

Biochemische Grundlagen der Nacherntebehandlung: Das Geheimnis eines guten Kaffees

DIRK SELMAR | GERHARD BYTOF

Kaffee ist so beliebt wie kaum ein anderes Getränk – dennoch ist das Wissen über die Hintergründe der Rohkaffee-Produktion sehr begrenzt. Völlig unverstanden waren bis vor kurzem die Prozesse, die im Zuge der Nacherntebehandlungen für die unterschiedlichen Qualitätsausprägungen des Kaffees verantwortlich sind. Erst mit Hilfe eines neuen, pflanzenbiologischen Ansatzes, der die Stoffwechselprozesse in den Kaffeebohnen berücksichtigt, ist es gelungen, Licht in dieses Dunkel zu bringen.

Kaffee ist das Lieblingsgetränk der Deutschen. Im Jahr 2006 hat jeder Deutsche – statistisch gesehen – 146 Liter des Heißgetränkes konsumiert (Deutscher Kaffeeverband). Damit liegt der *pro Kopf*-Verbrauch von Kaffee noch vor dem von Mineralwasser oder Bier. Die meisten Menschen trinken Kaffee nicht nur wegen seiner anregenden Wirkung, sondern sie schätzen auch den typischen Kaffee-Geschmack. Die Kaffee-Zubereitungen sind vielfältig: Ob Mokka, Espresso, Cappuccino, Latte macchiato oder ein traditioneller Filterkaffee – das Aroma und der unverwechselbare Geschmack zeichnen einen guten Kaffee aus.

Jeder weiß, dass für all diese Getränke ein Röstkaffee benötigt wird und dass dieser durch das Rösten von Rohkaffee entsteht. Kaffeeliebhaber wissen sicherlich, dass die Rösttemperatur und Röstdauer den Röstgrad und damit viele wichtige Eigenschaften der braunen Bohnen bestimmen, und dass auch die Wahl der richtigen Rohkaffees sehr wichtig ist; doch damit erschöpft sich meist schon das Wissen über die Entstehung von Kaffee.

In diesem Beitrag werden zunächst die Grundlagen der wichtigsten Nachernte-Verfahren vorgestellt, bevor erläutert wird, welche Auswirkungen die unterschiedlichen Methoden der Rohkaffee-Produktion auf die Rohkaffee-Qualität und damit auf Geschmack und Aroma des Kaffeegetränkes haben. Darauf aufbauend werden dann die biologischen Grundlagen dieser unterschiedlichen Verfahren präsentiert. Im Zentrum steht dabei die Erkenntnis, dass in den Kaffeebohnen

während der Rohkaffee-Produktion komplexe Stoffwechselprozesse ablaufen, deren Ausprägung durch die verschiedenen Methoden der Nacherntebehandlung beeinflusst wird.

Allgemeine botanische Aspekte

Die Gattung *Coffea* gehört zur Familie der Rubiaceae und umfasst etwa einhundert verschiedene Arten [4]. Nur drei davon werden zur Herstellung von Kaffee-Getränken verwendet: der Arabica-Kaffee (*Coffea arabica*), der Robusta-Kaffee (*Coffea canephora*) und der Liberica-Kaffee (*Coffea liberica*); letzterer ist allerdings kaum gefragt und hat keine Bedeutung. Etwa 70 % der Welterzeugung gehen auf Arabica-Kaffees zurück, dessen Sorten in zwei Hauptqualitäten produziert und vermarktet werden: gewaschene, *nass-aufbereitete* und ungewaschene, *trocken aufbereitete* Kaffees (s.u.). Der Marktanteil von Robusta-Kaffee liegt zurzeit bei etwa 30 %; der größte Teil der Robusta-Welternte wird trocken aufbereitet. Während in Deutschland Robusta-Kaffee nur eine geringe Bedeutung hat, wird der typisch erdige und eher muffige Geschmack in Frankreich, Spanien und insbesondere in Osteuropa geschätzt.

Die Heimat von *Coffea arabica* liegt in den Gebirgswäldern des südwestlichen Teils Äthiopiens. Der Gattungsname *Coffea* leitet sich vom englischen „coffee“ ab, das – wie auch der deutsche Name „Kaffee“ – wahrscheinlich auf das türkische Wort „kahve“ zurückgeht, welches seinerseits dem Arabischen „qahwa“ (für das Kaffeegetränk) entlehnt ist.

Im ursprünglichen Lebensraum wächst Kaffee im Schatten eines mehr oder weniger dichten Blätterdaches. Zwar kann der Kaffeebaum (*C. arabica*) eine Höhe zwischen 6 und 10 m erreichen, doch in Kultur hält man ihn meist als Strauch (Abbildung 1) oder als Hecke. 4 – 6 Jahre nach der Pflanzung beginnt er zu tragen. Das Ertragsmaximum wird in der Regel nach 10 – 15 Jahren erreicht. Der Blütenansatz und die Blütenbildung werden maßgeblich durch die Wasserversorgung, die Temperatur und die Tageslänge beeinflusst. Sehr häufig löst der einsetzende Regen nach einer ausgeprägten Trockenperiode die Blütenentwicklung aus.



ABB. 1 Kaffee-Busch mit Blüten und Früchten. In Anbau-gebieten nahe des Äquators tragen die *Arabica*-Kaffeesträucher regelmäßig gleichzeitig Blüten und Früchte. Daraus resultieren zwei Ernten pro Jahr. Bild: Inst. f. Pflanzenbiologie, TU Braunschweig.



ABB. 2 Eimer mit Kirschen. In Tansania erfolgt die Kaffeeernte traditionell durch Pflücken, wobei durch sorgfältige Auslese nur reife Kaffeekirschen geerntet werden. Bild: Inst. f. Pflanzenbiologie, TU Braunschweig.

Nach einer etwa acht- bis zehnmonatigen Reifezeit entwickeln sich dunkelrote, kirschenähnliche Steinfrüchte von 1-2 cm Durchmesser (Abbildung 2). In der Frucht befinden sich meist zwei Samen, die so genannten Kaffeebohnen. Im Gegensatz zu allen anderen Kaffeespezies ist *Coffea arabica* autogam, d.h. die Befruchtung erfolgt meist durch Selbstbestäubung; unter entsprechenden Bedingungen kommt jedoch auch eine Fremdbestäubung durch Insekten vor.

Wie die Samen vieler anderer tropischer Pflanzen zeigen auch Kaffeesamen keine durch Reifetrocknung induzierte Samenruhe und könnten bereits in der reifen Frucht keimen; allerdings wird die vorzeitige Keimung in der Frucht durch hemmende Faktoren im Fruchtfleisch unterdrückt. Die Ursachen für die Unterdrückung der Keimung in der Frucht können vielfältig sein; neben Keimungsinhibitoren oder entsprechenden Phytohormonen (z. B. Abscisinsäure) geht der Effekt häufig auch auf das hohe osmotische Potenzial des Fruchtfleisches zurück. Für Kaffeesamen ist bislang noch nicht bekannt, wie die Keimung in der Frucht unterdrückt wird.

