

Reduktionsmöglichkeiten von Asparagin und Acrylamid in der Getreidewertschöpfungskette – Sortenwahl, Anbau, Müllerei und Bäckerei

apl. Prof. Dr. Friedrich Longin, Landessaatzuchtanstalt der Universität Hohenheim, Dr. Klaus Schwadorf und Dr. Ute Bertsche, Core Facility der Universität Hohenheim, Dr. Andreas Baitinger, Gewerbliche Schule Im Hoppenlau, M.Sc. Matthias Rapp, W. v. Borries-Eckendorf GmbH & Co. KG, Dr. Lorenz Hartl, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Heiner Beck, Bäckerei BeckaBeck, Herman Gütler, Stelzenmühle; Kontakt: friedrich.longin@uni-hohenheim.de

Zusammenfassung

Acrylamid ist ein als krebserregend eingestufte Stoff, der bei starker Hitzeeinwirkung in der Verarbeitung stärkehaltiger Produkte entstehen kann. Über die Maillardreaktion wird er aus reduzierenden Zuckern und freiem Asparagin gebildet. Die EU Kommission hat letztes Jahr den Richtwert für Acrylamid in Weizenbrot auf 50 µg/kg gesenkt. Unser Ziel war es deshalb zu untersuchen, wie man das Acrylamidrisiko entlang der Getreidewertschöpfungskette senken kann. Dazu haben wir mehrere Versuchsserien unternommen. Zunächst haben wir in einem umfangreichen Backversuch klar zeigen können, dass der Gehalt an freiem Asparagin im Mehl sehr eng mit dem Acrylamidgehalt im Brot korreliert. Eine lange Teigruhe kann den Acrylamidgehalt im Brot erheblich reduzieren. Die Gehalte an freiem Asparagin im Mehl schwankten sehr zwischen den Sorten innerhalb der Arten Weizen, Durum, Dinkel, Emmer und Einkorn. Die Gehalte an freiem Asparagin der Sorten korrelierten nicht mit anderen Qualitätseigenschaften wie Proteingehalt, Sedimentationswert, Korngröße und Fallzahl. Eine gesteigerte Stickstoffdüngung führt zu höheren Gehalten an freiem Asparagin, allerdings hat die Wahl der Sorte einen größeren Einfluss auf die Gehalte an freiem Asparagin als die Düngung. Es konnten zudem Erkenntnisse belegt werden, nach denen der Ausmahlungsgrad einen großen Einfluss auf den Gehalt an freiem Asparagin von Mehl hat. Somit stehen zahlreiche Möglichkeiten entlang der Getreidewertschöpfungskette zur Verfügung, um das Acrylamidrisiko bei Getreideprodukten nachhaltig zu reduzieren.

Weizen (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*) ist weltweit eines der wichtigsten Grundnahrungsmittel und dessen täglicher Konsum gehört laut führenden Weltgesundheitsorganisationen wie der WHO, FAO und der EFSA zu einer gesunden und ausgewogenen Ernährung, insbesondere wenn Weizenprodukte als Vollkornvariante verzehrt werden [cf. 1]. Acrylamid ist ein als krebserregend eingestufte Stoff, der bei starker Hitzeeinwirkung in der Verarbeitung stärkehaltiger Produkte wie Kartoffeln und Getreide entstehen kann [2, 3]. Vor allem frittierte Kartoffelprodukte wie Chips und Pommes Frites zeigen hohe Acrylamidkonzentrationen, aber auch in den meisten Getreideprodukten kann Acrylamid nachgewiesen werden, in höheren Konzentrationen allerdings vor allem in Keksen, Lebkuchen und Knäckebrot [4, 5, 6]. In Brot findet man über 95% des Acrylamids in der Kruste und somit kaum Acrylamid in der Krume [2]. Die EU-Kommission hat den Richtwert für Acrylamid in Weizenbrot unlängst auf 50 µg/kg gesenkt. Für andere Brote liegt er bei 100 µg/kg.

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Methoden getestet, um den Acrylamidgehalt in Endprodukten zu senken. Acrylamid entsteht unter Hitzeeinwirkung in der sogenannten Maillard-Reaktion, wenn genügend reduzierende Zucker und die Aminosäure freies Asparagin vorhanden sind [2, 3, 7]. Eine der wichtigsten Maßnahmen zur Reduktion von Acrylamid ist eine Verringerung der Hitzeeinwirkung und somit die Vermeidung der Maillard-Reaktion. Allerdings muss man bedenken, dass gerade bei Brot diese Maillard-Reaktion zu der Bildung der knusprigen und aromatischen Kruste führt. Deshalb gilt es

Kompromisse zu finden, zwischen der Minimierung der Hitzeeinwirkung und der ausreichenden Gare und Geschmacksentwicklung. Es konnte weiter gezeigt werden, dass die Zugabe von der Aminosäure Cystein oder dem Enzym Asparaginase die Acrylamidbildung auch deutlich senken können [2].

