› VIRTUALAB – DAS VIRTUELLE LABOR – AUFBAU EINER INTERAKTIVEN LERNPLATTFORM FÜR PRAKTIKA DER THERMODYNAMIK

AUTOR_INNEN

PROF. DR. CORNELIA BREITKOPF
Technische Universität Dresden
cornelia.breitkopf@tu-dresden.de

SEBASTIAN PINNAU DIPL.-ING.
Technische Universität Dresden
Sebastian.Pinnau@ tu-dresden.de

DR. TOMMY LORENZ
Technische Universität Dresden
Tommy.Lorenz@ tu-dresden.de

KEYWORDS

VirtuaLab, E-Assessment, ONXY MINT, Thermodynamik, thermoE, Studienerfolg

ABSTRACT

Der Aufbau eines virtuellen thermodynamischen Labors als interaktive Lernplattform im Rahmen des etablierten thermoE-Konzeptes soll anhand eines exemplarischen Beispiels vorgestellt werden. Mittels intuitiver Bedienung wird den Studierenden das Verständnis thermodynamischer Zusammenhänge vermittelt. Die Umsetzung der interaktiven Arbeitsblätter erfolgt mittels verschiedener Programmierinstrumente, die die Nutzung von Diagrammen, Eingabefeldern, Schaltflächen und Schiebereglern praxisnah ermöglichen.

1. VIRTUALAB ALS FORTSETZUNG UND ERWEITERUNG VON THERMOE

In den letzten Jahren wurden von der Professur große Anstrengungen unternommen, um online unterstützte Übungen (*thermoE*) im Grundlagenfach „Technische Thermodynamik“ zu etablieren, die ein vorlesungs- und semesterbegleitendes Angebot zum Selbststudium darstellen (vgl. Breitkopf et al. 2015). Verschiedene Ansätze wurden in mehreren Projekten vor allem mit der Hochschule Zittau/Görlitz (Fakultät Maschinenwesen, Fachgebiet Technische Thermodynamik) entwickelt und erfolgreich in der Praxis erprobt (vgl. Freudenreich et al. 2016) und haben den Studienerfolg in diesem wichtigen Grundlagenfach des Maschinenbau signifikant steigern können.

VirtuaLab dient nach Evaluierung der bisherigen Ergebnisse der spezifischen Weiterentwicklung des an der TU Dresden erfolgreich etablierten *thermoE*-Assessments. Die neuen, virtuellen Praktikumsversuche sollen das vorhandene Aufgabenportfolio im Fach Technische Thermodynamik ergänzen und sinnvoll mit neuen didaktischen Inhalten erweitern.

Das Projekt *VirtuaLab* zielt dabei auf eine digitale Visualisierung von realen Experimenten. Dadurch werden Studierende neben theoretischem Grundlagenwissen vor allem mit praktischen Ansätzen vertraut gemacht. Die virtuellen Versuche sollen ein besseres Verständnis des Lehrstoffs ermöglichen; dies insbesondere vor dem Hintergrund fehlender in den Modulen verankerter realer Praktikumsangebote sowie hoher Studierendenzahlen und hoher generellen Lehrlast der Professur.

Mittels intuitiver Bedienung wird in *VirtuaLab* den Studierenden das Verständnis realer Phänomene der Thermodynamik und deren praktischer Umsetzung in Experimenten vermittelt. Die Umsetzung der interaktiven Arbeitsblätter als virtuelles Analogon zum realen Ablauf erfolgt in der Programmiersprache Python in Verbindung mit Jupyter Notebook oder Plotly Dash. Beide Systeme ermöglichen die Nutzung vorgefertigter Widgets wie Diagramme, Eingabefelder, Schaltflächen und Schieberegler. In Python stehen zudem zahlreiche wissenschaftliche Bibliotheken für Stoffdatenberechnung, Numerik etc. zur Verfügung.

Der Aufbau der interaktiven Arbeitsblätter orientiert sich dabei am Ablauf realer Experimente. Nach einem Theorieteil, der die grundlegenden Begriffe und Abläufe thermodynamischer Versuche anhand von Texten, Bildern und Videos erläutert, folgt die eigentliche Durchführung des Experiments mit der Ermittlung der Messwerte. Das Experiment wird mit der Auswertung und Fehlerbetrachtung abgeschlossen.

