Veit-Höser-Gymnasium Bogen

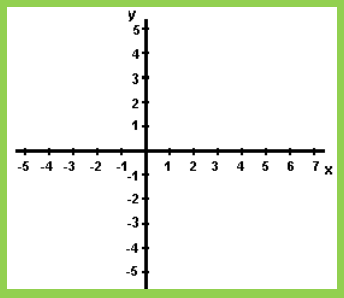
2013/15

Seminararbeit im Fach Chemie

von Tobias Rothammer

„Ei, Ei, Ei,… klein aber Oho!“ – Chemische und physikalische Untersuchungen des Hühnereis

f(x) = Ei ?!



Inhaltsverzeichnis

1 Dioxin im Ei – einer der aktuellsten Skandale in der Lebensmittelindustrie 3

2 Theoretische Grundlagen – Alles „rund“ um das Hühnerei

2.1 Aufbau des Hühnereis und Aufgaben der Bestandteile.....5

2.2 Der molekulare Aufbau der Eistrukturen 7

2.2.1 Eine besondere Mischung – Proteinaufbau des Eiklars 7

2.2.2 Nicht alles was glänzt ist Gold! – Lipidaufbau des Dotters 11

2.2.3 Ein gut durchdachtes Schutzsystem – molekulare Zusammensetzung der Eischale.....13

2.3 Nicht alles was rollt ist eine Kugel! – die Geometrie des Hühnereis.....15

2.4 Wie „natürlich“ ist er wirklich? – mathematische Grundlagen zur Funktion des natürlichen Logarithmus.....16

2.5 Der Zweck des Hühnereis – ein Spagat zwischen Massenproduktion und Erhaltung der Art.....17

2.5.1 Das Hühnerei zur Arterhaltung – ein „natürliches“ Wunder 17

2.5.2 Ohne das Ei „rollt“ da gar nichts – Verwendung des Hühnereis in der Nahrungsmittelindustrie 18

2.5.3 „Käfig, Boden oder Freiland?!“ – (Massen-)Produktion des Hühnereis 20

2.5.3.1 Die Freilandhaltung und ihre Merkmale 20

2.5.3.2 Ökologische Haltungen von Legehennen 21

2.5.3.3 Die Bodenhaltung – ein guter Kompromiss?.....21

2.5.3.4 Die Kleingruppenhaltung als intensivste Form der Eierproduktion.....22

2.5.3.5 Die Hühnerhaltung im Überblick 23

3 Harte Schale, weicher Kern, aber was steckt wirklich dahinter? – Praktische Untersuchung des Hühnereis

3.1 Chemische Untersuchungen der Eistrukturen 24

3.1.1 Alles „klar“ im Ei? – Untersuchung des Eiklars.....24

3.1.1.1 Die Biuret-Reaktion – Nachweis der Peptidbindungen im Eiklar.....24

3.1.1.2 Die Xanthoprotein-Reaktion – Nachweis von aromatischen Aminosäuren im Eiklar.....30
3.1.1.3 Denaturierungen des Eiklars – Die besondere Zerstörung.....33
3.1.1.4 Herstellung von Biskuit – das Geheimnis des Eischaums.....35
3.1.2.„Was ist denn nun das Gelbe vom Ei?“ – Untersuchung des Eidotters.....38
3.1.2.1 Gewinnung von Lecithin – der Emulgator im Eigelb.....38
3.1.2.2 Der Nachweis von Fetten des Dotters mit der Fettfleckprobe.....42
3.1.2.3 Herstellung von Mayonnaise – das Ei als Bindemittel.....44
3.1.3 Eine harte Sache? – Versuche zur Eischale.....46
3.1.3.1 Der Nachweis von Carbonat-Ionen.....46
3.1.3.2 Ein (Weich)Ei? – Das chemische Schälen des Hühnereis.....49
3.1.4.100% Ei? – Qualitativer Nachweis des Wassers im Hühnerei.....51
3.2 Das Volumen, die Geometrie und das Rollen – die Physik des Hühnereis.....53
3.2.1 Der Schwimmversuch – „Das Ei macht das Seepferdchen!“.....53
3.2.2 „Klein, aber enorme Kraft?!“ – Zerbrechen und Belastbarkeit des Eies.....55
3.2.3 Modell zum „ Eiern“? – Rollbahn des Eis als mathematische Funktion.....56
3.3 „Die Sendung mit dem Huhn“ – Ein kurzer Filmbeitrag zum Hühnerei.....77
4 „Sind wir jetzt schlau genug zum Eierlegen?!“ – Ein Ausblick zum Konflikt der Massenproduktion von Hühnereiern.....78
5 „Das passt alles in nur ein Ei?“ – Zusammenfassung der theoretischen und praktischen Betrachtungen des Hühnereis.....79
6 „Alles nur Gegacker zum in die Pfanne hauen?!“ – Selbsteinschätzung und Reflexion mit möglichen Verbesserungen.....81
7 Literaturverzeichnis.....83
8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis.....90
9 Erklärung zur Anfertigung der Seminararbeit.....93

1 Dioxin im Ei – einer der aktuellsten Skandale in der Lebensmittelindustrie

Abbildung 1: Karikatur zum Dioxinskandal 2010

Die vorliegende Karikatur beschäftigt sich mit einem der aktuellsten Skandale der Lebensmittelindustrie. Es ist eine gewöhnliche Szene am Morgen dargestellt, bei der ein Ehepaar ihre Frühstückseier genießt. Dies wird jedoch durch die Nachrichtensprecherin des Frühstücksfernsehens gestört: „Es sind etwa 120000 dioxinbelastete Eier in den Verkauf gelangt, es besteht aber keine akute Gesundheitsgefahr!“
Bei diesem Lebensmittelskandal, welcher 2010 bekannt geworden ist, sind dioxinverseuchte Fette vom Futtermittelproduzent Harles und Jentzsch aus Nordrhein-Westfalen in Umlauf gebracht worden. Das Futterfett ist als Ausgangsprodukt an verschiedenste Futtermittelhersteller geliefert worden.

Dioxine sind giftige Verbindungen und zählen zu den sauerstoffhaltigen Derivaten von halogenierten Kohlenwasserstoffen. Schon eine geringe Menge kann sehr schädlich für den Menschen sein. So wurden bereits Störungen des Immunsystems, schwere Erkrankungen der Schilddrüse und des Verdauungstraktes auf die Dioxine zurückgeführt. Darüber hinaus wurde in Tierversuchen krebserregende Wirkung festgestellt.

Lebensmittelskandale dieser Art sorgen für sehr viele Diskussionen in der Gesellschaft, da hier die Qualitätssicherung vieler Grundnahrungsmittel auf dem Spiel steht. Bei diesem Skandal rückte besonders das Hühnerei in den Mittelpunkt. Das Ei, so wie wir es kennen, ist für die meisten unersetzlich und hat eine tragende Rolle in unserem Ernährungsplan. Doch oft sind wir uns dabei nicht bewusst, welches kleine Wunder wir täglich verzehren. [Nach 7,8]

Im Anschluss werden nun die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Hühnereis experimentell genauer untersucht und beispielsweise folgende Fragen geklärt: Warum ist das Ei keine Kugel und wieso rollt es so komisch? Was macht unseren Kuchen so locker und die Mayonnaise so cremig?

2 Theoretische Grundlagen – Alles „rund“ um das Hühnerei

Als Erstes ist es natürlich sinnvoll den Aufbau des Hühnereies sowie die einzelnen Bestandteile genauer zu betrachten, welche in Abbildung 2 zu erkennen sind.

2.1 Aufbau des Hühnereis und Aufgaben der Bestandteile

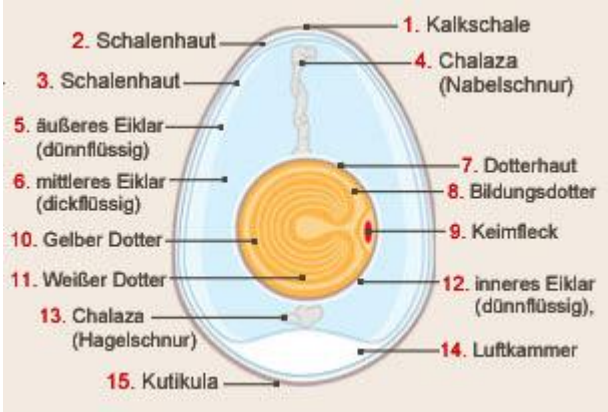


Abbildung 2: Der schematische Längsschnitt eines Hühnereis

Von außen nach innen ist das Hühnerei wie folgt aufgebaut: Es wird von einer 0,2 bis 0,4 mm dicken Kalkschale (1) geschützt. Diese trägt außen die Kutikula (15), ein sehr dünnes, bakterizides und fungizides Eioberflächenhäutchen, welches aber sehr leicht durch Hitze, Nässe oder mechanische Einwirkung beschädigt werden kann. Es trägt dazu bei, dass das Ei nicht austrocknet und länger haltbar ist. Auf die Kalkschale folgen direkt zwei Membranen – nämlich die Schalenhäute (2, 3). Diese beiden schließen die Luftkammer (14) des Eies ein, welche sich nach dem Legevorgang beim Abkühlen bildet. Dann folgt das ebenfalls bakterizide Eiklar, welches sich in drei Phasen einteilen lässt: Die beiden dünnflüssigen Abschnitte des äußeren (5) und inneren (12) Eiklars sowie die dickflüssige Phase des mittleren Eiklars (6). In diesem dickflüssigen Teil befinden sich die beiden Chalaza, die Nabelschnur (4) sowie die Hagelschnur (13). Diese sind sowohl am Dotter als auch an der Schalenhaut befestigt und dafür zuständig, dass der Dotter in der Mitte des Eies gehalten wird. Bei älteren Eiern sind die Chalaza elastischer und somit ein Merkmal für das Alter des Eis. So kann der Keimfleck (9), welcher nur bei einer vorausgegangenen Befruchtung vorhanden ist, nicht an der Schale haften und absterben. Das innere Eiklar umgibt im Anschluss – abgetrennt durch die Dotterhaut (7) – die Dotterkugel, welche wiederum aus verschiedenen Abschnitten aufgebaut ist, nämlich aus dem Bildungsdotter (8), dem gelben Dotter (10) und dem weißen Dotter (11). Insgesamt hat der Dotter einen Durchmesser von drei Zentimeter. [Nach 9]

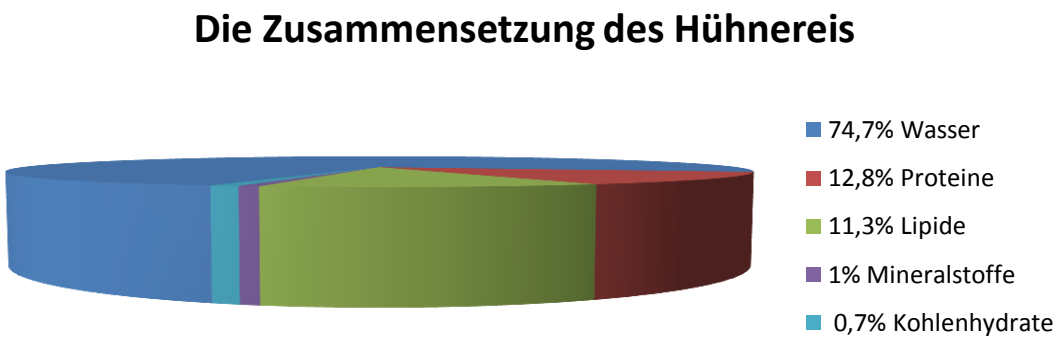


Abbildung 3: Die Bestandteile des Hühnereis im Überblick [1]

Das obenstehende Diagramm gibt Auskunft über die Zusammensetzung des Hühnereis im Überblick. Neben dem großen Anteil von Wasser sind vor allem Proteine und Lipide zur Entwicklung eines Organismus vorhanden.

In den folgenden Kapiteln wird nun die molekulare Beschaffenheit der Hauptbestandteile des Hühnereis vertieft.

[1] nach 10

2.2 Der molekulare Aufbau der Eistrukturen

2.2.1 Eine besondere Mischung – Proteinaufbau des Eiklars

„Das Eiklar ist eine ca. 10%ige wä[ss]rige Lösung verschiedener globulärer Proteine, die Ovomucinfasern enthält.“ [2] Die häufig verwendete Bezeichnung „Eiweiß“ für das Eiklar ist also darauf zurückzuführen, dass Proteine neben Wasser den Hauptanteil dieser wässrigen Lösung bilden. Die Anteile der anderen Inhaltsstoffe sind vergleichbar gering, was das folgende Kreisdiagramm zeigt.

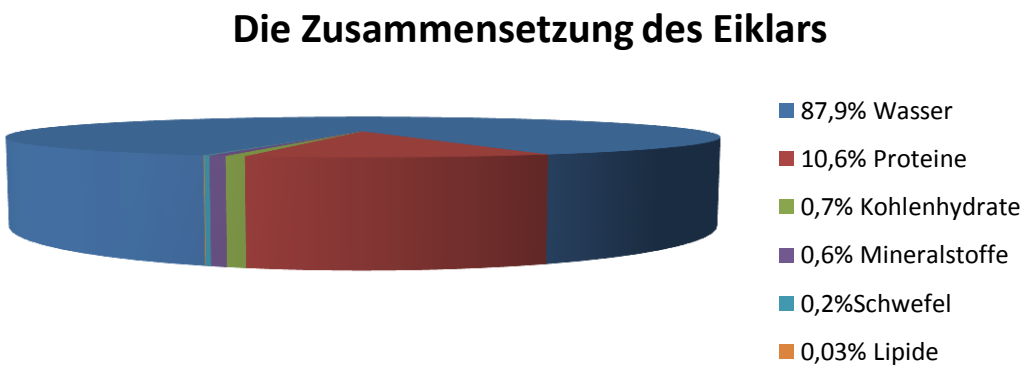


Abbildung 4: Die Bestandteile des Eiklars im Überblick[3]

Proteine zählen zu den natürlichen Makromolekülen und sind aus Aminosäuren aufgebaut. Der Grundaufbau von Aminosäuren ist in Abbildung 5 dargestellt. An ein Kohlenstoffatom sind eine Aminogruppe sowie eine Carboxygruppe gebunden, was auch den Namen Aminocarbonsäure beziehungsweise Aminosäure erklärt. Des Weiteren sind Bindungen zu einem Wasserstoffatom und einem variablen Rest vorhanden. Der variable Rest ist für die Aminosäure besonders wichtig, da dieser den Unterschied zwischen den 20 proteinogenen Aminosäuren, welche es nach der systematischen Biologie gibt, bildet. Diese 20 Aminosäuren sind ohne Ausnahme α-Aminosäuren, die die funktionellen Gruppen am gleichen Kohlenstoffatom tragen.

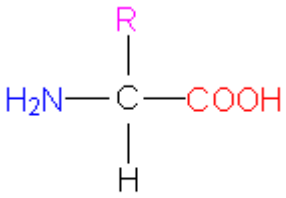


Abbildung 5: Die allgemeine Struktur einer Aminosäure

[2] Belitz, Grosch, Schieberle: „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“;
5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, Springer Verlag, 2001; S. 537
[3] nach 11

Besonders interessant sind nun aber die Eigenschaften der Aminosäuren: Diese liegen zum einen als Zwitterionen vor, da die Carboxylatgruppe als Protonenakzeptor und die Aminogruppe als Protonendonator fungiert. Weil Aminosäuren dadurch amphiphil sind, können sie sehr leicht ionisiert werden und in wässriger Lösung sowohl als Base als auch als Säure reagieren. Außerdem lösen sich Aminosäuren in polaren Lösungen besser als in unpolaren, was sie sehr gut wasserlöslich macht. [Nach 4, 6]

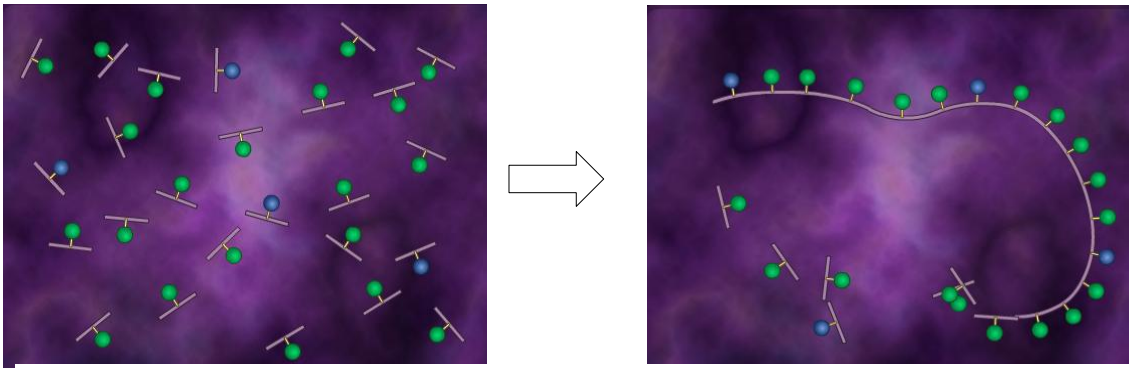


Abbildung 6 und 7: Die Aminosäuren vor der Polymerisation und die daraus folgende Primärstruktur

Das Protein als ein Makromolekül entsteht durch eine Polymerisation (vgl. Abb. 6, 7) dieser 20 existierenden polaren und unpolaren Aminosäuren. „Dieser Prozess kann als Kondensation (Elimination eines Wassermoleküls) betrachtet werden“ [4], wodurch die charakteristische Verknüpfung der Peptidbindung entsteht.

Diese ist, wie in Abbildung 8 dargestellt, eine Amid-Bindung. Die Merkmale einer Peptidbindung können aus einer Strukturanalyse gewonnen werden: Erstens besitzt diese Bindung keine freie Drehbarkeit und zweitens liegen alle Atome in einer Ebene. Zuletzt ergibt sich durch das Verlagern der freien Elektronenpaare am Stickstoffatom sowie der CO-Doppelbindung eine neue mesomere Grenzstruktur, was ebenfalls in Abbildung 8 gezeigt wird.

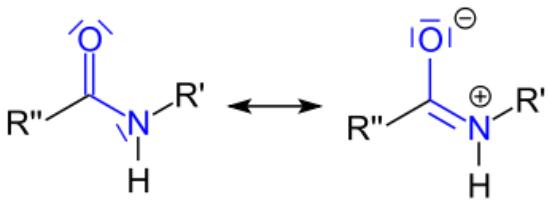


Abbildung 8: Die Mesomerie der Peptidbindung

Nach der Verbindung der Aminosäuren durch eine Kondensation spricht man von einer linearen Primärstruktur von Proteinen. Diese besitzt die richtige Aminosäuresequenz, welche die Funktionsfähigkeit des Proteins garantiert.

[4] D. Voet, J. G. Voet, C. W. Pratt: „Lehrbuch der Biochemie“;
1. Auflage, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002; S. 85

Eine typische Erscheinung bei Makromolekülen, welche eine enorme Länge aufweisen, sind Wechselwirkungen. Diese treten zwischen Teilen desselben Moleküls auf. Deswegen entsteht die Sekundärstruktur, die typischerweise in einer Faltblattstruktur oder in einer Helix-Struktur vorkommt.

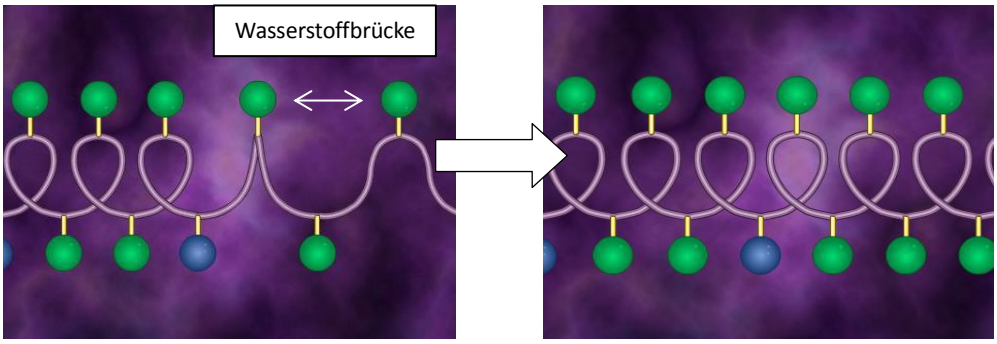


Abbildung 9 und 10: Die Helixstruktur eines Proteins durch Wasserstoffbrückenbindungen

Die dreidimensionale Sekundärstruktur entsteht aus der Primärstruktur, die durch die Wirkung von Wasserstoffbrückenbindungen helikal eingedreht wird (vgl. Abb. 9, 10).

Proteine treten in der Natur in vielfältigen Strukturen auf. Im Eiklar handelt sich um globuläre Proteine, die entweder eine Tertiärstruktur oder eine Quartärstruktur aufweisen.

Weiter wird die dreidimensionale Tertiärstruktur eines Proteins durch die vorherrschenden intermolekularen Wechselwirkungen der Molekülreste bestimmt. Diese ausschlaggebenden Wechselwirkungen sind Van-der-Waals-Kräfte, Dipol-Dipol-Wechselwirkungen, Ionenbindungen, Wasserstoffbrücken sowie Disulfidbindungen und führen zu weiteren Verwindungen des Proteinstrangs (vgl. Abb. 11). Ausgehend von diesen Kräften entstehen eine charakteristische Anordnung in der Tertiärstruktur sowie die später genannte Funktion der Proteine.

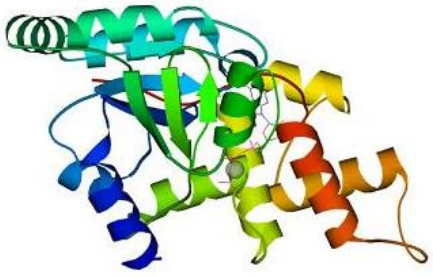


Abbildung 11: Die Tertiärstruktur eines Proteins

Eine weitere Form von globulären Proteinen im Eiklar ist die in Abbildung 12 dargestellte Quartärstruktur. Typischerweise besteht diese funktionelle Einheit aus vielen einzelnen Proteinsträngen. Diese werden genau wie in der Tertiärstruktur mit intermolekularen Wechselwirkungen stabilisiert, was die räumliche Geometrie und somit die Funktion des Proteins garantiert.

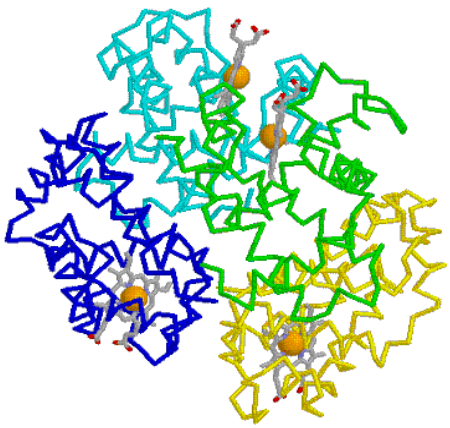


Abbildung 12: Die Quartärstruktur eines Proteins

Die Tertiär- und Quartärstruktur von Proteinen kommen im Eiklar des Hühnereis vor. Die Phasen des dickflüssigen und dünnflüssigen Eiklars unterscheiden sich lediglich am Ovomucingehalt. Beim Dickflüssigen ist dieser viermal so hoch und verursacht folglich eine höhere Viskosität.

Dieses Ovomucin ist ein relativ kleines Protein in rohem Eiweiß. An die Primärstruktur dessen ist eine Vielzahl von Kohlenhydrateinheiten gebunden. Außerdem ist ein wesentlicher Teil von den Hydroxylgruppen des Ovomucin mit Schwefelsäure verestert. Im Eiklar sind natürlich noch weitere Proteine vorhanden wie beispielsweise Ovalbumin, Ovotransferrin, Ovomucoid sowie Lysozym.

Diese Proteine besitzen vielfältige Funktionen. Zum einen dienen sie zur Verteidigung gegen Mikroorganismen. Dies ist für das Hühnerei zum Schutz des hochwertigen Nährstoffinhalts besonders wichtig. Zudem sind diese Makromoleküle für die Entwicklung eines neuen Lebewesens unerlässlich, da Strukturproteinen den Aufbau von Zellen und Bindegewebe ermöglichen. Selbstverständlich erfüllen sie auch ihre Aufgaben als Botenstoffe sowie Reservestoffe. Dies kann man gut am Beispiel des Hühnereis erkennen. Das Ei stellt in Bezug auf Nährstoffe ein abgeschlossenes System dar, da der Embryo nicht mit dem Mutterorganismus über eine Nabelschnur wie bei Säugetieren verbunden ist.

Im späteren Praxisteil werden die Eigenschaften von Proteinen im Eiklar experimentell erprobt.

[Nach 1, 4, 6, 12, 13, 14, 27, 28, 36]

2.2.2 Nicht alles was glänzt ist Gold! – Lipidaufbau des Dotters

Beim Dotter unterscheidet man den Bildungsdotter sowie den Nahrungsdotter. Der Bildungsdotter ist das Zytoplasma der Eizelle und bildet den Embryo, wohingegen der Nahrungsdotter – wie bereits der Name verrät – ein Gemisch aus Nährstoffen ist, mit denen der Embryo versorgt wird.

Außerdem enthält der Dotter zwei Gruppen von Partikel: Das sind zum einen die Dottertröpfchen, welche mit unterschiedlicher Größe einen Durchmesser von 20 bis 40 µm aufweisen, „Fetttröpfchen ähneln, überwiegend aus Lipiden bestehen und zum Teil Proteinmembran haben“[5].

Zudem weisen die deutlich kleineren Granula mit 1 bis 1,3 µm eine weniger einheitliche Form auf. „Sie haben eine Substruktur, bestehen im Wesentlichen aus Proteinen, enthalten aber auch Lipide und Mineralstoffe.“[6]

Der „Eidotter ist eine Fett-in-Wasser-Emulsion mit einer Trockenmasse von ca. 50%“. [7] Diese Masse besteht zu einem Drittel aus Proteinen und zu zwei Drittel aus Lipiden. Das nachfolgende Diagramm soll diese Nährstoffanteile im Zellplasma veranschaulichen.

