

Die folgenden Original-Seiten der Zeitschrift „Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht“ wurden mit Genehmigung des Verlages Klaus Seeberger auf die Webseite [www.thomas-wilhelm.net](http://www.thomas-wilhelm.net) gestellt.

Vielen Dank für die Erlaubnis.

Die exakte Quellenangabe des Artikels ist:

DEUERLING, A.; WILHELM, T.

***Die Physik und Chemie der „Mousse au Chocolat“***

Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 64, Nr. 7, 2011, S. 408 - 416

# Die Physik und Chemie der »Mousse au Chocolat«

ANJA DEUERLING – THOMAS WILHELM

Um dem Mangel an Alltagsbezug und der negativen Interessensentwicklung entgegen zu wirken sowie die Allgegenwart der Chemie und Physik zu verdeutlichen, werden die Herstellungsschritte eines Rezeptes für »Mousse au Chocolat« wissenschaftlich hinterfragt und mit einfachen Experimenten physikalisch sowie chemisch erläutert. Es wird so deutlich, wie wir uns die Chemie und Physik insbesondere beim Zubereiten von Speisen völlig unbewusst zu Nutzen machen.

## 1 Einsatzmöglichkeiten im Unterricht

Als Ausgangspunkt für die naturwissenschaftliche Erläuterung der Herstellung einer Mousse au Chocolat dient das Rezept in Kasten 1. Der Prozess des Schokoladenschmelzens kann im

Rahmen der Wärmelehre im Physikunterricht quantitativ sowie qualitativ untersucht werden. Bei der Thematisierung von Emulsionen im Chemieunterricht kann die Herstellung eines stabilen Systems aus Öl und dem im Eigelb enthaltenen Wasser aufgegriffen werden. Lecithin – als Bestandteil des Eigelbs

– fungiert hierbei als grenzflächenaktiver Stoff. Und auch die im Eiweiß enthaltenen Proteine entfalten beim Schlagen des Eischnees ihre emulgierenden Eigenschaften und lassen den Eischnee gelingen. Darüber hinaus bietet der Arbeitsschritt der Eischneherstellung eine Möglichkeit, die sonst im schulischen Unterricht nicht behandelten, aber sowohl chemisch wie auch physikalisch interessanten Schäume näher zu betrachten. Alltagsnahe Fragestellungen, weshalb die verwendeten Küchengeräte frei von Fett und Spülmittel sein müssen, Eischnee am besten in einem Kupfergefäß und unter Verwendung von etwas Salz oder Zitronensäure geschlagen werden soll, lassen sich als Motivation aufgreifen und stellen einen deutlichen Bezug zur Lebenswelt dar. Auch als fächer- und jahrgangsstufenübergreifendes Projekt ist es denkbar, einzelne Arbeitsschritte aufzugreifen und so Unterrichtsinhalte sowie Grundkonzepte wissenschaftlichen und kooperativen Arbeitens zu vermitteln. Im Folgenden werden einige einfach und gefahrlos durchführbare Versuche zum Schmelzen der Schokolade, Herstellung einer stabilen Emulsion und Schlagen des Eischnees erläutert, die auch als Schülerexperimente und bereits in der Sekundarstufe I durchgeführt werden können (vgl. auch DEUERLING, 2009).

## 2 Das Schmelzen der Schokolade

### 2.1 Der Einfluss der Kakaobutter

Einen der Hauptbestandteile jeder Schokolade bildet die Kakaobutter, welche wie alle Fette ein Triglycerid darstellt (VILGIS, 2008, 196). Ihre chemische Zusammensetzung ist neben dem Geschmack auch für den für Schokolade typischen Schmelzbereich knapp unterhalb der Körpertemperatur verantwortlich. Die drei Alkoholgruppen des Grundbausteins aller Fette, des Glycerins, sind für den Fall der Kakaobutter mit den gesättigten Fettsäuren Palmitin- und Stearinsäure, sowie der einfach-ungesättigten Öl- und zweifach-ungesättigten Linolsäure verestert (EISENBRAND & SCHEIER, 2006, 583). Jedes, der aus diesen Kombinationen möglichen Fette weist einen spezifischen Schmelzpunkt auf, so dass sich für Kakaobutter als Fettgemisch ein Schmelzbereich ergibt, der stark durch den Hauptbestandteil Palmito-2-Oleostearin mit einem Schmelzpunkt von 34,5 °C geprägt wird, welches je nach Anbaugebiet einen Molanteil von 34–39 % der Kakaobutter ausmacht.

#### Rezept:

1. 150 g süße, dunkle Schokolade guter Qualität werden mit einer Raspel zerkleinert und schließlich unter Rühren im Wasserbad geschmolzen.
2. Eiweiß und Eigelb dreier Eier werden getrennt und die Dotter mit 80 g Zucker verrührt.
3. Die noch flüssige Schokolade hebt man unter die Eigelb-Zucker-Masse, gibt 100 ml Olivenöl zu und mischt alles gut.
4. Unter Zugabe einer Prise Salz werden die übrigen drei Eiklar steif geschlagen, wobei auf die Verwendung eines fett-, spülmittel- und eigelbfreien Handrührgerätes zu achten ist.
5. Um die im Eischnee eingeschlossenen Luftbläschen nicht zu zerstören, hebt man diesen vorsichtig unter die Schokoladenmasse und stellt die fertige Mousse einige Zeit kühl.

Kasten 1. Rezept für Mousse au Chocolat (WOLKE, 2008, 47–48)

Aus der durch die EU-Verordnung festgelegten Zusammensetzung (ROTH, 2007, 11) von Bitter-, Vollmilch- und weißer Schokolade lassen sich nach BECKER und BAUERMEISTER (1967) die innere Energie verschiedener Schokoladensorten, die Schmelzwärme und die spezifische Wärmekapazität fester und flüssiger Schokolade in Abhängigkeit von deren Zusammensetzung und Temperatur berechnen. Hierfür werden die prozentualen Anteile mit den entsprechenden Werten der inneren Energie der einzelnen Bestandteile der Schokolade multipliziert und diese aufaddiert. Nach BECKER und BAUERMEISTER lassen sich die Werte für die innere Energie beliebig zusammengesetzter Schokoladensorten nach diesem Verfahren berechnen, solange die Einschränkung gemacht wird, dass diese nur aus den Bestandteilen Kakaobutter, Kakaomassen, Zucker und Milchpulvern zusammengesetzt sind. Für die verwendeten Produkte trifft dies zu. Somit können die Werte für die innere Energie in Abhängigkeit von der Temperatur aufgetragen werden. Aus der Steigung der Kurve im gewünschten Temperaturpunkt lässt sich schließlich die zugehörige spezifische Wärmekapazität in Abhängigkeit der Zusammensetzung und der Temperatur der Schokolade berechnen. Somit können Vergleichswerte für die aus den folgenden Experimenten gewonnenen Daten berechnet werden. Dies ergab, dass die Messmethode gute Ergebnisse liefert. Zudem ist sie leicht im schulischen Unterricht umsetzbar.