Ein anderer Ansatz ist die Reduktion der Vorstufen des Acrylamids bereits im Rohmaterial, also im Getreide. Da bei der Herstellung von Getreideprodukten reduzierende Zucker im Überfluss vorhanden sind, kommt es auf die Beeinflussung des Gehaltes an freiem Asparagin an [8]. In mehreren experimentellen Feldstudien konnte für Weizen gezeigt werden, dass die Schwefelversorgung des Bodens einen maßgeblichen Einfluss auf die Asparaginmenge im Korn hat [7, 9, 10, 11, 12, 13]. So führt eine starke Schwefelunterversorgung zu stark gesteigerten Gehalten von freiem Asparagin. Bei normal mit Schwefel versorgten Böden, wie sie bei guter landwirtschaftlicher Praxis durch die empfohlenen Schwefeldüngergaben erreicht werden wurden Gehalte von freiem Asparagin auf deutlich niedrigerem Niveau gefunden.

Wenig Untersuchungen gibt es bisher zu der Frage, ob sich Sorten bezüglich des Gehaltes an freiem Asparagin unterscheiden und wenn ja, wie groß dieser Faktor im Vergleich zum Umwelteinfluss des Anbauortes bzw. der Stickstoffdüngung ist. In einer einfachen Laborstudie wurde gezeigt, dass eine längere Teigruhe die Acrylamidmenge reduzieren konnte [2], aber eine wiederholte Studie unter echten Bäckereibedingungen fehlt bisher.

Versuchsaufbau

Wir haben deshalb mehrere Versuche gestartet, in denen zahlreiche Sorten der Arten Weizen, Durum, Dinkel, Emmer und Einkorn an jeweils drei Standorten angebaut wurden und dann im Labor auf deren Gehalte an freiem Asparagin im Vollkornmehl untersucht wurden. Darüber hinaus wurden im Labor zahlreiche Qualitätseigenschaften bestimmt, um deren mögliche Korrelation zum Gehalt an freiem Asparagin zu untersuchen. Beim Einkorn, Emmer und Dinkel wurden jeweils 10 Sorten, beim Durum 25 Sorten und beim Weizen 149 Sorten an jeweils drei Standorten in partiell wiederholten Versuchen angebaut. Beim Stickstoffdüngungsversuch wurden 2016/2017 sieben Weizensorten an drei Orten in drei Stickstoffdüngungsstufen angebaut (N1 = 175 kg Stickstoff/ha, N2 = 200 kg Stickstoff/ha, N3 = 230 kg Stickstoff/ha, jeweils Nmin + Düngung). Der Zusammenhang freies Asparagin im Vollkornmehl und Acrylamid in der Brotkruste wurde an 20 verschiedenen Broten untersucht, die sich lediglich in der verwendeten Weizensorte unterschieden. Die Weizensorte war jeweils eine Mischprobe aus drei Anbauorten und wurde sortenrein zu Vollkornmehl vermahlen (Treffler Mühlomat, Sieblochung = 500 µm). Zudem wurden die Brote einmal mit kurzer und langer Teigruhe gebacken. Bei der kurzen Teigruhe wurden 2 kg Vollkornmehl, 40 g Salz, 50 g Hefe, 1,3 l Wasser zu Teig verarbeitet und nach 1,5 Stunden als freigeschobenes Brot gebacken. Bei der langen Teigruhe wurde die Hefemenge halbiert und die Wassermenge auf 1,5 l erhöht, wie es auch im Bäckerbetrieb üblich ist. Nach dem Kneten waren die Teige 17 Stunden im Kühlschrank und wurden nach einer sieben-stündigen Akklimatisationszeit unter Raumtemperatur verbacken [für mehr Details siehe 14].

Der Rohproteingehalt wurde per NIRS bestimmt (ICC Standardmethode 159) und der Gehalt an freiem Asparagin am Vollkornmehl bestimmt (EC No 152/2009, Annex III, Method F, mehr Details unter [15]). Die Acrylamidmenge wurde an der Kruste der 40 Versuchsbrote bestimmt nach [18].

Zudem wurden die Kornmuster von fünf Weizensorten zweier Anbauorte in der gewerblichen Schule Im Hoppenlau durch erfahrene Müller zu standardisierten Mehlen verarbeitet und der Asparagingehalt separat für Kleie, Vollkornmehl und die Auszugsmehle der Type 1050 und 550 bestimmt. Als Basisvermahlungsmaschine wurde der Promylograph T verwendet. Die groben Schalenanteile wurden auf einer Labormühle nachzerkleinert. Die Type 1050 wurde aus einzelnen Fraktionen ermischt. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistikpaket R unter Nutzung des Paketes ASREML .

