

Hopfenpolyphenole unter der Lupe

HOPFENANALYSE | Hopfen zeichnet sich durch einen hohen Gehalt an Sekundärmetaboliten aus. Die bekanntesten und wichtigsten Vertreter sind das ätherische Öl, die Bitterstoffe (Harze) und die Polyphenole. Für den Einsatz beim Brauprozess müssen die Gehalte genau bekannt sein. Sie stehen – in Abhängigkeit der Sorte und des Erntejahres – für das Hopfenöl und die Bitterstoffe zur Verfügung. Diese detaillierten Angaben fehlen jedoch für die Hopfenpolyphenole mit Ausnahme von Xanthohumol. Hier ist die vollständige Liste.

DIE MASSENSPEKTROMETRIE als das Werkzeug der Wahl in der heutigen Spurenanalytik ermöglicht auch eine detaillierte Untersuchung der phenolischen Verbindungen des Hopfens. Die erzielten Ergebnisse stellen nicht nur eine Erweiterung der Sortencharakterisierung dar, sondern dienen auch als Ausgangsbetrachtungen für eine Bewertung der Qualität des Bieres.

Der Gesamtpolyphenolgehalt der getrockneten Hopfendolden liegt zwischen drei und acht Prozent und ist sortenabhängig [3]. Polyphenole sind natürliche Antioxidantien, welche sowohl die Bierbittere als auch die Wahrnehmung des Bierkörpers bzw. des Mundgefühls positiv beeinflussen können [4–6].

In der Pflanzenwelt sind viele phenolische Verbindungen bekannt. Hierzu zählen phenolische Carbonsäuren, Flavan-3-ole oder Flavonolglykoside. Einige Hopfenpolyphenole finden sich jedoch nicht oder nur sehr selten in anderen Pflanzen. Ein prominentes Beispiel ist das Prenylflavonoid Xanthohumol, welches zusammen mit Bitterstoffen eine Besonderheit des Hopfens ist und bereits vielfach untersucht und beschrieben wurde.

Autoren: Dr. Christina Schmidt, Dr. Martin Biendl, Hallertauer Hopfenveredelungsgesellschaft m.b.H., (Hopsteiner), Mainburg

Tabelle 1 zeigt nicht nur eine Auflistung der untersuchten Hopfensorten, sondern gibt auch einen Überblick über die Gehalte für Alpha-Säuren, Beta-Säuren und Xanthohumol, bekannte Schlüsselinhaltsstoffe des Hopfens. Die Daten wurden mittels HPLC-UV ermittelt und sind der Hopsteiner Homepage entnommen [7].

Die hausinterne Prozesskontrolle während der Hopfenverarbeitung bietet einen großen Pool an Proben der unterschiedlichsten Hopfensorten. In diesen Proben des Erntejahres 2021 wurde ein Monitoring für Hopfenpolyphenole mit Hilfe der LC-

MS/MS-Analytik durchgeführt. Xanthohumol war nicht Teil des Monitorings. Je mehr Batches einer Sorte verarbeitet wurden, desto höher ist die untersuchte Probenzahl für diese Sorte.

Ein Batch enthält max. 30 Tonnen Hopfen. In der Summe konnten mehr als 400 Einzelproben von 23 unterschiedlichen Hopfensorten der europäischen Hauptanbauregionen analysiert werden. Die meisten stammen aus Deutschland, aber auch aus Tschechien, Slowenien und Polen. Vereinzelt standen auch Hopfensorten aus USA und Australien zur Verfügung.

Die Details zur Probenvorbereitung sowie die analytischen Messparameter für die angewandte LC-MS/MS-Methode sind in der Veröffentlichung der Fachzeitschrift *BrewingScience* [8] beschrieben.

› Multifidole

Multifidolglukoside (kurz Multifidole) wurden zum ersten Mal in der Pflanze *Jatropha Multifida* L. beschrieben [9]. Im Hopfen wurde diese Substanzklasse 2005 entdeckt [10]. Multifidole sind Zwischenprodukte bei der Biosynthese der bekannten Alpha-Säuren und Bestandteile des

