

Popcorn, Popkorn ... a-maizing

Peter Bützer

Einstieg in das Thema

Popcorn ist heute weit verbreitet. Noch vor 40 Jahren konnte man diesen Snack nur an Jahrmärkten kaufen, heute in jedem Kino und zur Selbstzubereitung bei jedem Grossverteiler. Wer nun aber glaubt, dass auch etwas Wissen über diesen weissen „Schaum“ vorhanden ist, täuscht sich. Michelle Scherer hat mit einer Befragung von 100 Jugendlichen im Alter von 13 bis 16 Jahren Überraschendes zu Tage gefördert¹. Es ist bei gut der Hälfte bekannt, dass es sich um ein pflanzliches, natürliches Material handelt. Zweidrittel der Mädchen meinen, dass für das Platzen eine chemische Reaktion, die Hälfte der Knaben denken, dass der Wasserdampf verantwortlich ist. Zur Herkunft von Popcorn, geschichtlich und landwirtschaftlich wurde nur geraten. Da mögliche Antworten vorgegeben waren, muss man davon ausgehen, dass Hintergründe zu Popkorn ziemlich unbekannt sind und das Poppen des Maiskorns wenig verstanden wird. Mit dieser Arbeit ist die Möglichkeit geboten einige Wissenslücken zu stopfen und einen vertieften Einblick in Popcorn zu gewinnen.

Ein Dutzend Fragen

Inhalt

1	Was ist Popcorn?	3
1.1	Einige Angaben zur Kulturpflanze Mais.....	3
1.2	Eigenschaften vom Maiskorn	5
1.3	Popcornsorten	6
1.4	Wie lange kennt man schon Popcorn?.....	8
2	Warum poppt Popcorn?.....	9
2.1	Was ist das Weisse von Popcorn?	10
3	Welche Struktur hat Popcorn?.....	11
4	Wie ist die zeitliche Verteilung der Pops?.....	13
5	Wie gross wird der Druck im Korn?	17
5.1	Bestimmung des freigesetzten Wassers	17
5.2	Abschätzung des Innendrucks beim Pop	18
6	Dichte von Popcorn	18
7	Wie viel Energie wird pro Pop freigesetzt?	19
8	Wie rasch poppt das Popcorn?	19
8.1	Druckmessungen	19
8.2	Schnelle Schalldruck-Messungen	22
8.3	Die Leistung eines Pops?.....	24
8.4	Die Individualität der Körner	24
9	Warum funktioniert es nicht auf einer heissen Platte?.....	26
10	Warum schmeckt Popcorn süss, wenn man es im Mund behält?.....	26
11	Besondere Substanzen in Popcorn.....	28
11.1	Zink	28
11.2	Bildung von Acrylamid.....	29
11.3	Geruch von Popcorn	30
12	Ein künstlicher Pop (Artificial Pop = Pop Art?)	31
13	Weiterführende Literatur (z.T. übernommen).....	32
14	Literatur.....	32

Prof. Dr. Peter Bützer
 Pädagogische Hochschule St.Gallen
 Chemie
 2005-04-23

1 Was ist Popcorn?

Popcorn ist „Puffmais“, eine Variante von Hartmais mit kleinen, besonders harten Körnern. Beim Erhitzen platzen die Körner auf, eine weisse Masse tritt aus; so lässt sich das bekannte „Popcorn“ herstellen.

Nicht jeder Mais kann poppen – nur der Puff-Mais, Knall-Mais, Flocken-Mais, Perl-Mais, Reis-Mais (*Zea mays* convar. *microsperma*).



Abbildung 1: Mais ist ein einjähriges Gras!!

1.1 Einige Angaben zur Kulturpflanze Mais

Tabelle 1: Wachstumsverlauf von Mais

Wachstumsverlauf ²	Zeitraum
Bestellung	Anfangs Mai
Beginn des Auflaufens	Mitte Mai
Beginn des Längenwachstums	Ende. Mai
Beginn der Blüte	Anfangs Juli
Beginn der Milchreife	Ende Juli
Beginn der Teigreife	Mitte August
Beginn der Gelbreife	Anfangs September
Ernte	10. Oktober

Mais ist eine Pflanze des warmen Klimas, Er kann in unseren Breitengraden nur im Frühling (Mai) - und nicht wie andere Getreidearten im Herbst - angesät werden, weil die Maispflanzen kälteempfindlich sind. Das Pflanzenwachstum vom Mais ist von der Aussaat bis Anfang Juli sehr langsam³. Das Jugendwachstum sollte daher mit einer ausreichenden Nährstoffversorgung im zu diesem Zeitpunkt tatsächlich durchwurzelten Bereich gefördert werden. Durch anfänglich oberflächliche Wurzelentwicklung ist die Nährstoffausnutzung während der Jugendentwicklung relativ gering. Durch Zufuhr von leichtlöslichen Nährstoffen, in der Praxis häufig als flüssig Reihendüngung mit NP-Düngern, kann der Mais in dieser kritischen Phase unterstützt werden. Später kann die Maispflanze auch auf die Bodennährstoffe aus tieferen Schichten zurückgreifen. Die gesamte Nährstoffverwertung ist sehr gut. Mais ist wegen seiner hohen Nährstoffverträglichkeit die Kultur, zu der bevorzugt hohe, zum Teil oft zu hohe Düngergaben (z.B. Gülle) verabreicht werden. Als C4 -Pflanze (bei Licht nur Photosynthese keine CO₂-Respiration) kann der Mais sehr viel Sonnenenergie nutzen, was vor allem bei höheren Temperaturen zu einer sehr guten Nährstoffverwertung führt⁴. Die Zeit der höchsten Nährstoffaufnahme ist etwa 10 - 15 Tage vor der Blüte bis 25 - 30 Tage nach der Blüte. In dieser Zeit werden circa 70 - 80 % des gesamten Nährstoffbedarfs aufgenommen. Während N und P auch noch bei der Kornreife dem Boden entzogen werden, ist die Kaliumaufnahme bis dahin abgeschlossen. Der Wasserbedarf ist mit 300 Liter pro 1 kg Trockensubstanz relativ niedrig, wegen der hohen Produktionsleistung im Juni/Juli jedoch beträchtlich⁵. Die hohe Produktionsleistung ist auch verantwortlich für den hohen Nährstoffbedarf.

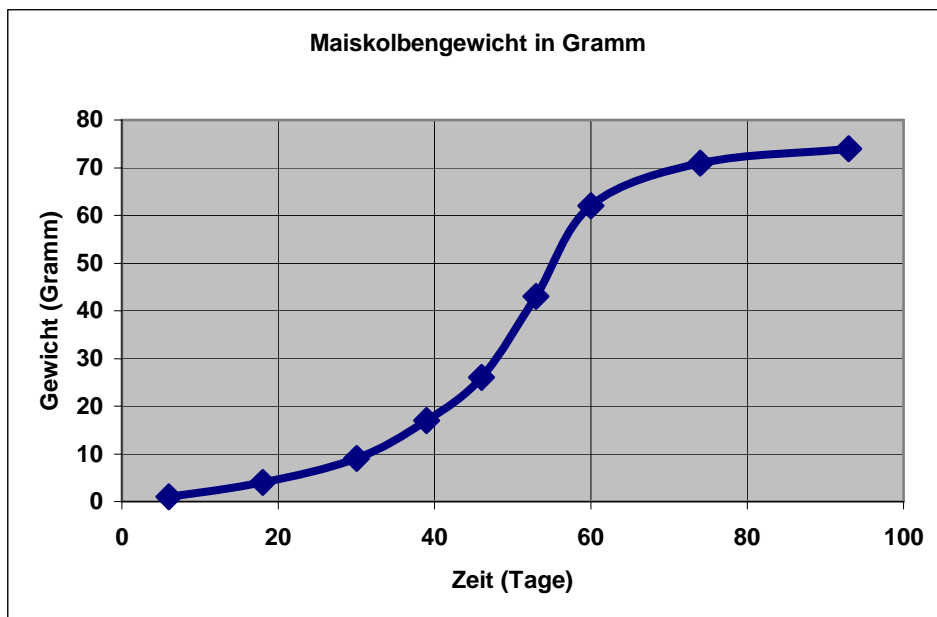
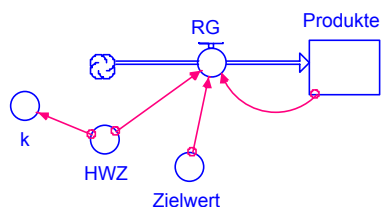


Abbildung 2: Wachstum von Mais⁶

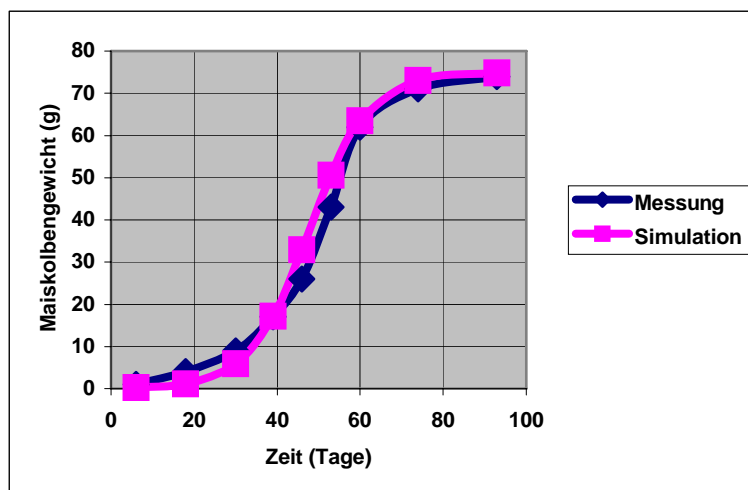
Beim Maiswachstum zeigt sich ein typischer Verlauf von logistischem Wachstum, das sich sehr einfach mit einem Modell simulieren lässt.

Man geht davon aus, dass die Geschwindigkeit einerseits proportional den Produkten zunimmt, aber andererseits umso langsamer wird, je näher der Zielwert erreicht wird. Die exponentielle Zunahme ist durch dessen Halbwertszeit charakterisiert [$k = \ln(2)/HWZ$], also etwa 50 Tage. Der obere Grenzwert, der Zielwert ist rund 75 Gramm.



HWZ: 50 Tage
Zielwert: 57 g

$k \cdot (1 - \text{Produkte} / \text{Zielwert}) \cdot \text{Produkte}$
Initialisierung: Produkte=0.1



Simulationsdiagramm¹

Zeitdiagramm der Simulation mit den Messungen im Vergleich.

Abbildung 3: Messung und Simulation eines logistischen Wachstums im Vergleich

Einige Zahlen zur Düngung⁷:

Faustzahl zur N-Düngung: 140 - 180 kg N/ha (Gesamt N/Vegetationsjahr)

Die Maispflanze entzieht je nach Nutzungsrichtung ca. 90 - 120 kg P₂O₅/ha.

Der Kaliumbedarf von Mais ist hoch, er entzieht dem Boden ca. 170 - 300 kg K₂O/ha.

Die Maispflanze hat einen relativ geringen Magnesiumbedarf, durchschnittlich entzieht Körnermais ca. 30 kg MgO/ha.

¹ Simulation mit dem Computerprogramm STELLA

Spurennährstoffe wie Zink, Eisen und Mangan sind für die Maispflanze von Bedeutung, da sie massgeblich an der Photosynthese und anderen Stoffwechselprozessen der Pflanze beteiligt sind.

Der Maisertrag ist weltweit ca. 600 Mio. Tonnen.

In den USA werden pro Hektar durchschnittlich 8500 kg Mais geerntet, in Mexiko nur 2200. Der Maisertrag in den EU-Ländern beträgt 8300 kg/ha (=83 dt/ha²). Der Rekord, erzielt 1986 in den U.S.A., war 23.4 t/ha⁸.

Tabelle 2: Unkrautkonkurrenz und die folgenden Ertragsrückgänge bei Mais⁹

Verunkrautung (nach Entwicklungsstadien des Maises)	Ertragsrückgang, %	
	Mittel	Extrem
Ständig unkrautfrei	0	0
Verunkrautet bis zum 3-Blatt-Stadium - danach unkrautfrei	0	0
Verunkrautet bis zum 6-Blatt-Stadium - danach unkrautfrei	11	19
Verunkrautet bis zum 8-Blatt-Stadium - danach unkrautfrei	19	33
Unkrautfrei bis zum 3-Blatt-Stadium - danach verunkrautet	13	31
Unkrautfrei bis zum 6-Blatt-Stadium - danach verunkrautet	4	12
Unkrautfrei bis zum 8-Blatt-Stadium - danach verunkrautet	0	3
Ständig verunkrautet	38	67

Der Ertrag geht umso stärker zurück, je später die Unkrautbekämpfung erfolgt!

Gen-Tech Mais. Bt-Mais¹⁰, GMO-Mais¹¹?? → eine Diskussion

1.2 Eigenschaften vom Maiskorn

Ein Maiskorn besteht aus 3 Teilen: Der harten Hülle, dem Pericarp (Fruchtwand), dem Keim und dem durchsichtigen Endosperm mit der Stärke.

Der Mais liefert vor allem viel Kohlenhydrate und nennenswerte Mengen an Vitamin B₁. Er hat aufgrund seiner Lysin- und Tryptophan-Armut von allen Getreidearten die geringste biologische Wertigkeit bezüglich dieser Aminosäuren.

Tabelle 3: Einige Inhaltsstoffe des ganzen Korn¹² (in 100 g essbarem Anteil)

Hauptbestandteile	Vitamine	Mineralstoffe
Wasser: 12,5 g*	Carotin**: 370 µg	Natrium: 6 mg
Protein: 8,5 g	Vitamin E: 1950 µg	Kalium: 330 mg
Fett: 3,8 g	Vitamin B ₁ : 360 µg	Magnesium: 120 mg
Kohlenhydrate: 64,7 g	Vitamin B ₂ : 200 µg	Calcium: 15 mg
Ballaststoffe: 9,2 g	Vitamin B ₆ : 400 µg	Eisen: 500–2400 µg
Mineralien: 1,3 g	Niacin: 1,5 mg	Mangan: 480 µg

* Bei der Ernte ca. 18-19 g Wasser

**Carotin = Summe aller Provitamin A-Carotinoide

Der Kohlenstoff und das Wasser werden mit der Fotosynthese aus erneuerbaren Reaourcen aufgebaut, Stickstoff und Mineralstoffe werden dem Boden entzogen.