Acrylamidmenge der Brotkruste korreliert eng mit Asparagingehalt der Mehle

Da sich der größte Anteil des Acrylamids beim Brot in der Brotkruste befindet, haben wir uns bei der Messung des Acrylamids auch auf die Brotkruste konzentriert [z.B. 2]. Die Menge Acrylamid in der Brotkruste korrelierte mit 0,89 mit dem Gehalt an freiem Asparagin des Ausgangsmehls, wenn eine kurze Teigruhe angewendet wurde (Fig. 1A). Bei der langen Teigruhe war die Korrelation etwas geringer aber mit 0,73 immer noch hoch positiv (Fig. 1B). Dies bestätigt andere Studien in der Literatur [z.B. 2, 3, 7, 11, 12] und zeigt auf, dass die Menge freies Asparagin im Mehl eine zentrale Rolle für die Bildung von Acrylamid darstellt. Je weniger davon im Getreide ist, umso geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer erhöhten Acrylamidbildung im Endprodukt.

Die Acrylamidmenge schwankte je nach Weizensorte bei den Broten mit der kurzen Teigruhe zwischen 72,0 und 399,2 µg/kg Brotkruste und bei den Broten mit der langen Teigruhe zwischen 48,8 und 250,8 µg/kg Brotkruste. Das lässt mehrere Folgerungen zu. Erstens, da wir die Acrylamidmenge nicht am gesamten Brot, sondern an der Brotkruste gemessen und die Brotkruste den kleinsten Teil des Brotes darstellt, war die Acrylamidmenge bezogen aufs gesamte Brot bei allen Versuchen weit unter dem EU Grenzwert. Zweitens, der Bäcker hat alleinig durch eine verlängerte Teigruhe die Möglichkeit, die Acrylamidmenge im Brot erheblich zu reduzieren, was eine „clean-labe“ Methode darstellt. Und Drittens sieht man durch die große Schwankungsbreite der Acrylamidwerte der 20 Versuchsbrote, die sich ja nur in der verwendeten Weizensorte unterschieden, den möglichen Effekt, den die Auswahl der Weizensorte auf die Acrylamidmenge im Endprodukt haben kann.

Sorten unterscheiden sich deutlich im Gehalt an freiem Asparagin

Acrylamid wird erst unter Hitzeeinwirkung gebildet, ist im erntefrischem Getreide nicht vorhanden. Freies Asparagin ist allerdings im Getreide messbar und wie oben gezeigt, korreliert der Gehalt an freiem Asparagin sehr eng mit der Acrylamidmenge im Brot. Somit macht es Sinn, Rohgetreide auf den Gehalt freies Asparagin zu untersuchen. Bei allen Weizenarten konnten wir sehr unterschiedliche Gehalte an freiem Asparagin der einzelnen Sorten feststellen (Tab. 1, Tab. 2). So schwankten beispielsweise beim Brotweizen die Gehalte an freiem Asparagin der untersuchten 149 Sorten von 143,25 mg/kg bis 453,34 mg/kg im Vollkornmehl. Dies zeigte sich auch durch statistisch signifikante genetische Varianzen für den Gehalt an freiem Asparagin bei allen Weizenarten. Insofern besteht theoretisch die Möglichkeit, durch Sortenwahl die Menge von freiem Asparagin im Rohmaterial erheblich zu senken. Allerdings stellten wir auch fest, dass sich die Gehalte an freiem Asparagin einer Sorte je nach Anbauort erheblich unterschieden, obwohl die Düngung und Anbauverfahren an jedem Ort gleich waren (Fig. 4). Anbauorte, von denen Müller ihre Weizenlieferungen bekommen, unterscheiden sich jedes Jahr und das Klima am jeweiligen Ort noch viel mehr, was alles die Aufnahme von Nährstoffen und somit die Zusammensetzung des Getreidekorns beeinflusst. Insofern ist eine gezielte Auswahl der Anbauumwelt mit dem Ziel einer Reduktion des Gehaltes an freiem Asparagin in Getreide eigentlich unmöglich. Unbedingt sichergestellt werden sollte jedoch die bereits oben erwähnte Vermeidung eines Schwefelmangels der Weizenbestände, was in unseren Versuchen beachtet wurde.

Stickstoffdüngung steigert Gehalt an freiem Asparagin

Im Gegensatz zu den zufälligen Schwankungen des Klimas an jedem Ort stellt die Düngung mit Stickstoff eine durch die Landwirtschaft beeinflussbare Größe dar. Wir haben deswegen sieben Weizensorten an drei Anbauorten in drei Stickstoffdüngungsstufen angebaut und untersucht. Dabei kam ein klarer Trend heraus. Je mehr Stickstoff gedüngt wurde, desto höher war der Gehalt an freiem Asparagin im Vollkornmehl (Fig. 2). Dies bestätigt andere aktuelle Studien in der Literatur [z.B. 16]. Dieser Effekt ist vergleichbar mit dem Rohproteingehalt, der mit steigender Stickstoffdüngung auch steigt [z.B. 17]. Somit stellt die Reduktion der Stickstoffdüngung eine Möglichkeit dar, die Gehalte an freiem Asparagin und damit letztendlich auch Acrylamid in Backwaren zu senken. Allerdings ist es aus unserer Sicht falsch, wegen Asparagin prinzipiell Weizen mit wenig Proteingehalt zu fordern. Unsere

