

Fortschritte in der Hopfenextraktion mit überkritischem Kohlendioxid

VERBESSERTER LÖSEEIGENSCHAFTEN | Bisher werden bei der Extraktion von Hopfen mit überkritischem Kohlendioxid Drücke bis maximal 300 bar eingesetzt. In diesem Jahr wird eine Anlage mit einem Extraktionsdruck von 500 bar in Betrieb gehen. Hauptbeweggrund ist die Energieeinsparung durch die verbesserten Löseeigenschaften von CO_2 bei 500 bar und damit die Nachhaltigkeit. 500 bar-Extrakte unterscheiden sich geringfügig von 300 bar-Extrakten, womit sich dieser Beitrag befasst.

CO_2 HAT JE nach Druck und Temperatur vier verschiedene Zustände, die aus dem Phasendiagramm in Abbildung 1 hervorgehen [1]. Es sind dies „gasförmig“, „fest“, „flüssig“ und „überkritisch“. Flüssiges und überkritisches CO_2 haben eine Dichte von etwa 0,9 kg/Liter, also ähnlich wie Wasser, und können Hopfeninhaltsstoffe wie die α - und β -Säuren sowie Aromastoffe lösen, wobei überkritisches CO_2 die derzeit bevorzugte Methode ist.

Abbildung 2 zeigt das Fließschema einer Extraktion mit überkritischem CO_2 , das

durch einen mit Pellets gefüllten Extrakteur gepumpt wird und dabei die Wertstoffe löst. Der Druck wird in einem Entspannungsventil auf < 73 bar reduziert und in einem Wärmetauscher verdampft. Das gasförmige CO_2 verliert seine Löseeigenschaften, der Extrakt scheidet sich in einem Abscheider

ab. Das CO_2 wird in einem Kondensator verflüssigt, mit einer Hochdruckpumpe auf den Extraktionsdruck verdichtet und die Extraktionstemperatur in einem Wärmetauscher eingestellt. Das CO_2 fließt zurück in den Extrakteur. Die Extraktion ist somit ein batchweiser Kreislaufprozess. Am Ende der Extraktion wird der Behälter entspannt, das CO_2 zurückgewonnen und der Behälter entleert. Nach einer Befüllung mit frischen Pellets wird der Extraktionszyklus neu gestartet.

Alle wichtigen Hopfeninhaltsstoffe wie α - und β -Säuren sowie die Aromastoffe werden mittels überkritischem CO_2 gelöst. Nicht löslich sind Polyphenole [1, S. 157ff]. Die inerte Atmosphäre und die moderaten Temperaturen verhindern chemische Reaktionen, wie sie bei einer klassischen Lösemittelextraktion stattfinden können [1, S. 155].



Autoren: Dr. Adrian Forster (li.), Dr. Florian Schüll (re.), HVG Hopfenverwertungsgenossenschaft e.G., Wolnzach; Andreas Gahr, Hopfenveredlung St. Johann GmbH, Train-St. Johann; Roland Novy, BarthHaas GmbH & Co. KG, Nürnberg