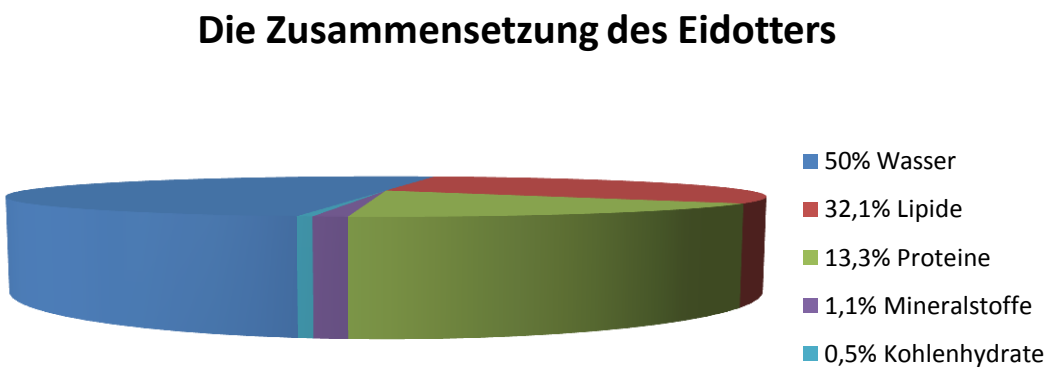


Abbildung 13: Die Bestandteile des Eidotters im Überblick[8]

[5] Belitz, Grosch, Schieberle: „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“; 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, Springer Verlag, 200; S. 541
[6] siehe Fußnote 5
[7] siehe Fußnote 5
[8] Nach 15

Von den darin enthaltenen Proteinen liegen drei verschiedene Arten vor: Diese sind Levitine, Lipovitelline und Phosvitine. Dabei beinhaltet die erstgenannte Gruppe wasserlösliche, globuläre Proteine, wohingegen Lipovitelline nicht kovalente Aggregate von Lipiden und Proteinen – also Lipoproteine – darstellen. Zuletzt handelt es sich bei Phosvitine um Glykoproteine, welche mit einer Kohlenhydratgruppe verbunden sind.

Im Gegensatz dazu ist die Gruppe der Lipide eine Vielzahl von strukturell unterschiedlichen, chemischen Stoffen. Lipide ähneln sich nur in ihrer sehr geringen Polarität und damit in ihren Lösungseigenschaften. Sie sind in allen unpolaren Lösungsmitteln (z.B. Benzin, Benzol, Hexan) sehr gut löslich, nicht aber in Polaren (z.B. Wasser).

Ferner ist die Farbe des Eidotters auf die Carotinoide zurückzuführen, welche ebenfalls als Lipide einzuordnen sind und vor allem durch das Futter des Geflügels bestimmt werden. Wird ein Huhn beispielsweise mit viel Mais gefüttert, spiegelt sich dies in der kräftigen Farbe des Eigelbs wieder.

Um diese beiden Stoffgruppen der Proteine und Lipide für das Küken im Hühnerei bereitzustellen, müssen sich diese Stoffe vereinen. Dies funktioniert in Komplexen nur mit einem amphiphilen Vermittler, auch Emulgator genannt. Dieser besitzt sowohl hydrophobe als auch hydrophile Eigenschaften. Der vorhandene Emulgator im Eidotter ist das Lecithin. Der Name kommt vom Griechischen *lekithos*, was übersetzt *der Dotter* bedeutet. Dieses ist ein Phospholipid – zählt zu der Gruppe der Phosphatidylcholine – das am zentralen Glycerin neben den höheren Fettsäuren (hydrophob) noch Phosphorsäure und eine organische Base (hydrophil) trägt (vgl. Abb. 14). [Nach 4, 6, 16, 17, 18, 19, 34, 42]

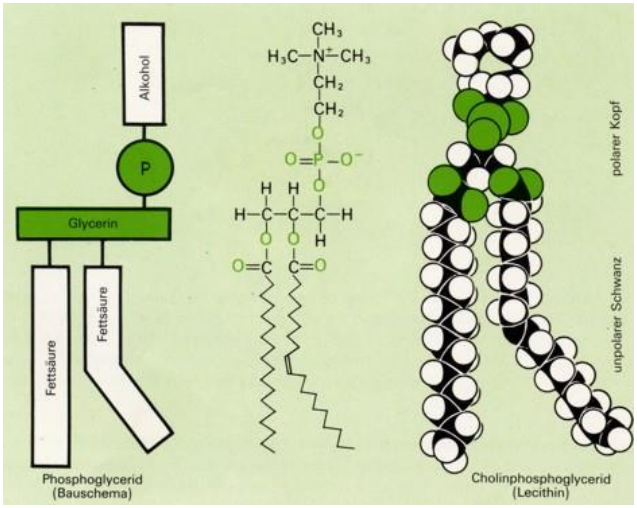


Abbildung 14: Die Struktur des Emulgators Lecithin

Die Emulgatorwirkung des Lecithins wird später im Praxisteil bei der Herstellung von Mayonnaise noch genauer betrachtet. Außerdem werden die Eigenschaften von Lecithin und Fett bei der Fettfleckprobe verglichen.

2.2.3 Ein gut durchdachtes Schutzsystem – molekulare Zusammensetzung der Eischale

Die Schale ist grundsätzlich aus Calciumcarbonat – Calcit – (vgl. Abb. 15) und Proteinfasern in einem Verhältnis von 50:1 aufgebaut. Außerdem ist ein sehr geringer Anteil an Magnesiumcarbonat und -phosphat enthalten. Wie bereits beim Aufbau des Hühnereis unter 2.1 angesprochen schließt sich innen an die Kalkschale das Eierschalenhäutchen an (vgl. Abb. 16). Dieses bestimmt die Form des Eies und schützt den nährstoffreichen Inhalt vor Bakterien. Diese Membran ist aus kollagenhaltigen Fasern aufgebaut. Kollagen (vgl. Abb. 17) ist das meist vorkommende Strukturprotein bei vielzelligen Lebewesen und tritt vor allem im Bindegewebe auf. Diese Fasern ermöglichen ein „biopolymeres Netzwerk“[9] zwischen dem Inhalt des Eies und der äußeren Kalkschale. Sie garantieren dabei einen Transport von Nährstoffen für das heranwachsende Küken und stellen die Abwehr von Mikroorganismen am Calciumcarbonat-Mantel sicher.

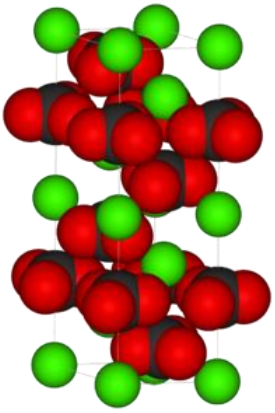


Abbildung 15: Elementares Calcit $Ca[CO_3]$

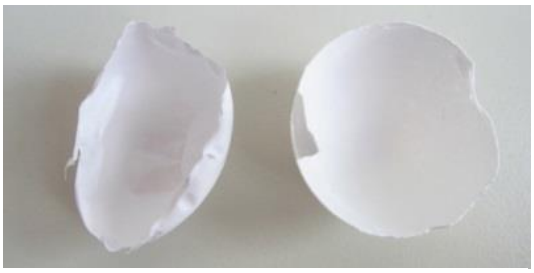


Abbildung 16: Eierhäutchen, Kalkschale (v. l.)

Durch die Poren der porösen Kalkschale ist außerdem ein Austausch von Gas und Flüssigkeit möglich. Die Sauerstoffversorgung durch die Schale ist für das Küken im Ei essentiell und darüber hinaus wird trotz des Wärmeaustausches das Austrocknen des Hühnereies verhindert. Die Geometrie wird unter 2.3 noch einmal konkretisiert sowie die Stabilität der Kalkschale im Praxisteil unter 3.2.2 erprobt. Dieses gut durchdachte System garantiert die Versorgung und den Schutz für den Embryo bei der Brut.

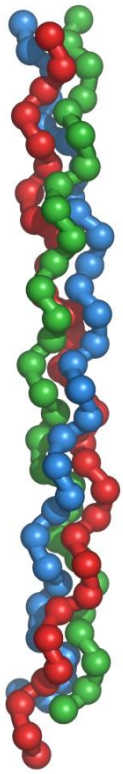


Abbildung 17: Eine Kollagen-Tripelhelix

[9] http://eierschale.wordpress.com/2012/05/04/eggshell-membrane/; 2.Absatz

Ein interessantes Detail ist außerdem die Farbe der Kalkschale, welche keinesfalls auf die Fütterung und Haltung des Huhnes zurückzuführen ist. Die Farbe stellt nur ein Kennzeichen der Geflügelrasse dar, wobei es eine große Vielfalt an Vogeleiern gibt (vgl. Abb. 18). Am Beispiel von Wildvögeln lässt sich dies nochmals veranschaulichen: Die Farbe der Eischale unterstützt in freier Wildbahn die Tarnung am Brutort. Eierschalen von Vögeln, die in gebauten Nestern auf Bäumen oder gescharrten Mulden am Boden (vgl. Wachtel) brüten, weisen zur Tarnung vor Fressfeinden häufig braune, grüne oder gelbe Farbtöne auf. Diese werden durch körpereigene Pigmente wie zum Beispiel Blut verursacht. Die Eischalen der Höhlenbrüter hingegen sind meist weiß.

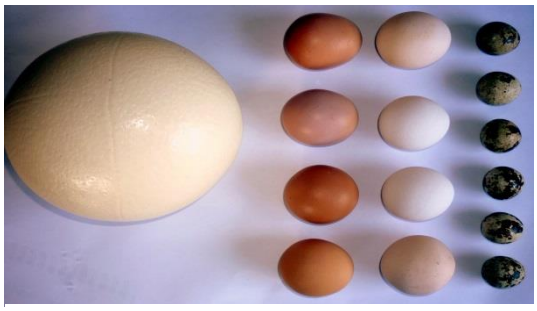


Abbildung 18: Die Vielfalt der Vogeleier - Stauß, Huhn, Wachtel (v.l.)

Beim Hühnerei ist der einzige Unterschied, den die Farbe im Hausgebrauch verursacht, das bessere Färben der weißen Eier an Ostern. Im Geschmack ist kein Unterschied zwischen braunen und weißen Eiern zu erkennen. [Nach 4, 20, 21, 22]

2.3 Nicht alles was rollt ist eine Kugel! – die Geometrie des Hühnereis

Jeder kennt sie, die Form des Hühnereis. Doch wenn man nun genauer hinsieht, dieses besondere Oval mehr wissenschaftlich betrachtet, ist es gar nicht so einfach, diese Form einzuordnen. Zuerst ist es jedoch wichtig, die Begriffe rund um das Ei uns seine Geometrie zu definieren.

Hierbei stößt man schon auf die erste Schwierigkeit: Für das Oval gibt es keine eindeutige Definition. Man sagt häufig, ein „Oval ist eine in sich geschlossene ebene Linie, die ellipsenförmig ist oder die Form eines Hühnereis hat“. [10] Außerdem gilt, dass eine Eilinie oder Eikurve den Umriss des Hühnereis bezeichnet. Da das Ei an einem Ende schmaler wird, hat es im Gegensatz zur Ellipse nur eine Symmetrieachse (vgl. Abb. 19). Darüber hinaus sind die Linien stückweise zweimal stetig differenzierbar, was bedeutet, dass man die Linie in mehreren Intervallen zweifach ableiten kann und sie Sprungstellen (Unstetigkeitsstellen) besitzt. Die Eilinie ist konvex und besitzt eine echt positive Krümmung. Der Unterschied zwischen Eikurve und Rollbahn ist später in den praktischen Untersuchungen bei der Beschreibung des Rollens von Bedeutung. Außerdem wird im Zusammenhang damit auf die biologischen Hintergründe hingewiesen, wobei unter 3.2.3 die Frage geklärt wird, warum das Ei keine Kugel ist und es so *komisch* rollt. „Man unterscheidet zwischen dem Oval, der Eifigur (Ovoid) und dem Eikörper so wie man zwischen der Kreislinie, der Kreisfläche und der Kugel unterscheidet.“ [11] (vgl. Abb. 20)

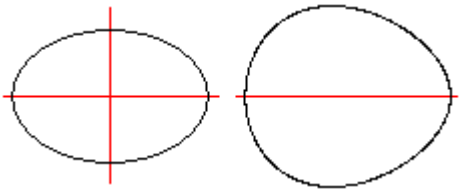


Abbildung 19: Ellipse und Eikurve/-linie im Vergleich

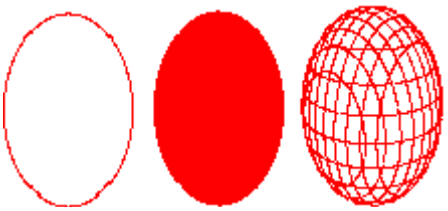


Abbildung 20: Das Oval, die Eifigur, der Eikörper (v. l.)

Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten, wie man die Eikurve aus einer Ellipse konstruieren kann. Hierauf wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Diese Geometrie ist im Laufe der Evolution entstanden und hat eine optimale Strategie zum Schutz des Embryos während der Brut entwickelt. Die später folgende physikalische Praxis geht auf die Vorteile der Geometire näher ein. [Nach 23, 24]

[10] http://www.mathematische-basteleien.de/eilinien.htm
[11] Siehe Fußnote 10

2.4 Wie „natürlich“ ist er wirklich? – mathematische Grundlagen zur Funktion des natürlichen Logarithmus

Auf den ersten Blick ist dieses Kapitel im Zusammenhang der Theorie der Kuckuck im Nest. Die nachfolgenden mathematischen Grundlagen stehen nicht in Verbindung zu den anderen ausgeführten Kapiteln. Im Laufe der Praxis wird sich jedoch herausstellen, dass die Grundlagen zum natürlichen Logarithmus für die Experimentalreihe zur mathematischen Funktion der Rollbahn des Eis unter 3.2.3 wichtig sind.

Definition:

„In der Exponetialgleichung $e^x = y$ nennt man den Exponenten x den natürlichen Logarithmus von y. Man schreibt $x = \ln(y)$.

Die Umkehrfunktion der natürlichen Exponentialfunktion heißt Funktion des natürlichen Logarithmus. Sie wird mit $x \rightarrow \ln(x)$, $x \in R^+$, bezeichnet.“ [12] Nun besitzt die Funktion des natürlichen Logarithmus einige typische Eigenschaften. Zum einen weist diese ein asymptotisches Verhalten auf, wenn man x gegen eine unendlich große Zahl laufen lässt. Der ln(x) strebt dann auch gegen Unendlich wodurch eine waagrechte Asymptote entsteht. Es gilt also:

$$\lim_{x \to \infty} \ln x = +\infty$$

Zudem gilt für eine senkrechte Asymptote x = 0:

$$\lim_{x \to 0+} \ln x = -\infty$$

Hierbei wird der Grenzwert der Funktion beliebig klein. Des Weiteren ist über den Funktionsgraphen des natürlichen Logarithmus (vgl. Abb. 21) auszusagen, dass dieser nur für die positiven reellen Zahlen definiert ist: $\boldsymbol{D_{\ln(x)} =]0; +\infty]}$

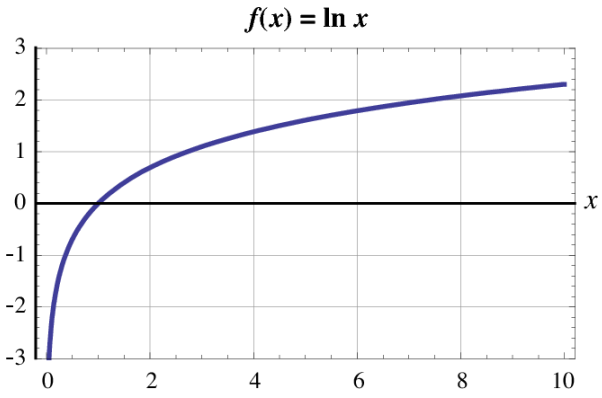


Abbildung 21: Ein Ausschnitt des natürlichen Logarithmus: f(x) = ln x

Außerdem ist die Funktion streng monoton steigend, differenzierbar und die Wertemenge umfasst die ganze Menge der reellen Zahlen: $\boldsymbol{W_{\ln(x)} = [-\infty; +\infty]}$

Charakteristisch ist das sehr langsame logarithmische Wachstum, welches langsamer zunimmt als das von jeder positiven Potenz. [Nach: 5, 25]

[12] H. Götz, M. Herbst, C. Kestler, H. Kosuch, Dr. J. Novontný, B. Sy, T. Thiessen, A. Zitterbart: „Lambacher Schweizer 11 - Mathematik für Gymnasien“; 1. Auflage, Stuttgart, Ernst Klett Verlag, 2009; S. 155

2.5 Der Zweck des Hühnereis – ein Spagat zwischen Massenproduktion und Erhaltung der Art

Im Anschluss an die molekularen und physikalisch-mathematischen Grundlagen werden in den folgenden Kapiteln der Zweck und die Verwendung des Hühnereis genauer erläutert. Zuerst wird dabei der ursprüngliche, biologische Grund nach der evolutionären Entwicklung des Eis angesprochen.

2.5.1 Das Hühnerei zur Arterhaltung – ein „natürliches" Wunder

Das Ei ist die „weibliche Fortpflanzungszelle […] der (vielzelligen) Lebewesen". [13] Als diese beinhaltet sie das Erbgut mütterlicherseits, bei vorausgegangener Befruchtung auch väterlicherseits, und ist zur Arterhaltung von Vögeln unerlässlich. Die Größe des Hühnereis ist ganz klar mit der nötigen Versorgung des Embryos während der Brutzeit zu erklären. Geschützt durch die Schale liegt die Reservesubstanz im Dotter vor, da die Entwicklung nicht wie bei Säugetieren im Körper der Mutter stattfindet. Detailliertere Erklärungen zur Biologie des Eis und der Entwicklung des Kükens darin werden im Rahmen dieser Seminararbeit nicht gegeben. [Nach 26]

Der natürliche Trieb des Huhns, Eier abhängig von der Brutfürsorge und Umwelteinflüssen zur Brut abzulegen, wird durch die industrielle Eierproduktion stark beeinflusst. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass Hennen die Eier unmittelbar nach der Eiablage abgenommen werden. Die Eierproduktion wird im nachfolgenden Kapitel genauer vorgestellt. Für die Hühner ist es wohl nur noch auf Bauernhöfen ohne intensivierte Hühnerhaltung möglich, ihre natürlichen Triebe auszuüben.

[13] http://www.wissen.de/lexikon/ei

2.5.2 Ohne das Ei „rollt“ da gar nichts – Verwendung des Hühnereis in der Nahrungsmittelindustrie

Schon in der Steinzeit hat man erkannt, dass man die Eier von Vögeln als Nahrungsmittel verwenden kann. Dies ist der Ursprung zur immer weiter entwickelten und erforschten Nutzung des Eis im Haushalt und der Industrie. Als sehr bedeutendes Nahrungsmittel liegt der steigende Jahresverbrauch eines Bundesbürgers von Eiern derzeit bei 214 Stück.

Das Ei findet in der Nahrungsmittelindustrie vielseitige Verwendung. Wie bereits unter 2.2.1 und 2.2.2 angedeutet, haben das Eiklar und der Eidotter besondere Eigenschaften. Diese Phänomene auf molekularer Ebene werden in der Produktion von Lebensmitteln genutzt. Eine wichtige Eigenschaft des Hühnereis ist die thermische Koagulierbarkeit, welche der Grund für die Funktion als Bindemittel ist. Außerdem ist eine weitere Anwendung des Hühnereis in der Lebensmittelindustrie die Auflockerung von Produkten, was durch das Schaumbildungsvermögen des Eiklars ermöglicht wird. Darüber hinaus wird die Wirkung als Emulgator genutzt, welche auf das Lecithin im Eigelb zurückzuführen ist und die Bildung von Emulsionen verursacht.

Die vielseitige Verwendung wird im Praxisteil unter 3.1.1.4 und 3.1.2.3 beispielhaft an der Herstellung von Biskuit und an der Herstellung von Mayonnaise vertieft.

Da aber frische Hühnereier zerbrechlich und kurzfristig haltbar sind, werden aus dem Schalenei, dem unverarbeitetem Hühnerei, dem Eiklar oder dem Eidotter Eiprodukte (vgl. Abb. 22) hergestellt. Diese dienen zur Weiterverarbeitung in Süß- und Teigwaren, Mayonnaise, Salatsoßen, Trockensuppen, Fleischprodukten, Margarine oder Eiscreme.

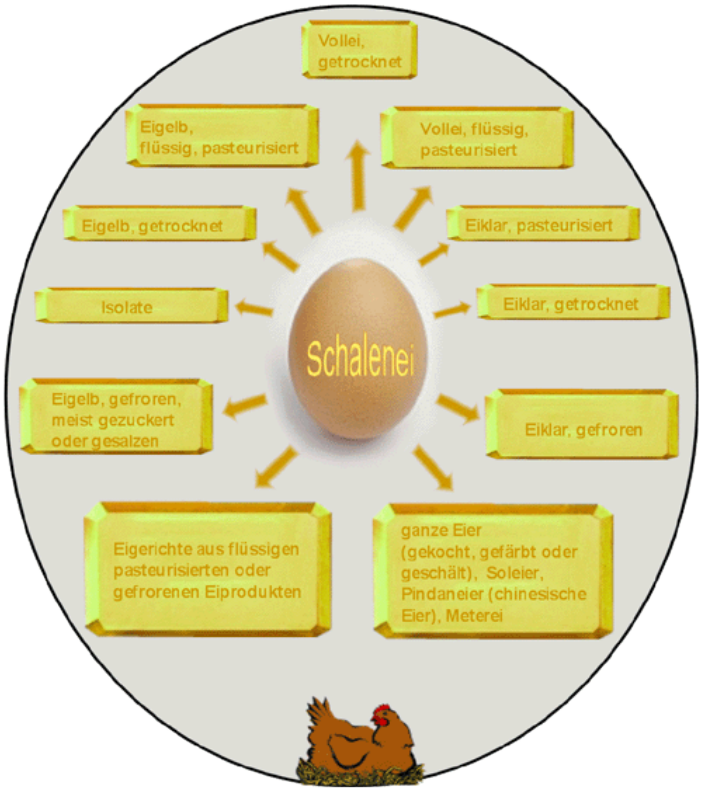


Abbildung 22: Ein Überblick über die Eiprodukte

Natürlich birgt die massenhafte Verwendung von Hühnereiern aber nicht nur Vorteile, sondern auch eine Reihe von Nachteilen. Eine große Nachfrage der Industrie und der Bevölkerung soll natürlich durch ein großes Angebot der Produzenten befriedigt werden. Dies bringt aber selbstverständlich eine Intensivierung der Haltung von Hühnern mit sich. Diese Hennen werden nun durch intensive Fütterung auf möglichst engem Raum zu Höchstleistungen gebracht. Dass dabei die natürlichen Triebe der Hennen auf der Strecke bleiben und der Tierschutz aus Profitgründen diskussionserregend verletzt wird, liegt wohl auf der Hand. So ist die Haltung von Hühnern wie auch jene von vielen andern Tieren ein Brennpunkt in der heutigen Nahrungserzeugung. [Nach 27, 28, 29]

2.5.3 „Käfig, Boden oder Freiland?!“ – (Massen-)Produktion des Hühnereis

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die Problematik einer alltäglichen Szene im Supermarkt gegeben – der Eiereinkauf. Bei diesem muss zwangsläufig jeder Mensch – außer man ernährt sich vegan – des Öfteren eine Entscheidung treffen, welche bei den einen leichter bei den anderen schwerer gefasst wird. Diese Entscheidung basiert auf einem Kompromiss zwischen Preis und artgerechter Haltung. So werden nun die vier verschiedenen Haltungsformen von Legehennen vorgestellt, was im Allgemeinen eine Entscheidungshilfe beim Kauf von Hühnereiern darstellen kann.