Exemplarisch soll das Vorgehen anhand eines typischen thermodynamischen Praktikumsversuches – Ermittlung der Verbrennungsenthalpie – gezeigt werden.

2. ERARBEITUNG DES PRAKTIKUMSVERSUCHS VERBRENNUNGSENTHALPIE

2.1. Didaktisches Konzept

Die Umsetzung des realen Experimentes in die virtuelle Realität basiert auf der Adaption des Ablaufs eines realen Praktikumsversuches. Diese Reihenfolge ist folgendermaßen gegeben: Theorie erarbeiten und Antestat absolvieren, experimenteller Aufbau, Durchführung mit Messdatenerfassung, Auswertung und Fehlerbetrachtung.

Der erste Schritt sieht eine eigenständige Vorbereitung des theoretischen Hintergrunds durch die Studierenden vor. Dieses eigenständig erarbeitete Wissen wird in der Realität durch ein Praktikumsantestat abgeprüft und soll zur generellen Durchführung des Praktikumsversuches befähigen. Dieser erste Schritt wird im virtuellen Experiment durch ein Eingangstestat in OPAL/ONYX als Fragenkatalog umgesetzt. In Abbildung 1 ist die erste Seite des Tests exemplarisch veranschaulicht.

Im Test werden verschiedene Aufgabenformate von OPAL/ONYX genutzt. Hier fließen die Erfahrungen der letzten Jahre in die Erstellung von Online-Assessments ein. Im dargestellten Beispiel werden die wesentlichen theoretischen Hintergründe zur Verbrennungsenthalpie abgefragt. Hier handelt es sich um Grundlagen (Kalorimeter und Energieumsatz bei chemischen Reaktionen). Wird eine Frage nicht ausreichend beantwortet, erfolgt ein motivierender Hinweis auf weiterführende Literatur oder das Vorlesungsskript.

