

Physik in drei Gängen ---

Das Kochen als Kontext zum Thema Wärmeübertragung

C. Mennerich¹, R. Müller², S. Süllo³

¹ *Studienseminar Braunschweig für das Lehramt an Gymnasien, Braunschweig
+ 1 Zeile, vermutlich kommt die Schuladresse noch dazu*

² *Institut für Fachdidaktik der Naturwissenschaften, Abt. Physik und Physikdidaktik, Technische Universität Braunschweig, Pockelsstraße 11, 38106 Braunschweig*

³ *Institut für Physik der Kondensierten Materie, Technische Universität Braunschweig, Mendelssohnstr. 3, 38106 Braunschweig*

1. Einleitung

Die niedrigen Absolventenzahlen in Deutschland in den naturwissenschaftlich-technischen Studienfächern werden gemeinhin als Hemmschuh für die zukünftige technische und wirtschaftliche Entwicklung angesehen [1]. Seit Jahren werden daher popularisierende Präsentationsformen eingesetzt, um der Öffentlichkeit naturwissenschaftliche Inhalte nahezubringen. Ziel ist eine größere Akzeptanz dieser Inhalte bei der heutigen Schülergeneration, und damit der Erhöhung der Absolventenzahlen in der Zukunft. Entsprechend schießen Wissenschaftsmuseen wie Pilze aus dem Boden, Wissenschaftssendungen haben es selbst im Privatfernsehen auf beste Sendeplätze im Abendprogramm gebracht, unterschiedlichste Wissenschaftsausstellungen ziehen über das Land [2].

Gemäß diesem Trend gibt es in der Physik das Bemühen, das Fach vom Ruch des staubtroffenen, mathematischen Modellierens von Naturvorgängen zu befreien. So sind „Physik am Samstagmorgen“-Vorlesungen zum festen Bestandteil der Öffentlichkeitsarbeit vieler Physikfachbereiche geworden, „Star Trek“ dient als Grundlage physikalischer Untersuchungen, und von Seiten der Deutschen Physikalischen Gesellschaft werden Wissenschaftsshows unter dem Motto „Highlights der Physik“ organisiert [3,4]. Zudem stand das Jahr der Physik 2000 unter dem Titel „Physik macht Spaß“, womit allerdings eine inhaltliche Reduktion nur auf jene Aspekte impliziert wird, welche als in unserer Spaßgesellschaft konsensfähig angesehen werden.

Für die schulische Lehre der Physik bringt diese Popularisierung neue Aufgaben und Probleme mit sich. Die Lehrer werden mit einem Publikum – den Schülern – konfrontiert, welches zunehmend eine Präsentation in unterhaltender Form erwartet. Nun erhöht gute Unterhaltung beim Zuschauer sicher die Motivation zur Beschäftigung mit den behandelten Themen. Andererseits ist es im Schulunterricht aufgrund der beschränkten Ressourcen und speziellen Rahmenbedingungen unmöglich, Wissenschaftsunterhaltung auf dem Niveau eines Science Centers oder des Fernsehens zu liefern. Zudem führt eine Reduktion auf spektakuläre Schaustücke zu einer Verzerrung des Bildes der Naturwissenschaften [5]. Denn letztlich ist das tägliche Brot der Wissenschaftler überwiegend mühsame Detailarbeit, die Erarbeitung umfassender Erklärungen der betrachteten naturwissenschaftlich-technischen Vorgänge sowie deren Einordnung in ein übergeordnetes Konzept. Lehrziel des Physikunterrichtes ist gerade auch die Vermittlung solcher prozessbezogenen Kompetenzen (siehe bspw. Ref. [6]).

Vor diesem Hintergrund scheint Bedarf an Unterrichtseinheiten für die tägliche Lehre zu bestehen, in denen der Motivationsschub, welcher durch neue Präsentationsformen erreicht werden kann, kombiniert wird mit traditionelleren Ansätzen, all dieses unter Berücksichtigung des begrenzten zeitlichen Rahmens für Vorbereitung und Durchführung solcher Unter-

richtseinheiten. In diesem Beitrag möchten wir das Konzept einer solchen Einheit am Beispiel der Wärmeübertragung in Lebensmittel während ihrer Zubereitung diskutieren.

1.1 Konzept der Unterrichtseinheit

Die vorgestellte Unterrichtseinheit besteht aus der Zubereitung eines 3-Gänge-Menüs, im Rahmen dessen die Schüler die Temperaturentwicklung in Lebensmitteln beim Kochen direkt bestimmen. Auf diese Weise werden die Mechanismen der Wärmeübertragung für die Schüler in einem Alltagskontext erfahrbar gemacht und im Rahmen von Experimenten quantifiziert.

Thematisch fällt die Wärmeübertragung in den Bereich „Thermodynamik“. Diese wird in den curricularen Vorgaben der Länder oft nicht eigenständig behandelt, sondern im Themenkomplex „Energie“ diskutiert. Der zeitliche Umfang für die Unterrichtseinheit in der hier vorgestellten Form (Zubereitung des Menüs, Durchführung der Experimente, Präsentation und Diskussion der Ergebnisse inklusive gemeinsames Speisen) beträgt ca. 6 Schulstunden. Die Einheit könnte daher z. B. als eigenständiges Projekt eingesetzt werden, um die elementare Größe „Temperatur“ und daran assoziiert den Energiestrom über Wärmeleitung zu verdeutlichen.

Weiter gibt es als Anknüpfungspunkte eine Reihe von Fragen hinsichtlich der Lebensmittelzubereitung, welche eher in den Bereich der Chemie bzw. Biologie fallen. Daher kann auf Basis dieser Unterrichtseinheit ein interdisziplinäres Projekt „Kochen“ als Beitrag zum Themenkomplex „Naturwissenschaft und Technik“ aufgebaut werden, in welchem diese weiterführenden Aspekte näher behandelt werden. Ein solcher Ansatz entspricht auch der Idee, dass Unterricht im Fachgebiet Physik den Schülern die Kompetenz vermitteln soll, sich mit naturwissenschaftlichen Fragestellungen im Allgemeinen auseinanderzusetzen [6,7]. Aus Gründen der inhaltlichen Kohärenz werden wir diese Aspekte allerdings nur soweit ansprechen, wie es für ein Verständnis der Experimente nötig ist und verweisen ansonsten auf die Literatur [8,9].