### 2.2 Bestimmung der spezifischen Wärmekapazitäten fester und flüssiger Schokolade sowie deren Schmelzwärme

Mit dem Verfahren der Kalorimetrie lassen sich die spezifischen Wärmekapazitäten fester und flüssiger Schokoladensorten unterschiedlicher Zusammensetzung und deren spezifische Schmelzwärme experimentell bestimmen. Hierzu wird in einem Mischskalorimeter, dessen geringe und somit in den Berechnungen zu vernachlässigende Wärmekapazität bekannt ist, die von einem System mit bekannter Wärmekapazität  $c$  und Masse  $m$  abgegebene Wärmemenge  $\Delta Q$  durch die Messung der entstehenden Temperaturänderungen  $\Delta \vartheta$  oder des hervorgerufenen Phasenüberganges nach dem Mischen der beiden Systeme unterschiedlicher Temperatur bestimmt.

Um die spezifische Wärmekapazität fester Schokolade  $c_{s, fest}$  zu bestimmen, werden  $m_s = 15$  g des geraspelten Schokoladenproduktes in ein Glas gegeben und im Kühlschrank auf etwa die Ausgangstemperatur  $\vartheta_{vorher} = 4$  °C gekühlt, um einen ausreichend großen Temperaturbereich unterhalb des beginnenden Schmelzbereiches für die Erwärmung zur Verfügung zu stellen und abzusichern, dass die dem System zugeführte Wärmemenge ausschließlich eine Erhöhung der Temperatur und keinen Phasenübergang bewirkt. Anschließend wird das Glas mit der Schokolade in einen Styroporbecher zur Isolation gestellt, um Wärmeverluste möglichst zu vermeiden. Hierfür eignen sich Transportbehälter für Chemikalien. In den Deckel des Gefäßes bohrt man ein Loch, durch das mit einem Temperatursensor und dem zugehörigen Programm (verwendet wurde DataStudio von Pasco) die Temperaturmessung erfolgt. Diese wird mit der kalten Schokolade gestartet. Zeitgleich werden in einem Reagenzglas  $m_{Fe} = 30$  g Eisenspäne im Wasserbad auf etwa 90 °C erhitzt und die Endtemperatur mit Hilfe eines Thermometers vor der Zugabe zur Schokolade bestimmt. Nachdem die Zugabe erfolgt ist, wird unverzüglich mit dem Rühren mittels des Thermometers begonnen, so dass sich bei einer etwa dreiminütigen Messung während des Versuches der Temperaturverlauf in Abbildung 1 ergibt. Aus diesem lassen sich schließlich durch Extrapolation die Anfangs- und Mischtemperaturen  $\vartheta_{vorher}$  und  $\vartheta_{Misch}$  zur anschließenden Berechnung der spezifischen Wärmekapazitäten ermitteln.

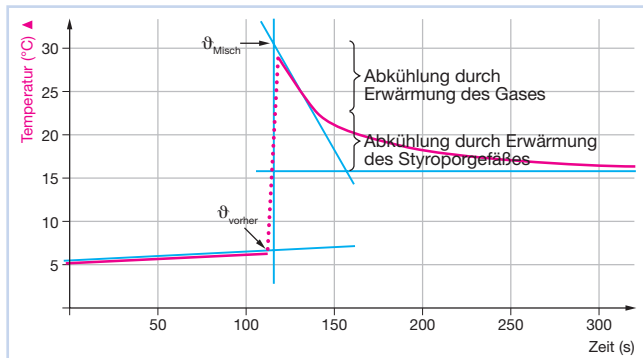


Abb. 1. Ausgewerteter Temperaturverlauf für Bitterschokolade nach dem Verfahren der Kalorimetrie

Aufgrund der berechneten Ergebnisse und Energieverluste, welche durch das Erwärmen des Behälters verursacht werden, kann obiger Verlauf wie folgt erklärt werden: Bei Zugabe des Eisens findet ein Wärmeaustausch zunächst überwiegend zwischen Eisen und Schokolade statt (110 s bis 120 s). Wegen der geringen Wärmeleitfähigkeit von Schokolade dauert es etwas, bis auch die Schokolade, die am Thermometer hängt, erwärmt ist. Der Wärmeaustausch mit dem Glas ergibt nach der Eisenzugabe und dem Einstellen der Mischtemperatur zunächst einen steilen Temperaturabfall (120 s bis 140 s). Dieser Bereich der Kurve wurde zur Extrapolation und Ermittlung der Anfangs- sowie Mischtemperatur  $\vartheta_{\text{vorher}}$  und  $\vartheta_{\text{Misch}}$  des Versuches herangezogen. Der folgende, weniger steil verlaufende zweite Bereich des Temperaturabfalls ist auf den nun einsetzenden Erwärmungsprozess des restlichen Gefäßes (Styropor und Luft) zurückzuführen.

Zur analogen Bestimmung der spezifischen Wärmekapazität flüssiger Schokoladen werden zunächst definierte Mengen im Wasserbad auf Temperaturen oberhalb des Schmelzbereichs von Schokolade erhitzt. Anschließend kann eben beschriebenes Verfahren analog durchgeführt werden, wobei sich die entsprechenden Kurven in Temperaturbereichen zwischen 40 °C und 60 °C ergeben.

Die spezifische Wärmekapazität lässt sich nun unter der Annahme, dass die vom Eisen abgegebene Wärmemenge vollständig zum Erwärmen der Schokolade verwendet wird, wie folgt berechnen:

$$c_{S,\text{fest/flüssig}} = \frac{m_{\text{Fe}} \cdot c_{\text{Fe}} \cdot (\vartheta_{\text{Fe}} - \vartheta_{\text{Misch}})}{m_{\text{S}} \cdot (\vartheta_{\text{Misch}} - \vartheta_{\text{vorher}})}$$

Werden die spezifischen Wärmekapazitäten fester und flüssiger Schokoladensorten  $c_{S,\text{fest}}$  und  $c_{S,\text{flüssig}}$  als bekannt angegeben oder wurden bereits bestimmt, so lässt sich eben beschriebener Versuch auch unter Verwendung von etwa  $m_{\text{W}} = 30 \text{ g}$  Wasser der Wärmekapazität  $c_{\text{W}}$  an Stelle des Eisens durchführen, das auf eine Ausgangstemperatur  $\vartheta_{\text{W}}$  von etwa 45 °C erwärmt wird, bevor es der festen und auf circa  $\vartheta_{\text{Misch}} = 5 \text{ °C}$  gekühlten Schokolade zugegeben wird. Aus den erhaltenen Messkurven kann nach folgender Formel die Schmelzwärme der entsprechenden Schokoladen berechnet werden:

$$Q_{\text{S}} = \frac{m_{\text{W}} \cdot c_{\text{W}} \cdot (\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\text{Misch}})}{m_{\text{S}}} - c_{S,\text{fest}} \cdot (\vartheta_{\text{Schmelz}} - \vartheta_{\text{vorher}}) - c_{S,\text{flüssig}} \cdot (\vartheta_{\text{Misch}} - \vartheta_{\text{Schmelz}})$$

$\vartheta_{\text{Schmelz}}$  bezeichnet hierbei die Schmelztemperatur der verwendeten Schokolade, welche wie unter 2.4 beschrieben experimentell ermittelt werden kann.

