagwürze	1029	1022	1005	998	991	1009	16	20
Kühlmitte	1012	1001	991	1005	991	1000	9	11
Abnahme absolut	-58	-42	-35	-67	-56	-52	13	16
Abnahme in %	-6	-4	-4	-7	-6	-5	1	2
gesamtlösl. N (bez. auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	1098	1117	1096	1102	1089	1101	10	13
Ausschlagwürze	1070	1071	1062	1047	1047	1059	12	15
Kühlmitte	1048	1057	1044	1054	1044	1049	6	7
Abnahme absolut	50	61	51	48	45	51	6	7
Abnahme in %	5	5	5	4	4	5	0	1

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	38,0	43,0	39,0	45,0	41,0	41,2	2,9	3,56
Ausschlagwürze	19,0	31,0	35,0	29,0	25,0	27,8	6,1	7,57
Kühlmitte	18,0	29,0	28,0	19,0	23,0	23,4	5,0	6,24
Abnahme absolut	20,0	14,0	11,0	26,0	18,0	17,8	5,8	7,15
Abnahme in %	52,6	32,6	28,2	57,8	43,9	43,0	12,6	15,70
noch koag. N (bez. auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	43,7	50,1	44,7	52,9	47,8	47,8	3,8	4,69
Ausschlagwürze	19,8	32,5	37,0	30,4	26,4	29,2	6,5	8,09
Kühlmitte	18,6	30,6	29,5	19,9	24,2	24,6	5,4	6,73
Abnahme absolut	25,1	19,5	15,2	33,0	23,5	23,3	6,6	8,25
Abnahme in %	57,4	38,9	34,0	62,3	49,3	48,4	12,0	14,86
MgSO₄-fällb. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	23,1	21,7	21,9	20,3	21,8	21,8	1,0	1,23
Ausschlagwürze	21,2	21,0	21,4	19,6	21,3	20,9	0,7	0,92
Kühlmitte	21,0	19,6	20,0	17,9	20,1	19,7	1,1	1,41
Abnahme absolut	2,1	2,1	1,9	2,4	1,7	2,0	0,3	0,32
Abnahme in %	9,1	9,7	8,7	11,8	7,8	9,4	1,5	1,88
MgSO₄-N (bez. auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	26,6	25,3	25,1	23,9	25,4	25,2	1,0	1,21
Ausschlagwürze	22,0	22,0	22,6	20,6	22,5	21,9	0,8	1,01
Kühlmitte	21,7	20,7	21,1	18,8	21,2	20,7	1,1	1,42
Abnahme absolut	4,8	4,6	4,0	5,1	4,2	4,6	0,4	0,54
Abnahme in %	18,2	18,2	16,0	21,3	16,6	18,1	2,1	2,55
TBZ (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	16,0	16,0	17,0	16,0	17,0	16,4	0,5	0,68
Ausschlagwürze	27,0	34,0	35,0	30,0	32,0	31,6	3,2	3,98
Kühlmitte	37,0	40,0	40,0	39,0	40,0	39,2	1,3	1,62
Zunahme	21,0	24,0	23,0	23,0	23,0	22,67	1,53	1,90
TBZ (bez. auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	18,4	18,6	19,5	18,8	19,8	19,0	0,6	0,73
Ausschlagwürze	28,1	35,6	37,0	31,5	33,8	33,2	3,5	4,38
Kühlmitte	38,3	42,2	42,1	40,9	42,1	41,1	1,7	2,08
Zunahme	19,9	23,6	22,7	22,1	22,3	22,1	1,4	1,69
freies DMS (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	347	346	396	367	396	370	25	31
Ausschlagwürze	31	40	72	21	30	39	20	25
Kühlmitte	57	63	69	57	66	62	5	7
Abnahme absolut	290	283	327	310	330	308	21	26
Abnahme in %	84	82	83	84	83	83	1	1

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS (bez. auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	399	403	454	431	461	430	28	35
Ausschlagwürze	32	42	76	22	32	41	21	26
Kühlmitte	59	66	73	60	70	66	6	7
Abnahme absolut	340	337	381	371	392	364	25	31
Abnahme in %	85	84	84	86	85	85	1	1
DMS-P (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	791	828	819	911	910	852	55	69
Ausschlagwürze	111	104	111	104	115	109	5	6
Kühlmitte	60	54	56	49	45	53	6	7
Abnahme absolut	731	774	763	862	865	799	61	76
Abnahme in %	92	93	93	95	95	94	1	1
DMS-P (bez. auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	911	965	939	1070	1060	938	27	34
Ausschlagwürze	115	109	117	109	121	114	4	5
Kühlmitte	62	57	59	51	47	59	3	3
Abnahme absolut	849	908	880	1019	1013	879	30	37
Abnahme in %	93	94	94	95	96	94	0	1
Bitterstoffe								
Pfanne-Voll α	0,5	1,0	15,0	20,0	9,0	5,5	8,2	10,2
Pfanne-Voll Iso- α	0,5	0,5	1,0	0,0	0,5	0,7	0,3	0,4
Ausschlagwürze α	26,0	25,0	29,0	29,0	27,0	26,7	2,1	2,6
Ausschlagwürze Iso- α	25,0	28,0	26,0	26,0	26,0	26,3	1,5	1,9
Kühlmitte α	22,0	19,0	21,0	21,0	19,0	20,7	1,5	1,9
Kühlmitte Iso- α	38,0	41,0	38,0	39,0	39,0	39,0	1,7	2,2
ITT 80 % Entfärbung								
Pfanne-Voll	28	28	28	29	27	28	1	1
Ausschlagwürze	46	47	45	43	49	37	2	3
Kühlmitte	49	55	47	45	51	48	4	5

10.4.3 Analysen der Sude mit dem DSVD-System – 1. Versuchsreihe

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Abgeläuterte Menge in hl	164	164	165	164	166			
Angefallene Kondensatmenge in l	594	589	597	585	598			
Gesamtverdampfung	3,71	3,67	3,70	3,65	3,69			
Extrakt % GG								
Pfanne-Voll	11,19	11,22	11,60	11,52	11,70	11,45	0,23	0,28
Ausschlagwürze	11,53	11,25	11,75	11,57	11,73	11,57	0,20	0,25
Kühlmitte	11,72	11,55	11,83	11,77	11,93	11,76	0,14	0,18
Extraktzunahme in °P	0,53	0,33	0,23	0,25	0,23	0,31	0,13	0,16
Gesamtverdampfung	4,74	2,94	1,98	2,17	1,97	2,76	1,17	1,46
Verdampfung beim Kochen	3,04	0,27	1,29	0,43	0,26	1,06	1,19	1,47
Verdampfung beim Strippen	1,65	2,67	0,68	1,73	1,71	1,69	0,70	0,87

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
pH-Wert								
Pfanne-Voll	5,68	5,67	5,60	5,67	5,63	5,65	0,03	0,04
Ausschlagwürze	5,59	5,60	5,55	5,58	5,55	5,61	0,02	0,03
Kühlmitte	5,53	5,71	5,55	5,51	5,49	5,57	0,09	0,11
Farbe nach EBC								
Pfanne-Voll	5,50	6,00	5,50	6,00	6,00	5,80	0,27	0,34
Ausschlagwürze	6,50	6,50	6,50	6,50	7,00	6,60	0,22	0,28
Kühlmitte	7,00	7,00	7,00	7,00	7,50	7,10	0,22	0,28
Zunahme in EBC	1,50	1,00	1,50	1,00	1,50	1,30	0,27	0,34
gesamtlösl. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	970	938	938	943	966	951	16	20
Ausschlagwürze	960	931	952	932	958	947	14	18
Kühlmitte	938	938	949	923	940	938	9	12
Abnahme absolut	32,0	0,0	-11,0	20,0	26,0	13	18	23
Abnahme in %	3,3	0,0	-1,2	2,1	2,7	1	2	2
gesamtlösl. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	1089	1050	1016	1028	1037	1044	28	35
Ausschlagwürze	1046	1039	1018	1012	1026	1028	14	18
Kühlmitte	1005	1020	1008	985	990	1001	14	18
Abnahme absolut	84	30	8	43	47	42	28	34
Abnahme in %	8	3	1	4	5	4	3	3
noch koag. N (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	33	34	33	38	34	34	2	3
Ausschlagwürze	28	28	26	31	27	28	2	2
Kühlmitte	26	25	23	29	27	26	2	3
Abnahme absolut	7	9	10	9	7	8	1	2
Abnahme in %	21,2	26,5	30,3	23,7	20,6	24,5	4,0	5,0
noch koag. N (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	37	38	36	41	36	38	2	3
Ausschlagwürze	31	31	28	34	29	30	2	3
Kühlmitte	28	27	24	31	28	28	2	3
Abnahme absolut	9	11	11	10	8	10	1	2
Abnahme in %	24,8	28,6	31,7	25,3	22,1	26,5	3,7	4,6
MgSO₄-fällb. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	20,0	19,3	20,1	19,4	20,7	19,9	0,6	0,71
Ausschlagwürze	19,8	19,1	19,3	20,7	20,8	19,9	0,8	0,97
Kühlmitte	20,1	20,1	20,3	19,8	19,4	19,9	0,4	0,44
Abnahme absolut	-0,1	-0,8	-0,2	-0,4	1,3	0,0	0,8	0,99
Abnahme in %	-0,5	-4,1	-1,0	-2,1	6,3	-0,3	3,9	4,88

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
MgSO₄-fällb. N (bez. auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	22	22	22	21	22	21,8	0,5	0,64
Ausschlagwürze	22	21	21	22	22	21,7	0,7	0,92
Kühlmitte	22	22	22	21	20	21,3	0,6	0,69
Abnahme absolut	0,9	-0,3	0,2	0,0	1,8	0,5	0,8	1,02
Abnahme in %	4,0	-1,2	1,0	0,1	8,1	2,4	3,7	4,61
TBZ (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	15,0	16,0	18,0	16,0	16,0	16,2	1,1	1,36
Ausschlagwürze	27,0	26,0	27,0	25,0	26,0	26,2	0,8	1,04
Kühlmitte	34,0	33,0	31,0	31,0	31,0	32,0	1,4	1,76
Zunahme	19,0	17,0	13,0	15,0	15,0	16,33	3,06	3,79
TBZ (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	16,8	17,9	19,5	17,4	17,2	17,8	1,0	1,29
Ausschlagwürze	29,4	29,0	28,9	27,1	27,8	28,5	0,9	1,16
Kühlmitte	36,4	35,9	32,9	33,1	32,6	34,2	1,8	2,25
Zunahme	19,6	18,0	13,4	15,6	15,5	16,4	2,4	2,98
freies DMS (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	65	67	66	167	191	111	62	78
Ausschlagwürze	82	74	65	121	121	93	27	33
Kühlmitte	47	52	27	67	54	49	15	18
Abnahme absolut	18	15	39	100	137	62	54	67
Abnahme in %	28	22	59	60	72	48	22	27
freies DMS (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	73	75	71	182	205	121	66	83
Ausschlagwürze	89	83	69	131	130	100	28	35
Kühlmitte	50	57	29	71	57	53	16	19
Abnahme absolut	23	18	43	111	148	69	58	72
Abnahme in %	31	25	60	61	72	50	21	26
DMS-P (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	698	610	494	891	941	727	188	234
Ausschlagwürze	200	202	214	310	308	247	57	71
Kühlmitte	81	87	96	131	133	106	25	31
Abnahme absolut	617	523	398	760	808	621	169	209
Abnahme in %	88	86	81	85	86	85	3	4
DMS-P (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	783	683	535	971	1010	667	125	155
Ausschlagwürze	218	226	229	337	330	224	6	7
Kühlmitte	87	95	102	140	140	94	8	9
Abnahme absolut	697	588	433	832	870	573	133	165
Abnahme in %	89	86	81	86	86	85	4	5

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bitterstoffe								
Pfanne-Voll α	38,0	39,0	37,0	32,0	27,0	38,0	1,0	1,2
Pfanne-Voll Iso- α	12,0	11,0	12,0	7,0	6,0	11,7	0,6	0,7
Ausschlagwürze α	34,0	35,0	28,0	24,0	22,0	32,3	3,8	4,7
Ausschlagwürze Iso- α	31,0	30,0	29,0	34,0	30,0	30,0	1,0	1,2
Kühlmitte α	19,0	18,0	19,0	18,0	14,0	18,7	0,6	0,7
Kühlmitte Iso- α	42,0	41,0	39,0	43,0	38,0	40,7	1,5	1,9
ITT 80 % Entfärbung								
Pfanne-Voll	31	33	30	33	26	31	3	4
Ausschlagwürze	35	34	34	34	28	32	3	4
Kühlmitte	41	43	41	39	34	36	3	4

10.4.4 Analysen der Sude mit dem DSVD-System – 2. Versuchsreihe

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Aufheizen Phase 1 in bar	2,5	2,5	2,5					
Dampfdruck Aufheizen Phase 2 in bar	1,8	1,8	1,8					
Abgeläuterte Menge in hl	164	164	165	164	166			
Temperatur Pfanne-Voll in °C	74	74	74					
Temperatur Kochen in °C	99	99	99					
Dampfdruck Kochen 1 in bar	1,5	1,5	1,5					
Dauer Kochen 1 in min	15	15	15					
Dampfdruck Kochen 2 in bar	1,3	1,3	1,3					
Dauer Kochen 2 in min	20	20	20					
Dampfdruck Strippen in bar	0,9	0,9	0,9					
Temperatur Strippen	99	99	99					
Dauer Strippen in min	65	65	65					
Angefallene Kondensatmenge in l	594	589	597	585	598			
Gesamtverdampfung	3,71	3,67	3,70	3,65	3,69			
Extrakt % GG								
Pfanne-Voll	11,15	11,23	11,28	11,06	11,36	11,22	0,12	0,14
Ausschlagwürze	11,79	11,57	11,80	11,53	11,60	11,66	0,13	0,16
Kühlmitte	12,02	11,81	12,00	11,67	11,80	11,86	0,15	0,18
Extraktzunahme in °P	0,87	0,58	0,72	0,61	0,44	0,64	0,16	0,20
Gesamtverdampfung	7,80	5,16	6,38	5,52	3,87	5,75	1,46	1,81
Verdampfung beim Kochen	5,74	3,03	4,61	4,25	2,11	3,95	1,41	1,75
Verdampfung beim Strippen	1,95	2,07	1,69	1,21	1,72	1,73	0,33	0,41
pH-Wert								
Pfanne-Voll	5,68	5,67	5,68	5,66	5,57	5,65	0,05	0,06
Ausschlagwürze	5,61	5,60	5,59	5,58	5,49	5,61	0,05	0,06
Kühlmitte	5,53	5,53	5,52	5,52	5,43	5,54	0,04	0,05