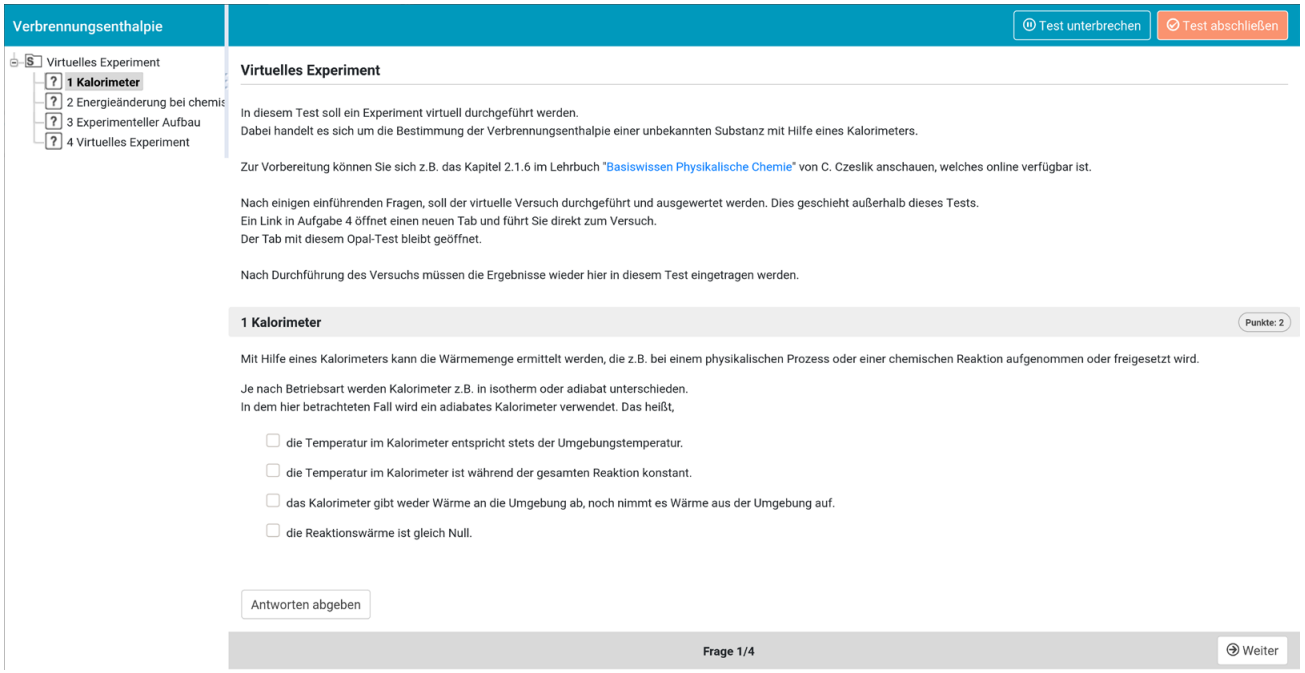
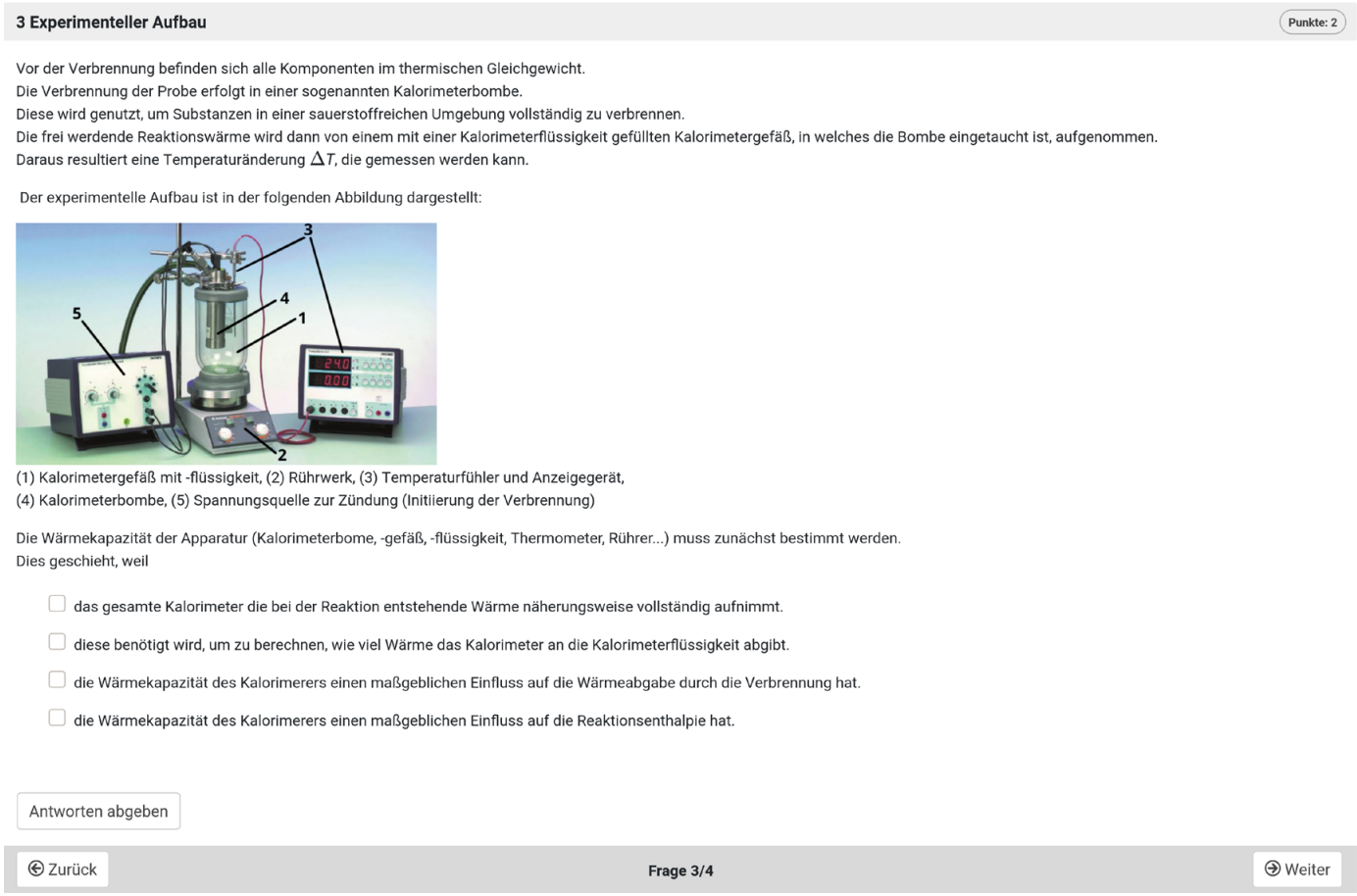