Von der Kaffeekirsche zur Kaffeebohne

Für die Produktion von Rohkaffee ist es notwendig, das Fruchtfleisch der Kaffeekirschen zu entfernen und die Bohnen zu trocknen. Traditionell gibt es zwei unterschiedliche Verfahren der Nacherntebehandlung der Arabica-Kaffees, die „trockene“ und die „nasse“ Aufbereitung. Die ältere und kostengünstigere Methode ist die „trockene“ oder „natürliche“ Aufbereitung. Sie wird auch heute noch dort verwendet, wo große Kaffee-Ernten schnell verarbeitet werden müssen und nur wenig Wasser für einen nassen Prozess zur Verfügung steht. Der so produzierte Rohkaffee wird als „ungewaschener Arabica“ bezeichnet und dem nass aufbereiteten Rohkaffee, dem „gewaschenen Arabica“, gegenübergestellt (Abbildung 3) [4].

Die trockene Aufbereitung

Bei der Wahl der Kaffee-Nacherntebehandlungsmethode spielen vor allem logistische Aspekte eine entscheidende Rolle. Die wichtigsten Vorbedingungen für die trockene Aufbereitung sind eine verlässliche und intensive Sonneneinstrahlung und eine ausreichende Kapazität an Trocknungsflächen. Das Procedere ist relativ einfach: zunächst werden die Kaffeekirschen geerntet – in der Regel durch Abstreifen aller Früchte eines Kaffeestrauches (*stripping*), so dass neben den reifen roten Kaffeekirschen auch grüne, unreife und schwarze, überreife Früchte als Mischung vorliegen.

Alle geernteten Kaffeekirschen werden dann auf Betonterrassen ausgebreitet und in der Sonne getrocknet. Mehrmals am Tag werden die Früchte umgeschichtet (Abbildung 4). Um eine zu große Absenkung der Temperatur während der Nacht zu verhindern, werden

ABB. 3 | DIE BEIDEN TRADITIONELLEN METHODEN DER ROHKAFFEE-AUFBEREITUNG

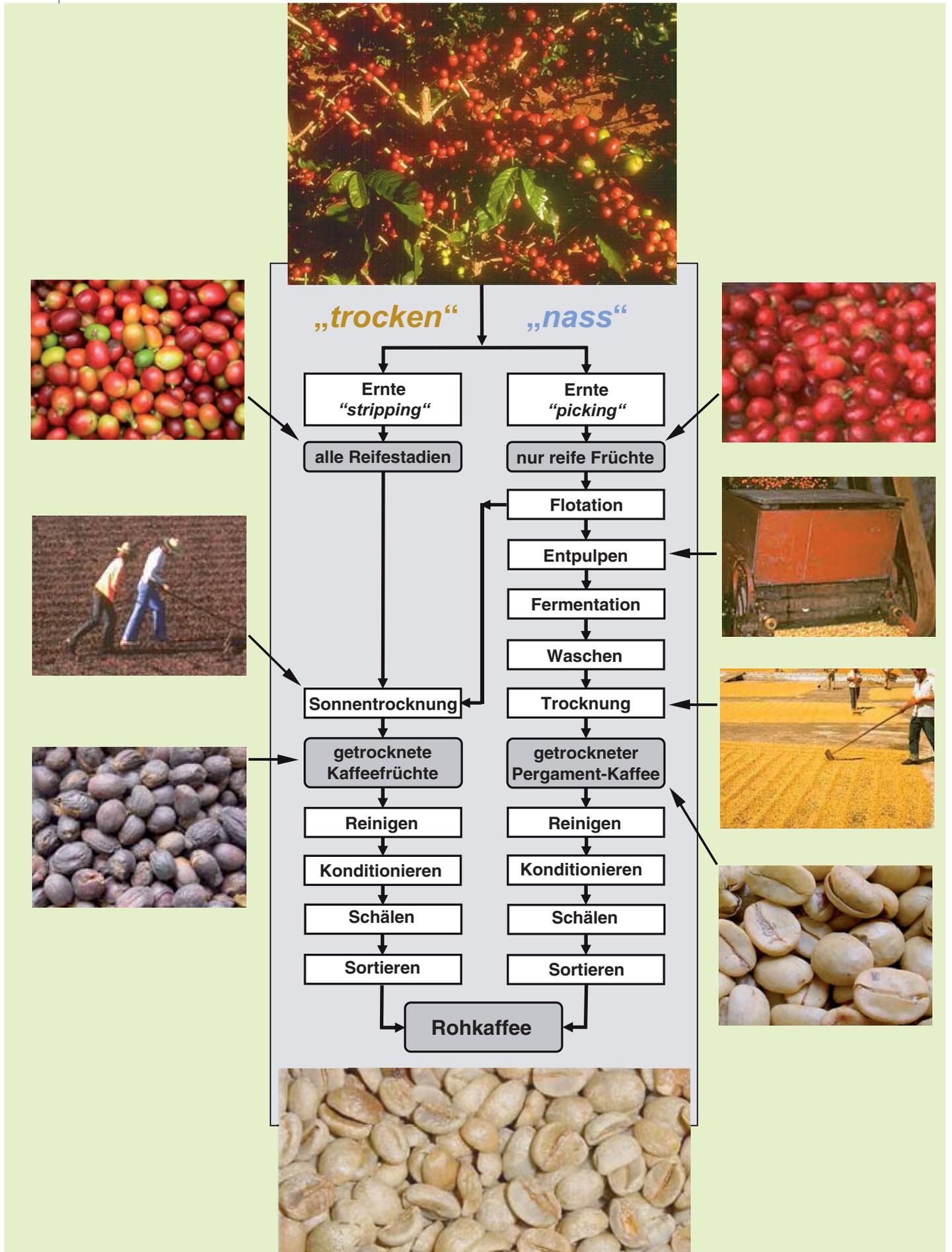




ABB. 4 Bei der trockenen Aufbereitung (Brasilien) werden alle Kaffeebohnen in der Frucht unsortiert in der Sonne getrocknet und dabei mehrmals am Tag gewendet. In Brasilien geschieht dies mitunter auf riesigen Terrassen und mit Hilfe von Traktoren. Bei der Trocknung (ca. drei Wochen) färben sich die Kaffeebohnen allmählich dunkelbraun bis schwarz. Bild: Inst. f. Pflanzenbiologie, TU Braunschweig.

die Kaffeeirschen abends zu Haufen zusammen geschoben. Nach zwei bis drei Wochen sind die Kaffeeirschen trocken. Die Samen, deren Gewicht zu Beginn der Trocknung etwa 50 % betrug, haben dann eine Restfeuchte von etwa 11 %. Nachdem Fremdkörper wie Steine oder Holzstücke aussortiert wurden, wird das gesamte getrocknete Fruchtfleisch (Endo-, Meso- und Exokarp) mit mechanischen Schälmaschinen vollständig entfernt.

Nun muss der Rohkaffee für zwei bis vier Wochen zwischengelagert und konditioniert werden, bevor er fertig zum Verschiffen ist. Da bei diesem Verfahren kein Sortieren nach Reifestadien der verwendeten Früchte erfolgt, gelten die auf diese Weise produzierten *ungewaschenen Arabicas* häufig als qualitativ minderwertiger als die *gewaschenen Arabicas*.