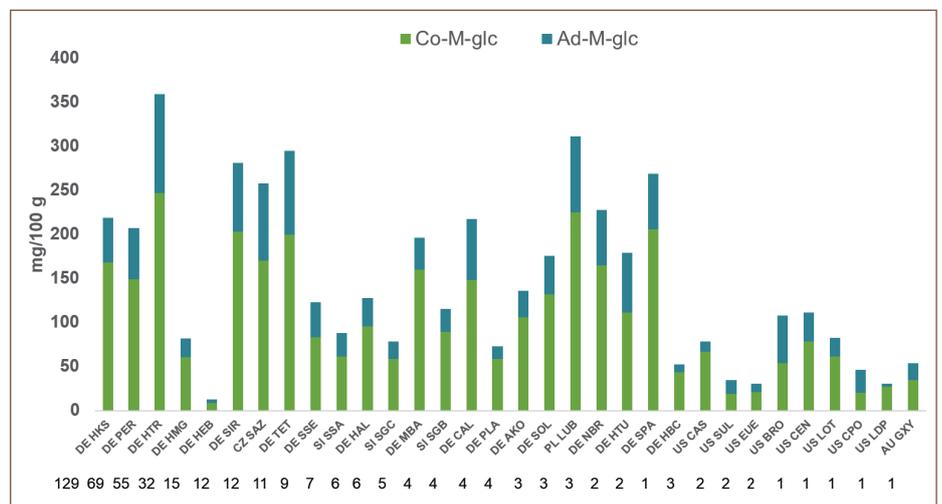


Abb. 1 Konzentrationen für Co-Multifidol-glukosid (Co-M-glc) und Ad-Multifidol-glukosid (Ad-M-glc) in mg/100 g in Hopfen (Ernte 2021) aus Europa, USA und Australien (alle Grafiken: Hopsteiner)

© 2024 Fachverlag Hans Carl GmbH
Alle Rechte vorbehalten

Kopieren, Vervielfältigung und Verbreitung
nur mit Genehmigung des Verlages.

Hartharzes im Hopfen. Es handelt sich um Phloroglucin-Derivate mit Prenyl-Seitenketten, die in Form verschiedener Homologe auftreten [11]. Sie zeigen entzündungshemmende Eigenschaften und werden als bitter wahrgenommen. Der Nachweis im Bier und die Bestimmung der Geschmackschwellenwerte gelang Dresel et al. [5].

Abbildung 1 gibt die ermittelten Gehalte für Co- und Ad-Multifidol-glukosid (Co- und Ad-M-glc) als Mittelwerte an, zusammen mit der Anzahl der untersuchten Proben. Insgesamt konnten 32 Hopfensorten aus Europa, USA und Australien bewertet werden. Die Sorte Herkules wurde mit 129 Proben am häufigsten analysiert.

Die europäischen Sorten zeigen immer höhere Gehalte an Co-M-glc im Vergleich zu Ad-M-glc. Das Verhältnis der beiden Homologe ist sortenspezifisch und schwankt zwischen 1,6 (DE HTU) und 5 (DE MBA bzw. DE HBC). Die höchste Konzentration der beiden Substanzen in der Ernte 2021 wurde bei der Hopfensorte Hallertauer Tradition (DE HTR) mit 358,8 mg/100 g beobachtet, während die niedrigste Menge bei der Sorte Hersbrucker Spät (DE HEB) detektiert werden konnte. Diese Ernte zeigt höhere Gehalte für Multifidolglukoside im Vergleich zu den beiden vorangegangenen Ernten [12].

Die Konzentrationen der amerikanischen Hopfensorten liegen deutlich niedriger als die der europäischen Sorten. Ein Co/Ad-M-glc-Verhältnis von ≥ 1 zeigt nur die amerikanische Sorte Bravo (US BRO).

Obwohl es sich bei diesen beiden Verbindungen um Zwischenprodukte der Biosynthese der Alpha-Säuren handelt, konnte keine Korrelation der Multifidole und der jeweiligen Alpha-Säurenkonzentration (siehe Tab. 1) festgestellt werden. So hat die amerikanische Sorte Eureka! (USEUE) sehr hohe Alpha-Säuregehalte, weist aber sehr niedrige Konzentrationen an Multifidolglukosiden auf.

