

Computergestützter Chemieunterricht

Messen, Auswerten und Simulieren mit PC, Notebook und Tablet/Smartphone

Ich möchte zwei aus meiner Sicht essentielle Aussagen zum Thema voranstellen und damit eine Diskussionsgrundlage schaffen:

Der Computer oder andere digitale Medien sollen und dürfen das Experiment nicht ersetzen, können aber die Erkennbarkeit der Phänomene sowie die Erfassung und Auswertung der Messdaten und der dahinter liegenden Gesetzmäßigkeiten erleichtern.

Der Einsatz von modernen Datenloggern eröffnet vielfältige experimentelle Möglichkeiten, ohne den Blick auf das Wesentliche – die zu Grunde liegende chemische Reaktion und ihre Gesetzmäßigkeiten – zu verschleiern. Der Umgang mit moderner Technologie und die verbesserte Visualisierung von Messwerten kombiniert mit weitreichenden Auswertungsmöglichkeiten wirken nicht nur im Laborunterricht motivierend.

Damit sollte auch die Zielrichtung der Artikelserie – es sind vorerst 4 Teile geplant – klar sein: Wie können die neuen Medien vom fast schon antiquierten Stand – PC bis hin zu Notebook, Tablet und Smartphone den Experimentalunterricht und speziell den Laborunterricht unterstützen und Motivation sowie Kompetenzerwerb fördern, ohne den Blick auf das Wesentliche zu verlieren? Dabei sollen auch die neuesten Trends und Entwicklungen einbezogen werden, wie z.B. das Verschwimmen der Grenzen zwischen den einzelnen Geräteklassen (Smartphones, die fast Tabletgröße erreichen, Notebooks, die nach Abnahme des Bildschirms zu Tablets mutieren) und die zugehörigen „Apps“, welche herkömmliche Computerprogramme immer mehr ersetzen. Auch der neueste Trend am Markt – „Wireless – Sensoren“, die ohne Kabel die Messdaten per Bluetooth übermitteln und somit direkt auf Endgeräten wie Tablets und Smartphones verfügbar machen. Gerade durch den Einsatz von Technologien „am Puls der Zeit“ und das Einbeziehen von Gadgets, die sonst im Unterricht nicht erlaubt und erwünscht sind, sehe ich eine große Chance, die Begeisterung der Schüler/innen zu heben.

Welche Ausrüstung ist zu empfehlen und notwendig, welche Experimente sind für die angedeuteten Ziele besonders geeignet und welche Hilfestellungen gibt es für die Lehrer/innen? Können die Systeme auch im Anfangsunterricht der Sekundarstufe 1 und dort durchgeführten Schüler/innenexperimenten eingesetzt werden? Es wird um die didaktischen und technischen Grundlagen gehen, aber auch die ökonomische Seite, die in unserem unterfinanzierten Schulwesen immer eine wichtige Rolle spielt.

Übersicht zur Artikelserie

Teil 1: Hard- und Software, Didaktische Grundlagen, **Temperatur- und Wärmemessung**

Teil 2: Schwerpunkt Laborunterricht, **Leitfähigkeitsmessung**

Teil 3: Schwerpunkt Datenanalyse, **pH-Wert und Maßanalyse**

Teil 4: Spezielle Sensoren, Wireless Technologie, **Photometrie und Kinetik**

1. Fachdidaktische Grundlagen

Messen ist wie Lesen, Schreiben und Rechnen eine unverzichtbare Kulturtechnik, wird aber leider oft völlig unterschätzt und in der schulischen Ausbildung nicht ausreichend gewürdigt. Eine möglichst frühe Beschäftigung mit naturwissenschaftlichen Phänomenen und eine Hinführung zu eigenständigem Experimentieren und Messen sind anzustreben. Computerunterstützte Messsysteme können dabei den Zugang zur „Kunst“ des Messens erleichtern und die Auswertung von Experimenten und deren Interpretation erleichtern und motivierender gestalten. Eine Schwierigkeit ist sicher, dass Messtechnik nicht im Vordergrund stehen und das eigentliche Experiment und seine Phänomene verdecken, sondern sich damit ergänzen soll.