Die trockene Aufbereitung wird vor allem in Brasilien, Indonesien, Äthiopien und im Jemen angewandt. *Ungewaschene Arabicas* zeichnen sich vor allem durch eine angenehme Süße und ausgeprägte Vollmundigkeit aus.

Die nasse Aufbereitung

Die steigende Nachfrage nach Rohkaffee führte zum Vordringen des Kaffeeanbaus in Regionen mit eher unsicheren Sonnenverhältnissen. Aufgrund der wechselhaften und feuchteren Witterungsbedingungen würden trockene Aufbereitungen hier regelmäßig zum Verderben der Kaffeeirschen führen. Als alternatives Aufbereitungsverfahren wurde die nasse Aufbereitung entwickelt, die weniger Trocknungszeit und Platz benötigt.

Der wesentliche Schritt dieses Verfahrens ist die so genannte „*Entpulpung*“ der frischen Kaffeeirschen. Dabei wird mit einem mechanischen „*Pulper*“ der

Großteil des Fruchtfleisches (*Pulpa*) entfernt – entweder durch Quetschen der Früchte zwischen einer rotierenden Scheibe und einem Messer (Scheibenpulper) oder durch Pressen der Kaffeeirschen zwischen einer rotierenden Trommel und dem Rahmen (Zylinderpulper).

Eine wichtige Voraussetzung für diese Verfahren ist die sorgfältige Vorauswahl der Früchte. Diese erfolgt entweder bereits bei der Ernte durch das gezielte Pflücken von ausschließlich reifen Kaffeeirschen (*picking*) oder erst unmittelbar vor der Bearbeitung durch geeignete Verfahren. Diese Vorauswahl ist notwendig, da nur vollreife Früchte die mechanischen Pulper passieren können.

Allerdings werden die Samen durch die Entpulpung nicht vollständig freigesetzt, sondern sind noch von der so genannten Pergamentschicht oder Hornschale (= Endocarp) umgeben. Des Weiteren finden sich noch erhebliche Reste des schleimigen Mesokarps, die der Pergamentschicht anhaften. Aufgrund des sehr hohen Zuckergehaltes dieser Pulpa-Rückstände können die frisch entpulpften Kaffeebohnen nicht direkt auf der Terrasse getrocknet werden, denn sie würden bei nicht ausreichender Sonneneinstrahlung durch durch mikrobiellen Befall verderben.



ABB. 5 Fermentation (hier: Ostafrika). Nach Entfernen des Fruchtfleisches werden die schleimigen Reste der Pulpa im Zuge einer Fermentation enzymatisch abgebaut. Dieser Prozess kann einen bis vier Tage beanspruchen. Danach werden die Kaffeebohnen in einen Waschkanal geschaufelt. Bild: Inst. f. Pflanzenbiologie, TU Braunschweig.

Die mit einem grünen Pfeil markierten Begriffe werden im Glossar auf Seite 164 erklärt.

Die an der Pergamentschicht anhaftenden schleimigen Fruchtfleischanteile werden in einem nachfolgenden Fermentationsschritt enzymatisch zersetzt und danach abgewaschen (Abbildung 5). Die Dauer der Fermentation ist stark von deren Randbedingungen abhängig und kann von zwölf Stunden bis zu vier Tagen variieren, dabei können die gepulpten Bohnen vollständig mit Wasser überdeckt sein oder die Fermentation findet im feuchten Haufwerk statt. Im Zuge der Fermentation verflüssigt sich der Schleim, so dass er problemlos abgewaschen werden kann. Der weit verbreitete Ausdruck „*gewaschener Arabica*“ geht auf diesen abschließenden Waschvorgang zurück.

Der resultierende so genannte Hornschalenkaffee lässt sich viel schneller trocknen als die ganzen Kaffeefrüchte – je nach Sonneneinstrahlung dauert es lediglich zwei bis fünf Tage, bis die Bohnen die gewünschte Endfeuchte von etwa 11 % aufweisen. In vielen Kaffeeanbaugebieten mit unsicheren Sonnenverhältnissen, wie beispielsweise Kolumbien und Mittelamerika, wird der Hornschalenkaffee in mechanischen Ofen-Trocknern getrocknet. Dadurch wird die Trocknungszeit auf etwa 48 Stunden reduziert. Charakteristisch für nass aufbereitete Rohkaffees sind eine ausgeprägte Säure und das feine Aroma.

Neue Verfahren der Rohkaffee-Aufbereitung

Aufgrund steigender Peronalkosten in den Kaffeeproduktionsländern wird der Preisdruck für nass aufbereitete Kaffees immer stärker. Neben dieser ökonomischen Komponente sind es aber auch ökologische Überlegungen, die in jüngster Zeit zur Etablierung neuer, progressiver Verfahren der Rohkaffeeherstellung führten. Die nasse Aufbereitung verbraucht sehr viel Frischwasser, und es fallen große Mengen an Abwasser an, die durch die Fermentationsrückstände stark mit organischem Material belastet sind und dadurch vielerorts ein Problem für die Flüsse darstellen.

Der zentrale Punkt der neuen Verfahren ist die mechanische Entfernung des Schleims. Zunächst werden die reifen Kaffeekirschen – genau wie bei der traditionellen Nass-Aufbereitung – mit entpulpt; doch anstelle der normalerweise folgenden Fermentation werden die schleimigen Rückstände des Fruchtfleisches durch Reibung an bewegten Teilen entfernt. Im Gegensatz zu den etwa vierzig Litern Wasser, die üblicherweise bei der traditionellen Nass-Aufbereitung pro kg Hornschalenkaffee verbraucht werden, ist der Wasserbedarf bei den progressiven Verfahren sehr viel geringer und liegt zum Teil unter einem Liter pro Kilogramm [5]. Leider ist die Qualität des so produzierten Kaffees nicht die gleiche, wie die der hochwertigen, traditionell gewaschenen Arabicas. Aktuelle Forschungsarbeiten (s. u.) zeigen jedoch, dass dieser Mangel durch die Einführung einer Zwischenlagerung behoben werden kann.

Während der Aufbereitung laufen in den Kaffeebohnen Stoffwechselprozesse ab

In der Vergangenheit wurden die Qualitätsunterschiede von nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees stets damit erklärt, dass bei der nassen Aufbereitung ausschließlich reife Kaffeekirschen verarbeitet werden und dass grundsätzlich viel sorgfältiger gearbeitet wird, als bei der trockenen Aufbereitung. Diese Sichtweise etablierte die Lehrmeinung, dass das Maximum der Qualitätsausprägung eines Rohkaffees bereits bei der Ernte in den gesunden und voll entwickelten Kaffeekirschen erreicht sei, und dass alle nachfolgenden Prozesse der Rohkaffeeherstellung lediglich diese initiale Qualität senken könnten; etwaige positive Einflüsse der Aufbereitung wurden *per se* ausgeschlossen. Es wurde also überhaupt nicht in Betracht gezogen, dass die Nacherntebehandlung des Kaffees dessen Aromapotenzial auch steigern könnte.