➤ Weitere Untersuchungsergebnisse

Flavonole liegen im Hopfen genauso wie Multifidole gebunden an Zucker vor. Die bekanntesten Vertreter sind das Quercetin-3-rutinosid (Q-rut), auch bekannt als Rutin, das Quercetin-3-glukosid (Q-glc) und das Kaempferol-3-glukosid (K-glc). Da Flavonolglykoside sehr gut wasserlöslich sind, finden sich im Bier Konzentrationen bis zu 5 mg/l. Deren Gehalte im Hopfen

CHARAKTERISTISCHE MERKMALE DER UNTERSUCHTEN HOPFENSORTEN

Sorten-kürzel [1]	Ursprung	Hopfensorte	% Alpha-Säuren EBC 7.7 [2]	% Beta-Säuren EBC 7.7 [2]	% Xanthohumol EBC 7.15 [2]
DE HKS	Deutschland	Herkules	13,0 – 17,0	4,0 – 5,5	0,6 – 0,8
DE PER	Deutschland	Perle	4,0 – 9,0	2,5 – 4,5	0,4 – 0,6
DE HTR	Deutschland	Hallertauer Tradition	4,0 – 7,0	3,0 – 6,0	0,3 – 0,5
DE HMG	Deutschland	Hallertauer Magnum	11,0 – 16,0	5,0 – 7,0	0,4 – 0,5
DE HEB	Deutschland	Hersbrucker Spät	1,5 – 4,0	2,5 – 6,0	0,2 – 0,3
DE SIR	Deutschland	Saphir	2,0 – 4,5	4,0 – 7,0	0,3 – 0,4
CZ SAZ	Tschechien	Saazer	2,8 – 3,5	3,0 – 5,0	0,2 – 0,4
DE TET	Deutschland	Tettninger	2,5 – 5,5	3,0 – 5,0	0,3 – 0,4
DE SSE	Deutschland	Spalter Select	3,0 – 6,5	2,5 – 5,0	0,3 – 0,5
SI SSA	Slowenien	Super Styrian Aurora	7,5 – 8,8	3,3 – 5,0	0,3 – 0,6
DE HAL	Deutschland	Hallertauer Mittel-früher	3,0 – 5,5	3,0 – 5,0	0,2 – 0,3
SI SGC	Slowenien	Styrian Golding Celeia	4,0 – 7,0	2,5 – 4,5	0,1 – 0,3
DE MBA	Deutschland	Mandarina Bavaria	7,0 – 10,0	4,0 – 7,0	0,4 – 0,8
SI SGB	Slowenien	Styrian Golding Bobek	3,0 – 7,0	4,0 – 7,0	0,3 – 0,4
DE CAL	Deutschland	Callista	2,0 – 5,0	5,0 – 10,0	0,3 – 0,6
DE PLA	Deutschland	Polaris	19,0 – 23,0	4,0 – 6,0	0,7 – 1,0
DE AKO	Deutschland	Akoya	8,0 – 10,0	4,0 – 5,0	0,9 – 1,0
DE SOL	Deutschland	Solero	9,0 – 10,0	5,0 – 6,0	0,7 – 0,8
PL LUB	Polen	Lublin	3,0 – 4,5	2,5 – 3,5	0,2 – 0,3
DE NBR	Deutschland	Northern Brewer	6,0 – 10,0	3,0 – 5,0	0,5 – 0,7
DE HTU	Deutschland	Hallertauer Taurus	12,0 – 17,0	4,0 – 6,0	0,9 – 1,0
DE SPA	Deutschland	Spalter	2,5 – 5,5	3,0 – 5,0	0,2 – 0,3
DE HBC	Deutschland	Hallertau Blanc	9,0 – 12,0	4,0 – 6,0	0,2 – 0,4
US CAS	USA	Cascade	4,5 – 7,0	4,5 – 7,0	0,1 – 0,4
US SUL	USA	Sultana	13,0 – 15,0	4,0 – 5,0	0,5 – 0,7
US EUE	USA	Eureka!	17,0 – 19,9	4,6 – 6,0	0,5 – 0,6
US BRO	USA	Bravo	14,0 – 17,0	3,0 – 5,0	0,8 – 1,0
US CEN	USA	Centennial	9,5 – 11,5	3,5 – 4,5	0,3 – 0,5
US LOT	USA	Lotus	13,0 – 17,0	5,5 – 6,0	0,8 – 1,0
US CPO	USA	Calypso	12,0 – 14,0	5,0 – 6,0	0,5 – 0,7
US LDP	USA	Lemondrop	5,0 – 7,0	4,0 – 6,0	0,2 – 0,3
AU GXY	Australien	Galaxy	11,0 – 16,0	5,0 – 9,0	0,7 – 0,8

Tab. 1

Quelle: Hopsteiner

sind sortenspezifisch und betragen zusammen max. ein Prozent. Zusätzlich zu Rutin, Quercetin-glukosid und Kaempferol-glukosid erweitert diese Studie die Datenlage

für Kaempferol-3-rutinosid (K-rut), Myricetin-3-glukosid, Hespertin-7-rutinosid sowie für die Aglykone Kaempferol, Quercetin und Myricetin.