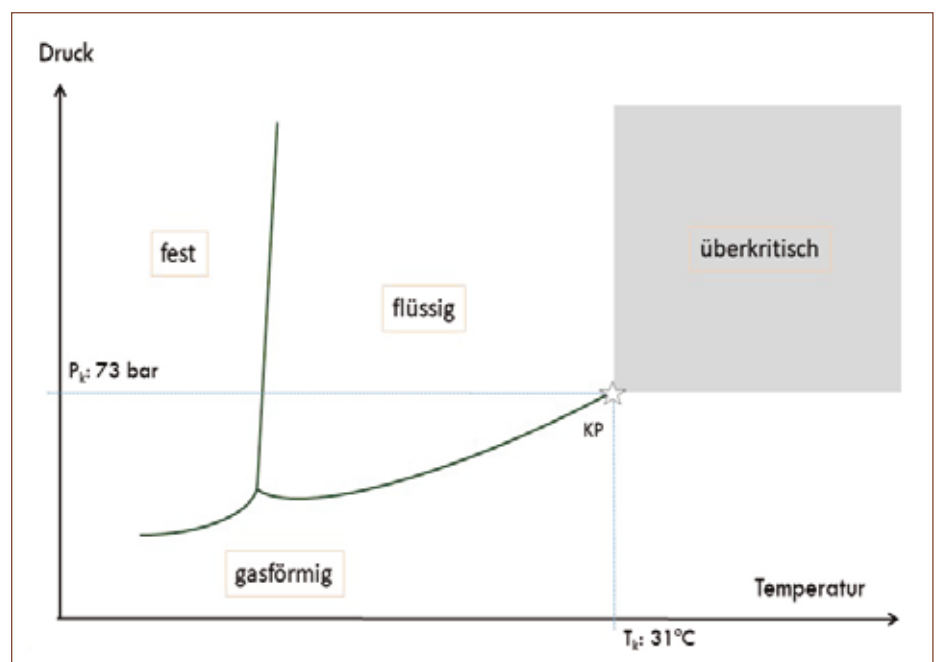


Abb. 1 Phasendiagramm von Kohlendioxid (Druck/Temperatur)

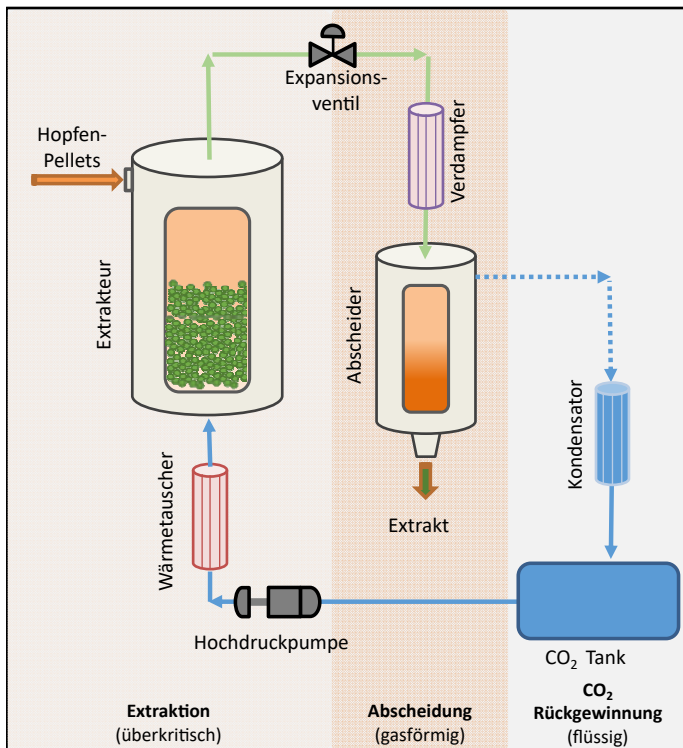


Abb. 2
Fließschema einer
Extraktion mit über-
kritischem CO₂

Extraktionszeit zur Folge.

- Die Massenausbeute ist bei 500 bar etwa um ein Prozent bezogen auf Pellets höher. Es wird also etwas mehr gelöst. Das erweiterte Stoffspektrum umfasst in geringen Mengen Hopfenbegleitbitterstoffe und Xanthohumol.
- Die 500 bar-Extrakte sind „grüner“, was darauf schließen lässt, dass mehr Chlorophyll gelöst wird. Sie sind zudem etwas viskoser.