Abb. 1: Eingangstest zur theoretischen Vorbereitung des virtuellen Versuches

Zweiter Schritt eines realen Experimentes ist die Versuchsvorbereitung mit einer detaillierten Bedienungsanleitung (je nach Art des Versuches). Dies dient neben dem reproduzierbaren Ablauf für alle Studierenden auch der Arbeitssicherheit. Dazu wird im Anschluss an den Eingangs-Test in OPAL/ONYX der experimentelle Ablauf anhand von Beschreibungen und Fotos des realen Experimentes erläutert. In Abbildung 2 ist dieser Teil des Versuchs veranschaulicht.

Alle Einzelteile des realen Versuchsstandes werden erläutert und in ihrer Funktionsweise vorgestellt. Sollten im Verlauf eines Versuches chemische Substanzen zur Anwendung kommen, so werden dazu Datenblätter mit Sicherheitshinweisen berücksichtigt. Im vorliegenden Beispiel ist dies nicht der Fall.



3 Experimenteller Aufbau Punkte: 2

Vor der Verbrennung befinden sich alle Komponenten im thermischen Gleichgewicht.
Die Verbrennung der Probe erfolgt in einer sogenannten Kalorimeterbombe.
Diese wird genutzt, um Substanzen in einer sauerstoffreichen Umgebung vollständig zu verbrennen.
Die frei werdende Reaktionswärme wird dann von einem mit einer Kalorimeterflüssigkeit gefüllten Kalorimetergefäß, in welches die Bombe eingetaucht ist, aufgenommen.
Daraus resultiert eine Temperaturänderung ΔT, die gemessen werden kann.

Der experimentelle Aufbau ist in der folgenden Abbildung dargestellt:

(1) Kalorimetergefäß mit -flüssigkeit, (2) Rührwerk, (3) Temperaturfühler und Anzeigegerät,
(4) Kalorimeterbombe, (5) Spannungsquelle zur Zündung (Initiierung der Verbrennung)

Die Wärmekapazität der Apparatur (Kalorimeterbome, -gefäß, -flüssigkeit, Thermometer, Rührer...) muss zunächst bestimmt werden.
Dies geschieht, weil

- ☐ das gesamte Kalorimeter die bei der Reaktion entstehende Wärme näherungsweise vollständig aufnimmt.
- ☐ diese benötigt wird, um zu berechnen, wie viel Wärme das Kalorimeter an die Kalorimeterflüssigkeit abgibt.
- ☐ die Wärmekapazität des Kalorimerers einen maßgeblichen Einfluss auf die Wärmeabgabe durch die Verbrennung hat.
- ☐ die Wärmekapazität des Kalorimerers einen maßgeblichen Einfluss auf die Reaktionsenthalpie hat.