1.2 Grundlegende Begriffe der Wärmeübertragung und des Kochens

Grundsätzlich gibt es vier unterschiedliche Mechanismen der Wärmeübertragung: Konvektion, Kondensation, Wärmeleitung sowie Wärmestrahlung. Alle diese Prozesse spielen bei der Lebensmittelzubereitung eine Rolle und können in diesem Zusammenhang beispielhaft illustriert werden.

- **Wärmeleitung:** Bei der Wärmeleitung wird Energie in einem Material „von Molekül zu Molekül“ weitergegeben, etwa durch Stöße oder Gitterschwingungen. Gase (beim Kochen also Luft) sind schlechte Wärmeleiter (d. h. gute Isolatoren). Metalle sind gute Wärmeleiter, da hier die freien Elektronen, die auch für die elektrische Leitfähigkeit verantwortlich sind, zur Wärmeleitung beitragen (Aufgabe: Diskussion Metallpfanne vs. Steingutbräter).

Quantitativ wird die stationäre Wärmeleitung durch das Fouriersche Gesetz beschrieben. Die pro Zeit durch eine Schicht der Dicke Δx übertragene Energie ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen beiden Enden und zur Fläche A und umgekehrt proportional zur Dicke:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Die Wärmeleitfähigkeit λ der uns hier interessierenden Materialien variiert zwischen 0,025 W/(m·K) für Luft über 0,5 W/(m·K) für Rindfleisch bis zu 400 W/(m·K) für Kupfer.

- **Konvektion:** Obwohl Luft ein schlechter Wärmeleiter ist, kann sie dennoch zum Wärmetransport beitragen: Bei der Konvektion wird die Wärme dadurch übertragen, dass die Materie selbst transportiert wird (durch Strömungen in Flüssigkeiten und Gasen). Deutlich sichtbar sind z. B. die Konvektionsströmungen beim Kochen von Gemüse. Das Wasser, das am Topfboden von der Kochplatte erhitzt wird, besitzt eine geringere Dichte als das kühlere Wasser darüber und steigt daher nach oben. Es bilden sich Konvektionswalzen aus, die die Wärme wesentlich effektiver transportieren als bei der reinen Wärmeleitung (typischerweise um einen Faktor 100).

Noch effektiver ist die *erzwungene Konvektion*, bei der die Flüssigkeits- oder Gasströmung künstlich erzeugt wird. Jeder kennt das Phänomen: Ein Löffel Suppe kühlt schneller ab, wenn man pustet (andere Beispiele für erzwungene Konvektion sind der Umluftherd, die Wasserkühlung von Motoren oder die Kühlung von Computerprozessoren mit Ventilatoren). Je nachdem, wie stark man pustet, ist die erzwungene Konvektion noch einmal um einen Faktor 10-100 effektiver als die natürliche Konvektion.

- **Wärmestrahlung:** Alle Körper geben Wärmestrahlung ab und verlieren dadurch Energie. Es handelt sich um elektromagnetische Strahlung mit einem (idealerweise Planckschen) Spektrum, das erst ab 500 °C nennenswerte Anteile im sichtbaren Bereich aufweist (z. B. Heizdrähte im Toaster).

Fast alle Nichtmetalle können in guter Näherung als schwarze Körper modelliert werden, für deren abgestrahlte Leistung das Stefan-Boltzmann-Gesetz gilt:

$$\dot{Q} = -\sigma \cdot A \cdot T_K^4 \quad (1)$$

(T_K = Temperatur des Körpers; Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$). Befindet sich der Körper vollständig umschlossen in einer Umgebung der Temperatur T_U (z. B. Backofen, Zimmer), so empfängt er auch die von der Umgebung abgestrahlte Wärmestrahlung, und die Richtung der Energieübertragung hängt davon ab ob der Körper oder die Umgebung die höhere Temperatur besitzt:

$$\dot{Q} = -\sigma \cdot A \cdot (T_K^4 - T_U^4) \quad (2)$$

- **Kondensation:** Wenn Wasserdampf zu Wasser kondensiert, wird durch die Phasenänderung eine Kondensationswärme von 2258 kJ/kg freigesetzt. Beim Eierkocher wird dies zur Erwärmung genutzt: Das kondensierte Wasser setzt sich an der Ei-Oberfläche nieder, und die Kondensationswärme wird zum großen Teil an das Ei abgegeben.

Abhängig davon, welche Medien den Wärmetransport übernehmen (z.B. Luft, Wasser oder Öl bei Konvektion), kann die Wärmeübertragungsrates um Größenordnungen variieren. Dieses spiegelt sich beim Kochvorgang in der Zubereitungsdauer von Speisen wieder. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass mehrere Wärmeleitungsprozesse gemeinsam auftreten (z.B. beim Braten im Ofen Erhitzung des Bratgutes per Konvektion und Wärmestrahlung, Thermalisieren des Bratens per Wärmeleitung). Eigentlich muss dieses in einer Verschaltung von Wärmeleitwegen (Parallel-/Serienschaltung) berücksichtigt werden, was allerdings den schulischen Rahmen sprengen würde.

Weiter wird der Erwärmungsprozess stark durch die thermischen Randbedingungen bestimmt. Beim Kochen in Wasser ist die größte Temperaturdifferenz 100°C, beim Backen im Ofen nahezu 300°C, beim Grillen auf dem Holzkohlegrill 1000°C. Die Temperaturdifferenz kontrolliert die Art des dominanten Wärmetransportweges, welcher mit dem T^4 -Gesetz für den Grill über Strahlung geht, während es beim Kochen im Wasser per Konvektion verläuft.

Zum Verständnis der nachfolgenden Versuche bedarf es einer kurzen Diskussion elementarer Kochbegriffe. Nahrungsmittel werden gekocht, um sie genießbar und schmackhafter zu machen. So werden in Fleisch und Eiern auf diese Weise Krankheitserreger abgetötet, Bohnen

werden erst durch das Kochen essbar. Zusätzlich verändert sich die Konsistenz von Nahrungsmitteln in einer Art, die sie schmackhafter und besser verdaulich machen.

Speziell für tierische Produkte lässt sich dieses darauf zurückführen, dass neben Wasser die hauptsächlichsten Bestandteile Proteine (Aminosäure-basierte Molekülkomplexe) sind, deren Eigenschaften durch Wärmebehandlung stark verändert werden. Dieser Vorgang der sog. „Denaturierung“ bezeichnet die Transformation der Proteine durch das Aufbrechen und die Neuerstellung atomarer Bindungen.