Vergleich von 300 und 500 bar-Extrakten

Beispielhaft für zahlreiche Vergleiche von Extrakten der niedrigeren Druckstufe (260-300 bar) mit 500 bar wird die Extraktion homogener Herkulespellets aus der Ernte 2019 beleuchtet. Die Ausbeute an α-Säuren nach EBC 7.7 (HPLC) war mit 97 Prozent bei 300 bar und 98 Prozent bei 500 bar nahezu identisch. An Extrakt fielen 26,2 Gewichtsprozent bei 300 und 27,5 bei 500 bar an. Daraus errechnet sich ein Anreicherungsgrad (AG) von 3,82 kg Pellets/kg Extrakt bei 300 bar bzw. von 3,64 bei 500 bar. Der Anreicherungsgrad drückt aus, wieviel kg Pellets für 1 kg Extrakt nötig sind. Der Begriff Anreicherungsgrad wird auch für die analytischen Größen zwischen Extrakt und Pellets angewandt und verdeutlicht, um wievielfach mehr eine Substanz im Extrakt im Vergleich zu Pellets aufgefunden wird. Im Idealfall sind die Anreicherungsgrade von Gewicht und Inhaltsstoffen identisch. Berücksichtigt werden müssen beim Vergleich die Analysenfehler der jeweiligen Substanz.

Tabelle 1 enthält wesentliche Analysendaten in den eingesetzten Pellets und den beiden resultierenden Extrakten sowie die dazugehörigen Anreicherungsgrade. Es handelt sich um Bitterstoffe wie α- und β-Säuren mit HPLC ermittelt nach EBC 7.7 und 7.9 sowie deren Mittelwert und einige Begleitbitterstoffe nach EBC 7.9. Über den positiven Beitrag einer Vielzahl von Hopfenbegleitbitterstoffen hat der Arbeitskreis von T. Hofmann umfänglich berichtet [2, 3], eine Zusammenfassung findet sich in [1, S.212 ff]. Der Gewichtsangleichung stehen die Anreicherungsgrade der einzelnen Analysen gegenüber, die sehr gut korrelieren. Es zeigt sich ferner eine sehr gute Übereinstimmung für die Bittersäuren zwischen den beiden Extrakten. In Tabelle 2 sind einige Einzelkomponenten sowie Sum-

BITTERSTOFFE IN DEN PELLETS UND DEN BEIDEN EXTRAKTEN 300 UND 500 BAR; WERTE IN GEW.-%

Analysenkriterium	Pellets	300 bar	AG	500 bar	AG
Gewichtsausbeute		26,2	3,82	27,5	3,64
α-Säuren EBC 7.7	14,53	54,40		53,20	
α-Säuren EBC 7.9	14,69	54,27		53,34	
Ø	14,62	54,43	3,72	53,30	3,64
β-Säuren EBC 7.7	4,50	17,05		16,00	
β-Säuren EBC 7.9	4,41	16,96		16,07	
Ø	4,45	17,00	3,82	16,04	3,60
Xanthohumol EBC 7.9	0,72	Spur	> 0	0,25	0,35
Humulinone EBC 7.9	0,24	nn		Spur	> 0
Hulupone EBC 7.9	0,05	nn		Spur	> 0

Tab. 1

Hopfenextraktion bei 500 bar

In den letzten Jahren sind durch die CO₂-Extraktion von Naturstoffen neue Erkenntnisse gewonnen worden. Es zeigte sich, dass interessante Inhaltsstoffe erst oberhalb 300 bar gut löslich sind, was technische Entwicklungen zur Folge hatte [1, S. 158]. Durch die Anstrengungen von Anlagen- und Apparatebauern können mittlerweile Extraktionsanlagen mit einer Druckauslegung bis 500 bar realisiert werden. Hintergrund für ein unterschiedliches Löse-

vermögen von CO₂ ist die Abhängigkeit der Dichte vom Druck. Im Rahmen der üblichen Extraktionstemperaturen von 50 bis 60 °C liegt die Dichte des CO₂ bei 500 bar um 15 Prozent höher als z.B. bei 280 bar. Daraus leiten sich folgende Merkmale einer 500 bar-Extraktion ab:

- Durch die höhere Dichte verbessern sich die Löseeigenschaften des CO₂, so dass sich seine zur Extraktion benötigte Menge um 20 bis 30 Prozent reduzieren lässt. Das hat einen um etwa 20 Prozent geringeren Energiebedarf und eine kürzere

men von Stoffgruppen der Aromastoffe mit ihren Anreicherungsgraden in den Pellets und Extrakten gelistet. Die beiden Extrakte unterscheiden sich weder in den absoluten Gehalten noch in den einzelnen Anreicherungsgraden.