² dt = Dezitonne, 1 dt = 100 kg

Popcorn ist sehr kaliumreich und enthält neben Ballaststoffen die Vitamine B₁ und B₂. Es ist vollkommen frei von Klebereiweissen (Gluten) → wichtig für gewisse Allergiker. Der Kohlehydratanteil in Form von Stärke liegt bei rund 70 Prozent. Als Nahrung aufgenommen gelangt die Stärke nur relativ langsam in den Blutkreislauf und sichert eine kontinuierliche Versorgung. 100 Gramm Popcorn (naturell) enthalten nur ca. 1389 kJ (= 327 kcal).

Wichtig: Soll Popcorn poppen, dann benötigt es 11 – 14 % Wasser!! Das ist notwendig, weil das Wasser mit der Stärke ein Gel bilden kann. Stärke kann etwa das eigene Gewicht an Wasser binden. Wenn die Körner während 24 Stunden bei 100 °C getrocknet werden, explodieren sie nicht mehr. Richtig gelagert hält Popcorn 3 – 4 Jahre¹³.

Tabelle 4: Grösseklassen¹⁴

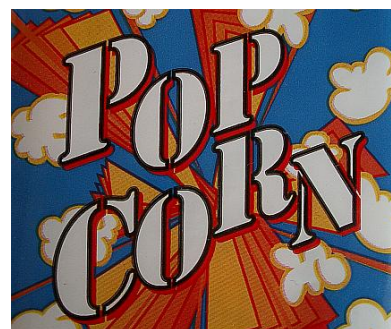
Anzahl Kerne pro 10 Gramm	Klasseneinteilung
52-67	gross
68-75	mittel
76-105	klein

Der für die hier beschriebenen Experimente verwendete Mais hatte 58±2 Körner³ auf 10 Gramm, was der Klasseneinteilung gross entspricht.

1.3 Popcornsorten

Tabelle 5: Zusammensetzung (Herstellerangaben), 100 g Popcorn enthalten

	Normales Popcorn*	Mikrowellen Popcorn**
Energiewert	1390 kJ	2073 kJ
Eiweiss	11 g	8 g
Kohlenhydrate	62 g	67 g
davon Zucker	0.9 g	
Fett	4 g	22 g
davon gesättigte Fettsäure	0.5 g	
Ballaststoffe	11 g	
Natrium	0.05 g	
Zusatzstoffe (Antioxidans)		E306****, E304***



* Pop Corn, Waver Popcorn Co., Box 395, Van Buren, Indiana, U.S.A. (Migros)

** Pop Corn, Liven S.A., Spain, (Migros)

*** Ascorbylpalmitat → Vitamin C-Ester der Palmitinsäure

**** Tocopherol → Vitamin E

Der Zusatz von Butter/Fett/Öl und Salz vergrössert das Volumen des Popcorns nach dem Platzen. Dabei benötigt Mikrowellenpopcorn mehr Fettsäuren. Konventionell wird optimal ein Volumen von 37.3 ml/g, mit Mikrowellen von 33.1 ml/g erreicht – also 12% weniger¹⁵.

Folgerung: Das Mikrowellenpopcorn ist viel energiereicher (ca. 50%), da es noch Fett enthält.

³ 4 Messungen

Im Folgenden wurde für die Versuche auch in der Mikrowelle nur normales Popcorn verwendet.

Die Kohlehydrate sind vor allem Stärke, die sich im Innern des Korns befindet und von einer harten Schale eingeschlossen ist.

Normale natürliche Stärke besteht aus einer Mischung von ca. 15-30% Amylose und 70-85% Amylopectin. Amylose ist strukturell ein lineares Polymer von Anhydroglucose-Einheiten, mit einer Molmasse ungefähr zwischen 40'000 und 340'000 g/mol, also Ketten mit 250 bis 2000 Anhydroglucose-Einheiten. Amylopectin ist aus verzweigten und quervernetzten Amylose-Einheiten sogenannten Anhydroglucose-Einheiten aufgebaut, die Verzweigungen enthalten – die Molmasse kann bis 80'000'000 g/mol sein!

Stärkenachweis mit einer Iodlösung (I_2/KI in Wasser)



I_2 wird in der als Spirale vorliegenden Amylose eingeschlossen und dabei blau.

Direkter Nachweis mit der dunkelblauen Farbe auf einem Popcorn



Popcorn gekocht in heissem Wasser. In der Lösung (links) kann Stärke nachgewiesen werden.

Abbildung 4: Nachweis von Stärke mit Iod bei Popcorn

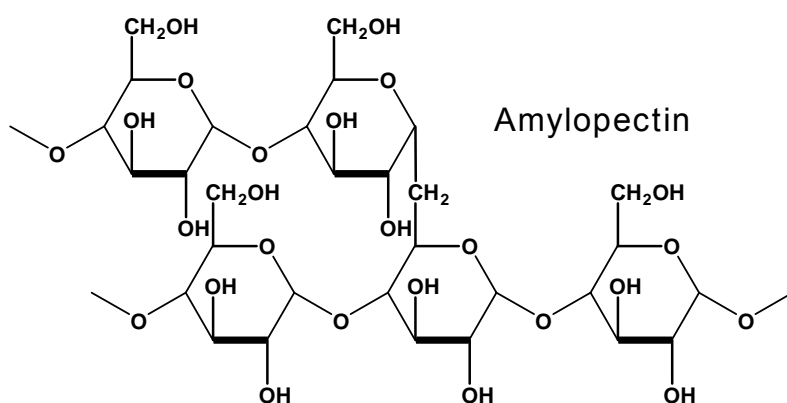
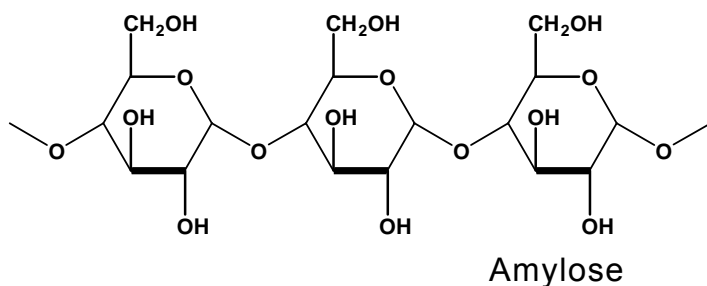


Abbildung 5: Die beiden Grundsubstanzen der Stärke

Tabelle 6: Stärkeeigenschaften einiger Pflanzen

Stärke	Amylose-Gehalt [%]	Wasser-Gehalt [%]	Verkleisterungs-Temp. [°C]
Kartoffelstärke	17–22	17–18	58–60
Maisstärke	0–42	10–15	63–70
Reisstärke	12	12	72
Weizenstärke	16–18	12	50

Ein einfacher Hinweis auf den Baustoff Kohlehydrat liefert das Experiment mit konzentrierter Schwefelsäure, bei welchem Kohlenstoff gebildet wird.

Popcorn wird mit konzentrierter Schwefelsäure (97%) übergossen. Schwefelsäure dient nur dazu, der Stärke das Wasser zu entziehen.

Reaktion von links nach rechts.



Reaktion

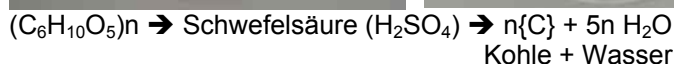


Abbildung 6: Reaktion des Kohlehydrats Stärke mit konzentrierter Schwefelsäure

1.4 Wie lange kennt man schon Popcorn?

Pop heisst nach dem Herkunftswörterbuch modern, auffallend, attraktiv, besonders für Jugendliche¹⁶. Wir meinen hier das englische Wort für Puff oder Knall – beides ist doch recht modern. Ist Popcorn also als modernes Snack Food entwickelt worden?¹⁷

Fossiler Mais-Pollen, 80'000 Jahre alt, wurde in Ausgrabungen Mexiko City gefunden – das Maiskorn ist dem heutigen sehr ähnlich. Maiskörner von Popcorn mit einem Alter von 4000 Jahren wurden in Bat Cave (New Mexico) gefunden – sie konnten noch poppen! Präcolumbanisches Popcorn- Geschirr wurde 1500 Jahre zurückdatiert. Paul Mangelsdorf, der Harvard Popcorn-Forscher meinte: "All races of wild corn were popcorns, their kernels small and flinty in texture, almost impossible to chew, and difficult to grind. Their real usefulness was discovered when kernels accidentally exposed to the heat of glowing coals exploded to become tender, tasty morsels with the nutritional value of whole grain bread."

Kolumbus fand die Eingeborenen in Westindien nicht nur Popcorn essend, sondern sie trugen ihn auch als Schmuck. In die Strassen kam dieses Nahrungsmittel 1885, als Charles Cretors die dampfgetriebene Popcorn-Maschine erfand¹⁸.

Heute ist Popcorn ein Snack, besonders beliebt in Kinos.

2 Warum poppt Popcorn?

Der Dämon im Popcorn

Im „The Popcorn Book“¹⁹ ist beschrieben wie die Indianer das Poppen erklärt haben. Sie glaubten, dass sich ein kleiner Dämon im Innern von jedem Korn aufhalte. Wenn sein Haus nun aufgeheizt wird, gerät er in Wut. Je wütender er wird, desto mehr schüttelt er sein Haus. Schliesslich schlägt der kleine Dämon das Dach ab und verschwindet.



Abbildung 7 : Maiskolben

Popcorn ist eine Besonderheit und lässt Staunen²⁰. Da füllt man einen kleinen Beutel Körner in einen Mikrowellenofen⁴ und nach einigen Minuten ist das Volumen um einen Faktor 40 bis 50 angewachsen. Man kann die Körner auch in eine Pfanne mit etwas heissem Öl geben, dann poppen sie noch rascher.

Noch 1984 schrieb McGee in seinem Buch „On Food and Cooking“²¹: „Why does popcorn pop? No one seems to have investigated the problem in much detail, and so what follows is the current educated guess.“ Aus Erfahrung weiss man lediglich, dass der ideale Wassergehalt 11 – 14% betragen und das die Hülle dicht und fest⁵ sein soll – was die Produzenten auch einzuhalten versuchen. Der Wassergehalt, der zum grössten Volumen führt ist 11%²². Das Platzen entspricht einem Behälterbersten mit Wasserdampf!

Ein Maiskorn poppt.
Eine weisse Masse tritt aus.
Das Volumen wird viel grösser.

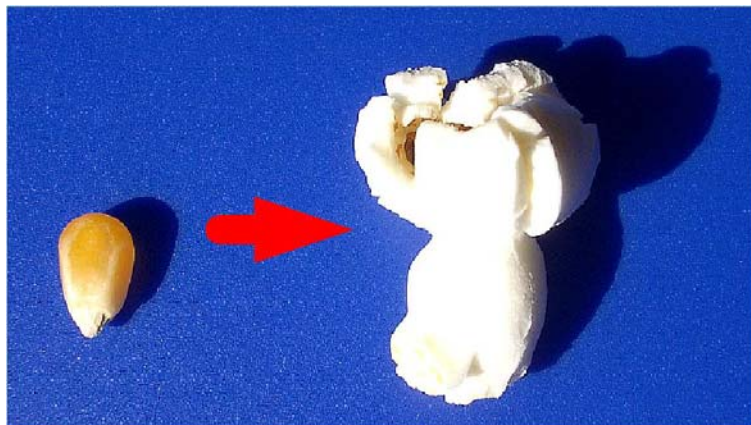


Abbildung 8: Ein Maiskorn vor und nach dem Platzen.

Es sind vier Voraussetzungen, die Popcorn poppen lassen:

1. Die Feuchtigkeit im Korn (minimal 12%)
2. Die Stärke im Korn (im Endosperm)
3. Die harte, dichte Schale des Korns (besonders hartes und dichtes Pericarp)
4. Eine Temperatur im Innern von ca. 175 °C

⁴ Mikrowellenofen: Ofen mit einer Frequenz von ca. 2.5 GHz und 800 Watt Leistung

⁵ Hamaker B., The chemistry of popcorn: it's all about "pop-ability", American Chemical Society's BioMacromolecules, Online-Vorabveröffentlichung vom 7. April 2005

2.1 Was ist das Weisse von Popcorn?

Wie die Zusammensetzung erraten lässt, könnte das Weisse aus Kohlenhydraten bestehen. Warum ist es denn so schaumartig und doch fest?

Beim Erhitzen spielen sich zwei wichtige chemische Vorgänge ab.

2.1.1.1 Die Gelierung²³.

Das Gelatinieren/Gelbildung/Gelierung (Gelatinisation) bezeichnet die Zerstörung der molekularen Anordnung und das unumkehrbare Quellen und Verkleistern der Stärkekörner unter dem Einfluss von Hitze mit Wasser. Die Körner quellen mit zunehmender Temperatur. Die Viskosität steigt und erreicht den höchsten Wert, wenn die Stärkekörner bis zum Maximum hydratisiert werden und in engem Kontakt mit ihrer Umgebung sind. Die Gelbildung ist eine mehrstufige irreversible Reaktion.

Zusammengefasst:

Intermolekulare Bindungen brechen mit zunehmenden Temperatur

H-Brücken binden damit mehr Wasser

Abnehmende Kristallinität der Strukturen

Zunehmende Quervernetzung (Wasserabspaltung → Verkleisterung, Kondensation, Gelbildung)

Verlust der Doppelbrechung

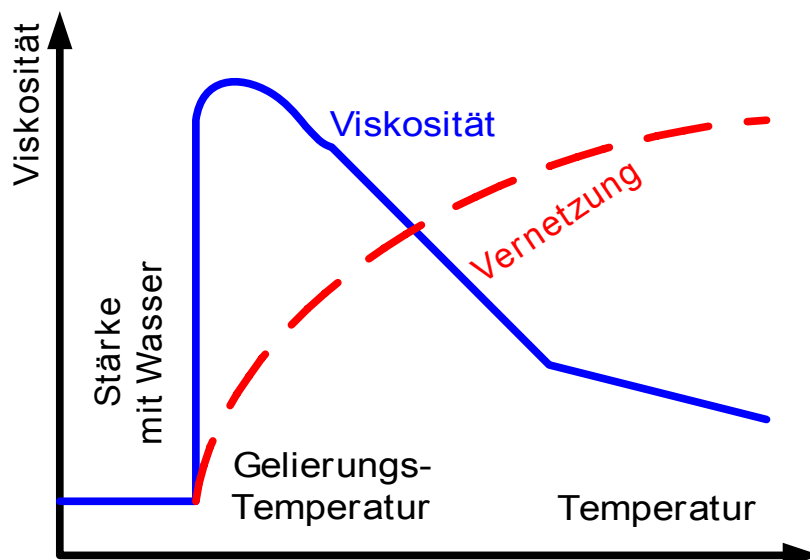


Abbildung 9: Temperaturabhängige Veränderung von Viskosität und Vernetzung von Stärke-Wasser-Mischungen²⁴

Tabelle 7: Gelier-Temperaturen verschiedener Stärken²⁵

Stärke	Gelierungs-Temperatur 'C
Mais	70-75
Hirse	70-75
Reis	68-75
Weizen	52-54
Gerste	61-62
Kartoffel	56-69

Die Gelierung nimmt mit zunehmendem Druck zu²⁶ → für Popcorn wichtig!