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Farbe nach EBC								
Pfanne-Voll	5,00	5,30	5,30	5,30	5,00	5,18	0,16	0,20
Ausschlagwürze	5,70	6,00	5,90	5,80	5,90	5,86	0,11	0,14
Kühlmitte	6,75	7,00	6,75	6,75	7,00	6,85	0,14	0,17
Zunahme in EBC	1,75	1,70	1,45	1,45	2,00	1,67	0,23	0,29
gesamtlösl. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	93,9	94,9	88,9	93,3	97,6	94	3	4
Ausschlagwürze	95,4	95,0	97,0	97,7	98,1	97	1	2
Kühlmitte	100,0	95,9	99,8	98,9	99,2	99	2	2
Abnahme absolut	-6,1	-1,1	-10,9	-5,6	-1,6	-5	4	5
Abnahme in %	-6,5	-1,1	-12,2	-6,0	-1,6	-5	4	6
gesamtlösl. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	106	106	99	106	108	105	3	4
Ausschlagwürze	102	103	103	106	106	104	2	3
Kühlmitte	104	102	104	106	106	105	2	2
Abnahme absolut	1	4	-5	0	2	0	4	5
Abnahme in %	1	4	-5	0	2	0	4	4
noch koag. N (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	32	38	33	33	33	34	2	3
Ausschlagwürze	26	32	26	28	26	27	2	3
Kühlmitte	24	27	25	24	25	25	1	2
Abnahme absolut	8	11	8	9	8	9	1	2
Abnahme in %	25,5	28,6	24,0	27,3	24,2	25,9	2,0	2,4
noch koag. N (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	36	42	37	37	36	38	3	3
Ausschlagwürze	28	34	28	30	28	29	3	3
Kühlmitte	25	29	26	26	27	26	1	2
Abnahme absolut	11	14	10	12	10	11	1	2
Abnahme in %	30,9	32,1	28,6	31,1	27,1	29,9	2,1	2,5
MgSO₄-fällb. N (Originalwerte) in mg/l								
Pfanne-Voll	19,6	18,4	19,3	19,9	19,3	19,3	0,6	0,70
Ausschlagwürze	19,3	19,9	19,4	20,1	19,7	19,7	0,3	0,42
Kühlmitte	19,8	19,6	19,8	20,0	19,8	19,8	0,1	0,18
Abnahme absolut	-0,2	-1,2	-0,5	-0,1	-0,5	-0,5	0,4	0,53
Abnahme in %	-1,0	-6,5	-2,6	-0,5	-2,6	-2,6	2,4	2,93
MgSO₄-fällb. N (bez. auf 12 °P) in mg/l								
Pfanne-Voll	22	21	21	23	21	21,6	0,8	0,95
Ausschlagwürze	21	22	21	22	21	21,2	0,6	0,73
Kühlmitte	21	21	21	22	21	21,0	0,3	0,43
Abnahme absolut	1,4	-0,3	0,8	1,1	0,3	0,6	0,7	0,82
Abnahme in %	6,3	-1,3	3,6	4,8	1,2	2,9	3,0	3,71

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
TBZ (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	16,0	16,2	15,8	15,9	16,0	16,0	0,1	0,18
Ausschlagwürze	24,7	25,1	24,4	25,5	24,9	24,9	0,4	0,51
Kühlmitte	30,2	30,3	30,6	31,8	30,7	30,7	0,6	0,79
Zunahme	14,2	14,1	14,8	15,9	14,8	14,37	0,38	0,47
TBZ (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	18,0	18,1	17,6	18,1	17,7	17,9	0,2	0,30
Ausschlagwürze	26,3	27,2	26,0	27,8	27,0	26,9	0,7	0,90
Kühlmitte	31,6	32,2	32,0	34,2	32,7	32,5	1,0	1,27
Zunahme	13,5	14,1	14,4	16,2	15,0	14,7	1,0	1,25
freies DMS (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	289	272	299	343	301	301	26	33
Ausschlagwürze	91	82	45	61	70	70	18	22
Kühlmitte	60	42	47	46	49	49	7	8
Abnahme absolut	229	230	252	297	252	252	28	34
Abnahme in %	79	85	84	87	84	84	3	3
freies DMS (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	326	304	333	390	333	337	32	39
Ausschlagwürze	97	89	48	66	76	75	19	24
Kühlmitte	63	45	49	50	52	52	7	8
Abnahme absolut	263	260	284	340	281	285	32	40
Abnahme in %	81	85	85	87	84	85	2	3
DMS-P (Originalwerte)								
Pfanne-Voll	437	476	618	687	555	555	102	127
Ausschlagwürze	154	155	233	234	194	194	40	49
Kühlmitte	73	73	93	82	80	80	8	10
Abnahme absolut	364	403	525	605	474	474	96	119
Abnahme in %	83	85	85	88	86	85	2	2
DMS-P (bezogen auf 12 °P)								
Pfanne-Voll	492	532	688	780	613	571	103	128
Ausschlagwürze	164	168	248	255	210	193	47	59
Kühlmitte	76	78	97	88	85	84	12	15
Abnahme absolut	416	455	591	692	528	487	92	114
Abnahme in %	85	85	86	89	86	85	1	1
Bitterstoffe								
Pfanne-Voll α	21,3	24,2	22,6	3,4	17,5	22,7	1,5	1,8
Pfanne-Voll Iso- α	4,6	2,9	3,7	2,9	5,7	3,7	0,9	1,1
Ausschlagwürze α	29,8	23,3	24,5	22,5	23,9	25,9	3,5	4,3
Ausschlagwürze Iso- α	36,5	29	37,9	28,8	35,9	34,5	4,8	5,9
Kühlmitte α	20,6	19,5	20,1	18,2	19,9	20,1	0,6	0,7
Kühlmitte Iso- α	48,6	37,3	48,0	36,2	47,9	44,6	6,4	7,9

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bitterstoffe								
Pfanne-Voll	17,8	17,9	3,0	6,4	14,0	11,8	8,6	10,6
Ausschlagwürze	49,1	42,6	34,4	38,0	44,8	41,8	7,4	9,1
Kühlmitte	54,3	49,5	39,0	44,4	51,6	47,8	7,8	9,7
ITT 80 % Entfärbung								
Pfanne-Voll	22	20	21	22	21	21	1	1
Ausschlagwürze	36	39	37	31	36	28	3	4
Kühlmitte	43	44	42	40	42	39	2	2

10.4.5 Analysen der Sude mit dem DSVD-System – Variation der Kochparameter

	1. Variation - Sude 1/2	2. Variation - Sude 3/4
Befüllen + Aufheizen		
Dampfdruck in bar	1,5	0,84
Dampftemperatur in °C	139,6	135,90
Temp. DSVD in °C	98,7	97,75
Temp. WHP in °C	93,9	93,10
Dauer in min	0:20:13	0:24:54
Aufheizen zum Kochen		
Dampfdruck Phase 1 in bar	1,5	2,2
Dampfdruck Phase 2 in bar	1,5	1,5
Dampftemperatur Phase 1 in °C	138,6	137,1
Dampftemperatur Phase 2 in °C	138,6	135,4
Temp. DSVD Phase 1 in °C	99,3	98,7
Temp. DSVD Phase 2 in °C	99,3	98,8
Temp. WHP Phase 1	95,5	92,95
Temp. WHP Phase 2	95,5	95,5
Dauer Phase 1 in min		5:01:00
Dauer Phase 2 in min	0:15:24	0:34:56
Kochen		
Dampfdruck Kochen Phase 1 in bar	1,2	1
Dampftemperatur Phase 1 in °C	136,75	131,7
Dauer Phase 1 in min	10	77
Dampfdruck Kochen Phase 2 in bar	0,6	
Dampftemperatur in Phase 2 °C	129,7	
Dauer Phase 2 in min	30	
Temp. DSVD-Rinne	98,7	98,65
Temp. WHP	96,4	96,35
Dauer Kochen in min	0:44:21	1:17:11
WHP-Rast	0:24:52	0:24:52
Strippen		
Dampfdruck in bar	0,8	1
Dampftemperatur in °C	125,9	131,3
Temp. DSVD-Rinne in °C	98,9	98,8
Dauer in min	0:54:00	0:22:46

	Sude 1/2	Sude 3/4
Extrakt % GG		
Pfanne-Voll	10,70	10,87
Ausschlagwürze	11,57	11,89
Kühlmitte	11,79	12,19
Extraktzunahme in °P	1,09	1,32
Gesamtverdampfung	10,19	12,10
Verdampfung beim Kochen	8,13	9,35
Verdampfung beim Strippen	1,90	2,53
pH-Wert		
Pfanne-Voll	5,69	5,70
Ausschlagwürze	5,59	5,53
Kühlmitte	5,52	5,47
noch koag. N		
Pfanne-Voll	39,0	35,0
Ausschlagwürze	28,0	26,0
Kühlmitte	29,0	25,0
Abnahme absolut	10,0	10,0
Abnahme in %	25,6	28,6
MgSO₄-fällb. N		
Pfanne-Voll	17,5	
Ausschlagwürze	18,9	
Kühlmitte	19,6	
TBZ		
Pfanne-Voll	16,0	16,5
Ausschlagwürze	30,0	30,5
Kühlmitte	34,0	37,5
Zunahme	18,0	21,0
freies DMS in µg/l		
Pfanne-Voll	226	191
Ausschlagwürze	68	54
Kühlmitte	43	16
Abnahme absolut	183	175
Abnahme in %	81	92
DMS-P in µg/l		
Pfanne-Voll	794	871
Ausschlagwürze	286	126
Kühlmitte	135	76
Abnahme absolut	659	795
Abnahme in %	83	91
gesamtlösl. N in mg/l		
Pfanne-Voll	95,6	
Ausschlagwürze	98,0	
Kühlmitte	99,1	

	Sude 1/2	Sude 3/4
ITT 80 % Entfärbung		
Pfanne-Voll	16	25
Ausschlagwürze	32	33
Kühlmitte	34	45
Bittereinheiten		
Pfanne-Voll	6,0	9,0
Ausschlagwürze	39,0	39,0
Kühlmitte	46,0	47,0
Kondensatmengen in l		
abgeläuterte Menge in hl	164	
nach Kochende	408	
nach Strippen	639	
Verdampfung Kochen	2,64	
Verdampfung Strippen	1,23	

10.4.6 Bieranalysen

10.4.6.1 Analysen der konventionellen Kochung

Bierprobe	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Stammwürze [% GG]	11,64	11,57	11,58	11,58	11,59	11,59	0,03	0,03
Alkohol [% GG]	4,14	4,11	4,11	4,12	4,12	4,12	0,01	0,01
pH-Wert	4,55	4,47	4,52	4,52	4,51	4,51	0,03	0,03
scheinbarer Extrakt [% GG]	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	1,70	0,00	0,00
wirklicher Extrakt [% GG]	3,59	3,58	3,58	3,58	3,59	3,58	0,01	0,01
scheinbare Vergärung	86,00	85,80	85,90	85,80	85,90	85,88	0,08	0,10
wirkliche Vergärung	70,30	70,20	70,20	70,20	70,20	70,22	0,04	0,05
Farbe [EBC]	6,00	6,00	6,25	6,00	6,00	6,05	0,11	0,13
Jodprobe, visuell	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ			
Endvergärungsgrad [%]	86,75	86,18	86,26	86,20	86,13	86,30	0,25	0,29
noch koag. N [mg/10ml]	1,4	1,5	1,5	1,4	1,4	1,4	0,1	0,1
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	14,2	14,7	14,5	14,0	15,1	14,5	0,4	0,5
gesamtlösl. N [mg/100ml]	78,1	77,7	78,8	77,1	79,5	78,2	0,9	1,1
Schaumstabilität n. NIBEM	314	316	291	311	300	306	10,6	12
Schaumstabilität n. R & C	128	125	130	126	123	126	2,7	3
Reduktionsvermögen	31,0	32,0	31,0	31,0	32,0	31,4	0,5	1
Bittereinheiten [EBC]	28	29	28	29	30	29	0,8	1,0
α-Säure [mg/l]	2	2	2	2	3	2	0,4	0,5
Iso-α-Säure [mg/l]	30	30	30	31	32	31	0,9	1,0
Forciertest [Warmtage]	1	1	2	1	1	1	0,4	0,5
Werte bez. auf 12 °P								
noch koag. N [mg/100ml]	1,4	1,6	1,6	1,5	1,4	1,5	0,1	0,1
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	14,6	15,2	15,0	14,5	15,6	15,0	0,5	0,5
gesamtlösl. N [mg/100ml]	80,5	80,6	81,6	79,9	82,3	81,0	1,0	1,1

10.4.6.2 Analysen der ersten DSVD-Reihe

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bierprobe								
Stammwürze [% GG]	11,58	11,49	11,55	11,55	11,53	11,54	0,03	0,04
Alkohol [% GG]	4,20	4,17	4,19	4,19	4,18	4,19	0,01	0,01
pH-Wert	4,85	4,73	4,79	4,79	4,81	4,79	0,04	0,05
scheinbarer Extrakt [% GG]	1,49	1,47	1,50	1,50	1,49	1,49	0,01	0,01
wirklicher Extrakt [% GG]	3,41	3,37	3,41	3,41	3,40	3,40	0,02	0,02
scheinbare Vergärung	87,60	87,70	87,50	87,50	87,50	87,56	0,09	0,10
wirkliche Vergärung	71,60	71,70	71,50	71,60	71,60	71,60	0,07	0,08
Farbe [EBC]	5,00	5,25	5,00	5,00	5,00	5,05	0,11	0,13
Jodprobe, visuell	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ			
Endvergärungsgrad [%]	88,26	87,75	87,74	87,56	87,63	87,79	0,28	0,32
noch koag. N [mg/100ml]	2,0	2,2	2,2	2,1	2,3	2,2	0,1	0,1
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	8,2	8,8	9,5	8,9	9,9	9,1	0,7	0,8
gesamtlösl. N [mg/100ml]	69,3	70,7	71,1	68,9	69,7	69,9	0,9	1,1
Schaumstabilität n. NIBEM	302	313	318	321	319	315	8	9
Schaumstabilität n. R & C	133	136	132	137	138	135	3	3
Reduktionsvermögen	24,0	26,0	27,0	26,0	26,0	25,8	1,1	1,3
Bittereinheiten	25	26	26	25	27	26	0,8	1,0
α-Säure	2	2	2	2	2	2	0,0	0,0
Iso-α-Säure	29	28	29	28	30	29	0,8	1,0
Forciertest [Warmtage]	10	10	10	11	10	10	0,4	0,5
Werte bez. auf 12 °P								
noch koag. N [mg/100ml]	2,07	2,30	2,29	2,18	2,39	2,25	0,12	0,14
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	8,50	9,19	9,87	9,25	10,30	9,42	0,69	0,80
gesamtlösl. N [mg/100ml]	71,81	73,84	73,87	71,58	72,54	72,73	1,09	1,25