Der Einsatz von Datenloggern ermöglicht eine ökonomische und ökologische Versuchsplanung, also die Arbeit mit kleinen Ansätzen, geringen Substanzmengen / Konzentrationen die bei herkömmlicher Arbeitsweise die Gefahr bergen, dass die beobachtbaren Phänomene wenig auffällig ausfallen. Genau hier kann die gut sichtbare Anzeige und Aufzeichnung der Messwerte eine Verstärkung des Ertrags aus dem Versuch bringen.

In welchen Situationen ist die computerbasierte Messdatenerfassung überlegen?

- Rascher Anfall einer großen Anzahl von Messwerten
- Lange Aufzeichnungsdauer
- Graphische Darstellung der Werte mit variablen Achsenbelegungen
- Aufwändige Auswertung durch zeitgleiche Verrechnung der Daten (z.B. Logarithmieren, Differenzieren)

- Aufzeichnungsbeginn oder Ende bei Unter- oder Überschreiten von Schwellenwerten
- Änderungstendenz der Messwerte ist ein wesentlicher Aspekt
- Vergleich mehrere Messreihen notwendig

Viele dieser Punkte sind speziell im Laborunterricht von Bedeutung, wo es noch viel mehr als beim Demonstrationsexperiment darum geht, aus den Beobachtungen während des Experiments, vor allem aber aus den erhaltenen Messdaten Schlüsse zu ziehen.

2. Vorteile von Messwertwandlern

Mehrere Parameter mit einem einzigen Messgerät erfassen und anzeigen oder gleich auf einen Computer übertragen, das ist mit herkömmlichen Messgeräten nicht möglich. Eine breite Palette an Sensoren – nicht nur für die Chemie – bringt neben den schon erwähnten didaktischen Möglichkeiten auch ökonomische Vorteile, da im Prinzip für alle Messzwecke nur mehr ein (mobiles) Gerät nötig ist und dieses noch dazu in allen naturwissenschaftlichen Fächern eingesetzt werden kann. Bei der Ausstattung von Laborarbeitsplätzen sind alle diese Vorteile in der Zusammenschau ein starkes Argument für den Einsatz solcher Systeme.

Dieser Artikel will keine Vergleiche verschiedener am Markt befindlicher Systeme ziehen, vielmehr sollen die Komponenten und Möglichkeiten des Systems VERNIER aufgezeigt werden. Die getätigten didaktischen Aussagen gelten aber auch für alternative Systeme wie z.B. den ALL-CHEM-MISST-II¹, das gilt auch für die Experimentalanleitungen, welche leicht an das jeweilige Messumfeld angepasst werden können.

3. Hardware und Sensoren

Vernier bietet **Interfaces**² für verschiedene Einsatzbereiche. Die *LabQuest* – Serie zeichnet sich durch ein großes Touchscreen-Display und Anschlussmöglichkeiten für bis zu 5 Sensoren aus und kann dank integriertem Akku auch unabhängig von Computer und Stromversorgung eingesetzt werden. Dank Wi-Fi Konnektivität ist das Streaming der aktuellen Messwerte auf beliebig viele Mobilgeräte (z.B. Smartphones der Schüler/innen) möglich. Die kleineren Interfaces weisen keine eigene Anzeigemöglichkeit auf, haben weniger Anschlüsse für Sensoren und geringere Messraten und sind auf Stromversorgung über USB angewiesen. Mit dem GO!LINK können keine digitalen Sensoren (wie z.B. ein Tropfenzähler) ausgewertet werden. Die neueste Entwicklung GO WIRELESS LINK unterstützt über 35 Sensoren und kann über Bluetooth an beliebige iOS und Android (ab Sommer 2015) gekoppelt werden. Die Auswertung erfolgt über die in den jeweiligen App-Stores frei verfügbare Datenerfassungs- und Analyse – App³ auf beliebigen Android- oder iOS - Geräten, die Ausstattung mit einem Computer (PC, Notebook) fällt damit weg.



Abb. 1: Die Vernier Messwandler (von links nach rechts) Go!Link, LABQUEST 2, LABQUEST MINI und (oben) Go Wireless Link

Ich möchte versuchen, eine kleine Entscheidungshilfe für die Auswahl des geeigneten Wandlers zu geben: Die günstigen GO! – Wandler eignen sich nur für zeitabhängige Messungen bei vorgegebenem Messtakt und die Auswahl der Sensoren ist beschränkt, es werden allerdings fast alle für den Chemieunterricht wichtigen Sensoren unterstützt. Vergleichende Parallelmessungen und Verrechnungen zwischen 2 Messgrößen (z.B. eine Temperaturdifferenz) sind nicht möglich, können aber zum Teil durch aufeinanderfolgende Messserien realisiert werden. Die Stärken sind eindeutig die rasche Einsetzbarkeit und beim Wireless – System das Wegfallen eines Endgerätes mit USB-Schnittstelle.