2.1.1.2 Die Vernetzung

Amylose wird zu Amylopectin. Dabei binden sich Amyloseeinheiten untereinander zu grösseren Molekülen und bilden Netzwerke – es spielen sich Kondensationsreaktionen ab.

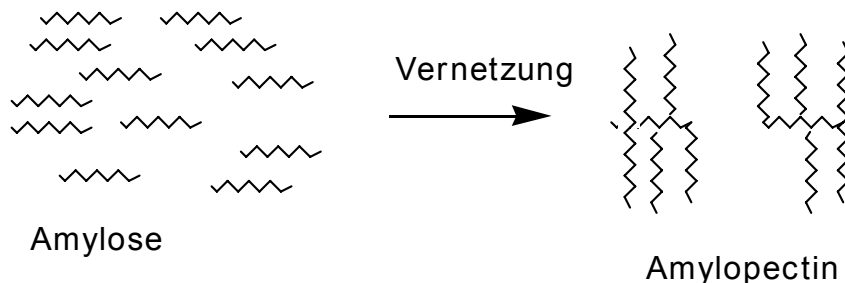


Abbildung 10: Amylose wird bei höherer Temperatur und höherem Druck zu Amylopectin

Die unverzweigten Amylose-Ketten sind in Form von Helices aufgebaut, die Iod einschliessen können, was je nach der Kettenlänge zu einer blauen oder violetten Farbe führt (Stärkenachweis). Das verzweigte Amylopectin bildet keine Helices auf, und kann somit Iod nicht einschliessen. Amylose ist meist für die Gelbildung, Amylopectin für die hohe Viskosität verantwortlich.

Tritt dieses flüssige Gel schlagartig aus, wenn das Korn explodiert, dann kühlt es sich sehr rasch ab. Der Grund dafür ist der Austritt von Wasserdampf und die Abkühlung durch die rasche Druckabnahme (adiabatische Abkühlung). Es bilden sich viele Poren, die vom expandierenden Dampf herrühren (wie die Porenbildung beim Brot, nur viel rascher). Das Weisse ist somit die Stärke des durchsichtigen Endosperms als fester Schaum.

3 Welche Struktur hat Popcorn?

Die Struktur der Stärkekörner im Endosperm vor der Reaktion zeigt Körner.

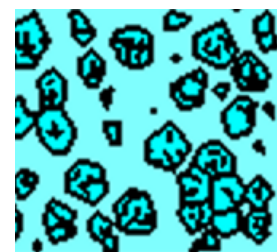


Abbildung 11: Mais-Stärke-Körner in 400 facher Vergrößerung

Die Korngrösse von Stärkekörnern wird als Grössenverteilung angegeben, die für die jeweilige Stärkeart charakteristisch ist; die Stärkekörner von Mais liegen in der Grössenordnung von 5-25 μm .

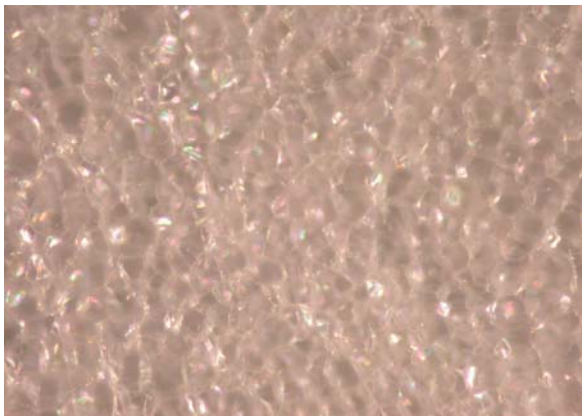
Nach der Reaktion sind die Körner zu Blasen aufgequollen und miteinander verbunden.



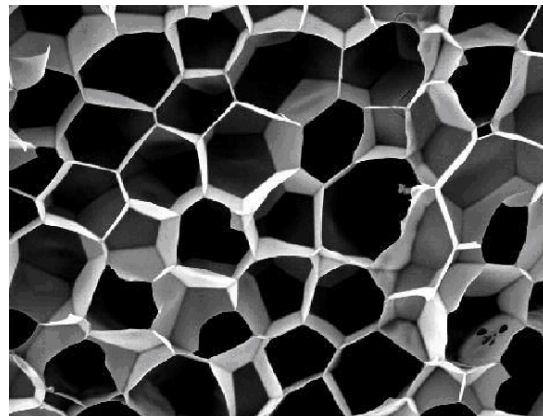
Ganzes Popcorn



Popcorn unter dem Mikroskop

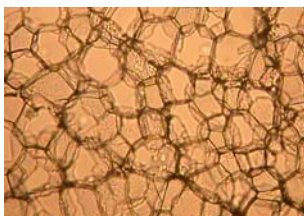


Popcorn, ein Stärkeschaum

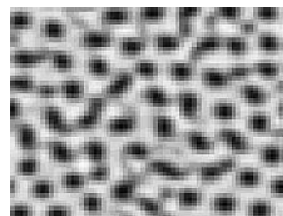


Struktur von Popcorn im REM²⁷

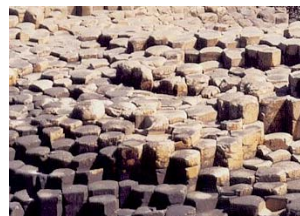
Abbildung 12: Popcorn in unterschiedlicher Vergrösserung



Popcorn im Mikroskop – eine Struktur wie bei Seifenblasen²⁸ oder Schäumen²⁹



Strukturen von erhitzten Flüssigkeiten³⁰ Die hexagonale Struktur ist bekannt bei Konvektion von Flüssigkeiten³¹



Flüssiger Stein, der sich verfestigt hat und dann ausgetreten ist. Giants Causeway (Nordirland)



Bienenwaben Die Bienen haben die materialsparendste Variante ausgewählt – das Waben-Sechseck

Abbildung 13: Struktur von Popcorn - ein fester Schaum

Bei gleicher Fläche brauchen Sechsecke weniger Platz als Kreise, weil sie sich ohne Zwischenräume dicht packen lassen (siehe auch Penrose Kachelmuster³²).

Das Waben-Sechseck ist in der Natur weit verbreitet. Wir finden dieses hexagonale Muster nicht nur bei den Bienen- und Wespennestern, sondern auch bei Insektenaugen, bei Molekülen, Kristallen und bei Viren. Die Technik nutzt die raumsparenden Eigenschaften der Waben bei Katalysatoren und Kühlern. Die sogenannten «Honeycombs» werden überall eingesetzt, wo es um Leichtbau geht, in der Raumfahrt, im Flugzeugbau und im Ski- bzw. Snowboardbau.

Popcorn hat Strukturen wie ein High-Tech Nahrungsmittel.

4 Wie ist die zeitliche Verteilung der Pops?

Hört man dem poppen bei der Herstellung von Popcorn zu, dann kann man keine Regelmässigkeiten feststellen. Ist das wahr? Diese Frage lässt sich beantworten, wenn man die zeitliche Verteilung der „Explosionen“ misst. Das kann mit einer Druckmessung geschehen, da bei jedem Platzen eines Kornes Wasserdampf freigesetzt wird. Dazu verwenden wir einen Mikrowellenofen (800 W), einen Rundkolben (250 ml) mit einem Zapfen mit Loch. Durch das Loch stecken wir einen Schlauch, der mit der Druckentlastung mit einer langen Kapillare und dem Druckmesser (Vernier³³) verbunden ist.

In den Kolben geben wir 20 Maiskörner. Der Druckmesser (Pressure Sensor) ist mit einem Interface (LabPro³⁴ von Vernier) zum Computer mit der Software Logger Pro³⁵ (Vernier) verbunden. Es kommen also nur Schulmessgeräte zum Einsatz.



Abbildung 14: Drucksensor mit Druckentlastung über eine Glaskapillare

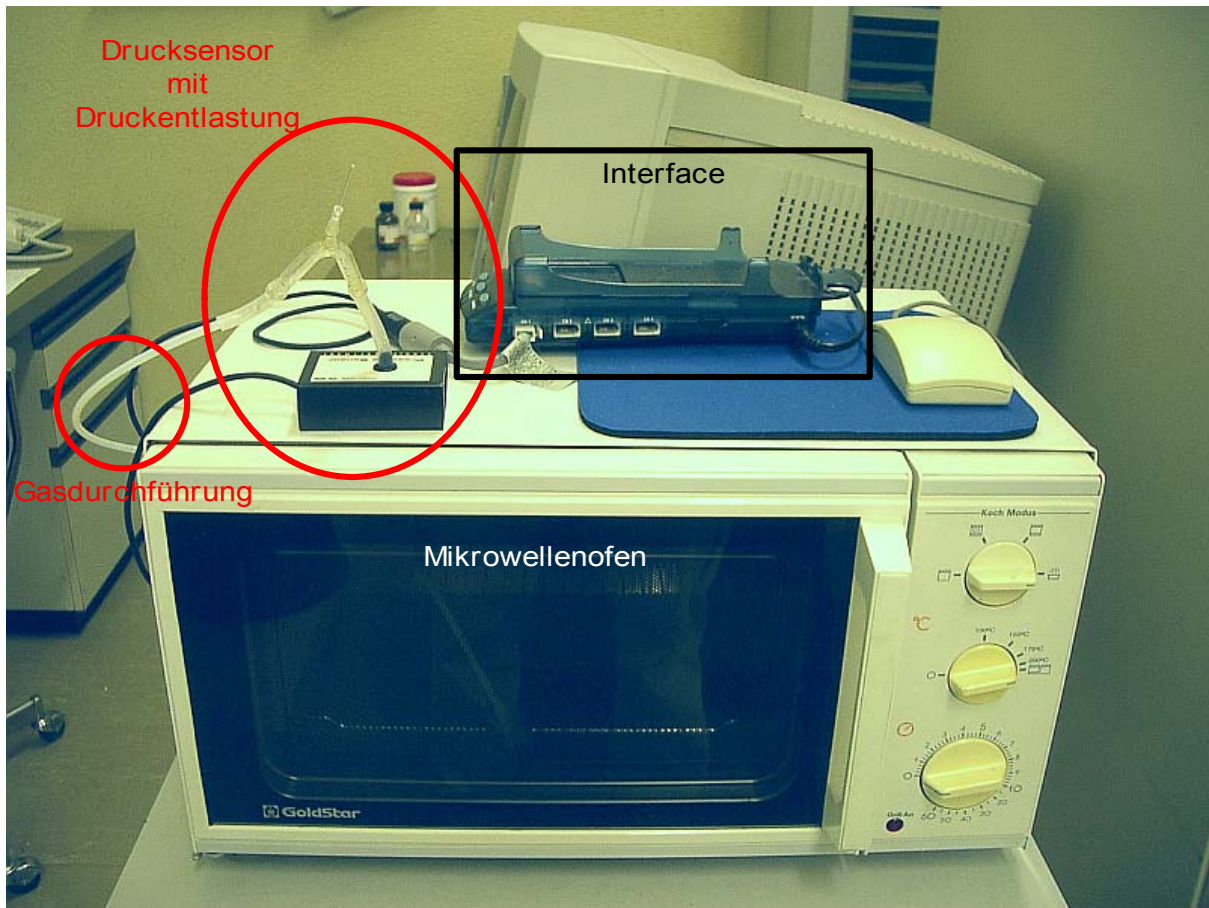


Abbildung 15: Umgebauter Mikrowellenofen für die Druckmessung mit Druckentlastung

Warum eine Druckentlastung? In einem Kolben ohne Druckentlastung steigt der Druck alleine durch die Temperaturerhöhung sehr stark an. Durch die Freisetzung von Wasserdampf bei poppen nimmt der Druck nochmals enorm zu – ein normaler Gummizapfen hält diesen Druck nicht aus – es sind also keine guten Messungen möglich. Zudem ist der Druck so hoch, dass es gefährlich werden könnte.

Die Druckentlastung ist ganz einfach aufgebaut. Es ist ein T-Stück, an welchem eine Glas-Chromatografie-Kapillare die Öffnung zur Umgebung darstellt. Der Druck im Kolben und den Leitungen wird so langsam und doch genügend rasch abgebaut – je höher der Druck, desto rascher der Druckabbau.