10.4.6.3 Analysen der zweiten DSVD-Reihe

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bierproben								
Stammwürze [% GG]	11,64	11,66	11,58	11,56	11,60	11,61	0,04	0,05
Alkohol [% GG]	4,19	4,19	4,24	4,24	4,25	4,22	0,03	0,03
pH-Wert	4,63	4,63	4,57	4,59	4,59	4,60	0,03	0,03
scheinbarer Extrakt [% GG]	1,60	1,60	1,40	1,40	1,40	1,48	0,11	0,13
wirklicher Extrakt [% GG]	3,51	3,51	3,34	3,33	3,34	3,41	0,10	0,11
scheinbare Vergärung	86,80	86,80	88,40	88,40	88,40	87,76	0,88	1,01
wirkliche Vergärung	71,00	71,00	72,30	72,30	72,30	71,78	0,71	0,82
Farbe [EBC]	5,10	5,25	5,30	5,20	5,20	5,21	0,07	0,09
Jodprobe, visuell	negativ	negativ	negativ	negativ	negativ			
scheinbarer Extrakt [% GV]	1,54	1,54	1,54	1,53	1,53			
Endvergärungsgrad [%]	87,34	87,37	87,26	87,33	87,38	87,34	0,04	0,05
noch koag. N [mg/100ml]	2,6	2,5	2,4	2,5	2,4	2,5	0,1	0,1
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,5	10,5	12,2	12,6	11,2	11,4	1,0	1,1

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Sud 4	Sud 5	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bierproben								
gesamtlösl. N [mg/100ml]	64,4	65,8	65,1	65,8	66,5	65,5	0,8	0,9
Schaumstabilität n. NIBEM	322	327	321	319	321	322	3,0	3
Schaumstabilität n. R & C	129	138	139	131	137	135	4,5	5
Reduktionsvermögen	32,0	29,0	32,0	32,0	32,0	31,4	1,3	2
Bittereinheiten [EBC]	30	30	30	30	30	30	0,1	0,1
α -Säure [mg/l]	4	4	4	4	4	4	0,3	0,3
Iso- α -Säure [mg/l]	32	32	32	32	32	32	0,2	0,3
Forciertest [Warmtage]	5	5	3	5	5	5	0,9	1,0
Werte bez. auf 12 °P								
noch koag. N [mg/100ml]	2,68	2,57	2,49	2,60	2,48	2,56	0,08	0,09
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,82	10,81	12,64	13,08	11,59	11,79	1,04	1,20
gesamtlösl. N [mg/100ml]	66,39	67,72	67,46	68,30	68,79	67,73	0,91	1,05

10.4.6.4 Analysen der Biere mit extra Hopfung nach Stripper

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Bierproben						
Stammwürze [% GG]	11,58	11,66	11,58	11,61	0,05	0,09
Alkohol [% GG]	4,24	4,19	4,24	4,22	0,03	0,05
pH-Wert	4,56	4,63	4,57	4,59	0,04	0,07
scheinbarer Extrakt [% GG]	1,39	1,60	1,40	1,46	0,12	0,22
wirklicher Extrakt [% GG]	3,33	3,51	3,34	3,39	0,10	0,19
scheinbare Vergärung	88,40	86,80	88,40	87,87	0,92	1,75
wirkliche Vergärung	72,30	71,00	72,30	71,87	0,75	1,42
Farbe [EBC]	5,25	5,25	5,30	5,27	0,03	0,05
Jodprobe, visuell	negativ	negativ	negativ			
Endvergärungsgrad [%]	86,20	86,94		86,57	0,52	0,99
noch koag. N [mg/10ml]	2,3	2,5	2,4	2,4	0,1	0,19
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,5	11,5	12,2	11,4	0,9	1,62
gesamtlösl. N [mg/100ml]	72,8	74,2	68,6	71,9	2,9	5,52
Schaumstabilität n. NIBEM	300	297	293	297	3,5	6,65
Schaumstabilität n. R & C	120	120	121	120	0,6	1,09
Reduktionsvermögen	29,0	29,0	29,0	29,0	0,0	0,00
Bittereinheiten [EBC]	30	31	31	31	0,4	0,77
α -Säure [mg/l]	3	3	3	3	0,2	0,31
Iso- α -Säure [mg/l]	32	32	32	32	0,2	0,41
Forciertest [Warmtage]	3	3	3	3	0,0	0,00
Werte bez. auf 12 °P						
noch koag. N [mg/100ml]	2,38	2,57	2,49	2,48	0,09	0,18
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,88	11,84	12,64	11,79	0,88	1,67
gesamtlösl. N [mg/100ml]	75,44	76,36	71,09	74,30	2,82	3,24

10.4.6.5 Sondersude

	mit Münchner Malz	3 Hopfengaben
Stammwürze [% GG]	11,44	11,75
Alkohol [% GG]	4,01	4,33
pH-Wert	4,58	4,59
scheinbarer Extrakt [% GG]	1,81	1,36
wirklicher Extrakt [% GG]	3,65	3,33
scheinbare Vergärung	84,7	88,9
wirkliche Vergärung	69,2	72,7
Farbe [EBC]	5,8	5
Jodprobe, visuell	negativ	negativ
Endvergärungsgrad [%]	87,35	89,08
noch koag. N [mg/10ml]	2	2,3
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,33	11,73
gesamtlösl. N [mg/100ml]	66,85	71,1
Schaumstabilität n. NIBEM	319	326
Schaumstabilität n. R & C	135	133
Reduktionsvermögen	25	31
Bittereinheiten [EBC]	31	32
α-Säure [mg/l]	3	4
Iso-α-Säure [mg/l]	31	33
Forciertest [Warmtage]	8	5
Werte bez. auf 12 °P		
noch koag. N [mg/100ml]	2,1	2,4
MgSO ₄ -fällb. N [mg/100ml]	10,84	11,99
gesamtlösl. N [mg/100ml]	70,12	72,6

10.4.7 Analysen der Versuche zur Ermittlung der minimal notwendigen Gesamtverdampfung**10.4.7.1 Analysen der Versuche mit normaler Verdampfung**

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Befüllen + Heizen	1,5	1,5	1,5			
Dampfdruck Aufheizen Phase 1 in bar	1,5	1,5	1,5			
Dampfdruck Aufheizen Phase 2 in bar	1,5	1,5	1,5			
Dauer Aufheizen in min	21	21	21			
abgeläuterte Menge in hl	165	165	165			
Temperatur Pfanne-Voll in °C	72	72	72			
Temperatur Kochen in °C	99	99	99			
Dampfdruck Kochen in bar	0,6	0,6	0,6			
Temperatur Kochen	99	99	99			
Dauer Kochen in min	35	35	35			
Dampfdruck Strippen in bar	1	1	1			
Dauer Strippen in min	50	50	50			

Extrakt % GG

Pfanne-Voll	11,16	11,03	11,40	11,20	0,19	0,47
Ausschlagwürze	11,53	11,46	11,76	11,58	0,16	0,39
Kühlmitte	11,71	11,59	11,91	11,74	0,16	0,40
Extraktzunahme in °P	0,55	0,56	0,51	0,54	0,03	0,07
Gesamtverdampfung	4,93	5,08	4,47	4,83	0,31	0,78
Verdampfung beim Kochen	3,32	3,90	3,16	3,46	0,39	0,97
Verdampfung beim Strippen	1,56	1,13	1,28	1,32	0,22	0,54

Kondensatmengen

Kondensat Aufheizen in m ³	0,3330	0,338	0,2769	0,32	0,03	0,08
Kondensat Kochen in m ³	0,2355	0,217	0,2264	0,23	0,01	0,02
Kondensat Strippen in m ³	0,2195	0,215	0,2001	0,21	0,01	0,03
gesamt 40 °C in m ³	0,7880	0,7700	0,7033	0,75	0,04	0,11
gesamt 100 °C in hl	8,02	7,84	7,16	7,67	0,45	1,13
PFV 70 °C in hl	157	157	157	157,00	0,00	0,00
PFV 100 °C in hl	159,83	159,83	159,83	159,83	0,00	0,00
Gesamtverdampfung in %	5,02	4,90	4,48	4,80	0,28	0,71
Verdampfung in % beim Aufheizen	2,12	2,15	1,76	2,01	0,22	0,54
Verdampfung in % beim Kochen	1,50	1,38	1,44	1,44	0,06	0,15
Verdampfung in % beim Strippen	1,40	1,37	1,27	1,35	0,06	0,16

pH-Wert

Pfanne-Voll	5,65	5,66	5,57	5,63	0,05	0,12
Ausschlagwürze	5,61	5,62	5,52	5,58	0,06	0,14
Kühlmitte	5,54	5,56	5,22	5,44	0,19	0,47

Farbe nach EBC

Pfanne-Voll	6,25	6,25	7,25	6,58	0,58	1,43
Ausschlagwürze	7,00	7,00	7,50	7,17	0,29	0,72
Kühlmitte	7,25	7,25	8,25	7,58	0,58	1,43
Zunahme in EBC	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	0,00

noch koag. N (Originalwert) in mg/l

Pfanne-Voll	36,0	47,0	40,0	41,0	5,6	13,83
Ausschlagwürze	24,0	31,0	24,0	26,3	4,0	10,04
Kühlmitte	26,0	28,0	23,0	25,7	2,5	6,25
Abnahme absolut	10,0	19,0	17,0	15,3	4,7	11,74
Abnahme in %	27,8	40,4	42,5	36,9	8,0	19,80

noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l

Pfanne-Voll	39,0	51,3	42,2	44,2	6,4	15,78
Ausschlagwürze	25,0	32,5	25,7	27,7	4,1	10,24
Kühlmitte	26,6	29,0	23,2	26,3	2,9	7,28
Abnahme absolut	12,4	22,3	19,1	17,9	5,0	12,52
Abnahme in %	31,8	43,5	45,1	40,1	7,3	18,07

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	15,9	14,7	15,6	15,4	0,6	1,55
Ausschlagwürze	28,9	28,5	28,7	28,7	0,2	0,50
Kühlmitte	33,6	33,6	32,7	33,3	0,5	1,29
Zunahme	17,7	18,9	17,1	17,90	0,92	2,28
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	17,2	16,0	16,5	16,6	0,6	1,52
Ausschlagwürze	30,1	29,9	30,7	30,2	0,4	1,11
Kühlmitte	34,4	34,8	32,9	34,0	1,0	2,44
Zunahme	17,2	18,8	16,5	17,47	1,17	2,90
freies DMS (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	251	256	258	255	4	8
Ausschlagwürze	80	57	100	79	22	53
Kühlmitte	72	57	75	68	10	23
Abnahme absolut	179	199	183	187	11	26
Abnahme in %	71	78	71	73	4	9,50
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	272	279	272	275	4	10
Ausschlagwürze	83	60	107	83	24	58
Kühlmitte	74	59	76	69	9	22
Abnahme absolut	198	220	197	205	13	32
Abnahme in %	73	79	72	75	4	9,06
DMS-P (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	360	356	355	357	3	6
Ausschlagwürze	98	109	98	102	6	15
Kühlmitte	35	47	45	42	6	15
Abnahme absolut	325	309	310	315	9	22
Abnahme in %	90	87	87	88	2	4,66
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	390	388	375	385	9	21
Ausschlagwürze	102	114	105	107	6	15
Kühlmitte	36	49	45	43	7	16
Abnahme absolut	355	340	329	341	13	31
Abnahme in %	91	87	88	89	2	4,52
Bitterstoffe in mg/l						
Pfanne-Voll	14,9	14,7	15,9	15,2	0,6	1,60
Ausschlagwürze	41,0	42,6	39,1	40,9	1,8	4,35
Kühlmitte	49,8	50,2	48,8	49,6	0,7	1,75

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Würzearomastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	218	193	318	243	66,14	164,32
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	135	135	n. a.	n. a.
Methional	55	43	48	49	6,03	14,97
Benzaldehyd	4,9	5,3	5,5	5	0,31	0,76
2-Phenylethanal	279	239	288	269	26,08	64,80
Summe Streckeraldehyde	557	480	794	610	163,65	406,57
Pentanal	0,7	0,6	0,4	1	0,15	0,38
2-Pentanon	1,6	1,7	1,8	2	0,10	0,25
Hexanal	49	37	60	49	11,50	28,58
Heptanal	2,5	2	3	3	0,50	1,24
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,5	0,6	1,1	1	0,32	0,80
2-Furfural	67	50	100	72	25,42	63,16
2-ac-Furan	2,2	3,8	n. n.	3	1,13	2,81
γ-Nonalacton	3,4	3,5	6,8	5	1,93	4,81
3-me-Butanol	62	81	113	85	25,77	64,03
2-me-Butanol	29	36	41	35	6,03	14,97
1-Pentanol	4	Sp.	27	16	n. n.	n. n.
1-Hexanol	19	23	34	25	7,77	19,30
1-Octanol	1	0,9	4,1	2	1,82	4,52
1-Octen-3-ol	2,1	1,9	6,8	4	2,77	6,89
Phenyl-OH	75	71	150	99	44,50	110,56
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	2,7	5,1	3,1	4	1,29	3,19
Geraniol			17,8	17,8		
Würzearomastoffe – vor Strippen						
3-me-Butanal	93	91	132	105,3	23,12	57,43
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	42	42,0		
Methional	44	39	30	37,7	7,09	17,63
Benzaldehyd	2,6	2,5	3,5	2,9	0,55	1,37
2-Phenylethanal	267	261	301	276,3	21,57	53,59
Summe Streckeraldehyde	407	394	509	436,7	62,98	156,46
Pentanal	0,8	1	0,8	0,9	0,12	0,29
2-Pentanon	0,6	0,8	0,8	0,7	0,12	0,29
Hexanal	6,5	6,8	10	7,8	1,94	4,82

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Heptanal	1,1	1,1	1,3	1,2	0,12	0,29
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,7	0,7	0,7	0,00	0,00
2-Furfural	288	264	352	301,3	45,49	113,01
2-ac-Furan	2,1	2,2	n. n.	2,2	0,07	0,18
g-Nonalacton	3,7	3	6,5	4,4	1,85	4,60
3-me-Butanol	19	21	43	27,7	13,32	33,08
2-me-Butanol	8,2	10	13	10,4	2,42	6,02
1-Pentanol	3,2	2,7	4,8	3,6	1,10	2,73
1-Hexanol	6,1	7	10	7,7	2,04	5,07
1-Octanol	0,9	0,9	2,4	1,4	0,87	2,15
1-Octen-3-ol	1,5	1,6	1,7	1,6	0,10	0,25
Phenyl-OH	75	74	127	92,0	30,32	75,31
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	2,5	3,7	3,3	3,2	0,61	1,52
Geraniol	0	0	23,2	7,7	13,39	33,28
Würzearomastoffe – nach Strippen						
3-me-Butanal	65	60	84	70	12,66	31,46
2-me-Butanal	0	0	26	9	15,01	37,29
Methional	33	30	29	31	2,08	5,17
Benzaldehyd	2,4	2,3	3,5	3	0,67	1,65
2-Phenylethanal	252	248	293	264	24,91	61,88
Summe Streckeraldehyde	352	341	435	376	51,39	127,67
Pentanal	0,8	0,8	0,6	1	0,12	0,29
2-Pentanon	0,6	0,6	0,6	1	0,00	0,00
Hexanal	4,5	4,3	6	5	0,93	2,31
Heptanal	0,8	0,5	0	0	0,40	1,00
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,8	0,6	0,6	1	0,12	0,29
2-Furfural	274	239	333	282	47,51	118,03
2-ac-Furan	2,8	2,4	0	2	1,51	3,76
γ-Nonalacton	3,2	3,1	6,5	4	1,93	4,81
3-me-Butanol	17	16	34	22	10,12	25,13
2-me-Butanol	6,8	6,6	11	8	2,48	6,17
1-Pentanol	Sp.	Sp.	6,1	6		
1-Hexanol	4,7	4,3	7,6	6	1,80	4,47
1-Octanol	Sp.	Sp.	1,4	1		
1-Octen-3-ol	Sp.	Sp.	1,4	1		
Phenyl-OH	76	72	136	95	35,85	89,07
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3	Sp.	2,2	3	0,57	1,41
Geraniol			23,2	23		

