

EINFLUSS VON DÜNGERGABEN AUF DEN GEHALT AN α -AMINO-STICKSTOFF UND NITRAT SOWIE DAS AROMAPROFIL IN ERDBEEREN

ELISABETH KOCH, STEFAN VOLGENANDT, MANUEL BECKER und MARTIN POUR
NIKFARDJAM

Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO)
D-74189 Weinsberg, Traubenplatz 5
E-Mail: Martin.PourN@lvwo.bwl.de

Erdbeeren der Sorte 'Clery' (*Fragaria x ananassa*) wurden über einen Zeitraum von 12 Wochen vor und während der Fruchtreife mit unterschiedlichen Konzentrationen an Dünger supplementiert. Anschließend wurden die reifen Früchte photometrisch auf ihren Gehalt an Nitrat und α Amino-Stickstoff sowie mittels Headspace-GC/MS auf ihre Aromastoffe untersucht. Analog zur zunehmenden Düngemenge finden sich für Nitrat und α -Amino-Stickstoff höhere Gehalte. Das gilt auch für eine Vielzahl der untersuchten Aromastoffe. Düngung fördert also die Bildung von Aromastoffen, möglicherweise da mehr Aminosäuren für die Proteinbiosynthese zur Verfügung stehen und somit Enzyme der Aromaproduktion vermehrt gebildet werden können. Außerdem sorgt eine verbesserte Stoffwechselsituation potentiell für mehr Vorläuferstrukturen von Aromastoffen. Eine Diskriminanzanalyse zeigt signifikante Unterschiede zwischen den zwei niedrigsten und der höchsten Düngestufe. Die Hauptkomponentenanalyse belegt zusätzlich, dass hauptsächlich Methylester sowie Linalool und 2,3-Butandion auf erhöhte Düngung ansprechen, da insbesondere Methylester bei der Reifung gebildet werden, die von der Düngung unterstützt wird.

Schlagwörter: Erdbeere, Dünger, Aroma, NOPA, Nitrat

Influence of fertilisation on α -amino nitrogen content, nitrate and aroma profile of strawberry. Plants of the strawberry cultivar 'Clery' (*Fragaria x ananassa*) were treated with different amounts of fertiliser over a period of 12 weeks before and during fruit ripening. The ripe fruit were harvested and the concentration of nitrate and α -amino nitrogen as well as the aroma were analysed, the latter by headspace trap gaschromatography/mass spectrometry (GC/MS). The content of nitrate and α -amino nitrogen increased according to the amount of fertiliser. Additionally our results show a correlation between fertilisation and aroma formation, namely that the supplementation leads to an increase of aroma substances, maybe due to increasing amounts of amino acids for protein biosynthesis and, thus, more enzymes for aroma production are available. Furthermore improved metabolic status may provide more precursors for aroma active substances. A discriminant analysis proved significant differences between the two lowest levels and the highest level of fertilisation. A principal component analyses confirmed these results and additionally showed that mainly the formation of methyl esters as well as linalool and 2,3-butandione were influenced by fertilisation since methyl esters are especially formed during ripening, which is supported by fertilisation.

Keywords: strawberry, fertilizer, aroma, NOPA, nitrate

AROMA

Erdbeeren gehören zu den beliebtesten Früchten, und somit ist ihr Aroma ein wichtiger Gegenstand der Forschung. Mittlerweile konnten bereits über 300 flüchtige Verbindungen bestimmt werden (LARSEN et al., 1992). Das Aromaprofil selbst hängt allerdings von unterschiedlichsten Faktoren ab, insbesondere der Sorte, dem Reifegrad und der Lagerung nach der Ernte. Trotzdem kann man einige typische Vertreter ausmachen. Mit 25 bis 90 % Gesamtanteil an flüchtigen Stoffen sind Ester die wichtigste Substanzklasse, Ethyl- und Methylbutanoat sowie -hexanoat sind ebenso typisch und ubiquitär in Erdbeeren vorhanden. Sie zeichnen sich durch ihren fruchtigen Charakter aus (FORNEY et al., 2000). Daneben bilden auch Carbonyle wie (E) 2 Hexenal oder 2,3-Butandion und Terpene wie Linalool einen Teil des Aromas. Außerdem wird Furaneol (2,5-Dimethyl-4-hydroxy-3(2H)-furanon) und seinem methylierten Abkömmling Mesifuran (2,5-Dimethyl-4-methoxy-3(2H)-furanon) ein wichtiger Beitrag zugeschrieben (SCHIEBERLE und HOFMANN, 1997; ULRICH et al., 1995). Für die Geruchswahrnehmung der einzelnen Komponenten ist neben dem jeweiligen Gehalt in der Erdbeere der Geruchsschwellenwert entscheidend. Aus diesen beiden Parametern kann der Aromawert als Quotient aus Konzentration und Geruchsschwelle berechnet werden. Dabei gilt, dass die Substanz ab einem Wert >1 zum Aroma beiträgt (FORNEY et al., 2000).

BIOSYNTHESE

Aromastoffe werden aus den Hauptpflanzeninhaltsstoffen Kohlenhydrate, Aminosäuren und Fette im sekundären Metabolismus gebildet (FORNEY et al., 2000). Dabei dienen Kohlenhydrate, wie Fructose-1,6-bisphosphat, als Vorläuferstrukturen für die Gruppe der Furanone. Linalool als Vertreter der Monoterpene wird über den Methylerythritol-Phosphat-Weg und die Zwischenstufe des Geranyldiphosphats gebildet und gilt als primäres Aroma, das bereits im intakten Fruchtgewebe enthalten ist (BERGER, 2007; SONG und FORNEY, 2008; BUETTNER, 2017). Bei der Probenaufarbeitung für die Analyse oder dem Kauvorgang bei der Nahrungsaufnahme werden die Zellen verletzt und sekundäre Aromen etwa durch Lipoxygenase-Aktivität gebildet. Dadurch

entstehen aus dem Abbau ungesättigter C₁₈-Fettsäuren beispielsweise Aldehyde wie (E)-2-Hexenal, die aber auch aus der β -Oxidation stammen können. Bei der Esterbildung spielt die Alkoholacyltransferase (AAT) durch die Übertragung eines Acyl-Restes von Acyl-CoA auf einen Alkohol eine grundlegende Rolle (Buettner, 2017; FORNEY et al., 2000). Der Metabolismus von Aminosäuren ist eine weitere Quelle für Aromastoffe und interessant für die Bildung verzweigter Strukturen wie Ethyl-2-methylbutanoat. Außerdem entstehen hier Amine, Säuren, Aldehyde, Alkohole und Ester (BUETTNER, 2017; SONG und FORNEY, 2008).

DÜNGER

Die Bereitstellung von Nährstoffen als Dünger wirkt sich unterschiedlich auf den Metabolismus der Pflanze aus. Stickstoff in Form von Nitrat wird durch Transportsysteme in der Wurzel aufgenommen, in den Zellen zunächst durch die Nitrat- und Nitritreduktase mit Reduktionsäquivalenten der Photosynthese zu Ammonium reduziert und anschließend in Aminosäuren umgewandelt. Das Kohlenstoffgrundgerüst stammt dabei von Kohlenhydraten aus der CO₂-Assimilation durch die Photosynthese. Eine gute Photosyntheseleistung ist also für die Aminosäurebildung förderlich. Fast alle Elemente eines Volldüngers sind daran beteiligt, so sind beispielsweise Eisen und Mangan an der Biosynthese von Chlorophyll und dem Elektronentransport beteiligt, Magnesium stellt das Metallion von Chlorophyll dar, und Phosphor dient als Energiewährung (MALONE, 2014; OKE et al., 2005). Aus den Aminosäuren werden wiederum Proteine gebildet, die unter anderem als Enzyme an allen Stoffwechselprozessen in der Pflanze beteiligt sind. An der Bildung und Aktivierung wichtiger Enzyme sind beispielsweise Kalium und Zink beteiligt. Kalium ist außerdem für den Transport von Assimilaten wichtig (LAWLOR, 2002; SINGH und SARAVANAN, 2012; WANG et al., 2009). Für die Bestäubung, Pollenproduktion und stabile Fruchtentwicklung ist Bor bedeutsam. Neben den beschriebenen Beispielen sind die Elemente noch in andere vielschichtige Prozesse involviert (BRUNETTO et al., 2015; MALONE, 2014).