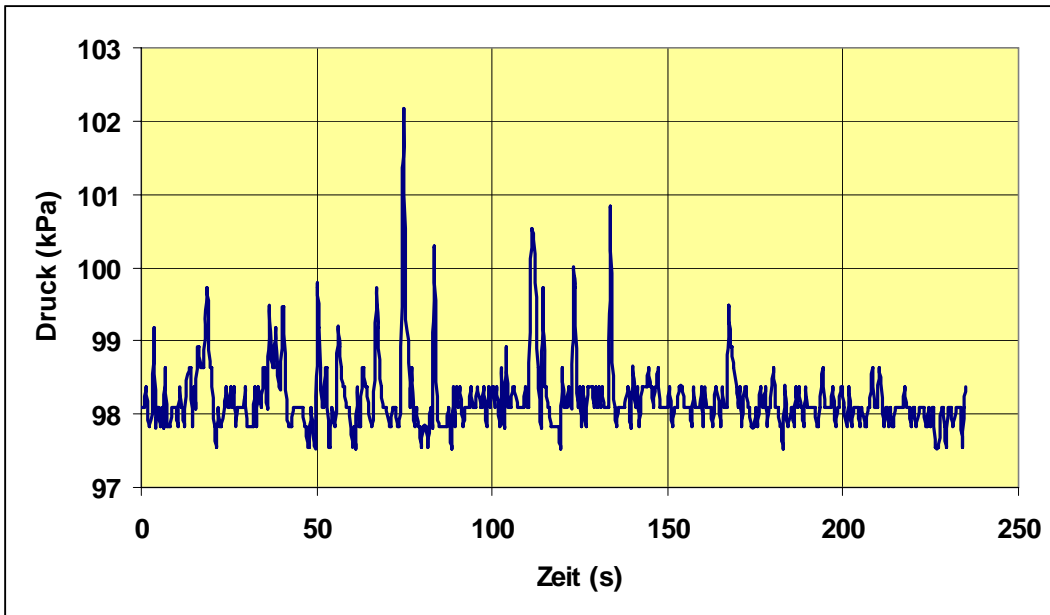


Abbildung 16: Druckmessung von 20 Maiskörnern in einem Glaskolben mit 126 ml Volumen und Druckentlastung. Jeder Peak entspricht einem Pop, grosse Peaks 2 und 3 Pops.

Tabelle 8: Statistische Auswertung von 2 Messserien (je 20 Körner)

Zeitintervall (s)	Anzahl Pops 1. Messserie	Anzahl Pops 2. Messserie	Summe der Pops in diesem Intervall
0-30	0	3	3
30-60	2	5	7
60-90	5	5	10
90-120	7	3	10
120-150	5	2	7
150-180	1	1	2

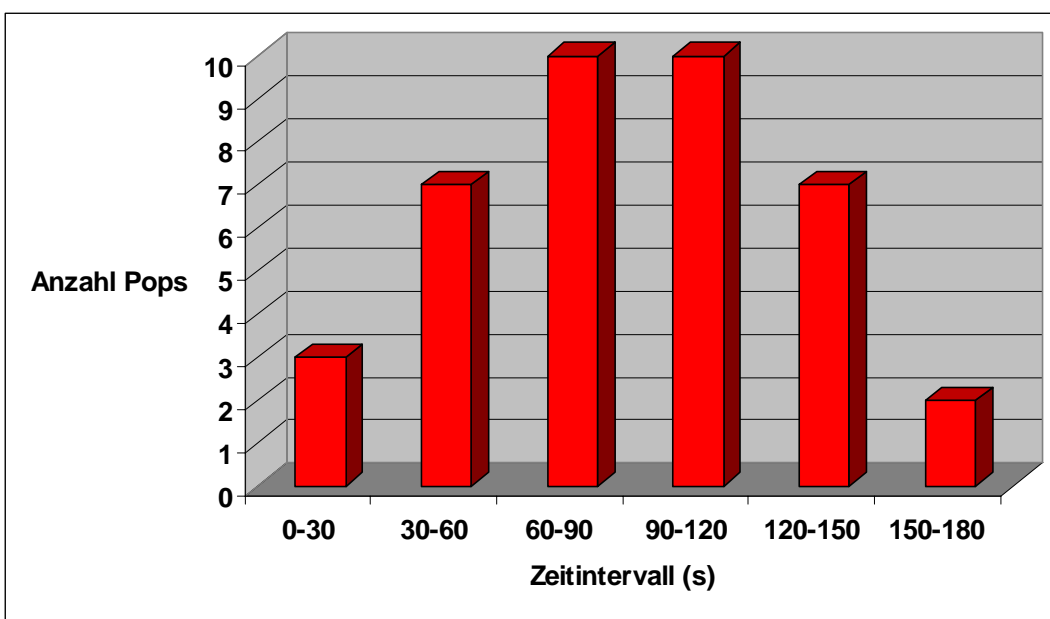


Abbildung 17: Statistische Verteilung der Pops in 30 Sekunden Intervallen

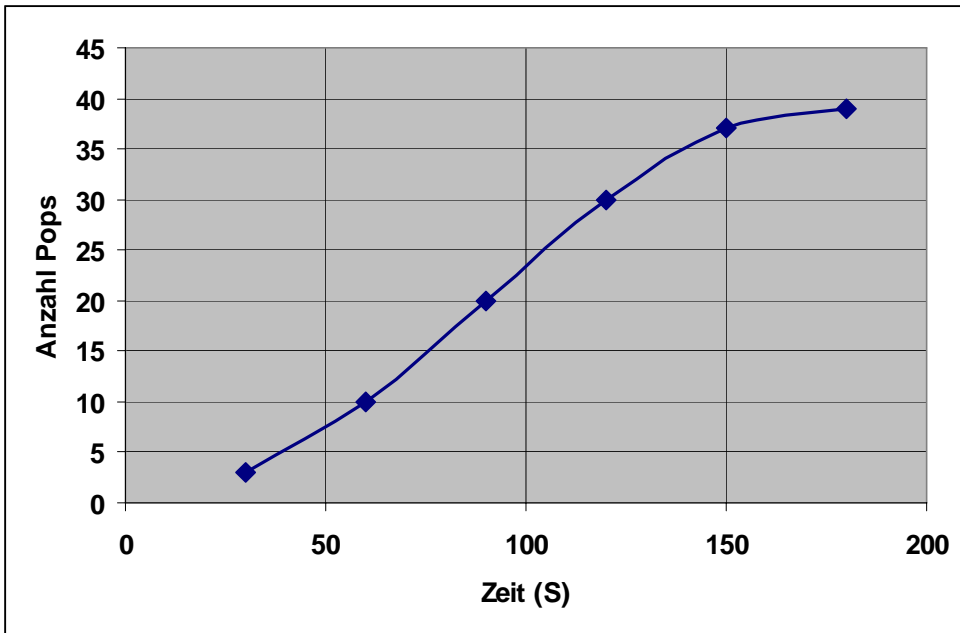


Abbildung 18: Summenkurve von 40 Körnern aus 2 Serien (Mikrowelle)

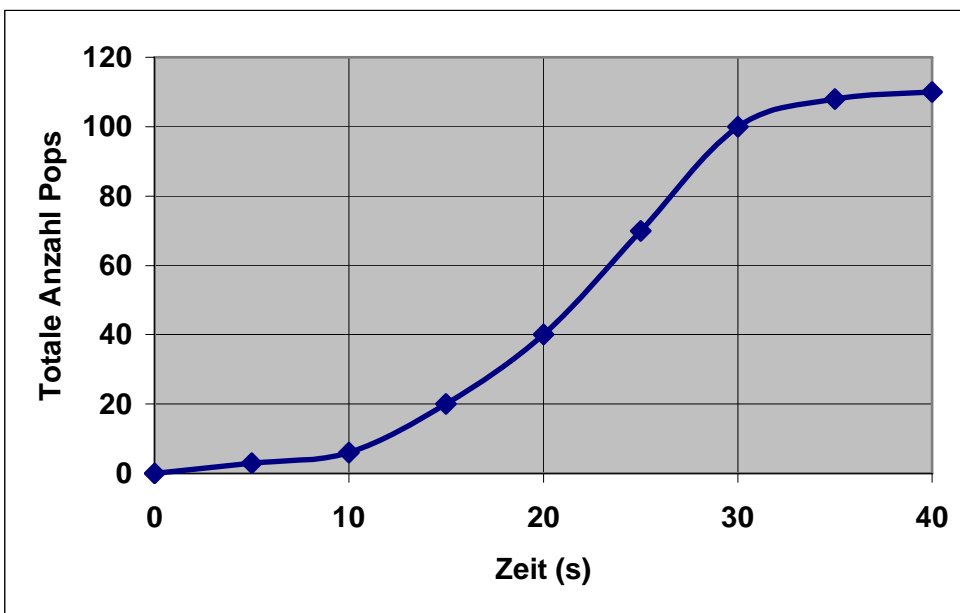


Abbildung 19: Summenkurve von 200 Körnern (In einer Pfanne mit Öl)³⁶

Folgerung: Das poppen der Körner zeigt eine zufällige Verteilung. Die Reaktion in einer Pfanne mit Öl ist viel rascher, als mit der Mikrowelle.

Die Geschwindigkeit der Reaktion ist von der Temperatur abhängig.

Bei diesem Experiment konnte gezeigt werden, dass bei der Reaktion Wasser freigesetzt wird. Ein einfacher Nachweis wurde mit wasserfreiem Kupfersulfat (CuSO_4) gemacht, das sich blau färbte.



Abbildung 20: Wasserdampf schlägt sich auf der Innenwand des Kolbens im Mikrowellenofen nieder.

5 Wie gross wird der Druck im Korn?

5.1 Bestimmung des freigesetzten Wassers

Berechnung aus der experimentell bestimmten Gasdruck-Zunahme.

Der Druckverlauf beim poppen eines einzelnen Kornes wurde im Mikrowellenofen bestimmt. Da eine Kapillare am Glaskolben (126 ml Inhalt) angehängt war, nahm der Druck wieder ab. Somit musste auf den Maximaldruck zurückgerechnet werden. Das konnte mit einem exponentiellen Fit geschehen. Um grobe Fehler auszumerzen wurden zwei verschieden grosse Glaskolben verwendet (126, 72 ml).

Aus dem maximalen Druck lassen sich mit der allgemeinen Gasgleichung die Anzahl Mole Wasser berechnen, die bei einem Pop freigesetzt werden.

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$p = 6.85 \text{ kPa} = 6850 \text{ Pa}$ (aus der Regression, Schnittpunkt der Kurve mit der y-Achse bei $x=0$)

$V = 126 \text{ ml} = 126 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (Volumen des Kolbens, 126 ml)

$T \text{ ca. } 273 + 200 \text{ K} = 473 \text{ K}$

$n = 2.19 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$; entspr. $m = n \cdot M = 3.95 \text{ mg}$ Wasser

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T$$

$p = 9.31 \text{ kPa} = 9310 \text{ Pa}$ (aus der Regression, Schnittpunkt der Kurve mit der y-Achse bei $x=0$)

$V = 72 \text{ ml} = 72 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$ (Volumen des Kolbens, 72 ml)

$T \text{ ca. } 273 + 200 \text{ K} = 473 \text{ K}$

$n = 1.70 \cdot 10^{-4} \text{ mol}$; entspr. $m = n \cdot M = 3.07 \text{ mg}$ Wasser

5.2 Abschätzung des Innendrucks beim Pop

Verwendung der Allgemeinen Gasgleichung:

77 Körner: Masse 13.129 g

Durchschnittliche Masse pro Korn: $m = 0.17 \text{ g}$

Messzylinder 20 ml mit 77 Körnern

Wasser auffüllen auf 20 ml, Masse Wasser 9.68 g \rightarrow Volumen der Körner (Annahme Wasser \approx Dichte 1 g/cm^3) $V(77 \text{ Körner}) = 10.32 \text{ cm}^3$

Durchschnittliches Volumen pro Korn: $V = 0.134 \text{ cm}^3$

Einwaage: 77 Körner 13.129 g; Masse pro Korn (Durchschnitt) $m = 0.17 \text{ g}$

Annahme: 12% Wasser entsprechen 0.02 g pro Korn (siehe Wassergehalt)

$V(77 \text{ Körner}) = 10.32 \text{ ml} = 10.32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$; $V(1 \text{ Korn}) = 1.34 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3$

$n(1 \text{ Korn}) = m/M = 0.02/18 = 1.11 \cdot 10^{-3} \text{ mol H}_2\text{O}$

$p = (n \cdot R \cdot T)/V = 0.00944 \cdot 8.3144 \cdot (273 + 200) / 1.34 \cdot 10^{-7}$

$p = 3.26 \cdot 10^7 \text{ Pa} = 326 \text{ bar!!}$

Nimmt man stattdessen die mit unseren Druck-Messungen bestimmten 3 – 4 mg Wasser, statt die angenommenen 100 mg (10% der Kornmasse), und geht davon aus, das nur 50% des Volumens für den Wasserdampf im Korn zur Verfügung steht, dann erhält man Drücke von 98 – 130 bar – immerhin (Die von Sibley zitierten 9 bar gehen vom ganzen Kornvolumen aus, das aber dem Gas nur zu ca. 10% zur Verfügung steht³⁷).

6 Dichte von Popcorn

Masse: 12.550 g Körner wurden in einen 20 ml Messzylinder eingewogen.

Der Messzylinder ganz mit 20 ml Volumen aufgefüllt hatte eine Masse von 22.982 g.

Die Masse des Wassers: 10.442 g

Annahme: Wasser hat die Dichte $\rho_w \approx 1 \text{ g/cm}^3$

Volumen der Körner: $V = 9.558 \text{ cm}^3$

Dichte der Körner: $\rho_K = 12.550/9.558 \approx 1.31 \text{ g/cm}^3$

Die Dichte grösser als die von Wasser. Das ist recht hoch, wenn man bedenkt, dass der Grossteil aus Stärke besteht. Die Stärke muss somit ausserordentlich dicht gepackt sein.

Fertiges Popcorn wurde silanisier⁶, um es für Wasser unbenetzbar zu machen (mit Dichlordimethylsilan in Methylchlorid). 12 silanierte aufgesprungene Popcorn wurden in einen Messzylinder mit 50 ml Inhalt eingefüllt und mit einem feinen Draht oben fixiert. Dann wurde Wasser eingefüllt, bis zur 50 ml Marke. Das zugegebene Wasser hatte eine Masse von 42.478 g (Annahme Wasser \approx Dichte 1 g/cm^3). Somit hatten die 12 Popcorn ein Volumen von 7.522 cm^3 , also pro Popcorn durchschnittlich 0.626 cm^3 .

⁶ Silanisieren: Reaktion der OH-Gruppen von Stärke mit Dichlordimethylsilan, wobei HCl abgespalten und $>\text{Si}<(\text{CH}_3)_2$ an der Oberfläche gebunden wird. Somit bilden sich keine Wasserstoffbrücken mehr.

Volumenzunahme des eigentlichen Materials:

$$f = (\text{Volumen nach dem poppen})/(\text{Volumen Körner}) = 0.626/0.134 = 4.7$$

Die immer wieder zitierte Volumenzunahme von $f = 30 - 50$ bezieht sich auf das Gesamtvolumen mit den grossen Hohlräumen, gegeben durch die schlechte Packungsdichte von fertigem Popcorn.