### 2.3 Ergebnisse des Kalorimetrierfahrens

Die entsprechenden Versuche wurden mit Bitter-, Vollmilch- und weißer Schokolade jeweils dreimal durchgeführt und durch Mittelwertbildung wurden Ergebnisse erzielt, die mit den theoretischen Werten im Rahmen der Messgenauigkeiten übereinstimmen, was Tabelle 1 verdeutlicht. Es bietet sich an, im Unterricht arbeitsteilig mit unterschiedlichen Schokoladensorten zu experimentieren und die erhaltenen Ergebnisse anschließend zu vergleichen. Die (geringen) Abweichungen der experimentellen Werte von den erwarteten Werten nach oben bieten im Unterricht zudem Anknüpfungspunkte für eine Fehlerdiskussion, bei welcher auf die Verluste durch nicht zu unterbindende Wärmestrahlung und Messungenauigkeiten während der Durchführung eingegangen werden kann. Die spezifische Wärmekapazität fester Schokolade erwies sich für weiße Schokolade und für Vollmilchprodukte mit etwa 2,10 kJ/kgK bereits in der Theorie als am höchsten. Dies konnte mit den ermittelten Werten von 2,51 kJ/kgK für weiße Schokolade und 2,44 kJ/kgK für Vollmilchschokolade auch experimentell bestätigt werden. Für Bitterschokolade nimmt sie etwas niedrigere Werte von etwa 1,76 kJ/kgK an. Für die Herstellung einer Mousse au Chocolat bedeutet dies, dass zum Erreichen der Schmelztemperatur der Bitterschokolade der geringste Energiebetrag aufgewendet werden muss. Ebenso muss eine geringere Wärmemenge beim abschließenden Kaltstellen entzogen werden. Die Wärmemenge, die zum Schmelzen der Bitterschokolade aufgewendet werden muss, liegt mit 32,2 kJ/kg aber deutlich über den Werten für weiße Schokolade mit 20,9 kJ/kg und Vollmilchschokolade mit 20,6 kJ/kg. Für Bitterschokolade ist somit beim Schmelzen ein besser kontrollierbarer Phasenübergang möglich als für andere Schokoladensorten.

	$c_{S,\text{fest}} / \text{kJ}(\text{kgK})$		$c_{S,\text{flüssig}} / \text{kJ}(\text{kgK})$	
	Messung	Theorie	Messung	Theorie
Weißer Schokolade	2,51	2,10	2,12	1,76
Vollmilch	2,44	2,10	2,26	1,84
Bitterschokolade	2,36	1,76	1,83	1,84

Tab. 1. Vergleich theoretischer und experimentell ermittelter Werte

Da für flüssige Schokoladen die spezifische Wärmekapazität der Vollmilchschokolade sowie der Zartbitterschokolade mit 2,10 kJ/kgK etwas über den Werten der weißen Schokolade mit 1,76 kJ/kgK liegen, lassen sich folgende für den kochbegeisterten Schüler interessante Schlüsse ziehen: Für das Erwärmen um einen festgelegten Temperaturbetrag der bereits verflüssigten weißen Schokolade sind geringere Wärmemengen nötig als für eine gleiche Menge dunkler oder Vollmilchschokolade. Dies führt dazu, dass die weiße Schokolade weniger kontrolliert erhitzt werden kann und nach dem vollständigen Phasenübergang schneller Gefahr läuft anzubrennen als Produkte mit höherem Kakaoanteil. Demzufolge ist es mit weißer Schokolade etwas schwieriger, eine Mousse au Chocolat herzustellen als mit Bitterschokolade, die sich am besten eignet.

### 2.4 Schmelzkurven verschiedener Schokoladensorten durch Schmelzen im Wasserbad

Im Rahmen der Wärmehlehre soll zudem verdeutlicht werden, dass die einem System während eines Phasenüberganges zu-

geführte Energie nicht zu einem Temperaturanstieg führt. Dies wird üblicherweise beim Schmelzen von Eis oder Sieden von Wasser gezeigt, geht aber auch mit der interessanteren Schokolade. Es bietet sich an, zunächst feste Schokolade in einem Wasserbad kontinuierlich zu erwärmen und den Temperaturverlauf mit Hilfe eines Temperatursensors und der entsprechenden Software zu dokumentieren.

Zur Durchführung des Experiments werden etwa 15 g Schokolade geraspelt und in ein großes Reagenzglas gefüllt. Dieses wird in einem Wasserbad unter gleichmäßiger Wärmezufuhr mittels einer Heizplatte und unter ständigem Rühren kontinuierlich von etwa 20 °C auf eine Temperatur von circa 40 °C erwärmt. Für Bitterschokolade mit einem Kakaoanteil von 99 % ergibt sich somit eine exemplarische Schmelzkurve, wie sie Abbildung 2 zeigt.

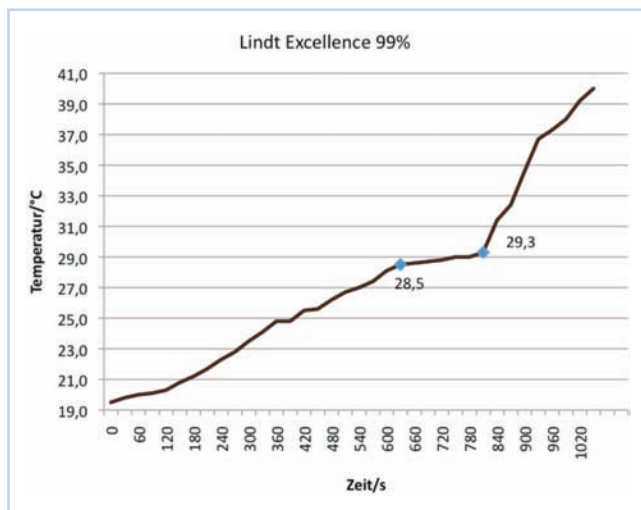


Abb. 2. Schmelzkurve für Schokolade der Sorte Lindt Excellence 99 %

Die Schokolade Lindt Excellence mit einem Kakaoanteil von 99 % erwärmt sich zunächst kontinuierlich mit der Temperaturzunahme des Wasserbades und beginnt schließlich bei einer Temperatur von 28,5 °C zu schmelzen. Bei einer Temperatur von 29,3 °C ist der Schmelzprozess beendet. Die Schokolade liegt vollständig flüssig vor. Bei weiterem Erwärmen lässt sich erneut ein linearer Anstieg der Temperatur der flüssigen Schokolade erkennen. Eine kleinere spezifische Wärmekapazität bedeutet einen schnelleren Anstieg der Temperatur. Der schnellere Anstieg bei flüssiger Bitterschokolade passt deshalb dazu, dass gemäß den experimentellen Ergebnissen die spezifische Wärmekapazität für flüssige Bitterschokolade kleiner ist als für feste. Für weiße und Vollmilchschokolade erhält man ähnliche Schmelzkurven, wobei der Schmelzbereich von weißer Schokolade zwischen 26,7 °C und 27,9 °C, der von Vollmilchschokolade im Bereich von 27,2 °C bis 27,3 °C ermittelt wurde. Dass diese unterhalb des Schmelzbereiches von Bitterschokolade liegen, lässt sich mit dem geringeren Kakaomassenanteil und damit höheren Anteil an Milchbestandteilen begründen. Da die während der Herstellung beigemengten Milchbestandteile in einer anderen Kristallform vorliegen als die Kristalle der Kakaobutter, führt ein erhöhter Milchanteil der Schokolade zu einem weicherem und insgesamt weniger hitzestabilen Produkt (Wageningen University).