2.5.3.1 Die Freilandhaltung und ihre Merkmale

Abbildung 23: Die Freilandhaltung von Legehennen

In der ersten Haltungsform in dieser Reihe – der Freilandhaltung – ist, wie der Name schon verrät, ein Mindestauslauf von vier Quadratmeter pro Huhn vorgeschrieben. Für die Stallungen gelten allerdings die gleichen Regelungen wie in der später konkretisierten Bodenhaltung. Hierbei wird lediglich ein Quadratmeter Platz für neun Hennen bereitgestellt. Im Freien (vgl. Abb. 23) sind zusätzlich Unterstände für den Schutz vor natürlichen Feinden notwendig. Dadurch, dass die Legehennen tagsüber bei jeder Witterung den Gang ins Freie wahrnehmen können, ergibt sich der Vorteil, dass das Geflügel nicht so empfindlich ist wie in anderen Formen der Haltung. Die Nachteile in der Freilandhaltung sind teilweise vergleichbar mit der Bodenhaltung. Diese sind beispielsweise soziale Konflikte zwischen den Hennen, welche auf Grund der großen Zahl einer Haltungsgruppe verursacht werden. Des Weiteren kommen die Tiere mit ihrem eigenen Kot in Berührung, was sie anfällig für Parasiten macht und den Bedarf an Medikamenten erhöht. Mit der näher an der Natur angelehnten Haltung ergeben sich speziell hier noch eine schwankende Eierqualität, zusätzliche Tierverluste sowie ein verglichen höherer Arbeitsaufwand. [Nach 30, 31, 32]

2.5.3.2 Ökologische Haltungen von Legehennen

Darüber hinaus ist die ökologische Haltung von Legehennen noch mehr am natürlichen Leben des Geflügels orientiert. Hier leben die Hennen vergleichbar wie ihre Artgenossen in der Freilandhaltung (vgl. Abb. 24). Dagegen aber nicht mit neun, sondern nur mit sechs Hennen pro Quadratmeter Stallfläche. Zusätzlich ist in dieser Form die Haltung in Käfigen und das Kürzen der Schnäbel grundsätzlich untersagt. Das Geflügel darf natürlich nur mit Futter aus ökologischer Erzeugung versorgt werden, wobei dies hauptsächlich im eigenen Betrieb erzeugt werden muss. Eier dieser Haltung sind mit dem Bio-Siegel (vgl. Abb. 25) sowie mit einem Zeichen eines Bio-Anbauverbandes. [Nach 30, 31, 32]

Abbildung 24: Legehennen in ökologischer Haltung

Abbildung 25: Das deutsche staatliche Bio-Siegel

2.5.3.3 Die Bodenhaltung – ein guter Kompromiss?

Eine intensivierte Haltungsform ist die Bodenhaltung (vgl. Abb. 26). Diese deckt den größten Teil der Hühnerhaltung und Eierproduktion in Deutschland ab. So werden in diesem System bis zu neun Hühner pro Quadratmeter auf dem Boden gehalten, wobei kein Freilauf wie in der Freilandhaltung vorgeschrieben ist. Ein Nachteil bei der intensiven Bodenhaltung sind die verstärkt auftretenden sozialen Konflikte, welche sich bis hin zum Kannibalismus steigern können. Die Tiere können nur mit einer Streufläche ihre natürlichen Verhaltensweisen ausleben, wo sie wiederum mit ihrem Kot in Kontakt kommen und so anfälliger für Parasiten werden. Der Bedarf an Medikamente und der Verlust sind folglich höher, da die Hennen kein starkes Immunsystem besitzen. [Nach 30, 31, 32]

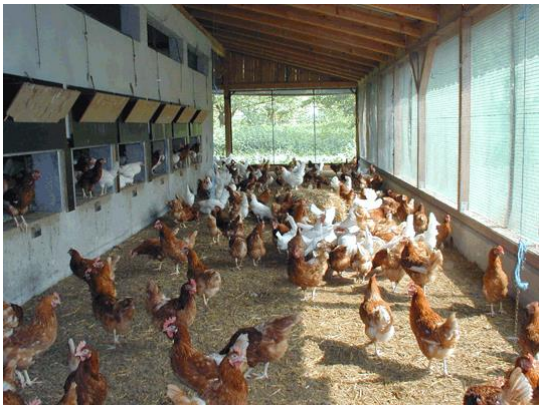


Abbildung 26: Die Bodenhaltung von Legehennen

2.5.3.4 Die Kleingruppenhaltung als intensivste Form der Eierproduktion

Abbildung 27: Die Kleingruppenhaltung von Legehennen

Zu guter Letzt die meist diskutierte Haltungsform – die Kleingruppenhaltung. Diese Haltungsform war bislang als Käfighaltung bekannt, wird aber nach Bestimmungsänderungen nicht mehr als solche bezeichnet, sondern zählt nur noch zum Käfighaltungssystem (vgl. Abb. 27). Die meisten Arbeitsschritte werden hier automatisch von Maschinen erledigt, so zum Beispiel die Fütterung oder der Abtransport von Kot und Eiern. Dieses Haltungssystem ist äußerst umstritten, da das Geflügel dem natürlichen Verhalten wie Scharren und Flügelschlagen aus Platzmangel nicht nachkommen kann. Dem gegenüber steht der Vorteil, dass die Hühner nicht mit ihrem eigenen Kot in Berührung kommen, sich also nicht so leicht mit Krankheiten infizieren. Die Verabreichung von Medikamenten ist nicht ganz so häufig nötig und Verluste daher eher gering. Natürlich hat die Kleingruppenhaltung noch weitere wirtschaftliche und arbeitstechnische Vorteile für den Landwirt, der auf kleinerer Fläche mehr Legehennen unterbringen kann. [Nach 30, 31, 32]

2.5.3.5 Die Hühnerhaltung im Überblick

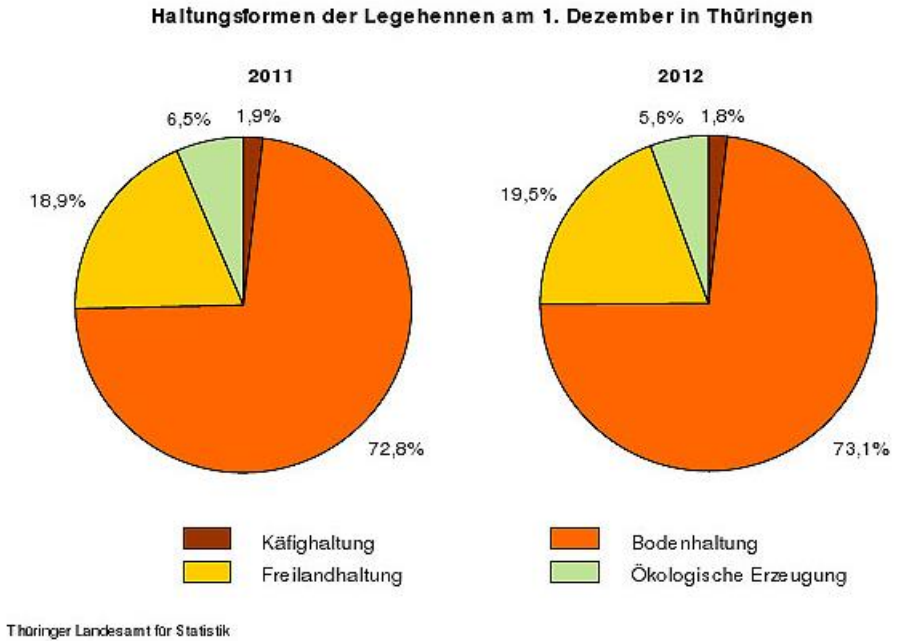


Abbildung 28: Die Verteilung der Haltungsformen von Legehennen (Thüringen)

Im Überblick (vgl. Abb. 28) sind die Anteile der Haltungsformen in Thüringen – stellvertretend für Deutschland – dargestellt. Aus diesen beiden Diagrammen ist zu entnehmen, dass bei der Produktion von Hühnereiern nach Kompromissen gesucht wird. Einerseits ist die ökologische Haltung von Tieren mit erhöhtem Aufwand und niedrigerem Gewinn verbunden und andererseits wird versucht die Kleingruppenhaltung durch neue Richtlinien aus Tierschutzgründen zu reduzieren.

Dieses Kapitel soll vor allem dazu dienen, dass man über die Haltung von Hennen aufklärt, der Konsum von Hühnereiern bewusst erfolgt und eigene Überlegungen angestellt werden, wie zum Beispiel, was mit den 50% der geschlüpften Küken bei der Aufzucht von Legehennen geschieht? Diese sind nämlich männlich und können keine Eier legen. [Nach: 32, 33]

Mit diesen gedanken beginnt im Folgenden der Praxisteil dieser Seminararbeit. Zur Veranschaulichung der theoretischen Grundlagen werden die Eigenschaften, der Aufbau sowie chemische und physikalische Phänomen genauer betrachtet.

3 Harte Schale, weicher Kern, aber was steckt wirklich dahinter? – Praktische Untersuchung des Hühnereis

3.1 Chemische Untersuchungen der Eistrukturen

3.1.1 Alles „klar“ im Ei? – Untersuchung des Eiklars

Als erstes werden die molekularen Strukturen des Hühnereis genauer betrachtet. Folgende Versuche betreffen das Eiklar des Hühnereis, wobei man im ersten Experiment die Struktur der charakteristischen Peptidbindung in den vorhandenen Proteinen nachweist.

3.1.1.1 Die Biuret-Reaktion – Nachweis der Peptidbindungen im Eiklar

Geräte: Reagenzglas, Reagenzglasständer, Reagenzglashalter, tiefe Schüssel, Gabel, Trichter, Gaskartusche, zwei Tropfpipetten

Chemikalien: 1 mL verdünnte Natronlauge, 5 mL Wasser, Eiklar eines Eis, Kupfersulfat-Lösung, Kochsalz

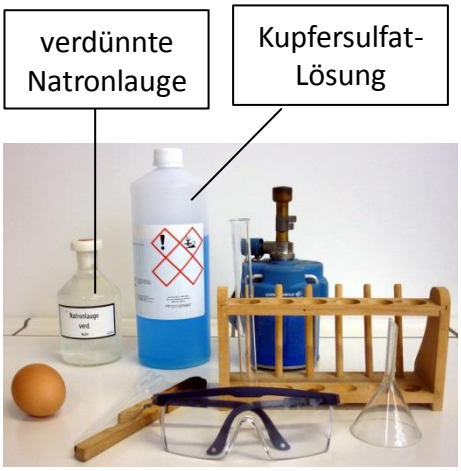


Abbildung 29: Die Materialien für die Biuret-Reaktion

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Zunächst versetzt man das Eiklar in einer Schüssel mit 5 mL Wasser, gibt zwei Spatelspitzen Kochsalz zu und verquirlt die Substanzen mit einer Gabel so lang, bis eine klare Lösung entsteht.
- Danach gibt man 4 mL dieser Eiklar-Lösung mit Hilfe eines Trichters in ein Reagenzglas und fügt 1 mL Natronlauge hinzu.
- Daraufhin erwärmt man diesen Ansatz ungefähr 10 Sekunden lang in der Sparflamme der Gaskartusche und tropft anschließend 5-10 Tropfen Kupfersulfat-Lösung zu!

Entsorgung: Alle Lösungen werden reichlich verdünnt in den Abfluss geben.

Versuchsbeobachtung:

- Beim Erwärmen der Lösung in der Sparflamme des Brenners (vgl. Abb. 30) lässt sich eine Verfestigung und Ansätze einer Ausflockung erkennen.
- Kurz nach dem Zugeben der Kupfersulfat-Lösung bemerkt man eine Hellblaufärbung, die sich schnell von einer Dunkelblau- bis zu einer Violett-Färbung entwickelt. Daneben lässt sich eine Ausklockung erkennen (vgl. Abb. 31).

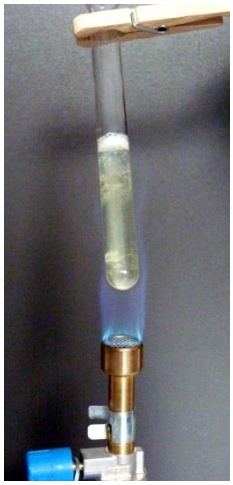


Abbildung 30: Erwärmen der Eiklar-Lösung

Abbildung 31: Die violette Färbung nach der Zugabe der Kupfersulfat-Lösung

Auswertung:

- Wie bereits im vorangegangen Kapitel der molekularen Struktur des Eiklars genauer erläutert, verknüpfen die Peptidbindungen die einzelnen Aminosäuren im Protein.
- Durch die Zugabe der Natronlauge und das Erhitzen flockt die Protein-Lösung aus und zerstört die eigentliche Struktur der Proteine. Dies bezeichnet man als Denaturierung von Proteinen, worüber im Anschluss ein Exkurs zur genaueren Erläuterung folgt.
- Mit den Cu^{2+}-Ionen der Kupfersulfat-Lösung fällt im alkalische Milieu das schwerlösliche, hellblau Kupferhydroxid aus:

$$\mathbf{Cu^{2+}_{(aq)} + 2\ OH^{-}_{(aq)} \longrightarrow Cu(OH)_{2(s)}}$$

- Jedoch bilden die Peptide im Eiklar mit den Cu^{2+}-Ionen einen Komplex, wodurch eine dunkelblaue Verfärbung zu erkennen ist. Im Anschluss kommt es rasch mit der Bildung eines Komplexes aus Kupfer(II)-Ionen und Proteinen zu einer violetten Farbvertiefung. Dieser Komplex ist so stabil, dass eine Fällungsreaktion des schwerlöslichen Salzes $Cu(OH)_2$ ausbleibt.

- Genauer werden bei diesem Versuch Peptidbindungen im Eiklar nachgewiesen. Voraussetzung dafür ist, dass die Peptide mindestens zwei Peptidbindungen besitzen:

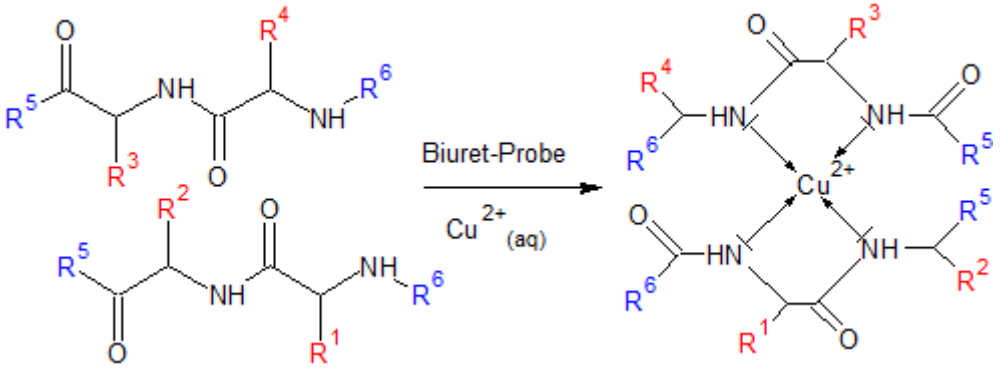


Abbildung 32: Die Biuret-Reaktion im alkalischen Milieu

- Das Zentrum des Komplexes, wie man in Abbildung 32 gut erkennen kann, bildet das positiv geladene Cu^{2+}-Ion. Dieses Ion zieht auf Grund der positiven Ladung die freien Elektronenpaare[14] der Stickstoffatome in den Peptidbindungen an sich.

- Bei der Biuret-Reaktion verändert sich erst durch das ausfallende Kupferhydroxid und dann durch den Cu^{2+}-Komplex die Lichtabsorption der Substanz so, dass Lichtwellen des sichtbaren Lichts absorbiert werden. Wie nach dem Phänomen der Farbigkeit kommt es dann zur Farberscheinung der Komplementärfarbe. Es werden Lichtwellen im Bereich von ca. 560 bis 630 nm absorbiert (vgl. Abb. 33), wodurch die Reflexion eine blaue bis violette Farberscheinung verursacht.

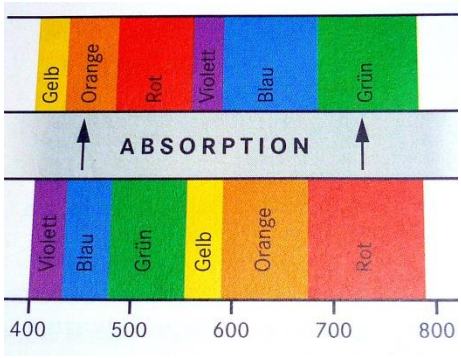


Abbildung 33: Spektralfarben (unten) und Komplementärfarben (oben

Literatur: nach 35

[14] Frei Elektronenpaare werden nur an der entscheidenden Stelle gezeichnet, nämlich an den Stickstoffatomen.

Exkurs: ***Was steckt hinter der Denaturierung von Proteinen?***

Als Grundlage für diese Frage werden unter 2.2.1 die Struktur und die Eigenschaften von Proteinen geklärt. Man spricht von einer Denaturierung eines Proteins im Allgemeinen, wenn die ursprüngliche räumliche Struktur dessen durch chemische oder physikalische Einflüsse verändert worden ist. Hierbei bleibt die biologische Funktion nicht erhalten. Die Sekundär- und Tertiärstruktur und damit auch die Quartärstruktur werden dabei aufgelöst, wobei die Primärstruktur, die Reihenfolge der aneinander geketteten Aminosäuren, bestehen bleibt. Eine derartige Veränderung kann

- zum einen durch die Änderung des **pH-Werts**,
- durch die Zugabe von **Alkohol**,
- zum andern durch **Hitzeeinfluss**,
- oder auch durch **mechanische Einwirkung**

verursacht werden.

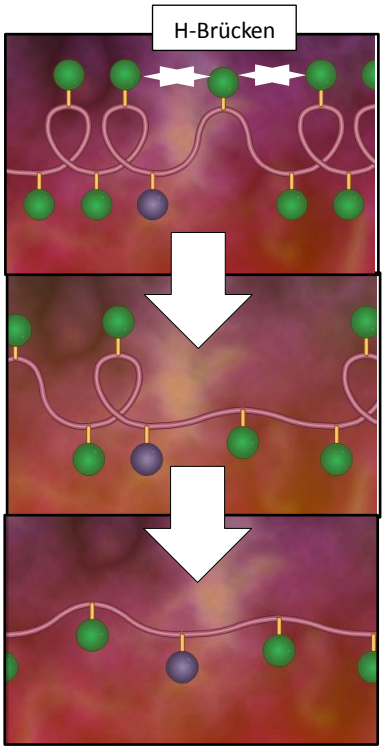


Abbildung 34, 35, 36: Die Denaturierung – Zerstörung der Proteinstruktur

Die Energie, welche durch **Hitzeeinfluss** zugeführt wird, bricht die Wasserstoffbrücken auf (vgl. Abb. 34 bis 36). So werden die dreidimensionalen Strukturen aufgelöst, woraufhin die offen vorliegenden Peptidketten Wassermoleküle einschließen. Die H_2O-Moleküle werden nämlich von den hydrophilen Aminosäureresten angezogen (vgl. Abb. 37). Daneben lagern sich die hydrophoben Reste der Aminosäuren gegenseitig aneinander (vgl. Abb. 38), wodurch ein wasserunlöslicher Zusammenschluss gebildet wird. Dies spiegelt sich in der typischen Trübung bis hin zur Weißfärbung des Eiklars in verschiedensten Versuchen wider.

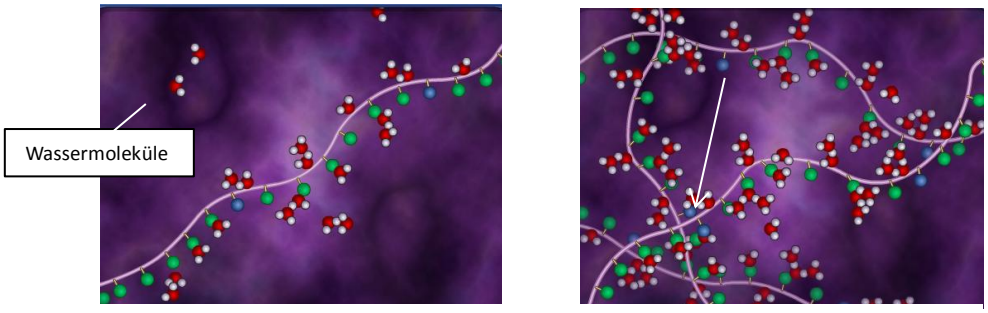


Abbildung 37 und 38: Die Anlagerung der H_2O-Moleküle an die polaren (grünen) Aminosäurereste sowie die gegenseitige Anlagerung der polaren (blauen) Aminosäurereste

Bei der **Säuredenaturierung** erfolgt auch eine Umstrukturierung der Proteine in einen energetisch günstigeren Zustand. Die Protonenabgabe der Säure verursacht eine Ladungsänderung, wodurch die Wasserstoffbrücken, ähnlich wie beim Hitzeeinfluss, unterbrochen werden. Die Protonen werden an die Carboxylatgruppe (COO^-) der Aminosäuren abgegeben, woraus zusätzlich Carboxygruppen (COOH) entstehen. Somit existiert die negative Ladung der Carboxylatgruppe nicht mehr sowie auch keine ionischen Wechselwirkungen zwischen den Aminosäuren (vgl. Abb. 39).

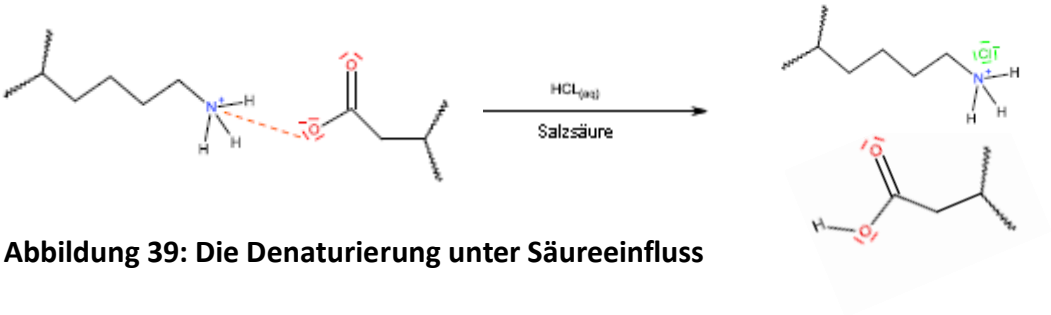


Abbildung 39: Die Denaturierung unter Säureeinfluss

Beim **Einfluss von Laugen** ändert sich ebenfalls die Zusammensetzung der Ionen. Es werden Aminogruppe der Aminosäurereste deprotoniert, was der Grund für eine weniger positive Ladung der Proteinen ist und folglich geringeren Wechselwirkungen mit negativ geladenen Gruppen vorhanden sind. Unter anderem werden den Carboxygruppen Protonen entzogen, sodass Carboxylatgruppen entstehen. Dadurch werden vorhandenen Wasserstoffbrücken zerstört und wiederum negative Ladungen der Proteine erzeugt, welche sich voneinander abstoßen.

Allgemein hat die Änderung des pH-Wertes die gleiche Folge wie die Hitze Einwirkung. Durch eine irreversible Denaturierung bildet sich eine nicht wasserlöslicher Zusammenschluss der Proteinketten (vgl. Abb. 37 und 38), wonach wiederum eine Trübung oder Weißfärbung vorliegt.

Bei der **Denaturierung durch Ethanol** werden die intermolekularen Wechselwirkungen (H-Brücken) von Proteinen untereinander und mit H_2O-Molekülen gestört (vgl. Abb. 40). Durch den leicht amphiphilen Charakter von Ethanol wechselwirken diese Moleküle zum einen mit den hydrophoben Resten der Aminosäuren. Zum andern herrschen auch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den hydrophilen Teilen des Ethanols und der Proteine sowie dem Wasser. Dadurch wird die räumliche Struktur der dreidimensionalen Proteinketten, welche sich in einer Hydrathülle befinden, aufgelöst und der bekannte weiße unlösliche Komplex der Proteine fällt aus.

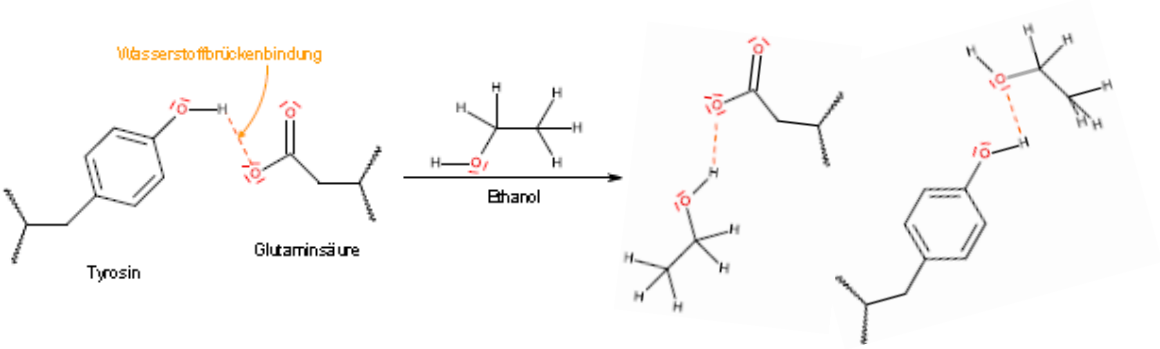


Abbildung 40: Schaubild zur Reaktion von Aminosäuren mit Ethanol

Die **mechanische Denaturierung** erfolgt wiederum auf Grund der Aufhebung der intermolekularen Wechselwirkungen. Es handelt sich hierbei genauso um eine Aufhebung der Sekundär- und Tertiärstruktur, wobei es sich dabei im Gegensatz zu den anderen Denaturierungen um einen reversiblen Vorgang handelt.
[Nach 37, 38, 45]

3.1.1.2 Die Xanthoprotein-Reaktion – Nachweis von aromatischen Aminosäuren im Eiklar

Als nächstes beschäftigt sich dieses Experiment mit den Resten der Aminosäuren, wobei ein häufiger Rest – der Aromatische – nachgewiesen wird.

Geräte: Petrischale mit Gegenstück zum Abdecken, eine Tropfpipette, tiefen Teller, Gabel

Chemikalien: Eiklar-Lösung, 1 mL konzentrierte Salpetersäure, 5 mL Wasser, Kochsalz

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Zuerst stellt man eine Eiklar-Lösung her, indem man das Eiklar mit 5 mL Wasser und einer Spatelspitze Kochsalz mit einer Gabel verquirlt, bis eine klare Lösung entsteht.
- Im Anschluss gibt man 2 mL der Eiklar-Lösung in eine Petrischale (vgl. Abb. 41) und versetzt diese tropfenweise mit 1 mL konzentrierter Salpetersäure.

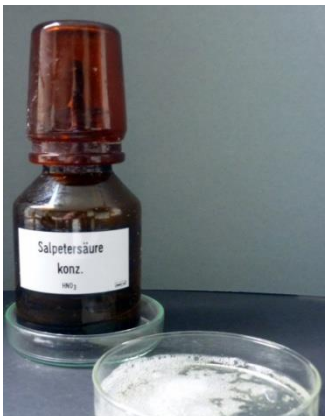


Abbildung 41: Die Versuchsvorbereitung der Xanthoprotein-Reaktion

Entsorgung: Das denaturierte Eiklar kann in den Restmüll gegeben werden.

Versuchsbeobachtung:

Vor der Zugabe der konzentrierten Salpetersäure | nach einer Stunde | nach drei Tagen

Abbildung 42 bis 46: Der Reaktionsverlauf der Xanthoprotein-Reaktion

- Bei der Zugabe der Salpetersäure flockt das Eiklar um den Eintrittspunkt des Tropfens schlagartig aus (vgl. Abb. 43).
- Nach einer Zeitspanne von einer Stunde tritt eine Gelbfärbung im Zentrum des Tropfens ein (vgl. Abb. 44).
- Nach drei Tagen ist die Eiklar-Lösung gänzlich ausgeflockt und die Gelbfärbung hat sich deutlich über die ganze Petrischale ausgeweitet (vgl. Abb. 45, 46)

Auswertung:

- Ähnlich wie bei der Biuret-Reaktion kommt es bei der Xanthoprotein-Reaktion zu einer schlagartigen Ausflockung, welche auf die Denaturierung der Proteine auf Grund des pH-Wertes zurückzuführen ist. Die Denaturierung unter Veränderung des pH-Werts wurde bereits im Exkurs unter 3.1.1.1 genauer erklärt.
- Wie bereits unter 2.2.1 aufgeführt, werden Aminosäuren aufgrund ihrer sonst gleichen Struktur nur anhand des Rests unterschieden. Man spricht von einem aromatischen Rest, wenn dieser einen Benzolring enthält. Mit diesem ergeben sich neue chemische Eigenschaften. Aminosäuren mit einem derartigen Rest sind beispielswiese L-Phenylalanin oder L-Tyrosin.

- Charakteristischerweise findet bei der Zugabe von Salpetersäure eine Nitrierung am Benzolring statt. Es handelt sich genauer um eine elektrophile, aromatische Substitution (vgl. Abb. 47).