Proteine in Fleisch sind bei Temperaturen bis ca. 55°C stabil. Oberhalb dieser Temperatur beginnen sie zu denaturieren, dieses mit einer Rate, die sich bei einer Temperaturerhöhung von 10°C jeweils verdoppelt. Mit der Denaturierung der Proteine geht die beim Kochen/Braten/Grillen beobachtbare Farbänderung von Fleischstücken einher. Weiterhin formt ein Protein, das Collagen, den wesentlichen Bestandteil des Bindegewebes in Fleisch. Mit der Denaturierung dieses Proteins zieht sich das Bindegewebe zusammen, wobei aus dem durch das Bindegewebe umschlossene Muskelfleisch das Wasser herausgepresst wird. Wird daher Fleisch zu lange bzw. zu hohen Temperaturen erwärmt, wird das Wasser nahezu komplett aus dem Fleischstück herausgepresst. Das Resultat ist eine knochentrockene Mahlzeit. Um dieses zu vermeiden soll Rind (Steak) im Kern nur auf ca. 70°C erwärmt werden, Schwein auf 85°C (Zitat Johann Lafer: Das Tier ist ja schon tot, es muss nur noch erwärmt werden).

Für Eier als tierische Produkte gelten ähnliche Regeln. So beginnt die Denaturierung des Eigelbs im Temperaturbereich zwischen 65 und 70°C, während das umgebende Eiweiß schon bei 60 bis 63°C zu verfestigen beginnt. Entsprechend ergeben sich die Regeln zur Behandlung von Eiern. So kann mit der Trennung von Eiweiß und Eigelb letzteres zur Bindung von Soßen und Süßspeisen genutzt werden. Dabei müssen diese eben bis ca. 65 bis 70°C erhitzt werden, um die Verdickung und Bindung der Speise über das Eigelb zu erwirken.

Jenseits der Proteindenaturierung kann die Erwärmung von Nahrungsmitteln auch genutzt werden, um zusätzliche Aromen zu erzeugen. Die bekannteste und wichtigste Reaktion hierbei ist die sog. Maillard-Reaktion. In dieser Reaktion, welche bei Temperaturen zwischen 150 und 180°C abläuft, verbindet sich der in den Nahrungsmitteln gelöste Zucker mit den Proteinen. Dieses resultiert in der Erzeugung von neuen Aromastoffen, welche z.B. der Oberfläche von scharf angebratenem Fleisch seinen besonderen Geschmack verleiht.

1.3 Umsetzung des Konzeptes

Mit dem bisher Gesagten ergibt sich als zentrale Frage für die Umsetzung des Unterrichtskonzeptes: Wie kann die Temperatur von Kochgut während der thermischen Behandlung bestimmt werden, ohne dass die Qualität der Speisen darunter leidet? Diese Frage muss unter Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen geklärt werden:

- a.) Welche Speisen eignen sich für ein mehrgängiges Menü, lassen sich mit schulischen Mitteln und in relativ kurzer Zeit zubereiten?
- b.) Welche vegetarischen Alternativen gibt es für die Menüfolge?
- c.) Können unterschiedliche Arten des Wärmetransportes thematisiert werden?
- d.) Sind die Experimente einfach?
- e.) Schmeckt es?

Unter Berücksichtigung dieses Anforderungsprofils haben wir eine Reihe von Versuchen ausgeführt, um die Umsetzbarkeit des Unterrichtskonzeptes zu überprüfen. Als Resultat unserer Versuche präsentieren wir in Abschnitt 2 eine mögliche Speisenfolge. Mit den in diesem Menü beschriebenen Experimenten thematisieren wir die Wärmeübertragungsprozesse Konvek-

tion, Wärmeleitung und Wärmestrahlung. Bei der Zusammenstellung des Menüs bot sich kein Experiment zur Kondensation an. Mit den von uns genutzten experimentellen Techniken sollte aber die Bestimmung des Temperaturverlaufs von in Wasserdampf gegarten Germknödeln geeignet sein, um diese Art des Wärmetransportes zu charakterisieren. Weiter zeigen unsere Erfahrungen, dass die Experimente insgesamt sehr einfach sind – alle hier präsentierten Daten sind das Resultat von „Freihandexperimenten“, die ohne spezielle Vorbereitungen ausgeführt wurden. Was die Frage des Geschmacks des Menüs angeht, so muss deren Beantwortung den Schülerexperimentatoren überlassen bleiben.

Hinsichtlich der zentralen Frage zeigt sich, dass bei hinreichender hygienischer Vorkehr eine ganze Reihe von Techniken zur Bestimmung der Temperatur des Gargutes eingesetzt werden können. So benutzten wir Alkoholthermometer aus der Physiksammlung (Messbereich bis 100°C), ein kommerzielles Fleischthermometer (bis 120°C) sowie ein Widerstandsthermometer (bis 200°C). Ursprüngliche Bedenken, dass die Messungen aufgrund unkontrollierter Wärmeeinträge in die Thermometer stark mit systematischen Fehlern behaftet sein könnten, erwiesen sich als unbegründet. Die Tatsache, dass drei konzeptionell verschiedene Techniken/Geräte zur Bestimmung der gleichen experimentellen Größe eingesetzt wurden, lädt dazu ein, die Frage der Temperaturmessung als eigenständiges Thema anzusprechen.

2. In drei Gängen zur Wärmeübertragung

Im folgenden Abschnitt werden 3 Rezepte vorgestellt, welche mit schulischen Mitteln eine Bestimmung des Erwärmungsprozesses von Lebensmitteln bei unterschiedlichen Zubereitungsarten ermöglichen. Die Rezepte sind als Dreigänge-Menü aufgeführt, nach Abschluss der Zubereitung können die Schüler das Resultat ihrer Bemühungen verspeisen. So können sie ihre Messdaten mit ihren Geschmackseindrücken verbinden und lernen, wie Geschmack, Textur etc. der Kochstücke mit der zugeführten Wärmebehandlung zusammenhängen.

2.1 Vorspeise: Schafskäse in zwei Variationen

Rezept – für 2 Personen

2 × 200 g Feta
2 Zwiebeln
2 Tomaten
1 Paprikaschote (gelb)
2 Peperoni
Olivenöl
Kräuter der Provence
Salz
Pfeffer

Zubereitung a – Gedämpfter Feta: Ofen auf 200°C vorheizen. Zwiebeln in Scheiben schneiden und auf der Alufolie auslegen. Ein Stück Feta auflegen und dieses mit Hilfe eines Korkeziehers (am besten ohne "Seele") von der Seite vorbohren, so dass das Thermometer eingeführt werden kann, ohne Bruchstellen am Feta zu erzeugen. Kräftig mit Pfeffer würzen, weitere Zwiebelringe auflegen, mit etwas Olivenöl beträufeln und alles in Alufolie einwickeln. Die Folie mit dem Käse auf das Backgitter legen und ca. 60 min backen, bis der Käse in der Mitte eine Temperatur von ca. 90°C aufweist.