Studien zeigen klar auf, dass man ohne Kenntnis der Sorte nicht alleinig vom Proteingehalt einer Weizenprobe auf den zu erwartenden Gehalt an freiem Asparagin schließen kann. So gibt es unter den 149 untersuchten Weizensorten welche mit einem Proteingehalt $> 13\%$, die aber < 200 mg/kg Asparagin hatten und umgekehrt Sorten mit einem Proteingehalt $< 12\%$ mit > 300 mg/kg an freiem Asparagin (Fig. 3). Dies zeigt auch eindrücklich der Düngungsversuch. Auch in der höchsten Düngungsstufe hatte Sorte 4 einen niedrigeren Asparagingehalt als Sorte 7 im niedrigsten Düngungsniveau. Aus Sicht einer Minimierung von Asparagin ist es also am besten das Wechselspiel zwischen Sorte und Düngung (weniger Stickstoff, ausreichend Schwefel) zu beachten und dabei aber die Backeigenschaften nicht aus dem Blick zu verlieren.

Züchtung auf niedrigen Gehalt an freiem Asparagin möglich, aber nötig?

Somit sind wir wieder bei der Möglichkeit der Sortenwahl. Sorten mit niedrigem Gehalt an freiem Asparagin werden natürlich nur akzeptiert, wenn diese in den anderen Merkmalen wie Backqualität gut sind. Aus diesem Grund haben wir den Zusammenhang zwischen dem Gehalt an freiem Asparagin und mehreren Qualitätskriterien bei Weizen untersucht. Wie oben beschrieben korrelierte der Asparagingehalt bei allen Arten kaum mit dem Proteingehalt (Fig. 3, Tab. 1). Es gibt Sorten, die von der Genetik her viel Protein bilden, die dann aber nicht unbedingt auch viel freies Asparagin haben. Allerdings führen Steigerungen der Stickstoffdüngung bei allen Sorten zu einem höheren Protein- und Asparagingehalt (Fig. 2). Die Gehalte an freiem Asparagin korrelierten nicht mit den weiteren wichtigen Qualitätsmerkmalen wie dem Sedimentationswert, der Fallzahl, der Korngröße sowie beim Durum auch nicht mit b-Wert und Glasigkeit. Das bedeutet einerseits, dass man den Gehalt an freiem Asparagin nicht einfach anhand eines anderen Merkmales vorhersagen kann, sondern dieser muss selbst gemessen werden. Andererseits bedeutet es aber auch, dass man auf Sorten mit niedrigem Gehalt an freiem Asparagin züchten könnte, ohne dass man negative Konsequenzen auf andere Qualitätseigenschaften erwarten muss. Die Züchtung ist aber ein langwieriger Prozess und die Analytik zur Bestimmung von Asparagin ist aufwendig. Insofern stellt sich die Frage, inwieweit die aufgezeigten Sortenunterschiede wirklich für die Getreidebranche von Bedeutung sind und sich eine aufwendige Züchtung dafür lohnt.

Asparagin ist vor allem in Mehlen mit höherem Ausmahlungsgrad

Zusammen mit der gewerblichen Schule Im Hoppenlau haben wir die Asparagingehalte an sortenreinen Mehlen untersucht und dabei unterschieden zwischen Vollkornmehl, den Auszugsmehlen der Type 1050 und 550 und der Kleie. Bei allen Sorten und unabhängig vom Anbauort war mit Abstand am meisten Asparagin in der Kleie (≥ 400 mg/kg, Fig. 4). Etwa halb so viel Asparagin wurde dahingegen im Vollkornmehl gemessen. Interessanterweise hatte das Auszugsmehl der Type 1050 fast genauso viel Asparagin wie das Vollkornmehl. Das Auszugsmehl der Type 550 hatte dahingegen nur eine sehr geringe Menge Asparagin (< 75 mg/kg), was ältere Studien bestätigt [11]. Insofern kann durch die Wahl der Mehltypen etwas getan werden, den Gehalt an freiem Asparagin zu senken. Aus dieser Sicht ist ein Mehl mit niedrigem Aschegehalt am besten, was ja auch mit Abstand am meisten in der Bäckerei eingesetzt wird. Interessanterweise sah man aber auch bei den verschiedenen Mehltypen die Abhängigkeit der Gehalte an freiem Asparagin vom Anbauort aber auch von der Sorte. So fiel beispielsweise die Sorte Patras sowohl in diesem Mahlversuch als auch in dem großen Weizensortenscreening (Tab. 2) und dem Düngungsversuch (Fig. 2, Sorte 4) positiv auf. Das bedeutet, dass man den Gehalt an freiem Asparagin in den verschiedenen Mehlfraktionen zumindest grob über eine einzelne Messung am Vollkornmehl abschätzen kann.