Zu den Auswirkungen einer unterschiedlichen Düngergabe auf die Aromastoffbildung gibt es bis dato wenig Anhaltspunkte. Denkbar wäre, dass eine geringe Pro-

teinbiosynthese weniger Enzyme zur Aromastoffbildung bereitstellt und dies weniger Aroma zur Folge hat. Außerdem liefert eine schlechte Stoffwechsellage aufgrund von Mangel an essentiellen Elementen weniger Vorläuferstrukturen zur Aromabildung (OJEDA-REAL et al., 2009; HONG et al., 1990; LAWLOR, 2002). Phosphor, Kalium, Zink und Molybdän wirken sich positiv auf den Gehalt an Extraktstoffen ("soluble solids") in der Frucht aus. Für Kalium und Molybdän wurde in Tomaten bzw. Erdbeeren bereits eine teilweise Zunahme des Aromas festgestellt (CAO et al., 2015; WANG et al., 2009; AHMAD, 2014; BAKSHI et al., 2013; LIU et al., 2017).

BESTIMMUNG

Bei der Untersuchung von Aromastoffen kommen unterschiedliche Ansätze zum Tragen. Im vorliegenden Fall wurde die Methode der Headspace (HS)-GC/MS gewählt, um nur diejenigen Komponenten zu bestimmen, die man bei Raumtemperatur riechen bzw. über den Mundraum retronal wahrnehmen kann. Die HS-GC/MS bietet gegenüber anderen Methoden den Vorteil, dass sie direkt und matrixfrei arbeitet. Zur Annäherung an die realen Konzentrationen im Pflanzengewebe wurden die Erdbeeren vor der Analyse püriert. Zur Nachempfindung der Verdampfung im Mundraum wurden die Proben vor der Messung auf 37 °C temperiert (NIKFARDJAM et al., 2013).

Da bislang nur wenige Daten zum Einfluss unterschiedlicher Düngergaben auf die Bildung von Aromastoffen in Erdbeeren vorliegen, wurde dies in der vorliegenden Arbeit untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, inwieweit sich höhere N-Supplementierung als Nitrat und α Amino-Stickstoffgehalt (α -Amino-N) in den Früchten wiederfindet.

MATERIAL UND METHODEN

PROBENMATERIAL UND DÜNGUNG

Bei den Erdbeerpflanzen der Sorte 'Clery' handelt es sich um Frigo A+-Pflanzen, die Frühsorte 'Clery' weist eine hohe Anbaudichte in Baden-Württemberg auf (VOLGENANDT, pers. Mitteilung). Sie wurden mit bereits induzierten Blütenanlagen vor dem Winter im

Kühlhaus eingelagert. Nach der Pflanzung wuchsen sie im Halbfreiland im staatlichen Obstversuchsgut Heuchlingen (Deutschland) in Kulturgefäßen mit Maßen von ca. 36 cm × 22 cm × 16 cm (l/b/h) und jeweils acht Pflanzen pro Behälter. Das Substrat war reines Cocopeat mit Fasern der Firma Gramoflor (Vechta, Deutschland). Die Erdbeeren wurden mit Kristalon Rot (Yara, Dülmen, Deutschland), einem Vollnährstoffdünger, über einen Zeitraum von 12 Wochen (Anfang April bis Mitte Juni) gedüngt. Kristalon Rot enthält 12 % Gesamtstickstoff, 12 % Phosphat, 36 % Kaliumoxid, 1 % Magnesiumoxid, 1 % Schwefel und Spurennährstoffe (0,025 % Bor, 0,004 % Molybdän, 0,01 % Kupfer, 0,07 % Eisen, 0,04 % Mangan, 0,025 % Zink). Der Dünger wurde abgewogen, in Wasser gelöst und flüssig verabreicht. Der Düngeplan ist in Tabelle 1 wiedergegeben. Jede Düngevariante wurde in dreifacher Wiederholung angesetzt. An drei verschiedenen Tagen (08.06.17, 13.06.17, 19.06.17) wurden jeweils die optisch reifen Früchte, sprich vollständig rot ohne überreife Anzeichen wie matschig oder schimmelig, gepflückt. Die Erdbeeren wurden direkt frisch zur Messung eingesetzt bzw. eine Nacht im Kühlschrank bei 5 °C gelagert.

CHEMIKALIEN

Alle Chemikalien wiesen die erforderliche analytische Reinheit auf. Das verwendete doppelt-entmineralisierte Wasser entstammte einer Milli-Q Integral3-Anlage (Millipore, Dreieich, Deutschland). 2,3-Butandion, Ethylacetat, Ethylbutanoat, Hexanal, Ethylisovalerat, 2-Heptanon, Methylhexanoat, Ethylhexanoat, Hexylacetat, Kaliumnitrat und Linalool stammten von der Firma Merck (Darmstadt, Deutschland). Methylacetat, Isopropylacetat, Ethyl-2-methylbutanoat und 2-Hexenal waren von Alfa Aesar (Karlsruhe, Deutschland) und (E)-2-Hexenyl-acetat und Methylbutanoat von Sigma Aldrich (Steinheim, Deutschland). Für die automatisierte Bestimmung von Nitrat und α -Amino-N wurden fertige Test-Kits verwendet und die Reagenzlösung bei Bedarf nach der jeweiligen Anleitung hergestellt. Das Testsystem für Nitrat stammte von R-Biopharm (Darmstadt, Deutschland) beziehungsweise Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finnland), das α -Amino-N-Testkit ebenfalls von Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finnland).

PROBENAUFARBEITUNG

Etwa 100 g Erdbeeren wurden gewaschen, abgetrocknet und Blätter sowie Strunk entfernt. Gegebenenfalls wurden matschige oder schimmelige Stellen an den Früchten entfernt. Anschließend wurde die Probe 60 s mit einem Stabmixer fein püriert, 7 g wurden für die Aromastoffanalyse in ein Headspace-Vial eingewogen und mit einem PTFE/Butylseptum (beides: neoLab Miggel, Heidelberg, Deutschland) verschlossen. Die Probe wurde direkt mittels HS-GC/MS vermessen. Für die Bestimmung des Nitrat- und α Amino-N-Gehalts wurden 10 g der pürierten Probe in einen 100 ml-Maßkolben eingewogen und bis zur weiteren Aufarbeitung bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert.

NITRAT UND α -AMINO-N

Die Bestimmung erfolgte nach einem modifizierten Protokoll von Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finnland). Die aufgetauten Proben wurden mit 60 ml $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ heißem Reinstwasser versetzt und im Wasserbad 15 min bei $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten. Anschließend wurden sie auf Raumtemperatur abgekühlt, auf Marke aufgefüllt und durch einen Faltenfilter (Machery-Nagel 616 1/4, 185 mm Durchmesser; Düren, Deutschland) filtriert. Das Filtrat wurde 10 min bei 4000 rpm zentrifugiert und der Überstand zur Analyse eingesetzt.

NITRAT

Die Bestimmung erfolgte automatisiert mit dem Gerät Arena 30 von Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finn-

land). Zugrunde liegt eine photometrische Bestimmung. Nitrat wird durch das Enzym Nitrat-Reduktase zu Nitrit reduziert, wobei NADPH verbraucht wird, was durch Abnahme der Absorption bei 540 nm quantifizierbar ist. Der Analysenablauf erfolgte gemäß Protokoll von Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finnland).

α -AMINO-N

Die Bestimmung erfolgte automatisiert mit dem Gerät Arena 30 (Thermo Fischer Scientific, Vantaa, Finnland). Zugrunde liegt eine photometrische Bestimmung. Primäre Aminogruppen werden mit *o*-Phthaldialdehyd und N-Acetylcystein zu Isoindolen derivatisiert, die als chromogene Komplexe bei 340 nm quantitativ messbar sind. Der Analysenablauf erfolgte gemäß Protokoll von Thermo Fischer Scientific (Vantaa, Finnland) mit doppelter Inkubationszeit.

AROMA

GC-MS

Die GC-MS-Anlage bestand aus einem Turbomatrix 40 Trap Headspace Sampler, der an einen Clarus 600-Gaschromatographen und ein Clarus 600C-Massenspektrometer angeschlossen war (PerkinElmer, Überlingen, Deutschland). Als Trennsäule wurde eine Elite-624 mit 30 m Länge, ID 0,25 mm und 1,4 μm Schichtdicke der Fa. PerkinElmer (Überlingen, Deutschland) verwendet. Als Trägergas diente Helium in BIP-Qualität (Tyczka, Mannheim, Deutschland) mit 20 psi. Das Temperaturprogramm der GC begann bei $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (5 min halten), dann eine Rampe von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ pro Minute auf $220\text{ }^{\circ}\text{C}$, die

Tab. 1: Düngeplan für die Erdbeerpflanzen (Anmerkung: Die höchste Düngestufe entspricht noch nicht dem Level der Überdüngung.)