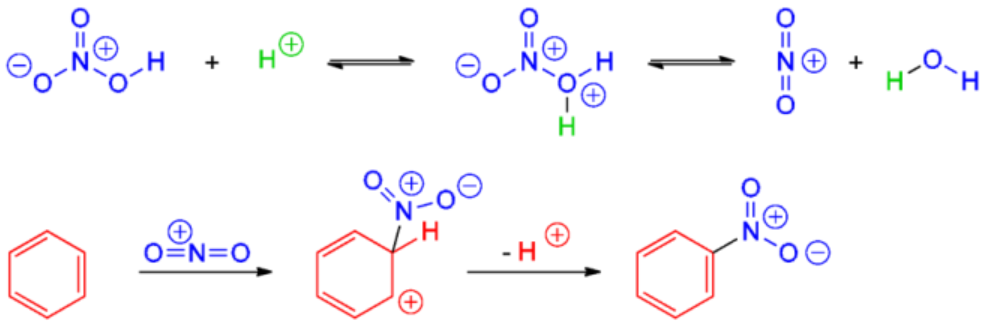


Abbildung 47: Der Mechanismus der elektrophilen aromatischen Substitution

- Bei diesem Mechanismus entsteht als erstes durch Protonierung der Salpetersäure (HNO_3) und Abspaltung eines Wassermoleküls das starke Elektrophil (NO_2^+). Dieses Elektrophil wird im Anschluss vom nucleophilen Aromaten angegriffen und erweitert durch Substitution das konjugierte System delokalisierter Elektronen. Auf diese Weise wird ein Wasserstoffatom durch die NO_2-Gruppe der Salpetersäure am Benzolring des Aminosäurenrestes ersetzt (vgl. Abb. 48).

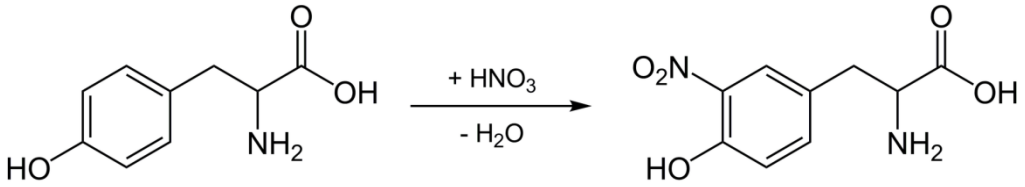


Abbildung 48: Die Xanthoprotein-Reaktion am Beispiel von L-Tyrosin

- Die dabei entstehende Gelbfärbung ist folgendermaßen zu erklären: Durch die Substitution wird das System der delokalisierten Elektronen des Benzolrings so erweitert, dass die Energie der Lichtwellen im Bereich des sichtbaren Lichts ausreicht, um diese Elektronen anzuregen.
- Wie bereits beim vorausgegangenen Versuch aufgeführt, veranschaulicht Abbildung 33 den Zusammenhang zwischen Spektral- und Komplementärfarben. Man kann daraus erkennen, dass beim Produkt der Xanthoprotein-Reaktion eine Absorption der Lichtwellen zwischen 400 bis 450 nm erfolgt.

Literatur: nach 39, 40

3.1.1.3 Denaturierungen des Eiklars – Die besondere Zerstörung

Der folgende Versuch kann sehr leicht auf dem Herd in einer Küche durchgeführt werden. Man kann anhand dieses Experiments die alltägliche Verwendung des Eis im Haushalt sehr gut erkennen.

Geräte: tiefe Schüssel, Pfanne, digitales Thermometer

Chemikalien: ein Eiklar

Abbildung 49: Versuchsaufbau für die Denaturierung des Eiklars

Versuchsdurchführung:

- Zuerst trennt man vorsichtig das Eiklar vom Dotter und gibt diese jeweils in eine Schüssel.
- Danach stellt man die Pfanne auf den Herd und gibt das Eiklar langsam hinein.
- Im Folgenden beginnt man mit dem kontrollierten Erhitzen und achtet dabei auf verschiedene Stadien des Versuchs

Entsorgung: Das Eiklar ist zum Verzehr geeignet oder kann im Biomüll entsorgt werden.

Versuchsbeobachtung:

- Beim Erhitzen des Eiklars in der Pfanne lässt sich eine immer stärker werdende Ausflockung feststellen, wodurch das Eiklar gänzlich weiß gefärbt wird (vgl. Abb. 50 bis 53).

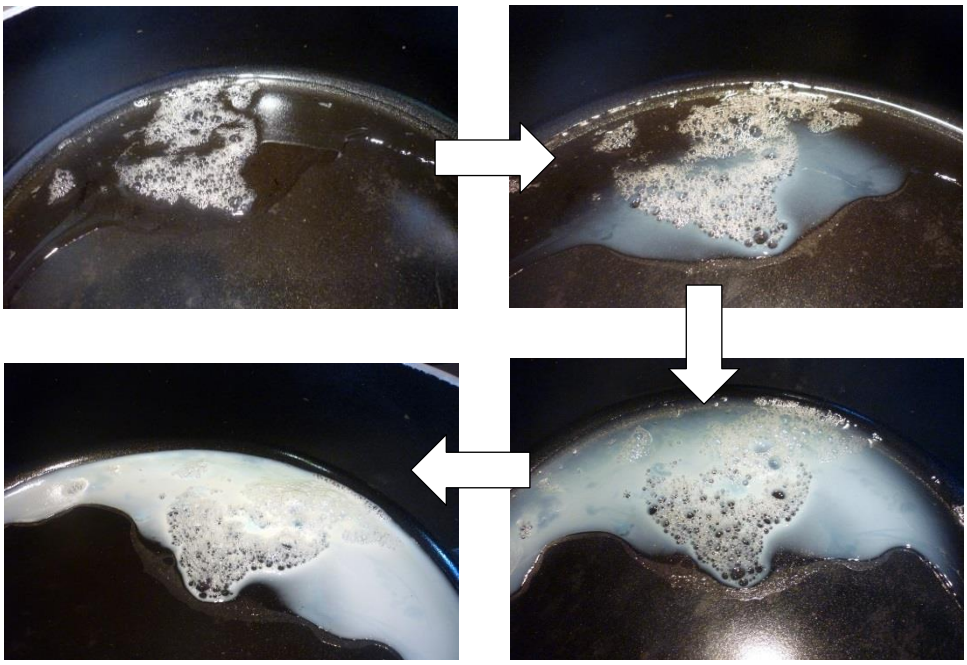


Abbildung 50 bis 53: Verlauf der Denaturierung durch Hitzeeinfluss

Auswertung:

- Wie im vorausgegangenen Exkurs unter 3.1.1.1 besprochen, handelt es sich hier um eine Denaturierung der Proteine durch Hitzeeinwirkung. Hierbei kommt es also zu einer Zerstörung der molekularen Struktur der Proteine sowie zu einer Einlagerung von Wassermolekülen zwischen die Primärstruktur der Makromoleküle.

Literatur: nach 37, 38, 45

3.1.1.4 Herstellung von Biskuit – das Geheimnis des Eischaums

Um bei der alltäglichen Verwendung von Hühnereiern in der Küche zu bleiben, wird im Anschluss die Herstellung von Biskuit durchgeführt, welcher eine der wichtigsten Kuchen- und Tortengrundlagen darstellt.

Geräte: Handrührgerät, Rührschüssel, Tasse, Waage, Schneebesen, vorbereitete Backform, Ofen

Chemikalien: 5 Eier, 100 g Zucker, 2 Teelöffel Backpulver, 150 g Mehl

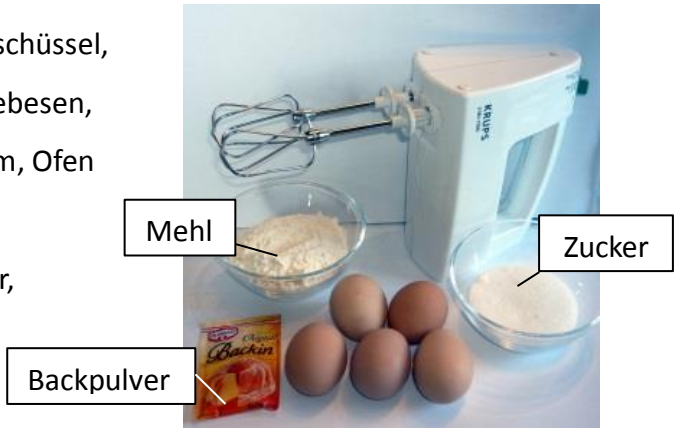


Abbildung 54: Zutaten für die Herstellung von Biskuit

Versuchsdurchführung:

- Zuerst trennt man das Ei und gibt das Eigelb in die Tasse sowie das Eiklar in die Rührschüssel, um es nach der Zugabe des Zuckers mit dem Handrührgerät solange zu schlagen bis ein fester Schaum entsteht und man die Schüssel kippen kann.
- Des Weiteren gibt man das Eigelb hinzu und verrührt dies mit dem festen Schaum. Wonach man vorsichtig das Mehl-Backpulvergemisch mit dem Schneebesen unterhebt.
- Jetzt kann man die schaumige Masse in die vorbereitete Backform geben und ungefähr 20 Minuten bei 180°C sowie Umluft backen.
- Nach dieser Zeit nimmt man das fertige Biskuit aus dem Ofen und löst dieses vorsichtig aus der Form. Um es genauer zu betrachten fertigt man einen Querschnitt desselbigen an.

Entsorgung: Die abfallenden Eischalen werden in den Biomüll gegeben. Das Biskuit ist zur Weiterverarbeitung zu Torten oder Kuchen geeignet.

Versuchsbeobachtung:

- Beim Schlagen des Eiklar-Zucker-Gemischs (vgl. Abb. 55) kann man erkennen, dass man mit dem Handrührgerät sehr leicht einen festen, weißen Schaum herstellen kann. Dieser ist so stabil, dass man die Rührschüssel mit der Öffnung nach unten kippen kann, ohne dass Schaum aus der Schüssel gleitet (vgl. Abb. 56).

Abbildung 55: Das Schlagen des Eiklar-Zuckergemischs mit dem Handrührgerät

Abbildung 56: Der feste Ei-Schaum nach dem Schlagen des Eiklars

- Bei der Zugabe des Eidotters färbt sich die Masse gelblich. Beim Unterheben des Backpulvers und des Mehls lässt sich eine Verfestigung zu einer zäheren Masse erkennen.
- Durch das Backen bei 180°C im Ofen verfestigt sich der Teig zu einem lockerem Biskuitboden, der im Querschnitt betrachtet eine sehr hohe Lufteinlagerung erkennen lässt (vgl. Abb. 57)

Abbildung 57: Querschnitt des fertigen Biskuits

Auswertung:

- Wie aus der Beobachtung hervorgeht, kann man aus dem Eiklar durch mechanisches Einwirken mit dem Handrührgerät sehr leicht einen festen Eischnee herstellen. Dies ist der Vorgang einer mechanischen Denaturierung, welche bereits unter 3.1.1.1 im Exkurs genau besprochen wird.

- Trotz des hohen Wasseranteils ist der hergestellte Schaum relativ stabil. Die im Eiklar enthaltenen Proteine haben wie unter 2.2.1 beschrieben hydrophobe und hydrophile Reste, welche sich grenzflächenaktiv am Luft-Wasser-Übergang (vgl. Abb. 58) anordnen. Die entstehenden Bläschen können so stabilisiert werden, was auch durch die Dauer des Rührens mit der Verkleinerung der Luftbläschen verstärkt wird.

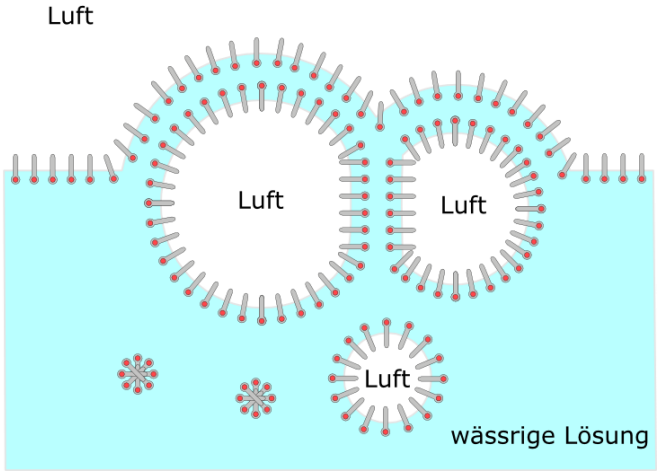


Abbildung 58: Schematische Darstellung der Grenzflächenaktivität von Proteinen (grau), rote Punkte: Hydrophile Reste der Aminosäuren

- Nun müssen sowohl Rührer und Schüssel fettfrei sein als auch Eiklar und Eigelb sorgfältig voneinander getrennt werden, da die hydrophoben Fettmoleküle die Proteine bei der Stabilisierung der Bläschen behindern. Nachdem der Eischnee geschlagen ist, kann das Eigelb zugegeben werden, da der Platz für die Fettmoleküle bei den Proteinen bereits belegt ist.
- Durch das anschließende Zugeben des Mehl-Backpulver-Gemischs, dessen Wirkung in diesem Zusammenhang nicht vertieft wird, und dem darauffolgenden Hitzeeinfluss beim Backen wird zusätzlich eine irreversible Zerstörung der Proteine hervorgerufen (vgl. Exkurs zur Denaturierung unter 3.1.1.1). Die räumliche Anordnung der Peptidketten wird nachhaltig verändert, wobei die Luftbläschen, die durch die mechanische Einwirkung in die Masse eingebracht worden sind, im schaumigen Teig eingeschlossen bleiben. Dies wird nochmals mit genanntem Querschnitt des fertigen Biskuits (vgl. Abb. …) verdeutlicht, der sehr gut die Einlagerung der Luftbläschen beziehungsweise den schaumig-weichen Charakter des Teiges zeigt. Diese Eigenschaft wird bei der Lebensmittelproduktion ausgenutzt.

Literatur: nach 28, 41

3.1.2. „Was ist denn nun das Gelbe vom Ei?“ – Untersuchung des Eidotters

Nach der Untersuchung des Eiklars wird nun der sehr nährstoffreiche Eidotter betrachtet. Die nächsten Versuche behandeln einen weiteren Grund, warum das Ei bei der Herstellung von Nahrungsmitteln so nützlich ist.

3.1.2.1 Gewinnung von Lecithin – der Emulgator im Eigelb

Geräte: Peleusball, 50-mL-Pipette, Papierfilter, Trichter, 10-mL-Pipette, Glasrührstab, jeweils ein 100-mL/200-mL/500-mL-Becherglas, Gaskartusche, Vierfuß, kleines verschließbares Gefäß

Chemikalien: zwei Eigelb, 20 mL Ethanol, 50 mL Diethyl-Ether, 40 mL Aceton, Leitungswasser für das Wasserbad

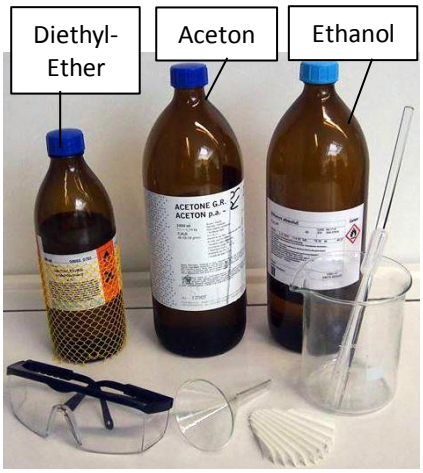


Abbildung 59: Die Materialien für die Lecithin-Gewinnung

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Dieses Experiment wird im Abzug durchgeführt. Hierbei vermengt man als erstes 20 mL Ethanol und das Eigelb mit dem Glasrührstab.
- Als nächstes gibt man zu diesem homogenen Gemisch 50 mL Diethyl-Ether.
- Anschließend filtriert man das Stoffgemisch und dampft das Filtrat vorsichtig im Wasserbad ein.
- Daraufhin versetzt man das Gemisch viermal mit 10 mL Aceton, rührt dies gut durch und gießt es dann langsam in ein Becherglas ab.

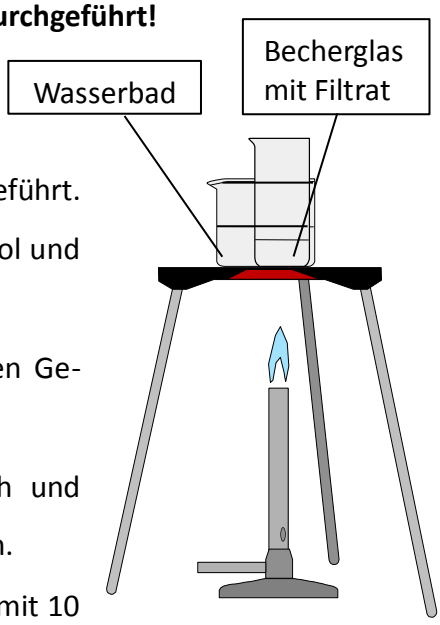


Abbildung 60: Das Eindampfen des Filtrats im Wasserbad

- Das restliche Lösungsmittel dampft man nochmals vorsichtig im Wasserbad ein (vgl. Abb. 60)

Versuchsbeobachtung:

- Beim Vermengen von Eigelb und Ethanol entsteht ein homogenes Stoffgemisch (vgl. Abb. 61)
- Mit der Zugabe und dem Verrühren von Diethyl-Ether erhält man nach zweiminütigem Rühren zwei Phasen und somit eine Suspension (vgl. Abb. 62)
- Nach dem Filtrieren (vgl. Abb. 63 und 64) liegt eine klare, gelbliche Lösung vor, welche beim Eindampfen im Wasserbad nach kurzer Zeit dickflüssiger und zur Emulsion wird.
- Das Aceton wird nach dem viermaligem Zugeben und Durchrühren jeweils in gelblichem Farbton abgegossen (vgl. Abb. 65 bis 67).
- Zum Schluss liegt nach dem Eindampfen eine weiche, wachsartige sowie gelbliche Masse vor (vgl. Abb. 68).

Abbildung 61: Ein homogenes Stoffgemisch nach Zugabe von Ethanol

Abbildung 62: Eine Suspension nach dem Vermengen mit Diethyl-Ether

Abbildung 63 und 64: Das Filtrieren der Suspension

Abbildung 68: fertiges Lecithin

Abbildung 67: Nach dem letzten Abgießen des Acetons

Abbildung 66: Nach der dritten Zugabe von Aceton

Abbildung 65: Nach dem ersten Zufügen von Aceton

Entsorgung: Der Rückstand des Filtrierten kann im Restmüll entsorgt werden. Aceton reichlich verdünnt in den Abfluss geben.

Auswertung:

- Bei diesem Experiment erfolgt eine „partielle Entfettung mit verschiedenen Lösungsmitteln“ [15], um aus dem Dotter Lecithin gewinnen zu können. Die anderen Bestandteile des Dotters wie Lipiden, Proteinen, Kohlenhydrate und Wasser werden in folgenden Schritten extrahiert. Eine Extraktion erfolgt auf Basis des Prinzips *similia similibus solvuntur*, so können sich Stoff gleicher Polarität ineinander lösen und Wechselwirkungen eingehen.
- Das zugegebene Ethanol, welches aufgrund der Hydroxy-Gruppe und der kurzen Kohlenstoffkette einen amphiphilen Charakter aufweist (vgl. Abb. 69), denaturiert die Proteine, wie im Exkurs unter 3.1.1.1 geschildert. So wird den Proteinen die Hydrathülle entzogen, woraufhin sich in einer polaren Umgebung Aggregate bilden, die durch intermolekulare Wechselwirkungen zusammengehalten werden. So liegt das Ethanol-Dotter-Gemisch als Emulsion vor.

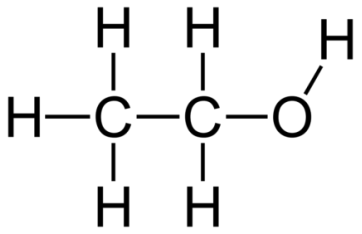


Abbildung 69: Das amphiphile Ethanol

- Im Folgenden verändert sich mit der Zugabe von Diethyl-Ether die polare Umgebung zu einer unpolaren. Dies fällt die polaren Proteine und Kohlenhydrate aus, da der unpolare Diethyl-Ether (vgl. Abb. 70) mit langkettigen Lipiden wechselwirkt. Die Ethanol-Moleküle werden durch ihren amphiphilen – weniger unpolaren – Charakter verdrängt. Bei den beiden Phasen handelt es sich also um ein polares Gemisch aus Ethanol, Proteinen und Kohlenhydraten sowie um eine unpolare Phase der Lipide und des Diethy-Ethers. Somit filtriert man die Suspension und erhält ein Filtrat, bei dem man durch Erhitzen den Diethyl-Ether abdampfen kann. Das vorliegende Stoffgemisch ist wieder eine Emulsion.

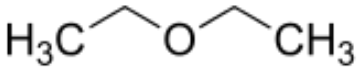


Abbildung 70: Der unpolare Diethyl-Ether

[15] Belitz, Grosch, Schieberle: „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“; 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, Springer Verlag, 200;1 S. 542

- Im letzten Schritt kann durch das mehrmalige Zugeben des amphiphilen Acetons das Lecithin aus der Emulsion gewonnen werden. Dies ist nur möglich, da es sich bei unserem Emulgator um ein Phospholipid handelt, welches sich grundsätzlich von den anderen Lipiden, wie z.B. den gelben Carotinoiden, unterscheidet. Dies liegt an der unter 2.2.2 erklärten Struktur mit dem polaren Element der Phosphorsäure sowie der organischen Base. Dieser hydrophile Teil setzt also die Lipophilität des Lecithins im Vergleich zu den andern Lipiden ausschlaggebend herab.

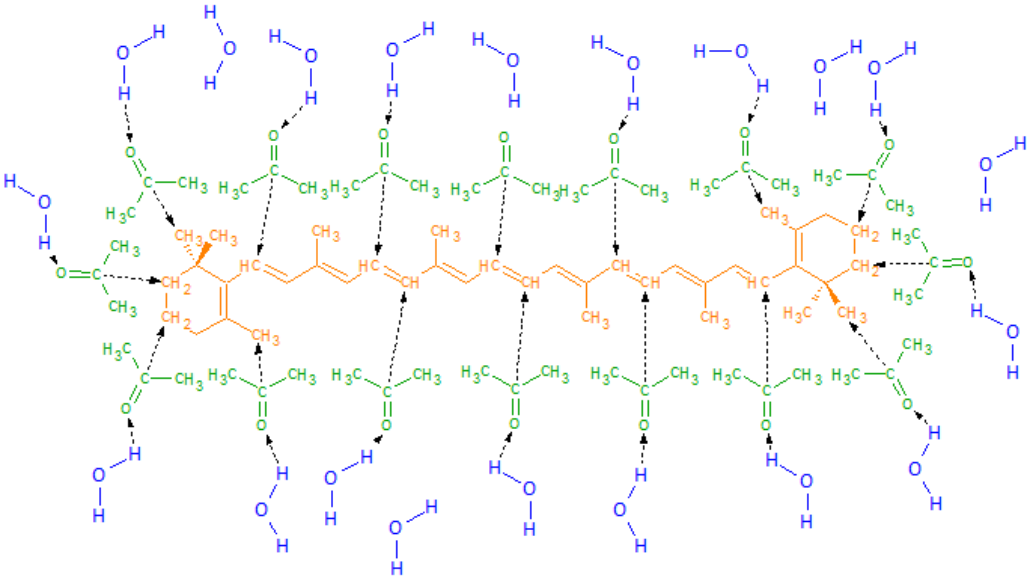


Abbildung 71: Am Beispiel des ß-Carotins: Extraktion der Lipide durch das amphiphile Aceton

So ist es möglich nur die übrigen Fette und Carotinoide in Aceton zu lösen (vgl. , welche auf Grund der molekularen Struktur einen eindeutig lipophilen Charakter aufweist (vgl. Abb. 71). Durch das Rühren können diese langen Moleküle noch effektiver aus dem Teilchenverband der Lipide gelöst werden. Durch das Umschließen der Aceton-Moleküle können die gänzlich polaren Lipide extrahiert werden.

Literatur: nach 4, 19, 34, 42, 47

3.1.2.2 Der Nachweis von Fetten des Dotters mit der Fettfleckprobe

Die Fettfleckprobe gilt gewöhnlich als ein einfacher Versuch, was aber auf den ersten Blick täuschen kann. Im Folgenden wird dieser verwendet, um die Eigenschaften der Dotterinhaltsstoffe zu veranschaulichen.

Geräte: Pipette, Spatel, Filterpapier

Chemikalien: Speiseöl, gewonnenes Lecithin, Wasser, Eigelb

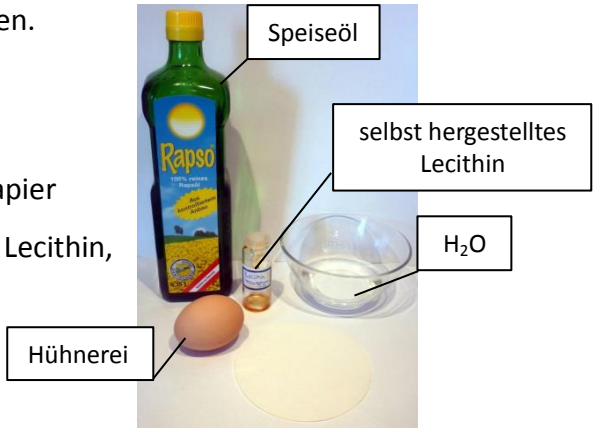


Abbildung 72: Utensilien für die Fettfleckprobe

Versuchsdurchführung:

- Bei diesem Versuch trägt man von den angegebenen Substanzen jeweils einen Tropfen mit der Pipette oder eine Spatelspitze auf das Filterpapier auf (vgl. Abb. ...). Nach 15 Minuten an der Luft wird das Filterpapier wieder betrachtet.

Entsorgung: Das Filterpapier gibt man in den Biomüll.

Versuchsbeobachtung: (vgl. Abb. 73, 74)

- Der aufgetragene H_2O-Tropfen hinterlässt eine transparente Stelle, welche nach zehn Minuten verschwindet.
- An der Stelle des Öls ist ein fettiger Fleck sichtbar, der unverändert transparent bleibt.
- Das Lecithin lässt nur wenig bis keine Transparenz erkennen und verändert sich nicht.
- Die Probe des Eigelbs hinterlässt eine weiche, krustenähnliche Schicht.