10.4.7.2 Versuche mit reduzierter Verdampfung

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Befüllen + Heizen	0,9	0,9	0,9			
Dampfdruck Aufheizen Phase 1 in bar	1,5	1,5	1,5			
Dampfdruck Aufheizen Phase 2 in bar	1	1	1			
Dauer Aufheizen in min	27	27	27			
abgeläuterte Menge in hl	165	165	165			
Temperatur Pfanne-Voll in °C	72	72	72			
Temperatur Kochen in °C	99	99	99			
Dampfdruck Kochen in bar	0,1	0,1	0,1			
Dampfdruck Strippen in bar	0,7	0,7	0,7			
Temperatur Strippen	99	99	99			
Dauer Strippen in min	50	50	50			
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	11,60	11,38	11,37	11,45	0,13	0,32
Ausschlagwürze	11,72	11,44	11,57	11,58	0,14	0,35
Kühlmitte	11,88	11,68	11,71	11,76	0,11	0,27
Extraktzunahme in °P	0,28	0,30	0,34	0,31	0,03	0,08
Gesamtverdampfung	2,41	2,64	2,99	2,68	0,29	0,72
Verdampfung beim Kochen	1,03	0,53	1,76	1,11	0,62	1,54
Verdampfung beim Strippen	1,37	2,10	1,21	1,56	0,47	1,18
Kondensatmengen						
Kondensat Aufheizen in m ³	0,1696	0,2660	0,2906	0,24	0,06	0,16
Kondensat Kochen in m ³	0,0357	0,0060	0,0144	0,02	0,02	0,04
Kondensat Strippen in m ³	0,1646	0,1454	0,1556	0,16	0,01	0,02
gesamt 40 °C in m ³	0,3698	0,4174	0,4606	0,42	0,05	0,11
gesamt 100 °C in hl	3,76	4,25	4,69	4,23	0,46	1,15
PFV 70 °C in hl	157	157	157	157,00	0,00	0,00
PFV 100 °C in hl	159,83	159,83	159,83	159,83	0,00	0,00
Gesamtverdampfung in %	2,36	2,66	2,93	2,65	0,29	0,72
Verdampfung in % beim Aufheizen	1,08	1,69	1,85	1,54	0,41	1,01
Verdampfung in % beim Kochen	0,23	0,04	0,09	0,12	0,10	0,24
Verdampfung in % beim Strippen	1,05	0,93	0,99	0,99	0,06	0,15
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,59	5,62	5,62	5,61	0,02	0,04
Ausschlagwürze	5,54	5,58	5,58	5,57	0,02	0,06
Kühlmitte	5,48	5,56	5,54	5,53	0,04	0,10
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	8,00	7,00	7,25	7,42	0,52	1,29
Ausschlagwürze	7,75	7,00	7,25	7,33	0,38	0,95
Kühlmitte	8,25	7,25	7,50	7,67	0,52	1,29
Zunahme in EBC	0,25	0,25	0,25	0,25	0,00	0,00

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
noch koag. N (Originalwert) in mg/l						
Pfanne-Voll	37,0	38,0	36,0	37,0	1,0	2,48
Ausschlagwürze	22,0	25,0	25,0	24,0	1,7	4,30
Kühlmitte	24	25	20	23,0	2,6	6,57
Abnahme absolut	13,0	13,0	16,0	14,0	1,7	4,30
Abnahme in %	35,1	34,2	44,4	37,9	5,7	14,06
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	38,3	40,1	38,0	38,8	1,2	2,86
Ausschlagwürze	22,6	26,3	26,0	24,9	2,0	5,07
Kühlmitte	24,2	25,7	20,6	23,5	2,7	6,61
Abnahme absolut	14,1	14,4	17,4	15,3	1,8	4,56
Abnahme in %	36,9	35,9	45,9	39,5	5,5	13,72
TBZ (Originalwert)						
Pfanne-Voll	17,2	15,9	16,4	16,5	0,7	1,63
Ausschlagwürze	28,7	28,2	28,3	28,4	0,3	0,66
Kühlmitte	32,8	32,1	32,2	32,4	0,4	0,94
Zunahme	15,6	16,2	15,8	15,9	0,3	0,76
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	17,8	16,8	17,3	17,3	0,5	1,28
Ausschlagwürze	29,5	29,6	29,4	29,5	0,1	0,25
Kühlmitte	33,1	33,0	33,1	33,1	0,0	0,07
Zunahme	15,3	16,3	15,8	15,8	0,5	1,23
freies DMS (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	259	261	262	261	2	3
Ausschlagwürze	130	82,0	81	98	28	69
Kühlmitte	51	70	73	65	12	29
Abnahme absolut	208	191	189	196	10	25
Abnahme in %	80	73	72	75	4	11
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	268	276	277	274	4	11
Ausschlagwürze	134	86	84	101	28	69
Kühlmitte	51	72	75	66	13	31
Abnahme absolut	217	204	201	207	8	20
Abnahme in %	81	74	73	76	4	10
DMS-P (Originalwert) in µg/l						
Pfanne-Voll	344	318	299	320	23	56
Ausschlagwürze	107	105	96	103	6	14
Kühlmitte	44	42	46	44	2	5
Abnahme absolut	300	276	253	276	24	58
Abnahme in %	87	87	85	86	1	3

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	356	336	316	336	20	51
Ausschlagwürze	110	110	100	107	6	15
Kühlmitte	44	43	47	45	2	5
Abnahme absolut	312	293	268	291	22	54
Abnahme in %	88	87	85	87	1	3
Bitterstoffe in mg/l						
Pfanne-Voll	16,2	15,2	14,9	15,4	0,7	1,69
Ausschlagwürze	41,5	41,4	42,5	41,8	0,6	1,51
Kühlmitte	51,5	46,3	49	48,9	2,6	6,46
Würzearomastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	337	145	219	234	96,84	240,57
2-me-Butanal	146	n. a.	n. a.	146	n. a.	n. a.
Methional	43	25	56	41	15,57	38,67
Benzaldehyd	5,3	2,1	7	4,8	2,49	6,18
2-Phenylethanal	271	215	265	250	30,75	76,38
Summe Strecker-aldehyde	783	387	547	572	199,21	494,91
Pentanal	sp.	0,7	0,5	0,6	0,14	0,35
2-Pentanon	1,6	1,6	1,7	1,6	0,06	0,14
Hexanal	64	25	50	46	19,76	49,08
Heptanal	3,2	1,4	2,7	2,4	0,93	2,31
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,5	0,7	0,6	0,12	0,29
2-Furfural	84	52	72	69	16,17	40,16
2-ac-Furan	n. n.	2,1	1,5	1,8	0,42	1,05
γ-Nonalacton	6,6	3,5	3	4,4	1,95	4,84
3-me-Butanol	105	118	61	95	29,87	74,21
2-me-Butanol	39	44	29	37	7,64	18,97
1-Pentanol	23	8,1	2,9	11	n. n.	n. n.
1-Hexanol	34	37	20	30	9,07	22,54
1-Octanol	2,2	1,6	0,9	1,6	0,65	1,62
1-Octen-3-ol	4,5	3,8	2,3	3,5	1,12	2,79
Phenyl-OH	137	108	81	109	28,01	69,58
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3,5	3,3	3,6	3,5	0,15	0,38
Geraniol	18,8			18,8		
Würzearomastoffe – vor Strippen						
3-me-Butanal	180	108	103	130	43,09	107,04
2-me-Butanal	58	n. a.	n. a.	58		
Methional	22	42	43	36	11,85	29,43
Benzaldehyd	4,9	3	3	3,6	1,10	2,73
2-Phenylethanal	350	253	268	290	52,21	129,72
Summe Strecker-aldehyde	616	406	417	480	118,20	293,64
Pentanal	0,9	0,9	0,9	0,9	0,00	0,00
2-Pentanon	1,1	0,9	0,9	1,0	0,12	0,29
Hexanal	15	15	9,3	13	3,29	8,18

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Heptanal	1,7	1,4	1,2	1,4	0,25	0,63
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,8	0,7	0,8	0,8	0,06	0,14
2-Furfural	364	254	267	295	60,11	149,33
2-ac-Furan	2,7	4,6	2,5	3,3	1,16	2,88
γ -Nonalacton	6,4	3,8	3,1	4,4	1,74	4,32
3-me-Butanol	60	26	27	38	19,35	48,07
2-me-Butanol	19	11	12	14	4,36	10,83
1-Pentanol	11	2,6	3,5	6	4,61	11,46
1-Hexanol	16	7,4	8,5	11	4,68	11,63
1-Octanol	3,9	1,3	1,3	2,2	1,50	3,73
1-Octen-3-ol	3	2,1	1,8	2,3	0,62	1,55
Phenyl-OH	132	76	71	93	33,87	84,14
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3,1	2,8	3,2	3,0	0,21	0,52
Geraniol	67,1			67,1		
Würzearomastoffe – nach Strippen						
3-me-Butanal	105	63	72	80	22,11	54,94
2-me-Butanal	34	n. a.	n. a.	34		
Methional	23	38	44	35	10,82	26,87
Benzaldehyd	4,3	2,6	3,2	3,4	0,86	2,14
2-Phenylethanal	319	242	270	277	38,97	96,83
Summe Streckeraldehyde	486	346	389	407	71,71	178,16
Pentanal	0,8	0,8	0,8	0,8	0,00	0,00
2-Pentanon	0,9	0,6	0,7	0,7	0,15	0,38
Hexanal	8,7	4,3	6	6	2,22	5,51
Heptanal	n. a.	0,8	0,9	0,9	0,07	0,18
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,7	0,8	0,7	0,7	0,06	0,14
2-Furfural	352	246	262	287	57,14	141,96
2-ac-Furan	n. a.	1,6	2,4	2,0	0,57	1,41
γ -Nonalacton	6,7	3,7	3,3	4,6	1,86	4,62
3-me-Butanol	50	21	22	31	16,46	40,90
2-me-Butanol	16	8,5	10	12	3,97	9,86
1-Pentanol	11	Sp.	Sp.	11		
1-Hexanol	12	5,6	7,1	8	3,35	8,32
1-Octanol	1,5	0,9	1	1,1		
1-Octen-3-ol	2,1	1,3	1,5	1,6		
Phenyl-OH	146	84	76	102	38,31	95,19
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	2,6	2,6	2,7	2,6	0,06	0,14
Geraniol	23,3			23,3		

10.4.7.3 Bieranalysen zu Verdampfungsversuchen

		normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Stammwürze	GG %	11,54	11,66
	GV %	12,06	12,19
Alkohol	GG %	4,05	4,1
	GV %	5,16	5,21
Extrakt, scheinbar	GG %	1,82	1,83
	GV %	1,83	1,85
Extrakt, wirklich	GG %	3,67	3,71
	GV %	3,69	3,73
Ausstoß-V°, scheinbar	%	85	85
Ausstoß-V°, wirklich	%	69	69
End-V°, scheinbar	%	85	85
End-V°, wirklich	%	69	69
pH-Wert		4,52	4,52
Farbe	EBC	4,5	4,5
	Brand	0,27	0,27
Aussehen		klar	klar
Jodprobe, visuell		negativ	negativ
Schaum R & C		133	131
noch koag. N		2,5	2,5
Forciertest 0/60°C		3	4
DMS frei		82	92
TBZ		27,2	27,9

Bewertung nach DLG, frische Biere

	normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Farbe	typgerecht	typgerecht
Schaum	visuell sehr gut	visuell sehr gut
Geruch	Spur roh, etwas spelzenartig	rein
Geschmack	Spur roh, etwas spelzenartig, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, Spur anhängend	rein, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, im Abtrunk normal
Wertung	2	1

Bewertung nach DLG, forciert gealterte Biere

	normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Farbe	typgerecht	typgerecht
Schaum	visuell sehr gut	visuell sehr gut
Geruch	rein, etwas spelzenartig	rein
Geschmack	Spur roh, etwas gemüseartig, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, Spur anhängend	rein, schlank, rezent, Bittere sehr kräftig, im Abtrunk normal
Wertung	4	3

10.4.7.4 Bieraromastoffe

	normale Verdampfung	geringe Verdampfung
Hexanol-1	14	17
Heptanol-1	5,2	5,1
Octanol-1	12	13
Decanol-1	5,4	6,3
2-Phenylethanol	24	27
Furfurylalkohol	0,35	0,24
Essigsäure-Isobutylester	0,04	0,04
Essigsäure-Hexylester	5,2	6,2
Essigsäure-Heptylester	2,6	3,4
Essigsäure-Octylester	4,8	4,4
Essigsäure-Furfurylester	5	3,4
Essigsäure-2-Phenylethylester	0,4	0,44
Buttersäure-Ethylester	0,15	0,14
Hexansäure-Ethylester	0,14	0,13
Octansäure-Ethylester	0,19	0,2
Decansäure-Ethylester	0,02	0,02
Isovaleriansäure	0,47	0,3
Hexansäure	1,3	1,1
Octansäure	4,3	4,3
Nonansäure	0,01	0,01
Decansäure	0,45	0,45
9-Decensäure	0,08	0,06
Dodecansäure	sp.	0,01
α -Terpineol	5,4	5,3
Linalool	17	20
Nerol	2,2	2,9
γ -Nonalacton	16	17

10.4.7.5 Alterungskomponenten

	normale	geringe	normale	geringe
	Verdampfung frisch	Verdampfung frisch	Verdampfung gealtert	Verdampfung gealtert
2-Methyl-Butanal	18	20	19	21
3-Methyl-Butanal	11	9,3	14	12
2-Furfural	7,3	8,7	71	74
5-Methyl-Furfural	5,1	5,6	5,3	6
Benzaldehyd	0,7	0,5	0,8	0,7
2-Phenylethanal	6,8	6,2	11	10
Bernsteinsäure-Diethylester	1,9	1,8	2	1,9
Nicotinsäure-Ethylester	11	9,9	12	15
Phenyllessigsäure-Ethylester	1,1	1	1,2	1,1
2-Acetyl-Furan	4	4,9	6,2	6,6
2-Propionyl-Furan	3,5	3,3	3,7	3,5
γ -Nonalacton	29	32	32	37
Summe der Wärmeindikatoren	36	41	103	111
Summe der Sauerstoffindikatoren	19	16	26	22
Summe der Alterungskomponenten	71	74	147	152