Düngestufe	Anzahl der Düngungen	Düngerhythmus	Menge (g) an Dünger pro Behälter
1	0	-	-
2	5	Alle 2 Wochen	1
3	10	Jede Woche	1
4	20	Zweimal pro Woche	1
5	28	Dreimal pro Woche	1
			2 (jedes 3. Mal)

wieder für 5 min gehalten wurden, sodass sich eine Gesamtlaufzeit von 20 min ergab. Das Massenspektrometer arbeitete im EI⁺ Modus (70 eV) und zeichnete während der ganzen Laufzeit im Massenbereich zwischen m/z 40 und 200 auf.

HEADSPACE SAMPLER

Trap Timing: 1 cycle, 1 min pressurize; decay time 1,2 min. Es wurden folgende Temperaturen gewählt: oven 37 °C mit 60 min Temperierzeit der Proben; needle 50 °C; transfer-line 200 °C; trap low 40 °C, trap high 220 °C. Die Drücke waren wie folgt: column 20 psi; desorb 20 psi; vial 25 psi. Als Adsorptionsmaterial wurde Air toxic (PerkinElmer, Überlingen, Deutschland) genutzt.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

SENSORIK UND OPTISCHE CHARAKTERISIERUNG

Die Früchte der verschiedenen Düngestufen und Pflücktage wurden auf Geruch und Geschmack untersucht. Das beste Aroma sowie den besten Geschmack wiesen

die Erdbeeren der beiden höchsten Düngestufen auf. Für Fruchtfäule, Deformation und andere Anzeichen verminderter Fruchtqualität konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden (Werte nicht gezeigt). Die hohen Düngestufen lieferten aber einen höheren Ertrag (96 bzw. 91 g/Pflanze für Düngestufe 4 und 5 gegenüber 51, 44 und 40 g/Pflanze für Level 3, 1 und 2). Diese Tendenz wurde auch in anderen Studien belegt (PAPADOPOULOS, 1987; IATROU und PAPADOPOULOS, 2016).

NITRAT UND α -AMINO-N

Den Pflanzen wurden während des Wachstums und der Fruchtreife durch die verschiedenen Düngestufen unterschiedliche Mengen an Stickstoff zugeführt. Zudem enthielt der Dünger Mangan, was unterstützend auf die Nitrat-Assimilation wirkt (MALONE, 2014). Wichtig dafür ist außerdem Molybdän als Teil von molybdänhaltigen Enzymen wie der Nitratreduktase, an deren Aktivierung auch das Element Bor beteiligt ist (LIU et al., 2017; SINGH und SARAVANAN, 2012). Man erkennt für beide Parameter Auswirkungen auf die jeweiligen Gehalte in der Frucht (Tab. 2). Bei Nitrat gibt es einen signifikant höheren Wert für die höchste Düngestufe, bei α -Amino-N sind die Unterschiede noch deutlicher. Außer bei

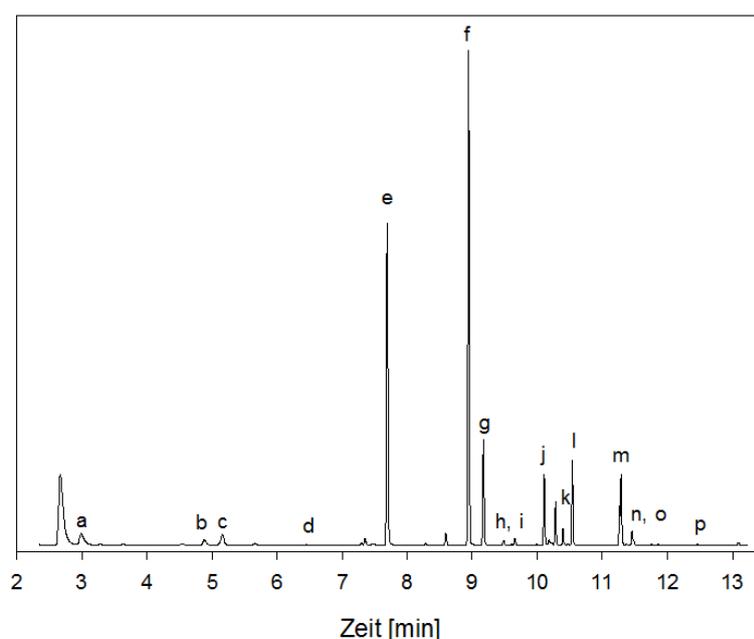


Abb. 1: Beispielchromatogramm der höchsten Düngestufe am dritten Pflücktag; Buchstaben kennzeichnen die analysierten Aromastoffe (Tab. 3)

der 2. Stufe unterscheiden sich alle anderen Werte signifikant voneinander und steigen proportional zur Menge an Dünger. Dies wird auch durch eine direkte graphische Auftragung der Gehalte an Nitrat und α -Amino-N in Abhängigkeit von der Düngemenge deutlich (Abb. 2). Das Bestimmtheitsmaß dient hierbei als Indikator. Zunehmende Zufuhr an Stickstoff durch Dünger sorgt somit direkt für höhere Nitrat- und α -Amino-N-Konzentrationen

in der Frucht. Dies wurde ebenfalls von Darnell und Stutte (2001) beschrieben, die bei Zugabe von Nitrat höhere Nitratkonzentrationen im Gewebe feststellten. Bezüglich NOPA fanden Haynes und Goh (1987) einen Anstieg des α -Aminosäure-Stickstoffgehalts bei erhöhter Supplementierung mit Stickstoff.

Tab. 2: Gehalte an Nitrat und NOPA (mg/100 g) in den reifen Erdbeeren in Abhängigkeit von der Düngestufe (Tab. 1); Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen nach 95 %-Niveau und Tukey-Test.

Düngestufe	Nitrat (mg/100 g)	NOPA (mg/100 g)
1	7,97 ± 2,56 ^b	12,22 ± 2,29 ^d
2	7,80 ± 1,86 ^b	13,44 ± 2,17 ^{c, d}
3	8,71 ± 2,07 ^b	14,88 ± 1,93 ^c
4	9,01 ± 2,14 ^b	18,40 ± 1,93 ^b
5	12,15 ± 3,05 ^a	23,37 ± 3,19 ^a

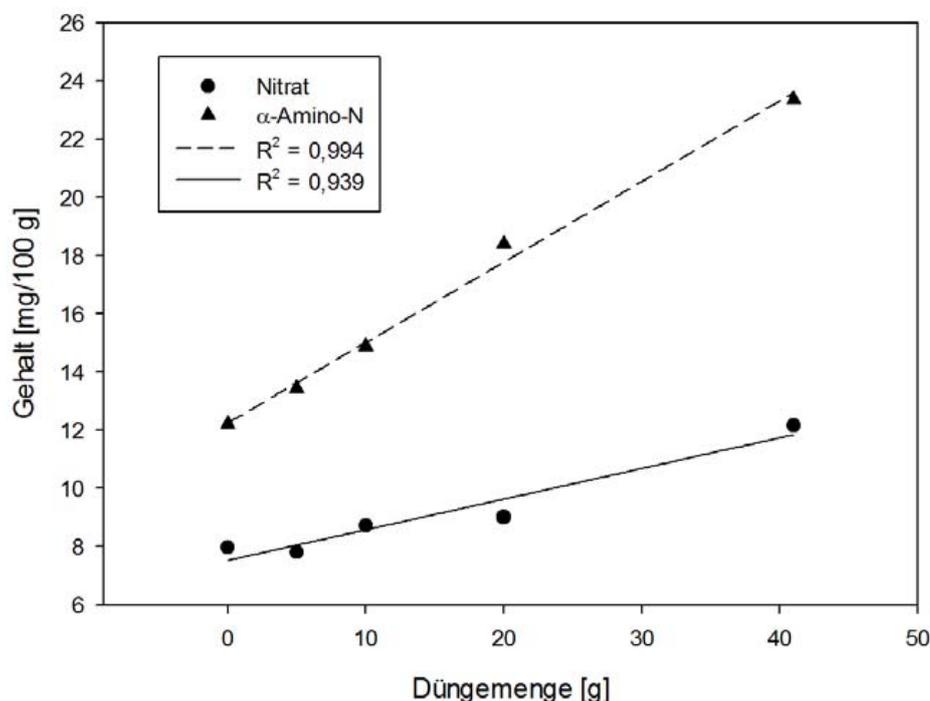


Abb. 2: Korrelation zwischen den Gehalten an Aminosäuren und Nitrat und der Düngemenge mit Bestimmtheitsmaß der linearen Regression

AROMAAKTIVE VERBINDUNGEN

An drei Pflücktagen wurden jeweils 5 Proben pro Düngervariante gezogen und auf 16 Aromastoffe untersucht (Abb. 1). Tabelle 3 fasst die Ergebnisse zu den jeweiligen Gehalten, der Aromakategorie, den Geruchsschwellenwerten und Aromawerten zusammen. Das Aroma wird hauptsächlich durch die fruchtigen Noten der Ester bestimmt, daneben tragen aber auch grüne Noten, wie beispielsweise von Hexanal, zum Aroma bei. Zusätzlich findet man Eindrücke von buttrig und floral. Der Aromawert berechnet sich wie bereits erwähnt aus dem Gehalt dividiert durch den Geruchsschwellenwert. Mit steigendem Aromawert wächst der jeweilige Beitrag zur Gesamtkomposition. Die größten Aromawerte weisen 2,3-Butandion, Ethylbutanoat und Ethylhexanoat auf. Letztere werden auch in der Literatur häufig mit hohen Werten genannt, wohingegen 2,3-Butandion nur selten erwähnt wird (LARSEN und POLL, 1992; LARSEN et al., 1992; SCHIEBERLE und HOFMANN, 1997). Ab einem Aromawert >1 trägt ein Stoff per Definition zum Aroma bei, in der Praxis kann es aber sinnvoll sein, den Wert auf 10 zu erhöhen, um einen wirklichen, quantitativ bedeutsamen Einfluss der Komponente auf das Aroma sicherzustellen. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur noch Substanzen mit einem Aromawert >10 betrachtet.