Alternativ können auch zwei Stücke Feta in der Folie zubereitet werden. Hierzu wird das untere Stück vom Mittelpunkt der oberen Fläche bis zum Mittelpunkt einer kurzen Kantenlänge so eingekerbt, dass das Messthermometer in diese Kerbe eingepasst werden kann. Es ist auf

guten Kontakt zwischen dem Feta und der Messspitze des Thermometers zu achten (Abbildung 1).



Abbildung 1: Für die Temperaturmessung nach Zubereitung a präparierter Feta

Zubereitung b – Überbackener Feta: Ofen auf 200°C vorheizen. Die Tomaten, die Paprikaschote und die Peperoni klein würfeln und zusammen mit den Kräutern und etwas Salz und Pfeffer in einer mit Olivenöl gefetteten, feuerfesten Form verteilen. Den Feta wie oben beschrieben mit dem Thermometer versehen oben auflegen und mit etwas Olivenöl beträufeln. Alles im Ofen ca. 30 min backen, bis der Feta gut zerlaufen ist.

Experiment/Daten

Jeweils ein Stück Feta ($3\text{ cm} \times 6,5\text{ cm} \times 11\text{ cm}$) wurde wie oben beschrieben zubereitet und in den vorgeheizten Ofen (Oberhitze, keine Umluft) gestellt. Als Temperatursensor wurden Alkoholthermometer (Messbereich bis 100°C) benutzt, welche bei entsprechender Ausrichtung bequem durch das Sichtfenster des Ofens abgelesen werden können. Die Temperatur wurde jede Minute abgelesen und über der Zeit aufgetragen (vgl. Abbildung 2).

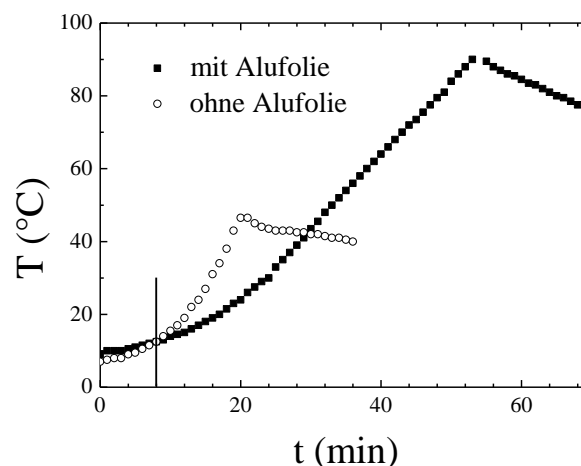


Abbildung 2: Messwerte für die Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit in der Feta-Mitte.

Der Feta in Folie wurde mit einer Anfangstemperatur von 10°C (Käsemitte) in den Ofen eingebracht. Abbildung 1 zeigt für die ersten drei Minuten eine konstante Temperatur und in den folgenden 22 Minuten einen exponentiellen Anstieg auf 33°C . Im Weiteren verläuft der Anstieg linear bis die Maximaltemperatur von 88°C 52 Minuten nach Beginn des Experiments erreicht wird. Nach Herausnahme des Fetas wurden noch für 15 Minuten Messwerte aufgenommen. Die Temperaturabnahme ist in diesem Bereich nahezu linear. Ein "Nachwärmen" wurde nicht beobachtet.

Im Unterschied zum Folien-Feta weist der offene Feta einen Temperaturanstieg ab der ersten Minute auf. Die Anfangstemperatur beträgt hier 7°C. Deutlich zu erkennen ist auch ein wesentlich schnellerer, ebenfalls exponentiell verlaufender Temperaturanstieg, sodass bereits nach 8 Minuten die Temperatur im offenen Feta auf den Wert des Folien-Fetas gestiegen ist. Der Anstieg verläuft bis zum Abbruch des Experiments bei einer Innentemperatur von 46,5°C exponentiell. Auch hier wurden noch für 15 Minuten Messwerte des Abkühlvorganges aufgenommen. Dieser zeigt in den ersten 5 Minuten eine recht schnelle Abkühlung um 3°C (0,6°C pro Minute) um anschließend mit ca. 0,25°C pro Minute deutlich langsamer zu werden. Ein Nachwärmen ist auch hier nicht zu beobachten.

Zu betonen ist hier noch der wesentliche kulinarische Unterschied zwischen beiden Zubereitungsformen. Während der Folien-Feta formstabil ist und durch die Zubereitung nur wenig seine Konsistenz ändert, beginnt der offene Feta schon nach kurzer Zeit zu zerfließen. Im hier geschilderten Experiment begannen die Kanten des Fetas bereits nach 8 Minuten abzuschmelzen und nach 15 Minuten war ca. die Hälfte des Fetas zerflossen. In den folgenden 5 Minuten begann die Höhe des Fetas über dem Thermometer durch diesen Schmelzvorgang abzunehmen, was nach 20 Minuten zum Abbruch des Experiments führte. Die Feta-Schicht über dem Thermometer betrug zu diesem Zeitpunkt ca. 5 mm gegenüber ca. 12 mm zu Beginn des Experiments.

Da die Wärmeübertragung im Backofen weiter unten ausführlich diskutiert wird, soll hier nur kurz auf den Aspekt der Wärmestrahlung genauer eingegangen werden. Dieser wird durch den Vergleich der beiden Temperaturverläufe sehr deutlich demonstriert. Während der offene Feta den kombinierten Übertragungsmechanismen Konvektion und Strahlung ausgesetzt ist, wird die Strahlung beim Folien-Feta stark durch die Alufolie reflektiert und trägt somit kaum zu dessen Erwärmung bei. Hieraus resultiert der deutlich schnellere Temperaturanstieg des offenen Fetas, welcher insbesondere in den ersten 8 Minuten des Experiments nur durch diesen zusätzlichen Wärmebeitrag erklärt werden kann. Das Abschmelzen der Fettschicht, welche das Thermometer umgibt muss erst für größere Zeiten berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang bietet sich auch die Möglichkeit auf Anwendungen der Reflexion von Wärmestrahlung einzugehen (z.B. bei der Rettungsdecke oder Schutz von PKWs vor Überhitzung durch Sonneneinstrahlung). Eine kurze Abschätzung der Lage des Emissionsmaximums mittels des Wienschen Verschiebungsgesetzes zeigt für eine Temperatur der Herdwände von $T = 200^\circ\text{C}$ das Maximum bei einer Frequenz von ca. 11 μm . Dies entspricht, genau wie die Lage des Emissionsmaximum eines Menschen (ca. 16 μm), dem Spektralgebiet des mittleren Ultrarot. Somit ist eine Vergleichbarkeit des Reflexionsverhaltens der Alufolie bezüglich der Abstrahlung eines Menschen und der Strahlung des Herdes gegeben.