Gleichzeitig ist es möglich den Temperaturanstieg des Wasserbades im gleichen Versuch zu dokumentieren. In diesem Temperaturbereich ergibt sich kein Phasenübergang und somit ein kontinuierlicher Anstieg der Temperatur mit der Zeit.

Eine vergleichende Diskussion der beiden ermittelten Graphen im Unterricht bietet sich an und kann an Hand der Versuchsergebnisse auch ohne eine quantitative Auswertung erfolgen.

### 3 Die Herstellung einer stabilen Emulsion aus Öl und Wasser

#### 3.1 Theoretische Grundlagen

Die Vermengung des Eigelbs mit Zucker und Öl stellt ebenfalls interessante Anknüpfungspunkte für den Physik- und Chemieunterricht bereit. Der wesentliche Aspekt liegt in der Herstellung einer stabilen Emulsion aus Öl und dem im Eigelb enthaltenen Wasser. Ein Eidotter, der durchschnittlich 1/3 des Gesamtgewichts eines Eies ausmacht, besteht etwa zur Hälfte aus Wasser (FREDE, 1991, 243–245).

Darüber hinaus machen etwa 33 % der Trockenmasse Fette aus, die auf Grund ihrer apolaren Molekülstruktur mit polarem Wasser nicht mischbar sind. Wasser und Öl bilden somit eine möglichst geringe Kontaktfläche, um die damit verbundene Oberflächenenergie gering zu halten. Eine vollständige Phasentrennung und die Ausbildung eines Zweiphasensystems als thermodynamisch stabiler Zustand sind die Folge. Auch nachdem dem System durch Schütteln Energie zugeführt wurde, lässt sich bereits nach kurzer Zeit eine Trennung der beiden Phasen beobachten. Als Schülerversuch durchgeführt, wirft dies die Frage auf, weshalb sich bei der Mousseherstellung das Öl und das im Eigelb enthaltenen Wasser problemlos mischen lassen.

Das Geheimnis liegt im Dotter selbst, der auf Grund der Nichtmischbarkeit seiner Bestandteile auch zweiphasig vorliegen müsste. Um die Phasentrennung durch Aggregation, Koaleszenz und Aufräumen zu verhindern, bedarf es eines grenzflächenaktiven Stoffes, der auf Grund seiner Amphiphilie in der Lage ist, mit beiden nicht-mischbaren Stoffen in Kontakt zu treten.

Etwa 28 % der im Eigelb enthaltenen Lipide sind Phospholipide, die unter dem Namen Lecithin als Stoffgemisch besser bekannt sind und auch den Schülerinnen und Schülern als Inhaltsstoffe industriell hergestellter Lebensmittel geläufig sind. Bei Lecithin handelt es sich um ein Stoffgemisch aus Phospholipiden, die in ihrer Struktur den Fetten sehr ähnlich sind und durch die Veresterung von Fettsäuren – meist Stearin-, Palmitin-, Palmitolein-, Olein-, Linol- und Linolensäure – Glycerin, Phosphorsäure und Cholin gebildet werden. An Hand der mit 73 % den Hauptteil des Lecithins bildenden Struktur, die Abbildung 3 zeigt, lässt sich der amphiphile Charakter des Lecithins verdeutlichen.

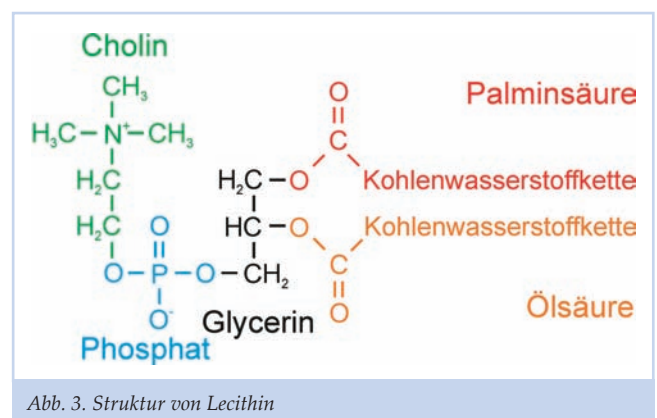


Abb. 3. Struktur von Lecithin

Lecithin verfügt sowohl über apolare Kohlenwasserstoffketten der veresterten Fettsäuren, wie auch über polare Phosphatreste und eine positive Ladung am Stickstoffatom des Cholins. Stehen hydrophile und hydrophobe Gruppen »in einem ausgewogenen Verhältnis, so sind diese Substanzen imstande, die zwischen den beiden Phasen herrschende Grenzflächenspannung [...] zu erniedrigen« (PFEIFER & HAFNER, 1987, 42). Mit dem hydrophilen Molekülrest tauchen die Emulgatoren in die polare Wasserphase ein, lockern die starken Wasserstoffbrücken und ragen mit dem hydrophoben Alkylabschnitt aus der wässrigen Phase heraus. Sie können somit mit diesem in die Ölphase eindringen. Ab einer spezifischen Konzentration an Tensidmolekülen kommt es schließlich zur Ausbildung von etwa 500 nm großen Mizellen durch eine Einkapselung der zu emulgierenden Moleküle, wie sie in Abbildung 4 schematisch dargestellt ist.

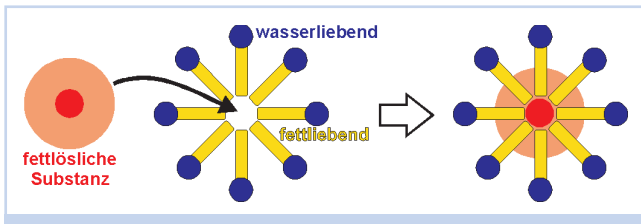


Abb. 4. Mizellenbildung

Ist der Anteil des Lecithins groß genug, um alle enthaltenen Öltropfen mit einer ausreichenden Anzahl grenzflächenaktiver Moleküle zu umschließen, so können diese – wie es für das Eigelb der Fall ist – fein in der wässrigen Phase verteilt und durch den Emulgator stabilisiert werden. Man spricht in diesem Fall von einer Öl-in-Wasser-(O/W-)Emulsion. Für den Fall einer W/O-Emulsion verhält es sich invers. Lecithin ist auf Grund seines strukturellen Aufbaus in der Lage, sowohl W/O-, wie auch O/W-Emulsionen zu stabilisieren (THIMM & SOMMER, 2009, 23). Somit liefert die Mousseherstellung einige Anknüpfungspunkte für die nähere Untersuchung der vorkommenden Emulsionstypen.

Eigelb stellt aufgrund des höheren Wasseranteils eine O/W-Emulsion dar, nach der Zugabe des Öls hingegen bildet sich durch Phasenumkehr eine W/O-Emulsion, wie sich mit einfachen Versuchen nachweisen lässt. Der Schwerpunkt kann hierbei auf chemischen, wie auch physikalischen Aspekten liegen.