DÜNGEREINFLUSS

Früchte der verschiedenen Düngestufen wurden auf ihre Aromastoffe untersucht (Tab. 4). Mit Ausnahme von Ethylacetat und (E)-2-Hexenal nehmen alle Gehalte mit steigender Düngemenge zu, d. h., dass Dünger Einfluss auf die Aromastoffproduktion der Pflanze hat. Wie genau sich Dünger auf die Aromastoffproduktion in Pflanzen auswirkt, ist zurzeit wenig bekannt. Da an den meisten Prozessen Enzyme beteiligt sind, die in ihrer Form als Proteine aus Aminosäuren bestehen, ist die Pflanze für deren Bildung unter anderem auf eine ausreichende Stickstoffversorgung angewiesen (Stickstoff ist mit 12 % der zweitgrößte Bestandteil des eingesetzten Düngers). An der Proteinbiosynthese sind auch noch andere Elemente wie Magnesium und Zink beteiligt, Letzteres beispielsweise an der Bildung von Vorläuferstrukturen

für die beteiligte Enzymsysteme. Eine Düngung könnte sich hier positiv auswirken (MALONE, 2014; SINGH und SARAVANAN, 2012). Es erfolgt also eine interne, metabolische Regulation (LAWLOR, 2002). Ein prominentes Beispiel ist hier die Alkoholacyltransferase (AAT), die im letzten Schritt der Esterbildung einen Acyl-Rest auf einen Alkohol überträgt. Die AAT wird nur im Fruchtgewebe gebildet, und die Expression erhöht sich während der Fruchtreife um das bis zu 16-fache (SONG und FORNEY, 2008). Außerdem wurde in aromareichen Früchten eine höhere Aktivität als in aromaarmen gefunden (FORNEY et al., 2000). Dieses Enzym ist also entscheidend an der Aromaentwicklung beteiligt, insbesondere da Ester die Hauptklasse der Aromastoffe in Erdbeeren darstellen. Bei schlechter Stickstoffzufuhr könnte die Bildung eingeschränkt werden, um Ressourcen zur Erhaltung vegetativer Funktionen zu sparen. Die Folge wäre – wie zu beobachten war – eine reduzierte Aromabildung.

BANGERTH et al. (2012) berichteten, dass neben Enzymen ein Mangel an freien Fettsäuren als Precursor für Aromastoffe ein limitierender Faktor für deren Produktion ist. Fettsäuren stellen wichtige Ausgangsverbindungen sowohl für Carbonyle als auch für Ester dar, da sie 2-, 4- und 6-C-Atom-Ketten aus der β -Oxidation liefern (SONG und FORNEY, 2008). Erdbeeren enthalten ca. 20 % Ölsäure, ein Drittel Linolsäure und gut 25 % Linolensäure. Damit sind die mehrfach ungesättigten Fettsäuren mit knapp zwei Drittel die vorherrschende Gruppe in Erdbeeren, gefolgt von einfach ungesättigten mit 25 %, gesättigte Fettsäuren machen lediglich rund 13 % aus (KAFKAS et al., 2009; BLAKESLEY et al., 1979). Besonders ungesättigte Fettsäuren sind an der Bildung aromapotenter Strukturen beteiligt (BELITZ et al., 2008).

Neben Fetten sind Aminosäuren potentielle Vorläuferstrukturen für Aromastoffe. Ihre Bildung hängt direkt mit der Stickstoffaufnahme zusammen, da das aufgenommene Nitrat hauptsächlich in Aminosäuren umgewandelt wird. Dafür werden Kohlenstoffgrundgerüste aus der Photosynthese benötigt, die durch N/P/K-Zufuhr stimuliert wird. In diesem Zusammenhang steht auch, dass in dieser Studie die Pflanzen mit den höheren Düngungen optisch betrachtet mehr Blattmasse gebildet

haben und so bessere Voraussetzungen zur Photosynthese hätten (CAO et al., 2015; BRUNETTO et al., 2015, LAWLOR, 2002). Dadurch könnten mehr Zucker und damit mehr Vorläuferstrukturen zur Aminosäuresynthese bzw. für die Aromastoffe selbst vorliegen. In der Literatur wird ebenfalls berichtet, dass sich Phosphor, Kalium, Zink und Molybdän positiv auf den Gehalt an Extraktstoffen in der Frucht auswirken. WANG et al. (2009) beschreiben eine mögliche Korrelation zwischen dem Gehalt an Aromavorstufen und schlussendlich dem der Aromastoffe am Beispiel von K-Mangel. Eine moderate Erhöhung der K-Zufuhr führte zu einer Erhöhung der Extraktstoffe, löslicher Zucker und flüchtiger Verbindungen in Tomaten (CAO et al., 2015; AHMAD, 2014; BAKSHI et al., 2013; LIU et al., 2017; WANG et al., 2009). Ähnliches wird auch von LIU et al. (2017) für die Supplementierung mit Molybdän berichtet.

Wie bereits dargestellt, korreliert der α -Amino-N-Gehalt mit der N-Supplementierung durch den Dünger. Aminosäuren liefern nach Desaminierung, Decarboxylierung und Folgereaktionen unterschiedliche Aromastoffe bzw. deren Vorstufen wie Aldehyde, Alkohole und Säuren (PÉREZ et al., 2002). Über die tatsächliche Aminosäurezusammensetzung in Erdbeeren gibt es unterschiedliche Veröffentlichungen. Gemeinsam haben alle, dass Asparaginsäure, Glutaminsäure bzw. ihre Amide und Alanin die Hauptaminosäuren sind. Interessant sind vor allem verzweigte Aminosäuren, da aus ihnen verzweigte Aromastoffe, wie Ethyl-2-methylbutanoat, gebildet werden können. Experimente, in denen Erdbeeren mit L Isoleucin supplementiert wurden, weisen einen siebenfachen Anstieg an 2-Methylbutanoatestern mit Ethyl-2-methylbutanoat als ihrem Hauptvertreter auf (BREMER et al., 1996; PÉREZ et al., 2002; PEREZ et al., 1992). Eine höhere Konzentration an Aminosäuren könnte somit die Aromabildung verstärken.

Ethylacetat weist für die höchste Düngevariante einen Mittelwert auf, der deutlich höher als die übrigen ist. Ethylacetat entsteht häufig als Fehl aroma bei überrei-

fen Früchten (NIKFARDJAM et al., 2013). Dies belegen auch unsere Versuche zu 'Clery', in denen Erdbeeren aus dem Freiland nach Reifegrad in hellrot, gemischt und dunkelrot aufgeteilt wurden. Ethylacetat wies für die dunkelrote Fraktion einen mehr als zehnfach erhöhten Wert im Vergleich zur hellroten und gemischten Gruppe auf (Daten nicht gezeigt). Möglicherweise waren die Erdbeeren der stark gedüngten Pflanzen zum Zeitpunkt der Ernte reifer als andere, da die Reifung durch Dünger verbessert wird. Ähnliches gilt für 2-Heptanon, das sonst als typisches Aroma von Schimmelpilzen bekannt ist, in Lebensmitteln etwa in Gorgonzola-Käse (BELITZ et al., 2008). OJEDA-REAL et al. (2009) fassten aus unterschiedlichen Studien zusammen, dass die Festigkeit der Frucht bei übermäßigem N-Angebot nachlässt und sie somit anfälliger für mikrobiellen Verderb wird. Die Festigkeit lässt auch durch erhöhte Zufuhr an Phosphor nach (VALENTINUZZI et al., 2015). Der erste Eindruck zur Festigkeit der Erdbeeren aus dieser Versuchsreihe belegt dies im Allgemeinen. Möglicherweise ist dies die Erklärung für die steigenden Konzentrationen an 2-Heptanon mit zunehmender N Supplementierung.