Feines Auszugsmehl zu nehmen, um der Acrylamidproblematik aus dem Weg zu gehen, wollen wir aber hier auf keinen Fall als Empfehlung geben. Der Verbraucher isst es zwar mit Abstand am liebsten, aber es ist unzweifelhaft bewiesen, dass für eine gesunde Ernährung unser täglich Brot dazugehört,

allerdings in der Vollkornvariante. Insofern müssen für das Vollkornbacken andere Methoden gefunden werden, falls Acrylamidreduktionen nötig sind.

Vergleich verschiedener Weizenarten

Hierfür haben wir den Gehalt an freiem Asparagin an zahlreichen Sorten der Arten Weizen, Durum, Dinkel, Emmer und Einkorn bestimmt. Der Vergleich zwischen den Arten ist bei unseren Versuchen nicht gänzlich losgelöst von umweltbedingter Variation, da sich für die einzelnen Arten z.T. der Anbauort und das Anbaujahr unterschied. Allerdings sind die Ergebnisse so eindeutig, dass man folgendes ableiten kann. Die Sorten von Weizen, Durum, Dinkel und Emmer scheinen in etwa den gleichen Schwankungsbereich beim Gehalt an freiem Asparagin zu haben, während Einkorn etwa doppelt so viel hat. Eine Erklärungsmöglichkeit ist, dass Einkorn im Vergleich zu den anderen untersuchten Weizenarten ein deutlich kleineres Korn hat und somit beim Vollkornmehl relativ gesehen mehr Schale und weniger Endosperm auftritt. Da laut unsere Mehlstudie aber das Asparagin vor allem in den Randschichten sitzt, ist die geringere Menge Asparagin bei den anderen Weizenarten lediglich ein Verdünnungseffekt des Endosperms. Dies ist ja auch die Begründung warum Einkorn bei positiven Inhaltsstoffen wie Mineralstoffen und Vitaminen deutlich mehr als die anderen Weizenarten hat. Insofern sind mögliche Acrylamidreduktionen bei Einkorn von größerer Bedeutung als bei den anderen Arten. Auch hier gilt, dass die vielen positiven Inhaltsstoffe des Einkorns so interessant sind, dass man nicht wegen Acrylamid von vorneherein auf Einkorn und insbesondere Einkornvollkorn verzichten sollte.

Fazit

Inwiefern Aktivitäten zur Reduktion des Acrylamids bei Weizenprodukten entlang der Wertschöpfungskette überhaupt notwendig sind, können und wollen wir mit dieser Studie nicht beantworten. Die wenigsten Backprodukte erreichen Acrylamidwerte wie Pommes Frites oder Chips und alle gemessenen Versuchsbrote befanden sich deutlich unter dem EU Grenzwert für Acrylamid. Unser Anliegen war es, verschiedene Möglichkeiten entlang der Getreidewertschöpfungskette auf deren Potential zur Acrylamidreduktion zu untersuchen. Zunächst konnten wir untermauern, dass der Gehalt an freiem Asparagin im Vollkornmehl sehr eng mit der Menge Acrylamid im Brot zusammenhängt. Wir konnten weiter klar aufzeigen, dass es im Weizen, Durum, Dinkel, Emmer und Einkorn große Unterschiede des Gehaltes an freiem Asparagin einzelner Sorten gibt. Durch Sortenwahl könnte somit das Acrylamidrisiko von vorneherein fast halbiert werden. Es wäre sogar möglich über gezielte Selektion, die Gehalte an freiem Asparagin bei Weizen langfristig weiter zu senken. Eine reduzierte Stickstoffdüngung führt auch zu reduzierten Gehalten an freiem Asparagin im Mehl ist aber nur in Kombination mit der Sortenwahl unter Berücksichtigung der Backqualität zu empfehlen. Der Bäcker kann durch die Verlängerung der Teigruhe nochmals das Acrylamidrisiko senken. Zudem hat Vollkornmehl deutlich mehr Asparagin als Auszugsmehl. Weitere Reduktionsmöglichkeiten, die hier nicht untersucht wurden, sind die Reduktion der Backtemperatur und Dauer, der Einsatz von Enzymen sowie die Vermeidung von Schwefelmangel im Anbau der Getreide. Es stehen somit zahlreiche Möglichkeiten zur Verfügung, um das Acrylamidrisiko entlang der Getreidewertschöpfungskette nachhaltig zu senken.

Danksagung

Dieses Projekt wurde maßgeblich von der Universität Hohenheim im Rahmen eines von der DFG geförderten Projektes finanziert (DFG LO 1816/4-1). Wir danken zudem der Firma H. & J. Brüggem KG für die Finanzierung zur Untersuchung der Hartweizenmuster auf Asparagin.