## 3.2 Nachweis des Emulsionstyps mit chemischen und physikalischen Methoden

### 3.2.1 Farbstoffmethode nach ROBERTSON

Um Eigelb als Öl-in-Wasser-Emulsion und die im Verlauf des Rezeptes herzustellende Mischung aus Eigelb und Öl als Wasser-in-Öl-Emulsion nachzuweisen, sind die physikalischen und chemischen Eigenschaften der jeweiligen äußeren Phase entscheidend. Die Farbstoffmethode nach ROBERTSON ist eine der bekanntesten und im Unterricht häufig durchgeführten Methoden zum Nachweis des Emulsionstyps (PFEIFER & HAFNER, 1986, 31–35). Emulsionen mit wässriger Phase können demnach nur mit wasserlöslichen Farbstoffen angefärbt werden, wie beispielsweise Methylblau. Beim Umgang mit Methylblau sind die Experimentierenden auf dessen gesundheitsschädigende Wirkung hinzuweisen. W/O-Emulsionen hingegen lassen sich nur mit unpolaren Farbstoffen wie einer Sudan III-Lösung kenntlich machen. In Abbildung 5 ist dies verdeutlicht. Mit bereits angesetzten Färbemitteln lassen sich schnell und einfach deutliche Ergebnisse erzielen.

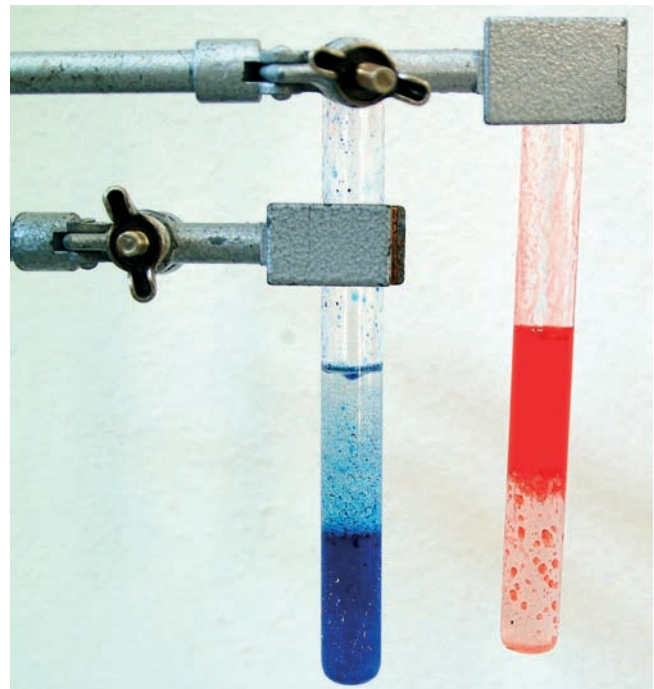


Abb. 5. 2-Phasensystem aus Öl (oben) und Wasser (unten) mit Methylblau (links) bzw. Sudan III (rechts) gefärbt

Die Schülerinnen und Schüler untersuchen zunächst das Färbemögen der beiden Farbstoffe an den bekannten und reinen Komponenten Öl und Wasser, indem sie kleine Mengen der Lösungen in Reagenzgläser zutropfen, und stellen so den begrenzten Einsatzbereich der beiden Farbstoffe fest. Für die anschließende Versuchsdurchführung mit Eigelb und der aus diesem und Öl hergestellten Emulsion werden jeweils kleine Mengen der zu untersuchenden Probe in Petrischalen gegeben und in getrennten Verfahren mit jeweils ein bis zwei Tropfen Methylblau- bzw. Sudan III-Lösung versetzt. Durch anschließendes Rühren mit einem Glasstab, lässt sich schließlich erkennen, dass sich reines Eigelb nur mit Methylblau anfärben lässt, Sudan III hingegen liegt auch nach dem Rühren ungelöst vor, wie in Abbildung 6 zu sehen ist. Somit ist Eigelb als O/W-Emulsion nachgewiesen.

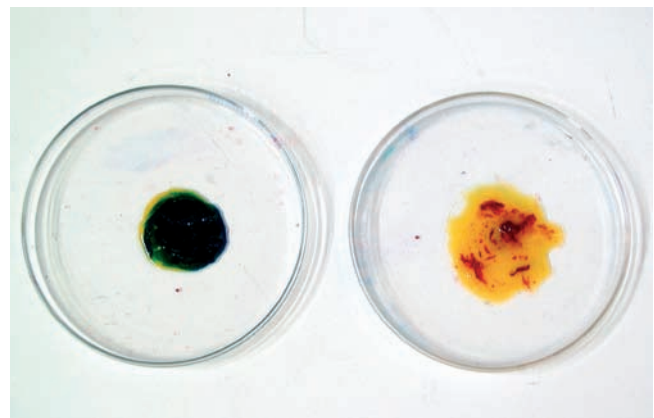


Abb. 6. Farbstoffmethode nach ROBERTSON an Eigelb

Der Versuch mit Teilen einer Emulsion aus drei Eigelb und 100 ml Olivenöl hingegen liefert als Ergebnis eine W/O-Emulsion, wie Abbildung 7 zeigt. Sie lässt sich mit Sudan III anfärben, Methylblau verteilt sich lediglich in der Probe, ohne sich zu lösen.

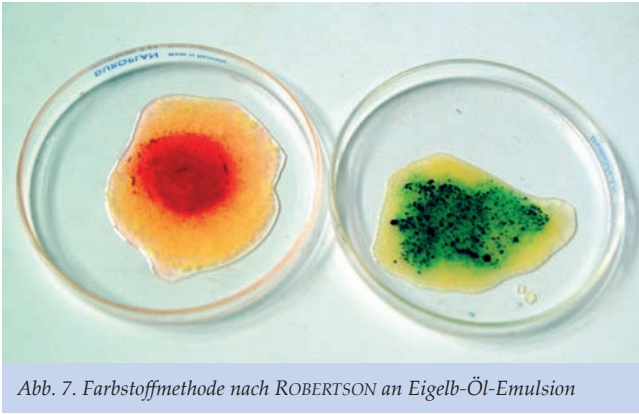


Abb. 7. Farbstoffmethode nach ROBERTSON an Eigelb-Öl-Emulsion

### 3.2.3 Leitfähigkeitsmessung der Emulsionen

Die Leitfähigkeitsmethode bietet die Möglichkeit, den Emulsionstyp auf Basis physikalischer Eigenschaften zu untersuchen (PFEIFER & HAFNER, 1986, 32–34). Da eine Lösung nur dann elektrisch leitfähig sein kann, wenn in ihr Ionen vorhanden sind und sie somit einen Elektrolyten bildet, weist nur eine O/W-Emulsion elektrische Leitfähigkeit auf. Die äußere Wasserphase dieses Emulsionstyps kann als Elektrolyt fungieren, was der Ölphase auf Grund ihres apolaren Charakters und der daraus resultierenden Nicht-Lösbarkeit von Ionen nicht möglich ist. Eine W/O-Emulsion zeigt deshalb keine elektrische Leitfähigkeit. Der Versuch kann mit Hilfe einfacher Mittel schnell durchgeführt werden. Hierfür eignen sich Leitfähigkeitsmessgeräte oder auch zwei Platinelektroden im Abstand von 0,5 cm bei einer angelegten Wechselspannung von 5–12 V. Zur Verdeutlichung des Stromflusses wird eine Glühlampe in den Stromkreis eingebaut, deren Leuchten als Nachweis für die Leitfähigkeit gedeutet werden kann und somit Wasser als äußere kontinuierliche Phase des Eigelbs und Öl als kontinuierliche Phase der Eigelb-Öl-Emulsion festlegt.