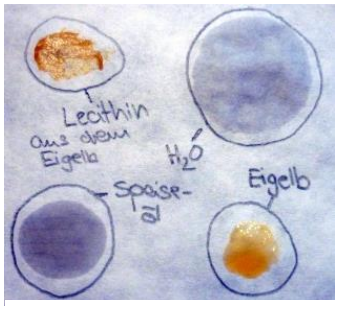


Abbildung 73: Das Filterpapier mit den aufgetragene Substanzen

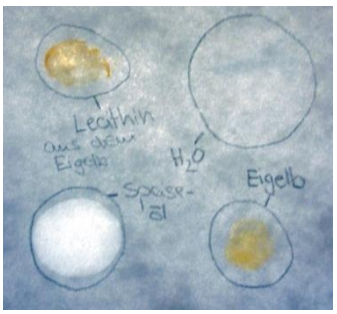


Abbildung 74: Die Probe nach 15 Minuten gegen das Licht gehalten

Auswertung:

Folglich sind diese Substanzen so zu charakterisieren:

- Der Fleck des aufgetragenen Wassers entsteht durch die Einlagerung der kleinen H_2O-Moleküle zwischen die großen Zellulose-Moleküle (vgl. Abb 75). Dieser verschwindet aber nach kurzer Zeit, da das Wasser verdunsten. Dies ist aufgrund ihrer Größe möglich: Um zu verdunsten, müssen sich die Teilchen bewegen (kinetische Energie). Dies wird durch die Umwandlung von Wärmeenergie verursacht. Je mehr sich die Moleküle also bewegen, desto mehr Platz brauchen sie und gehen somit in die Luft über. Die Probe ist folglich negativ.

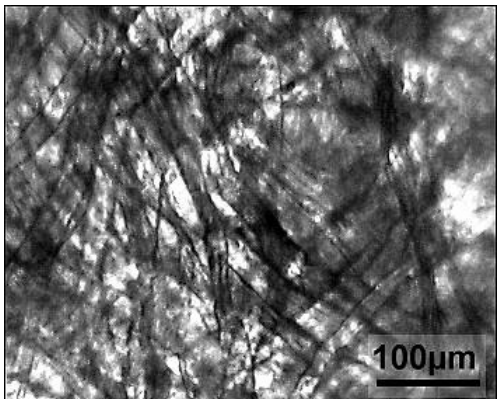


Abbildung 75: Das Mikrofoto eines Filterpapiers

- Das verwendete Öl hinterlässt die typischen Merkmale einer positiven Fettfleckprobe. Fette weisen im Vergleich zu H_2O eine viel größere räumliche Struktur auf. Die vorhandene Wärmeenergie reicht deshalb nicht aus, dass diese großen Moleküle in die Umgebung übergehen. Sie hinterlassen deshalb dauerhaft Flecken auf Papier, welche gegen das Licht gehalten (vgl. Abb. …) transparent erscheinen.
- Wie bereits unter 2.2.2 geklärt, hat das Lecithin eine ähnlich Struktur wie Fette und wird zu den Lipiden gezählt. Man kann aber anhand von diesem Versuch nachweisen, dass es nicht die gleichen Eigenschaften wie Fette besitzt. Es sollte keine transparente Stelle auf dem Papier hinterlassen, was bei selbst hergestelltem Lecithin durch Rückstände von Fett und Carotinoide verfälscht werden kann. Die Fettfleckprobe ist ebenfalls negativ.
- Das flüssige Eigelb bildet nach dem Auftragen lediglich eine weiche Kruste. Diese entsteht durch das Verdunsten von Wassermolekülen an der Grenzfläche zwischen Luft und Eidotter. Das Gemisch dringt nicht merkbar in das Filterpapier ein. Es können auch hier keine Fette nachgewiesen werden, da sich diese im Dottergemisch befinden und dort im Teilchenverband stabilisiert sind. Die Probe ist negativ, obwohl Fette im Eidotter vorhanden sind.

Literatur: nach 19

3.1.2.3 Herstellung von Mayonnaise – das Ei als Bindemittel

Das gewonnene Lecithin wird nun für die Herstellung einer beliebten Beilage verwen-det – der Mayonnaise.

Abbildung 76: Der Versuchsaufbau für die Mayonnaise-Herstellung

Geräte: Reagenzglas, Reagenzglasstopfen, Reagenz-glashalter, zwei 150-mL-Bechergläser, Stativ, Uhrglas

Chemikalien: 5 mL Eigelb, 1 mL Sonnenblumenöl

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Als erstes gibt man das Eigelb in das Reagenzglas, fügt anschließend das Sonnenblumenöl hinzu, verschließt das Reagenzglas mit dem Stopfen und schüttelt dieses kräftig.
- Als nächstes spannt man das Reagenzglas horizontal in das Stativ ein und bringt das Uhrglas unter der Reagenzglasöffnung in Position. Daraufhin neigt man das Reagenzglas leicht mit der Öffnung nach unten und lässt die Masse auf das Uhrglas tropfen.

Entsorgung: Die verbrauchten Substanzen kön-nen in den Biomüllgegeben werden.

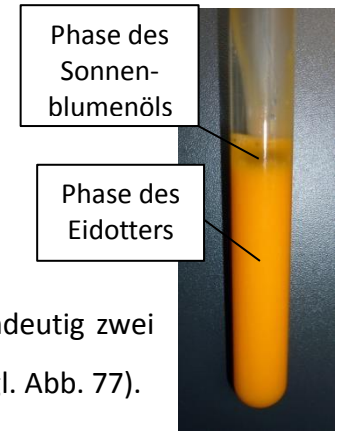


Abbildung 77: Nach der Zugabe des Sonnenblu-menöls

Versuchsbeobachtung:

- Vor dem Schütteln des Reagenzglases sind eindeutig zwei Phasen des Eigelbs und des Öls zu erkennen (vgl. Abb. 77).
- Nach dem Schütteln erhält man eine Emulsion.

- Beim Tropfen auf das Uhrglas ist eindeutig eine Konsistenzänderung – eine Zunahme der Viskosität – zu erkennen (vgl. Abb. 78). Die zähflüssige Emulsion tropft sehr langsam herab.

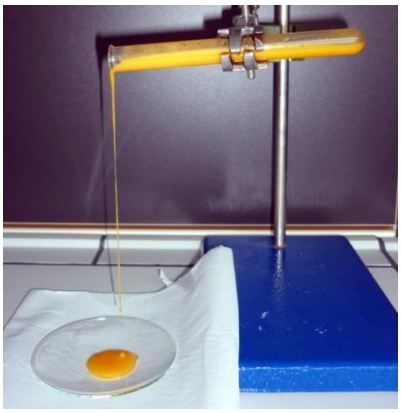


Abbildung 78: Die zähflüssige Mayonnaise

Auswertung:

- Diese Konsistenzänderung des Stoffgemisches nach dem Schütteln ist auf das als Emulgator wirkende Lecithin des Eigelbs zurückzuführen. Das Lecithin wirkt, wie unter 2.2.2 erklärt, als Tensid an der Grenzfläche zwischen den polaren H_2O-Molekülen und den unpolaren Fettmolekülen (vgl. Abb. 79).

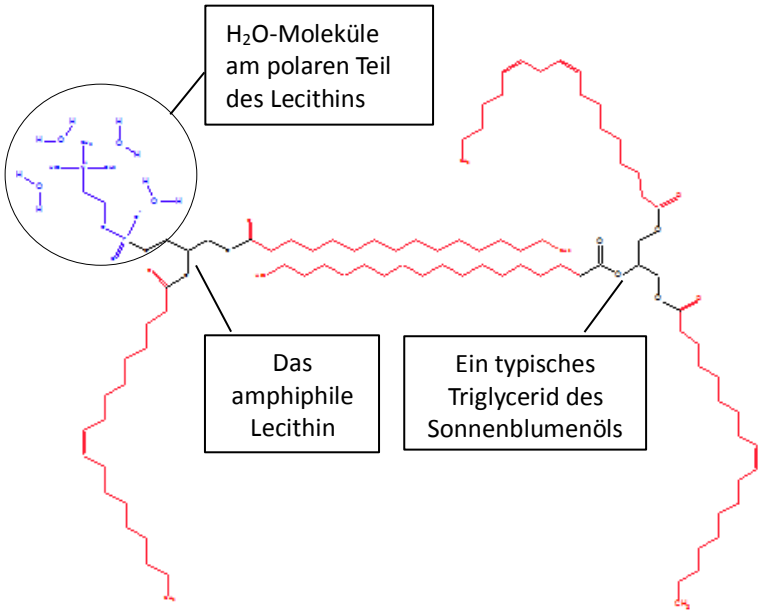


Abbildung 79: Das Lecithin als Ampholyt zwischen den polaren H_2O-Molekülen (blau) und den langen unpolaren Fettsäureresten (rot) des Sonnenblumenöls

- Der Emulgator ummantelt die Fett-Tröpfchen und bildet sogenannte Micellen (vgl. Abb. 80). Nach dem Prinzip *similia similibus solvuntur* (*Ähnliches löst sich in Ähnlichem*) stoßen sich Fett und Wasser normalerweise ab. Doch ein Tensid verbindet die verschieden polaren Moleküle und führt zu einer deutlich gesteigerten Viskosität. Die zusätzlichen Fettmoleküle bilden zusammen mit dem Lecithin eine stabile und energiearme Struktur. Dieses Phänomen wird in Der Nahrungsmittelindustrie genutzt, was bereits in der Theorie unter 2.5.2 erwähnt wurde.

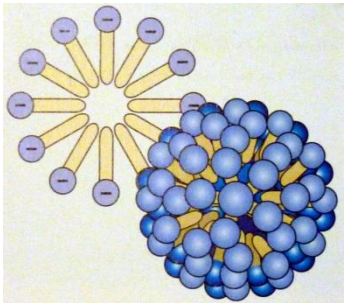


Abbildung 80: Die Micellen-Bildung durch Tenside

Literatur: nach 17, 18, 19, 43, 44

3.1.3 Eine harte Sache? – Versuche zur Eischale

Die nächsten beiden Versuche beschäftigen sich mit der sowohl stabilen als auch zerbrechlichen Kalkschale. Ist es denn möglich diese chemisch aufzulösen?

3.1.3.1 Der Nachweis von Carbonat-Ionen

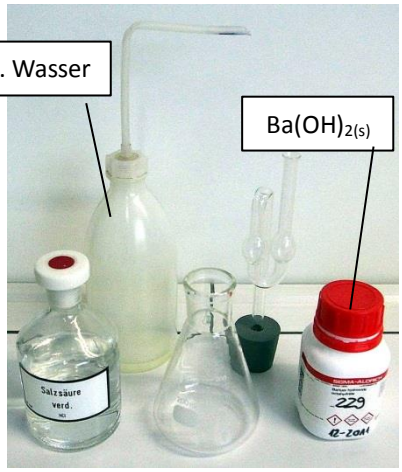


Abbildung 81: Die Versuchsvorbereitung zum Nachweis von Carbonat-Ionen

Geräte: Erlenmeyerkolben, Gummistopfen, Gärröhrchen, Mörser und Pistill

Chemikalien: verd. Salzsäure, $Ba(OH)_{2(s)}$, Schalen von drei Hühnereiern destilliertes Wasser

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Zuerst zerreibt man mit Mörser und Pistill (vgl. Abb. 82) die Kalkschale der Hühnereier und gibt diese in den Erlenmeyerkolben.
- Als Nächstes steckt man das Gärröhrchen, welches man mit der selbst hergestellten, gesättigten und filtrierten $Ba(OH)_2$-Lösung bis zur Hälfte aufgefüllt hat, in den Stopfen.
- Nach der Zugabe der Salzsäure verschließt man den Erlenmeyerkolben schnellst möglich mit dem Stopfen und dem damit verbundenem Gärröhrchen (vgl. Abb. 83).

Abbildung 82: Das Zerreiben der Kalkschale

Abbildung 83: Der Versuchsaufbau zum Nachweis von Carbonat-Ionen

Entsorgung: Die nicht verwendeten Eierschalenreste können in den Biomüllgegeben werden. Die $Ba(OH)_2$-Lösung wird in den Entsorgungsbehälter (G4) gegeben

Versuchsbeobachtung:

- Nach der Zugabe der Salzsäure ist eine deutliche Gasentwicklung zu erkennen, welche durch ein starkes Aufschäumen im Erlenmeyerkolben und Bläschenbildung im Gärröhrchen erkennbar ist (vgl. Abb. 84, 85).
- Das entstandene Gas reagiert mit der $Ba(OH)_2$-Lösung im Gärröhrchen und ein weißer Niederschlag fällt aus (vgl. Abb. 86).

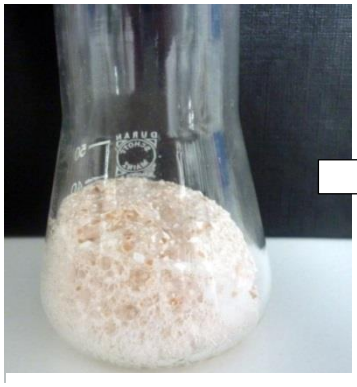


Abbildung 84: Die Gasentwicklung nach der Zugabe von Salzsäure

Abbildung 85: Das Entweichung des entstandenen Gases durch das Gärröhrchen

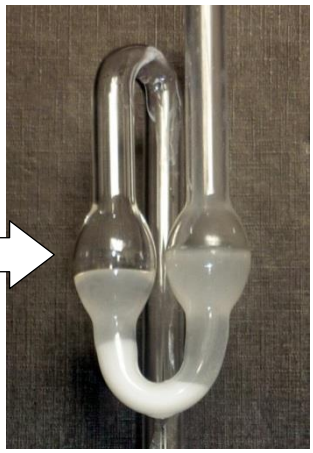


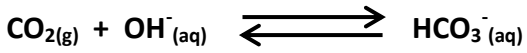
Abbildung 86: Die Ablagerung eines weißen Niederschlags im Gärröhrchen

Auswertung:

- Beim ersten Schritt entwickelt sich über eine Säure-Base-Reaktion nach Brønsted ein Gas, bei welchem es sich um Kohlenstoffdioxid (CO_2) handelt. Diese Reaktion ist mit einer Zerfallsreaktion gekoppelt.

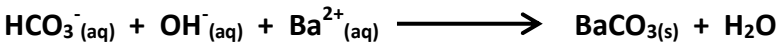
Die korrespondierenden Säure-Base-Paare sind jeweils in den gleichen Farben gekennzeichnet: Die Salzsäure reagiert als erste Säure (Protonendonator) zum Chlorid-Ion, welches die korrespondierenden Base (Protonenakzeptor) darstellt. In dieser Gleichgewichtsreaktion liegt das zweite Säure-Basen-Paar mit dem Wassermolekül als Säure und dem Sauerstoffatom des Calciumcarbonats als Base vor.

- Im Folgenden reagiert das Kohlenstoffdioxid in einem Gleichgewichtsschritt langsam mit den OH^--Ionen des $Ba(OH)_2$-Wassers zu Hydrogencarbonat.



$$CO_{2(g)} + OH^-_{(aq)} \rightleftharpoons HCO_3^-{}_{(aq)}$$

- Im Anschluss daran setzt sich das Hydrogencarbonat schnell mit OH^- und Ba^{2+} zum weißen Bariumcarbonat ($BaCO_3$) Niederschlag um.



$$HCO_3^-{}_{(aq)} + OH^-_{(aq)} + Ba^{2+}_{(aq)} \longrightarrow BaCO_{3(s)} + H_2O$$

Dies ist das typische Nachweisreagenz für Carbonat-Ionen.

Literatur: nach 21, 48

3.1.3.2 Ein (Weich)Ei? – Das chemische Schälen des Hühnereis

Geräte: 250-mL-Becherglas

Chemikalien: 125 mL Essigessenz (25%), Hühnerei

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Abbildung 87: Die Vorbereitung für das „chemische Schälen“

Versuchsdurchführung:

- Als erstes geben Sie in das Becherglas 125 mL Essigessenz und legen danach vorsichtig das Hühnerei hinein.
- Mit regelmäßiger Beobachtung kann das Ei nach zwölf Stunden entnommen werden.

Entsorgung: Die Reste der Säure reichlich verdünnt in den Abfluss geben. Das geschälte Ei im Biomüll entsorgen.

Versuchsbeobachtung:

- Kurz nach dem Zufügen des Hühnereies kommt es auf der gesamten Oberfläche dessen zu einer Bläschenbildung bzw. zu einer Gasentwicklung, welche mit der Zeit stark zunimmt.
- Nach ungefähr fünf Minuten beginnen sich ein paar Bläschen von der Schale zu lösen und sprudeln an die Oberfläche. Außerdem fängt das Ei an zu schwimmen.

Abbildung 88: Zwei Stunden nach Versuchsbeginn – eine starke Schaumentwicklung

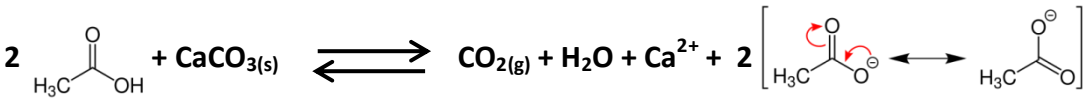
- Nach zwei Stunden kann man eine starke Schaumentwicklung auf der Oberfläche der Essigessenz-Lösung feststellen (vgl. Abb. 88).

- Nach zwölf Stunden kann man das nun geschälte Ei vorsichtig aus dem Becherglas entnehmen. Man sieht nun das rohe Hühnerei mit nur wenigen Resten der Kalkschale vor sich (vgl. Abb. 89).

Abbildung 89: Das Ei nach dem Essig-Bad

Auswertung

- Die in der Essigessenz enthaltene Essigsäure, welche in der Lage ist weitaus härtere Materialien anzugreifen, zersetzt auch die Kalkschale des Eis in einer Säure-Base-Reaktion nach Brønsted.



(alle Ionen sowie die Essigsäure befinden sich in wässriger Lösung!)

- Unter dieser Reaktion kommt es zu einer CO_2-Entwicklung, welche mit der Bläschenbildung deutlich zu erkennen ist. Diese Gasentwicklung treibt das Ei an die Oberfläche und lässt es schwimmen.
- Die korrespondierenden Säure-Base-Paare sind bei dieser Reaktion die Essigsäure mit dem Acetat-Ion, das durch Mesomerie stabilisiert ist, als die korrespondierende Base sowie das Wassermolekül als Säure mit dem Stauerstoff-Atom des Carbonat-Ions als zugehörige Base.
- Die erhaltenen Reste der Kalkschale am geschälten Ei sind auf das Schwimmen durch die Gasentwicklung und auf die Luftblase im Hühnerei zurückzuführen. Dieser Teil der Oberfläche ist nicht dauerhaft mit der Essigessenz in Berührung gekommen und an der Luft getrieben

Literatur: nach 21, 48, 49, 50

3.1.4. 100% Ei? – Qualitativer Nachweis des Wassers im Hühnerei

Zum Abschluss der chemischen Untersuchungen wird die Hauptkomponente Wasser im Ei qualitativ nachgewiesen.

Abbildung 90: Die Materialien für den qualitativen Wassernachweis

Geräte: zwei große Reagenzgläser, Messer, Gaskartusche, Stativ, Uhrglas, Spatel, zwei Petrischalen, Tiegel, Tiegelzange

Chemikalien: gekochtes Ei, Kupfersulfat-Pentahydrat

Sicherheit: **Alle Sicherheitshinweise gemäß den Etiketten und für den Umgang mit Säuren und Laugen beachten! Schutzbrille! Alle Experimente werden unter Beachtung der R- und S-Sätze durchgeführt!**

Versuchsdurchführung:

- Als Erstes wird das blaue Kupfersulfat-Pentahydrat mit Tiegel, Tiegelzange und Brenner solang erhitzt bis eine weiße Substanz zurückbleibt.
- Im Anschluss dazu entfernt man die Schale von einem hart gekochten Ei, wonach man jeweils eine kleine Menge des Eiklars und des Eigelbs in die beiden Reagenzgläser gibt.
- Nach diesen Vorbereitung wird eins der beiden Reagenzgläser fast waagrecht (vgl. Abb. …) in das Stativ eingespannt, woraufhin man eine Spatelspitze des eingedampfte Kupfersulfat in die Reagenzglasöffnung einbringt. Unter diese legt man ein Uhrglas.
- Anschließend kann man das Ende des Reagenzglases mit dem Brenner erhitzen. So wird auch mit dem zweiten Reagenzglas verfahren.

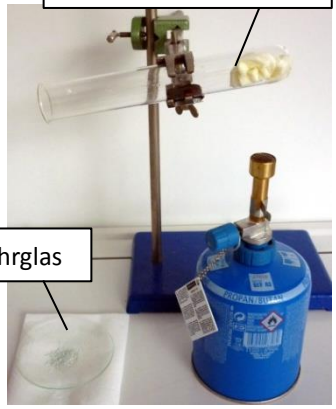


Abbildung 91: Versuchsaufbau für den qualitativen Wassernachweis

Entsorgung: Das verbrauchte Kupfersulfat wird in den Feststoffabfall (G4) und der Hühnereirest in den Biomüll gegeben.

Versuchsbeobachtung:

- Beim Eindampfen des Kupfersulfats-Pentahydrats (vgl. Abb. 92) stellt man fest, dass sich die zuerst kräftig blaue, körnige Substanz völlig entfärbt und zu einer weißen, brösligen Verbindung verwandelt.
- Beim Erhitzen der beiden Reagenzgläser kann man gleichermaßen eine rasche Entwicklung von Dampf erkennen, der beginnt an den Reagenzglaswänden zu kondensieren. Diese Flüssigkeit fließt aufgrund der leichten Schräge in Richtung der Öffnung und färbt dort das weiße Kupfersulfat blau.

Abbildung 92: Eindampfen des Kupfersulfats

Auswertung:

- Durch das Erhitzen und den hohen Energieeinfluss auf die bereits denaturierten Eibestandteile, werden Wassermoleküle durch die Hitze energetisch so angeregt – ihre kinetische Energie soweit gesteigert –, dass sie sich aus dem Teilchenverband loslösen und in den gasförmigen Zustand übergehen.
- Durch Abkühlen am Reagenzglas kondensieren sie zu Wassertropfen.
- Das Kupfer(II)-Sulfat ist eine Verbindung aus Cu^{2+}-Kationen sowie (SO_4^{2-})-Anionen. Diese zählt zu den Hydraten, welche die Eigenschaft haben, kristallwasserhaltig zu sein. Diese Verbindung ist in der Lage, Wasser zu speichern (vgl. Abb. 93). Da das Kupfersulfat anfangs eingedampft wurde und es sich mit dem Flüssigkeitskontakt blau färbt, kann man Wasser sowie blaues Kupfer(II)-Sulfat-Pentahydrat identifizieren:

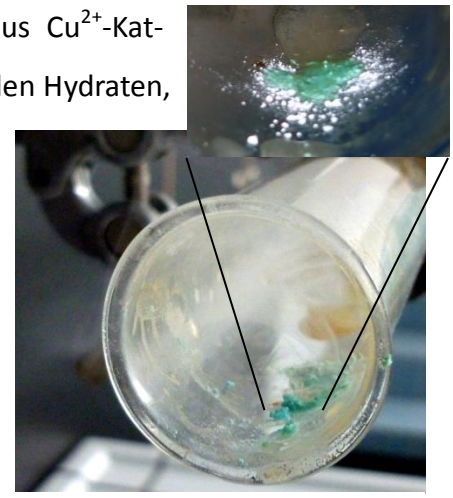


Abbildung 93: Die Färbung des Kupfer(II)-Sulfat-Pentahydrats durch Wasser

$$\underset{\text{Kupfer(II)-Sulfat}}{CuSO_4} + \underset{\text{Wasser}}{5\,H_2O} \longrightarrow \underset{\text{Kupfer(II)-Sulfat-Pentahydrat}}{[Cu(H_2O)_4]SO_4 \cdot H_2O}$$

Literatur: nach 51, 52

3.2 Das Volumen, die Geometrie und das Rollen – die Physik des Hühnereis

Da die Bestandteile des Hühnereis nun chemisch betrachtet worden sind, folgt jetzt eine physikalische Konkretisierung der Eigenschaften des Hühnereis.
In der Theorie wurden bereits die Grundlagen zur Geometrie und dem Aufbau des Hühnereis erklärt. Mit den folgenden Versuchen werden diese praktisch genauer beleuchtet und darüber hinaus werden die Eigenschaften des Hühnereis und die biologischen Vorteile dessen veranschaulicht.

3.2.1 Der Schwimmversuch – „Das Ei macht das Seepferdchen!“

Materialien: durchsichtiger Plastikbehälter, 300 mL Wasser, frisches Hühnerei

Versuchsdurchführung:

- Bei diesem Versuch füllt man Wasser in den durchsichtigen Plastikbehälter und gibt dann das frische Hühnerei hinein.
- Das gleiche Verfahren wiederholt man 21 Tage später.

Entsorgung: Das Ei kann im Haushalt verwendet werden.

Versuchsbeobachtung:

- Man stellt fest, dass das frische Hühnerei bei der Zugabe ins Gefäß schnell auf den Boden sinkt und dort verharrt. (vgl. Abb. 94)
- 21 Tage später schwimmt es an der Oberfläche und steigt nach kurzem Hinunterstupsen sofort wieder auf. (vgl. Abb. 95)

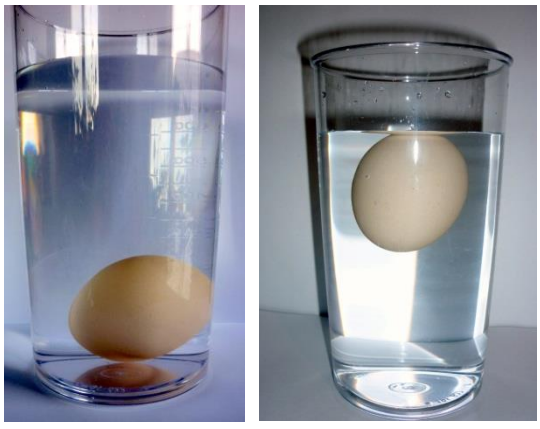


Abbildung 94 und 95: Der Versuchs-aufbau des Schwimmversuchs (links: frisches Ei; rechts: 21 Tage altes Ei)

Auswertung:

- Dieses Verhalten des Hühnereis kann man nur auf das Alter zurückführen, da es sich um dasselbe Ei handelt. Wie wir bereits im Kapitel des Aufbaus unter 2.1 erfahren haben, enthält das Ei eine Luftblase, welche nach dem Legevorgang entsteht.
- Nun stellt sich jedoch die Frage, warum das Hühnerei erst mit zunehmendem Alter schwimmt, da diese Blase von Anfang an (vgl. Abb. 96) vorhanden ist. Die Erklärung hierfür ist eine Vergrößerung dieser Luftansammlung und somit eine Ausweitung des Luftanteils vom Gesamtvolumen (vgl. Abb. 97). Da Luft eine geringere Dichte als Wasser aufweist, wird das Ei nach oben getrieben.