7 Wie viel Energie wird pro Pop freigesetzt?

$$E = W = p \cdot V \text{ (Pa/m}^2 = \text{N/m}^2 \cdot \text{m}^3 = \text{N} \cdot \text{m} = \text{J});$$

$$\text{Volumen: } V \text{ (pro Korn)} = 0.7 \cdot 10^{-6} / 8 = 8.75 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3$$

$$V(\text{Gasvolumen pro Korn}) = V \text{ (pro Korn)} / 10 = 8.75 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$$

$$\text{Druck: } p = 100 \text{ bar} = 10^7 \text{ Pa}$$

$$E = 10^7 \cdot 8.75 \cdot 10^{-9} = 0.0875 \text{ J} = 87.5 \text{ mJ}$$

100 g Popcorn haben eine Energie als Nahrung von 1389 kJ. Das macht pro Korn mit einer Masse von $m = 125 \text{ mg}$ eine Energie von $E = 1.74 \text{ J}$, also rund 20 mal mehr als die „Popenergie“.

Ist die Zubereitung, das poppen, nun Energieverschwendung? Nein. Man konnte nachweisen, dass von gekochter, also von zubereiteter Nahrung viel mehr Energie verwertet werden kann, als dies bei Rohkost möglich ist. Gekochte Nahrung ist im Durchschnitt etwa 150% besser³⁸.

8 Wie rasch poppt das Popcorn?

8.1 Druckmessungen

Um die Geschwindigkeit der Gasfreisetzung beim poppen zu messen, wurde der Druckanstieg im geschlossenen System verfolgt. Das ist praktisch sehr schwierig durchzuführen, weil der Druck alleine schon durch die Zunahme der Temperatur so stark ansteigt, dass der Überdruck durch öffnen der Leitung abgelassen werden muss. Das sollte bis möglichst kurz vor dem Platzen des Kornes geschehen – recht schwierig, wenn man die Zufallsverteilung kennt.

Experiment:

Interface: LoggerPro (Vernier), Software: LabPro 3.2 (Vernier)

Messsonde: Gas Pressure Sensor (Vernier), Antwortzeit 0.1 Millisekunden

Messungen: Messintervall 1 s, Messfrequenz 0.01 s, Pretrigger 0.1 s

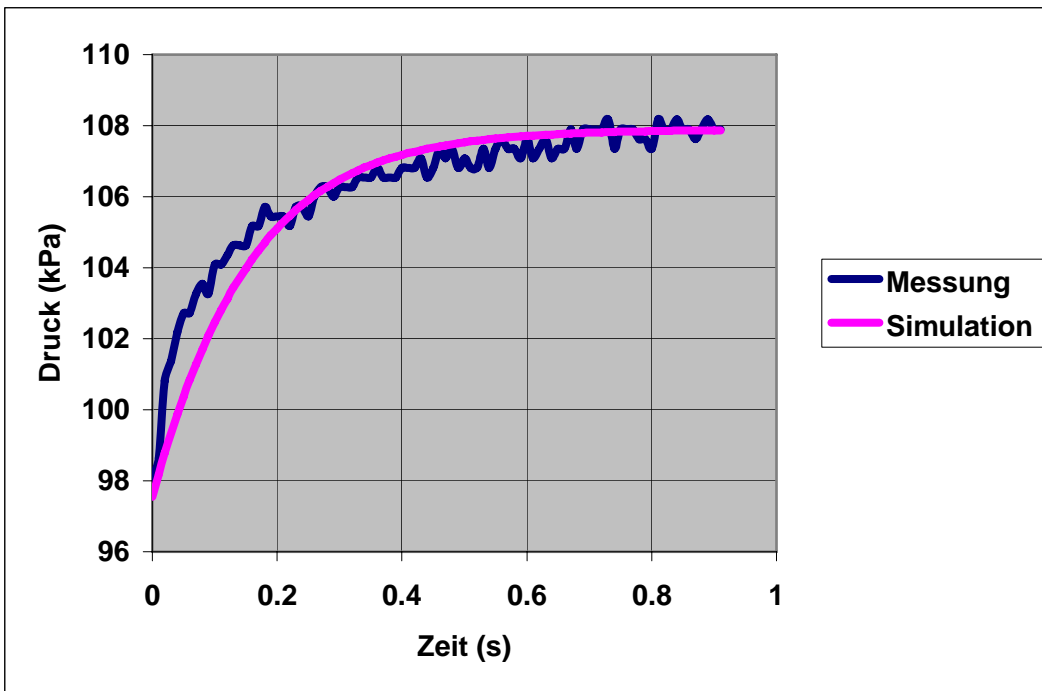


Abbildung 21: Druckanstieg durch die Explosion eines einzelnen Korns im Mikrowellenofen (Mittelwert von 4 Experimenten) [Mikrowellenofen, ohne Druckentlastung (sehr schwierig, da die Druckentlastung in kurzen Zeitabschnitten von Hand gemacht werden muss), 126 ml Rundkolben (mit Leitungen), 1 Popcorn, Pretrigger 0.2 sec]

Die Messanordnung wurde verbessert, indem eine kontinuierliche Druckentlastung eingebaut wurde. So ergibt sich ein Verlauf, der den Druckanstieg und die Druckentlastung gleichzeitig darstellt. Diese beiden Vorgänge müssen anschliessend mathematisch aufgetrennt werden.

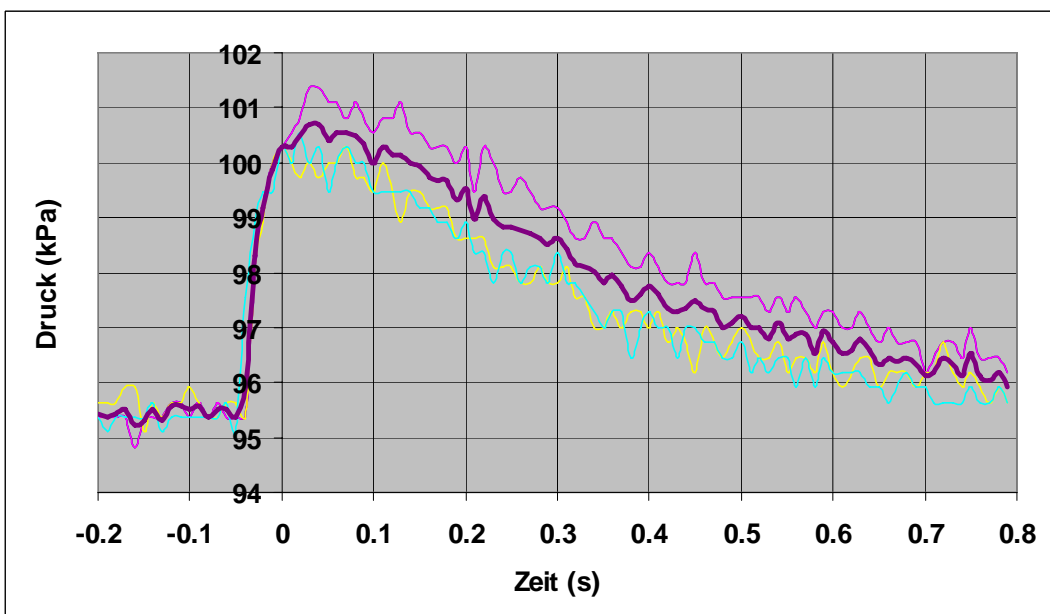


Abbildung 22: Druckmessungsserie 1 von 4 Körnern im Mikrowellenofen [Leitung mit kurzer Kapillare zur Druckentlastung, 72 ml RG (mit Leitungen), je 1 Popcorn, Trigger 98 kPa, Pretrigger 0.2 sec, 4 Versuche (Mittelwert)]

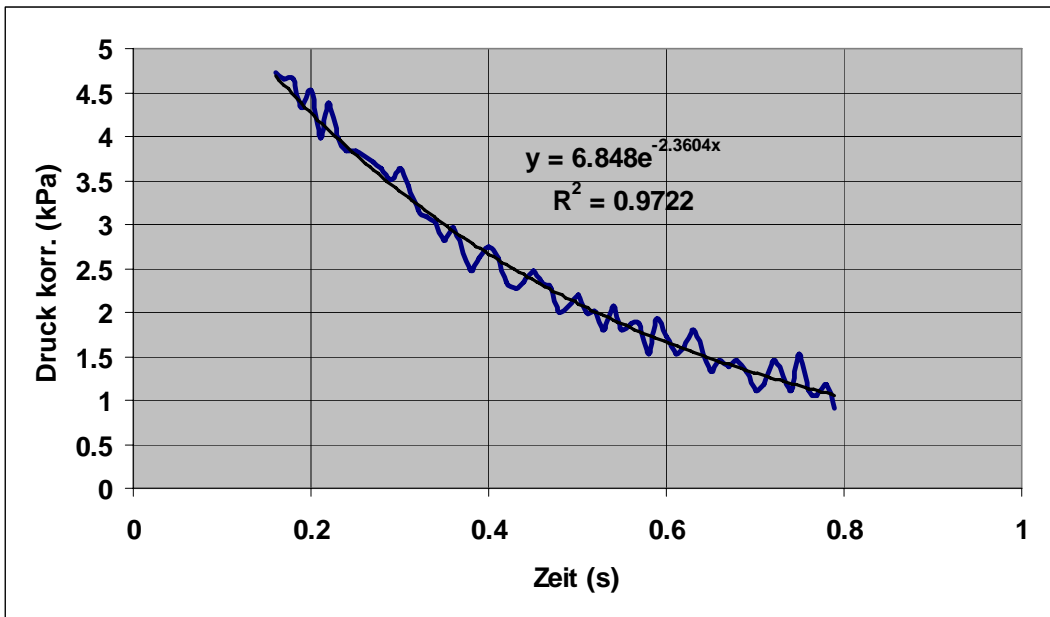


Abbildung 23: Nur Druckentlastung von Druckmessungsserie 1

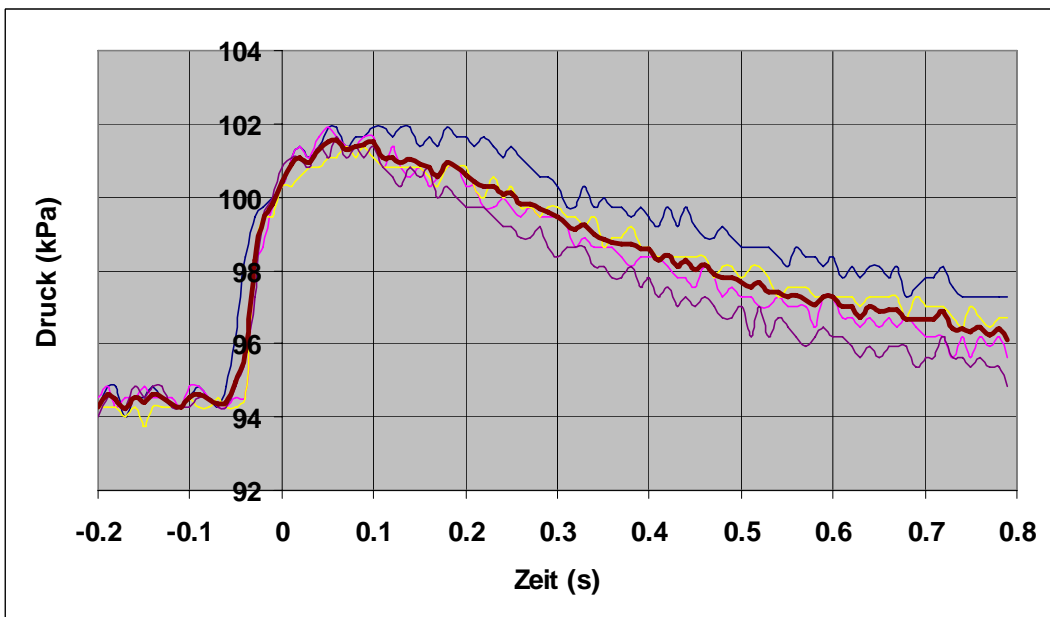


Abbildung 24: Druckmessungsserie 2 von 4 Körnern im Mikrowellenofen [Leitung mit langer Kapillare zur Druckentlastung. 126 ml Rundkolben (mit Leitungen), je 1 Popcorn, Trigger 98 kPa, Pretrigger 0.2 sec, 4 Versuche (Mittelwert)]

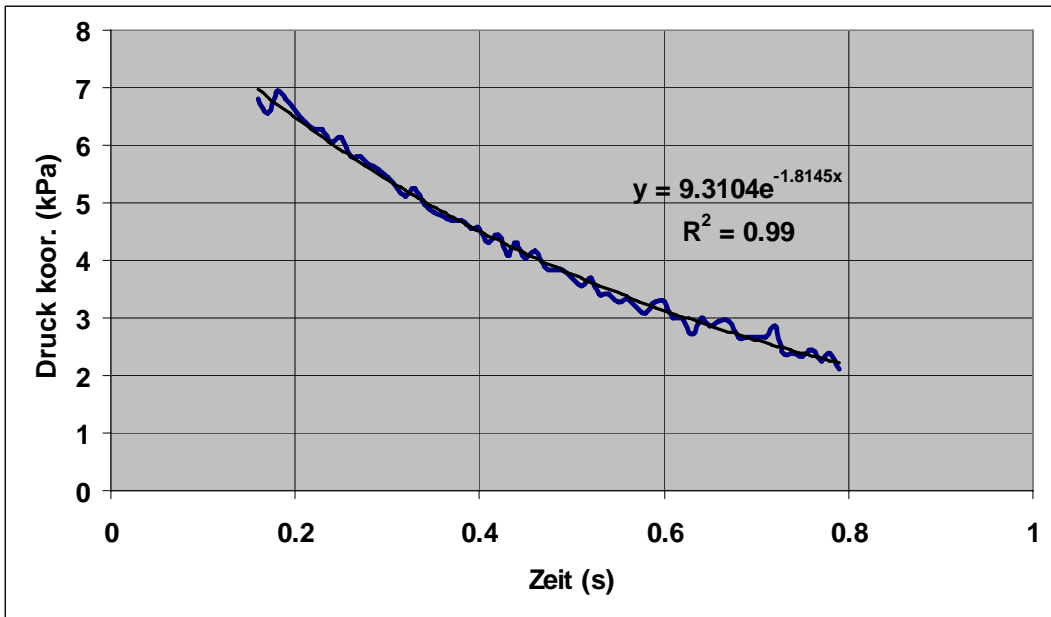


Abbildung 25: Nur Druckentlastung von Druckmessungsserie 2

Die Regressionen sind so gut, dass eine Rückextrapolation auf den Maximaldruck möglich ist.