## 4 Das Schlagen des Eischnees

### 4.1 Proteine – das Geheimnis des Eischnees

Den dritten Arbeitsschritt bei der Herstellung der Schokoladenmousse stellt das Schlagen des Eischnees dar. Erst die enorme Oberfläche eines Schaums ermöglicht uns das einzigartige Geschmackserlebnis beim Genuss einer Mousse oder beim Verzehr von Eiscreme, da die Kontaktfläche zwischen Dessert und Zunge maximiert wird. Schäume sind Verwandte der Emulsionen und stellen eine Dispersion von Gasen in Flüssigkeiten dar. Sie entstehen allerdings schwieriger als Emulsionen aus zwei Flüssigkeiten, weshalb bei der Eischneeherstellung auf die Abwesenheit von apolaren Fett- und Spülmittelresten geachtet werden sollte und auch keine Hartplastikschüssel verwendet werden sollen, an welchen Fettreste auf Grund des apolaren Charakters häufig zurückbleiben. Um die große und somit energetisch ungünstige Oberfläche zwischen Flüssigkeit und Luft zu stabilisieren, bedarf es wie für Emulsionen grenzflächenaktiver Substanzen. Hierfür entfalten die darin enthaltenen Proteine beim Schlagen des Eiklars im wahrsten Sinne des Wortes ihre emulgierenden Eigenschaften und stabilisieren so den Schaum (VILGIS, 2008, 160).

Proteine stellen ein Gemisch langkettiger Makromoleküle aus Aminosäuren dar, die ähnlich wie Lecithin sowohl über hydrophobe wie auch hydrophile Molekülabschnitte verfügen. Da die Proteine im Eiklar in wässrigem Milieu vorliegen, müssen apo-

lare Molekülabschnitte nach außen abgeschirmt werden. Dies erfolgt, indem die Proteinketten sich in der Weise verknäulen, dass sich eine Molekülstruktur ergibt, bei der die hydrophilen Anteile nach außen zeigen und die hydrophoben Bereiche im Inneren eingekapselt sind. Die Tertiärstruktur der Moleküle wird durch diese Anordnung bestimmt. Beim Schlagen des Eischnees werden die natürlich vorliegenden Proteinknäule durch das mechanische Schlagen aufgefaltet und ordnen sich durch Adsorption an der Grenzfläche zwischen Gas und Flüssigkeit an, wie Abbildung 8 zeigt. Die beschriebene Änderung der Sekundär- und schließlich auch Tertiärstruktur eines Proteins bezeichnet man als Denaturierung. »Die Strömungsfelder zwischen einem Paar sich gegenläufig bewegender Rührbesen (oder einem Schneebesen und den Seiten der Rührschüssel) sind ideale Voraussetzungen für die Denaturierung von Proteinen.« (BARHAM, 2003, 31)

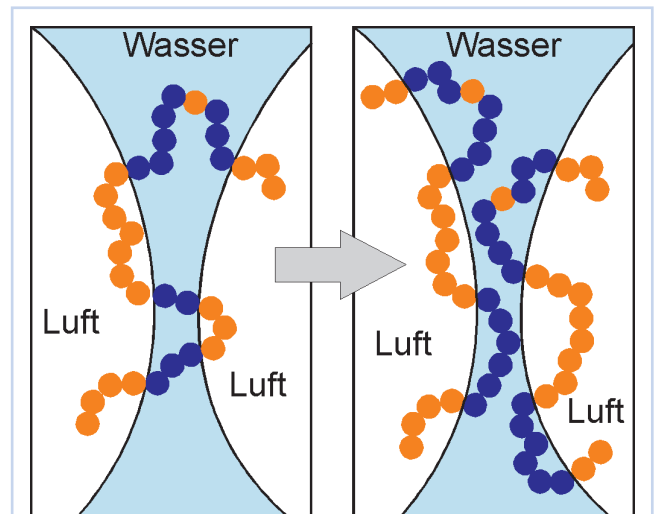


Abb. 8. Ausrichtung der Proteinketten an der Phasengrenze entsprechend ihrer Polarität und Veränderung durch das Schlagen des Eischnees (nach VILGIS, 2008, 161)

Abbildung 8 zeigt, wie die dünne (hellblau gezeichnete) Flüssigkeitsschicht zwischen benachbarten Schaumblasen von hydrophilen (dunkelblau gezeichneten) Molekülabschnitten durchsetzt wird. Die hydrophoben (orange gezeichneten) Molekülabschnitte tauchen in die Gasphase ein. Das durch neue Bindungen geknüpfte Netzwerk stabilisiert die Schäume und verhindert eine Koaleszenz, das Zusammenschließen kleinerer zu größeren, weniger stabilen Bläschen. Die Denaturierung lässt sich neben Hitze auch durch Säuren, Alkohole und Schwermetallsalze begünstigen (BRUCE, 2007, 1213). Wissen, das schon vor Jahrzehnten in der Küche genutzt wurde. Aus Zeiten, in denen noch keine elektrischen Handrührgeräte zur Verfügung standen, finden sich so noch heute in Rezepten Hinweise, wie sich Eischnee am besten schlagen lässt. So soll auf fettfreie Geräte geachtet werden, sollen Hartplastikschüsseln vermieden und das Eiklar und eine Prise Salz stattdessen in einer mit Zitronensaft eingeriebenen Kupferschüssel und in einem warmen Wasserbad geschlagen werden. Auch die Zugabe von etwas Likör oder Weinstein zum Eiklar findet sich häufig. Diese Rezepttipps sind chemisch und physikalisch sinnvoll und lassen sich im schulischen Unterricht leicht nachvollziehen und überprüfen. Sollen die hergestellten Speisen im Anschluss verzehrt werden, muss hierfür in der Schulküche und nur mit dort zur Verfügung stehenden Geräten gearbeitet werden. Im Chemiesaal verarbeitete Lebensmittel dürfen nicht verzehrt werden!

Die für das Gelingen des Eischnees entscheidenden Proteine im Eiklar sind Ovalbumin, mit einem Anteil von 54 % der gesamten enthaltenen Proteine sowie Conalbumin, Ovomucin und die Globuline G2 und G3 (FREDE, 1991, 244–245). Ovalbumin begünstigt die Stabilität des Eischnees, da es schon bei geringen Temperaturen und unter mechanischer Einwirkung denaturiert. Es zählt zu den Schaumbildnern. Ovomucin hingegen denaturiert nur sehr schwer, zählt allerdings zu den Schaumstabilisatoren, da es über eine gute Vernetzbarkeit verfügt, leicht an andere Proteine assoziierbar ist und somit die Viskosität der im Schaum eingeschlagenen Flüssigkeit erhöht. Ein Abfließen dieser und eine folgende Schaumzerstörung werden so verhindert. Die Globuline G2 und G3 verfügen als Schaumbildner über leicht diffundierende Moleküle mit großer Oberflächenhydrophobität. Das Aufschlagvolumen kann so durch die begünstigte Entstehung immer kleinerer Bläschen deutlich erhöht werden. Und auch Conalbumin leistet seinen Beitrag, indem es mit 2- bzw. 3-wertigen Metallionen hitzestabile Komplexe bildet, welche den Schaum zusätzlich stabilisieren. Dies liefert auch die Begründung für die empfohlene Verwendung von Kupferschüsseln, da diese die nötigen Kupferionen zur Komplexbildung liefern. Da Kupferschüsseln allerdings verstecktes Kupferoxid enthalten können, und somit während des Eischneeschlagens gesundheitsschädliches Kupferchlorid entstehen kann, sei auf eine eventuelle Gesundheitsgefährdung in diesem Zusammenhang hingewiesen. Die Zugabe von Salz oder schwachen Säuren mit wenig Eigengeschmack, wie Zitronen- oder Weinsäure ändert die Ladungsverhältnisse und somit die Wechselwirkungen, die die Tertiärstruktur der Proteine stabilisieren. Somit wird eine Umstrukturierung dieser begünstigt und das Schlagen erleichtert.