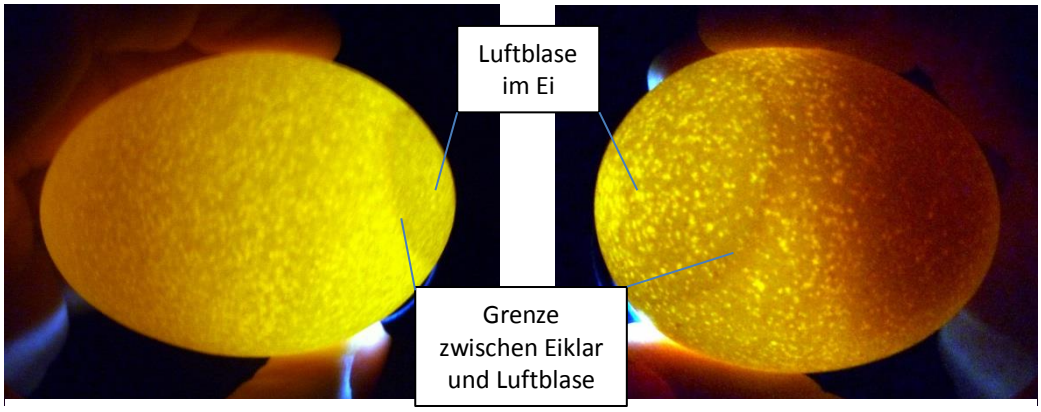


Abbildung 96 und 97: Das Durchleuchten der Eier zur Veranschaulichung der Luftblasen

- Dieses Phänomen ist auf die Beschaffenheit der porösen Kalkschale zurückzuführen, die man sich als System aus kleinsten Kanälen vorstellen kann. Je älter das Ei wird, desto mehr Feuchtigkeit wird in Form von Wasserdampf abgegeben. In Folge dessen wird der Platz durch Diffusion von Luft ins Inneren des Hühnereis gefüllt und die Luftblase vergrößert. Daran kann man erkennen, dass durch die Kalkschale Substanzen in gasförmigen Zustand diffundieren können. Dies sicher außerdem die Sauerstoff Versorgung des Kükens während der Brut.

Literatur: nach 53, 54

3.2.2 „Klein, aber enorme Kraft?!“ – Zerbrechen und Belastbarkeit des Eies

Nachdem nun die Gründe für das Schwimmen des Eis bekannt sind, wird das Ei im Folgenden auf seine Belastbarkeit erprobt.

Abbildung 98: Die Druckausübung auf die Spitzen des Eis

Materialien: zwei rohe Hühnereier

Versuchsdurchführung:

- Man nimmt ein rohes Hühnerei an den Spitzen Seiten zwischen Daumen sowie Zeigefinger und versucht, es zu zerdrücken.
- Das zweite Ei nimmt man hingegen an den flachen Seiten zwischen Daumen und Zeige-finger und übt wieder Druck aus.

Entsorgung: Die zerbrochenen Eier müssen in den Biomüll gegeben werden.

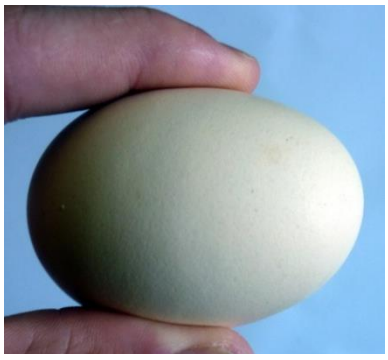


Abbildung 99: Die Druckeinwirkung durch die Finger auf die Längsseiten

Versuchsbeobachtung:

- Bei unbeschädigten Eiern ist es sehr schwer diese zu zerdrücken – besonders zwischen den beiden Spitzen.

Auswertung:

- Wenn man auf das Ei Druck ausübt, wird schnell klar, dass es mit seiner besonderen Geometrie (vgl. 2.3) eine sehr hohe Stabilität aufweist. Man kann darauf schließen, dass dieser Sachverhalt nicht auf das Material zurückzuführen ist, da ein Ei zerbricht wenn es beispielsweise auf den Boden fällt. Die Geometrie des Eikörpers trägt dazu bei, dass der Druck gleichmäßig auf das ganze Ei verteilt wird.
- Dies ist bei der Brut besonders wichtig, da die Henne das Ei drei Wochen belastet bevor ein Küken schlüpfen kann.

Literatur: nach 55, 56, 57, 58

3.2.3 Modell zum „ Eiern“? – Rollbahn des Eis als mathematische Funktion

Dieses Experiment beschäftigt sich mit dem Rollverhalten des Hühnereis und wird in mehreren Teilversuchen durchgeführt. Diese Idee wird mit den Ansätzen der Modellbildung verfolgt. Hierbei ist es besonders wichtig, dass ein Modell nicht der Realität entspricht und deshalb hinter dieser bleibt. Es dient mit den folgenden Schritten zur Vereinfachung der komplexen Wirklichkeit:

- Die **Abgrenzung** dient dazu, irrelevante Objekte eines Versuchs zu vernachlässigen, um genaue und präzise Ergebnisse zu erlangen.
- Durch die sogenannte **Reduktion** werden genaue Details eines Versuches vernachlässigt und somit das Experiment vereinfacht.
- Eine **Dekomposition** trägt mit der Zerlegung der Herangehensweise und Unterteilung in mehrere Segmente eines Experiments zu einer übersichtlichen Entwicklung der Versuchsergebnisse bei.
- Gegensätzlich dazu kommt es bei der **Aggregation** zur Verbindung von mehreren Teilsegmenten um den Modelkontext zu optimieren.
- Bei einer **Abstraktion** werden Objekte im Versuchsverlauf klassifiziert.

In einer Dekomposition werden zuerst Hypothesen aufgestellt und in einer Versuchsreihe Ergebnisse gesammelt, um diese auszuwerten und weiter auszuarbeiten. Als Ziel wird eine allgemeine Beschreibung des Rollens von Eiern anvisiert.
Es ist also ein Trugschluss ein Modell mit der Realität gleichzusetzen. Mit diesen Grundlagen beginnt man nun die Entwicklung des Models zum Rollverhalten des Hühnereis. [Nach 59]

(1) Teil der Experimentalreihe: Aufstellung von Hypothesen über das Rollverhalten von Hühnereiern

Im Folgenden werden Hypothesen zum Rollverhalten eines Eis aufgestellt, welche sowohl Zusammenhänge der Eigeometrie als auch Kombination von biologischen, mathematischen und natürlich-logischen Grundlagen umfassen.

I. Hypothese:

Das Hühnerei rollt immer auf geradem Weg eine schiefe Ebene hinunter.

II. Hypothese:

Die Rollbahn des Hühnereis lässt sich mit einer mathematischen Funktion beschreiben.

III. Hypothese:

Das Rollverhalten eines Eis ist von verschiedenen Parametern abhängig.

IV. Hypothese:

Die Rollbahn ist unabhängig von der Größe des Eis.

(2) <u>Teil der Experimentalreihe: Das Rollen des Hühnereis</u>

Nun hat das Ei einfach freie Bahn und wird probehalber über eine schiefe Ebene gerollt um erste Erkenntnisse zur Weiterführung des Modells zu erlangen.

Materialien: großer Tisch, Platte (2,80m x 1,20m), Unterlegkeile, Bretter, Wasserwaage, Metermaß, drei beliebig gewählte Hühnereier

Abbildung 100: Die Materialien für den zweiten Schritt der Experimentalreihe zum Rollverhalten des Eis

Versuchsdurchführung:

- Als erstes wird der große Tisch auf einer weitgehend ebenen Fläche aufgestellt, die Platte als Ebene sicher darauf platziert und gesäubert. Danach wird die Platte mit Hilfe von Metermaß und Wasserwaage vermessen. Hierbei wird diese mit den Unterlegkeilen in alle Richtungen ausgeglichen, um daraufhin mit einem passenden Brett eine schiefe Ebene zu erhalten.
- Bei seitlicher Ansicht (vgl. Abb. 101) wird nun das rechtwinklige Dreieck ABC festgelegt, bei welchem die schiefe Ebene die Hypotenuse bildet. So ergibt sich die Strecke h=[BC]. Außerdem wird die Steigung m_E durch den Winkel α festgelegt.

  Damit gilt: $sin\ \alpha = \frac{h}{[AC]}$

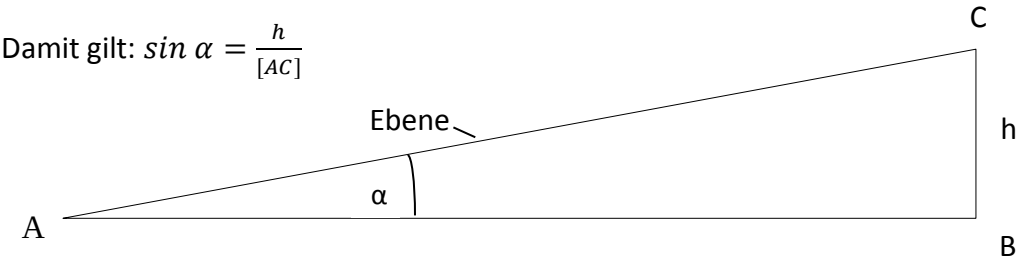


Abbildung 101: Die seitliche Ansicht einer schiefen Ebene

- Drei verschiedene Hühnereier, welche sich in Form sowie in Größe unterscheiden, lässt man die schiefe Ebene hinunterrollen. An dieser Stelle sollte man darauf achten, dass man die Startposition des Hühnereis in etwa immer gleich wählt.
- Im folgenden Schritt wird die Steigung der Ebene m_E variiert und das Verhalten der Hühnereier genau beobachtet.

Versuchsbeobachtung:

- Bei geringer Steigung m_E

$$\boldsymbol{\sin\alpha = \frac{2\ \mathbf{cm}}{280\ \mathbf{cm}} \rightarrow \alpha\ = 0{,}41°}$$

eiern die Eier die Ebene abwärts, d.h. sie rollen annähernd aneinanderhängende Parabeln (vgl. Abb. 102), welche bei kleineren Eiern enger ausfallen.

- Bei stärkerer Steigung m_E rollen die Eier asymptotisch von einer gedachten Linie, welche auf der Höhe des Startpunktes S liegt, weg.
- Bei einer sehr starken Steigung m_E beginnen die Eier schnell über die Längsseite zu rollen, was sich bis zum Zerbrechen steigern kann.

Abbildung 102: Die Rollbahn des Hühnereis bei niedriger Steigung

Auswertung:

- Wie aus der Beobachtung der verschiedenen Hühnereier hervorgeht, weichen die einzelnen Rollbahnen stärker voneinander ab. Das in der Theorie besprochene Oval (vgl. 2.3) ist nicht bei allen Eiern gleich. Man kann aber durchaus einen Zusammenhang erkennen beziehungsweise Vermutungen anstellen, wie man dieses Rollverhalten verallgemeinern kann:
    - Es lässt sich deutlich eine Abhängigkeit von der **Steigung m_E** der schiefen Ebene erkennen.
    - Außerdem wird ein unterschiedliches Rollverhalten von unterschiedlichen **Größen** der Hühnereier verursacht.
    - Ein weiterer Parameter, welcher nicht sofort ins Auge springt ist das **Alter** des Eis. Im Ei befindet sich an der stumpfen Seite die eingelagerte Luftblase, die wie unter 3.2.1 mit zunehmendem Alter immer größer wird. Eine unterschiedlich große Luftansammlung beeinflusst natürlich die Dynamik des Eis, da sich der Schwerpunkt zur spitzen Seite verlagert.
- Um eine allgemeine Beschreibung des Rollverhaltens zu erstellen, muss im nächsten Schritt durch eine Abgrenzung und Reduktion eine Standardisierung des Experiments erfolgen. Die Parameter müssen mit einem genauen oder allgemein gültigen Wert festgelegt werden.

- Zum Festhalten einer standardisierten Rollbahn bietet sich nun zur Beschreibung eine mathematische Funktion an. Diese Überlegung kann man auf Grund der immer gleich verlaufenden Rollbahn und dem asymptotischen Verhalten anstellen. Nun ist hierfür ein Koordinatensystem auf der Fläche der schiefen Ebene notwendig, wobei folgende Möglichkeiten einer Auftragung möglich sind:

  a. Bei der Festlegung des Koordinatensystems mit der y-Achse parallel zu den längeren Seiten (vgl. Abb. 103) der Ebene ergibt sich folgendes Problem: Wie in der oben stehenden Beobachtung erklärt, können die Eier bei bestimmter Größe und Steigung m_E aneinanderhängende parabelähnliche Kurven rollen. Dabei würden für einen x-Wert mehrere y-Werte auftreten, was die Rollbahn nicht als mathematische Funktion definierbar macht.

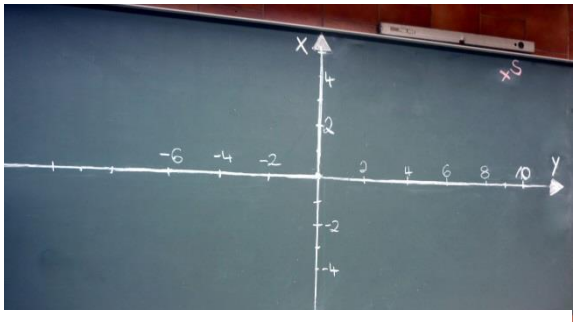


Abbildung 103: Möglichkeit a für die Festlegung des KOSYs

  b. Jedoch tritt dieselbe Problematik auch bei der anderen Anbringung des KOSYs auf, wenn die y-Achse parallel zu den Breiten aufgetragen wird.

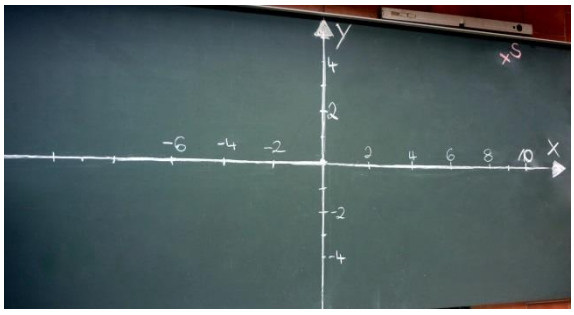


Abbildung 104: Möglichkeit b für die Festlegung des KOSYs

  - ➢ So ist die Beschreibung des Rollverhaltens mit Hilfe einer mathematischen Funktion und der niedrigen Steigung nicht möglich!

- Des Weiteren ist es zur Verallgemeinerung bedeutend, ebenfalls eine Reduktion des Hühnereis zu vollziehen. Dieses muss eine durchschnittliche Geometrie, Masse sowie eine Oberfläche ohne Auffälligkeiten besitzen.
- Hinzu kommt auch eine Standardisierung des Starts auf der schiefen Ebene, da der Beginn der Rollbahn besonders ausschlaggebend für den Rollweg ist. Deshalb ist es auch wichtig, das gleiche Ei 20 Mal über die gleiche Ebene rollen zu lassen, wodurch man mit dem arithmetischen Mittel ein aussagekräftiges Ergebnis erhält. Diese Bahnen müssen natürlich in einer übersichtlichen Form festgehalten werden.

(3) <u>Teil der Experimentalreihe: Standardisierung der Rollbahn des Hühnereis</u>

Materialien: Schere, Klebstreifen, Videokamera, Kreide, Zündholzschachtel, Hühnerei mit Standardmaßen

Versuchsdurchführung:

- Wie aus dem zweiten Schritt der Versuchsreihe hervorgeht, kann ein Koordinatensystem nur dann festgelegt sowie das Rollen mit einer mathematischen Funktion beschrieben werden, wenn keine geringe sondern eine mittlere Steigung vorgegeben wird. Durch eine Aggregation wird das KOSY wie unter 2b) (vgl. Abb. …) besprochen festgelegt und die Steigung m_E durch die Höhe h = 5,5 cm standardisiert. Mit der Länge der Platte [AC] = 280 cm und der Höhe ergibt sich der spitze Winkel α folgendermaßen:

$$\sin\alpha = \frac{5{,}5\ \mathbf{cm}}{280\ \mathbf{cm}} \rightarrow \alpha = \mathbf{1{,}13°}$$

- Nun wird ein durchschnittliches Ei (vgl. Abb. 105) bestimmt, welches ein regelmäßige Oberfläche sowie ein Standardoval als Eikörper, wie unter 2.3 definiert, besitzt, eine Masse von ca. 60 g aufweist und drei Tage alt ist.

Abbildung 105: Das standardisierte Hühnerei zur Veranschaulichung im Messschieber

- Im Anschluss wird die Startbox (vgl. Abb. 106, 107) zur Festlegung eines kontinuierlich gleichen Starts platziert, welche aus dem Rahmen einer Zündholzschachtel gewonnen wird und mit Hilfe von Klebeband befestigt werden kann. Die Startbox bildet den beliebig gewählten **Startpunkt S(9/5).** Das Ei, welches mit der stumpfen Seite an die Box gelegt wird, erhält genau wie die Startbox eine Markierung (vgl. Abb. …), damit der gleiche Start noch präzisiert werden kann.

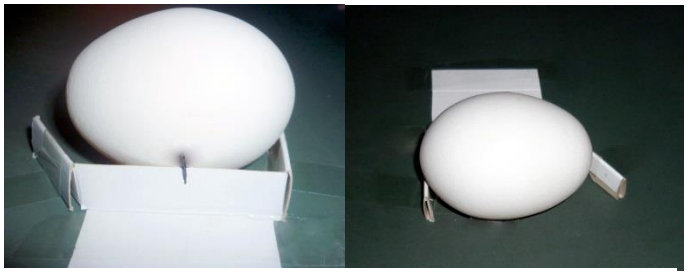


Abbildung 106 und 107: Die Startbox auf der Rampe im Startpunkt S(9/5)

- Sobald man diese aufgeführten Vorkehrungen vorbereitet hat, kann man das Hühnerei rollen lassen. Nachdem ca. 20 Rolldurchgänge erfolgt sind, welche man mit Hilfe der Videokamera filmt, können nun die Rollbahnen auf Papier gebracht werden. Hierbei ist eine große und übersichtliche Darstellung in mehreren Koordinatensystemen erforderlich.

Versuchsbeobachtung:

- Man stellt nun fest, dass die einzelnen Rolldurchgänge meist nahezu identisch einen weiten Bogen abwärts der Ebene verlaufen. Außerdem erkennt man nochmals deutlich das bereits gennannte asymptotische Verhalten.
- Dennoch gibt es unter den 20 Durchgängen vier *Ausreißer*, welche durch einen *Fehlstart* entstehen.

Auswertung:

- Nach der Übertragung der Rollbahnen von der Kamera auf Papier (vgl. Abb. 108) kann man die *Ausreißer*, also alle Graphen die stark vom durchschnittlichen Schema abweichen abgrenzen. Dadurch wird das Ergebnis konkretisiert und Messfehler durch Verwackeln o.Ä. können ausgeschlossen werden.

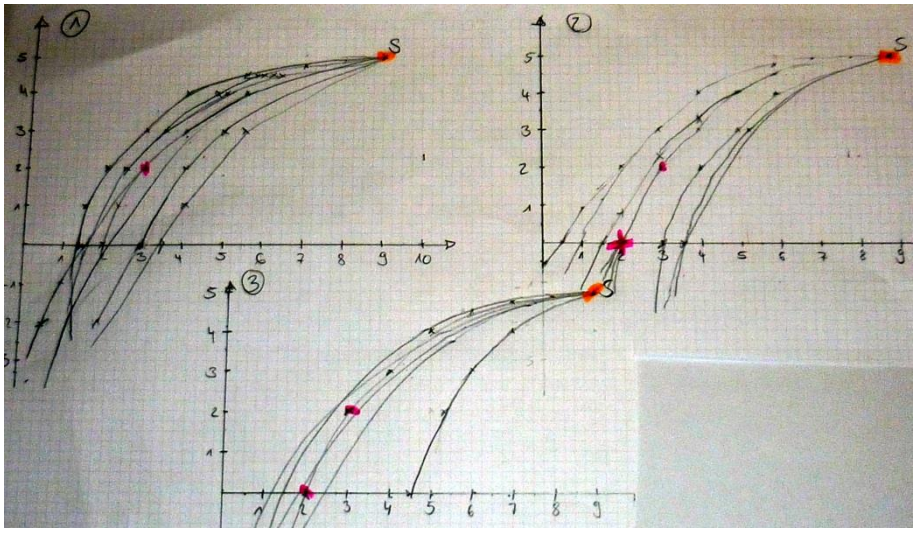


Abbildung 108: Die Übertragung der Rollfunktionen auf Papier

- Die zur Auswertung geeigneten Graphen werden also klassifiziert und nach der Auftragung mittels dem Pro-gramm GeoGebra zu einem Roll-bereich (vgl. Abb. 109) verarbeitet. Dies erfolgt in folgenden Schritten: Als Erstes wird der Startpunkt S(9/5) einge-fügt. Im Anschluss daran wird bei jeder x-Koordinate der größte und kleinste y-Wert mit einem Punkt festgelegt. Danach werden jeweils die größten sowie die kleinsten Funktionswerte mit Hilfe von Strecken miteinander verbunden.

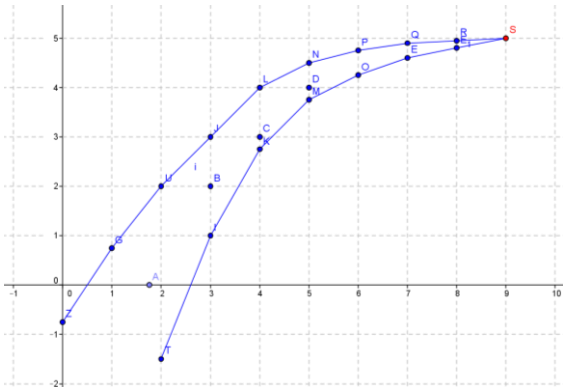


Abbildung 109: Der gewonnene Rollbereich des Hühnereis in GeoGebra

- Nun können Punkte angetragen werden (z.B. Schnittpunkte mit der x- und y-Achse), welche von den verwendeten Funktionsgraphen des Hühnereis häufig tangiert oder geschnitten werden. Daraufhin werden Funktionen gesucht, die in den vorgegebenen Funktionsbereich passen und möglichst viele markante Punkte schneiden. Hierbei kann man schnell Übereinstimmungen mit der Funktion des natürlichen Logarithmus f(x) = ln(x) erlangen, dessen Eigenschaften bereits oben unter 2.4 erklärt wurden.
- Mit den erklärten Eigenschaften dieser Funktion und dem gewonnenen Funktionsbereich wird der Graph der Funktion

$$f(x) = a\ \ln(c + bx) + d$$

in GeoGebra mit Hilfe von sogenannten Schiebereglern (vgl. Abb. 110) mit verwendeten Variablen möglichst exakt an den Rollbereich angepasst.

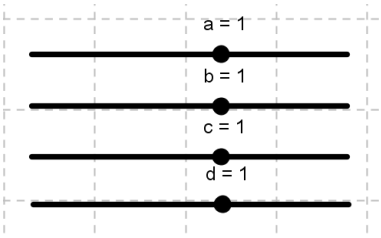


Abbildung 110: Die Schiebe-regler zur Anpassung der Funktion an den Funktionsbereich

- Durch systematische Anpassung erhält man folgende Funktionsgleichung mit zugehörigem Graphen:

$$h(x) = 1{,}3 \ln(-1{,}5 + x) + 2{,}4 \qquad D_h =]1{,}5;\ 9]$$

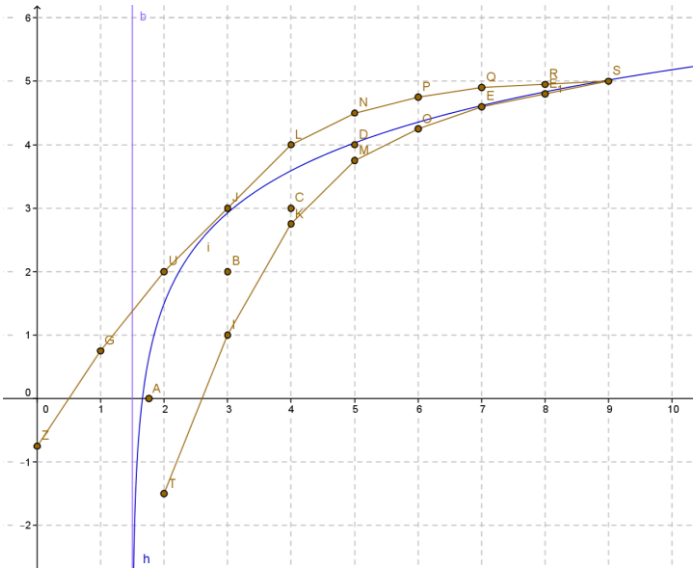


Abbildung 111: Der entwickelte Funktionsgraph zur Rollbahn des Hühnereis mit der Funktion *h(x) = 1,3 ln(-1,5 + x) +2,4*

- Bei der Entwicklung dieser Funktion h kann man nun deutlich die Eigenschaften des natürlichen Logarithmus erkennen. Wie in der Abbildung durch die blaue Asymptote b veranschaulicht, erkennt man das asymptotische Verhalten. Der Grund für dieses Rollverhalten ist das nicht gleichmäßige Abrollen, welches durch die Geometrie mit den zwei verschiedenen – stumpfer und spitzer– Seiten verursacht wird. Dadurch entsteht ein Ungleichgewicht, welches das Ei zur spitzen Seite neigen lässt und somit eine Drehachse verursacht. Somit ist die Geometrie der Grund für das typische Rollverhalten des Eis. [Nach 5, 25]

Nun da das Aufstellen einer Funktionsgleichung zur Rollbahn des Hühnereis gelungen ist, stellt man sich die Frage, in wie weit man dies als allgemein gültigen Sachverhalt verwenden kann. Deshalb wird im folgenden Schritt das Modell um den Parameter der Größe erweitert. Damit wird experimentell beleuchtet, ob man die Funktion des natürlichen Logarithmus auch auf andere Arten von Eiern anwenden kann.
Gelingt es also mit verschieden großen Eiern eine Funktionsschar des natürlichen Logarithmus zu erstellen?