Diese inzwischen überholte Vorstellung ließ völlig unberücksichtigt, dass Kaffeebohnen lebendige Organismen sind, in denen – auch während der gesamten Nacherntebehandlung – Stoffwechselprozesse ablaufen, die die stoffliche Zusammensetzung der Samen und damit letztlich auch das Aromapotenzial nachhaltig ändern können [1, 4].

Wenn diese Überlegung richtig ist, so müsste sich dies durch einen relativ einfachen Versuch, bei dem identisches Ausgangsmaterial parallel nass und trocken aufbereitet wird, belegen lassen. Dazu wurden frisch geerntete Kaffeekirschen aufwändig per Hand sortiert und dann ausschließlich die roten, reifen Kirschen in Parallelansätzen nass und trocken aufbereitet. Die sensorischen Analysen der so erstellten Kaffees ergaben, dass sich tatsächlich die charakteristischen Unterschiede von gewaschenen und trocken aufbereiteten Arabicas zeigten. Mit diesem einfachen Versuch wurde die tradierte Lehrmeinung widerlegt und die Bedeutung der Nacherntebehandlung für die Qualitätsausprägung der Rohkaffees demonstriert.

Stoffliche Unterschiede der nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees

Letztendlich müssen die beobachteten sensorischen Unterschiede auf die stoffliche Zusammensetzung der verschiedenen aufbereiteten Rohkaffees zurückzuführen sein. Zwar gab es bereits unzählige Studien zu möglichen Unterschieden im Vorkommen von verschiedenen Substanzen in nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees, doch wurde nie tatsächlich identisches Ausgangsmaterial für die verschiedenen Aufbereitungen verwendet, und es gab lange Zeit keine verlässlichen Aussagen zu Unterschieden in der stofflichen Zusammensetzung von nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees.

Es gibt viele Möglichkeiten, grundsätzliche Unterschiede in der stofflichen Zusammensetzung eines Sa-



mens zu dokumentieren. Im Fall von Rohkaffee bietet es sich an, die Zusammensetzung an freien Aminosäuren und löslichen Kohlenhydraten als Marker zu verwenden, da diese Substanzen nicht nur im Stoffwechsel des Samens eine zentrale Rolle spielen, sondern auch essenzielle Vorstufen für wichtige Aromastoffe des Kaffeegetränkes darstellen, die während des Röstens im Zuge von ► *Maillard-Reaktionen* gebildet werden.

Die Analyse der freien, proteino-genen Aminosäuren hat gezeigt, dass deren Gesamtgehalt stets in den nass aufbereiteten Rohkaffees höher ist als in den trocken aufbereiteten (siehe Tabelle rechts oben). Allerdings zeigte sich bei diesen Untersuchungen auch, dass der Gehalt freier Aminosäuren sehr stark schwankt. Bei den von uns analysierten Proben lagen die geringsten Gehalte unter 2.800 mg/kg Freier Aminosäurem (FG), die höchsten Werte über 7.000 mg/kg FG [2]. Diese großen Unterschiede sind sicherlich zum Teil darauf zurückzuführen, dass Früchte ganz unterschiedlicher Herkunft und Provenienz untersucht wurden. Doch selbst wenn Früchte ein und derselben Plantage verwendet wurden, bei denen sich lediglich deren Erntezeitpunkte um zwei Wochen unterscheiden (Tabelle, Brasilien 1A, 1B), zeigten sich beträchtliche Unterschiede, die zum Teil sogar größer sind, als die Unterschiede zwischen den entsprechenden nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees. Diese große Variabilität demonstriert noch einmal sehr nachdrücklich, dass bei derartigen Untersuchungen nur dann solide Ergebnisse erhalten werden können, wenn für die Parallelansätze der nass und trocken aufbereiteten Rohkaffees tatsächlich völlig identisches Ausgangsmaterial verwendet wird [2].

Saccharose stellt mit 5 % - 8 % TG den größten Anteil löslicher Zucker der Kaffeesamen, allerdings unterliegen auch die Saccharose-Gehalte starken individuellen Schwankungen, so dass aufbereitungsbedingte Unterschiede kaum erfassbar sind. Im Gegensatz dazu werden die Gehalte von Glucose und Fructose sehr stark durch die Art der Nachernte-Behandlung beeinflusst (Abbildung 6). In frischen und trocken aufbereiteten Rohkaffees finden sich etwa fünf- bis zehnfach höhere Konzentrationen dieser beiden Hexosen als in den nass aufbereiteten [3]; auch bei anderen Kohlenhydraten wie beispielsweise bei Galactose oder bei Arabinose zeigten sich entsprechende Konzentrationsunterschiede.

Da die untersuchten Rohkaffees lebendige Organismen sind, müssen die beobachteten stofflichen Unterschiede letztendlich auf Unterschiede in deren Stoffwechsel zurückzuführen sein. Es stellt sich zwangsläufig die Frage, welche Stoffwechselprozesse während der Aufbereitung in den Kaffeesamen ablaufen und wie diese Prozesse von der Aufbereitungsmethode abhängen, beziehungsweise beeinflusst werden.

TAB. GEHALTE AN FREIEN PROTEINOGENEN AMINOSÄUREN

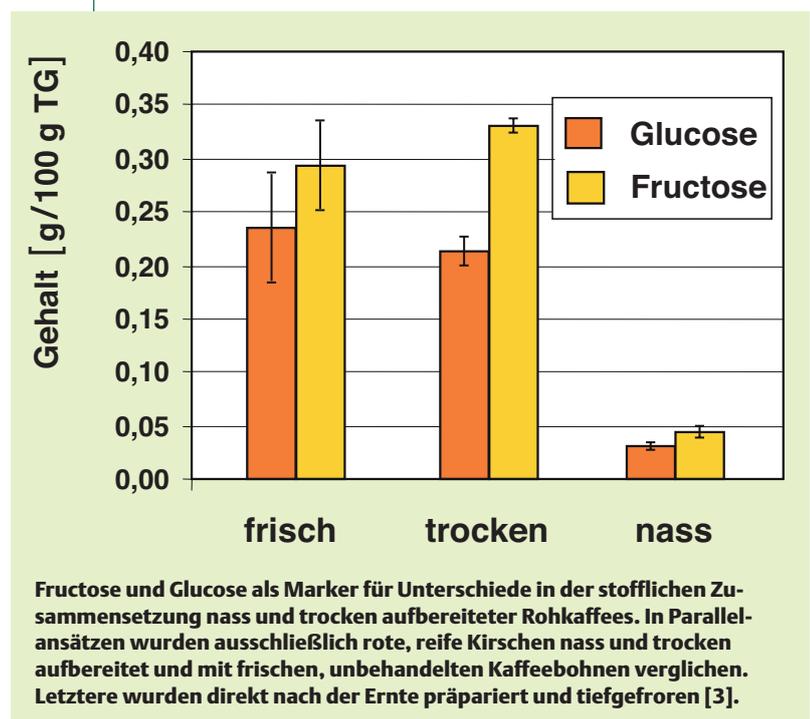
Charge	Gehalt an freien Aminosäuren [mg/kg FG]		
	trocken aufbereitet	nass aufbereitet	Unterschied %
Plantage, Brasilien, 1 A	3.570	4.310	20.9
Plantage, Brasilien, 1 B	4.030	4.360	8.2
Plantage, Brasilien, 2	7.050	7.320	3.8
Plantage, Kolumbien	2.760	2.850	3.3
Labor, Früchte aus Brasilien	5.050	5.400	6.9
Labor, Früchte aus Peru	3.710	3.940	6.2
Labor, Früchte aus Kenia	3.250	3.570	9.8

Sowohl für die experimentellen Aufbereitungen im Labor wie auch für die Modellaufbereitungen auf der Plantage wurden ausschließlich rote, reife Kirschen in Parallelansätzen nass und trocken aufbereitet. Die Aminosäuren wurden mittels hochauflösender Flüssigkeitschromatographie (HPLC) quantifiziert [2].