Literatur

- [1] Huang T, Xu M, Lee A, Cho S, Qi L (2015) Consumption of whole grains and cereal fiber and total and cause-specific mortality: Prospective analysis of 367,442 individuals. *BMC Med* 13:1–9
- [2] Claus A, Carle R, Schieber A (2008) Acrylamide in cereal products: A review. *J Cereal Sci* 47:118–133
- [3] Mottram DS, Wedzicha WL, Dodson WA (2002) Acrylamide is formed in the Maillard reaction. *Nature* 419: 448-449
- [4] Becalski A, Lau BPY, Lewis D, Seaman SW (2003) Acrylamide in foods: Occurrence, sources, and modeling. *J Agric Food Chem* 51:802–808
- [5] Svensson K, Abramsson L, Becker W, Glynn A, Hellenäs KE, Lind Y, Rosén J (2003) Dietary intake of acrylamide in Sweden. *Food Chem Toxicol* 41:1581–1586
- [6] Sadd P, Hamlet C (2005) The Formation of Acrylamide in UK Cereal Products. In: Friedman M, Mottram D (eds) *Chemistry and Safety of Acrylamide in Food. Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer, Boston, MA, pp 415–429
- [7] Granvogl M, Wieser H, Koehler P, Von Tucher S, Schieberle P (2007) Influence of sulfur fertilization on the amounts of free amino acids in wheat. Correlation with baking properties as well as with 3-aminopropionamide and acrylamide generation during baking. *J Agri And Food Chem* 55: 4271-4277
- [8] Surdyk N, Rosén J, Andersson R, Åman P (2004) Effects of Asparagine, Fructose, and Baking Conditions on Acrylamide Content in Yeast-Leavened Wheat Bread. *J Agric Food Chem* 52:2047–2051
- [9] Shewry PR, Franklin J, Parmar S, Smith SJ, Mifflin BJ (1983) The effects of sulphur starvation on the amino acid and protein compositions of barley grain. *J Cereal Sci* 1:21–31
- [10] Köhler P, Granvogl M, Wieser H, von Tucher S, Schieberle P (2007) Acrylamid Bildungspotenzial von Getreidemehlen in Abhängigkeit von der Schwefeldüngung. *Getreidetechnologie* 61:223 227
- [11] Claus A, Schreiter P, Weber A, Graeff S, Herrmann W, Claupein W, Schieber A, Carle R (2006) Influence of agronomic factors and extraction rate on the acrylamide contents in yeast-leavened breads. *J Agric Food Chem* 54:8968–8976
- [12] Curtis TY, Muttucumaru N, Shewry PR, Parry MAJ, Powers SJ, Elmore JS, Mottram DS, Hook S, Halford NG (2009) Effects of genotype and environment on free amino acid levels in wheat grain: implications for acrylamide formation during processing. *J Agric Food Chem* 57:1013–1021
- [13] Corol DI, Ravel C, Rakszegi M, Charmet G, Bedo Z, Beale MH, Shewry PR, Ward JL (2016) 1H-NMR screening for the high-throughput determination of genotype and environmental effects on the content of asparagine in wheat grain. *Plant Biotechnol J* 14:128–139
- [14] Beck H, Dietz L, Gütler A, Gütler H, Heilig W, Longin F (2019) Die Länge der Teigführung beeinflusst die Qualität und das Aroma von Broten und erfordert eine differenzierte Sortenwahl. https://www.uni-hohenheim.de/uploads/media/Weizen_Teigfuehrung_Backergebnisse.pdf

[15] Rapp M, Schwadorf K, Leiser WL, Würschum T, Longin CFH. (2018) Assessing the variation and genetic architecture of asparagine content in wheat: what can plant breeding contribute to a reduction in the acrylamide precursor? *Theoretical Applied Genetics*, doi: 10.1007/s00122-018-3136-x

[16] Stockmann F, Weber EA, Mast B, Schreiter P, Merkt N, Claupein W, Graeff-Hönninger S (2019) Acrylamid-formation potential of cereals: what role does the agronomic management system play? *Agronomy* 9: 584

[17] Gabriel D, Pfitzner C, Haase NU, Hüsken A, Prüfer H, Greef J-M, Rühl G (2017) New strategies for a reliable assessment of baking quality in wheat – rethinking the current indicator protein content. *Journal of Cereal Science*, 77: 126-134

[18] Rosén J, Hellenäs KE (2002) Analysis of acrylamide in cooked foods by liquid chromatography tandem mass spectrometry. *Analyst*, 127(7):880-882.

WICHTIG: alle Bildrechte verbleiben beim Autor!

Fig. 1: Zusammenhang zwischen Acrylamid in der Brotkruste und dem Gehalt an freiem Asparagin im Vollkornmehl bei 20 Versuchsbroten, die jeweils mit einer kurzen und langen Teigruhe gebacken waren. Die Brote unterscheiden sich lediglich in der verwendeten Weizensorte.