Weder Hesperin-rutinosid noch Myricetin konnten in den untersuchten Hopfensorten nachgewiesen werden. Sehr geringe Gehalte wurden für Myricetin-3-glukosid und die beiden Aglykone Kaempferol und Quercetin detektiert. Deshalb sind in Abbildung 2 die Ergebnisse der vier dominantesten Flavonolglykoside im Hopfen dargestellt.

Mit Abstand die höchsten Gehalte an Flavonolglykosiden zeigt die Hopfensorte Solero (DE SOL). Wie bereits aus der Literatur [13] bekannt, ist Quercetin-glukosid in höherer Menge als Kaempferol-glukosid vorhanden. Das Verhältnis der beiden liegt zwischen 1,3 für die Hopfensorte Polaris aus Deutschland (DE PLA) und 7,2 für die amerikanische Sorte Bravo (US BRO). Bei den meisten europäischen Sorten kann ein Verhältnis zwischen 2 und 4 beobachtet werden. Den höchsten Gehalt an Kaempferol-glukosid weist die deutsche Hopfensorte Hallertau Blanc (DE HBC) mit 39 mg/100 g auf und den niedrigsten die Sorte Hallertauer Magnum (DE HMG) mit lediglich 5 mg/100 g.

Wie auch bei Quercetin- und Kaempferol-glukosid wird für Quercetin-rutinosid eine höhere Menge im Vergleich zu Kaempferol-rutinosid bestimmt. Nur bei den beiden Sorten Polaris (DE PLA) und Cascade (US CAS) übersteigt die detektierte Menge an Kaempferol-rutinosid den Gehalt an Quercetin-rutinosid. Sorten, die ein 1:1 Verhältnis dieser beiden Substanzen aufweisen, sind US Centennial (US CEN) und die australische Sorte Galaxy (AU GXY).

Außerdem konnte beobachtet werden, dass Kaempferol-glukosid, in höheren Konzentrationen zu finden ist im Vergleich zu Kaempferol-rutinosid außer bei den Sorten Hallertauer Magnum (DE HMG), Solero (DE SOL), US Cascade (US CAS), US Centennial (US CEN), US Lotus (US LOT) und Galaxy aus Australien (AU GXY). Dieses Bild kann auch bei Quercetin-glukosid und Quercetin-rutinosid beobachtet werden. Es findet sich mehr Quercetin-glukosid, mit Ausnahme der oben genannten Hopfensorten.

Es lässt sich also festhalten, dass nicht nur die an Glukose gebundenen Flavonole sich zur Sortendifferenzierung eignen, wie von Kamhuber bereits 2012 beschrieben [13], sondern auch die beiden an das Disaccharid Rutinose gebundenen Flavonole.

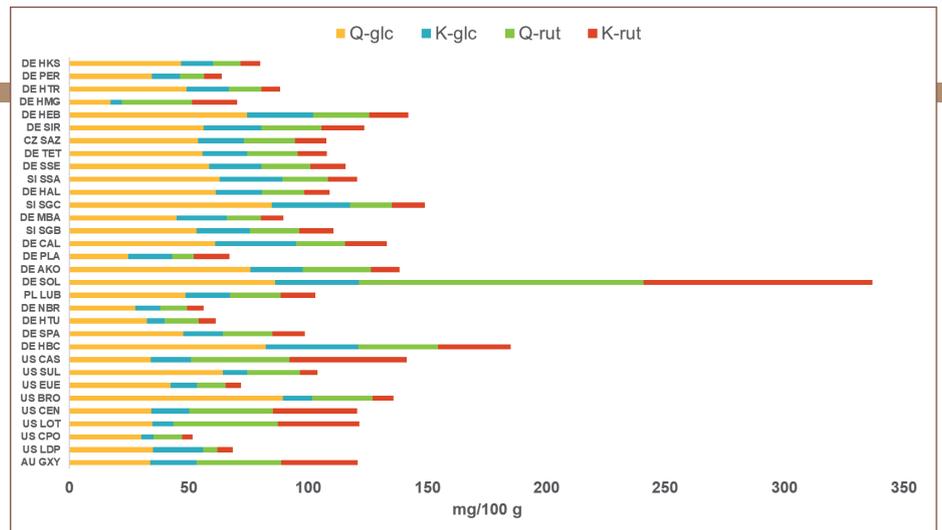


Abb. 2 Flavonolglykoside in mg/100 g in Hopfen (Ernte 2021) aus Europa, USA und Australien