Die LABQUEST – Wandler unterscheiden sich vor allem im Touchscreen und den standalone und WiFi – Fähigkeit des großen Geräts, das zusätzlich zum gut bedienbaren Touchscreen die Auswertungs- und Analysesoftware bereits eingebaut hat und über einige fix integrierte Sensoren (GPS, Licht, Mikrofon, g-Sensor und Temperatur) und eben einen Akku für netzunabhängigen Betrieb verfügt. Ein weiteres Argument für das mehr als doppelt so teure System ist die simultane Übertragung der Messdaten auf WiFi-fähige Endgeräte, welche den gleichzeitigen Zugriff von vielen Schülern mit ihren eigenen Endgeräten erlaubt. Wer ohne diese speziellen Eigenschaften auskommt, kann auf die MINI-Version zurückgreifen, welche vor allem für anspruchsvolle Messungen mit direkter Computeranbindung geeignet ist.

Das Angebot an **Sensoren**⁴ aus allen Sparten der Naturwissenschaften bis hinein in den Bereich der Medizin und Ökologie ermöglicht den Einsatz der Systeme in praktisch allen Bereichen des schulischen Experimentierens. Die Einbindung bestehender Sensoren ist grundsätzlich möglich, wegen der verwendeten Steckernorm aber aufwändig. Geräte mit Schreiberausgang können über einfache Spannungsmessung angebunden werden. Die große Vielfalt an Sensoren und die dadurch breite Palette an abgedeckten Messgrößen erlaubt den fächerübergreifenden Einsatz auch über den nawi-Bereich hinaus z.B. im Sport- und Informatikunterricht. Diese breit gefächerte Anwendbarkeit ist natürlich ein ökonomisches Argument und gewährleistet eine gute Auslastung der Investition.



Abb. 2: Eine Zusammenstellung der Basissensoren für den Chemieunterricht: Thermofühler, pH- und Leitfähigkeitssonde, Gasdrucksensor, Strom- und Spannungsmessung sowie der Tropfenzähler für die Volumsmessung (auch ohne Rührstation verfügbar)

Ein weiteres Kriterium für den effizienten Einsatz solcher Systeme ist die **Auswertungssoftware**, die einerseits eine breite Palette an Anzeigemöglichkeiten und Optionen zur grafischen Analyse bieten muss, aber auch in der Bedienung so einfach und leicht zu erlernen sein sollte, dass auch Schüler/innen das Setup für ihr Experiment selbst einrichten können. Mit LoggerPro liegt eine Software vor, die diese Kriterien erfüllt und auch vielfältige Exportmöglichkeiten anbietet, um die erfassten oder berechneten Daten in externen Programmen weiter zu verarbeiten. Details zur Bedienung werden bei den einzelnen Experimenten vorgestellt, eine Kurzanleitung kann beim Autor bezogen werden.

4. Versuche zur Temperaturmessung

Temperaturänderungen spielen, bedingt durch den bei jeder chemischen Reaktion auftretenden Energieumsatz, bei sehr vielen unterrichtsrelevanten Versuchen eine wichtige Rolle. Aber auch im physikalisch – chemischen Bereich, z.B. bei Lösungsvorgängen und den Phasenübergängen bzw. deren praktischen Anwendung bei Destillationen, lassen sich mittels der einfach durchzuführenden Temperaturmessung wertvolle Erkenntnisse gewinnen. Durch das breite Angebot an Sensoren für verschiedene Temperaturbereiche und ihre relative Unempfindlichkeit gegenüber aggressiven Medien, bietet sich ein breites Spektrum an Experimenten an. Ich möchte versuchen, hier einige repräsentative Beispiele herauszugreifen um einen ersten Überblick zu bieten:

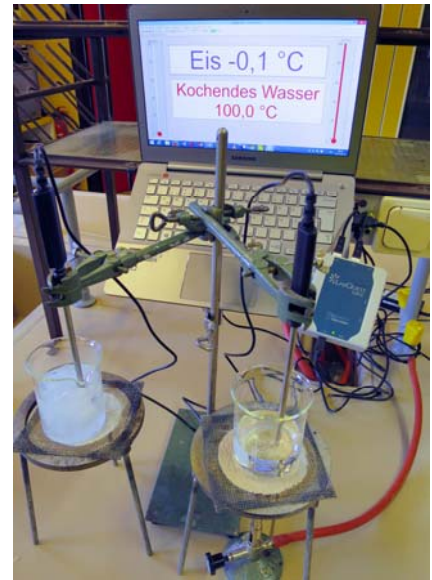
- Temperatur und Phasenübergänge
- Bestimmung von Energieumsätzen – Kalorimetrie
- Flammentemperatur

Einen guten Überblick zu den Einsatzmöglichkeiten im naturwissenschaftlichen Unterricht bietet die Versuchssammlung auf der Homepage von Vernier⁵

V1: Phasenübergänge von Wasser

Dieses einfache Experiment nutzt die gleichzeitige Anzeige von 2 Temperaturen, jener von Eiswasser und der von siedendem Wasser. Dafür wird die Software (LoggerPro) für eine Zweikanalmessung vorbereitet und am Anzeigebildschirm 2 Digitalanzeigen positioniert (zusätzlich können nach Wunsch auch analoge Thermometeranzeigen verwendet werden, siehe Abbildung). Ein Temperaturfühler wird in Eiswasser getaucht, der zweite in siedendes Wasser. Das Erreichen von Schmelz- und Siedepunkt kann verfolgt und die Endwerte abgelesen werden. Eine alternative Durchführung wäre eine zeitabhängige Messung, bei der ein Temperaturfühler in zerkleinertes Eis getaucht wird und dieses langsam erhitzt wird. Aus dem aufgezeichneten Temperaturverlauf lassen sich ebenfalls Schmelz- und Siedetemperatur des Wassers ablesen.

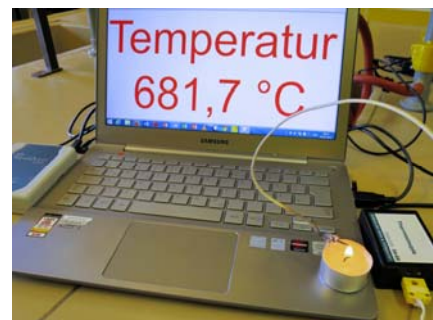
Abb. 1: Versuchsanordnung zur Schmelz- und Siedepunktsbestimmung



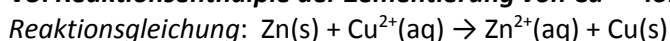
V2: Flammentemperatur

Mit einem Hochtemperatursensor (Thermoelement) können Temperaturen in Flammen (z.B. auch in den verschiedenen Zonen einer Brennerflamme, bzw. der leuchtenden / nicht leuchtenden Flamme eines Bunsenbrenners) bestimmt werden. Als weitere Anwendung ist die Bestimmung von Schmelztemperaturen von eher niedrig schmelzenden Salzen oder Metallen zu nennen.

Abb. 2: Versuchsanordnung zur Messung der Flammentemperatur eines Teelichts



V3: Reaktionsenthalpie der Zementierung von Cu²⁺ - Ionen mit Zink



Experimente zur Temperaturmessung eignen sich besonders zum Einstieg in die Messtechnik, da Temperaturfühler unempfindlich sind und meist ohne spezielle Eichung eingesetzt werden können.

Geräte: Magnetrührer und Rührstäbchen, behelfsmäßiges Kalorimeter (2 ineinandergesteckte PS-Trinkbecher, möglichst transparent), Temperatursensor, Mensur 50 mL, Uhrglas, Waage

Chemikalien: Kupfersulfat Lösung $c(\text{Cu}^{2+}) = 0,5 \text{ mol/L}$, Zinkpulver