Folgende Zusatzinformationen zum Vergleich der beiden Extrakte sind noch ermittelt worden:

Die dynamischen Viskositäten der beiden Extrakte lassen keine wesentlichen Unterschiede erkennen. Der 500 bar-Extrakt erscheint etwas viskoser, und es ist im Einzelfall zu prüfen, ob die Viskosität von 1 bis 2 Pas, die für automatische Dosieranlagen empfohlen wird, eine geringfügig höhere Aufwärmtemperatur erfordert. Die Viskositätsschwankungen innerhalb verschiedener Sorten und Jahrgänge sind allerdings ausgeprägter als die zwischen 300 und 500 bar.

Ein Vergleich der Pflanzenschutzmittel in den Pellets und den Extrakten ist in Tabelle 3 enthalten. Berechnet wird die Transfertrate (TR) von Pflanzenschutzmittel in den beiden Extrakten in Relation zu den Mengen in den Pellets nach folgender Formel:

$$\text{Transferrate} = \frac{\text{Wert im Extrakt}}{\text{Wert im Pellet}} \times \text{Anreicherungsgrad} \times 100 \%$$

Dabei sind durch Analysenfehler bedingte Schwankungen der Transferraten in der Größenordnung bis 20 Prozent zu berücksichtigen. Zwischen den 300 bar- und 500 bar-Extrakten sind keine signifikanten Unterschiede zu erkennen. Die Transferraten der erfassten Pflanzenschutzmittel schwanken zwischen etwa 10 bis 95 Prozent, je nach ihrer chemischen Struktur. Die Summe der Rückstände ist mit 150 mg/kg bei 300 bar nahezu identisch mit den 151 mg/kg bei 500 bar. Die aus diesen Werten errechneten Transferraten ergeben sich bei 300 bar mit 75 Prozent und bei 500 bar mit 79 Prozent. Der höhere Druck bewirkt folglich keine geänderte Löslichkeit von Pflanzenschutzmitteln.

Tabelle 4 listet die Gehalte einiger relevanter Metalle in den Pellets und Extrakten sowie ihre Transferraten von Pellets in den Extrakt.

Arsen und Cadmium sind in den Pellets nicht nachweisbar, die Rückstände von Blei und Quecksilber in den Pellets verbleiben in den Trebern und sind weder mit 300 noch mit 500 bar extrahierbar.

GEHALTE EINZELNER AROMAKOMPONENTEN UND SUMMEN VON STOFFGRUPPEN IN DEN PELLETS ...

... und den 300 resp. 500 bar-Extrakten sowie die dazu gehörigen Anreicherungsgrade (AG); Werte in mg/kg

	Pellets	300 bar	AG 300	500 bar	AG 500
Myrcen	1013	3233	3,19	3212	3,17
β-Caryophyllen	70	279	3,99	298	4,26
Humulen	240	908	3,78	998	4,16
2-Methylbutyl-2-methylpropanoat	157	518	3,30	498	3,17
Linalool	8	28	3,50	28	3,50
2-Undecanon	11	39	3,55	39	3,55
Geraniol	13	44	3,38	43	3,31
Humulenepoxid II	7	19	2,71	18	2,57
Kohlenwasserstofffraktion	1412	4747	3,36	4847	3,43
Sauerstofffraktion	384	1211	3,15	1181	3,08
Summe der GC-Komponenten	1796	5958	3,18	6028	3,36
Summe der Ester	310	986	3,25	956	3,08
Summe der Monoterpenalkohole	24	78	3,12	76	3,17
Summe der Sesquiterpenalkohole	14	35	2,50	36,5	2,61
Summe der Ketone	36	126	3,50	124,5	3,36
Summe der Epoxide	11	28	2,55	27	2,45

Tab. 2

RÜCKSTÄNDE VON PFLANZENSCHUTZMITTELN IN DEN PELLETS UND EXTRAKTEN IN MG/KG, ...