8.2 Schnelle Schalldruck-Messungen

Schnellere Messungen, aber auch eine einfachere Versuchsanordnung ergibt sich, wenn ein Mikrofon als Sensor verwendet wird. Mit diesem wird die Druckveränderung durch den Pop gemessen. Begrenzt sind die Möglichkeiten einzig durch die maximale Messfrequenz (Mikrofon) und die maximal mögliche Anzahl Messungen (Interface).

Experiment:

Heizbarer Magnetrührer, Popcorn (ein einzelnes Korn), 150 ml Weithalserlenmeyer, 5 ml Sonnenblumenöl. Das Mikrofon muss vorne mit einem Filterpapier abgedeckt werden um Ölspritzer auf die Membran des Mikrophons zu verhindern.

Interface: LoggerPro (Vernier), Software: LabPro 3.2 (Vernier)

Messsonde: Microphone (Vernier),
Max. Messfrequenz: 5000 Hz

Messzeit: 0.1 s,
Messfrequenz: 100 s⁻¹,
Trigger: 4,
Pretrigger 0.01 s



Abbildung 26: Messaufbau mit einem Mikrofon

Messung:

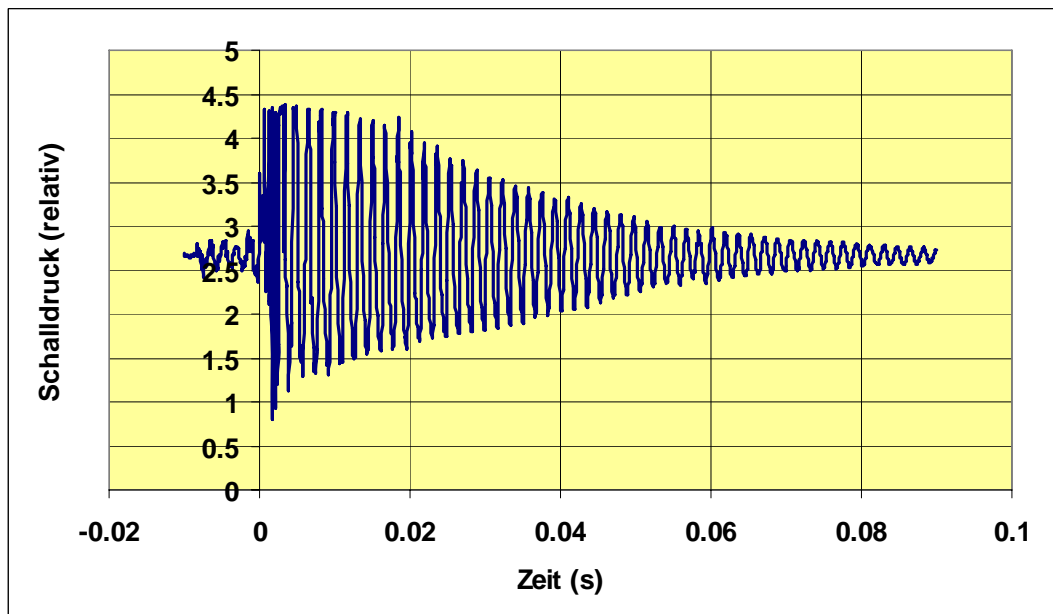


Abbildung 27: Schalldruckmessung eines Pops mit einem Mikrofon

Die Messung zeigt, dass ein Korn in ca. 0.06 Sekunden platzt. Interessant ist das langsame Ausklingen des Drucks. Diese Beobachtung hat dazu geführt, die Messungen in verschiedenen Gefäßen durchzuführen, in einem normalen Becherglas und einem hohen Bescherglas. Wie nicht anders zu erwarten sind die Messungen leicht unterschiedlich ausgefallen. Die Eigenschwingung der Glasgefäße und das Echo scheinen nicht vernachlässigbar zu sein. So wurde ein neues Messgefäß gebaut, bei dem die Eigenfrequenzen sicher nicht mehr im Messbereich bis 5000 Hz liegen, ein Aluminiumzylinder (Masse: Aussen-Durchmesser 4 cm, Höhe 3 cm, Wanddicke 0.5 cm)³⁹. Dieser Zylinder wurde auf die Heizplatte gestellt und mit 1 ml Paraffinöl dünnflüssig gefüllt. Etwa 3 cm über dem oberen Rand war das Mikrofon fixiert.



Abbildung 28: Aluzylinder für Schalldruckmessungen

Messungen:

Interface: LoggerPro (Vernier), Software: LabPro 3.2 (Vernier)

Messsonde: Microphone (Vernier), Max. Messfrequenz: 5000 Hz

Messzeit: 0.05 s, Messfrequenz: 1000 pro s, Trigger: 4, Pretrigger 0.01 s

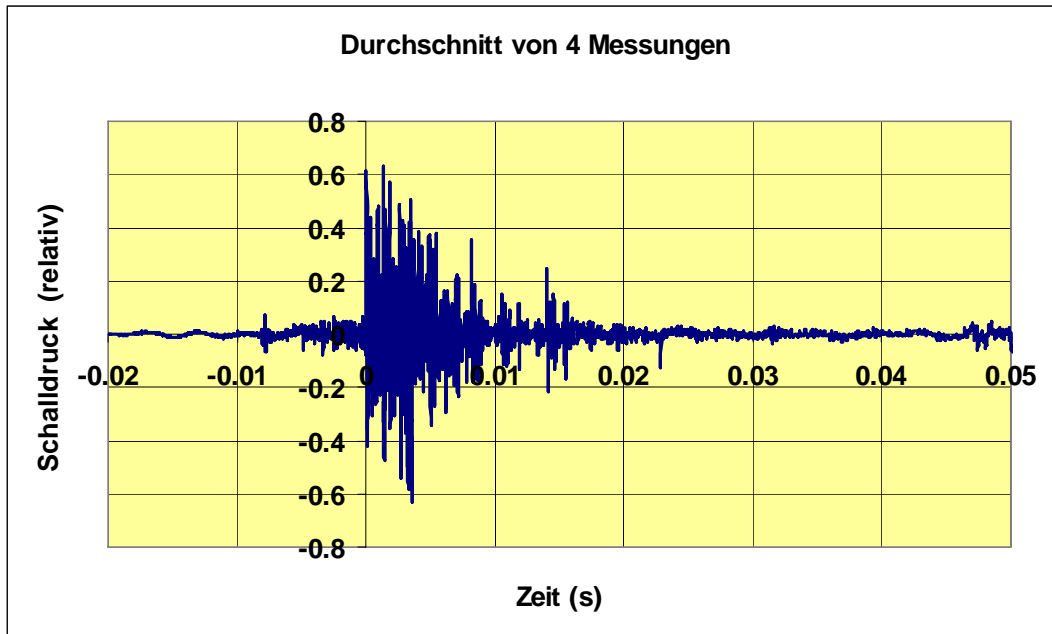


Abbildung 29: Durchschnitt von Schalldruckmessungen mit dem Mikrophon bei 4 Körnern. (Pretrigger: 0.02 Sekunden)

Die Messungen zeigen den Druckanstieg und den Druckabfall vom Schalldruck sehr gut. Die hier gezeigten Messungen sind mehrfach reproduziert worden.

Folgerung: Körner poppen ungefähr innerhalb von 0.01 - 0.02 Sekunden, der Druckanstieg erfolgt in rund 0.002 Sekunden.

8.3 Die Leistung eines Pops?

Die Arbeit W pro Pop ist ungefähr: $W = 87.5 \text{ mJ}$

Die Leistung $P = W/t = 87.5 \cdot 10^{-3} / 0.02 = 4.37 \text{ J/s} = 4.37 \text{ W} = 5.95 \cdot 10^{-3} \text{ PS}$

Folgerung 168 Körner hätten, wenn sie alle gleichzeitig explodieren würden, eine Leistung von 1 PS, oder 228 Körner 1 kW.

8.4 Die Individualität der Körner

Körner sind unterschiedlich, das zeigen sie ganz deutlich beim poppen. Wie wir gesehen haben, ist die Zeit unterschiedlich wann sie platzen. Sie sind aber auch unterschiedlich, wie sie platzen. An vier Beispielen soll das gezeigt werden. Man kann sagen, dass jedes Korn ein ganz „individuelles“ Poppen zeigt – in verschiedener Hinsicht: im Zeitpunkt wann und der Art wie.

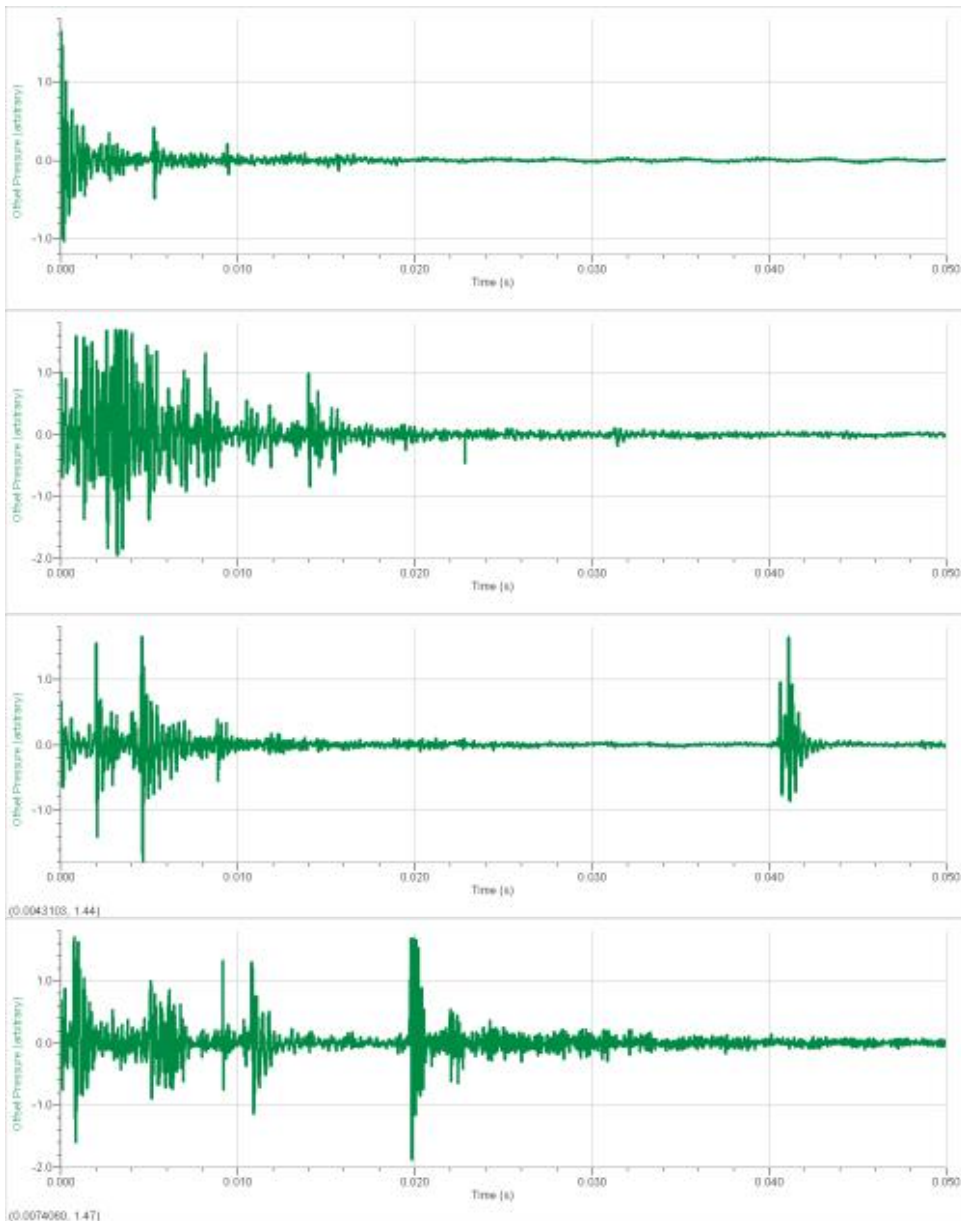


Abbildung 30: Das unterschiedliche Poppen von 5 Körnern (im Alu-Zylinder)



Abbildung 31: Pericarp von 2 Körnern nach dem Poppen

Die individuellen Unterschiede zeigen sich ganz deutlich in den unterschiedlichsten Formen der Überreste des Pericarp nach dem Poppen. Wenn die Stärke mit Amylase entfernt wird, bleibt das Pericarp übrig. Die Formen dieser Überreste sind genauso individuelle, wie der Schalldruck. Die Formen sind sehr ähnlich den Stahlteilen,

die nach Tank-Explosionen zurückbleiben.

Wenn also allgemeine Aussagen über Popcorn gemacht wird, dann sind das immer Aussagen über Mittelwerte.

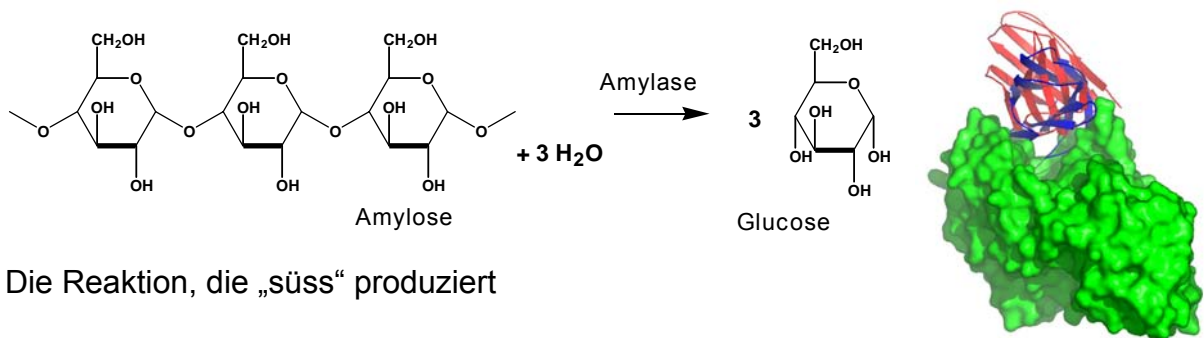
9 Warum funktioniert es nicht auf einer heißen Platte?