2.2.1 Hauptgang: Hackbraten

Rezept – für 6 Personen

600 g Gehacktes halb/halb
100 g Kartoffeln, gekocht
1 Zwiebel
2 Knoblauchzehen
Butter
Worcestershire Sauce
Pfeffer
Ketchup
Salz
Basilikum
Zitronensaft

Zubereitung: Ofen auf 180°C vorheizen. Kartoffeln pressen, mit dem Hackfleisch vermengen. Zwiebel und Knoblauchzehen klein schneiden, in Butter glasig braten, kurz abkühlen lassen, zur Hackfleischmischung geben. Mit Worcestershire-Sauce, Pfeffer, Ketchup, Salz, Basilikum und Zitronensaft würzen. Aus der Fleischmasse einen Laib formen, in eine gefettete Auflaufform setzen, im Ofen ca. 40 min backen (bis der Kern des Bratens eine Temperatur von ca. 85°C erreicht hat). Vor dem Servieren 10 min stehen lassen.

Experiment/Daten

Der Hackbraten wurde gemäß Rezept zubereitet, in eine Auflaufform gelegt (Abbildung 3) und in den vorgeheizten Backofen gestellt. Da die meisten Zutaten des Bratens aus dem Kühlschrank kamen, beginnt das Experiment bei 16 °C Bratentemperatur. An einem Bratenthermometer, das mit seiner Spitze etwa in der Bratenmitte steckte, wurde in regelmäßigen Abständen die Temperatur abgelesen. Die Messwerte sind in Abbildung gegen die Zeit aufgetragen. Der Hackbraten wurde nach 40 min aus dem Ofen genommen, als in der Bratenmitte die für Schweinefleisch avisierte Temperatur von 85°C erreicht war (rot gestrichelte Linie). Die Temperaturmessungen wurden danach noch für 20 min weitergeführt.



Abbildung 3: Für die Temperaturmessung präparierter Hackbraten

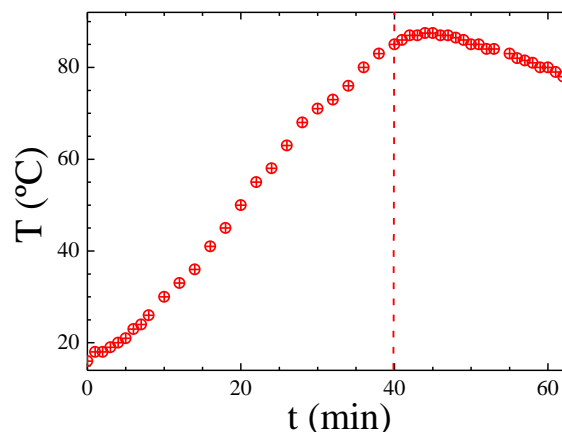


Abbildung 4: Messwerte für die Temperatur in der Hackbraten-Mitte

Erwärmung des Hackbratens

Abbildung 3 veranschaulicht schematisch, welche Vorgänge bei der Erwärmung des Bratens im Backofen ablaufen. Der Hackbraten wird mit einer Temperatur von 20°C in den vorge-

heizten Ofen gestellt. Von den Heizdrähten und den heißen Wänden des Backofen-Inneren wird Wärme auf den kühleren Braten übertragen. An der Wärmeübertragung sind fast ausschließlich Konvektion und Wärmestrahlung beteiligt.

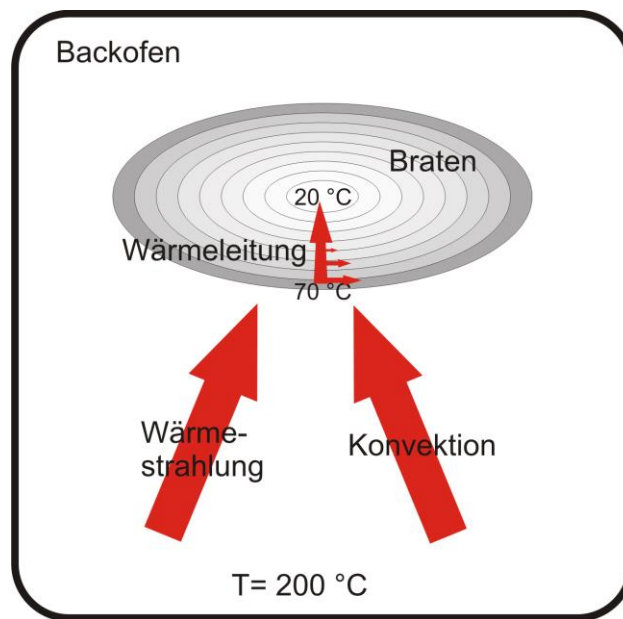


Abbildung 5: Veranschaulichung der Wärmeübertragungsprozesse im Backofen

Der Braten erwärmt sich nicht gleichmäßig. Wärmestrahlung und Konvektionswärme werden an der Oberfläche absorbiert, und zunächst steigt nur die Temperatur an der Bratenoberfläche an. Die Temperatur in der Mitte des Bratens bleibt eine ganze Weile fast unverändert. Als Folge der Temperaturdifferenz innerhalb des Hackbratens setzt Wärmeleitung ein. Der Braten erwärmt sich schichtweise von außen nach innen (Abbildung ; für eine quantitative Beschreibung dieses Vorgangs s. den Rezeptvorschlag „Nilpferd in Burgunder“ in diesem Heft). Der Garvorgang sollte unterbrochen werden, wenn die Temperatur in der Mitte die Denaturations-Temperatur erreicht hat (d. h. wenn er „durch“ ist). Lässt man den Braten dagegen ausreichend lange im Ofen, wird schließlich das thermodynamische Gleichgewicht $T = \text{const.}$ erreicht (ein Euphemismus für: „Der Braten ist ungenießbar“).