Für Linalool kann eine Einteilung in drei signifikant verschiedene Gruppen beobachtet werden. Linalool nimmt in Bezug auf die Biosynthese eine gewisse Sonderstellung ein, da es anabol und über einen anderen Weg als die anderen Aromastoffe gebildet wird, die meist gemeinsame Ursprünge haben (BERGER, 2007). 2-Hexenal zeigt hingegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gehalten in Abhängigkeit von der Düngestufe. Der Aromastoff wird vor allem durch Lipoxygenasen gebildet, die bei Zellverletzung eine besonders hohe Aktivität aufweisen (FORNEY et al., 2000). Da die Erdbeeren für die Analyse zunächst püriert wurden, kann 2-Hexenal hierbei entstanden sein und mögliche Unterschiede durch die Düngung überdecken.

Tab. 3: Gemessene Aromen, Median der gemessenen Konzentrationen ($\mu\text{g/l}$) und Aromawerte; Literaturstellen der Geruchsschwellenwerte: (1) NIKFARDJAM et al., 2013; (2) LARSEN und POLL, 1992; (3) DU et al., 2011; (4) SCHIEBERLE und HOFMANN, 1997; (5) BURDOCK und FENAROLI, 2010; gereiht nach Aromawert

Ret.-Zeit (min)	Abk.	Substanz	Kategorie	Median ($\mu\text{g/l}$)	Geruchsschwellenwert ($\mu\text{g/l}$)	Aromawert
4,90	b	2,3-Butandion	Buttrig	3239	3 (4)	1080
8,94	f	Ethylbutanoat	Fruchtig, Ananas	1233	3 (1)	411
11,28	m	Ethylhexanoat	Fruchtig, Ananas-Banane	558	1 (1)	558
9,65	i	Ethylisovalerat	Fruchtig, Apfel	28	0,1 (5)	280
9,17	g	Hexanal	Grün	1767	4 (1)	442
10,39	k	2-Heptanon	Fermentiert	210	1 (1)	210
11,45	n	Hexylacetat	Fruchtig, Apfel, Birne	321	2 (2, 5)	160
5,17	c	Ethylacetat	Fruchtig, etherisch	351	5 (1)	70
9,60	h	Ethyl-2-methylbutanoat	Fruchtig, Apfel	20	0,3 (3)	67
12,45	p	Linalool	Floral	605	6 (2)	101
7,70	e	Methylbutanoat	Fruchtig, Apfel	4176	63 (1)	66
10,10	j	(E)-2-Hexenal	Grün	3941	77 (1)	51
10,53	l	Methylhexanoat	Fruchtig, etherartig nach Ananas	1953	63 (1)	31
3,00	a	Methylacetat	Fruchtig, frisch	3453	1500 (1)	2,3
11,46	o	(E)-2-Hexenyl-acetat	Fruchtig, frisch	154	210 (3)	0,7
6,45	d	Isopropylacetat	Fruchtig, süß, Apfel	38	2000 (5)	0,02

Tab. 4: Mittelwertschätzer der Aromastoffkonzentrationen ($\mu\text{g}/100\text{ g}$) in Abhängigkeit von der Düngestufe (Tab. 1); Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen nach 95 %-Niveau und Tukey-Test.

Aromastoffe, ($\mu\text{g}/100\text{ g}$)	Düngestufe				
	1	2	3	4	5
2,3-Butandion	229,3 \pm 144,1 ^b	291,2 \pm 132,0 ^b	299,9 \pm 164,8 ^b	407,3 \pm 181,9 ^{a,b}	559,0 \pm 252,1 ^a
Ethylbutanoat	114,8 \pm 104,7 ^b	170,2 \pm 203,3 ^{a,b}	164,0 \pm 162,3 ^{a,b}	237,2 \pm 300,9 ^{a,b}	353,2 \pm 281,2 ^a
Ethylhexanoat	54,0 \pm 33,2 ^b	67,1 \pm 41,9 ^{a,b}	62,4 \pm 29,0 ^b	76,9 \pm 53,9 ^{a,b}	105,3 \pm 80,2 ^a
Ethylisovalerat	3,2 \pm 2,7 ^b	4,6 \pm 5,1 ^b	4,1 \pm 3,6 ^b	5,3 \pm 5,0 ^{a,b}	8,3 \pm 7,6 ^a
Hexanal	183,6 \pm 76,7 ^b	197,8 \pm 84,2 ^b	187,6 \pm 124,0 ^b	248,4 \pm 131,2 ^{a,b}	313,0 \pm 188,3 ^a
2-Heptanon	11,2 \pm 7,9 ^c	15,3 \pm 8,9 ^c	21,1 \pm 15,1 ^{b,c}	30,1 \pm 18,9 ^b	43,6 \pm 24,1 ^a
Hexylacetat	24,1 \pm 10,7 ^b	29,7 \pm 11,8 ^b	32,6 \pm 16,6 ^b	36,0 \pm 14,1 ^b	55,4 \pm 32,2 ^a
Ethylacetat	22,6 \pm 24,3 ^b	42,1 \pm 62,8 ^{a,b}	39,4 \pm 52,9 ^b	38,9 \pm 55,6 ^b	100,2 \pm 109,2 ^a
Ethyl-2-methyl-butanoat	1,3 \pm 2,1 ^b	2,7 \pm 5,5 ^{a,b}	2,3 \pm 3,9 ^{a,b}	4,0 \pm 7,4 ^{a,b}	8,4 \pm 11,7 ^a
Linalool	48,4 \pm 16,5 ^c	56,4 \pm 11,3 ^{b,c}	61,4 \pm 14,3 ^b	68,9 \pm 14,8 ^{a,b}	78,3 \pm 14,0 ^a
Methylbutanoat	327,0 \pm 134,1 ^b	372,4 \pm 130,2 ^{a,b}	388,3 \pm 155,7 ^{a,b}	478,3 \pm 169,7 ^{a,b}	530,3 \pm 170,1 ^a
(E)-2-Hexenal	467,4 \pm 188,1 ^a	394,7 \pm 165,8 ^a	337,6 \pm 207,4 ^a	416,3 \pm 226,4 ^a	414,9 \pm 251,0 ^a
Methylhexanoat	141,3 \pm 62,3 ^b	174,0 \pm 69,3 ^{a,b}	169,8 \pm 73,8 ^{a,b}	205,5 \pm 86,1 ^{a,b}	221,1 \pm 75,2 ^a

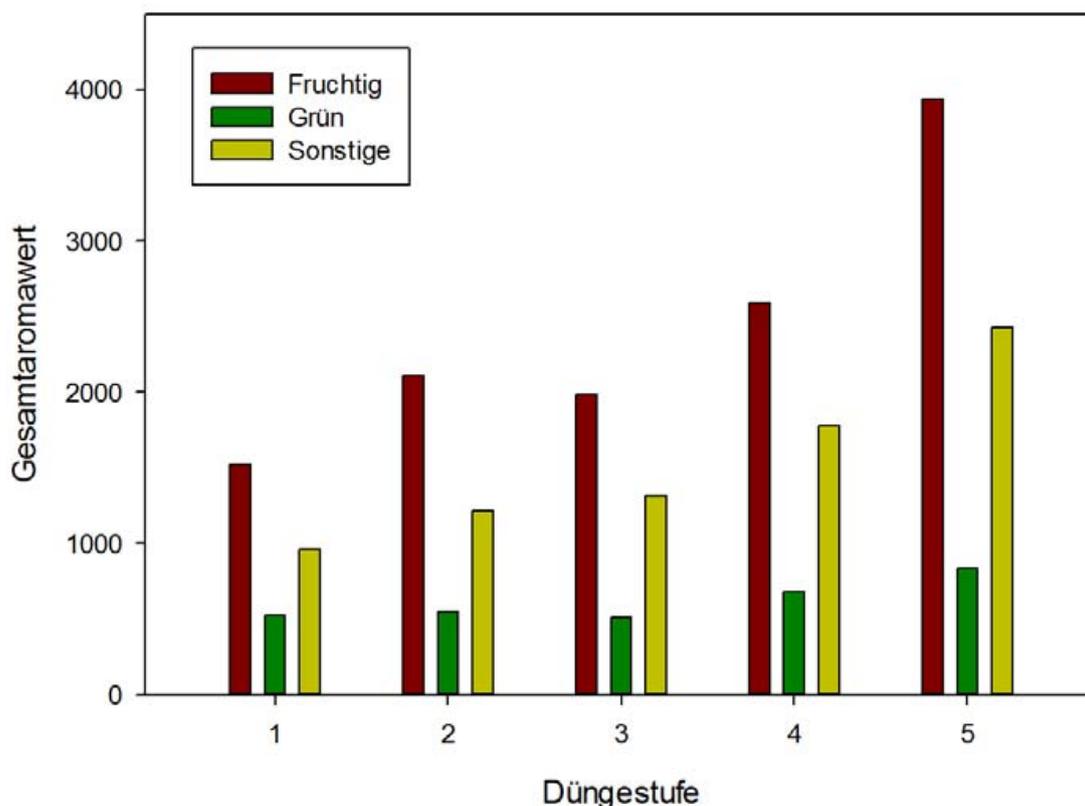


Abb. 3: Verhältnis von fruchtigen, grünen und sonstigen Aromawerten in Abhängigkeit von der Düngestufe; die einzelnen Aromawerte wurden entsprechend ihrer Kategorie (Tab. 3) addiert.