Durchführung: Auf einem Uhrglas wird eine Portion von ca. 1,3 g $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (2 mmol) vorbereitet und die genaue Masse notiert. Die Software wird für eine zeitabhängige Temperatureaufzeichnung eingerichtet (Messdauer 240 s, 1 Messpunkt/s). Das Kalorimeter wird mit 50 mL der Kupfersulfat Lösung gefüllt, der Temperatursensor mit ausreichender Eintauchtiefe justiert und der Rührer gestartet. Die Temperatureaufzeichnung wird ca. 1 Minute vor Zugabe der Zinkstaub – Portion gestartet. Das Einbringen der Zink – Portion sollte zügig und in einem Schritt erfolgen um die Umsetzung und damit die Energiefreisetzung nicht zu verschleppen. Die Aufzeichnung wird fortgesetzt, bis sich die Temperatur stabilisiert hat (leicht linear abfallend), in der Praxis reicht dafür eine Gesamtdauer von ca. 4 Minuten.

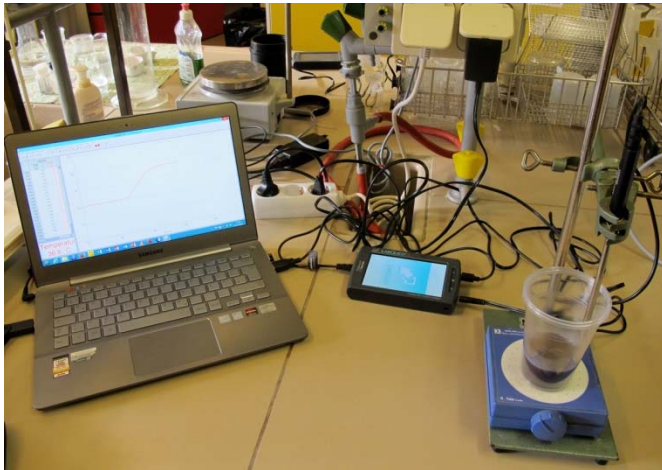


Abb. 3: Versuchsanordnung zur Zementierung

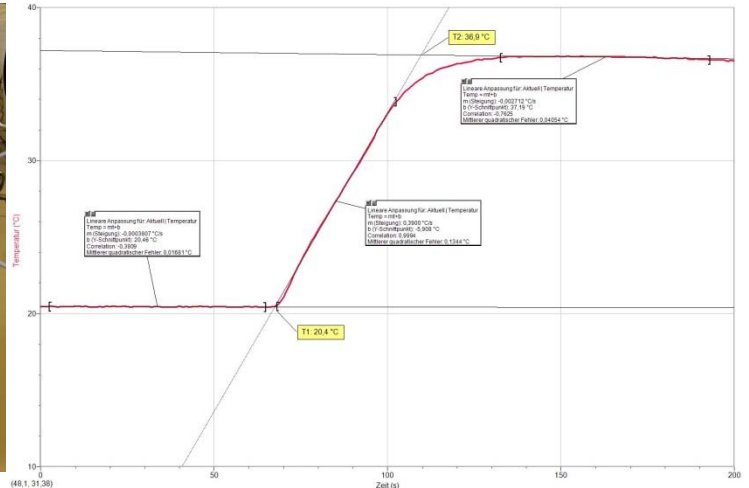


Abb. 4: Auswertung der Temperaturkurve

Auswertung: Die SchülerInnen können gleichzeitig den Reaktionsverlauf (Entfärbung der Lösung, Zementierung von rotbraunem metallischem Kupfer am Zinkstaub) und den Verlauf der Reaktionstemperatur im Kalorimeter beobachten, was den exothermen Charakter dieser Redoxreaktion einfach erschließt. Auch die für die quantitative Auswertung entscheidende Temperaturdifferenz kann aus dem entstandenen Graphen einfach abgeschätzt werden. Bei der exakten Bestimmung der Temperaturdifferenz ist die Auswertungsoption mit Ausgleichgeraden hilfreich, die durch vorher markierte Bereiche gelegt werden können (siehe Abb. 2). Die Schnittpunkte der 3 daraus resultierenden Geraden ergeben die Maximal- und Minimaltemperatur für die Ermittlung der Temperaturdifferenz ΔT .