Die Messdaten in Abbildung zeigen, dass bei dem relativ kleinen Hackbraten die Erhöhung der Temperatur in der Bratenmitte innerhalb der ersten 5 Minuten einsetzt und anschließend näherungsweise linear verläuft. Die Temperatur steigt auch noch weiter an, nachdem der Braten aus dem Ofen genommen wurde. Das ist mit dem oben Gesagten nachvollziehbar: Solange die Temperatur außen noch höher als innen ist, findet Wärmeleitung nach innen statt, und die Temperatur im Innern steigt an. Hier liegt der Grund dafür, dass man große Braten noch eine Zeitlang „ruhen“ lassen soll, nachdem man sie aus dem Ofen genommen hat.

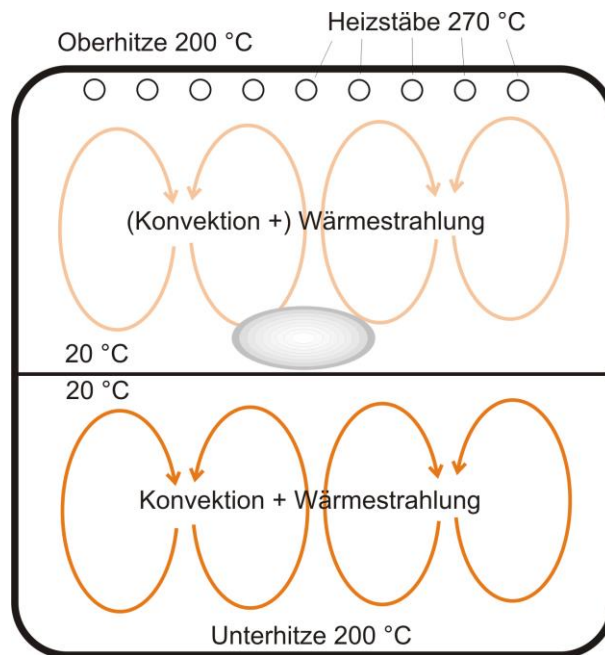


Abbildung 6: Modellieren der Wärmeübertragung in einem Backofen

Wärmeübertragung im Backofen

Betrachten wir nun, wie die Wärme von den Backofenwänden zur Bratenoberfläche gelangt. Die Beiträge der verschiedenen Wärmeübertragungsmechanismen lassen sich experimentell nicht unterscheiden. Aber mit dem einfachen Modell aus Abbildung lassen sich qualitativ doch einige Einsichten gewinnen. Betrachtet wird die folgende Situation: Der Braten (Fläche $0,08 \text{ m}^2$) ist auf einem Backblech gerade in den Backofen geschoben worden (Temperatur 20°C). Der Backofen ist vorgeheizt, die Ofenwände besitzen eine Temperatur von 200°C . Oben im Backofen sind Heizstäbe angebracht (Abstand 5 cm , Dicke $0,5 \text{ cm}$), die eine Temperatur von 270°C besitzen.

Das Backblech unterteilt den Backofen in eine obere und eine untere Hälfte (Höhe jeweils 20 cm). Die Konvektion kann daher für beide Hälften getrennt betrachtet werden. Hier zeigt sich ein sehr interessanter Sachverhalt, den man qualitativ leicht verstehen kann. In der unteren Hälfte ist es unten warm und oben kalt. Die wärmere Luft ist weniger dicht als die kältere, und deshalb werden, wie oben beschrieben, Konvektionsströmungen in Gang gesetzt, mit denen Wärme transportiert wird.

In der oberen Hälfte ist es umgekehrt: Oben ist es warm, unten kälter. Die entsprechende Luftschichtung ist bereits stabil; auch durch noch so starkes Heizen werden kaum Konvektionsströmungen erzeugt. Die Oberhitze wirkt fast ausschließlich durch Wärmestrahlung, kaum durch Konvektion. Die Wärmeleitung durch die Luft spielt ebenfalls keine Rolle.

Die durch Wärmestrahlung von den Herdwänden auf den Braten übertragene Leistung lässt sich einfach mit der oben angegebenen Formel (2) berechnen, da der Braten vom Ofen ganz umschlossen ist. Komplizierter ist es, die Strahlungsleistung der Heizstäbe quantitativ zu beschreiben. Entsprechende Formeln findet man in der ingenieurwissenschaftlichen Fachliteratur [12].

Einen Eindruck vom Wirken der verschiedenen Wärmeübertragungsarten erhält man aus der folgenden Tabelle, in der die quantitativen Vorhersagen des Modells eingetragen sind.

<i>Mechanismus der Wärmeübertragung</i>	<i>Übertragene Wärme / Zeit (=Leistung)</i>
---	---

Strahlung von den Herdwänden (200 °C)	195 W
Direkte Strahlung von den Heizstäben (270 °C)	55 W
Konvektion obere Ofenhälfte	2 W
Konvektion untere Ofenhälfte	48 W
Wärmeleitung	6 W
<i>Gesamt</i>	<i>303 W</i>

Angenommen wurde jeweils eine Oberflächentemperatur des Bratens von 20 °C. Wenn die Oberflächentemperatur im Lauf der Zeit ansteigt, reduzieren sich die Wärmeübertragungsraten entsprechend der abnehmenden Temperaturdifferenz.

2.2.2 Alternative für Vegetarier: Tofu in der Pfanne

Falls sich in der Schülergruppe Vegetarier befinden, kann diesen angeboten werden, für den Hauptgang eine Tofu-basierte Mahlzeit zu erstellen. Als Test hierfür haben wir einen Freihandversuch mit Tofuscheiben von einigen Zentimetern Dicke ausgeführt, in die wir zwei kleine Taschen für Widerstandsthermometer geschnitten haben. Diese Scheiben wurden in einer mit etwas Wasser gefüllten Bratpfanne einseitig auf dem Herd erwärmt. Die Temperatur wird bei dieser Messmethode über die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes ermittelt, der mit einem Handmultimeter gemessen wird.