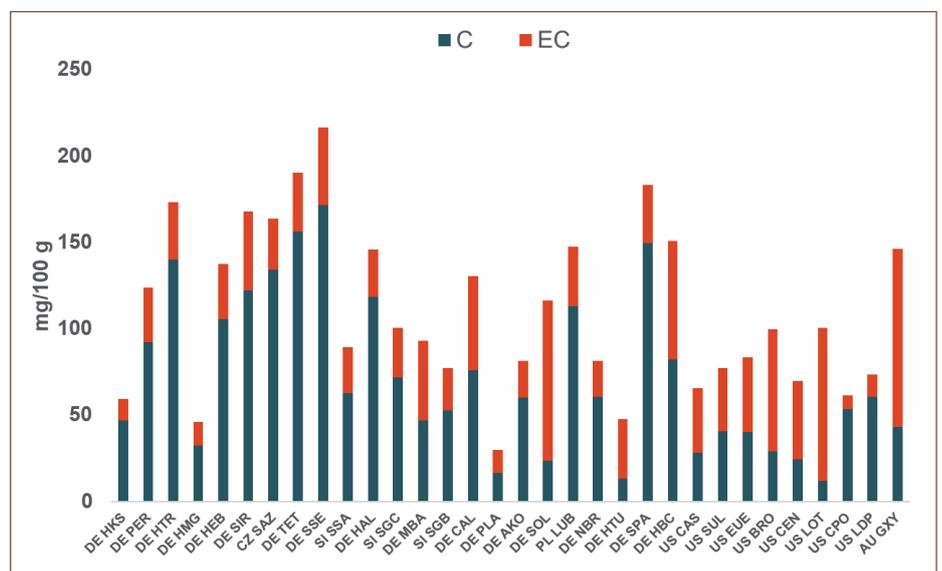


Abb. 3 Gehalte der Flavan-3-ole Catechin (C) und Epicatechin (EC) in mg/100 g in Hopfen (Ernte 2021) aus Europa, USA und Australien

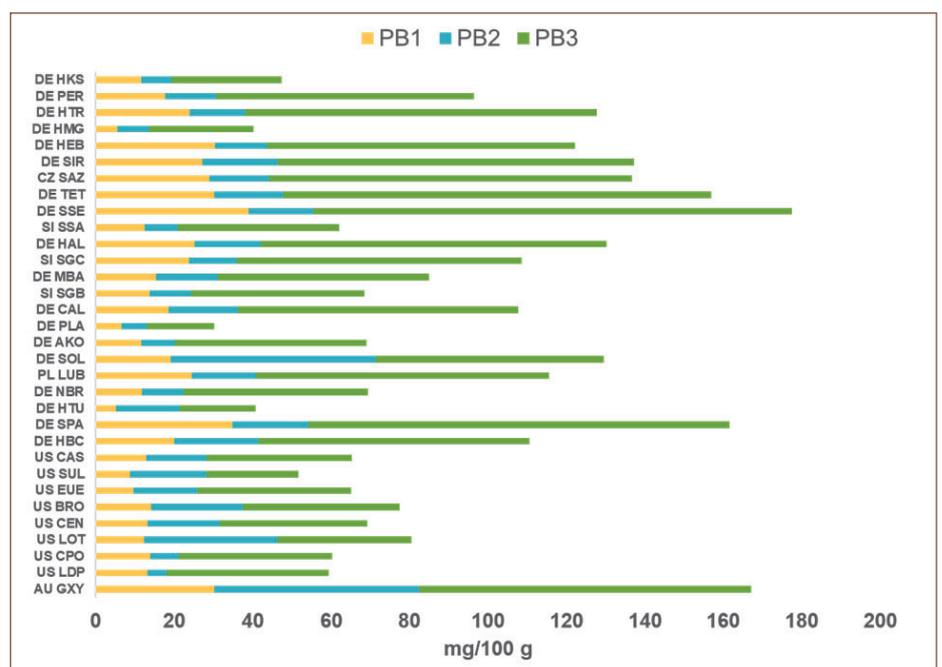


Abb. 4 Konzentrationen der Procyanidine B1, B2 und B3 in mg/100 g in Hopfen (Ernte 2021) aus Europa, USA und Australien

STREUUNG DER EINZELDATEN (MIN/MAX) UND MITTELWERTE (\pm STANDARDABWEICHUNG (σ)) ...