## 4.2 Der Tyndall-Effekt – Das Eiklar wird weiß

Auch die optische Veränderung, dass Eischnee im Laufe des Schlagens weiß wird, liefert ein Alltagsbeispiel für die Lichtstreuung an kleinsten Schaumbläschen, den sogenannten Tyndalleffekt. Auftreffendes Licht wird an den Schaumbläschen in alle Richtungen gestreut. Schickt man einen Laserstrahl durch Schaumwasser, so wird das Licht an den Bläschenwänden des Schaums gestreut und kann so auch ins Auge des Betrachters gelangen, so dass der Laserstrahl sichtbar wird (siehe Abb. 9). Darüber hinaus basiert die räumliche Struktur von Schäumen auf sehr komplexen Grundlagen und stellt ein aktuelles und breites Forschungsgebiet dar, das noch viele Fragen offen lässt (THEYSSSEN, 2009, 49–57). Physik und Chemie als sich ständig entwickelnde Wissenschaften mit hoher Alltagsrelevanz können so im Unterricht thematisiert werden. Somit bildet das Schlagen des Eischnees eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten für den Chemie- und Physikunterricht, die im Folgenden an schülergerechten Experimenten aufgezeigt werden sollen.

## 4.3 Experimente zur Denaturierung des Eiweiß

### 4.3.1 Hitzedenaturierung

Dass Wärme die Denaturierung von Eiweiß unterstützt und sich Eiklar beim Braten oder Kochen verändert, ist den Schülerinnen und Schülern aus dem Alltag bekannt. Im Unterricht kann nun die Temperatur von etwa 60 °C bestimmt werden, bei welcher eine Denaturierung einsetzt. Dies entspricht in etwa der Denaturierungstemperatur des Hauptbestandteils Conalbumin (GRUBER). Das Eiklar wird hierfür in ein Reagenzglas gegeben und in einem Wasserbad unter ständiger Temperaturmessung kontinuierlich erhitzt. Die Temperaturen, bei welchen sichtbare Veränderungen eintreten, und die, bei der die Veränderungen vollständig vollzogen sind, werden abgele-

sen. Die vollständige Stockung des Eiklars und somit das Ende der Denaturierung ist bei etwa 82 °C erreicht. Hier liegt die Denaturierungstemperatur der Ovalbumine (84,5 °C) (GRUBER). Somit erweist sich der Rezepthinweis, Eischnee im Wasserbad zu schlagen, als durchaus sinnvoll und kann an Hand der ermittelten Temperaturen auf eine Denaturierung der entsprechenden Proteine zurückgeführt werden.

### 4.3.2 Fällung der Globuline mit gesättigter Ammoniumsulfatlösung und Schlagen von behandeltem und unbehandeltem Eiklar

Den Schülerinnen und Schülern sollte bekannt sein, dass beim Schlagen des Eiklars das Volumen deutlich erhöht wird und dies durch das Einschlagen von Luft erfolgt. Dass das Eiklar selbst die nötigen Emulgatoren zur Schaumbildung liefert, lässt sich einfach nachweisen, indem man ein Glas Wasser mit Eiklar versetzt und aufschäumt.

Nun sollen die Globuline und ihre Funktion als Schaumbildner nachgewiesen werden. Globuline lassen sich mit gesättigter Ammoniumsulfatlösung ausfällen. Hierfür gibt man Eiklar in ein Becherglas und versetzt es mit der gleichen Menge der Lösung. Ein Ausflocken der Lösung durch die Globulinfällung ist zu beobachten. Schlägt man das behandelte Eiklar nun und vergleicht das Ergebnis mit dem Eischnee eines unbehandelten Eiklars, so ist deutlich zu erkennen, dass Globulin seine schaumbildende Funktion nicht mehr erfüllen kann und der Eischnee instabil und wenig voluminös wird, wie Abbildung 10 zeigt.

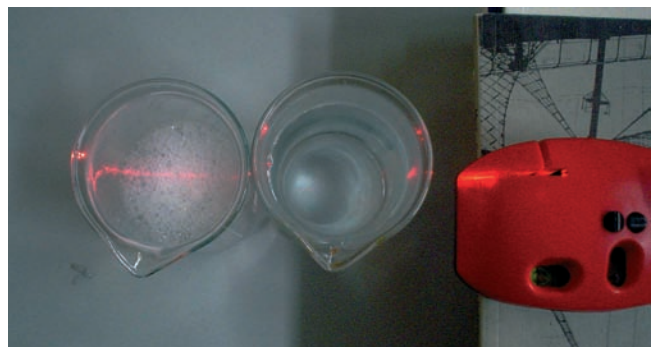


Abb. 9. Tyndall-Effekt an Schäumen. Rechts reines Wasser und links Schaumwasser mit einigen Tropfen Spülmittel



Abb. 10. Eischnee aus mit Ammoniumsulfat behandeltem Eiklar (links) und unbehandeltem Eiklar (rechts)

### 4.3.3 Denaturierung durch Zitronensäure, Weinstein, Ethanol und Kupfersulfat

Um die unterstützenden Einflüsse von Zitronensäure, Weinstein, Ethanol und Kupfersulfat auf die Denaturierung von Eiklar zu untersuchen, bietet es sich an, Rezepte aufzugreifen, die entsprechende Anweisungen enthalten. Auf deren Grundlagen können nun Reagenzgläser mit jeweils etwa ein bis zwei Zentimetern Eiklar gefüllt werden und anschließend mit einigen Millilitern Zitronensaft, Ethanol oder einer Spatelspitze Weinstein sowie Kupfersulfat versetzt werden. Durch ein anschließendes Schütteln wird deutlich, dass durch die Zugabe jeweils eine Denaturierung des Eiweiß erfolgt, die an einer Ausflockung zu erkennen ist, wie Abbildung 11 am Beispiel Weinstein zeigt.