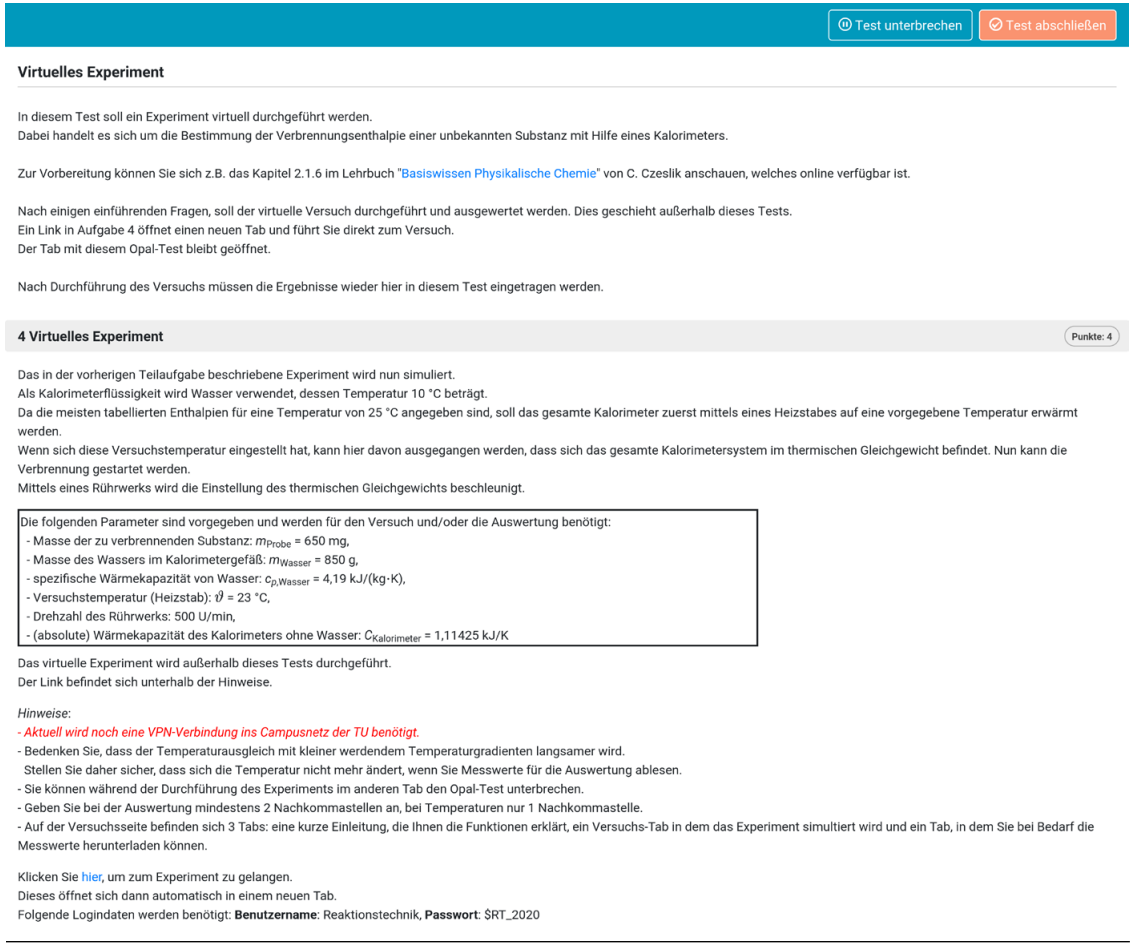
Antworten abgeben

Zurück | Frage 3/4 | Weiter

Abb. 2: Experimentelle Versuchsbeschreibung

Nach diesen zwei vorbereitenden Schritten erfolgt eine Weiterleitung zum virtuellen Experiment. Aufgrund unserer Erfahrungen mit Aufgabenformaten in OPAL/ONYX war bereits bei der Planung des virtuellen Versuches klar, dass die vorhandenen Möglichkeiten in OPAL/ONYX nicht ausreichend sind, um ein virtuelles Experiment umzusetzen. Daher wurde das virtuelle Experiment von Beginn an in Python/Jupyter programmiert.

Den Studierenden wird zum Starten des virtuellen Versuches ein Link bereitgestellt. In Abbildung 3 ist dieser Schritt veranschaulicht. Zu Beginn erfolgt die Angabe der experimentellen Bedingungen (Temperatur, spezifische Wärmekapazität, usw.), die variabel einstellbar ist. Danach folgen einige Durchführungshinweise.



Test unterbrechen | Test abschließen

Virtuelles Experiment

In diesem Test soll ein Experiment virtuell durchgeführt werden.
Dabei handelt es sich um die Bestimmung der Verbrennungsenthalpie einer unbekannten Substanz mit Hilfe eines Kalorimeters.