... für Hopfensorten mit Probenanzahl $n > 10$ für einzelne Vertreter der untersuchten Substanzklassen

Sorten-kürzel [1]	n		Co-M-glc	Q-rut	C	B3
DE HKS	129	Mittel ($\pm \sigma$)	168,3 ($\pm 35,9$)	11,6 ($\pm 2,8$)	46,7 ($\pm 10,2$)	8,2 ($\pm 5,3$)
		Min-Max	105,4 – 271,8	6,8 – 18,7	23,8 – 80,7	13,1 – 43,4
DE PER	69	Mittel ($\pm \sigma$)	148,6 ($\pm 36,4$)	10,3 ($\pm 2,7$)	92,4 ($\pm 21,1$)	65,7 ($\pm 13,2$)
		Min-Max	87,3 – 256,0	6,1 – 17,9	51,9 – 126,3	24,5 – 92,4
DE HTR	55	Mittel ($\pm \sigma$)	247,2 ($\pm 49,7$)	13,5 ($\pm 3,4$)	139,9 ($\pm 32,0$)	89,6 ($\pm 18,5$)
		Min-Max	144,8 – 351,4	8,8 – 23,7	68,3 – 210,0	47,2 – 125,4
DE HMG	32	Mittel ($\pm \sigma$)	60,9 ($\pm 16,5$)	29,6 ($\pm 8,2$)	32,2 ($\pm 6,6$)	26,5 ($\pm 6,1$)
		Min-Max	37,3 – 97,2	12,1 – 52,6	15,2 – 49,3	17,8 – 41,7
DE HEB	15	Mittel ($\pm \sigma$)	8,7 ($\pm 4,4$)	23,6 ($\pm 3,7$)	105,6 ($\pm 11,9$)	78,5 ($\pm 5,5$)
		Min-Max	3,1 – 16,3	19,3 – 31,0	83,0 – 120,2	69,7 – 85,1
DE SIR	12	Mittel ($\pm \sigma$)	203,3 ($\pm 40,2$)	25,3 ($\pm 4,6$)	122,1 ($\pm 21,9$)	90,8 ($\pm 19,7$)
		Min-Max	121,7 – 259,2	18,6 – 34,0	75,4 – 155,7	51,5 – 122,5
CZ SAZ	12	Mittel ($\pm \sigma$)	170,3 ($\pm 37,7$)	21,5 ($\pm 4,8$)	134,1 ($\pm 32,3$)	92,5 ($\pm 14,2$)
		Min-Max	115,9 – 220,6	16,8 – 34,7	74,5 – 188,8	73,0 – 121,6
DE TET	11	Mittel ($\pm \sigma$)	199,8 ($\pm 36,5$)	21,2 ($\pm 4,2$)	156,4 ($\pm 33,1$)	109,0 ($\pm 19,3$)
		Min-Max	128,6 – 250,0	16,1 – 29,9	85,6 – 194,4	69,4 – 136,1

Tab. 2

Quelle: Hopsteiner

➤ Gruppe der Flavan-3-ole

Die wichtigsten Vertreter der Gruppe der Flavan-3-ole im Hopfen sind Catechin, sein Epimer Epicatechin und Gallocatechin. Sie liegen nicht nur in freier Form vor, sondern auch als Di-, Oligo- oder Polymere. Ketten aus bis zu acht Einheiten (Oligomere) werden als Proanthocyanidine bezeichnet. Für Polymere wird der Begriff Tannine verwendet.

Die vier Procyanidine B1, B2, B3 und B4 sind Dimere, die sich ausschließlich aus den Monomeren Catechin und Epicatechin zusammensetzen. Sie sind Hauptbestandteile der Procyanidine in jeder Hopfensorte, und zwar mit ca. 80 Prozent des Gesamtgehaltes für diese Substanzgruppe [3].

In den Brauprozess gelangen die Flavan-3-ole hauptsächlich über das Malz und nur zu ca. 20–30 Prozent über den Hopfen. Bei der Würzekochung bilden sie schwer lösliche Komplexe mit Proteinen, welche mit dem Trub abgetrennt werden. Über die Zeit der Lagerung können die verbleibenden Polyphenole und Proteine Trübung verursachen [14–15].