Die umgesetzte Wärmemenge Q ergibt sich aus der Beziehung: $Q = m_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T$ (m ...Masse der Kalorimeterfüllung in g, c ...Wärmekapazität von Wasser = 4,1868 J/g.K) – im konkreten Fall 50 g · 4,1868 J/g.K · 16,5 K = 3454,1 J. Bezogen auf die im konkreten Versuch eingesetzte Masse an Zink $m(\text{Zn}) = 1,23$ g ergibt das einen molaren Wärmeumsatz von $\Delta H_{\text{R}} = Q_{\text{R}} \cdot M(\text{Zn})/m(\text{Zn}) = 3454 \text{ J} \cdot 65,4 \text{ g} / 1,12 \text{ g} = 183658 \text{ J/mol} = 183,7 \text{ kJ/mol}$. Dieser experimentell ermittelte Wert der Reaktionsenthalpie liegt etwa 15% niedriger als der Literaturwert von 217 kJ/mol. Diese Differenz ist ein guter Ausgangspunkt, um die SchülerInnen zur Erforschung der Ursachen des Fehlers zu motivieren und damit ihre experimentelle Arbeit kritisch zu reflektieren. Der Hauptanteil am Fehler liegt an der mangelnden Isolation des behelfsmäßigen Kalorimeters und der (bewussten) Vernachlässigung des Wasserwerts der Versuchsanordnung.

Die Vorteile der Messdatenerfassung liegen klar auf der Hand – die bei einer manuellen Ablesung nicht zu erreichende Messfrequenz (1 Hz), ergibt einen präzisen, auch im Bereich des schnellen Temperaturanstiegs zuverlässigen Graphen, der eine exakte Bestimmung der Temperaturdifferenz als wesentliche Basis der Berechnung erlaubt. Die einfache und rasche Durchführung erlaubt eine mehrfache Wiederholung der Messung, auch mit einer gezielten Variation der Parameter (Konzentration der Lösung, Korngröße des Zinkpulvers etc.).

Low-cost Mikroversion zur Bestimmung der Verbrennungswärme von Paraffin:

Erkenntnisse zum Energieumsatz chemischer Reaktionen lassen sich auch mit noch einfacheren Aufbauten gewinnen, wobei aber schon klar kommuniziert werden muss, dass dabei die Fehlerquellen mehr und größer werden und die gewonnen Ergebnisse unter diesem Aspekt interpretiert werden müssen.

Geräte und Chemikalien: Teelicht, Sektkorken – Drahtgestell, leere Teelichtschale, Temperatursensor, Waage

Durchführung: Das Teelicht wird genau abgewogen (m_1) und unter dem Drahtgestell positioniert. Die leere Teelichtschale wird ebenfalls abgewogen (m_3), fast zum Rand mit kaltem Wasser gefüllt und wieder abgewogen (m_4) – aus der Differenz ergibt sich die Masse des Wassers: $m = m_4 - m_3$. Der Temperatursensor wird in der Kalorimeterfüllung positioniert, ohne den Boden der Schale zu berühren. Die Software wird für eine zeitabhängige Temperatureaufzeichnung eingerichtet (Messdauer 240 s, 1 Messpunkt/s) und der Messvorgang ca. 1 Minute vor Entzündung des Teelichts gestartet. Das Teelicht wird entzündet und nach einer Temperaturerhöhung von ca. 20°C vorsichtig gelöscht

(auf keinen Fall heftig ausblasen, da dabei auch flüssiges Wachs aus dem System entfernt werden könnte). Die Aufzeichnung soll noch ca. 1 Minute nachlaufen um einen vollständigen, gut auswertbaren Graphen zu erhalten. Die Masse des Teelichts (m_2) wird bestimmt und aus der Differenz die Masse des verbrannten Paraffins errechnet: $m_p = m_1 - m_2$.

Die Auswertung des Temperaturverlaufs erfolgt analog zum Hauptversuch und ergibt die Temperaturdifferenz ΔT . Die umgesetzte Wärmemenge Q ergibt sich aus der Beziehung: $Q = m \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} \cdot \Delta T$ (m ...Masse der Kalorimeterfüllung in g, c ...Wärmekapazität von Wasser = 4,1868 J/g.K) – im konkreten Fall 25,334 g · 4,187 J/g.K · 27,00 K = 2863,85 J.