... sowie deren Transferraten (Werte im Extrakt : Dosage mit Pellets) in % rel.

	Pellets	300 bar	TR	500 bar	TR
Ametoctradin	0,93	0,35	11	0,70	21
Boscalid	10,7	26	71	29	75
Dimethomorph	0,48	0,75	23	1,0	57
TFNG	1,15	-		-	
Flonicamid	1,1	-		-	
Fluopicolide	0,030	0,095	83	0,090	83
Mandipropamid	25,3	80,0	84	79,5	86
Metrafenon	8,4	30,5	98	28,5	93
Myclobutanil	3,08	8,95	78	8,50	76
Pyraclostrobin	1,28	3,55	78	3,65	78
Spirotetramat inkl. Metab.	0,2	-		-	
Summe/Ø der TR		150,2	75	150,9	79

Tab. 3

Auch der Großteil von Eisen und Kupfer wird nicht extrahiert. Die Transferraten bei Eisen liegen unter einem Prozent relativ und bei Kupfer unter zehn Prozent. Das deckt sich für Kupfer mit [1, S. 159], wo für

die Wiederfindung < 15 Prozent angegeben wurden. Unterschiede zwischen den Extraktionsdrücken sind nicht ableitbar.

In beiden Extrakten liegen die Nitratwerte unterhalb der Bestimmungsgrenze.

METALLGEHALTE IN DEN PELLETS UND IN DEN EXTRAKTEN IN MG/KG SOWIE TRANSFERRATEN VON DEN PELLETS IN DIE EXTRAKTE IN % REL.

Metall	Pellets 300 bar	Extrakt 300 bar	TR	Extrakt 500 bar	TR
Arsen	uB	uB		uB	
Blei	0,08	uB	nn	uB	nn
Cadmium	uB	uB		uB	
Eisen	77	1,15	0,4	2,4	0,9
Kupfer	8,4	2,9	8,9	2,8	9,1
Quecksilber	0,01	uB	nn	uB	nn

uB = Wert unter der Bestimmungsgrenze; nn = Transfer nicht nachweisbar

Tab. 4

Interne Brauversuche

Seit 2016 wurden in unserer 2-hl-Forschungsbrauerei St. Johann elf Vergleiche von Bieren mit Extrakten einer niedrigeren Druckstufe und 500 bar-Extrakten mit identischen Dosagen an α-Säuren bei Kochbeginn vorgenommen. Getestet wurden die Sorten Herkules, Magnum und Perle. Die Bewertung der Bitterstoffausbeuten erfolgt auf zwei Wegen:

$$1. \text{ Spezifische Bitterstoffausbeute} = \frac{\text{Iso} - \alpha - \text{Säuren im Bier (mg/l)}}{\text{dosierte } \alpha - \text{Säuren in mg/l}} \times 100 \%$$

Messung mit HPLC nach EBC 9.47 im Bier und EBC 7.7/7.9 im Extrakt

$$2. \text{ Unspez. Bitterstoffausbeute} = \frac{\text{Bitterwert im Bier (IBU)}}{\text{dosierte Menge an KW in mg/l}} \times 100 \%$$

IBU im Bier nach EBC 9.8, Konduktometerwert (KW) im Extrakt nach EBC 7.6.

Es ergaben sich keine signifikanten Differenzen in den Bitterstoffausbeuten. Bis auf Spuren von Isoxanthohumol in den 500 bar-Bieren waren keine analytischen Unterschiede zwischen den Bieren vorhanden.

Umfangreiche Verkostungen und eine Vielzahl von Dreieckstests (n = 316) zeigten weder in der Summe noch in einem einzigen singulären Vergleich signifikante sensorische Unterschiede zwischen den Bieren.