Abbildung 3 fasst die Ergebnisse für die beiden Flavan-3-ole Catechin und Epicatechin zusammen. Die höchste Summe für die beiden Substanzen hat die Hopfensorte Spalter Select (DE SSE) mit 224 mg/100 g.

Die niedrigste Summe, mit nur etwa einem Zehntel der Sorte Spalter Select, wurde bei der Sorte Polaris (DE PLA) gefunden. Es zeigt sich häufig, dass Catechin dominanter ist als Epicatechin.

Ein Verhältnis von 1:1 weisen die Sorten Mandarina Bavaria (DE MBA), Hallertau Blanc (DE HBC), Polaris (DE PLA) und die amerikanischen Hopfensorten Cascade (US CAS), Sultana (US SUL) und Eureka! (USEUE) auf.

Mehr Epicatechin als Catechin weisen die deutschen Sorten Solero (DE SOL) und Hallertauer Taurus (DE HTU), die amerikanischen Sorten Bravo (US BRO), Centennial (US CEN) und Lotus (US LOT) sowie die australische Sorte Galaxy (AU GXY) auf.

Wichtig für die Betrachtungen zu Procyanidinen ist die Tatsache, dass Procyanidin B1 sich aus Epicatechin und Catechin als

Monomere zusammensetzt, während Procyanidin B2 nur Epicatechin und Procyanidin B3 nur Catechin als Monomere hat.

Die Procyanidine

So ist auch analog zu den Daten der Monomere die Sorte Spalter Select (DE SSE) die procyanidinreichste Hopfensorte, während Polaris (DE PLA) die procyanidinärmste Sorte ist (Abb. 4).

Procyanidin B3 konnte als die dominanteste Verbindung unter den analysierten Procyanidinen identifiziert werden. Es ist außerdem möglich, die evaluierten Hopfensorten in drei Gruppen einzuteilen.

Gruppe 1 hat folgende Reihenfolge der Procyanidine: $B3 > B2 \geq B1$. Dazu zählen die Sorten Hallertauer Magnum (DE HMG), Hallertauer Taurus (DE HTU), Mandarina Bavaria (DE MBA), Polaris (DE PLA), Hallertau Blanc (DE HBC) und Solero (DE SOL) und alle amerikanischen Hopfensorten mit Ausnahme von Calypso (US CPO), Lemondrop (US LDP) und Lotus (US LOT).

Gruppe 2 dagegen hat mehr Procyanidin B3 als B1 und dieses liegt höher als B2 ($B3 > B1 > B2$). Sie schließt alle restlichen europäischen Sorten mit ein sowie die beiden US-Sorten Calypso (US CPO) und Lemondrop (US LDP).

Für die letzte Gruppe 3 mit $B3 = B2 > B1$ bleibt bei aktueller Datenlage nur die amerikanische Sorte Lotus (US LOT).

Phenolische Carbonsäuren kommen nicht nur im Hopfen vor. Sie werden wie auch die Flavan-3-ole hauptsächlich über den Rohstoff Malz in den Brauprozess eingebracht. Bestimmte phenolische Carbonsäuren werden auch als Beteiligte der alterungsbedingten Trübung diskutiert [15]. Ihre Gehalte im Hopfen sind jedoch äußerst gering [3].

Untersucht wurden Ferulasäure, p-Hydroxybenzoesäure, p-, m- und o-Cumarsäure. In keiner der untersuchten Hopfensorten konnte o- und m-Cumarsäure detektiert werden. Nur 17 der 32 untersuchten Sorten zeigten Konzentrationen ≥ 1 mg/100 g für eine oder mehrere untersuchte Verbindungen.

Zum Beispiel enthält die Hopfensorte Perle (DE PER) Gehalte ≥ 1 mg/100 g für Ferulasäure (1,2 mg/100 g), p-Hydroxybenzoesäure (1,0 mg/100 g) und auch für p-Cumarsäure (1,1 mg/100 g), während die Sorte Polaris (DE PLA) mit Gehalten von 1,7 mg/100 g für Ferulasäure und 2,1

mg/100 g für p-Cumarsäure die höchsten Konzentrationen für diese Substanzklasse aufweist. Ein Unterschied zwischen europäischen und amerikanischen Sorten konnte nicht beobachtet werden.