Maiskörner auf heißen Platten machen mit der Oberfläche nur an einer ganz kleinen Stelle Kontakt. Das Pericarp ist als Material zudem ein recht guter Wärmeisolator. Damit wird das Korn nicht gut aufgeheizt, sondern verbrennt lokal, ohne die Temperatur für das Poppen zu erreichen.

Öl in einer Pfanne oder Mikrowellen heizen das Korn so gleichmässig auf, dass die Innentemperatur steigt, bis das Korn platzt.

10 Warum schmeckt Popcorn süß, wenn man es im Mund behält?

Wie wir von der Zusammensetzung her wissen, enthält Popcorn viel Kohlenhydrate in Form von Amylose. Diese wird in unserem Speichel mit dem Enzym Amylase und dem Wasser in Glucose zerlegt, die süß ist.

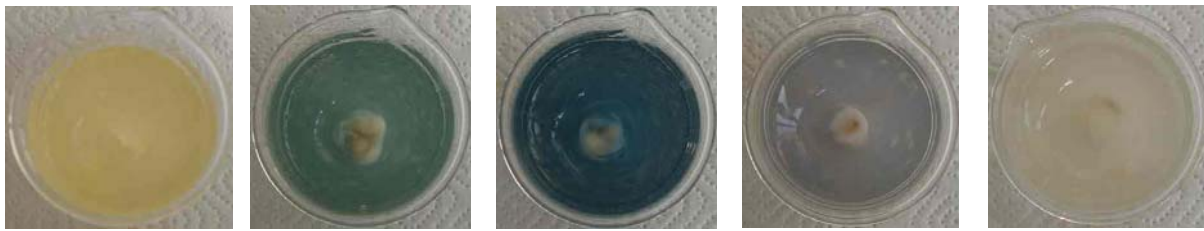


Die Reaktion, die „süß“ produziert

Das Enzym Amylase mit Amylose im aktiven Zentrum⁴⁰

Abbildung 32: Amylose wird durch das Speichelenzym Amylase in Glucose zerlegt

Wird Popcorn in einem Becherglas mit normalem Leitungswasser und etwas Amylase bei Raumtemperatur mit dem Magnetrührer gerührt, dann löst sich die weisse Masse bis auf das Pericarp und einige kleinere Stücke vollständig auf. Das heisst, dass die weisse Masse im Wesentlichen aus Amylose (resp. Amylopectin) besteht. Die Reaktion kann verfolgt werden, wenn man dem Wasser etwas Iodlösung (I_2/KI -Lösung) zusetzt.



Wasser mit I₂/KI
ohne Popcorn.

Ein Popcorn
wird
zugegeben,
Stärke wird
sofort
freigesetzt.

Nach kurzer
Zeit färbt die
Stärke im
Wasser mit Iod
blau.

Die Stärke wird
von Amylase
abgebaut, die
Farbe
verschwindet.
ca. 20 Minuten

Alle Stärke ist
abgebaut
worden.

Ca. 1 Stunde

Ca. 3 Minuten

Abbildung 33: Reaktion von Popcorn in einer Lösung von Amylase (Enzym des Speichels), Iod-Kaliumiodid und Stärke in Leitungswasser

Kann man diesen Farbverlauf verstehen? Versuchen wir ihn zu beschreiben:

Stärke wird aus dem Popcorn ins Wasser freigesetzt.

Diese Stärke reagiert sehr rasch mit dem Iod und bildet die blaue Farbe

(Beobachtung: sehr rasche Blaufärbung bei Zugabe von Iod zu einer Stärkelösung).

Die Stärke wird von der Amylase abgebaut, so auch die Stärke, welche Iod eingeschlossen hat. Damit verschwindet die blaue Farbe.

Mit einem Modell lässt sich diese Hypothese überprüfen. Es wird die Simulationssoftware Simile⁴¹ verwendet.

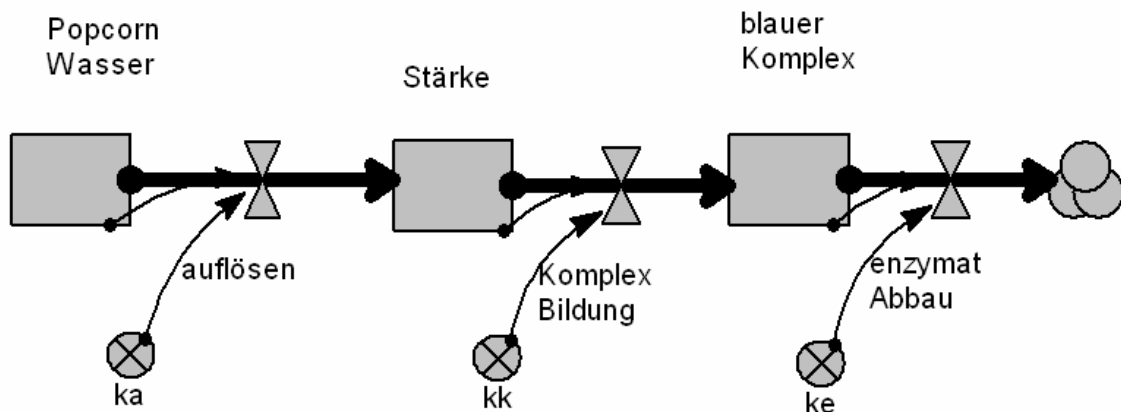


Abbildung 34: Simulationsdiagramm des vereinfachten Prozesses⁷

⁷ Simulation mit dem Computerprogramm Simile 3.3

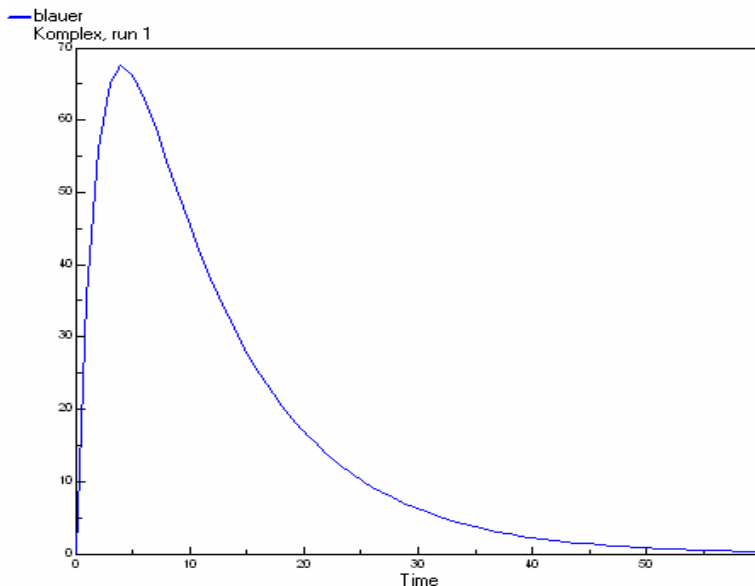


Abbildung 35: Zeitdiagramm Abszisse: Zeit (Minuten), Ordinate: Intensität der Blaufärbung (relativ)

Die rasche Blaufärbung und die langsame Abnahme der blauen Farbe kann mit diesem Modell verstanden werden.

Die Bildung von Glucose mit Amylase und die darauffolgende Reaktion von Milchsäure durch die Mundbakterien kann zu Karies führen:

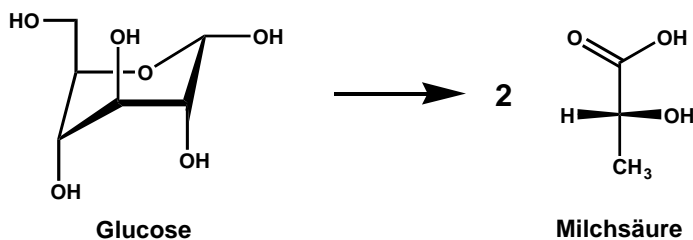


Abbildung 36: Bildung von Milchsäure aus Glucose durch Bakterien im Mund

Gibt es Besonderheiten?

11 Besondere Substanzen in Popcorn

11.1 Zink

Auffallend sind die hohen Zinkgehalte in Pop-Corn⁴². 6 untersuchte Proben enthielten 16,8; 19,0; 20,7; 20,8; 21,1 und 24,3 mg/kg Zink, während in anderen Mais-Proben 0,2 bis max. 10 mg/kg gemessen wurden. Die Ursache dieser hohen Gehalte ist unklar. Toxikologische Effekte sind jedoch keine zu erwarten, da Zink ein essentielles Element ist und täglich 22 mg aufgenommen werden sollten (Empfehlung WHO).

11.2 Bildung von Acrylamid

Acrylamid wird mit einer sogenannten Maillard-Reaktion gebildet. Acrylamid ist krebserzeugend, und somit wird versucht, die Bildung zu vermindern.

Tabelle 9: Gehalt an Acrylamid in Lebensmitteln (Mittelwerte in µg in kg der Beprobungen im 3.Quartal 2002)⁴³

Nahrungsmittel	Acrylamid (µg/kg)
Kartoffelchips	750
Kaffeersatz	620
Cracker	380
Lebkuchen	350
Röstzwiebeln	350
Butterkekse	300
Kaffeepulver	280
Pommes frites	250
Salzstangen	250
Popcorn	250
Spekulatius	230
Knäckebrot	170
Cornflakes	170

Folgerung: Die Aminosäuren reagieren mit den Kohlehydraten zum Acrylamid:

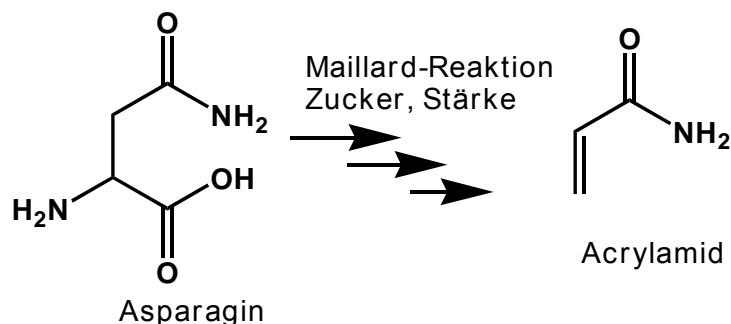


Abbildung 37: Acrylamidbildung bei hoher Temperatur

Die Untersuchungen z.B. bei Pommes-Chips haben gezeigt, dass die Gehalte an Acrylamid umso höher sind, je höher die Reaktionstemperatur ist. Das ist jedoch nicht der einzige Parameter.

Alte Maiskörner bilden in der Mikrowelle ganz dunkle bis schwarze Teile des aufgerissenen Pericarp.

links: Ein altes Korn in der Mikrowelle mit 3 Minuten Heizzeit.

rechts: Altes Korn, 2 Stunden in Wasser eingelegt, dann abgetrocknet und 1 Stunde bei RT trocknen gelassen. In der Mikrowelle mit 4 Minuten Heizzeit.

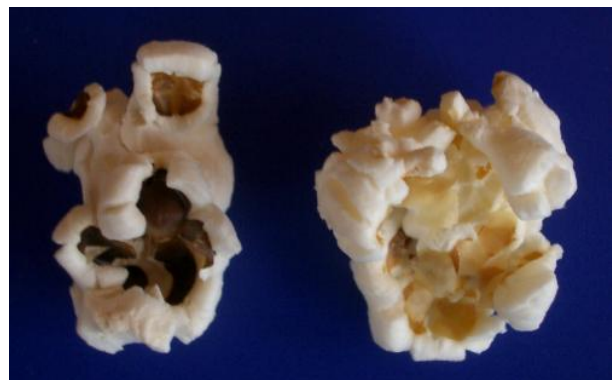


Abbildung 38: Einfluss der Trockenheit des Pericarp eine mögliche Massnahme

Folgerung: Popcorn mit ausgetrocknetem Pericarp zeigt eine stärkere Maillard-Reaktion und bildet somit ziemlich sicher auch mehr Acrylamid.

11.3 Geruch von Popcorn⁴⁴

Mit einer Analyse wurden in einem Extrakt aus frischem Popcorn 23 Geruchsstoffe ermittelt. Weitere wichtige Röstaromastoffe waren 2-Acetyltetrahydropyridin und 2-Propionyl-1-pyrrolin. Acetylpyrazin war aufgrund eines niedrigen Aromawertes nur von untergeordneter Bedeutung für den Geruch von frischem Popcorn. 2-Propionyl-1-pyrrolin, das erstmalig als Aromastoff in Lebensmitteln gefunden wurde, zeigte einen sehr niedrigen Geruchsschwellenwert von nur 0,02 ng/L (Luft). Die Ergebnisse zeigen, dass 2-Acetyl-1-pyrrolin und 2-Acetyltetrahydropyridin, die auch in der Weissbrotkruste gefunden wurden, auch für die Röstnote im Popcorn von grosser Bedeutung sind. Das röstig-kaffeeartig riechende 2-Furfurylthiol sowie 2-Propionyl-1-pyrrolin traten dagegen nur in Popcorn, nicht aber in der Weissbrotkruste auf.“

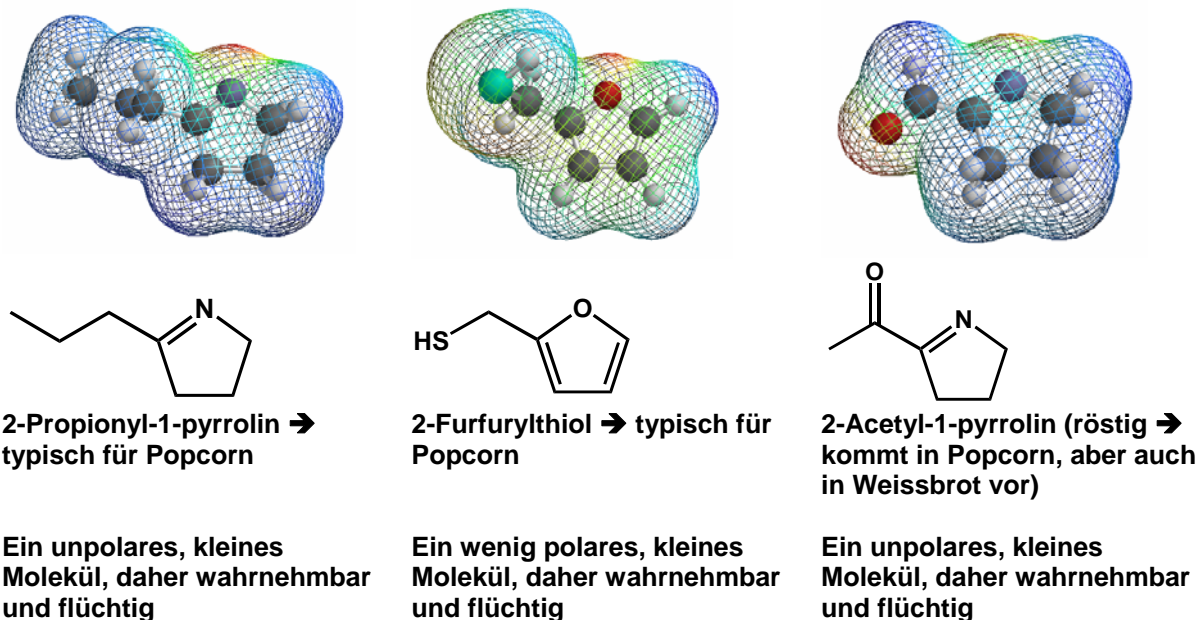


Abbildung 39: Wichtigste Moleküle, die für den typischen Geruch von Popcorn verantwortlich sind

Was kann gefolgert werden? Geruchsstoffe sind relativ kleine Moleküle, weil nur sie einen genügend hohen Dampfdruck besitzen. Die Moleküle sind, wenn sie durch direkte chemische Reaktionen (Oxidation, Reduktion, Säuren, Basen, Radikale) nicht sehr stark reizen, meist recht gut fettlöslich oder wenig wasserlöslich.