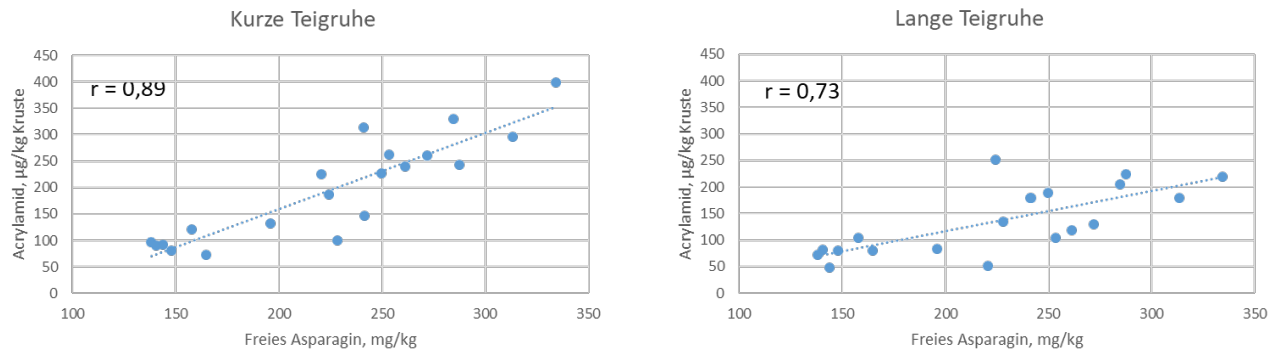


Fig. 2: Gehalte an freiem Asparagin im Vollkornmehl verschiedener Sorten, die jeweils in drei Stickstoffdüngungsstufen angebaut worden sind; jeder Sortenwert ist ein Mittelwert aus drei Anbauorten (N1 = blau = 175 kg Stickstoff/ha, N2 = orange = 200 kg Stickstoff/ha, N3 = rot = 230 kg Stickstoff/ha)

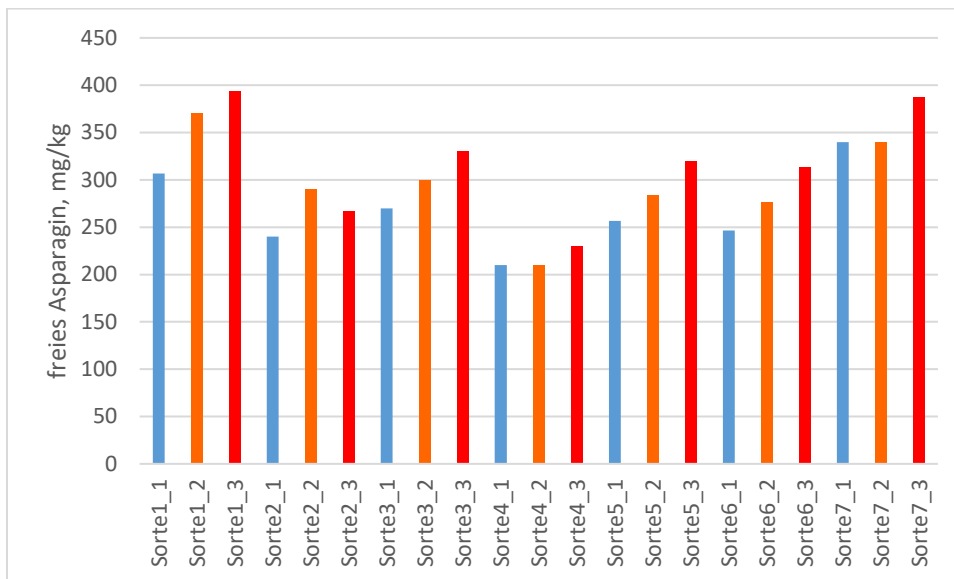


Fig. 3: Korrelation zwischen dem Protein- und freiem Asparagingehalt bei 149 Weizensorten; jeder Sortenwert stellt den Mittelwert von drei Anbauorten dar.