Keimungsprozesse und die Qualitätsausprägung von Rohkaffee

Aus pflanzenphysiologischer Sicht ist es nahe liegend, dass in ► rekalzitranen Samen, die einen aktiven Stoffwechsel aufweisen, Keimungsprozesse ablaufen. Geht man davon aus, dass die Keimung zunächst durch aktive Prinzipien im Fruchtfleisch unterdrückt wird, kann man schlussfolgern, dass eine Entfernung der Pulpa - wie sie bei der nassen Aufbereitung durchgeführt wird - zur Aufhebung dieser Inhibierung führen muss. Im Gegensatz dazu sollten diese Keimungsprozesse in trocken aufbereiteten Rohkaffees - bei denen das Fruchtfleisch und damit die aktiven Prinzipien der Keimungsunterdrückung während der Trocknung um den Samen verbleiben - nicht ablaufen.

ABB. 6 | FRUCTOSE UND GLUCOSE ALS MARKER



GLOSSAR

γ -Aminobuttersäure (GABA): Im Tierreich repräsentiert diese nicht-proteino gene Aminosäure einen wichtigen Neurotransmitter, in Pflanzen ist sie ein weit verbreiteter Stressmetabolit, der durch einfache Decarboxylierung von Glutamat gebildet wird. Die entsprechende Glutamat-Decarboxylase wird bei einer stressinduzierten Ausschüttung von Ca^{2+} -Ionen über das Calmodulin-System aktiviert.

Isocitratlyase: Dieses Enzym ist das Schlüsselenzym des Glyoxylat-Zyklus, über den die in Samen gespeicherten Fette in Zucker umgewandelt werden. Die aus der β -Oxidation von Fettsäuren stammenden Acetyl-CoA-Einheiten werden in Succinat eingebaut, zu Oxalacetat oxidiert und via Gluconeogenese in Hexosen umgewandelt.

Maillard-Reaktionen: Diese komplexen, nicht-enzymatischen Bräunungsreaktionen laufen u. a. beim Rösten pflanzlicher Produkte und auch beim Braten von Fleisch ab. Die komplexen Maillard-Produkte sind für die jeweils typischen sensorischen Eigenschaften der gerösteten Produkte verantwortlich. Bei den mehrstufigen Reaktionen reagieren zunächst freie Aminosäuren mit reduzierenden Zuckern; die dabei entstehenden N-Glycoside werden u. a. weiter über Amadori-Umlagerungen umgesetzt. Danach folgen ein so genannter Strecker-Abbau und die Bildung von Melanoidinen.

Northern-Blot-Technik: Bei dieser Methode zur Expressions-Analyse werden die isolierten RNAs gelelektrophoretisch aufgetrennt, auf eine Membran übertragen (Blotten) und fixiert. Spezifische RNAs bzw. RNA-Sequenzen können durch die Hybridisierung mit Hilfe komplementärer Sonden erkannt und quantifiziert werden.

rekalzitran: In Regionen mit ausgeprägten Jahreszeiten gehen die Samen nach einer so genannten Reifetrocknung in die Samenruhe über und können

so relativ lange überdauern. Bevor derartige „orthodoxe Samen“ durch Quellung erneut Wasser aufnehmen und keimen können, muss die Samenruhe gebrochen werden. Auf diese Weise wird die Keimung unter ungünstigen Bedingungen, z.B. im Herbst, unterbunden. Da eine derartige Verzögerung in den Tropen nicht erforderlich ist, fehlt dieses Merkmal bei vielen tropischen Samen – sie werden als „rekalzitran“ bezeichnet. Sie sind bereits in der reifen Frucht voll keimfähig, allerdings ist die Lagerungsfähigkeit stark begrenzt.

RT-PCR: Bei dieser Technik handelt es sich um eine Kombination aus zwei molekularbiologischen Methoden zur Analyse der Genexpression. Zunächst wird die relevante RNA mit Hilfe der reversen Transkriptase in cDNA umgeschrieben, die dann im Zuge einer klassischen Polymerase-Ketten-Reaktion (PCR) stark vervielfacht (amplifiziert) wird. Der Einsatz spezifischer Primer sowohl für die RT-Reaktion als auch für die PCR gewährleistet die notwendige Selektivität. Für eine verlässliche Quantifizierung wird ein interner Standard zugesetzt, der mit der zu analysierenden RNA konkurriert (kompetitive RT-PCR).

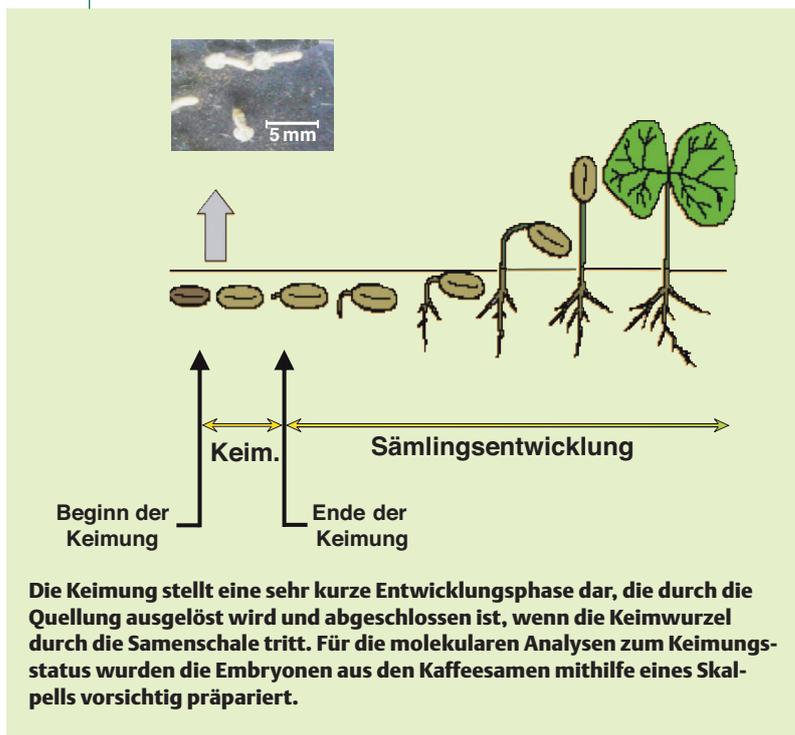
β -Tubulin: Eine wesentliche Voraussetzung für Zellteilungen ist die Teilung der Zellkerne. Hierfür werden Mikrotubuli ausgebildet. Mikrotubuli entstehen durch geordnete Aggregation der Spindelfaserproteine α - und β -Tubulin zu einem Hohlzylinder helikaler Struktur.