10.5 Analysen zum Vergleich des DSVD-Systems mit einem Innenkocher

10.5.1 Analysen der Kochung mit Innenkocher

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Aufheizen	2,5	2,5	2,5			
abgeläuterte Menge in hl	260	260	260			
Temperatur Pfanne-Voll in °C	74	74	74			
Temperatur Kochen in °C	99	99	99			
Dampfdruck Kochen in bar	2,5	2,5	2,5			
Dauer Kochen in min	70	70	70			
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	11,13	11,23	11,24	11,20	0,06	0,15
Ausschlagwürze	11,92	11,97	12,10	12,00	0,09	0,23
Kühlmitte	11,90	11,99	12,09	11,99	0,10	0,24
Extraktzunahme in °P	0,77	0,76	0,85	0,79	0,05	0,12
Gesamtverdampfung	6,92	6,77	7,56	7,08	0,42	1,05
Verdampfung beim Kochen	7,10	6,59	7,65	7,11	0,53	1,32
Verdampfung beim Strippen	-0,17	0,17	-0,08	-0,03	0,17	0,43
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,07	5,01	5,01	5,03	0,03	0,09
Ausschlagwürze	5,01	4,96	4,97	4,98	0,03	0,07
Kühlmitte	4,96	4,94	4,95	4,95	0,01	0,02
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	7,25	7,25	7,00	7,17	0,14	0,36
Ausschlagwürze	10,00	9,75	10,00	9,92	0,14	0,36
Kühlmitte	13,50	10,00	13,50	12,33	2,02	5,02
Zunahme in EBC	6,25	2,75	6,50	5,17	2,10	5,21
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	23,0	21,0	20,0	21,3	1,5	3,79
Ausschlagwürze	12,0	10,0	9,0	10,3	1,5	3,79
Kühlmitte	5,0	3,0	2,0	3,3	1,5	3,79
Abnahme absolut	18,0	18,0	18,0	18,0	0,0	0,00
Abnahme in %	78,3	85,7	90,0	84,7	5,9	14,76
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	24,9	22,5	21,4	22,9	1,8	4,43
Ausschlagwürze	12,1	10,0	8,9	10,3	1,6	3,97
Kühlmitte	5,0	3,0	2,0	3,3	1,6	3,86
Abnahme absolut	19,8	19,5	19,4	19,6	0,2	0,57
Abnahme in %	79,7	86,7	90,7	85,7	5,6	13,80

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	32,3	31,9	32,8	32,3	0,5	1,12
Ausschlagwürze	56,2	56,6	59,7	57,5	1,9	4,76
Kühlmitte	67,6	63,3	62,6	64,5	2,7	6,73
Zunahme	35,3	31,4	29,8	32,17	2,83	7,03
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	34,9	34,1	35,1	34,7	0,5	1,25
Ausschlagwürze	56,5	56,7	59,1	57,4	1,5	3,61
Kühlmitte	68,1	63,2	62,0	64,4	3,2	7,98
Zunahme	33,2	29,1	26,9	29,75	3,16	7,85
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	167	162	119	149	26	65,56
Ausschlagwürze	10	22	10	14	7	17,21
Kühlmitte	39	37	16	31	13	31,65
Abnahme absolut	128	125	103	119	14	33,91
Abnahme in %	77	77	87	80	6	13,86
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	181	173	127	160	29	71,86
Ausschlagwürze	11	24	11	15	7	18,34
Kühlmitte	42	40	17	33	14	34,24
Abnahme absolut	138	134	110	127	15	37,65
Abnahme in %	77	77	87	80	6	13,86
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	186	190	179	185	6	13,83
Ausschlagwürze	51	47	34	44	9	22,08
Kühlmitte	14	24	25	21	6	15,11
Abnahme absolut	172	166	154	164	9	22,77
Abnahme in %	92	87	86	89	3	8,44
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	201	203	191	199	6	15,76
Ausschlagwürze	55	50	36	47	10	24,23
Kühlmitte	15	26	27	23	6	15,93
Abnahme absolut	186	178	165	176	11	26,67
Abnahme in %	92	87	86	89	3	8,44
Bitterstoffe in mg/l						
Pfanne-Voll α	1	1	1	1,0	0,0	0,00
Pfanne-Voll Iso- α	1	2	1	1,3	0,6	1,43
Ausschlagwürze α	12,0	13	8	11,0	2,6	6,57
Ausschlagwürze Iso- α	18,0	25	27	23,3	4,7	11,74
Kühlmitte α	11	16	14,0	13,7	2,5	6,25
Kühlmitte Iso- α	30	27	33	30,0	3,0	7,45

Würzearomastoffe – Pfanne-Voll in µg/l	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
3-me-Butanal	450	438	384	424	35,16	87,34
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Methional	148	189	123	153	33,32	82,78
Benzaldehyd	7,7	7,7	6,1	7	0,92	2,29
2-Phenylethanal	342	367	321	343	23,03	57,21
Summe Streckeraldehyde	948	1001	833	927	85,89	213,37
Pentanal	0,5	0,5	0,6	1	0,06	0,14
2-Pentanon	2	2,5	2	2	0,29	0,72
Hexanal	88	84	69	80	10,02	24,88
Heptanal	5	4,3	4,2	5	0,44	1,08
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,4	0,4	0,4	0	0,00	0,00
2-Furfural	181	177	144	167	20,31	50,45
2-ac-Furan	3,8	5,4	3,8	4	0,92	2,29
γ-Nonalacton	11	11	11	11	0,00	0,00
3-me-Butanol	206	201	209	205	4,04	10,04
2-me-Butanol	81	65	63	70	9,87	24,51
1-Pentanol	Sp.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Hexanol	1,5	2,1	Sp.	2	0,42	1,05
1-Octanol	1,4	Sp.	1,1	1	0,21	0,53
1-Octen-3-ol	1,8	2	2	2	0,12	0,29
Phenyl-OH	239	208	243	230	19,16	47,59
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	8,6	8,9	5,7	8	1,77	4,39
Würzearomastoffe – vor Strippen						
3-me-Butanal	40	53	42	45,0	7,00	17,39
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n.a.	n. a.
Methional	110	99	102	103,7	5,69	14,13
Benzaldehyd	2,4	2,2	2,1	2,2	0,15	0,38
2-Phenylethanal	233	256	231	240,0	13,89	34,51
Summe Streckeraldehyde	385	410	376	390,3	17,62	43,76
Pentanal	0,5	0,7	0,4	0,5	0,15	0,38
2-Pentanon	n. n.	0,3	Sp.	0,3		
Hexanal	3	3,1	2,6	2,9	0,26	0,66
Heptanal	0,6	0,7	0,7	0,7	0,06	0,14
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,3	0,3	0,4	0,3	0,06	0,14
2-Furfural	389	462	461	437,3	41,86	104,00
2-ac-Furan	6,5	6,5	11	8,0	2,60	6,45
γ-Nonalacton	7,3	7,4	7,1	7,3	0,15	0,38
3-me-Butanol	13	12	5,9	10,3	3,84	9,55
2-me-Butanol	8,1	7,4	3,4	6,3	2,54	6,30
1-Pentanol	3,6	Sp.	n. n.	3,6		
1-Hexanol	2	2,1	n. n.	2,1	0,07	0,18
1-Octanol	n. n.	1,1	n. n.	1,1		
1-Octen-3-ol	n. n.	3,4	n. n.	3,4		

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Phenyl-OH	171	277	212	220,0	53,45	132,79
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	3,9	3,5	2,6	3,3	0,67	1,65
Würzearomastoffe – nach Strippen						
3-me-Butanal	135	106	67	103	34,12	84,77
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Methional	106	112	93	104	9,71	24,13
Benzaldehyd	3,2	3	2	3	0,64	1,60
2-Phenylethanal	351	332	277	320	38,43	95,48
Summe Streckeraldehyde	596	553	439	529	81,13	201,56
Pentanal	1,4	1,1	0,8	1	0,30	0,75
2-Pentanon	0,3	0,4	Sp.	0	0,07	0,18
Hexanal	5,4	4,6	2,9	4	1,28	3,17
Heptanal	1,4	1,1	0,8	1	0,30	0,75
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,4	0,5	0,4	0	0,06	0,14
2-Furfural	807	704	601	704	103,00	255,89
2-ac-Furan	16	14	11	14	2,52	6,25
γ -Nonalacton	7,9	8	7	8	0,55	1,37
3-me-Butanol	15	12	5,6	11	4,80	11,93
2-me-Butanol	8	7,8	3,2	6	2,72	6,75
1-Pentanol	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.	Sp.
1-Hexanol	3,3	2,2	Sp.	3	0,78	1,93
1-Octanol	Sp.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Octen-3-ol	n. n.	Sp.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
Phenyl-OH	247	253	362	287	64,73	160,82
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	5	4,7	3,2	4	0,96	2,40
Linolensäure	0,19	0,25	0,13	0,19	0,06	0,15
Linolsäure	0,53	0,45	0,49	0,49	0,04	0,10
Ölsäure	0	0	0	0,00	0,00	0,00

10.5.2 Analysen der Kochung mit DSVD-System

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Dampfdruck Aufheizen Phase 1 in bar	2,5	2,5	2,5			
Dampfdruck Aufheizen Phase 2 in bar	1,8	1,8	1,8			
abgeläuterte Menge in hl	249	248	248			
Temperatur Pfanne-Voll in °C	74	74	74			
Temperatur Kochen in °C	99	99	99			
Dampfdruck Kochen 1 in bar	1,5	1,5	1,5			
Dauer Kochen 1 in min	15	15	15			
Dampfdruck Kochen 2 in bar	1,3	1,3	1,3			
Dauer Kochen 2 in min	20	20	20			
Dampfdruck Strippen in bar	0,9	0,9	0,9			
Temperatur Strippen	99	99	99			
Dauer Strippen in min	65	65	65			

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	11,65	11,45	11,62	11,57	0,11	0,27
Ausschlagwürze	11,84	11,65	11,80	11,76	0,10	0,25
Kühlmitte	12,17	11,97	12,17	12,10	0,12	0,29
Extraktzunahme in °P	0,52	0,52	0,55	0,53	0,02	0,04
Gesamtverdampfung	4,46	4,54	4,73	4,58	0,14	0,34
Verdampfung beim Kochen	1,63	1,75	1,55	1,64	0,10	0,25
Verdampfung beim Strippen	2,79	2,75	3,14	2,89	0,21	0,53
Extrakt % GV						
Pfanne-Voll	12,19	11,67	12,48	12,11	0,41	1,02
Ausschlagwürze	12,40	12,01	12,62	12,34	0,31	0,77
Kühlmitte	12,77	12,55	12,77	12,70	0,13	0,32
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,59	5,59	5,59	5,59	0,00	0,00
Ausschlagwürze	4,94	5,02	4,96	4,97	0,04	0,10
Kühlmitte	4,97	4,97	4,99	4,98	0,01	0,03
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	8,50	8,25	8,50	8,42	0,14	0,36
Ausschlagwürze	10,00	10,00	8,50	9,50	0,87	2,15
Kühlmitte	10,00	10,00	11,00	10,33	0,58	1,43
Zunahme in EBC	1,50	1,75	2,50	1,92	0,52	1,29
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	36,0	33,0	29,0	32,7	3,5	8,72
Ausschlagwürze	26,0	31,0	29,0	28,7	2,5	6,25
Kühlmitte	22	26	20	22,7	3,1	7,59
Abnahme absolut	14,0	7,0	9,0	10,0	3,6	8,96
Abnahme in %	38,9	21,2	31,0	30,4	8,9	22,00
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	37,1	35,5	29,2	33,9	4,2	10,40
Ausschlagwürze	26,3	32,4	28,9	29,2	3,1	7,59
Kühlmitte	21,6	26,0	19,7	22,4	3,3	8,08
Abnahme absolut	15,5	9,5	9,5	11,5	3,4	8,53
Abnahme in %	41,7	26,7	32,6	33,7	7,5	18,68
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	27,9	27,1	27,9	27,6	0,5	1,15
Ausschlagwürze	39,3	39,3	40,8	39,8	0,9	2,15
Kühlmitte	50,1	48,8	50,2	49,7	0,8	1,94
Zunahme	22,2	21,7	22,3	22,1	0,3	0,80
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	28,7	29,2	28,1	28,7	0,5	1,36
Ausschlagwürze	39,8	41,1	40,6	40,5	0,7	1,62
Kühlmitte	49,3	48,8	49,4	49,2	0,3	0,71
Zunahme	20,5	19,7	21,3	20,5	0,8	2,02

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	57	83	114	85	29	70,89
Ausschlagwürze	59	63	62	61	2	5,17
Kühlmitte	15	53	30	33	19	47,55
Abnahme absolut	42	30	84	52	28	70,44
Abnahme in %	74	36	74	61	22	53,84
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	59	89	115	88	28	69,66
Ausschlagwürze	61	68	62	64	4	9,13
Kühlmitte	15	57	30	34	21	52,38
Abnahme absolut	43	32	85	53	28	68,44
Abnahme in %	74	36	74	61	22	53,84
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	198	191	242	210	28	68,68
Ausschlagwürze	81	85	102	89	11	27,70
Kühlmitte	38	36	44	39	4	10,34
Abnahme absolut	160	155	198	171	24	58,42
Abnahme in %	81	81	82	81	1	1,28
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	204	206	244	218	22	55,63
Ausschlagwürze	83	91	103	93	10	23,95
Kühlmitte	39	39	44	41	3	7,67
Abnahme absolut	165	167	199	177	19	48,01
Abnahme in %	81	81	82	81	1	1,28
Bitterstoffe in mg/l						
Pfanne-Voll α	20	24	20	21,3	2,3	5,74
Pfanne-Voll Iso-α	4	5	4	4,3	0,6	1,43
Ausschlagwürze α	14	13	12	13,0	1,0	2,48
Ausschlagwürze Iso-α	21	21	20	20,7	0,6	1,43
Kühlmitte α	11	11	11	11,0	0,0	0,00
Kühlmitte Iso-α	29	28	27	28,0	1,0	2,48
Würzearomastoffe – Pfanne-Voll						
3-me-Butanal	311	263	241	272	35,80	88,93
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Methional	92	74	74	80	10,39	25,82
Benzaldehyd	4	3,9	3,7	3,9	0,15	0,38
2-Phenylethanal	265	241	242	249	13,58	33,73
Summe Strecker-aldehyde	672	481	562	572	95,87	238,16
Pentanal	0,5	0,4	0,5	0,5	0,06	0,14
2-Pentanon	2,2	1,6	2	1,9	0,31	0,76
Hexanal	63	34	51	49	14,57	36,20
Heptanal	3,4	2,2	3,3	3,0	0,67	1,65
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,6	0,6	0,6	0,6	0,00	0,00
2-Furfural	101	88	92	94	6,66	16,54