In Abbildung 7 ist die Entwicklung der gemessenen lokalen Temperatur für beide Thermometer dargestellt. Es ergeben sich wieder charakteristische Erwärmungskurven, mit einem quasi-exponentiellen Anlaufen zu Beginn des Prozesses. Entsprechend der mittigeren Position (kleinerer Abstand von der Wärmequelle) des einen Thermometers tritt hier die Erwärmung deutlich früher als bei dem an der Oberfläche befindlichen ein. Mit derartigen Experimenten lassen sich also analog zum Hackbraten Erwärmungsprozesse beim Kochen demonstrieren und quantifizieren. Da die Autoren keine umfassenderen Erfahrungen mit schmackhaften Tofuzubereitungen haben, wird hier auf eine weiterführende Rezeptangabe verzichtet.

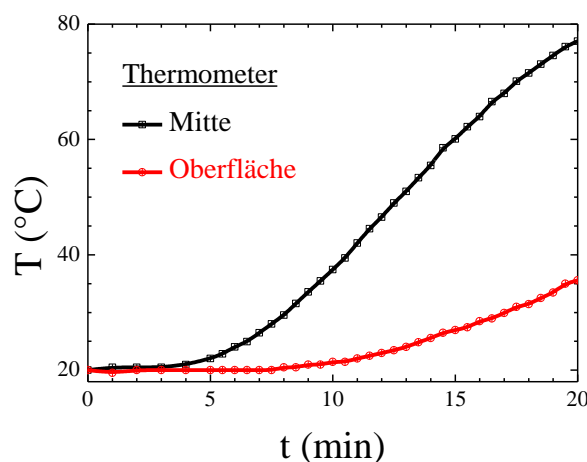


Abbildung 7: Erwärmungskurven für ein in einer Bratpfanne erhitztes Stück Tofu

2.3 Nachspeise: Weincreme

Rezept – für 3 Personen (nach [11])

3 Eier
190ml trockener Weißwein
unbehandelte Zitrone
8 Zuckerwürfel
1 EL Kirschwasser

Zubereitung: Eier trennen, Eiweiß kühl stellen. Eigelb in einem Edelstahltopf mit dem Wein verquirlen. Zitrone gründlich waschen, Zitronenschale mit den Zuckerstückchen abreiben, zum Wein-Ei-Gemisch geben. Alles kräftig schlagen. Kirschwasser zugeben. Topf in einem größeren Topf in ein Wasserbad setzen, zusammen auf dem Herd erwärmen, dabei die Creme ständig rühren. Vom Herd nehmen wenn die Creme dickflüssig wird. Abkühlen lassen. Vor dem Servieren das Eiweiß steif schlagen, vorsichtig unter die Creme heben. Sofort servieren. (Hinweis: Im Schülerexperiment sollte ein analoges Rezept ohne Alkohol gewählt werden.)

Experiment/Daten

Dieser Bestandteil des 3-Gänge-Menüs dient als Demonstrationsexperiment für Wärmeleitungsprozesse beim Kochen sowie zur Illustration kochchemischer Vorgänge. Dabei werden bei der Erhitzung der Weincreme im Wasserbad die Temperatur des Wasserbades (mittels Alkoholthermometer) und der Weincreme (mittels Bratenthermometer) bestimmt (Abbildung 8). Da die Weincreme während der Erwärmung ständig gerührt wird (erzwungene Konvektion), ergibt sich in der Creme eine homogene Temperaturverteilung. Weiter wird der Topf mit der Creme bei der Zubereitung im Wasserbad bewegt, wodurch auch im Wasserbad eine gleichmäßige Temperaturverteilung vorliegt. Damit sind Temperaturunterschiede zwischen Wasserbad und Creme die unmittelbare Konsequenz des Wärmewiderstandes, welcher von der Grenzfläche Wasserbad-Edelstahltopf-Creme erzeugt wird.



Abbildung 8: Messaufbau zur Bestimmung der Weincremeerwärmung im Wasserbad

Ziel des Erwärmungsprozesses ist es, die Eiercreme auf eine Temperatur zwischen 65 und 70°C zu erwärmen. In diesem Temperaturfenster stockt das Eigelb und die Creme verdickt sich. Die Creme darf nicht überhitzt werden, da bei Temperaturen deutlich jenseits von 70°C das Eigelb ausflockt und die Creme ihre Bindung verliert. Daher erfolgt die Zubereitung dergestalt, dass die Creme auf eine Temperatur im avisierten Bereich erhitzt wird, und nach anschließender Abkühlung das geschlagene Eiweiß untergerührt wird, mit dem Resultat einer luftig-lockeren Nachspeise. Um diese Zubereitungsanforderungen zu erfüllen wurde ein Experiment zur Temperaturentwicklung im Wasserbad und in der Creme ausgeführt, dessen Ergebnis in Abbildung 9 zusammengefasst ist.

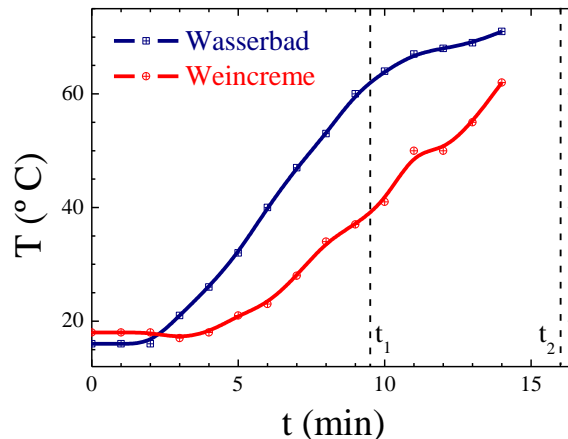


Abbildung 9: Temperaturverlauf von in einem Wasserbad erhitzter Weincreme

Zu Beginn wird die Weincreme ($T = 18\text{ °C}$) in das etwas kältere Wasserbad (16 °C) gestellt. Während nun das Wasser auf dem Herd erwärmt wird (Herdplatte auf voller Leistung), reagiert die Creme träge und folgt thermisch auf das umgebende kältere Wasserbad mit leichter Abkühlung. Erst nach 4 bis 5 Minuten erhöht sich die Temperatur in der Creme als Folge der Erwärmung des umgebenden Wasserbades. Diese zeitlich verzögerte Reaktion der Creme auf das Wasserbad bleibt im weiteren Verlauf des Experimentes bestehen. Nach ca. 10 Minuten (t_1 in Abbildung 9) hat das Wasserbad eine Temperatur von ca. 65 °C erreicht. Um in der Folge eine zu schnelle Erhitzung der Creme zu vermeiden, wird die Herdplatte ab t_1 auf halber Leistung betrieben – als Resultat ergibt sich eine Steigungsänderung im $T(t)$ Verlauf des Wasserbades. Die Messung wurde einige Minuten weitergeführt, bis die Weincreme nach ca. 13 Minuten einzudicken begann. Zu diesem Zeitpunkt musste die Creme intensiv gerührt werden, weshalb die Temperaturmessung beendet wurde. Weincreme und Wasserbad wurden nach 16 Minuten = t_2 vom Herd genommen, um eine weitere Erwärmung zu unterbinden. Aufgrund der vorliegenden Daten kann zu diesem Zeitpunkt die Temperatur der Creme auf ca. 70 °C abgeschätzt werden, dabei hatte die Creme die erwünschte dickliche Konsistenz.