Western-Blot-Technik: Beim Western-Blot werden die Proteine nach elektrophoretischer Auftrennung auf eine Trägermembran übertragen (Blotten) und anschließend analysiert, meist werden die Proteine mit spezifischen Antikörpern detektiert.

Die Keimung stellt eine sehr kurze Entwicklungsphase des Samens dar, die – zumindest bei orthodoxen Samen – durch die Quellung ausgelöst wird, und bereits

abgeschlossen ist, wenn die Keimwurzel durch die Samenschale tritt (Abbildung 7). Die nun folgende Entwicklung, die sehr häufig missverständlich auch noch als Teil der Keimung angesehen wird, repräsentiert bereits die Sämlingsentwicklung.

ABB. 7 | SAMENKEIMUNG UND SÄMLINGSENTWICKLUNG

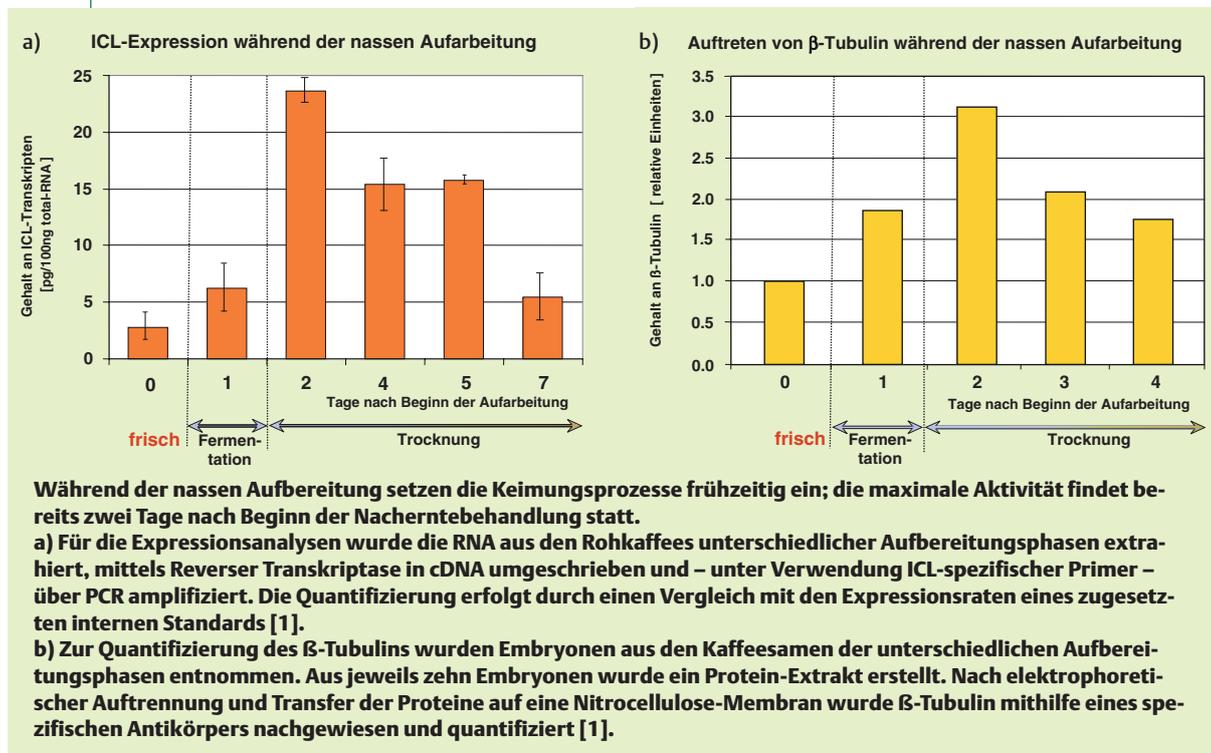


Ob ein Same keimt, kann nur mithilfe molekularer Marker zuverlässig bestimmt werden. Im Allgemeinen wird das Einsetzen von Keimungsprozessen entweder anhand des Auftretens charakteristischer, keimungsspezifischer Enzyme, beziehungsweise deren Genexpression, oder über die Wiederaufnahme der Zellteilungen bestimmt. Die \blacktriangleright Isocitratlyase (ICL) gilt als verlässlicher Keimungsmarker. Auf der Basis der ICL-Expressionsraten können die Keimungsprozesse sicher erfasst und quantifiziert werden. Entsprechende Expressionsstudien können entweder mittels \blacktriangleright Northern-Blots erfolgen oder mit Hilfe der deutlich empfindlicheren \blacktriangleright RT-PCR-Technik. Eine verlässliche Methode, um die Wiederaufnahme der Zellteilungsaktivität nachzuweisen, basiert auf der Quantifizierung von \blacktriangleright β -Tubulin in Protein-Extrakten aus isolierten Embryonen (Abbildung 7) mittels \blacktriangleright Western-Blot-Technik.

Sowohl die Expressionsanalysen als auch die Untersuchungen der Zellteilungsaktivität belegen, dass die Kaffeesamen im Zuge der nassen Aufarbeitung keimen (Abbildung 8). Bereits während der Fermentation setzt die Keimung ein, das Maximum der Keimungsaktivitäten ist am ersten Tag der Trocknung, also etwa am zweiten Tag der Nacherntebehandlung erreicht [1]. Da-



ABB. 8 | KEIMUNGSPROZESSE IN NASS AUFBEREITETEN ROHKAFFEES

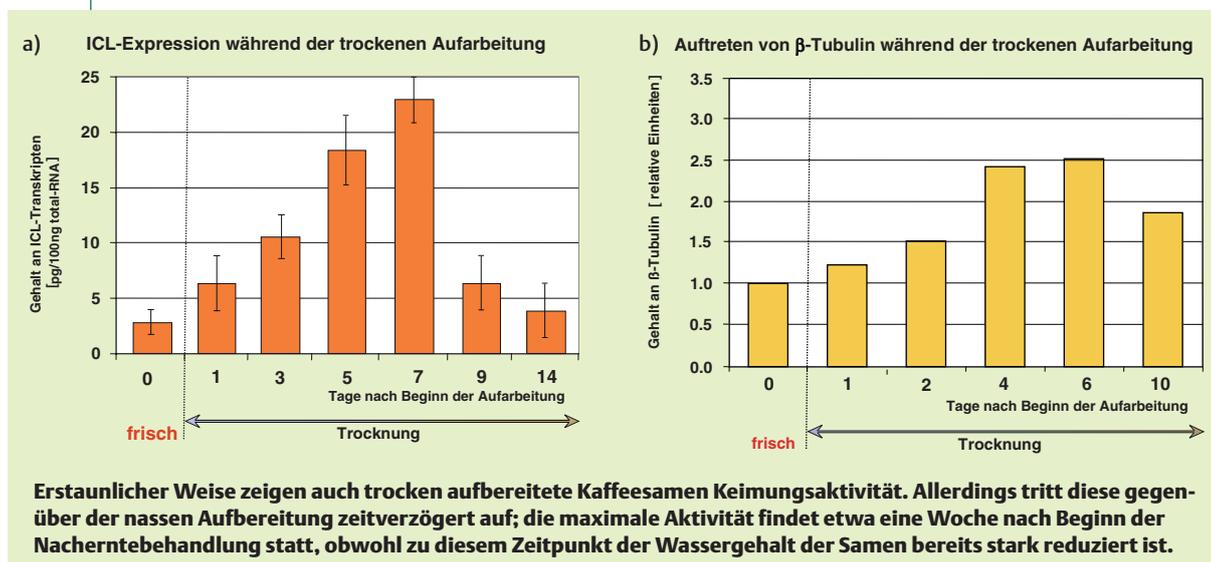


nach nimmt die Intensität kontinuierlich ab; unter anderem sicherlich auch deshalb, weil im fortlaufenden Trocknungsprozess der Wassergehalt der Bohnen so gering wird, dass alle Stoffwechselaktivitäten gebremst werden.