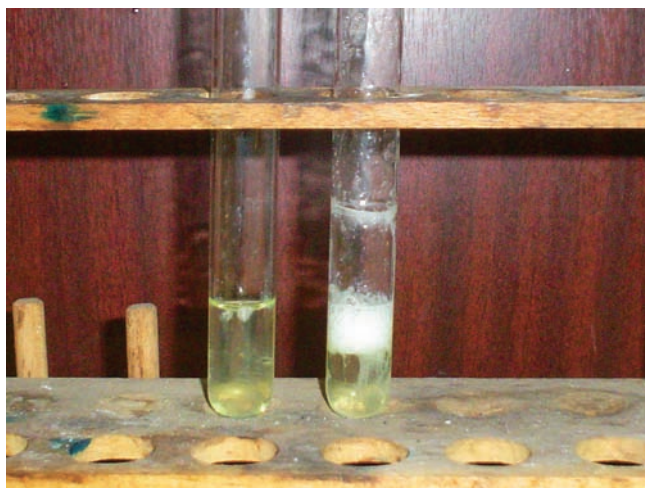


Abb. 11. Eiklar mit (rechts) und ohne Weinstein (links)

### 4.3.4 Nachweis zum Erhalt der Primärstruktur während der Denaturierung

Der im Unterricht häufig zum Nachweis von Proteinen durchgeführte Versuch zur Biuretreaktion (SEILNACHT) eignet sich, um nachzuweisen, dass während der Denaturierung lediglich die Sekundär- und Tertiärstruktur der Proteine, nicht aber deren Aminosäuresequenz und somit Peptidbindungen zerstört werden. Eiklar und geschlagener Eischnee werden hierfür zunächst mit einigen Millilitern dreiprozentiger Natronlauge versetzt und gut verschlossen geschüttelt. Anschließend tropft man eine siebenprozentige Kupfersulfatlösung (Fehling'sche Lösung I) zu. Nach erneutem Schütteln lässt sich wie Abbildung 12 zeigt sowohl bei Eiklar wie auch bei denaturiertem Eischnee, eine Blaufärbung erkennen, die durch die Bildung eines Kupfer(II)-Komplexes mit jeweils zwei Stickstoffatomen zweier Peptidketten hervorgerufen wird.

## 5 Fazit

Was hat denn Schokoladenmousse mit Chemie und Physik zu tun? Jede Menge! Die einzelnen Arbeitsschritte zur Herstellung einer »Mousse au Chocolat« liefern eine Vielzahl an Anknüpfungspunkten für den Chemie- und Physikunterricht. So wird nicht nur dem mangelnden Realitätsbezug der Fächer entgegengewirkt, sondern auch das Verständnis für die Allgegenwart der Naturwissenschaften gefördert und anhand vertrauter Themen die Aversion gegenüber den Fächern abgebaut. So erweist sich die Küche als täglich genutztes Labor und Chemie und Physik als durchaus schmackhaft.

## Literatur

BARHAM, P. (2003). *Die letzten Geheimnisse der Kochkunst*. Berlin Heidelberg: Springer.

BECKER, K. & BAUERMEISTER, J. (1967). Wärmehalt und spezifische Wärme von Kakaobutter, Schokoladen und Kuvertüren bei verschiedenen Temperaturen. *Fette Seifen Anstrichmittel*, 69(8).

BRUCE, P. (2007). *Organische Chemie*. München: Pearson, 5., aktualisierte Auflage.

DEUERLING, A. (2010). *Die Physik und Chemie der »Mousse au Chocolat«*, Staatsexamensarbeit, Universität Würzburg, <http://www.thomas-wilhelm.net/arbeiten/Mousse.htm> (24.04.2011).

EISENBRAND, G. & SCHREIER, P. (2006): *RÖMPP Lebensmittelchemie*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG, 2. Auflage.

FREDE, W. (1991). *Taschenbuch für Lebensmittelchemiker und -technologien Band 1*. Berlin, Heidelberg: Springer.

GRUBER, W. (o. J.). *Wie lange kocht man ein 3-Minuten Ei?* [http://kochen.exp.univie.ac.at/Ostern\\_Ei.html](http://kochen.exp.univie.ac.at/Ostern_Ei.html) (22.03.2011)

PFEIFER, G. & HAFNER, W. (1986). Herstellung und Eigenschaften von Emulsionen zur Hautpflege. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik Chemie*, 34(17/308), 31–35.

PFEIFER, P. & HAFNER, W. (1987). Stabile Emulsionen. Probleme bei der Herstellung kosmetischer Mittel. *Naturwissenschaften im Unterricht – Physik Chemie*, 24, 42.

ROTH, K. (2007). *Chemische Delikatessen*. Weinheim: Wiley-VCH, 1. Auflage.

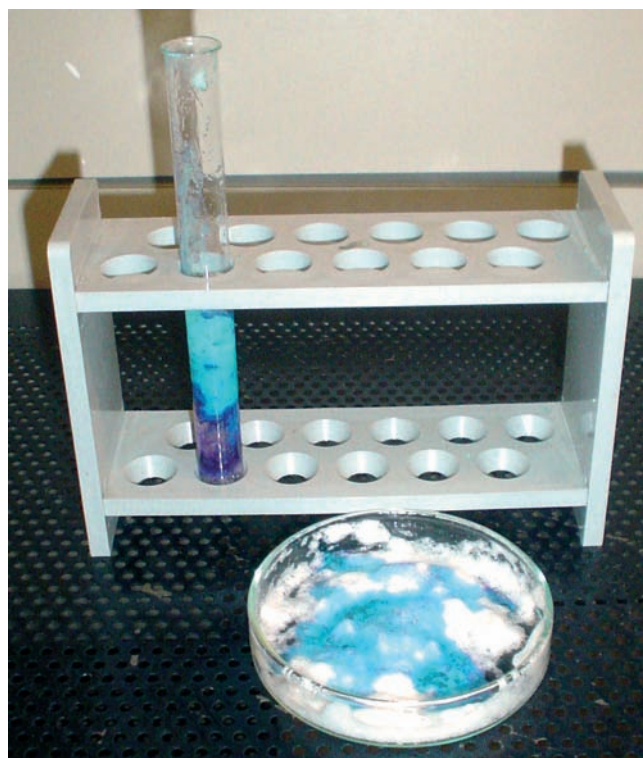


Abb. 12. Biuretprobe mit Eiklar (links) und geschlagenem Eiweiß (rechts)

SEILNACHT, T. (o. J.). *Biuret-Reaktion zum Nachweis von Eiweißen*. <http://www.seilnacht.com/Lexikon/biuret.html> (22.03.2011).

THEYSSEN, H. (2009). Mythos Bierschaumzerfall. Ein Analogon für den radioaktiven Zerfall? *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, 8(2), 49–57.

THIMM, K. & SOMMER, K. (2009). Lecithin – mehr als ein Emulgator. Experimentelle Untersuchung der Struktur und der Eigenschaften von Sojalecithin. *Unterricht Chemie*, 20(113), 23.

VILGIS, T. (2008). *Die Molekül-Küche. Physik und Chemie des feinen Geschmacks*. Stuttgart: S. Hirzel Verlag, 7., aktualisierte Auflage.

Wageningen University Niederlande, Food Microbiology Group (o. J.). *Wodurch ist der Schmelzpunkt von Schokolade festgelegt?* <http://www.food-info.net/de/qa/qa-fp45.htm> (22.03.2011).

WOLKE, R. (2008). *Was Einstein seinem Koch und seinem Friseur erzählte. Naturwissenschaft in der Küche und im Alltag*. München: Piper Verlag, 4. Auflage.

ANJA DEUERLING hat in Würzburg das Lehramt Physik und Chemie für Realschulen studiert. AR Dr. THOMAS WILHELM war Gymnasiallehrer für Mathematik und Physik und lehrt nun als Akademischer Rat Physikdidaktik für alle Schularten am Lehrstuhl für Physik und ihre Didaktik der Universität Würzburg. ■