Das Verhältnis von fruchtigen, grünen und sonstigen Aromastoffen verändert sich analog zu den Einzelverbindungen (Abb. 3). Die fruchtigen und sonstigen Noten nehmen zu, und die grünen Noten bleiben nahezu konstant. Damit verschiebt sich der Aromaeindruck trotz konstanter grüner Werte durch die Verdopplung der Aromawerte fruchtiger Noten in ebendiese Richtung. Zu den grünen Aromawerten muss man allerdings noch erwähnen, dass hier auch 2-Hexenal mitgewertet wurde, welches, wie beschrieben, potentiell bei der Probenaufarbeitung oder durch Oxidationen mit Luftsauerstoff entstanden ist.

Ein Vergleich der gemessenen Werte mit Literaturwerten gestaltet sich schwierig, da zu viele Variablen die Konzentrationen beeinflussen. Neben biologischer Varianz und Sorte wirken sich bereits die Analysenmethode und die Art der Quantifizierung entscheidend auf die gemessenen Aromastoffkonzentrationen aus. Insgesamt stehen die Werte jedoch im Einklang mit denen anderer Studien (LARSEN et al., 1992; Li et al., 2009; SCHIEBERLE und HOFMANN, 1997).

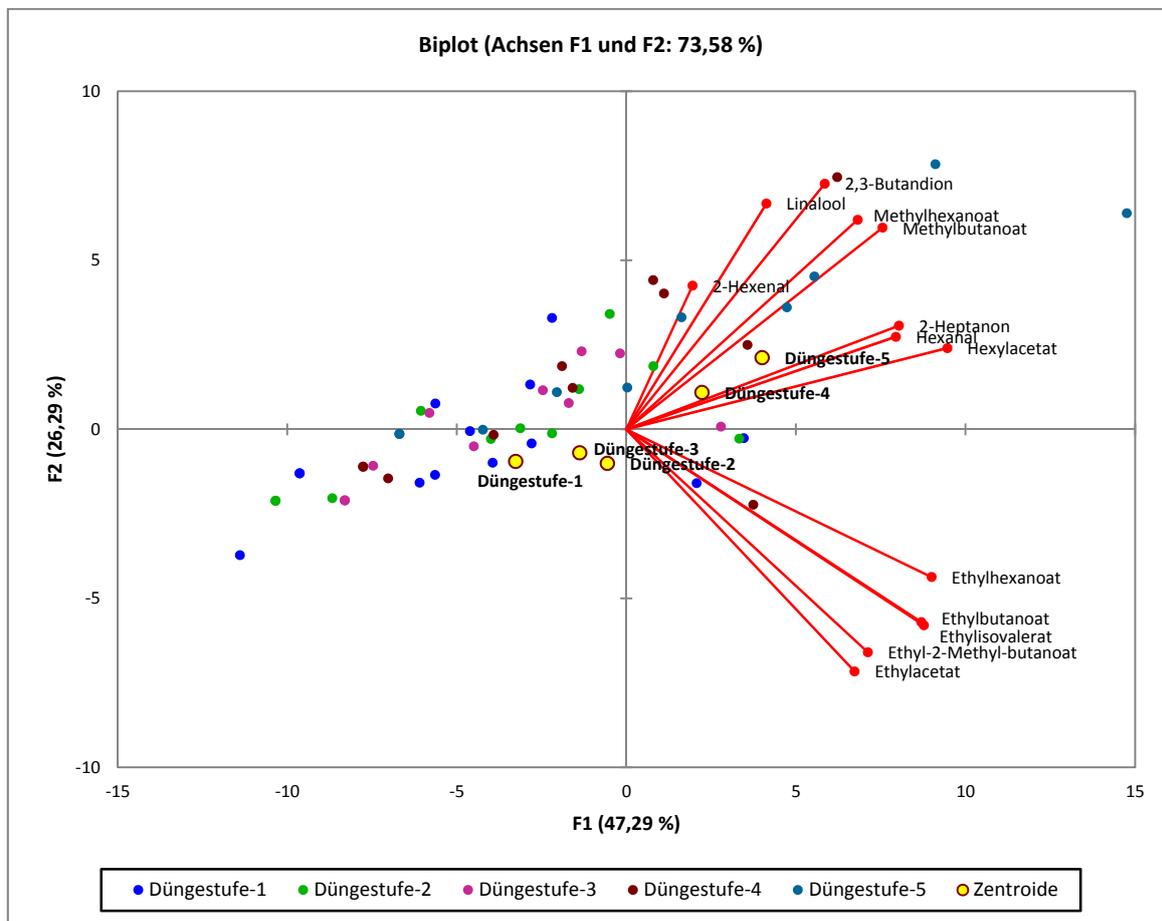


Abb. 4: Hauptkomponentenanalyse mit zwei Hauptkomponenten in Bezug auf die Düngestufe (Tab. 1) in Abhängigkeit der Aromastoffe

HAUPTKOMPONENTEN- UND DISKRIMINANZANALYSE

Zur Analyse der Daten wurde eine Hauptkomponentenanalyse (Abb. 4) durchgeführt, durch die knapp drei Viertel der Varianz erklärt werden können. Die Zentroide liegen eindeutig voneinander getrennt, das heißt, die Hauptkomponentenanalyse bestätigt die bereits durch Signifikanztests festgestellten Unterschiede zwischen den Düngestufen. Außerdem liegen die Zentroide nahezu auf einer Geraden zwischen den Achsen der Hauptkomponenten.

In Richtung dieser Geraden zeigen in der Biplot-Darstellung viele Aromastoffe, beispielsweise die Methy-

lester wie Methylhexanoat und Methylbutanoat sowie Linalool und 2,3-Butandion. Das heißt, diese Aromastoffe sprechen am stärksten auf die Düngung an. Kein Aromastoff zeigt in entgegengesetzte Richtung, es gibt also keine gegenläufigen Trends unter den analysierten Aromastoffen. Im rechten Winkel stehen alle Ethylester, somit sind sie nicht direkt an der Differenzierung der Düngarten beteiligt. Die Bildung von Methylestern wird folglich durch die Düngung mehr beeinflusst als die von Ethylestern. FORNEY et al. (2000) berichteten, dass die Konzentration an Methylestern während der Reifung um das bis zu Siebenfache ansteigt, wohingegen die Konzentration an Ethylestern nahezu gleichbleibt. Unter der Annahme, dass die Düngung die Reifung ver-

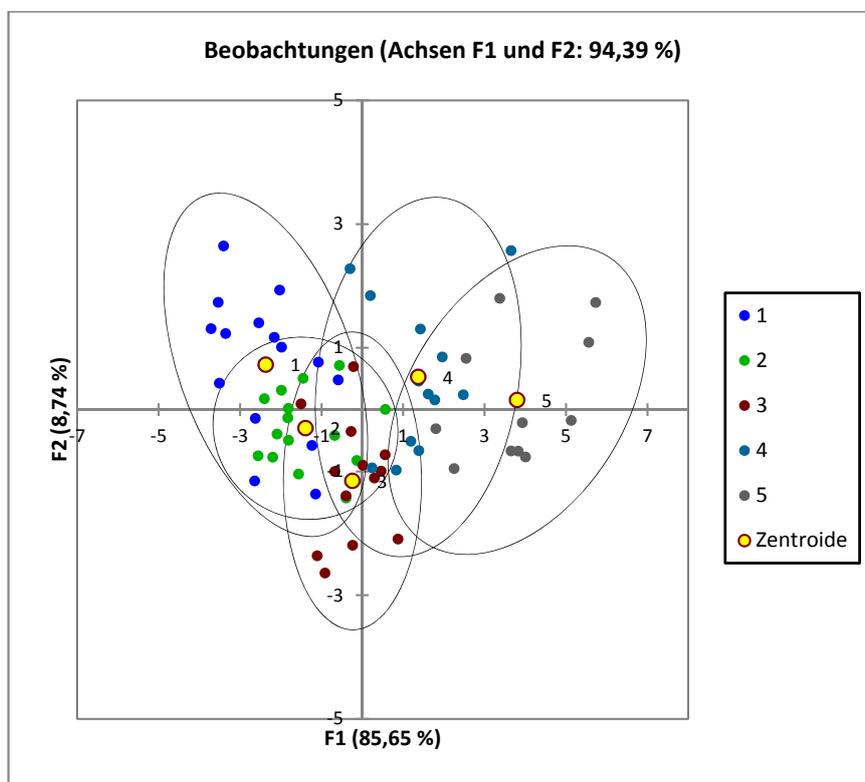


Abb. 5: Diskriminanzanalyse in Bezug auf die Düngestufe (Tab. 1) in Abhängigkeit der Aromastoffe; Zahlen kennzeichnen die Düngestufe

bessert, kann damit das Ergebnis der Hauptkomponentenanalyse erklärt werden.