Es war sehr überraschend, dass auch in den trocken aufbereiteten Samen – bei denen ja noch das gesamte Fruchtfleisch mit den potenziellen keimungsunterdrückenden Faktoren um die Samen verbleibt – Kei-

mungsprozesse ablaufen. Offensichtlich werden diese inhibitorischen Prinzipien im Zuge der Trocknung wirkungslos. Im Vergleich zu den nass aufbereiteten Rohkaffees ergibt sich allerdings ein ganz anderes Zeitfenster (Abbildung 9): das Maximum der Keimungsprozesse ist erst etwa eine Woche nach Beginn der Trocknung erreicht. Aufgrund dieser Analysen besteht heute kein Zweifel mehr, dass in den Kaffeesamen während der Rohkaffee-Aufbereitung tatsächlich Kei-

ABB. 9 | KEIMUNGSPROZESSE IN TROCKEN AUFBEREITETEN ROHKAFFEES



mungsprozesse stattfinden, und dass diese maßgeblich die stoffliche Zusammensetzung der Kaffeebohnen und damit deren Qualität beeinflussen.

Stressinduzierte Stoffwechselprozesse

Bei den Substanzeanalysen der Rohkaffees fiel auf, dass vor allem in trocken aufbereiteten Rohkaffees sehr hohe Konzentrationen an γ -Aminobuttersäure (GABA) vorkommen. Diese nicht-proteinogene Aminosäure wird in Pflanzenzellen vor allem bei Trockenstress aus Glutamat gebildet und akkumuliert. Bedenkt man, dass es sich beim Rohkaffee um lebendige Samen mit aktivem Stoffwechsel handelt, so ist es eigentlich keine große Überraschung, dass in diesen Zellen im Zuge der Rohkaffee-Trocknung der Stressmetabolit GABA gebildet wird (Abbildung 10).

Unerwartet war allerdings der Befund, dass sich – im Gegensatz zu den erheblichen Mengen an GABA, die in den trocken aufbereiteten Kaffeebohnen akkumuliert werden – nur sehr geringe Mengen in den nass aufbereiteten Rohkaffees finden, obwohl auch diese Samen auf die gleiche relative Feuchte von etwa 11 % getrocknet wurden. Der Schlüssel zum Verständnis liegt in den unterschiedlichen Zeitfenstern für die entsprechenden Stoffwechselaktivitäten: Während die Trocknung der ganzen Früchte je nach Witterungsbedingungen etwa zehn bis 20 Tage dauert, ist dieser Prozess beim Hornschalenkaffee (*nasse Aufbereitung*) bereits nach zwei bis fünf Tagen abgeschlossen. Nach

der Induktion der Stressreaktionen kann also bei der trockenen Aufbereitung deutlich länger (eine bis zwei Wochen) als bei den trocknenden *nass aufbereiteten* Bohnen (einen bis zwei Tage) in den Samen GABA gebildet und akkumuliert werden, bevor der Wassergehalt so niedrig ist, dass alle Stoffwechselreaktionen zum Erliegen kommen.

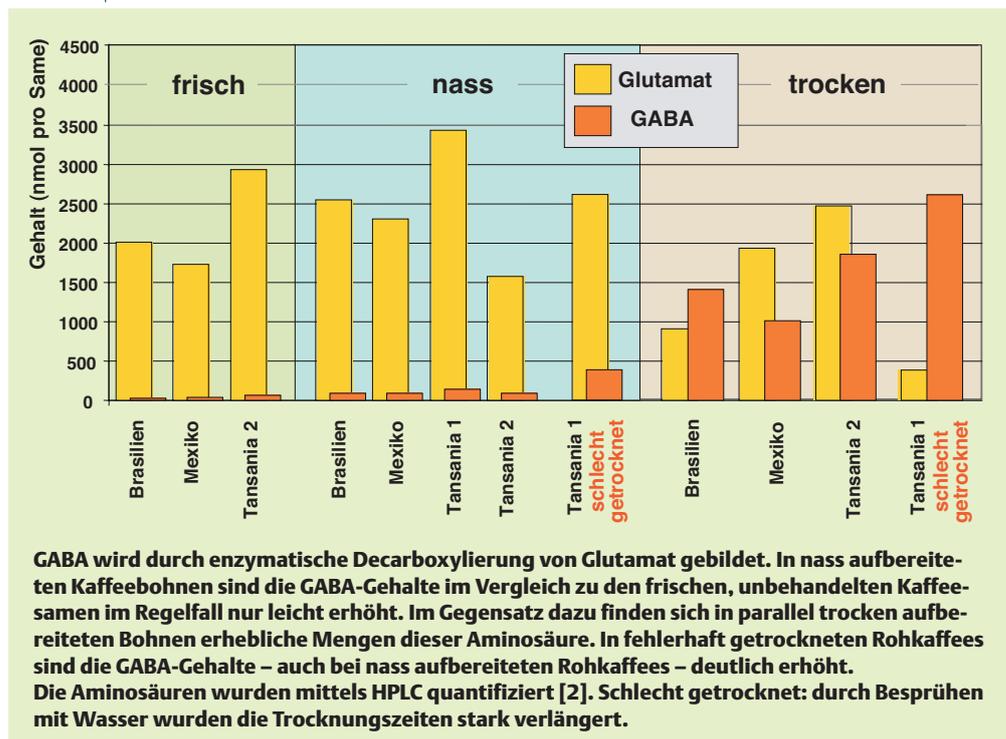
Vergrößert man das Zeitfenster für die Stress-Reaktionen durch eine künstliche Verlängerung der Trocknungszeiten, so finden sich sowohl in den nass aufbereiteten als auch in den trocken aufbereiteten Rohkaffees signifikant höhere GABA-Gehalte als in den normal getrockneten Vergleichsproben (Abbildung 10). Dieser Anstieg der Stressmetabolite ist begleitet von einer Abnahme der Glutamat-Konzentration.

Diese Ergebnisse belegen, dass in den trocknenden Rohkaffees – zusätzlich zu den bereits dargestellten Keimungsprozessen – auch stressinduzierte Stoffwechselreaktionen ablaufen, und zeigen, dass auch dieser Metabolismus nachhaltig von den Nachernte-Behandlungen beeinflusst wird.