(4) <u>Teil der Experimentalreihe: Rollen von anderen Eierarten</u>

So ist nun das Versuchsziel die Erstellung einer Funktionsschar in Abhängigkeit vom Parameter der Größe. Hierfür bieten sich Eierarten an, welche einen stärkeren Größenunterschied wie z.B. das Straußenei und das Wachtelei aufweisen, um eindeutige Ergebnisse zu erlangen.

Abbildung 112: Die gewählten Eierarten: das Straußenei, das Hühnerei sowie das Wachtelei (v.l.)

Geräte: Brett (Länge: 1m), Winkeleisen, ausgewälte Vogeleier (neu: Wachtelei und Straußenei), Videokamera

Versuchsdurchführung:

- Auf der bereits standardisierten Bahn werden zur Präzision eines immer gleichen Starts die Eier sowie die Startboxen markiert. Beim Straußenei muss jedoch auf Grund der Größe die Startbox durch ein Brett (vgl. Abb. 113), welches im rechten Winkel auf der Rampe angebracht wird, ersetzt werden.

Abbildung 113: Das Straußenei am Startpunkt S

- Man lässt die beiden Eierarten jeweils 20 Mal die Ebene hinunterrollen, was man mit Hilfe der Videokamera dokumentiert.
- Im Anschluss daran überträgt man die festgehaltenen Rollbahnen auf Papier, wobei eine große und übersichtliche Darstellung in mehreren Koordinatensystemen erforderlich ist.

Versuchsbeobachtung:

- Beide Eierarten rollen je kontinuierlich nahezu identische Bögen über die Rampe und es treten kaum *Ausreißer* auf.
- Das Wachtelei rollt langsam einen sehr kleinen, scharfen Bogen und bleibt nach kurzem zurückpendeln im tiefsten Punkt der Kurve liegen.
- Das Straußenei hingegen rollt schnell eine weite Kurve die Rampe hinunter.

Auswertung:

- Nachdem man die Rollbahnen auf Papier gebracht hat, können die *Ausreißer* abgegrenzt werden. Im Anschluss können die klassifizierten Graphen mit dem mathematischen Programm GeoGebra zu einem Rollbereich verarbeitet werden. So wird der Startpunkt S(9/5) eingefügt, jeweils die extremen y-Koordinaten zu den x-Koordinaten bestimmt und die gewonnenen Punkte mit Strecken verbunden. Häufig tangierte Punkte werden eingefügt und man versucht durch eingesetzte Schieberegler folgende Funktion des natürlichen Logarithmus anzupassen: **f(x) = a ln(c + bx) + d**.
- Bei beiden Eiern stellt man wiederum fest, dass das Rollen durch die Geometrie mit der spitzen und flachen Seite beeinflusst wird, da es zu einem ungleichmäßigen Abrollen kommt.
- Durch die Beobachtung des **Wachteleis** und die Auswertung in GeoGebra, welche auf die gleiche Weise erfolgt wie beim Hühnerei, erkennt man, dass der Rollbereich nicht als mathematische Funktion definierbar ist. Es ergeben sich mehrere Funktionswerte für einen x-Wert, da das Wachtelei eine enge Kurve rollt (vgl. Abb. 114). Dies weist auf den ersten Blick daraufhin, dass das Wachtelei von diesem Modell nicht gefasst werden kann. Dennoch wird durch den Rollbereich ein Funktionsgraph konstruiert, welcher die Asymptote c besitzt. Die konstruierte Funktion w(x) besitz die Gleichung:

w(x) = 0,3 ln(-8 + x) + 5 **D_w =]8; 9]**

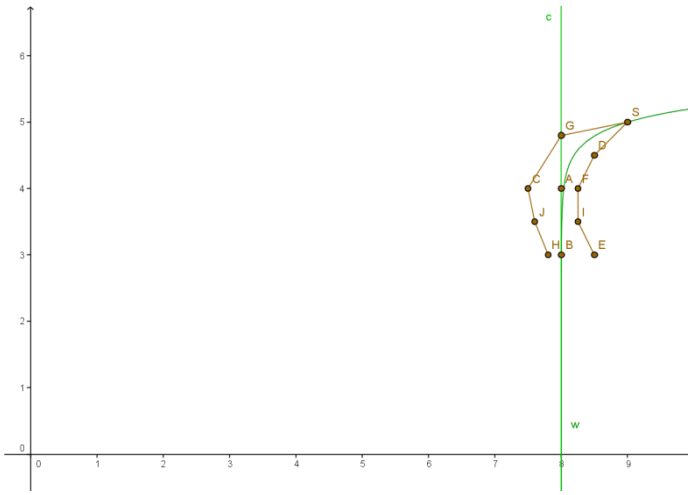


Abbildung 114: Der nicht definierbare Rollbereich mit der dennoch konstruierten Funktion *w(x) = 0,3 ln(-8 + x) + 5*

- Im Gegensatz dazu ist es beim **Straußenei**, wie beim Hühnerei, eindeutig möglich einen Funktionsbereich mit wahrscheinlicher Rollfunktion s(x) (vgl. Abb. 115) zu entwerfen. Es ergibt sich nach der Auswertung in GeoGebra folgende Funktion: **$s(x) = 3{,}8 \ln(15 + x) - 7$** **$D_s =]-15; 9]$**

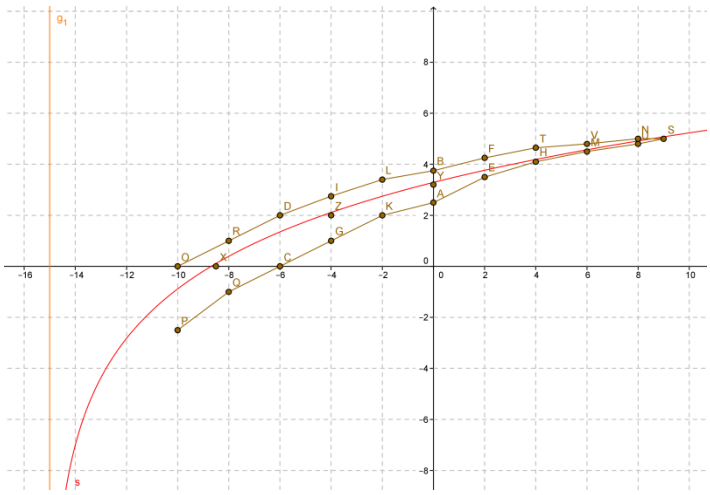


Abbildung 115: Der gewonnene Funktionsgraph zur Rollbahn des Straußeneis mit der Funktion *$s(x) = 3{,}8 \ln(15 + x) - 7$*

- Dieser Teil des Experiments bringt einen neuen, noch nicht bedachten Aspekt des Modells ans Licht: Durch die Wahl von größenmäßig sehr unterschiedlichen Eierarten kann man erkennen, dass diese Versuchsanordnung auf der schiefen Ebene von Hühnerei und Straußenei nur die Hälfte der Rollbahn oder gar noch weniger veranschaulicht. Man muss also davon ausgehen, dass die Funktionen nur in einem kleinen mathematischen Bereich die Rollbahnen beschreiben. Die beiden größeren Eier würden also ähnlich wie das Wachtelei eine nicht definierbare Kurve rollen, wenn der Modellaufbau diese Rollbahnen nicht beschränken würde.
- Bevor man nun die Rollbahnen zu einer Funktionsschar bzw. einem Bündel zusammenfasst, ist es wichtig zu erkennen, dass jede dieser Funktionen ihren eigenen Definitionsbereich festlegt. Dies erkennt man bei genauerer Betrachtung der Funktionsgleichungen: Das asymptotische Verhalten der einzelnen Rollfunktionen des natürlichen Logarithmus mit der Variable c sowie der Startpunkt S legen allgemein den Definitionsbereich für eine Rollfunktion eines Eis fest: **$D_r =]-c; 9]$**

- Unter Beachtung von diesem Sachverhalt kann man nun die Funktionsgraphen der Rollbahnen von Eiern mit den zugehörigen Asymptoten zu einem **Bündel** zusammenfassen. Dieses besitzt den **gemeinsamen Punkt S(9/5)** und die **Funktion f(x) = a ln(c + bx) – d** mit der **Definitionsmenge D_r =]-c; 9]**:

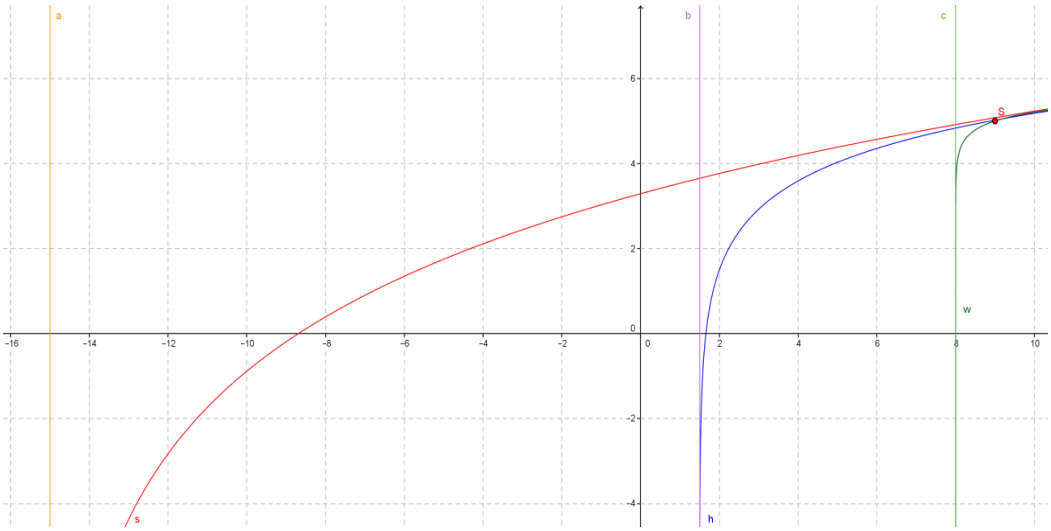


Abbildung 116: Die drei gewonnen Funktionsgraphen mit ihren Asymptoten als Bündel in (9;5)

Dieser komplexe Sachverhalt wird nun in einem Exkurs auf die Natur übertragen, wobei dies in keiner Weise das Nacheifern der Realität bedeuten soll. Es soll lediglich zur Veranschaulichung der Zusammenhänge der biologischen, mathematischen sowie physikalischen Hintergründe des Modells dienen. [Nach 60]

<u>Exkurs</u>: *Welche Vorteile bringt die Geometrie des Hühnereis nun eigentlich mit sich?*

Mit den Grundlagen zur ovalen Geometrie unter 2.3 und den gewonnenen Erkenntnissen aus den letzten Versuchen können einige Vorzüge dieser Geometrie aufgezeigt werden. Als Erstes folgt eine Gegenüberstellung von Natur und Roll-Modell.

Natur	&	Modell zum Rollverhalten

Abbildung 117: in der Natur - das Ei rollt aus dem Nest

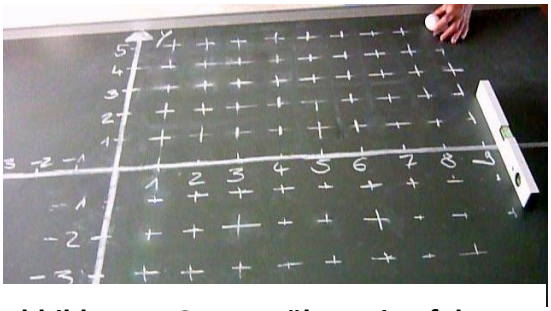


Abbildung 118: Das Hühnerei auf der schiefen Ebene

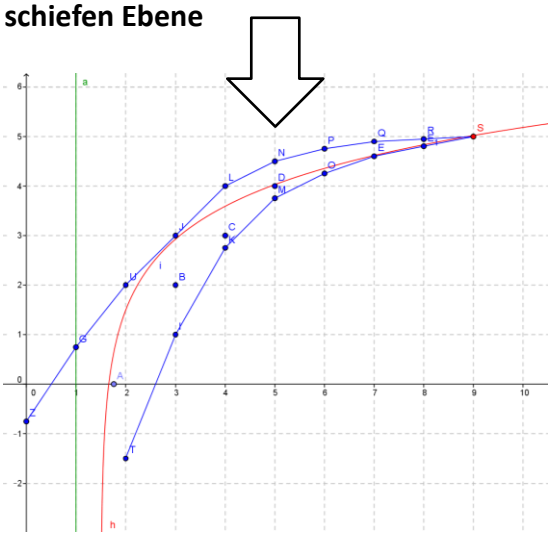


Abbildung 119: Die mathematischen Funktion zum Rollverhalten des Hühnereis

Man kann auf diese Weise gut erkennen, dass das erarbeitete Modell (vgl. Abb. 118) das Rollverhalten des Eis verallgemeinert. Evolutionär hat sich die ovale Form des Eis bei Vögeln zum einen auf Grund des weniger weiten Wegrollens durchgesetzt. Man kann in Bezug auf die Rollfunktion (vgl. Abb. 119) davon ausgehen, dass die Geometrie eine Art des Brutschutzes darstellt. Das evolutionäre Ziel ist, keine große Distanz zwischen Nest bzw. Muttervogel und Ei entstehen zu lassen (vgl. Abb. 117). Dadurch wird eine höhere Garantie der lebenserhaltenden Wärme durch das Huhn geboten, was für Entwicklung eines Embryos im Huhn unerlässlich ist. Daneben kann das Ei besser geschützt werden, da es durch das weniger weite Wegrollen nicht verloren geht sowie nicht durch das natürliche Umfeld (Steine o. Ä.) beschädigt werden kann. Zu

guter Letzt kann es im Ernstfall zurück in das Nest oder bei andern Vogelarten zurück in die vorgesehene Erdmulde befördert werden.

Darüber hinaus bringt die natürliche Umgebung einer Brut am Boden kleine Hindernisse (z.B. Pflanzen, Sand) mit sich, welche das Ei beim Wegrollen zusätzlich bremsen. Natürlich ist dieses Rollverhalten für Vögel, die in Bäumen ihre Nester haben von höchster Bedeutung, da die Eier beim Rollen nur einen kleinen Kreis beschreiben und so an ihrem Platz verharren. Außerdem ist ein biologischer Zusammenhang mit der Größe der Eier erkennbar. Logischerweise hat ein kleiner Vogel wie die Wachtel (vgl. Abb. 120) nicht dieselbe Möglichkeiten und vor allem Kraft wie ein Vogel Strauß (vgl. Abb. 121) das Ei zurück in das zugehörige Nest zu befördern. Natürlich ist das Ei auch anatomisch der Größe des Vogels angepasst. Wie auch im Modell festgestellt wurde, beeinflusst die Größe eines Eis die entstehende Rollbahn deutlich.

Abbildung 120: Die Wachtel – ein kleiner Laufvogel

Abbildung 121: Der Vogel Strauß – ein großer Laufvogel

Des Weiteren bietet die Anpassung der Geometrie nicht nur im Zusammenhang mit dem Rollen Vorzüge. Im hypothetischen Vergleich *Was wäre anders, wenn das Hühnerei eine Kugel wäre?* ergeben sich weiter Vorteile der ovalen Form.

Oval	**←→**	**Kugel**

Abbildung 122: Die Eikörper der Hühnereier im Nest

Abbildung 123: Die Darstellung der *Kugeleier* mit Hilfe von Billardkugeln

Neben dem vorteilhaften Rollen erkennt man noch zwei weitere evolutionär entwickelte Vorzüge. Im Allgemeinen kann das Gelege eines Vogels durch die ovale Geometrie bei der Brut viel kompakter zusammengehalten werden. Es entsteht also bei der hypothetischen Vorstellung, dass ein Gelege aus Kugeln bestünde, ein großer Anteil von Zwischenräumen (vgl. Abb. 123) zwischen den einzelnen *Eiern*. Das Huhn kann also durch die ovale Eiform (vgl. Abb. 122) das Gelege effektiver warm halten, da die sich gegenseitig anpassenden Eikörper den Platz im Nest optimal ausfüllen. Die gleichmäßige Nähe zum Brutfleck verbessert die Entwicklung der werdenden Küken. Der Brutfleck ist eine gut durchblutete Stelle am Bauch von Vögeln, welche die Wärmeübertragung auf das Gelege unterstützt. Folglich ermöglicht die Geometrie also eine effektivere Brut sowie eine höhere Anzahl an Nachkommen.

Als letzter aber sehr wichtiger Vorteile dieser Geometrie des Hühnereis ist ebenfalls die erhöhte Stabilität zu nennen. Das Ei ist so für die Belastung bei der Brut gewappnet, da ein Haushuhn 21 Tage auf ihrem Gelege sitzen muss, bis die Küken schlüpfen. So ist die Geometrie, welche die Eier besonders in der Spitze stabilisiert, wichtig für den Schutz des Geleges. Durch den bereits durchgeführten Versuch zur Belastung des Eis unter 3.2.2 wurde diese Stabilität veranschaulicht. Diese Belastungsfähigkeit geht sogar so weit, dass sich Architekten in der Vergangenheit an dieser Form inspirierten und den Rundbogen (vgl. Abb. 124) entwickelten.

Abbildung 124: Das Meisterwerk römischer Bogenarchitektur: der Pont du Gard

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die hypothetische Vorstellung ein Huhn lege *Kugeleier* deutlich wird, dass der Eikörper mit dem Rollen einer Kurve, der hohen Stabilität und der Anpassungsfähigkeit im Nest eine Verbesserung der Fortpflanzungsmöglichkeit von Vögeln mit sich bringt.
Wenn man diese Gedanken weiterverfolgt und den biologischen Zusammenhang berücksichtigt, könnte man sich die Frage stellen, ob eine Weiterentwicklung des Hühnereis zum Würfel denkbar wäre, wenn dies weitere Vorteile für die Brut mit sich brächte?

Durch diesen Exkurs wurde die Komplexität dieser Zusammenhänge noch deutlicher. Zum Schluss werden die gewonnen Ergebnisse zum Roll-Modell zusammengefasst und die Hypothesen nochmals begutachtet.

(5) Zusammenführung der Ergebnisse zum Rollverhalten des Eis und Stellungnahme zu den genannten Hypothesen

Zum Abschluss dieser Versuchsreihe werden nun die anfangs angestellten Hypothesen nochmals aufgegriffen und im Zusammenhang mit den gewonnen Ergebnisse und den Grundlagen zum Hühnerei bestätigt oder widerlegt.

I. Hypothese:

Das Hühnerei rollt immer auf geradem Weg eine schiefe Ebene hinunter.

Diese Hypothese kann man durch die Beobachtung des Hühnereis beim Rollen und den asymptotischen Verlauf mit einer engeren oder weiteren Kurve widerlegen. Durch dieses Verhalten rollt es nicht weit vom gegebenen Startpunkt weg. Man kann dies durch das nicht gleichmäßige Abrollen erklären, welches durch die zwei verschiedenen Seiten verursacht wird. Durch dieses Ungleichgewicht neigt sich das Ei zur spitzen Seite und verursacht somit eine Drehachse.

II. Hypothese:

Die Rollbahn des Hühnereis lässt sich mit einer mathematischen Funktion beschreiben.

Es ist in diesem Modell anhand des natürlichen Logarithmus gelungen, das Rollen des Eis mit einer mathematischen Funktion zu veranschaulichen. Auf Grund von mathematischen Grundlagen wurde bei der Funktion **f(x) = a ln(c + bx) + d** Folgendes festgelegt:
Die Variablen a und b beeinflussen die Funktion formgebend durch Streckung, wobei die Variablen c und d zu einer Verschiebung eines Graphen führen. Der Parameter a bewirkt eine Streckung entlang der y-Achse, wohingegen der Parameter b eine Streckung in x-Richtung verursacht.

III. Hypothese:

Das Rollverhalten eines Eis ist von verschiedenen Parametern abhängig.

Diese Hypothese ist vollkommen korrekt und dazu ein sehr wichtiges Detail von diesem Modell. Die im zweiten Schritt der Versuchsreihe genannten Parameter der Größe, die Steigung m_E sowie das Alter mussten zuerst festgestellt werden und im Anschluss standardisiert, um ein aussagekräftiges Ergebnis zu erlangen.

IV. Hypothese:

Die Rollbahn ist unabhängig von der Größe des Eis.

Das Rollverhalten des Eis ist sehr wohl abhängig von der Größe. Um dies genauer zu veranschaulichen wurden im vierten Schritte der Experimentalreihe extreme Eierarten, wie der Wachtel und des Vogel-Strauß, gewählt. Die andern Parameter konnten erfolgreich standardisiert werden.

Art des Eis	Zugehörige Funktion	Definitionsbereich
Wachtelei	$w(x) = 0{,}3 \ln(-8 + x) + 5$	$D_w =]8; 9]$
Hühnerei	$h(x) = 1{,}3 \ln(-1{,}5 + x) + 2{,}4$	$D_h =]1{,}5; 9]$
Straußenei	$s(x) = 3{,}8 \ln(15 + x) - 7$	$D_s =]-15; 9]$

Abbildung 125: Eine tabellarische Aufführung der erstellten Rollfunktionen mit Definitionsbereichen

Wenn man nun die Ergebnisse zusammenträgt und die Funktionsgleichungen betrachtet, kann man erkennen, dass die Variable a die Größe eines Eis widerspiegelt und so die Auswirkung auf das Rollen mit einer engeren oder weiteren Kurve veranschaulicht werden. Durch die Betrachtung der drei Rollfunktionen (vgl. Abb. 125) kann man dies nochmals untermauern.

Wie aus den Funktionen der Rollbahnen hervorgeht ist die Variable b = 1 immer gleich (vgl. Abb 125). Diese bewirkt eine Streckung in x-Richtung, wobei in dieser Modellanordnung keine unterschiedliche Dehnung oder Stauchung dieser Art erfolgt. Man könnte also davon ausgehen, dass b bei unterschiedlicher Steigung m_E verändert wird.

Diese veränderbare Größe spricht also nicht auf verschieden große Eierarten an. Um dies zu belegen müsste eine neue Versuchsreihe angestellt werden, wobei man bei verschiedenen Eiern jeweils die Steigung der schiefen Ebene variieren muss. Diese Variation wird im Rahmen dieser Seminararbeit nicht durchgeführt.

Darüber hinaus ist auch die Variable c eine markante Eigenschaft von dieser Funktionsschar, da diese für jede einzelne Funktion den Definitionsbereich festlegt. Durch diese veränderliche Größe c wird eine Verschiebung in x-Richtung verursacht. Weiter wird mit den Eigenschaften des natürlichen Logarithmus – genauer dem asymptotischen Verhalten – der Definitionsbereich festgelegt.

Zu guter Letzt verursacht die veränderbare Größe d eine Verschiebung entlang der y-Achse. Dieser kommt im Zusammenhang weniger Bedeutung zu, da d nur von der Wahl der Startposition des Eis abhängt.

Zum Abschluss dieser Experimentalreihe kann man sagen, dass die Geometrie des Hühnereis grundsätzlich einen Eikörper darstellt, welcher die erkannten Vorteile der **Stabilität**, der **Anpassungsfähigkeit im Nest** und des **gehemmten Wegrollens** mit sich bringt. Dies erhöht einerseits den Bruterfolg aller Vögel, kann aber andererseits bei einer Weiterentwicklung der Erkenntnisse, wie in der späteren Reflexion (vgl. 6) geschildert, zu einem System zur Prüfung von Eiqualität oder anderen nutzbringenden Vorgängen weiterverarbeitet werden.

3.3 „Die Sendung mit dem Huhn“ – Ein kurzer Filmbeitrag zum Hühnerei

Das Hühnerei ist als hochentwickeltes kleines System eine Vereinigung von vielen chemischen und physikalischen Vorgängen, welche zusammenspielen. Um einen kleinen Einblick zu geben und die Interesse zum Lesen dieser Seminararbeit zu fördern, liegt dieser Filmbeitrag bei. Dieser umfasst Ausschnitt der theoretischen Grundlagen sowie Eindrücke über die Durchführung der praktischen Untersuchungen.

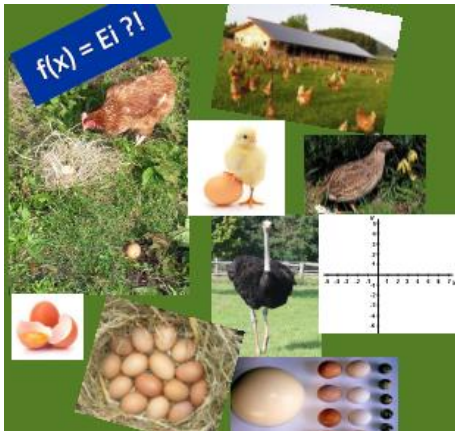


Abbildung 126: Das Cover des Kurzfilms zum Hühnerei

4 „Sind wir jetzt schlau genug zum Eierlegen?!“ – Ein Ausblick zum Konflikt der Massenproduktion von Hühnereiern

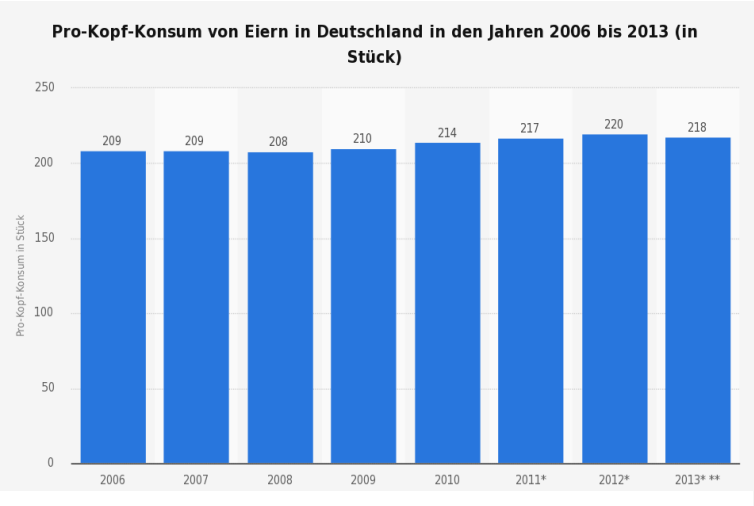


Abbildung 127: Der Jahresverbrauch von Hühnereiern pro Kopf

Wie man im Zusammenhang mit dieser Seminararbeit feststellen kann, ist dieses kleine, ovale System sehr ausgeklügelt. Grundsätzlich ist das Ei auf die optimale Fortpflanzung sowie einen raffinierten Brutschutz ausgelegt. Wie man aus den vorausgegangenen Kapiteln entnehmen kann, sind Nährstoffreserven sowie alle nötigen Vorräte für die Entwicklung eines Embryos bereitgestellt. Typischerweise hat der Mensch schnell diesen besonders wertvollen Inhalt entdeckt und ihn sich praktisch zu Eigen gemacht. Durch eine sehr hohe Nachfrage wurden die verschiedenen Haltungsformen von Legehennen in der Vergangenheit deutlich ausgebaut und intensiviert. Die Nutzung des Eis verursacht so eine Massenproduktion. *Nur wo soll das enden?* Der Jahreserbrauch von Hühnereiern pro Kopf stieg stetig, von 2004 bis 2012 von 209 auf 220 Stück (vgl. Abb. 127). Das Einzige, was dieses Wachstum einschränken könnte, ist die moderne Gesellschaft. Diese verlangt zunehmend aus Tierschutzgründen eine artgerechtere Haltung von Legehennen. Die Zahl von 218 Stück im letzten Jahr 2013 könnte eine Andeutung auf einen Rückgang oder auch nur ein leichte Schwankung darstellen. Dennoch werden die Diskussionen um Profit und Tierschutz höchst wahrscheinlich keinen baldigen Konsens mit sich bringen, da eine tierfreundlichere sowie teurere Produktion bei steigender Nachfrage nicht einfach zu bewerkstelligen ist. Dennoch kann ein Appell an die Verbraucher ausgesprochen werden. Der bewusste Konsum von Hühnereiern und ein Gedanke daran, woher die vielen Eier kommen, muss eine solide Grundlage für diesen Konflikt bilden. Nichtsdestotrotz wird das Hühnerei immer ein sehr gefragtes Nahrungsmittel bleiben, da es in der Küche unabdingbar ist. Zudem sind zahlreiche Traditionen an Ostern mit diesem ovalen Wunder verbunden.