Die Ergebnisse der Hauptkomponentenanalyse werden durch die Diskriminanzanalyse (Abb. 5) bestätigt. Hier sind die Zentroiden ebenfalls deutlich voneinander getrennt. Zusätzlich sind die Konfidenzellipsen der Düngestufen 1, 2 und 3 von der der höchsten Düngestufe praktisch vollständig getrennt. Auf die Auftrennung haben fast alle Aromastoffe Einfluss. Nur 2-Hexenal zeigt in eine andere Richtung, allerdings ist dieser Parameter kritisch zu betrachten, da er, wie bereits erwähnt, bei der Probenaufarbeitung entstanden sein kann.

EINFLUSS DES PFLÜCKTAGS

Alle Früchte wurden als reif, sprich vollständig rot ohne überreife Anzeichen wie matschig oder schimmelig, gepflückt. Gegebenenfalls wurden solche Stellen vor der Probenaufarbeitung entfernt. Es wurden an drei verschiedenen Tagen (08.06.17, 13.06.17, 19.06.17) jeweils alle reifen Früchte gepflückt. Bei acht der 13 untersuchten Aromastoffe sind die Konzentrationen am dritten Pflücktag signifikant höher als bei den ersten beiden Tagen (Tab. 5). Linalool zeigt am ersten Tag einen signifikant höheren Gehalt, und Methylacetat hat am dritten

Pflücktag niedrigere Werte (Daten nicht gezeigt).

PEREZ et al. (1992) zeigten in ihren Studien, wie stark sich das Aroma während der Reife verändert. Ethylhexanoat beispielsweise nahm vom 36. zum 41. Tag nach der Blüte um rund ein Drittel zu, vom 41. Tag zum 46. Tag nochmal um mehr als Dreifache.

Möglicherweise könnte eine längere Verweilzeit der Frucht am Strauch also zu einem ausgeprägteren Aroma führen, wobei zu beachten ist, dass die Ausbildung der Blüten bei Erdbeeren zeitversetzt erfolgt. Wie bereits erwähnt spielt die Nährstoffversorgung der Früchte eine wichtige Rolle bei der Aromabildung. Die ersten Früchte reifen zwar vermutlich aufgrund der Apikaldominanz der ersten Blüten bzw. Früchte schneller ab und bekommen am Anfang mehr Nährstoffe zur Verfügung, allerdings müssen auch die bereits gebildeten, noch unreifen Früchte versorgt werden. Dazu kommt, dass die Pflanze

ständig neue Blätter bildet und somit mehr Stoffe über die Photosynthese zur Verfügung stehen sollten. Diese müssen über die Zeit an immer weniger Früchte aufgeteilt werden, sodass die später reifenden Früchte vermutlich mehr Nährstoffe bereitgestellt bekommen und somit eine bessere Ausgangslage zur Aromastoffproduktion vorfinden (VOLGENANDT, persönliche Mitteilung). Man darf aber nicht außer Acht lassen, dass die Entscheidung, ob eine Frucht reif ist oder nicht, rein visuell durch den Farbeindruck und die Festigkeit der Frucht erfolgte und die Früchte am dritten Pflücktag möglicherweise reifer waren als andere. Außerdem zeigt 'Clery' Erfahrungsberichten zufolge generell die Tendenz, zu späteren Pflückzeitpunkten mehr Aroma zu besitzen, sodass die gemessenen signifikanten Unterschiede nicht eindeutig auf die Düngemenge zurückzuführen sind.

Tab. 5: Mittelwerte der Aromastoffgehalte ($\mu\text{g}/100\text{ g}$) in Abhängigkeit vom Pflücktag; Buchstaben kennzeichnen Signifikanzen nach 95 %-Niveau und Tukey-Test

Aromastoffe, ($\mu\text{g}/100\text{ g}$)	Pflücktag		
	08.06.2017	13.06.2017	19.06.17
2,3-Butandion	356,2 \pm 232,6 ^{a,b}	414,5 \pm 229,8 ^a	292,8 \pm 136,5 ^b
Ethylbutanoat	80,3 \pm 88,2 ^b	137,9 \pm 175,5 ^b	373,8 \pm 261,6 ^a
Ethylhexanoat	44,9 \pm 20,6 ^b	57,0 \pm 30,9 ^b	114,6 \pm 63,6 ^a
Ethylisovalerat	1,8 \pm 1,6 ^b	3,4 \pm 2,5 ^b	9,8 \pm 6,0 ^a
Hexanal	166,1 \pm 94,0 ^b	190,4 \pm 101,7 ^b	314,9 \pm 143,7 ^a
2-Heptanon	17,0 \pm 13,8 ^b	19,6 \pm 16,2 ^b	36,2 \pm 22,4 ^a
Hexylacetat	29,0 \pm 22,2 ^b	31,2 \pm 12,3 ^b	46,4 \pm 23,5 ^a
Ethylacetat	23,0 \pm 21,6 ^b	26,3 \pm 26,7 ^b	93,3 \pm 105,8 ^a
Ethyl-2-methylbutanoat	0,6 \pm 1,3 ^b	2,1 \pm 3,7 ^b	8,5 \pm 10,4 ^a
Linalool	72,8 \pm 15,8 ^a	54,0 \pm 15,5 ^b	61,3 \pm 15,8 ^b
Methylbutanoat	376,4 \pm 206,6 ^a	465,0 \pm 182,6 ^a	416,4 \pm 72,5 ^a
(E)-2-Hexenal	419,2 \pm 227,0 ^a	377,6 \pm 224,3 ^a	421,6 \pm 177,1 ^a
Methylhexanoat	165,2 \pm 91,8 ^a	206,1 \pm 86,4 ^a	175,8 \pm 38,9 ^a

FAZIT

Höhere Düngkonzentrationen fördern die Aromabildung in Erdbeeren der Sorte 'Clery'. Insbesondere die durch verschiedene Ester bedingte fruchtige Note nimmt zu, aber auch andere Aromaeindrücke, wie buttrig durch 2,3-Butan-dion und floral durch Linalool, erhöhen sich. Zudem liefert die Pflanze mit höherer Supplementierung mehr Ertrag und größere Früchte (Werte nicht gezeigt). Die erhöhte Stickstoffzufuhr spiegelt sich auch in den Früchten wider. Die Nitrat- und α -Amino-N-Werte steigen analog. Es könnten mehr Enzyme für die Aromabildung produziert worden sein, außerdem steigt durch den Dünger die Photosyntheseleistung, und die Pflanze kann mehr Vorläuferstrukturen für die Aromastoffe produzieren. In Folgeexperimenten könnten neben moderater Düngung auch Überdüngungsexperimente durchgeführt werden, um die optimale Düngemenge für die Aromastoffproduktion feststellen zu können. In

der durchgeführten Studie konnten die bekannten Erdbeeraromen Furaneol und Mesifuran nicht detektiert werden. Unklar ist daher, ob sie in dieser Erdbeersorte nicht vorkommen oder ob die gewählte analytische Methode für diese Parameter nicht geeignet ist. Interessant wäre auch herauszufinden, wie sich das Aroma durch die Aktivität von Speichelenzymen beim Kauvorgang verändert und welche Aromen dann retronasal (also mittels Headspace bei 37 °C) detektierbar wären.

Ein weiterer Arbeitsansatz könnte sein, die Auswirkungen von Dünger auf die Sensorik und die nutritiven Eigenschaften näher zu betrachten, da hier nicht nur die Aromastoffe eine Rolle spielen. So ist insbesondere das Zucker/Säure-Verhältnis für den Geschmack relevant. Außerdem sind Erdbeeren aufgrund ihres Gehaltes an Vitaminen, wie Ascorbinsäure, und antioxidativen Eigenschaften, beispielsweise durch Polyphenole, begehrt.