12 Ein künstlicher Pop (Artificial Pop = Pop Art?)

"Ein Grundsatz, der mit der Sinneswahrnehmung eines Experimentes nicht übereinstimmt, ist kein Grundsatz. Die Erfahrung muss ihn beweisen. Ich muss den logischen Schluss als Beweis in der Naturwissenschaft ablehnen. Das Experiment allein gibt Gewissheit."

Albertus Magnus, Heiliger (um 1200 bis 1280), auch Albert der Grosse genannt. Aufgrund seiner vielseitigen Beschäftigungen mit den Naturwissenschaften als Doctor universalis (deutsch: Universaldoktor) bekannt.

Viele Hypothesen haben als Theorien, bestätigt mit Experimenten eine Antwort gefunden. Was noch bleibt ist ein künstlicher Pop mit Maisstärke und Wasser. Dafür wurde ein dickwandiges Aluminiumgefäß mit Hohlraum und Deckel konstruiert⁴⁵.



Abbildung 40: Aluzylinder mit Hohlraum für angefeuchtete und gepresste Maisstärke (weiss) mit Deckel (rechts) für künstlichen Pop

Der Hohlraum wird mit angefeuchteter Maisstärke (Maizena) gefüllt und gut gepresst. Anschliessend wird der Deckel mit Araldit aufgeklebt, wobei Gasdichtigkeit wichtig ist.

Der so gefüllte, geschlossene Zylinder in einen Schraubstock gespannt wird von unten mit einem Gasbrenner erhitzt. Nach kurzer Zeit sprengt sich der Deckel

mit einer Explosion ab und ein Schaum, wie bei Popcorn tritt aus (manchmal ist es auch eine klebrige Masse!!).

Praktische Erfahrungen

Alle Versuche wurden mit normalem Popcorn durchgeführt, insbesondere auch jene in der Mikrowelle – es ist somit kein Mikrowellen-Popcorn erforderlich. Für die Mikrowelle wurden normale Papiersäcke verwendet, die einmal umgelegt, und bei denen die umgelegte Kante in der Mitte mit einem Kleber fixiert war. Somit ist es auch leicht möglich in der Mikrowelle kleine Portionen zuzubereiten.

13 Weiterführende Literatur

(z.T. übernommen)

- Aliki, Corn Is Maize: The Gift of the Indians. New York: HarperCollins Children's Books, 1976
 Allen, P., Who Sank the Boat? New York: The Putnam Publishing Group, 1996
 Asch, F., Popcorn. New York: Parents Magazine Press, 1979
 De Paola, T., The Popcorn Book. New York: Holiday House, 1984
 Gibbons, G., From Seed to Plant. New York: Holiday House, 1984
 Kimbrough D. R., Meglen R. R., A Simple Laboratory Experiment Using Popcorn..., J. Chem. Ed., 71 (6), 519-520, June 1994
 Piggyback song books. Everett, WA: Totline Publications.
 Raffi Singable Songbook. (1980). New York: Homeland Publications.
 Sauls F. C., Why Does Popcorn Pop?, J. Chem. Ed., 68 (5), 415-416, May 1991
 Scelsa, G. "Popcorn" song, available on CD. Greg & Steve: We All Live Together, Volume 2.
 Sibley L. K., Popcorn, ChemMatters, October 1984, pp. 10-12.
 Thayer, J., The Popcorn Dragon. New York: Morrow Junior Books, 1953
 Sarquis M., Sarquis J., The Popcorn Pop, Fun With Chemistry, Vol. 1, pp. 71-75, 1993
 Warren, J., Theme-A-Saurus: The Great Big Book of Mini-Teaching Topics. Everett, WA: Totline Publications, 1989
 Viele gute Hinweise: The Popcorn Board, Popcorn!, <http://www.popcorn.org/index.cfm>, 2004-03-05
 Huck, M., Grant, R., Simulation des Wachstums: Maize Growth and Development, <http://archive.ncsa.uiuc.edu/SCMS/DigLib/text/agriculture/Maize-Growth-Development-Huck.html>, 2004-03-14

14 Literatur

-
- ¹ Scherer Michelle, Popcorn, Die Geheimnisse eines Kornes, Maturaarbeit, Kantonsschule Heerbrugg, Januar 2005
² Bach, H. (1998): Yield estimation of corn based on multitemporal LANDSAT-TM data as input for an agrometeorological model, Pure Appl. Opt. 7 (1998) 809-825, http://141.84.50.121/iggf/Multimedia/Einfuehrung/nutzung_ernteschaetzung.htm, 2004-03-14
³ Ackermanager – Mais, Ökologische Aspekte des Maisanbaus, <http://www2.raiffeisen.com/pflanzenbau-neu/mais/index.html>, 2004-03-13
⁴ Ackermanager - Mais – Düngung, Allgemeine Düngeinformation, <http://www2.raiffeisen.com/pflanzenbau-neu/mais/duengung/index.html>, 2004-03-13
⁵ Finck A., Dünger und Düngung, Verlag Chemie Weinheim/New York, 1979, 295
⁶ Backman G., as reported in "On Growth and Form" by D'Arcy Thomas, Dover, 1992, page 115
⁷ Dekalb, Düngung, http://www.dekalb.de/mais/mais_duengung.html, 2004-03-14
⁸ Salvador J.R., What is the current thinking on the maximum potential yield for field corn?, <http://maize.agron.iastate.edu/yield.html>, 2004-03-14, nach: Tollenaar, M. 1985. What is the current upper limit of corn productivity? Proceedings of the Conference on Physiology, Biochemistry and Chemistry Associated with Maximum Yield Corn. Foundation for Agronomic Research and Potash and Phosphate Institute. St. Louis Missouri, 11-12 Nov. 1985
⁹ Pickert J., Landesamt für Verbraucherschutz und Landwirtschaft, Abt. Landwirtschaft und Gartenbau, <http://www.mlur.brandenburg.de//pflanze/unkrmais.htm>, 2004-03-14
¹⁰ Bt-Mais: Proteingen vom Bakterium *Bacillus thuringiensis* im Mais eingebaut, so dass dieser ein giftiges Protein gegen Larven des Maiszünslers (*Pyralis farinalis*) produziert. Dieses Protein wird vom Menschen im Magen abgebaut.
¹¹ GMO, GVO: Genetisch modifizierte/veränderte Organismen, genetic modified organism
¹² <http://www.weightlossforgood.co.uk/nutrition/popcorn.htm>, 2004-03-11
¹³ Michigan State University Extension, STORING POPCORN, <http://www.msue.msu.edu/msue/imp/mod01/01600285.html>, 2004-03-05
¹⁴ Carter R.P., Hicks D.R., Doll J.D., Schulte E.E., Schuler R., Holmes B., Popcorn, <http://www.hort.purdue.edu/newcrop/afcm/popcorn.html>, 2004-03-13

- ¹⁵ Ceylan M., Karababa E., The effects of ingredients on popcorn popping characteristics, International Journal of Food Science & Technology, 1365-2621, 2004
- ¹⁶ Hermann U., Herkunftswörterbuch, Knaur's, Lexikographisches Institut, München, 1982, 384
- ¹⁷ Sibley L., Popcorn,
http://www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acdisplay.html?DOC=vc2\1rp\1_popcorn.html,
2004-03-05, frei übersetzt
- ¹⁸ OCTAGON HANDELS GMBH, Interesting Facts about Popcorn, http://www.cinema-astoria.com/moviesites/popcorn/popcorn_en.html, 2004-03-05
- ¹⁹ De Paola, T., The Popcorn Book., New York: Holiday House, 1984
- ²⁰ Encyclopedia Popcornica,
<http://www.popcorn.org/frames.cfm?main=encyclopedia/index.cfm?usernav=html>, 2004-03-05
und darin zitiert: Song, A. and S.R. Eckhoff. 1994. Individual kernel moisture content of
preshelled and shelled popcorn and equilibrium isotherms of popcorn kernels of different
sizes. Cereal Chemistry 71(5):461-463;
- Song, A. and S.R. Eckhoff. 1994. Optimum popping moisture content for popcorn kernels of different
sizes. Cereal Chemistry 71(5):458-460.
- ²¹ McGee H., On Food and Cooking, Chales Scribner's Sons, New York, 1984, 242
- ²² Allred-Coyle, T. A., Toma, R. B., Reiboldt, W. & Thakur, M. Effects of moisture content, hybrid
variety, kernel size and microwave wattage on the expansion volume of microwave popcorn.
International Journal of Food Sciences and Nutrition 51, 389 – 394, 2000
- ²³ Coupland J, Starch Gelatinization (4.4.4),
http://www.courses.psu.edu/fd_sc/fd_sc400_jnc3/carbs/starch.htm, 2004-03-05
- ²⁴ Mangino M., Polysaccharides - starches and dextrans, <http://class.fst.ohio-state.edu/fst605/lectures/lect19.html>, 2004-03-05
- ²⁵ Lauriston R., Gelatinization Temperatures for Adjuncts,
http://hbd.org/brewery/library/GelTemps_RL0796.html, 2004-03-05
- ²⁶ Chuncheng Z., Chenglin M., Shouqin Z., Effects of High Hydrostatic on Gelatinization of Corn
Starch, <http://www.lib.ksu.edu/depts/issa/china/icae/part4/fe91.pdf>, Proceedings of 99
International Conference on Agricultural Engineering, Beijing, China, December, 1999
- ²⁷ Chen M., SCANNING ELECTRON MICROSCOPE PICTURES,
<http://www.ualberta.ca/~mingchen/pics/m-pop.jpg>, 2004-03-05
- ²⁸ John Sullivan J., The Planar Soap bubble Problem,
<http://mail2.sc.chula.ac.th/~wacharin/mathsbubbles.html>, 2004-03-06
- ²⁹ Erica G. Klarreich, Foams and Honeycombs, American Scientist, Volume 88, No. 2, 2000,
<http://www.americanscientist.org/template/AssetDetail/assetid/14718?fulltext=true>, 2004-03-06
- ³⁰ Young Y.N., Riecke H. Pesch W., Whirling hexagons and defect chaos in hexagonal non-
Boussinesq convection, http://www.iop.org/EJ/article/1367-2630/5/1/135/njp3_1_135.html ,
New J. Phys. 5 (2003) 135, PII: S1367-2630(03)63598-6
- ³¹ Van Dyke, M., Rayleigh-Benard Convection Cells, An Album of Fluid Motion, The Parabolic Press,
1982, <http://www.etl.noaa.gov/eo/notes/Convection/RBCells.html>, 2004-03-06
- ³² Davies P., Prinzip Chaos, Goldmann Verlag, 1990, 116
- ³³ Gas Pressure Sensor, <http://www.vernier.com/probes/probes.html?gps-bta&template=standard.html>, 2004-03-06
- ³⁴ Interface: <http://www.vernier.com/mbl/labpro.html>, 2004-03-06
- ³⁵ Logger Pro 3, <http://www.vernier.com/soft/lp.html>, 2004-03-06
- ³⁶ Slick F. Lee, Eat Your Experiment, <http://www.iit.edu/~smart/slicfre/lesson4.htm>, 2004-03-06
- ³⁷ Sibley L., Popcorn,
http://www.chemistry.org/portal/a/c/s/1/acdisplay.html?DOC=vc2\1rp\1_popcorn.html,
2004-03-05
- ³⁸ Randerson J., Early chefs left indelible mark on human evolution, New Scientist, 22 March, 2003, 17
- ³⁹ Bützer M., Planung und Konstruktion des Systems (Februar 2004)
- ⁴⁰ Wenig Z., http://zlab.bu.edu/~rong/dock/capri2_6.html, 2004-03-10
- ⁴¹ Simlie, Vers. 3.3, Simulistics Ltd., Edinburgh Technology Transfer Centre, King's Buildings,
Edinburgh, Scotland, EH9 3JL, <http://www.simulistics.com/>
- ⁴² Kantonales Laboratorium, Hammerstrasse 25, 4410 Liestal,
<http://www.baselland.ch/docs/vsd/labor/aktuell/mais2.htm>, 2003-12-24
- ⁴³ Haase G., Acrylamid, http://www.g-haase.de/ch_acrylamid.htm, 2004-03-05
- ⁴⁴ Deutsche Forschungsanstalt für Lebensmittelchemie, <http://dfa.leb.chemie.tu-muenchen.de/DJahr1991.html>, 2004-01-04
- ⁴⁵ Bützer M., Planung und Konstruktion des Systems (Februar 2004)