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
2-ac-Furan	2,3	1,9	2	2,1	0,21	0,52
γ -Nonalacton	9,2	8,8	9,2	9,1	0,23	0,57
3-me-Butanol	194	139	177	170	28,16	69,96
2-me-Butanol	46	31	40	39	7,55	18,76
1-Pentanol	Sp.	Sp.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Hexanol	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Octanol	0,9	0,7	1	0,9	0,15	0,38
1-Octen-3-ol	1,9	1,8	1,8	1,8	0,06	0,14
Phenyl-OH	179	175	176	177	2,08	5,17
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	5,4	3,7	4,1	4,4	0,89	2,21
Würzearomastoffe – vor Strippen						
3-me-Butanal	155	108	105	123	28,04	69,66
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Methional	117	107	119	114	6,43	15,97
Benzaldehyd	4,5	3,8	5,2	4,5	0,70	1,74
2-Phenylethanal	303	290	330	308	20,40	50,69
Summe Streckeraldehyde	578	508	559	548	36,20	89,93
Pentanal	0,7	0,6	0,6	0,6	0,06	0,14
2-Pentanon	1,3	1,4	1,3	1,3	0,06	0,14
Hexanal	25	16	16	19	5,20	12,91
Heptanal	2	1,8	1,6	1,8	0,20	0,50
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,5	0,5	0,6	0,5	0,06	0,14
2-Furfural	252	273	282	269	15,39	38,25
2-ac-Furan	7,1	4,3	4,5	5,3	1,56	3,88
γ -Nonalacton	8,6	10	9,4	9,3	0,70	1,74
3-me-Butanol	137	121	140	133	10,21	25,38
2-me-Butanol	45	40	44	43	2,65	6,57
1-Pentanol	3,2	Sp.	Sp.	3		
1-Hexanol	3	Sp.	Sp.	3		
1-Octanol	1,3	1,2	1,2	1,2	0,06	0,14
1-Octen-3-ol	3	2,7	1,7	2,5	0,68	1,69
Phenyl-OH	191	181	207	193	13,11	32,58
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	6,7	6,8	8,2	7,2	0,84	2,08
Würzearomastoffe – nach Strippen						
3-me-Butanal	122	49	68	80	37,87	94,09
2-me-Butanal	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.	n. a.
Methional	97	88	85	90	6,24	15,51
Benzaldehyd	4,9	3,9	3,4	4,1	0,76	1,90
2-Phenylethanal	321	292	309	307	14,57	36,20
Summe Streckeraldehyde	545	433	465	481	57,69	143,32
Pentanal	0,9	0,7	0,8	0,8	0,10	0,25
2-Pentanon	1,4	0,9	1,1	1,1	0,25	0,63
Hexanal	16	26	7,3	16	9,36	23,25
Heptanal	1,6	0,9	0,9	1,1	0,40	1,00

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
tr-2-cis-6-Nonadienal	0,6	0,5	0,5	0,5	0,06	0,14
2-Furfural	502	530	517	516	14,01	34,81
2-ac-Furan	10	7,4	8,7	8,7	1,30	3,23
γ -Nonalacton	9,2	10	10	9,7	0,46	1,15
3-me-Butanol	105	65	91	87	20,30	50,43
2-me-Butanol	34	22	29	28	6,03	14,97
1-Pentanol	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Hexanol	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.	n. n.
1-Octanol	0,6	1,6	Sp.	1,1	0,71	1,76
1-Octen-3-ol	1,8	2	1,7	1,8	0,15	0,38
Phenyl-OH	203	241	229	224	19,43	48,26
Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	6,2	6,4	6,4	6,3	0,12	0,29
Linolensäure	0,16	0,1	0,25	0,17	0,08	0,19
Linolsäure	0,54	0,56	0,58	0,56	0,02	0,05
Ölsäure	0	0	0	0,00	0,00	0,00

10.5.3 Auswirkungen des Kochsystems auf Würzen, Gärung und Filtration

10.5.3.1 Würzeanalysen der ersten Versuchsreihe

10.5.3.1.1 Innenkocher 1. Reihe

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Extrakt % GG						
Pfanne-Voll	11,22	11,34	11,27	11,28	0,06	0,15
Kühlmitte	12,37	12,24	12,18	12,26	0,10	0,24
Extraktzunahme in °P	1,15	0,90	0,91	0,99	0,14	0,35
Gesamtverdampfung	10,25	7,94	8,07	8,75	1,30	3,22
pH-Wert						
Pfanne-Voll	4,96	5,08	5,11	5,05	0,08	0,20
Kühlmitte	4,97	4,94	5,03	4,98	0,05	0,11
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	7,50	7,75	7,75	7,67	0,14	0,36
Kühlmitte	10,50	9,25	9,50	9,75	0,66	1,64
Zunahme in EBC	3,00	1,50	1,75	2,08	0,80	2,00
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	45	45	47	46	01	2,9
Kühlmitte	20	19	19	19	1	1,4
Abnahme absolut	25	26	28	26	2	3,8
Abnahme in %	55,6	57,8	59,6	57,6	2,0	5,00
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	48	48	50	49	1	3,2
Kühlmitte	19	19	19	19	0	1,0
Abnahme absolut	29	29	31	30	1	3,6
Abnahme in %	59,9	61,0	62,7	61,2	1,4	3,59

TBZ (Originalwerte)	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	32,2	30,9	31,0	31,4	0,7	1,80
Kühlmitte	59	60,1	59,3	59,5	0,6	1,41
Zunahme	26,8	29,2	28,3	28,10	1,21	3,01
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	34,5	32,7	33,1	33,4	0,9	2,32
Kühlmitte	57,0	58,7	58,3	58,0	0,9	2,18
Zunahme	22,6	26,0	25,2	24,60	1,81	4,49
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	146	108	113	122	21	51
Kühlmitte	46	45	68	53	13	32,
Abnahme absolut	100	63	45	69	28	69
Abnahme in %	68	58	40	56	15	36
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	156	114	120	130	23	56
Kühlmitte	49	48	73	56	14	34
Abnahme absolut	107	67	48	74	30	75
Abnahme in %	68	58	40	56	15	36
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	276	296	263	278	17	41
Kühlmitte	23	15	9	16	7	17
Abnahme absolut	253	281	254	263	16	39
Abnahme in %	92	95	97	94	2	6
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	296	313	280	296	17	41
Kühlmitte	25	16	10	17	8	18
Abnahme absolut	271	298	271	280	15	38
Abnahme in %	92	95	97	94	2	6
Fructose						
Pfanne-Voll	0,17	0,16	0,16	0,16	0,01	0,01
Kühlmitte	0,24	0,23	0,24	0,24	0,01	0,01
Glucose						
Pfanne-Voll	0,96	0,97	0,98	0,97	0,01	0,02
Kühlmitte	1,09	1,10	1,09	1,09	0,01	0,01
Saccharose						
Pfanne-Voll	0,27	0,27	0,26	0,3	0,0	0,01
Kühlmitte	0,28	0,28	0,28	0,3	0,0	0,00
Maltose						
Pfanne-Voll	5,46	5,44	5,37	5,42	0,05	0,12
Kühlmitte	6,07	5,97	5,91	5,98	0,08	0,20
Maltotriose						
Pfanne-Voll	1,21	1,28	1,24	1,24	0,04	0,09
Kühlmitte	1,42	1,40	1,39	1,40	0,02	0,04

Feststoffe	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
vor Plattenkühler	56	80	15	50,33	32,87	81,66
vor Flotation	116	96	35	82,33	42,19	104,82
nach Flotation	64		28	46,00	25,46	63,24
Aminosäuren – Pfanne-Voll						
Asparaginsäure	6,78	6,62	7,12	6,84	0,26	0,63
Glutaminsäure	7,51	7,20	7,72	7,48	0,26	0,65
Asparagin	11,66	10,96	11,64	11,42	0,40	0,99
Serin	7,43	7,32	7,21	7,32	0,11	0,27
Glutamin	10,61	11,95	11,09	11,22	0,68	1,69
Histidin	4,23	5,65	5,67	5,18	0,83	2,05
Glycin	2,83	3,34	3,05	3,07	0,26	0,64
Threonin	5,45	5,70	5,99	5,71	0,27	0,67
Alanin	12,97	12,54	12,47	12,66	0,27	0,67
Arginin	15,42	7,71	6,55	9,89	4,82	11,98
γ -Amino-Buttersäure	9,13	11,30	10,72	10,38	1,12	2,79
Tyrosin	11,45	9,91	11,31	10,89	0,85	2,12
Valin	13,40	13,08	13,82	13,43	0,37	0,92
Methionin	3,70	4,06	3,87	3,88	0,18	0,45
Norvalin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tryprophan	7,32	6,90	6,89	7,04	0,25	0,61
Isoleucin	6,88	6,70	6,99	6,86	0,15	0,36
Phenylalanin	14,16	13,88	14,32	14,12	0,22	0,55
Leucin	19,01	19,05	18,49	18,85	0,31	0,78
Lysin	12,70	12,44	12,19	12,44	0,26	0,63
Summe ARG + GAB	24,55	19,01	17,27	20,28	3,80	9,44
Aminosäuren – Kühlmitte						
Asparaginsäure	7,74	8,00	7,78	7,8	0,14	0,35
Glutaminsäure	8,04	8,13	7,86	8,0	0,14	0,34
Asparagin	13,93	13,40	13,20	13,5	0,38	0,94
Serin	8,42	8,22	8,03	8,2	0,20	0,48
Glutamin	2,42	2,15	1,88	2,2	0,27	0,67
Histidin	6,22	5,97	5,62	5,9	0,30	0,75
Glycin	3,84	3,67	3,61	3,7	0,12	0,30
Threonin	6,51	6,41	6,32	6,4	0,10	0,24
Alanin	14,14	13,91	13,83	14,0	0,16	0,40
Arginin	11,64	5,85	7,16	8,2	3,04	7,54
γ -Amino-Buttersäure	11,56	12,45	11,95	12,0	0,45	1,11
Tyrosin	13,17	12,39	11,92	12,5	0,63	1,57
Valin	15,19	14,91	14,72	14,9	0,24	0,59
Methionin	4,47	4,36	3,91	4,2	0,30	0,74
Norvalin	0,00	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
Tryprophan	7,41	7,47	6,90	7,3	0,31	0,78
Isoleucin	7,62	7,61	7,43	7,6	0,11	0,27
Phenylalanin	15,85	15,47	15,26	15,5	0,30	0,74

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Leucin	20,81	20,96	20,19	20,7	0,41	1,01
Lysin	14,67	13,19	12,52	13,5	1,10	2,73
Summe ARG + GAB	23,20	18,30	19,11	20,2	2,63	6,53

10.5.3.1.2 DSVD 1. Reihe

Extrakt % GG	Sud 1	Sud 2	Sud3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	11,96	11,82	11,67	11,82	0,15	0,36
Kühlmitte	12,45	12,34	12,21	12,33	0,12	0,30
Extraktzunahme in °P	0,49	0,52	0,54	0,52	0,03	0,06
Gesamtverdampfung	4,10	4,40	4,63	4,37	0,27	0,66
pH-Wert						
Pfanne-Voll	5,03	5,02	5,07	5,04	0,03	0,07
Kühlmitte	4,99	4,98	5,03	5,00	0,03	0,07
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	10,50	9,25	9,50	9,75	0,66	1,64
Kühlmitte	9,25	8,25	9,25	8,92	0,58	1,43
Zunahme in EBC	-1,25	-1,00	-0,25	-0,83	0,52	1,29
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	47	45	47	46	1	2,9
Kühlmitte	32	28	31	30	2	5,2
Abnahme absolut	15	17	16	16	1	2,5
Abnahme in %	31,9	37,8	34,0	34,6	3,0	7,37
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	47	46	48	47	1	3,3
Kühlmitte	31	27	30	29	2	4,9
Abnahme absolut	16	19	18	18	1	2,8
Abnahme in %	34,7	40,6	37,1	37,5	2,9	7,30
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	29,0	27,3	28,5	28,3	0,9	2,17
Kühlmitte	51,7	50	53,1	51,6	1,6	3,86
Zunahme	22,7	22,7	24,6	23,3	1,1	2,73
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	29,0	27,7	29,3	28,7	0,9	2,13
Kühlmitte	49,6	48,5	52,1	50,1	1,8	4,57
Zunahme	20,6	20,8	22,8	21,4	1,2	3,01
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	138	120	124	127	9	23
Kühlmitte	26	19	18	21	4	10
Abnahme absolut	112	101	106	106	6	13
Abnahme in %	81	84	85	84	2	5

freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	138	122	127	129	8	20
Kühlmitte	26	19	19	21	4	10
Abnahme absolut	112	102	109	108	5	12
Abnahme in %	81	84	85	84	2	5
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	262	319	309	297	30	75
Kühlmitte	51	46	41	46	5	12
Abnahme absolut	211	273	268	251	34	85
Abnahme in %	81	86	87	84	3	8
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	262	324	318	301	34	83
Kühlmitte	51	47	42	47	4	11
Abnahme absolut	211	277	275	255	37	93
Abnahme in %	81	86	87	84	3	8
Fructose						
Pfanne-Voll	0,17	0,16	0,19	0,17	0,02	0,04
Kühlmitte	0,22	0,21	0,24	0,22	0,02	0,04
Glucose						
Pfanne-Voll	1,02	1,01	1,03	1,02	0,01	0,02
Kühlmitte	1,10	1,07	1,12	1,10	0,03	0,06
Saccharose						
Pfanne-Voll	0,28	0,33	0,32	0,3	0,0	0,07
Kühlmitte	0,34	0,35	0,32	0,3	0,0	0,04
Maltose						
Pfanne-Voll	5,71	5,81	5,63	5,72	0,09	0,22
Kühlmitte	6,09	6,08	5,89	6,02	0,11	0,28
Maltotriose						
Pfanne-Voll	1,29	1,34	1,34	1,32	0,03	0,07
Kühlmitte	1,43	1,36	1,34	1,38	0,05	0,12
Feststoffe						
vor Plattenkühler	37	96	50	61,00	31,00	77,01
vor Flotation	120	52	180	117,33	64,04	159,10
nach Flotation	44		32	38,00	8,49	21,08
Aminosäuren – Pfanne-Voll						
Asparaginsäure	6,66	6,68	6,71	6,68	0,03	0,06
Glutaminsäure	7,58	6,89	7,19	7,22	0,35	0,86
Asparagin	10,49	9,86	10,53	10,29	0,38	0,93
Serin	7,35	7,34	7,29	7,33	0,03	0,08
Glutamin	12,97	12,58	12,51	12,69	0,25	0,62
Histidin	5,26	5,24	5,80	5,43	0,32	0,79
Glycin	3,45	4,15	3,43	3,68	0,41	1,02
Threonin	5,71	5,34	6,21	5,75	0,44	1,08
Alanin	13,00	12,90	12,31	12,74	0,37	0,93
Arginin	8,69	9,47	22,98	13,71	8,03	19,96