› Sortenbetrachtung und Fazit

Wichtig für die Sortenbetrachtungen sind nicht nur die Mittelwerte, sondern auch die Streuung der Einzeldaten. Tabelle 2 zeigt zusätzlich die relative Standardabweichung (σ) sowie die Minimal- und Maximalwerte für Hopfensorten mit einer Probenanzahl größer als zehn. Dazu werden beispielhaft einzelne Vertreter der untersuchten Substanzklassen aufgeführt. Es handelt sich um Daten für Co-Multifidol-glukosid (Co-M-glc), Quercetin-rutinosid (Q-rut), Catechin (C) und Procyanidin B3 (PB3). Die Ergebnisse zeigen breite Konzentrationsbereiche und machen die Notwendigkeit einer hohen Probenanzahl deutlich.

Es lässt sich somit ableiten, dass zuverlässige und repräsentative Ergebnisse der Durchschnittswert von mindestens zehn Proben sein müssen. Bei drei bis neun Proben zeigt sich ein sortenabhängiger Trend, während weniger als drei Proben nur einen möglichen Ausschnitt zeigen und durch weitere Proben abgesichert werden müssen. ■

› Literatur

1. IHGC, International Hop Growers' Convention, 2021, https://www.hopfenforschung.de/wp-content/uploads/2021/12/IHGC-hop-variety-list-2021_final.pdf.
2. www.brewup.eu/ebc-analytica, abgerufen am 14.5.2024.
3. Biendl, M.; Engelhard, B.; Forster, A.; Gahr, A.; Lutz, A.; Mitter, W.; Schmidt, R.; Schönberger, C.: Hopfen – Vom Anbau bis zum Bier, Fachverlag Hans Carl, Nürnberg, 2012.
4. Spreng, S.; Hofmann, T.: „Activity-Guided Identification of in Vitro Antioxidants in Beer“, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66, 2018, S. 720–731.
5. Dresel, M.; Dunkel, A.; Hofmann, T.: „Sensomics Analysis of Key Bitter Compounds in the Hard Resin of Hops (*Humulus lupulus* L.) and Their Contribution to the Bitter Profile of Pilsner-Type Beer“, *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 63, 2015, S. 3402–3418.
6. Goiris, K.; Jaskula-Goiris, B.; Syryn, E.; Van Opstaele, F.; De Rouck, G.; Aerts, G.; De Cooman, L.: „The Flavoring Potential of Hop Polyphenols in Beer“, *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 72, 2014, S. 135–142.
7. www.hopsteiner.com/de, abgerufen am 14.5.2024.
8. Schmidt, C.; Biendl, M.: „Quantitative analysis of a large spectrum of hop phenolic compounds by LC-MS/MS“, *BrewingScience*, 76, 2023, S. 38–47.
9. Kosasi, S.; Van Der Sluis, W.; Labadie, R.: „Multifidol and Multifidol Glucoside from the Latex of *Jatropha multifida*“, *Phytochemistry*, 28, 1989, S. 2439–2441.
10. Bohr, G.; Gerhäuser, C.; Knauff, J.; Zapp, J.; Becker, H.: „Anti-inflammatory Acylphloroglucinol Derivatives from Hops (*Humulus lupulus*)“, *Journal of Natural Products*, 68, 2005, S. 1545–1548.
11. Clark, S. M.; Vatheeswaran, V.; Ambrose, S. J.; Purves, R. W.; Page J. E.: „Transcriptome Analysis of Bitter Acid Biosynthesis and Precursor Pathways in Hop (*Humulus lupulus*)“, *BMC Plant Biology*, 13, 2013, S. 1–14.
12. Biendl, M.; Ritter, S.; Schmidt, C.: „Monitoring of Glycosidically Bound Polyphenols in Hops and Hop Products Using LC-MS/MS Technique“, *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 81, 2023, S. 45–53.
13. Kammhuber, K.: „Differentiation of the World Hop Collection by Means of the Low Weight Molecular Polyphenols“, *BrewingScience*, 65, 2012, S. 16–23.
14. Aron, P. M.; Shellhammer, T. H.: „A Discussion of Polyphenols in Beer Physical and Flavour Stability“, *Journal of the Institute of Brewing*, 116, 2010, S. 369–380.
15. Jongberg, S.; Andersen, M. L.; Lund, M. N.: „Covalent Protein-Polyphenol Bonding as Initial Steps of Haze Formation“, *Journal of the American Society of Brewing Chemists*, 78, 2020, S. 153–164.