Neben der Vermittlung einer unmittelbaren Schülererfahrung (die Konsistenzänderung der Creme als Folge der Wärmezufuhr) kann dieses Experiment genutzt werden, um Konzepte aus dem Bereich „Hinführung zum Energiebegriff“, so z.B. Aspekte wie innere Energie und Wärmetransport, auf elementarer Ebene zu diskutieren [6]. Auf diese Weise werden darüber hinaus Prinzipien der Modellbildung in den Naturwissenschaften illustriert. Grundlage dafür ist Abbildung 10, in welcher schematisch die (statischen) thermischen Verhältnisse bei der Zubereitung der Weincreme dargestellt werden. Ausgangspunkt ist die Herdplatte, in welcher elektrischer Strom zur Erzeugung von Wärme genutzt wird. Diese wird einerseits an den Topf mit dem Wasserbad abgegeben (Q_1), andererseits gibt es Wärmeübertragungsverluste durch Erwärmung der Umgebung (Q_2). Die übertragene Wärme Q_1 findet sich nun in der erhöhten inneren Energie des Wasserbades wieder (U_W), führt mittelbar aber auch zur Erhöhung der inneren Energie der Creme über Q_3 bzw. zur Erwärmung der Umgebung (Q_4). Insgesamt gilt für das Wasser $\Delta U_W = Q_1 - Q_3 - Q_4$ und für die Creme für die Creme $\Delta U_C = Q_3 - Q_5$.

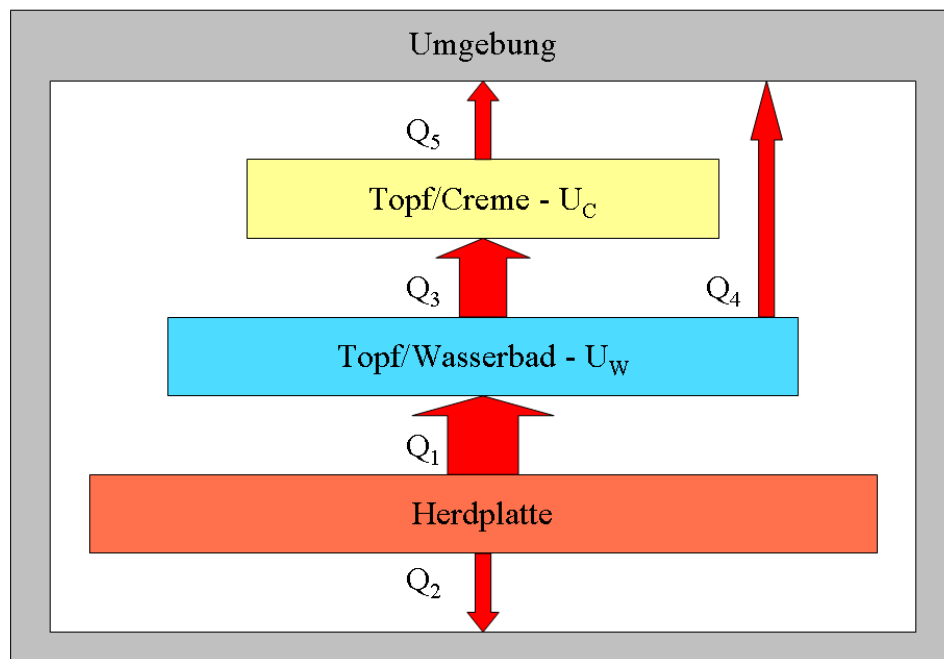


Abbildung 7: Schema zum Wärmetransport bei Erhitzung der Weincreme im Wasserbad

Es lassen sich keine generellen Angaben über Größenrelationen der verschiedenen Wärmehalte machen, da diese von der Größe und Beschaffenheit der Töpfe bzw. der Flüssigkeitsmengen abhängen. Es bietet sich allerdings an, die Schüler diskutieren zu lassen, auf welche Art die thermischen Verluste Q_2 , Q_4 und Q_5 minimiert werden, dieses speziell auch unter Berücksichtigung der oben eingeführten Fourierschen Wärmeleitungsgleichung.

Referenzen

- [1] Siehe z.B. den entsprechenden OECD Bericht (<http://www.oecd.org/>) sowie die durch den Verband Deutscher Ingenieure initiierte Aktion „SACHEN MACHEN“ – <http://www.sachen-machen.org> .
- [2] SPIEGEL extra Schule 49/2007
- [3] Star Trek. Die Technik der U.S.S. Enterprise: R. Sternbach, M. Okuda, Heel (2005)
- [4] <http://www.dpg-physik.de/presse/highlights/index.html>
- [5] A. Carl, E. Wassermann, Physik Journal 6, 11/2007, 3
- [6] <http://db2.nibis.de/1db/cuvo/ausgabe/>
- [7] Bildungsstandards im Fach Physik für den Mittleren Schulabschluss (2004)
- [8] Reise zum Mittelpunkt des Frühstückeis, L. Fisher, Campus (2003)
- [9] The Science of Cooking, P. Barham, Springer (2001)
- [10] The virtual cook: Modeling heat transfer in the kitchen, J. McInerney, H. McGee, A. Harrus, Physics today 11/1999, 30.
- [11] Die echte französische Küche, S. Piroué, Gräfe und Unzer (1994)
- [12] Yunus A. Cengel, Heat Transfer – A Practical Approach, McGraw-Hill, Boston (1998), Table 9.5: View factor expressions for some infinitely long (2D) geometries.

Kurzfassung:

Wir stellen eine Unterrichtseinheit vor, bei der ein 3-Gänge-Menü zubereitet wird. Die Schülerinnen und Schüler messen die Temperaturentwicklung in den Lebensmitteln während des Garens. Auf diese Weise werden die Mechanismen der Wärmeübertragung für die Schüler in einem Alltagskontext erfahrbar gemacht und im Rahmen von Experimenten quantifiziert.