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
γ-Amino-Buttersäure	11,55	11,95	7,54	10,35	2,44	6,06
Tyrosin	9,79	10,27	11,40	10,49	0,83	2,05
Valin	13,04	12,36	13,55	12,98	0,60	1,48
Methionin	4,09	4,00	3,98	4,02	0,06	0,15
Norvalin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tryprophan	6,92	7,11	6,48	6,84	0,32	0,80
Isoleucin	6,65	6,56	6,85	6,69	0,15	0,37
Phenylalanin	13,78	13,42	13,27	13,49	0,26	0,65
Leucin	18,78	19,05	19,32	19,05	0,27	0,67
Lysin	11,53	12,09	14,30	12,64	1,46	3,64
Summe ARG + GAB	20,24	21,42	30,52	24,06	5,63	13,98
Aminosäuren – Kühlmitte						
Asparaginsäure	7,76	8,51	7,72	8,00	0,45	1,11
Glutaminsäure	7,63	7,64	7,86	7,71	0,13	0,32
Asparagin	12,26	13,33	12,39	12,66	0,58	1,45
Serin	8,41	7,70	8,57	8,23	0,46	1,15
Glutamin	3,34	3,33	3,08	3,25	0,15	0,37
Histidin	5,76	5,77	6,00	5,84	0,14	0,34
Glycin	4,15	3,43	4,73	4,10	0,65	1,62
Threonin	6,04	6,42	6,28	6,25	0,19	0,48
Alanin	13,83	13,73	14,73	14,10	0,55	1,37
Arginin	9,43	14,81	25,52	16,59	8,19	20,35
γ-Amino-Buttersäure	12,84	9,28	9,88	10,67	1,91	4,73
Tyrosin	11,54	11,45	12,65	11,88	0,67	1,66
Valin	13,45	15,25	14,95	14,55	0,96	2,40
Methionin	4,08	4,19	3,63	3,97	0,30	0,74
Norvalin	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Tryprophan	7,60	7,45	7,49	7,51	0,08	0,19
Isoleucin	7,02	7,71	7,47	7,40	0,35	0,87
Phenylalanin	14,90	15,32	15,29	15,17	0,23	0,58
Leucin	20,24	19,47	22,32	20,68	1,47	3,66
Lysin	12,31	11,95	14,67	12,98	1,48	3,67
Summe ARG + GAB	22,27	24,09	35,40	27,25	7,11	17,67

10.5.3.2 Würzeanalysen der zweiten Versuchsreihe

10.5.3.2.1 Innenkocher 2. Reihe

Extrakt % GG	Sud 1	Sud 2	Sud3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	11,55	11,64	11,45	11,55	0,10	0,24
Kühlmitte	12,31	12,26	12,03	12,20	0,15	0,37
Extraktzunahme in °P	0,76	0,62	0,58	0,65	0,09	0,23
Gesamtverdampfung	6,58	5,33	5,07	5,66	0,81	2,01

pH-Wert	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	5,11	5,06	5,11	5,09	0,03	0,07
Kühlmitte	5,05	4,99	5,00	5,01	0,03	0,08
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	8,25	7,75	9,75	8,58	1,04	2,59
Kühlmitte	12,50	12,00	10,50	11,67	1,04	2,59
Zunahme in EBC	4,25	4,25	0,75	3,08	2,02	5,02
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	48	53	46	49	4	9,0
Kühlmitte	25	25	25	25	0	0,0
Abnahme absolut	23	28	21	24	4	9,0
Abnahme in %	47,9	52,8	45,7	48,8	3,7	9,12
noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l						
Pfanne-Voll	50	55	48	51	3	8,3
Kühlmitte	24	24	25	25	0	8,0
Abnahme absolut	26	30	23	26	4	8,8
Abnahme in %	51,3	55,4	48,4	51,7	3,5	8,68
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	26,0	27,9	28,3	27,4	1,2	3,05
Kühlmitte	50,3	50,4	50,3	50,3	0,1	0,14
Zunahme	24,3	22,5	22,0	22,93	1,21	3,01
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	27,0	28,8	29,7	28,5	1,4	3,36
Kühlmitte	48,9	49,2	50,1	49,4	0,6	1,50
Zunahme	21,9	20,4	20,4	20,90	0,86	2,13
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	83	70	105	86	18	43
Kühlmitte	35	33	29	32	3	7
Abnahme absolut	48	37	76	54	20	49
Abnahme in %	58	53	72	61	10	25
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	86	72	110	89	19	47
Kühlmitte	36	34	30	34	3	7
Abnahme absolut	50	38	80	56	21	53
Abnahme in %	58	53	72	61	10	25
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	204	184	166	185	19	47
Kühlmitte	10	10	10	10	0	0
Abnahme absolut	194	174	156	175	19	47
Abnahme in %	95	95	94	95	1	1
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	212	190	174	192	19	47
Kühlmitte	10	10	10	10	0	0
Abnahme absolut	202	179	164	182	19	47
Abnahme in %	95	95	94	95	1	1

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Fructose						
Pfanne-Voll	0,18	0,19	0,17	0,18	0,01	0,02
Kühlmitte	0,24	0,24	0,24	0,24	0,00	0,00
Glucose						
Pfanne-Voll	1,04	1,08	1,06	1,06	0,02	0,05
Kühlmitte	1,17	1,16	1,17	1,17	0,01	0,01
Saccharose						
Pfanne-Voll	0,32	0,29	0,33	0,3	0,0	0,05
Kühlmitte	0,35	0,33	0,31	0,3	0,0	0,05
Maltose						
Pfanne-Voll	5,95	6,10	5,88	5,98	0,11	0,28
Kühlmitte	6,22	6,38	6,37	6,32	0,09	0,22
Maltotriose						
Pfanne-Voll	1,28	1,28	1,22	1,26	0,03	0,09
Kühlmitte	1,36	1,36	1,47	1,40	0,06	0,16
Feststoffe						
Vorderwürze	30	24	29	27,67	3,21	7,99
Nachgüsse	38	33	6	25,67	17,21	42,77
vor Plattenkühler	48	33	12	31,00	18,08	44,92
vor Flotation	40	50	73	54,33	16,92	42,04
nach Flotation	44		34	39,00	7,07	17,57
Aminosäuren – Pfanne-Voll						
Asparaginsäure	5,98	6,18	6,33	6,16	0,18	0,44
Glutaminsäure	6,51	6,8	7,24	6,85	0,37	0,91
Asparagin	9,51	9,4	9,95	9,62	0,29	0,72
Serin	7,13	6,95	7,67	7,25	0,37	0,93
Glutamin	10,52	9,46	9,53	9,84	0,59	1,47
Histidin	5,39	3,65	4,85	4,63	0,89	2,21
Glycin	3,6	2,7	3,81	3,37	0,59	1,46
Threonin	5,33	4,53	5,16	5,01	0,42	1,05
Alanin	11,53	11,57	12,57	11,89	0,59	1,46
Arginin	23,05	22,7	20,87	22,21	1,17	2,91
γ-Amino-Buttersäure	5,18	7,41	8,8	7,13	1,83	4,54
Tyrosin	10,31	10,51	10,57	10,46	0,14	0,34
Valin	12,68	12,53	12,79	12,67	0,13	0,32
Methionin	4,23	4	4,08	4,10	0,12	0,29
Norvalin	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Tryprophan	6,1	6,25	6,44	6,26	0,17	0,42
Isoleucin	6,11	6,11	6,13	6,12	0,01	0,03
Phenylalanin	12,01	12,16	12,37	12,18	0,18	0,45
Leucin	17,29	17,39	18,57	17,75	0,71	1,77
Lysin	11,76	11,43	12,57	11,92	0,59	1,46
Summe ARG + GAB	48,23	30,11	29,67	36,00	10,59	26,31

Aminosäuren – Kühlmitte	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Asparaginsäure	5,5	7,7	6,19	6,5	1,13	2,80
Glutaminsäure	5,63	7,89	6,31	6,6	1,16	2,88
Asparagin	14,52	12,38	16,15	14,4	1,89	4,70
Serin	7,72	8,69	8,09	8,2	0,49	1,22
Glutamin	2,45	2,06	1,79	2,1	0,33	0,82
Histidin	7,26	5,51	5,51	6,1	1,01	2,51
Glycin	5,13	4,28	3,45	4,3	0,84	2,09
Threonin	9,91	6,03	5,41	7,1	2,44	6,06
Alanin	7,49	13,82	13,26	11,5	3,50	8,71
Arginin	25,42	19,21	26,63	23,8	3,98	9,89
γ -Amino-Buttersäure	14,53	10,04	11,81	12,1	2,26	5,62
Tyrosin	11,18	12,66	9,98	11,3	1,34	3,34
Valin	10,94	15,05	11,16	12,4	2,31	5,74
Methionin	4,2	4,53	4,01	4,2	0,26	0,65
Norvalin	0	0	0	0,0	0,00	0,00
Tryptophan	4,4	7,11	6,09	5,9	1,37	3,40
Isoleucin	6,97	7,12	6,54	6,9	0,30	0,75
Phenylalanin	16,94	14,32	15,8	15,7	1,31	3,26
Leucin	18,24	20,37	19,57	19,4	1,08	2,67
Lysin	9,57	12,65	12,1	11,4	1,64	4,08
Summe ARG + GAB	39,95	29,25	38,44	35,9	5,79	14,39

10.5.3.2.2 DSVD 2. Reihe

Extrakt % GG	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	11,71	11,53	11,68	11,64	0,10	0,24
Kühlmitte	12,16	12,05	12,18	12,13	0,07	0,17
Extraktzunahme in °P	0,45	0,52	0,50	0,49	0,04	0,09
Gesamtverdampfung	3,84	4,51	4,28	4,21	0,34	0,84
pH-Wert						
Pfanne-Voll	4,94	4,83	4,82	4,86	0,07	0,17
Kühlmitte	4,91	4,81	4,80	4,84	0,06	0,15
Farbe nach EBC						
Pfanne-Voll	8,00	8,00	7,75	7,92	0,14	0,36
Kühlmitte	8,00	8,00	8,00	8,00	0,00	0,00
Zunahme in EBC	0,00	0,00	0,25	0,08	0,14	0,36
noch koag. N (Originalwerte) in mg/l						
Pfanne-Voll	54	55	48	52	4	9,4
Kühlmitte	32	32	32	32	0	0,0
Abnahme absolut	22	23	16	20	4	9,4
Abnahme in %	40,7	41,8	33,3	38,6	4,6	11,48

noch koag. N (bezogen auf 12 °P) in mg/l	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	55	57	49	54	4	10,3
Kühlmitte	31	32	31	32	0	0,5
Abnahme absolut	24	25	18	22	4	10,0
Abnahme in %	43,1	44,5	36,2	41,3	4,4	11,01
TBZ (Originalwerte)						
Pfanne-Voll	28,2	26,3	27,9	27,5	1,0	2,54
Kühlmitte	49,5	47	50,8	49,1	1,9	4,80
Zunahme	21,3	20,7	22,9	21,6	1,1	2,83
TBZ (bezogen auf 12 °P)						
Pfanne-Voll	28,9	27,4	28,7	28,3	0,8	2,00
Kühlmitte	48,7	46,7	49,9	48,5	1,6	4,05
Zunahme	19,8	19,3	21,3	20,1	1,0	2,52
freies DMS (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	90	82	67	80	12	29
Kühlmitte	14	10	10	11	2	5
Abnahme absolut	76	72	57	68	10	24
Abnahme in %	84	88	85	86	2	4
freies DMS (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	92	85	69	82	12	29
Kühlmitte	14	10	10	12	2	5
Abnahme absolut	78	75	59	70	10	25
Abnahme in %	84	88	85	86	2	4
DMS-P (Originalwerte) in µg/l						
Pfanne-Voll	214	218	199	210	10	24
Kühlmitte	25	29	26	27	2	5
Abnahme absolut	189	189	173	184	9	22
Abnahme in %	88	87	87	87	1	2
DMS-P (bezogen auf 12 °P) in µg/l						
Pfanne-Voll	219	227	204	217	12	28
Kühlmitte	26	30	27	28	2	5
Abnahme absolut	194	197	178	189	10	25
Abnahme in %	88	87	87	87	1	2
Fructose						
Pfanne-Voll	0,18	0,18	0,19	0,18	0,01	0,01
Kühlmitte	0,24	0,26	0,24	0,25	0,01	0,03
Glucose						
Pfanne-Voll	1,14	1,13	1,18	1,15	0,03	0,07
Kühlmitte	1,19	1,21	1,20	1,20	0,01	0,02
Saccharose						
Pfanne-Voll	0,32	0,29	0,28	0,3	0,0	0,05
Kühlmitte	0,33	0,28	0,32	0,3	0,0	0,07
Maltose						
Pfanne-Voll	6,29	5,99	6,11	6,13	0,15	0,38
Kühlmitte	6,45	6,21	6,25	6,30	0,13	0,32

Maltotriose	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Pfanne-Voll	1,34	1,29	1,33	1,32	0,03	0,07
Kühlmitte	1,43	1,27	1,33	1,34	0,08	0,20
Feststoffe						
Vorderwürze	29	38	55	40,67	13,20	32,80
Nachgüsse	14	20	21	18,33	3,79	9,41
vor Plattenkühler	62	86	65	71,00	13,08	32,49
vor Flotation	133	73	97	101,00	30,20	75,03
nach Flotation	67		15	41,00	36,77	91,35
Aminosäuren – Pfanne-Voll						
Asparaginsäure	6,54	6,33	7	6,62	0,34	0,85
Glutaminsäure	7,52	6,85	7,2	7,19	0,34	0,83
Asparagin	9,72	9,27	9,44	9,48	0,23	0,56
Serin	7,86	7,65	7,38	7,63	0,24	0,60
Glutamin	11,43	11,04	9,84	10,77	0,83	2,06
Histidin	4,93	5,22	2,98	4,38	1,22	3,03
Glycin	3,92	3,9	2,83	3,55	0,62	1,55
Threonin	5,12	5,2	4,61	4,98	0,32	0,80
Alanin	12,78	12,1	11,36	12,08	0,71	1,76
Arginin	26,89	22,91	22,03	23,94	2,59	6,43
γ-Amino-Buttersäure	8,39	8,19	7,78	8,12	0,31	0,77
Tyrosin	10,59	10,67	10,14	10,47	0,29	0,71
Valin	12,76	11,86	13,95	12,86	1,05	2,60
Methionin	4,07	4,79	4,18	4,35	0,39	0,96
Norvalin	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Tryptophan	6,63	7,39	6,11	6,71	0,64	1,60
Isoleucin	6,04	6,05	6,09	6,06	0,03	0,07
Phenylalanin	12,75	12,82	13,3	12,96	0,30	0,74
Leucin	18,34	17,74	18,16	18,08	0,31	0,76
Lysin	11,22	12,1	11,13	11,48	0,54	1,33
Summe ARG + GAB	35,28	31,10	29,81	32,06	2,86	7,10
Aminosäuren – Kühlmitte						
Asparaginsäure	6,97	6,07	7,72	6,92	0,83	2,05
Glutaminsäure	7,15	6	7,35	6,83	0,73	1,81
Asparagin	10,95	15,33	10,83	12,37	2,56	6,37
Serin	8,11	8,03	7,7	7,95	0,22	0,54
Glutamin	2,65	2,36	2,51	2,51	0,15	0,36
Histidin	5,28	5,96	4,82	5,35	0,57	1,42
Glycin	3,76	4,23	3,97	3,99	0,24	0,58
Threonin	5,46	11,25	5,91	7,54	3,22	8,00
Alanin	12,96	6,72	12,21	10,63	3,41	8,46
Arginin	35,79	27,3	28,93	30,67	4,51	11,19
γ-Amino-Buttersäure	6,94	13,41	8,78	9,71	3,33	8,28
Tyrosin	10,99	9,26	11,18	10,48	1,06	2,63
Valin	12,5	11,02	15,41	12,98	2,23	5,55