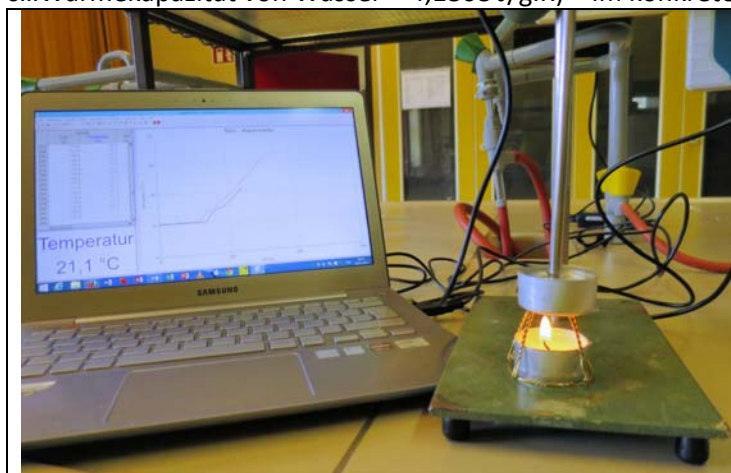


Abb. 5: Versuchsanordnung zur Heizwertbestimmung

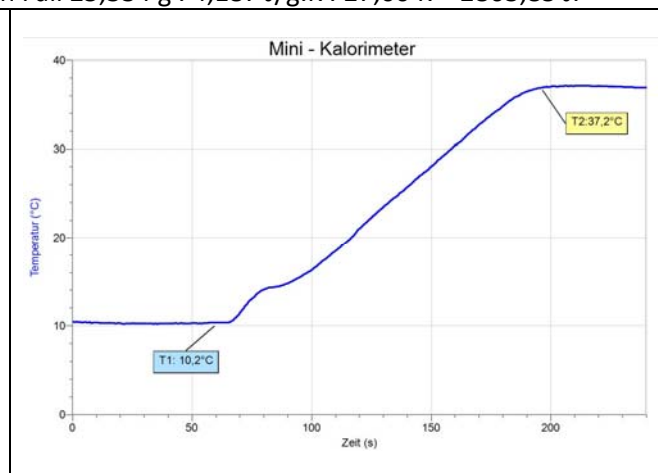


Abb. 6: Auswertung der Temperaturkurve für Paraffin

Da für festes Paraffin keine einheitliche molare Masse angegeben werden kann, bezieht sich der Vergleich auf die Literaturangaben für den Heizwert, der bei etwa 45 kJ/g liegt. Bezogen auf die im konkreten Versuch umgesetzten Masse an Paraffin $m_p = 0,090$ g ergibt das $H_i = Q_R / m_p = 2864 \text{ J} / 0,090 \text{ g} = x \text{ J/g} = 31,820 \text{ kJ/g}$. Dieser experimentell ermittelte Wert der Reaktionsenthalpie liegt damit etwa 30% niedriger als der Literaturwert. Das lässt sich damit erklären, dass das Kalorimetergefäß (die Aluschale) nicht isoliert ist und durch die entstehende Thermik der Abgase nicht die gesamte Reaktionswärme der Verbrennung in die Kalorimeterflüssigkeit eingebracht werden kann. Auch hier wird der (geringe) Wasserwert der Anordnung vernachlässigt. Der Versuch kann prinzipiell auch für andere brennbare Stoffe, z.B. Kohlenwasserstoffe oder Alkohole adaptiert werden, indem das Teelicht durch eine kleine Porzellanschale oder einen Spiritusbrenner mit Docht ersetzt wird. Allerdings muss bei leicht flüchtigen Brennstoffen auf die rasche Verdunstung geachtet werden, welche eine höhere Masse vortäuschen kann. Vermieden werden kann das dadurch, dass das Gefäß mit dem Brennstoff sofort nach dem Auslöschen der Flamme gewogen wird.

¹ AK Arbeitskreis Kappenberg, unter <http://www.kappenberg.com/pages/messgeraete/uebersicht.htm> findet sich unter anderem ein übersichtlicher Marktüberblick zu aktuellen Datenerfassungssystemen

² Übersicht zu den Interfaces von Vernier unter <http://www.vernier.com/products/interfaces/>

³ Links zum Apple AppStore und Google play <http://www.vernier.com/products/software/ga-app/>

⁴ Übersicht zur Sensorpalette von Vernier unter <http://www.vernier.com/products/sensors/>

⁵ Experimente und Laborideen auf der Homepage von Vernier unter: <http://www.vernier.com/experiments/>