5 „Das passt alles in nur ein Ei?“ – Zusammenfassung der theoretischen und praktischen Betrachtungen des Hühnereis

Mit einem Verweis auf einen sehr aktuellen Lebensmittelskandal erfolgt der Einstieg in die Seminararbeit *„Ei, Ei, Ei,… klein aber Oho!“ – Chemische und physikalische Untersuchungen des Hühnereis*. Um die chemischen sowie physikalischen Aspekte experimentell genauer betrachten zu können, wird dieses kleine Wunder mit den theoretischen Grundlagen zuerst analysiert. Dabei wird der Aufbau geschildert und im Anschluss daran die Funktion der Bestandteile – Eiklar, Eidotter und Kalkschale – veranschaulicht, indem auf molekularer Ebene der Aufbau erläutert wird. So sind diese drei Bestandteile zum Schutz und zur Versorgung des Embryos besonders wichtig.
Neben der chemischen Theorie wird die Geometrie des Hühnereis, welches einen stabilen Eikörper darstellt, begutachtet. Ebenfalls bekommen die Eigenschaften der Funktion des natürlichen Logarithmus im späteren Zusammenhang besondere Bedeutung.
Darüber hinaus ist der behandelte Gesichtspunkt über den Zweck des Hühnereis von zeitgenössischer Wichtigkeit. Dieser dient natürlich grundlegend der Arterhaltung, wird aber von der heutigen Gesellschaft mit der Nutzung in der Nahrungsmittelindustrie und der damit verbundenen Massenproduktion von Eiern entfremdet. So werden in diesem Kontext die Vorteile des Eis für die Nahrungsmittelindustrie konkretisiert, welche die thermische Koagulierbarkeit, das Schaumbildungsvermögen sowie die Wirkung als Emulgator umfassen. Zusätzlich werden die Merkmale der verschiedenen Haltungsformen von Legehennen vorgestellt.
Mit dieser Basis werden nun die chemischen Untersuchungen begonnen, wobei man sich als Erstes dem Eiklar widmet. Dabei wird die molekulare Struktur dessen durch den Nachweis der Peptidbindungen und der aromatischen Aminosäuren in der Biuret-Reaktion sowie der Xanthorotein-Reaktion veranschaulicht. Überdies geht man dem Phänomen der Denaturierung – untermauert mit einem Exkurs – auf den Grund und stellt einen Bezug zum Alltag in der Küche und der Nahrungsmittelindustrie her, indem das Geheimnis des Eischaums gelüftet wird.
Im Anschluss daran wird der Dotter des Eis untersucht. Dabei gewinnt man durch Extraktion den gängigen Emulgator Lecithin, von welchem infolgedessen die Eigenschaften bei der Fettfleckprobe und der Mayonnaise-Herstellung genauer belegt wer-

den. So kann der Alltagsbezug zu den theoretischen Grundlagen geknüpft werden.

Ferner wird die harte Kalkschale bei zwei Säure-Base-Reaktionen nach Brønsted aufgelöst und das Ei chemisch geschält. Im Folgenden wird der Hauptbestandteil des Eis – nämlich das Wasser – in Dotter und Eiklar qualitativ nachgewissen

Angekommen bei der Physik des Hühnereis wird die Vergrößerung der Luftblase mit dem Alter belegt, und die hohe Stabilität des Hühnereis erprobt.

Mit einer Experimantalreihe in fünf Schritten wird das Rollverhalten des Hühnereis untersucht. Dabei wird nach der Aufstellung von Hypothesen ein standardisierter Versuchsaufbau entwickelt, durch den es möglich ist, die Rollbahn des Eis mit der Funktion des natürlichen Logarithmus zu beschreiben. Dieses Roll-Modell wird darüber hinaus um den Parameter der Größe erweitert, was zu einer Aufstellung einer Funktionsschar führt. Aus diesem Bündel können nun Ergebnisse wie Zusammenhänge von Parameter und Variablen festgestellt werden. In einem Exkurs werden ebenso die Vorteile der ovalen Geometrie mit dem biologischen Hintergrund verarbeitet. So erkennt man, dass diese zu einer verbesserten Anpassungsfähigkeit im Nest, einer hohen Stabilität sowie eines kontrolliertem Rollverhaltens führt. Abschließend wird durch eine Stellungnahme zu den anfänglichen Hypothesen die Experimentalreihe beendet. Um einen Überblick über diese Ansammlung von verschiedensten Aspekten zu erleichtern und die Interesse zum Lesen dieser Arbeit zu wecken, liegt der Seminararbeit ein kurzer Filmbeitrag bei.

Zum Abschluss wird ein Ausblick über die zukünftige Produktion von Hühnereiern geben. Da es sich beim Hühnerei um ein wichtiges Nahrungsmittel handelt und Konflikt zwischen Tierschützern und Produzent entstehen, ist der Verbraucher aufgerufen, sich mit dieser Diskussion zu beschäftigen.

6 „Alles nur Gegacker zum in die Pfanne hauen?!“ – Selbsteinschätzung und Reflexion mit möglichen Verbesserungen

Die Entstehung und Verfassung meiner Seminararbeit ist vergleichbar mit der Entwicklung eines Embryos im Hühnerei, der bis hin zum Küken innerhalb eines gewissen Zeitrahmens heranwächst. Wenn man so möchte, kann die Idee – die Rollbahn des Hühnereis als mathematische Funktion – mit einem Keimfleck verglichen werden, welche zwar nicht durch die Paarung von Henne und Hahn zustande kommt, sondern durch die Verbindung aus der Interesse an Lebensmitteln sowie der Tierhaltung. Diese wächst nun heran, versorgt mit der mütterlichen Wärme des Huhns, der unabdingbaren Kraft aus den Nährstoffen des Dotters aber auch schwimmend in einer trüben Flüssigkeit – oder Gewissheit – wie dem Eiklar. Wichtig ist natürlich von Anfang an der nötige Schutz der Idee beziehungsweise des Keims durch einen bestärkenden Rat sowie eine hilfreiche Stütze oder einfach durch das ausgeklügelte Schutzsystem der Kalkschale.
Nach meiner Entscheidung wurde diese Arbeit mit der Kombination aus den chemischen und mathematisch-physikalischen Aspekten des Hühnereis durchgeführt. Man hätte jedoch auch eine andere – mehr biologisch angehauchte – Kombination zu den Aspekten des Hühnereis wählen können. Mit den theoretischen Grundlagen wurde eine erfolgreiche Ausarbeitung von experimentellen Gesichtspunkten möglich. Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit – das Rollverhalten des Eis – wurde in einer Versuchsreihe erprobt (vgl. 3.2.3). Erfreulicherweise wurde das Ziel erreicht, eine mathematische Funktion zur Verallgemeinerung des Rollens zu erstellen. Es wurde deutlich, dass die Geometrie des Eis eine evolutionär entwickelte Schutzmaßnahem darstellt, was mit dem Exkurs zu den biologischen Hintergründen untermauert werden konnte. Bei dieser Durchführung ist jedoch zu bedenken, dass eine Reihe von Faktoren die Ergebnisse beeinflussen. So zum Beispiel das Übertragen der Rollbahnen auf Papier und die anschließende Entwicklung einer mathematischen Funktion in GeoGebra. Hierbei lässt sich der subjektive Parameter nicht gänzlich ausschalten: *Wann führt die angepasste Funktion genau durch den Rollbereich? Startet das Ei im Punkt S(9/5) einwandfrei? Durch welche markanten Punkte rollt der Eikörper? Warum wählt man zur Erweiterung des Modells den Parameter der Größe?* Wie man sieht ist die Herangehensweise und Standardisierung von persönlicher Logik geprägt und könnte natürlich

zur Optimierung in einer anderen Weise zusammengesetzt werden! Darüber hinaus könnten die Auswirkungen der anderen Parameter untersucht werden. Der zukünftige Nutzen dieser Rollfunktion liegt also in der weiteren Entwicklung. Es ist mit diesen Grundlagen durchaus denkbar, beispielsweise ein System zur Qualitätssicherung und Prüfung von Hühnereiern zu entwerfen. Durch die Kenntnis verschiedener Parameter z.B. der Größe der Eier und der Steigung einer Rampe kann ein anderes Parameter wie das Alter festgestellt werden.

Zu guter Letzt kann man jedoch sagen, dass der Forschungsabschnitt zum Hühnerei, nicht annähernd so anerkannt und *ausgereift* ist, wie die chinesische Delikatesse: „Die tausendjährigen Eier“ [16] (vgl. Abb. 126). Hierbei handelt es sich um Hühnereier, die durch Fermentation zubereitet werden.

Abbildung 128: Eine chinesische Spezialität: "Die tausendjährigen Eier“

[16]Näheres unter: http://www.fr-online.de/panorama/chinesen-lieben--tausendjaehrige-eier--da-ist-doch-was-faul-,1472782,2991236.html; erster Absatz

7 Literaturverzeichnis

Bücher:

1. D. Voet, J. G. Voet, C. W. Pratt: „Lehrbuch der Biochemie“;
   1. Auflage, Weinheim, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002
2. K. Peter C. Vollhardt, N. E. Schore: „Organische Chemie“;
   2. Auflage, Weinheim, VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995
3. A. Glas: „Praktisches Handbuch der Lebensmittel“;
   1. Auflage, München, Bayerischer Landwirtschaftsverlag BLV, 1965,
4. Belitz, Grosch, Schieberle: „Lehrbuch der Lebensmittelchemie“;
   5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio, Springer Verlag, 2001
5. H. Götz, M. Herbst, C. Kestler, H. Kosuch, Dr. J. Novontný, B. Sy, T. Thiessen, A. Zitterbart: „Lambacher Schweizer 11 - Mathematik für Gymnasien“;
   1. Auflage, Stuttgart, Ernst Klett Verlag, 2009
6. I. Hefner, G. Herrmann, W. Kraus, C. Kreß, F. Orlik, R. Spichtinger: „Galvani Chemie 11“,
   1. Auflage, München, Bay. Schulbuch Verlag GmbH, 2009

Internetseiten:

7. Dioxinskandal:
   http://www.spiegel.de/wirtschaft/service/dioxin-skandal-belastete-ware-koennte-schon-beim-verbraucher-sein-a-739339.html
   (Stand: 27. 01.14)
8. Dioxinskandal:
   http://www.spiegel.de/thema/dioxinskandal_2011/
   (Stand: 27.01.14)
9. Aufbau des Hühnereis:
   http://www.rund-ums-ei.at/index.php?id=aufbau
   (Stand: 16.03.14)

10. Zusammensetzung des Hühnereis
http://de.wikipedia.org/wiki/H%C3%BChnerei
(Stand: 16.03.14)
11. Zusammensetzung des Eiklars
http://www.behrs.de/media/catalog/product/1/6/169_lp_1.pdf
(Stand: 21.09.14)
12. Denaturierung des Eiklars
http://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0365Erkenntnisgewinn_Denaturierung_von_Eiklar_Johannes_Hergt_WiSe_10_11.pdf
(Stand: 18.09.14)
13. Grundlagen zu Aminosäuren
http://www.jagemann-net.de/aminosaeuren/aminosaeuren.php
(Stand: 31.08.14)
14. Grundlagen zu Proteinen
https://www.bioinf.uni-leipzig.de/Leere/PRAKTIKUM/Protokolle/SS04/1/einfuehrung.html
(Stand: 21.09.14)
15. Zusammensetzung des Eidotters
http://lebensmittel-warenkunde.de/lebensmittel/fleisch/tierische-produkte/eidotter-19-gramm.html
(Stand: 21.09.14)
16. Grundlagen zu Fetten
http://www.jagemann-net.de/fette/fette.php
(Stand: 21.09.14)
17. Experimentalvortrag - Thema: Lipide
http://chids.online.uni-marburg.de/dachs/expvortr/546Lipide_Goldbach_Scan.pdf
(Stand: 21.09.14)
18. Lecithine
http://chids.online.uni-marburg.de/dachs/expvortr/639/lecithine.htm
(Stand: 21.09.14)

19. Prof. Blumes Tipp des Monats: „Lecithin – ein Fett der Gegensätze“
http://www.chemieunterricht.de/dc2/tip/06_04.htm
(18.03.14)
20. Eierschalen-Membran
http://eierschale.wordpress.com/2012/05/04/eggshell-membrane/
(Stand: 31.08.14)
21. Kristalloblastese
http://eierschale.wordpress.com/2012/05/23/kristalloblastese/
(Stand: 31.08.14)
22. Eierschale – 10.000 Poren
http://eierschale.wordpress.com/2012/05/30/10-000-pores/
(Stand: 01.09.14)
23. Eilinien und Ovale
http://www.mathematische-basteleien.de/eilinien.htm
(Stand: 30.05.14)
24. Ei-Kurve
http://www.uni-protokolle.de/Lexikon/Ei-Kurve.html
(Stand: 30.05.14)
25. Eigenschaften des natürlichen Logarithmus
http://www.uni-graz.at/imawww/thaller/lehre/hm/hm1/hm1se63.html
(Stand: 14.09.14)
26. Ei – die weibliche Fortpflanzungszelle
http://www.wissen.de/lexikon/ei
(Stand: 20.07.14)
27. Verbrauch von Eiern
http://www.agrarheute.com/eierverbrauch
(Stand: 08.09.14)
28. Sachanalyse, Didaktische Reduktion und Unterrichtsmaterialien – Thema: Soufflé
http://www.ibba.tu-berlin.de/fileadmin/i20/FD_Ernaehrung-_u_Lebensmittel/FD3_2011/Souffle_s.pdf
(Stand: 09.05.14)

29. Herstellung und Verwendung von Eiprodukten
http://www.was-wir-essen.de/abisz/eier_verarbeitung_herstellung_a.php
(Stand: 15.09.14)
30. Das Ei – ein geniales Lebensmittel
http://www.ernaehrungsberatung.rlp.de/Internet/global/themen.nsf/0/0CE01BE04972CCA5C12576EE0057BAC7?OpenDocument
(Stand: 28.01.14)
31. Haltung von Legehennen
http://www.was-wir-essen.de/abisz/eier_erzeugung_haltung.php
(Stand: 30.05.14)
32. Vorstellung der Haltungsformen:
http://www.was-wir-essen.de/abisz/eier_erzeugung_haltung.php
(Stand: 20.07.14)
33. Kritik an der Eierproduktion
http://www.peta.de/eier
(Stand: 28.01.14)
34. Dotter, Eigelb
http://www.lebensmittellexikon.de/e0000450.php
(Stand: 05.10.14)
35. Praktikum – Aminosäuren und Proteine
https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CCoQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.lehrer.uni-karlsruhe.de%2F~za3642%2FTest%2FMaterial_Fachberater%2FPRA_PRO_V3_1_Nachweisreaktionen_Biuret-Probe.doc&ei=H-QVVK_KNMa6ygPO6YLoBA&usg=AFQjCNHHju3bEX6RgpuwuKrqH6ygHVCiLA
(Stand: 06.02.14)
36. Proteine im Eiklar
http://www.chemistryviews.org/details/ezine/1492619/.html
(Stand: 30.08.14)
37. Denaturierung von Proteinen
http://www.chemieunterricht.de/dc2/milch/denatur.htm
(Stand: 14.09.14)

38. Denaturierung (Biochemie)
http://de.wikipedia.org/wiki/Denaturierung_(Biochemie)#S.C3.A4ure-_und_Lauge-Denaturierung
(Stand: 30.08.14)
39. Xanthoprotein-Test
http://www.seilnacht.com/Lexikon/xantho.html
(Stand: 07.02.14)
40. Elektrophile aromatische Substitution
http://n.ethz.ch/~nielssi/download/2.%20Semester/Allgemeine%20Chemie%20II%20(OC)/ChemLearning/content/tutorials/ACOCII/content.html
(Stand: 23.10.14)
41. Das Geheimnis des Eischnees
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch16.htm
(08.05.14)
42. Proteine des Eidotters
http://link.springer.com/article/10.1007%2FBF01112870
(Stand: 18.03.14)
43. Herstellung von Mayonnaise
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch15.htm
(Stand: 09.05.14)
44. Wenn die Küche zum Labor wird…
http://www.krups.de/specials/kochkultur/wenn-die-kueche-zum-labor-wird
(Stand: 08.05.14)
45. Denaturierung von Proteinen
http://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0365Erkenntnisgewinn_Denaturierung_von_Eiklar_Johannes_Hergt_WiSe_10_11.pdf
(Stand: 30.08.14)
46. Chemikalien an Schulen entsorgen
http://www.seilnacht.com/Chemie/entsorg.htm
(Stand: 25.10.14)

47. Aceton
http://www.chemie.de/lexikon/Aceton.html#Verwendung
(Stand: 27.10.14)
48. Carbonate
http://www.chemie.de/lexikon/Carbonate.html
(20.03.14)
49. Chemisches Schälen des Eis
http://de.wikihow.com/Ein-h%C3%BCpfendes-Ei-herstellen
(Stand: 28.01.14)
50. Versuch: Das Ei wird chemisch geschält
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch8.htm
(Stand: 05.03.14)
51. Versuch: Nachweis von Wasser im Hühnerei
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch4.htm
(Stand: 04.03.14)
52. Kupfersulfat
http://de.wikipedia.org/wiki/Kupfersulfat#Kupfer.28II.29-sulfat-Pentahydrat
(Stand: 25.10.14)
53. Außen hui, innen pfui? Der Frischetest
http://www.focus.de/familie/wissenstest/lernatlas/ei-experimente-zu-ostern-spiele_id_2264404.html
(Stand: 29.09.14)
54. Versuch: Das schwimmende Ei
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch11.htm
(Stand: 29.09.14)
55. Wieso ist das Ei oval?
http://www.naturstrolche.de/natur-pur/wieso-ist-das-ei-oval
(Stand: 06.10.14)
56. Alles rund um das Ei
http://www.eifrisch.de/76-0-Das+Ei.html
(Stand: 06.10.14)

57. Die ovale Eiform - der beste Schutz fürs Küken
http://www.br-online.de/kinder/fragen-verstehen/wissen/2007/01703/popup.shtml?01http://www.welt.de/print-welt/article685465/Ach-du-dickes-Wunderding.html
(Stand: 06.10.14)
58. Versuch: Starke Schale
http://www.chemieunterricht.de/dc2/grundsch/eier/versuch6.htm
(Stand: 06.10.14)
59. Prozesse der Modelbildung
http://de.wikipedia.org/wiki/Modell#Prozesse_der_Modellbildung
(Stand: 20.08.14)
60. Kurvenschar
http://de.wikipedia.org/wiki/Kurvenschar
(Stand: 21.08.14)

8 Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

- **Titelblatt:** http://www.fotosearch.de/bilder-fotos/huhn-ei.html
  http://de.123rf.com/lizenzfreie-bilder/huhn_ei.html
  http://de.123rf.com/lizenzfreie-bilder/augen_zeichnung.html
  sowie selbst erstellte Abbildungen
- **Abb. 1:** http://it-material.de/2011/03/dioxin-eier-keine-gesundheitsgefahr/
- **Abb. 2:** http://www.biohenne.de/html/?c=herkunft_der_eier
- **Abb. 3:** selbst erstellt [nach 10]
- **Abb. 4:** selbst erstellt [nach 11]
- **Abb. 5:** https://www.bioinf.uni-leipzig.de/Leere/PRAKTIKUM/Protokolle/SS04/1/einfuehrung.html
- **Abb. 6 und 7:** http://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0365Erkenntnisgewinn_Denaturierung_von_Eiklar_Johannes_Hergt_WiSe_10_11.pdf
- **Abb. 8:** http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Amid-Mesomerie.svg
- **Abb. 9 und 10:** http://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0365Erkenntnisgewinn_Denaturierung_von_Eiklar_Johannes_Hergt_WiSe_10_11.pdf
- **Abb. 11 und 12:** https://www.bioinf.uni-leipzig.de/Leere/PRAKTIKUM/Protokolle/SS04/1/einfuehrung.html
- **Abb. 13:** selbst erstellt [nach 15]
- **Abb. 14:** http://www.guidobauersachs.de/oc/lipide.html
- **Abb. 15:** http://de.wikipedia.org/wiki/Calcit
- **Abb. 16:** http://eierschale.wordpress.com/2012/05/04/eggshell-membrane/
- **Abb. 17:** http://de.wikipedia.org/wiki/Kollagen
- **Abb. 18:** selbst erstellt
- **Abb. 19 und 20:** http://www.mathematische-basteleien.de/eilinien.htm
- **Abb. 21:** http://www.uni-graz.at/imawww/thaller/lehre/hm/hm1/hm1se63.html

- **Abb. 22:** http://www.gzho.de/index.php?option=com_content&view=article&id=158:4-2-uebersicht-der-eiprodukte&catid=60:rund-ums-ei&Itemid=161
- **Abb. 23:** http://www.korn-hof.de/files/cto_layout/img/khb/galerie/freilandhaltung/_MG_1728.jpg
- **Abb. 24:** http://www.lechfeld.info/bicklhof/bilder/die%2520huehner/huehner%2520vor%2520stall.jpg
- **Abb. 25:** http://de.wikipedia.org/wiki/Bio-Siegel
- **Abb. 26:** http://www.mlr.baden-wuerttemberg.de/style_img/artikel_img/30034/image003.png
- **Abb. 27:** http://www.merkur-online.de/bilder/2009/03/25/106914/696383285-fakten-osterfest-legehennen-eier-1P09.jpg
- **Abb. 28:** http://media.repro-mayr.de//02/568402.jpg
- **Abb. 29:** selbst erstellt
- **Abb. 30:** selbst erstellt
- **Abb. 31:** selbst erstellt
- **Abb. 32:** selbst erstellt
- **Abb. 33:** I. Hefner, G. Herrmann, W. Kraus, C. Kreß, F. Orlik, R. Spichtinger; „Galvani Chemie 11“, 1. Auflage, München, Bay. Schulbuch Verlag GmbH, 2009; S. 33, Abbildung 3
- **Abb. 34 bis 40:** http://www.chids.de/dachs/praktikumsprotokolle/PP0365Erkenntnisgewinn_Denaturierung_von_Eiklar_Johannes_Hergt_WiSe_10_11.pdf
- **Abb. 41:** selbst erstellt
- **Abb. 42 bis 46:** selbst erstellt
- **Abb. 47:** http://www.seilnacht.com/Lexikon/xantho.html
- **Abb. 48:** http://de.wikipedia.org/wiki/Xanthoprotein-Reaktion
- **Abb. 49:** selbst erstellt
- **Abb. 50 bis 53:** selbst erstellt
- **Abb. 54:** selbst erstellt
- **Abb. 55 und 56:** selbst erstellt

- **Abb. 57:** selbst erstellt
- **Abb. 58:** http://de.wikipedia.org/wiki/Eischnee
- **Abb. 59:** selbst erstellt
- **Abb. 60:** selbst erstellt
- **Abb. 61 bis 68:** selbst erstellt
- **Abb. 69:** selbst erstellt
- **Abb. 70:** selbst erstellt
- **Abb. 71:** selbst erstellt
- **Abb. 72:** selbst erstellt
- **Abb. 73:** selbst erstellt
- **Abb. 74:** selbst erstellt
- **Abb. 75:** http://de.wikipedia.org/wiki/Filterpapier
- **Abb. 76:** selbst erstellt
- **Abb. 77:** selbst erstellt
- **Abb. 78:** selbst erstellt
- **Abb. 79:** selbst erstellt
- **Abb. 80:** I. Hefner, G. Herrmann, W. Kraus, C. Kreß, F. Orlik, R. Spichtinger; „Galvani Chemie 11“, 1. Auflage, München, Bay. Schulbuch Verlag GmbH, 2009; S. 84, Abbildung 4
- **Abb. 81 bis 86:** selbst erstellt
- **Abb. 87 bis 119:** selbst erstellt
- **Abb. 120:** http://www.tierfotograf.com/index.php?m=mediadb&c=search&a=preview&id=46248&nr=1&q_and=wachtel&q_not=&q_preselect=acht
- **Abb. 121:** http://www.bianca-kabus.de/Seiten/tier_fotos.html
- **Abb. 122 und 123:** selbst erstellt
- **Abb. 124:** http://de.wikipedia.org/wiki/Bogen_(Architektur)
- **Abb. 125 und 126:** selbst erstellt
- **Abb. 127:** http://de.statista.com/statistik/daten/studie/208591/umfrage/ eier-nahrungsverbrauch-pro-kopf-seit-2004/
- **Abb. 128:** http://www.fr-online.de/panorama/chinesen-lieben--tausendjaehrige-eier--da-ist-doch-was-faul-,1472782,2991236.html

9 Erklärung zur Anfertigung der Seminararbeit

Ich erkläre hiermit, dass ich die Seminararbeit ohne fremde Hilfe angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benützt habe.

Bogen, den 0.11.2014 _____

Unterschrift des Schülers