	Sud 1	Sud 2	Sud 3	Mittelw.	Stabw.	Interv.
Methionin	4,65	3,87	4,08	4,20	0,40	1,00
Norvalin	0	0	0	0,00	0,00	0,00
Tryprophan	7,02	6,93	6,51	6,82	0,27	0,68
Isoleucin	6,32	6,72	6,65	6,56	0,21	0,53
Phenylalanin	13,37	18,17	14,33	15,29	2,54	6,31
Leucin	18,97	20,07	20,24	19,76	0,69	1,71
Lysin	10,79	12,72	11,6	11,70	0,97	2,41
Summe ARG + GAB	42,73	40,71	27,71	37,05	8,15	20,25

10.5.3.3 Bieranalysen

	Reihe 1 konv.	Reihe 1 DSVD	Reihe 2 konv.	Reihe 2 DSVD
Stammwürze GG%	12,12	12,00	11,98	11,99
Stammwürze GV%	12,69	12,56	12,54	12,55
Alkohol Vol%	5,50	5,48	5,44	5,42
Extrakt wirklich	3,75	3,65	3,69	3,73
Ausstoß V° scheinbar	86	87	86	86
Ausstoß V° wirklich	70	71	70	70
pH-Wert	4,29	4,27	4,29	4,26
Farbe nach EBC	6,5	5,9	5,6	5
Farbe nach Brand	0,39	0,35	0,34	0,30
EBC-Bittereinheiten	21,6	20,7	23,2	21,6
Schaum n. R & C	127	130	131	133
Schaum n. NIBEM	250	263	260	282
koag. Stickstoff	1,8	2,6	1,6	2,1
Anthocyanogene	71,6	62,8	73,9	70,4
Polyphenole	175	176	189	182
TBZ	45,6	40,5	43,1	43,0

10.5.3.4 Gärungsnebenprodukte

	Reihe 1 konv.	Reihe 1 DSVD	Reihe 2 konv.	Reihe 2 DSVD
Diacetyl	0,06	0,06	0,08	0,08
2,3-Pentandion	0,04	0,04	0,05	0,04
Acetaldehyd	3,6	1,2	3,3	3,3
Ethylacetat	16,6	16,2	15,1	17,6
i-Butanol	6,4	7,0	8,2	6,7
n-Propanol	13,6	11,8	12,4	11,2
Amylacetat	1,8	1,6	1,7	2,1
Amylalkohole in mg/l	70,5	70,0	72,5	64,0
freies DMS in µg/l	44	35	41	28

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung des Ölpreises im süddeutschen Raum von 1/99–1/02	2
Abbildung 2:	Sudhaus Mitte 18. Jh.	6
Abbildung 3:	Direkt beheizte Pfanne	7
Abbildung 4:	Ketten in direkt beheizter Pfanne	7
Abbildung 5:	Dampfbeheizte Pfanne, Ziemann 1900	8
Abbildung 6:	Heizschlangen in dampfbeheizter Pfanne	8
Abbildung 7:	Hochleistungspfanne	8
Abbildung 8:	Pfanne mit Perculator	8
Abbildung 9:	Sternkocher	9
Abbildung 10:	Kaskadenkocher	9
Abbildung 11:	Röhrenkocher	9
Abbildung 12:	Rechteckpfanne [49]	10
Abbildung 13:	Schema einer Anlage zur Hochtemperaturwürzekochung – Kontikochung (Steinecker)	11
Abbildung 14:	Innenkocher	12
Abbildung 15:	Fouling	12
Abbildung 16:	Wärmebilanz des Sudhauses einer Brauerei	13
Abbildung 17:	PfaDuKo 1908	14
Abbildung 18:	PfaDuKo 2000	14
Abbildung 19:	Heizboden des DSVD von unten	16
Abbildung 20:	Templates	16
Abbildung 21:	Laminarer Kondensatfilm an einer senkrechten Wand	18
Abbildung 22:	Wärmeübergangswiderstände durch eine Wand	22
Abbildung 23:	Blasensieden	24
Abbildung 24:	Filmsieden	24
Abbildung 25:	Saubere Heizfläche	25
Abbildung 26:	Fouling nach 3 Suden	25
Abbildung 27:	Fouling nach 6 Suden	25
Abbildung 28:	Fouling nach 9 Suden	25
Abbildung 29:	Fouling nach 12 Suden	25
Abbildung 30:	Fouling nach 40 Suden	25
Abbildung 31:	Temperaturschichtung bei einer Pfanne mit Innenkocher	26
Abbildung 32:	Temperaturschichtung bei einer Pfanne mit Außenkocher	27

Abbildung 33:	Zentraler Einlauf.....	27
Abbildung 34:	Tangentialer und 23°- Einlauf.....	27
Abbildung 35:	Messstellen für die Dampfverteilung.....	28
Abbildung 36:	Temperaturverteilung im Heizboden.....	29
Abbildung 37:	Ungünstige Temperaturverteilung im Heizboden.....	30
Abbildung 38:	Streckerabbau.....	37
Abbildung 39:	Chromatogramm der Würzearomastoffe bei Kühlmitte.....	38
Abbildung 40:	Chromatogramm der Bieraromastoffe.....	41
Abbildung 41:	Aufheizen.....	45
Abbildung 42:	Kochen.....	46
Abbildung 43:	Whirlpoolrast.....	47
Abbildung 44:	Strippen.....	47
Abbildung 45:	Pilotanlage.....	49
Abbildung 46:	Erste industrielle Anlage.....	50
Abbildung 47:	Verteilung von oben.....	51
Abbildung 48:	Verteilung von unten.....	51
Abbildung 49:	DSVD mit Energiespeicher.....	52
Abbildung 50:	Anlage für 250 hl/Sud mit Whirlpoolpfanne und Innenkocher.....	53
Abbildung 51:	Kochprofil der DSVD-Sude nach Optimierung.....	57
Abbildung 52:	Trendkurven bei unterschiedlichen Verdampfungen.. Fehler! Textmarke nicht definiert.	
Abbildung 53:	Vergleich der Energierückgewinnung bei unterschiedlichen Gesamtverdampfungen.....	61
Abbildung 54:	Extraktgehalte.....	65
Abbildung 55:	Gesamtverdampfung.....	65
Abbildung 56:	Noch koagulierbarer Stickstoff.....	66
Abbildung 57:	Gesamtlöslicher Stickstoff.....	66
Abbildung 58:	Entwicklung der TBZ.....	67
Abbildung 59:	Freies DMS.....	67
Abbildung 60:	DMS-P.....	67
Abbildung 61:	Extraktgehalte.....	68
Abbildung 62:	Gesamtverdampfung.....	68
Abbildung 63:	pH-Wert.....	69
Abbildung 64:	Farbe nach EBC.....	69

Abbildung 65:	Freier Aminostickstoff	70
Abbildung 66:	Noch koagulierbarer Stickstoff	70
Abbildung 67:	Gesamtlöslicher Stickstoff	71
Abbildung 68:	TBZ	71
Abbildung 69:	Freies DMS	72
Abbildung 70:	DMS-P	72
Abbildung 71:	2-me-Butanal	73
Abbildung 72:	3-me-Butanal	73
Abbildung 73:	Methional	73
Abbildung 74:	Benzaldehyd	73
Abbildung 75:	2-Phenylethanal	74
Abbildung 76:	Summe der Streckeraldehyde	74
Abbildung 77:	Pentanal	75
Abbildung 78:	2-Pentanon	75
Abbildung 79:	Hexanal	75
Abbildung 80:	Heptanal	75
Abbildung 81:	tr-2-cis-6-Nonadienal	76
Abbildung 82:	γ -Nonalacton	76
Abbildung 83:	2-Furfural	77
Abbildung 84:	2-ac-Furan	77
Abbildung 85:	2-me-Butanol	78
Abbildung 86:	3-me-Butanol	78
Abbildung 87:	1-Pentanol	78
Abbildung 88:	1-Hexanol	78
Abbildung 89:	1-Octanol	79
Abbildung 90:	1-Octen-3-ol	79
Abbildung 91:	Phenyl-OH	80
Abbildung 92:	Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	80
Abbildung 93:	Terpineol	81
Abbildung 94:	Linalool	81
Abbildung 95:	Nerol	81
Abbildung 96:	Geraniol	81
Abbildung 97:	Extraktzunahme	82
Abbildung 98:	Gesamtverdampfung	82

Abbildung 99: Noch koagulierbarer Stickstoff.....	83
Abbildung 100: TBZ.....	83
Abbildung 101: Freies DMS	84
Abbildung 102: DMS-P	84
Abbildung 103: Extrakt.....	84
Abbildung 104: Verdampfung	84
Abbildung 105: Farbe	85
Abbildung 106: TBZ.....	85
Abbildung 107: Noch koagulierbarer Stickstoff in der Würze	86
Abbildung 108: Noch koagulierbarer Stickstoff im Bier.....	86
Abbildung 109: Freies DMS	86
Abbildung 110: DMS-P	86
Abbildung 111: Bitterstoffe in den Würzen.....	87
Abbildung 112: Bitterstoffe in den Bieren.....	88
Abbildung 113: Scheinbarer Extrakt und Vergärungsgrade der Biere	89
Abbildung 114: Verdampfung über Kondensatmengen	91
Abbildung 115: 2-me-Butanal.....	91
Abbildung 116: 3-me-Butanal.....	91
Abbildung 117: Methional	92
Abbildung 118: Benzaldehyd.....	92
Abbildung 119: 2-Phenylethanal.....	93
Abbildung 120: Summe der Streckeraldehyde	93
Abbildung 121: Pentanal.....	93
Abbildung 122: 2-Pentanon	93
Abbildung 123: Hexanal	94
Abbildung 124: Heptanal	94
Abbildung 125: tr-2-cis-6-Nonadienal.....	94
Abbildung 126: γ -Nonalacton	94
Abbildung 127: 2-Furfural	95
Abbildung 128: 2-ac-Furan	95
Abbildung 129: 2-me-Butanol	95
Abbildung 130: 3-me-Butanol	95
Abbildung 131: 1-Pentanol	96
Abbildung 132: 1-Hexanol.....	96

Abbildung 133: 1-Octanol.....	96
Abbildung 134: 1-Octen-3-ol.....	96
Abbildung 135: Phenyl-OH.....	97
Abbildung 136: Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon.....	97
Abbildung 137: Geraniol.....	98
Abbildung 138: Alterungskomponenten.....	99
Abbildung 139: Gesamtverdampfung.....	100
Abbildung 140: pH-Werte.....	100
Abbildung 141: EBC-Bittereinheiten in der Würze.....	101
Abbildung 142: EBC-Bittereinheiten im abgefüllten Bier.....	101
Abbildung 143: Farbe nach EBC.....	102
Abbildung 144: Feststoffe in der Würze.....	103
Abbildung 145: Vergleich der Trübungskurven von Innenkocher und DSVD-System.....	104
Abbildung 146: Vergleich der Partikelgrößen in den Würzen.....	105
Abbildung 147: DMS-P-Gehalte.....	106
Abbildung 148: Freies DMS.....	106
Abbildung 149: Vergleich der TBZ.....	107
Abbildung 150: Noch koagulierbarer Stickstoff.....	107
Abbildung 151: Vergleich Zuckerzusammensetzung bei Kühlmitte.....	108
Abbildung 152: Vergleich der Aminosäuren im Verlauf der Kochung.....	109
Abbildung 153: Vitaminausstattung der Würzen.....	110
Abbildung 154: Vergleich des Temperaturverlaufs.....	111
Abbildung 155: Vergleich der Extraktabnahme.....	112
Abbildung 156: Verlauf des Butandion.....	113
Abbildung 157: Verlauf der Hefezellzahl.....	114
Abbildung 158: Verlauf der pH-Werte.....	115
Abbildung 159: Farbaufhellung.....	115
Abbildung 160: Vergleich des Druckanstiegs während der Filtration.....	116
Abbildung 161: Alkoholgehalt und Ausstoßvergärungsgrade.....	118
Abbildung 162: Vergleich der Schaumzahlen.....	118
Abbildung 163: Langfristiger Trend der Schaumhaltbarkeit.....	119
Abbildung 164: Vergleich der Anthocyanogen- und Polyphenolgehalte.....	120
Abbildung 165: Vergleich der Gärungsnebenprodukte I.....	121
Abbildung 166: Vergleich der Gärungsnebenprodukte II.....	121

Abbildung 167: Vergleich der Gärungsnebenprodukte III	122
Abbildung 168: 3-me-Butanal.....	124
Abbildung 169: Methional	124
Abbildung 170: Benzaldehyd.....	125
Abbildung 171: 2-Phenylethanal.....	125
Abbildung 172: Summe der Streckeraldehyde	126
Abbildung 173: Pentanal.....	126
Abbildung 174: 2-Pentanon	127
Abbildung 175: Hexanal	127
Abbildung 176: Heptanal	127
Abbildung 177: tr-2-cis-6-Nonadienal.....	127
Abbildung 178: γ -Nonalacton	128
Abbildung 179: 2-Furfural	128
Abbildung 180: 2-ac-Furan	129
Abbildung 181: 2-me-Butanol	129
Abbildung 182: 3-me-Butanol	129
Abbildung 183: 1-Octanol.....	129
Abbildung 184: 1-Octen-3-ol.....	130
Abbildung 185: Phenyl-OH	130
Abbildung 186: Dihy-5,5-dime-2(3H)-Furanon	130

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Behandlung der Proben für die Analysen	31
Tabelle 2:	Übersicht über die konventionelle Analytik.....	31
Tabelle 3:	Fehler bei der Berechnung der Verdampfung.....	32
Tabelle 4:	Werte der t-Verteilung	44
Tabelle 5:	Variationen der Kochparameter	58
Tabelle 6:	Zeitpunkte und Mengen bei den Hopfengaben	59
Tabelle 7:	Sude 3 und 4 mit veränderter Hopfengabe.....	59
Tabelle 8:	Verbale Verkostung der frischen und der forciert gealterten Biere	98
Tabelle 9:	Vergleich β -Glucane im Unfiltrat	116
Tabelle 10:	Trübung und Zellzahl	117
Tabelle 11:	Dreiecksverkostung der frischen Biere der ersten Reihe	123
Tabelle 12:	Dreiecksverkostung der frischen Biere der zweiten Reihe	123
Tabelle 13:	Dreiecksverkostung der gealterten Biere der ersten Reihe	123