LITERATUR

- AHMAD, H. 2014: Dose Optimization of Potassium (K) for Yield and Quality Increment of Strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch) Chandler. *AJEA* 4 (12): 1526–1535.
- BAKSHI, P., JASROTIA, A., SHARMA, A., RAI, P. K., WALI, V. K. UND KUMAR, R. 2013: Pre-harvest application of iron and zinc influences growth, yield, quality and runner production of strawberry (*Fragaria x ananassa*) cv Chandler. *Indian Journal of Agricultural Science* (83.6).
- BANGERTH, F., SONG, J. UND STREIF, J. 2012: Physiological Impacts of Fruit Ripening and Storage Conditions on Aroma Volatile Formation in Apple and Strawberry Fruit: A Review. *HortScience* 47 (1): 4–10.
- BELITZ, H.-D., GROSCH, W. UND SCHIEBERLE, P. 2008: *Lehrbuch der Lebensmittelchemie*. 6., vollst. überarb. Aufl. - Berlin, Heidelberg: Springer, 2008
- BERGER, R. G. 2007: *Flavours and Fragrances*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007
- BLAKESLEY, C. N., LOOTS, J. G., DU PLESSIS, L. UND BRUYN, G. DE 1979: gamma. Irradiation of subtropical fruits. 2. Volatile components, lipids and amino acids of mango, papaya, and strawberry pulp. *J. Agric. Food Chem.* 27 (1): 42–48.
- BREMER, H. J., ANNINOS, A. UND SCHULZ, B. 1996: Amino acid composition of food products used in the treatment of patients with disorders of the amino acid and protein metabolism. *Eur J Pediatr* 155 (S1): 108-114.
- BRUNETTO, G., MELO, G. W. B. D., TOSELLI, M., QUARTIERI, M. UND TAGLIAVINI, M. 2015: The role of mineral nutrition on yields and fruit quality in grapevine, pear and apple. *Rev. Bras. Frutic.* 37 (4): 1089–1104.
- BUETTNER, A. 2017: *Springer Handbook of Odor*. Cham: Springer International Publishing, 2017
- BURDOCK, G. A. UND FENAROLI, G. 2010: *Fenaroli's handbook of flavor ingredients*. 6th ed. Boca Raton: Taylor & Francis.
- CAO, F., GUAN, C., DAI, H., LI, X. UND ZHANG, Z. 2015: Soluble solids content is positively correlated with phosphorus content in ripening strawberry

- fruits. *Scientia Horticulturae* 195: 183–187.
- DARNELL, R. L. UND STUTTE, G. W. 2001: Nitrate concentration effects on NO₃-N uptake and reduction, growth, and fruit yield in strawberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science. American Society for Horticultural Science* 126 (5): 560–563.
- DU, X., PLOTTO, A., BALDWIN, E. UND ROUSEFF, R. 2011: Evaluation of volatiles from two subtropical strawberry cultivars using GC-olfactometry, GC-MS odor activity values, and sensory analysis. *Journal of agricultural and food chemistry* 59 (23): 12569–12577.
- FORNEY, C. F., KALT, W. UND JORDAN, M. A. 2000: The composition of strawberry aroma is influenced by cultivar, maturity, and storage. *HortScience* 35 (6): 1022–1026.
- HAYNES, R. J. UND GOH, K. M. 1987: Effects of nitrogen and potassium applications on strawberry growth, yield and quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 18 (4): 457–471.
- HONG, Y.-C., HUANG, L.-C., REINECCIUS, G. A., HARLANDER, S. K. UND LABUZA, T. P. 1990: Production of aroma compounds from strawberry cell suspension cultures by addition of precursors. *Plant Cell Tiss Organ Cult* 21 (3): 245–251.
- IATROU, M. UND PAPADOPOULOS, A. 2016: Influence of nitrogen nutrition on yield and growth of an everbearing strawberry cultivar (cv. Evie II). *Journal of Plant Nutrition* 39 (11): 1499–1505.
- KAFKAS, E., GUNAYDIN, S., ERCISLI, S., OZOGUL, Y. UND UNLU, M. A. 2009: Fat and fatty acid composition of strawberry cultivars. *Chemistry of Natural Compounds* 45 (6): 861–863.
- LARSEN, M. UND POLL, L. 1992: Odour thresholds of some important aroma compounds in strawberries. *Z Lebensm Unters Forch* 195 (2): 120–123.
- LARSEN, M., POLL, L. UND OLSEN, C. E. 1992: Evaluation of the aroma composition of some strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) cultivars by use of odour threshold values. *Z Lebensm Unters Forch* 195 (6): 536–539.
- LAWLOR, D. W. 2002: Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield. Mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany* 53 (370): 773–787.
- LI, X.-X., FUKUHARA, K. UND HAYATA, Y. 2009: Concentrations of Character Impact Odorants in ‘Toyonoka’ Strawberries Quantified by Standard Addition Method and PQ Column Extraction with GC-MS Analysis. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 78 (2): 200–205.
- LIU, L., XIAO, W., JI, M.-L., YANG, C., LI, L., GAO, D.-S. UND FU, X.-L. 2017: Effects of molybdenum on nutrition, quality, and flavour compounds of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch. cv. Akihime) fruit. *Journal of Integrative Agriculture* 16 (7): 1502–1512.
- MALONE, NATHAN (HG.) 2014: Strawberries. Cultivation, antioxidant properties and health benefits. New York: Nova Publishers, 2014
- NIKFARDJAM, M., KOPP, M., HEMPFING, K. UND ENGEL, K.-H. 2013: Analysis of aroma compounds in fresh gooseberry fruit (*Ribes uva-crispa* L.) by means of Headspace HRGC-MS. *Mitteilungen Klosterneuburg Rebe und Wein, Obstbau und Früchteverwertung* 63 (2): 108–116.
- OJEDA-REAL, L. A., LOBIT, P., CÁRDENAS-NAVARRO, R., GRAGEDA-CABRERA, O., FARÍAS-RODRÍGUEZ, R., VALENCIA-CANTERO, E. UND MACÍAS-RODRÍGUEZ, L. 2009: Effect of nitrogen fertilization on quality markers of strawberry (*Fragaria × ananassa* Duch. cv. Aromas). *J. Sci. Food Agric.* 89 (6): 935–939.
- OKE, M., AHN, T., SCHOFIELD, A. UND PALIYATH, G. 2005: Effects of phosphorus fertilizer supplementation on processing quality and functional food ingredients in tomato. *Journal of agricultural and food chemistry* 53 (5): 1531–1538.
- PAPADOPOULOS, I. 1987: Nitrogen fertigation of greenhouse-grown strawberries. In: *Fertilizer Research* 13 (3): 269–276.
- PEREZ, A. G., RIOS, J. J., SANZ, C. UND OLIAS, J. M. 1992: Aroma components and free amino acids in strawberry variety Chandler during ripening. In:

- J. Agric. Food Chem. 40 (11): 2232–2235.
- PÉREZ, A. G., OLÍAS, R., LUACES, P. UND SANZ, C. 2002: Biosynthesis of Strawberry Aroma Compounds through Amino Acid Metabolism. J. Agric. Food Chem. 50 (14): 4037–4042.
- SCHIEBERLE, P. UND HOFMANN, T. 1997: Evaluation of the Character Impact Odorants in Fresh Strawberry Juice by Quantitative Measurements and Sensory Studies on Model Mixtures. J. Agric. Food Chem. 45 (1): 227–232.
- SINGH, S. K. UND SARAVANAN, S. 2012: Effect of bio-fertilizers and micronutrients on yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch) cv. CHANDLER. The Asian Journal of Horticulture (7.2).
- SONG, J. UND FORNEY, C. F. 2008: Flavour volatile production and regulation in fruit. Canadian Journal of Plant Science 88 (3): 537–550.
- ULRICH, D., RAPP, A. UND HOBERG, E. 1995: Analyse des Erdbeeraromas - Quantifizierung der flüchtigen Komponenten in Kulturerdbeervarietäten und der Walderdbeere. Z Lebensm Unters Forch 200 (3): 217–220.
- VALENTINUZZI, F., MASON, M., SCAMPICCHIO, M., ANDREOTTI, C., CESCO, S. UND MIMMO, T. 2015: Enhancement of the bioactive compound content in strawberry fruits grown under iron and phosphorus deficiency. Journal of the science of food and agriculture 95 (10): 2088–2094.
- WANG, Y.-T., LIU, R.-L., HUANG, S.-W. UND JIN, J.-Y. 2009: Effects of Potassium Application on Flavor Compounds of Cherry Tomato Fruits. Journal of Plant Nutrition 32 (9): 1451–1468.

Eingelangt am 19. Oktober 2017