Externe Brauversuche

Zusätzlich wurden ein 300 und ein 500 bar-Extrakt aus einer homogenen Pelletcharge der Sorte Herkules parallel zur eigenen For-

schungsbrauerei in einer 20-hl-Brauerei getestet. Basisrezept war ein untergäriges All-Malz-Bier mit ca. 25 Bittereinheiten. In beiden Betrieben kamen Malze mit vergleichbarer Qualität zum Einsatz.

Die in Vorversuchen ermittelten Bitterstoffausbeuten divergierten in den beiden Anlagen. Die kleinere 2-hl-Würze-Pfanne lag bei der Verwendung von Extrakten deutlich tiefer. Folgerichtig wurde die Dosage der α-Säuren bei Kochbeginn im externen 20-hl-Versuch mit 6,50 g/hl und in St. Johann mit 9,55 g/hl festgelegt. Das 20-hl-Sudwerk wird mit einem Innenkocher bei einem Überdruck von 90 mbar betrieben. St. Johann nutzt ebenfalls einen Innenkocher, jedoch mit atmosphärischer Kochung. Die Kochdauer des 20-hl-Sudes betrug 64 min zuzüglich 5 min Entspannung, die der 2-hl-Pfanne 70 min. Die externe Brauerei verwendete eine spezielle Hefemischung, St. Johann den Stamm W34. Das Bier des 20-hl-Sudes wurde vor der Kieselgurfiltration mit PVPP (10 g/hl) und Kieselgel (30 g/hl) stabilisiert. St. Johann praktizierte keine Stabilisierung. Um eine statistische Auswertung zu ermöglichen, wurden die Sude mit 300 und 500 bar-Extrakt dreifach ausgeführt.

Die drei Einzelversuche wurden separat analysiert. Tabelle 5 enthält die Mittelwerte der drei Sude und deren Standardabweichungen. Neben Stammwürze, Alkoholgehalt und pH sind die Bittereinheiten und die mittels HPLC nach EBC 9.47 analysierten Iso-α- und α-Säuregehalte, das Isoxanthohumol und der Schaum gelistet. Die sehr niedrigen Standardabweichungen der Dreifach-Sude liegen im Bereich der Standardabweichungen von Dreifachbestimmungen,

also innerhalb der Analysenfehler nach MEBAK [4]. Die Reproduzierbarkeit der Sude kann somit als sehr gut bezeichnet werden. In beiden Brauereien sind die jeweiligen Mittelwerte der Analysenmerkmale der 300 bar- und 500 bar-Biere deckungsgleich.

Die spezifischen und unspezifischen Bitterstoffausbeuten errechnen sich gemäß Tabelle 6. Auch hier sind keine wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Extrakten ableitbar.

Die Biere der 20-hl-Brauerei wurden in einem erweiterten Panel von BarthHaas, HVG und St. Johann verkostet. Ein Tetrad-Test [5] mit 29 Teilnehmern ergab elf richtige und 18 falsche Zuordnungen beim Vergleich der 300 bar- und 500 bar-Biere. Daraus leitet sich ab, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Bieren besteht. Ein Dreieckstest mit 32 Teilnehmern resultierte in zehn richtigen und 22 falschen Zuordnungen und ist damit ebenfalls weit entfernt von einem signifikanten Unterschied [6].

Die Biere aus St. Johann wurden im üblichen Panel verkostet. Der Tetrad-Test ergab bei 17 Testern acht richtige und neun falsche Zuordnungen und damit keine Signifikanz. Im Dreieckstest ordneten von 18 Verkostern sieben richtig und elf falsch zu, was ebenfalls keine Signifikanz erkennen lässt. Die Biere erreichten nach DLG in der optischen und sensorischen Bewertung vergleichbare Ergebnisse. Die Gesamtnoten schwankten zwischen 4,35 und 4,47 Punkten. Die Mittelwerte der jeweils drei 300 bar- und 500 bar-Biere lagen auf einem identischen Niveau von 4,42 vs. 4,41 Punkten. Der Rangsummentest nach Kramer [7] ergab keine signifikante Präferenz für irgendein Bier und auch in der Reihenfolge der Beliebtheit lagen die Biere nahezu gleichauf (53 vs. 47 %).