Von der Grundlagenforschung zur Anwendung

Die dargelegten Erkenntnisse zum Metabolismus der Kaffeesamen haben zu einem Paradigmenwechsel in der Kaffeeforschung geführt. Rohkaffee, der lange Zeit schlichtweg als „totes Handelsgut“ angesehen wurde, wird nun als lebendiger Rohstoff verstanden, dessen Stoffwechselkapazitäten genutzt werden können, um modulierend in die Qualitätsausprägung eingreifen zu können.

ABB. 10 | DIE AKKUMULATION VON GABA IN UNTERSCHIEDLICH AUFBEREITETEN ROHKAFFEES



In diesem Zusammenhang sei auf eine aktuelle Anwendung hingewiesen, deren Umsetzung letztendlich auf die Erkenntnisse zum Keimungsstoffwechsel der Kaffeesamen zurückzuführen ist: Wie bereits dargelegt, erreichen die Rohkaffees, die über neue, progressive Aufbereitungsmethoden mit mechanischer Entschleimung produziert werden nicht die Qualität der gewaschenen Arabicas. Da das Zeitfenster für die Keimungsprozesse bei progressiv aufbereiteten Rohkaffees deutlich verkürzt ist, war es nahe liegend, diese „eingesparte“ Zeit durch eine feuchte Zwischenlagerung (zwölf bis 24 Stunden) zu kompensieren. Die sensorischen Analysen der entsprechenden Rohkaffees haben bestätigt, dass eine derartige Zwischenlagerung tatsächlich die Tassenqualität der mechanisch entschleimten Rohkaffees



INTERNET-ADRESSEN:

- Deutscher Kaffeeverband (DKV):
<http://www.kaffeeverband.de/>
- Kaffeebibliothek des DKV:
<http://www.kaffeeverband.de/531.htm>
- Bücher und weiterführende Literatur:
<http://www.kaffeeverband.de/284.htm>
- Internationale wissenschaftliche Vereinigung zur Kaffeeforschung (ASIC):
<http://www.asic-cafe.org/index.php>
- Wissenschaftliche Beiträge der ASIC-Kongresse:
<http://www.asic-cafe.org/htm/eng/proceedings.htm>
- Kaffee und Gesundheit:
<http://coffeescience.org/alert>

deutlich erhöht, und so fast die gleiche Qualitätsausprägung wie bei traditionell gewaschenen Arabicas erreicht wird. Inzwischen werden in vielen Regionen die mechanisch entschleimten Kaffeebohnen standardmäßig einen Tag zwischengelagert.

Dieses aktuelle Beispiel demonstriert anschaulich, wie grundlagenwissenschaftliche Erkenntnisse über die Biologie des Kaffeesaamens zur Optimierung von Nachernteprozessen genutzt werden können. Es steht außer Frage, dass vergleichbare Zusammenhänge von Stoffwechselprozessen und der Qualitätsausprägung auch bei der Nachernte-Behandlung anderer pflanzlicher Produkte eine entscheidende Rolle spielen. Leider gibt es zurzeit kaum entsprechende Forschungsansätze, um diese spannenden angewandten Problemfelder mit modernen pflanzenbiologischen Methoden zu bearbeiten.

Zusammenfassung

Traditionell gibt es zwei unterschiedliche Verfahren der Nacherntebehandlung des Arabica-Kaffees: die „trockene“ und die „nasse“ Aufbereitung, die zu einem unterschiedlichen Geschmack und unterschiedlicher Qualität führen. Analysen der Expression keimungsspezifischer Enzyme sowie der Zellteilungsaktivität haben gezeigt, dass in Kaffeesaamen während dieser Aufbereitung Keimungsprozesse stattfinden, deren Ausprägung von der Art der Nacherntebehandlung abhängig ist. Darüber hinaus finden in den trocknenden Kaffeebohnen stressinduzierte Prozesse statt, wie beispielsweise die Akkumulation von γ -Aminobuttersäure. Diese Erkenntnisse, die erstmalig belegt haben, dass die bekannten Qualitätsunterschiede der Rohkaffees auch auf Unterschiede im Metabolismus der Kaffeesaamen zurückzuführen sind, haben zu einem Paradigmenwechsel geführt: Rohkaffee wird nicht mehr als „totes Handelsgut“ angesehen, sondern als ein lebendiger Rohstoff verstanden, dessen Stoffwechselkapazität genutzt werden kann, um modulierend in die Qualitätsausprägung einzugreifen.

Literatur

- [1] G. Bytof, S. E. Knopp, D. Kramer, B. Breitenstein, J. H. W. Bergervoet, S. P. C. Groot, D. Selmar, Transient Occurrence of Seed Germination Processes during Coffee Post Harvest Treatment, *Annals of Botany* 2007, 100, 61 – 66.
- [2] G. Bytof, S. E. Knopp, P. Schieberle, I. Teutsch, D. Selmar, Influence of processing on the generation of γ -aminobutyric acid in green coffee beans, *Eur. Food Res. Techn.* 2005, 220, 245 – 250.
- [3] S. E. Knopp, G. Bytof, D. Selmar, 2006: Influence of processing on the content of sugars in green Arabica coffee beans, *Eur. Food Res. Techn.* 2006, 223, 195-201.
- [4] H. Lange, J. B. Rothfos (Hrsg.), *Kaffee – Die Zukunft*, 2005, Behr's Verlag.
- [5] J. N. Wintgens (Hrsg.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production. (A Guidebook for Growers, Processors, Traders and Researchers by various authors)*, 2004: Wiley-VCH, Weinheim.

Die Autoren



Dirk Selmar, geb. 1955 in Salzgitter, hat sich zunächst mit dem pflanzlichen Sekundärstoffwechsel beschäftigt. In seiner Promotion, einem anschließendem PostDoc-Aufenthalt im Labor von Eric Conn (UC Davis) und in seiner Habilitation hat er am Beispiel des Stoffwechsels cyanogener Glucoside exemplarisch die biochemischen und pflanzenphysiologischen Grundlagen von Akkumulation, Kompartimentierung und Transport pflanzlicher Naturstoffe untersucht. Ein weiterer Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeiten umfasst aktuelle, angewandte Aspekte der modernen Pflanzenbiologie. In diesem Zusammenhang bearbeitet er die Grundlagen der Qualitätsausprägung von Kaffee und anderen tropischen Lebens- und Genussmitteln. Seit 1996 ist er als außerplanmäßiger Professor am Institut für Pflanzenbiologie der TU Braunschweig tätig.



Gerhard Bytof, geb. 1965 in Bevensen, hat sich nach seinem Biologie-Studium an der TU Braunschweig schwerpunktmäßig mit der Angewandten Pflanzenbiologie von tropischen und subtropischen Pflanzen (Kakao, Tee und vor allem Kaffee) befasst. Sein umfangreiches Fachwissen über Kaffee basiert auf zahlreichen Forschungsaufenthalten in Afrika sowie in Mittel- und Südamerika. Seit 2007 ist er als „Referent Scientific Affairs“ für die Tchibo GmbH in Hamburg tätig.

Korrespondenz:

Prof. Dr. Dirk Selmar
Institut für Pflanzenbiologie
Humboldtstraße 1
38106 Braunschweig
Email: d.selmar@tu-bs.de