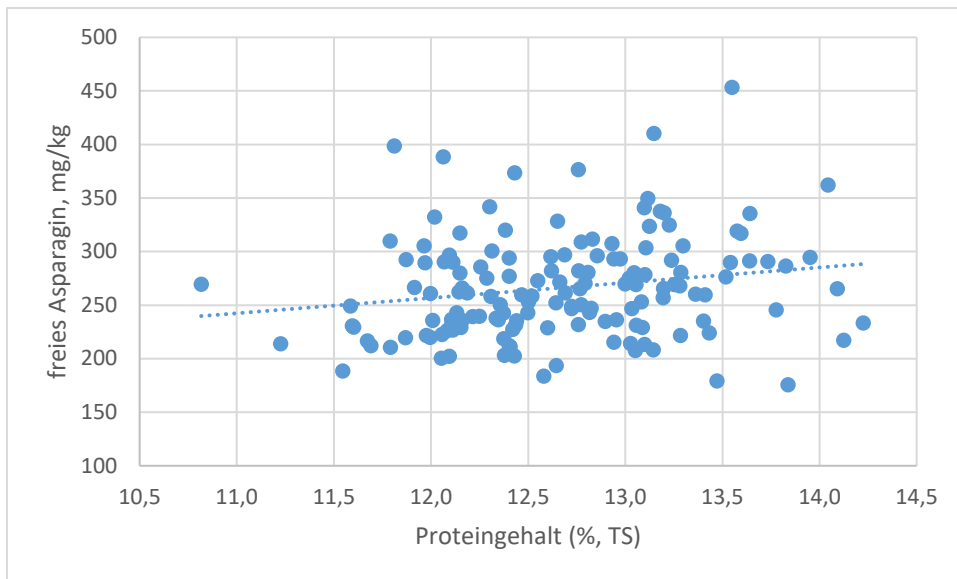
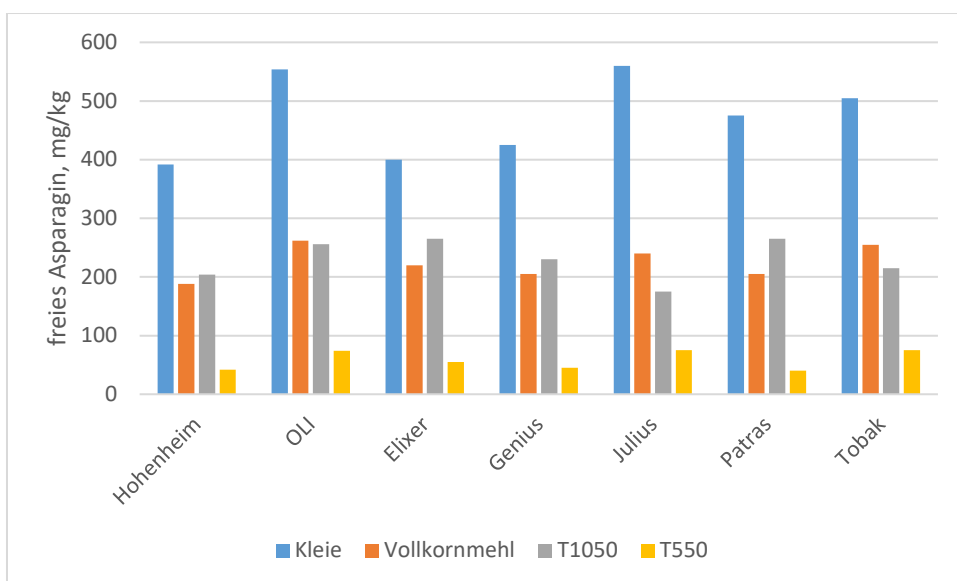


Fig. 4: Gehalte an freiem Asparagin verschiedener Mehlfractionen; die Mittelwerte je Ort wurden über die fünf getesteten Weizensorten (Elixer, Genius, Julius, Patras, Tobak) berechnet; die Sortenmittelwerte wurden aus den beiden Anbauorten (Hohenheim, Oberer Lindenhof (OLI)) berechnet.



Tab.1: Varianzkomponenten für den Gehalt an freiem Asparagin an Vollkornmehlen in mg/kg (σ^2_G = genetische Varianz, $\sigma^2_{G \times L}$ = Varianz der Genotyp x Ortsinteraktion, σ^2_e = Fehlervarianz), Heritabilität (H^2), least significant difference am 5% Wahrscheinlichkeitsniveau (LSD), Schwankungsbreite (Minimal-, Mittel-, Maximalwert) sowie die Korrelation zwischen Protein- und freiem Asparagingehalt (r (PC, Asp)) der Sorten gemittelt über jeweils drei Anbauorte je Art.

	Weizen	Durum	Dinkel	Emmer	Einkorn
Min	143,25	161,96	210,06	239,97	551,28
Mean	241,69	270,25	307,67	308,2	711,13
Max	453,34	381,26	500,80	450,54	839,95

LSD5%	95,78	93,94	100,00	70,00	100,00
σ^2_G	0,004***	0,002***	0,0001	0,00003	0,00004
σ^2_{GxL}	0,004***	0,002***			
σ^2_e	0,003	0,002	0,00005	0,00002	0,00007
H²	0,65	0,68	0,85	0,78	0,67
r (PC, Asp)	0,23**	-0,05	0,86***	0,4	-0,38

Tab. 2: Gehalt an freiem Asparagin (mg/kg) im Vollkornmehl beispielhafter Sorten gemittelt über jeweils drei Anbauorte.

Sorten	Kulturart	Asparagin
Oberkulmer Rotkorn	Dinkel	245,75
Franckenkorn	Dinkel	249,05
Badensonne	Dinkel	255,68
Badenkrone	Dinkel	298,1
Zollernspelz	Dinkel	506,75
Bauländer Spelz	Dinkel	546,64
Wintergold	Durum	194,9
Tempodur	Durum	230,72
Miradoux	Durum	286,93
Diadur	Durum	302,58
Sambadur	Durum	338,64
Terzino	Einkorn	693,02
Ramses	Emmer	266,62
Späth's Albjuwel	Emmer	283,63
Farvento	Emmer	347,13
Butaro	Weizen	179,41
Patras	Weizen	183,67
Discus	Weizen	203,16
JBAsano	Weizen	216,65
Bussard	Weizen	222,79
Colonia	Weizen	234,64
Akteur	Weizen	235,14
Apache	Weizen	235,93
Genius	Weizen	260,23
Julius	Weizen	280,17
Pionier	Weizen	280,43
Tobak	Weizen	341,76