Eine Verkostung nach den Vorgaben der CMA für hopfenbetonte Biere konnte ebenfalls keine Unterschiede im Hopfenaroma, besonders aber weder in der Harmonie der Bittere (7,8 vs. 7,6 Punkte) noch in der Intensität der Bittere (beide 5,0 Punkte) erkennen lassen.

Alterung von Hopfenextrakten

Es wurden vier CO₂-Hopfenextrakte über mehrere Jahre bei 20 °C gelagert. Da die Versuche noch nicht abgeschlossen sind, sollen hier nur wesentliche Inhalte gezeigt werden. Aus der Sorte Herkules stammt ein Vergleich von Extrakten mit zwei Jahre alten

MITTELWERTE EINIGER ANALYSENDATEN (\bar{x} = DURCHSCHNITTE AUS 3 SUDEN) UND STANDARDABWEICHUNGEN (SD) DER BEIDEN BRAUEREIEN

		20 hl				2 hl			
		300 bar		500 bar		300 bar		500 bar	
		\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD	\bar{x}	SD
Stammwürze	Gew.-%	11,61	0,01	11,59	0,01	12,66	0,34	12,86	0,20
Alkohol	Vol.-%	5,00	0,00	5,00	0,00	5,69	0,11	5,77	0,08
pH		4,62	0,03	4,65	0,08	4,57	0,03	4,61	0,06
Bittere	IBU	26,7	0,3	27,0	0,0	22,3	0,6	22,3	0,6
Iso- α -Säuren	mg/l	27,8	1,1	27,3	0,7	22,7	0,4	22,9	0,9
α -Säuren	mg/l	1,4	0,2	1,2	0,1	2,8	0,8	2,4	0,8
Isoxanthohumol	mg/l	nn		Spur		nn		0,1	
Schaum (Nibem)	s	251	5	257	5	221	18	216	21

Tab. 5

und frischen Pellets, extrahiert jeweils bei 280 und 500 bar. Die Dauer der Lagerversuche betrug bisher 51 Monate (± 1 Monat) bei 20 °C. Folgende Analysen kamen zur Anwendung:

- α - und β -Säuren nach EBC 7.7 und EBC 7.9;
- gaschromatographische Bestimmung von Aromakomponenten, angelehnt an MEBAK.

Die insgesamt 81 identifizierten und quantifizierten Aromasubstanzen umfassen über 99 Prozent der Peakflächen (= Summe aller GC-Komponenten).

Tabelle 7 enthält die prozentualen Veränderungen der gelagerten Proben gegen-

über den Ausgangswerten.

Folgende Beobachtungen leiten sich ab:

- Bei den 280 bar-Extrakten errechnet sich ein α -Verlust von 1,5 Prozent relativ, bei den 500 bar-Extrakten von 2,5 Prozent relativ, was sich in beiden Fällen im Rahmen der Analysenfehler bewegt.
- Die β -Säuren aller Extrakte sind ebenfalls stabil. Sie benötigen Sauerstoff, um reagieren zu können [1, S. 161].
- Die Summe der geeichten, gaschromatographisch ermittelten Aromakomponenten ist bei den beiden Drücken nahezu identisch.
- Die beiden CO₂-Extrakte unterscheiden sich weder bei den α -Säuren noch bei den

Aromastoffen im Lagerverhalten. Ob mit 280 oder 500 bar extrahiert wird, spielt also für die Extraktstabilität keine Rolle.

■ Zusammenfassung

Das als Hopfenextraktionsmittel derzeit führende überkritische CO₂ wird üblicherweise bei Drücken bis 300 bar praktiziert. Da inzwischen der Anlagenbau eine Extraktion bis 500 bar möglich macht, wird dieses Jahr eine großtechnische Anlage dieser Druckstufe in Betrieb gehen. Die höhere CO₂-Dichte bei 500 bar führt zu besseren Löseeigenschaften, wodurch die Menge an zu zirkulierendem CO₂ und die Extraktionszeit reduziert werden kann. Damit lassen

SPEZIFISCHE UND UNSPEZIFISCHE BITTERSTOFFAUSBEUTEN IN DEN BEIDEN BRAUEREIEN

		20 hl		2 hl	
		300 bar	500 bar	300 bar	500 bar
Dosierte α -Säuren	mg/l	65,0	65,0	95,5	95,5
Dosierte Konduktometerwerte	mg/l	71,6	74,1	105,2	108,9
Iso- α -Säuren	mg/l	27,8	27,3	22,7	22,9
Bittere	IBU	26,7	27,0	22,3	22,3
Spez. Bitterstoffausbeute ¹⁾	%-rel.	42,8	42,0	23,8	24,0
Unspez. Bitterstoffausbeute ²⁾	%-rel.	37,3	36,4	21,1	20,5

1) Iso- α -Säuren im Bier: α -Säuren dosiert x 100 %

2) Bittere (IBU) im Bier : Konduktometerwert dosiert x 100 %

Tab. 6

PROZENTUALE GEHALTE DER α - UND β -SÄUREN SOWIE DER SUMME ALLER GASCHROMATOGRAPHISCH ...

... erfassten Aromakomponenten nach einer Extraktlagerung über 51 Monate bei 20 °C

	CO ₂ 280 bar	CO ₂ 500 bar	CO ₂ 280 bar	CO ₂ 500 bar
	HKS gealtert	HKS gealtert	HKS normal	HKS normal
α -Säuren	99	98	98	97
β -Säuren	100	100	99	99
Summe aller GC-Komponenten	99	100	84	84

Tab. 7

sich ca. 20 Prozent an Energie einsparen, denen allerdings die höheren Investitionskosten gegenüberstehen. CO₂ löst bei 500 bar Substanzen, die bei 300 bar unlöslich sind. Neben mehr Chlorophyll – die Extrakte sind „grüner“ – umfasst das in geringen Mengen Xanthohumol und positive Hopfenbegleitbitterstoffe. Die Mengenausbeute ist auf Pellets bezogen bei 500 bar um knapp ein Prozent höher als bei 300 bar.

Zahlreiche Brauversuche zeigen, dass die Bitterstoffausbeuten bei beiden Extrakten identisch sind. Analytisch unterscheiden sich die Biere nur in Spuren von Isoxanthohumol in 500 bar-Bieren. Alle Verkostungen belegen, dass sensorisch kein Unterschied zwischen 300 und 500 bar-Bieren besteht. Das ist allerdings logisch, da schon in den Extrakten die Differenzen marginal sind. Am Verfahren hat sich ja auch nichts geändert, es wurde lediglich optimiert. ■

■ Literatur

1. Biendl, M.; Engelhard, B.; Forster, A.; Gahr, A.; Lutz, A.; Mitter, W.; Schmidt, R. und Schönberger, C.: „Hopfen – vom An-

bau bis zum Bier“, Fachverlag Hans Carl, 2012.

2. Haseleu, G.: Sensorische, strukturanalytische und quantitative Studien zu Bitterstoffen aus Hopfen (*Humulus Lupulus L.*) und deren Beitrag zum Bittergeschmack von Bier, Dissertation, TU München, 2010.
3. Intelmann, D.: Molekulare psychophysikalische und rezeptorbasierte Studien zum Bittergeschmack von Bier, Dissertation, TU München, 2010.
4. MEBAK Brautechnische Analysemethoden, Band Würze, Bier, Biermischgetränke, Selbstverlag der MEBAK, Freising-Weihenstephan, 2012.
5. Ennis, J.M.; Jesionka, V.: The Power of Sensory Discrimination Methods Revisited, *Journal of Sensory Studies* 26, 2011, S. 371-382.
6. MEBAK Methodensammlung, Band Sensorik, 2013, 3.1.3 Dreiecksprüfung (nach DIN EN ISO 4120:2007-10), S. 59-65.
7. Kramer, A.: *Chemical Senses and Flavor* 1, 1974, S. 121-133.