Zur Vorbereitung können Sie sich z.B. das Kapitel 2.1.6 im Lehrbuch "Basiswissen Physikalische Chemie" von C. Czeslik anschauen, welches online verfügbar ist.

Nach einigen einführenden Fragen, soll der virtuelle Versuch durchgeführt und ausgewertet werden. Dies geschieht außerhalb dieses Tests.
Ein Link in Aufgabe 4 öffnet einen neuen Tab und führt Sie direkt zum Versuch.
Der Tab mit diesem Opal-Test bleibt geöffnet.

Nach Durchführung des Versuchs müssen die Ergebnisse wieder hier in diesem Test eingetragen werden.

4 Virtuelles Experiment Punkte: 4

Das in der vorherigen Teilaufgabe beschriebene Experiment wird nun simuliert.
Als Kalorimeterflüssigkeit wird Wasser verwendet, dessen Temperatur 10 °C beträgt.
Da die meisten tabellierten Enthalpien für eine Temperatur von 25 °C angegeben sind, soll das gesamte Kalorimeter zuerst mittels eines Heizstabes auf eine vorgegebene Temperatur erwärmt werden.
Wenn sich diese Versuchstemperatur eingestellt hat, kann hier davon ausgegangen werden, dass sich das gesamte Kalorimetersystem im thermischen Gleichgewicht befindet. Nun kann die Verbrennung gestartet werden.
Mittels eines Rührwerks wird die Einstellung des thermischen Gleichgewichts beschleunigt.

Die folgenden Parameter sind vorgegeben und werden für den Versuch und/oder die Auswertung benötigt:
- Masse der zu verbrennenden Substanz: m_{Probe} = 650 mg,
- Masse des Wassers im Kalorimetergefäß: m_{Wasser} = 850 g,
- spezifische Wärmekapazität von Wasser: $c_{p,Wasser}$ = 4,19 kJ/(kg·K),
- Versuchstemperatur (Heizstab): ϑ = 23 °C,
- Drehzahl des Rührwerks: 500 U/min,
- (absolute) Wärmekapazität des Kalorimeters ohne Wasser: $C_{Kalorimeter}$ = 1,11425 kJ/K

Das virtuelle Experiment wird außerhalb dieses Tests durchgeführt.
Der Link befindet sich unterhalb der Hinweise.

Hinweise:
- *Aktuell wird noch eine VPN-Verbindung ins Campusnetz der TU benötigt.*
- Bedenken Sie, dass der Temperaturausgleich mit kleiner werdendem Temperaturgradienten langsamer wird. Stellen Sie daher sicher, dass sich die Temperatur nicht mehr ändert, wenn Sie Messwerte für die Auswertung ablesen.
- Sie können während der Durchführung des Experiments im anderen Tab den Opal-Test unterbrechen.
- Geben Sie bei der Auswertung mindestens 2 Nachkommastellen an, bei Temperaturen nur 1 Nachkommastelle.
- Auf der Versuchsseite befinden sich 3 Tabs: eine kurze Einleitung, die Ihnen die Funktionen erklärt, ein Versuchs-Tab in dem das Experiment simultiert wird und ein Tab, in dem Sie bei Bedarf die Messwerte herunterladen können.

Klicken Sie hier, um zum Experiment zu gelangen.
Dieses öffnet sich dann automatisch in einem neuen Tab.
Folgende Logindaten werden benötigt: **Benutzername**: Reaktionstechnik, **Passwort**: $RT_2020

Abb. 3: Start des virtuellen Versuches

Der Versuch startet auf dem externen Server im ersten interaktiven Arbeitsblatt nochmals mit einer Versuchsbeschreibung, die vor allem die digitalen Bedienelemente erläutert. Dazu gehören Drehzahlstellschraube, Temperatureinstellung, Masse. Abbildung 4 gibt einen Eindruck von diesem Versuchsschritt. Die Studierenden können damit in Echtzeit die Auswirkungen veränderter Eingangsgrößen auf das Versuchsergebnis testen. Dies stellt im Vergleich zum realen Versuch, der zeitlich und räumlich begrenzt ist, einen erheblichen Vorteil dar.

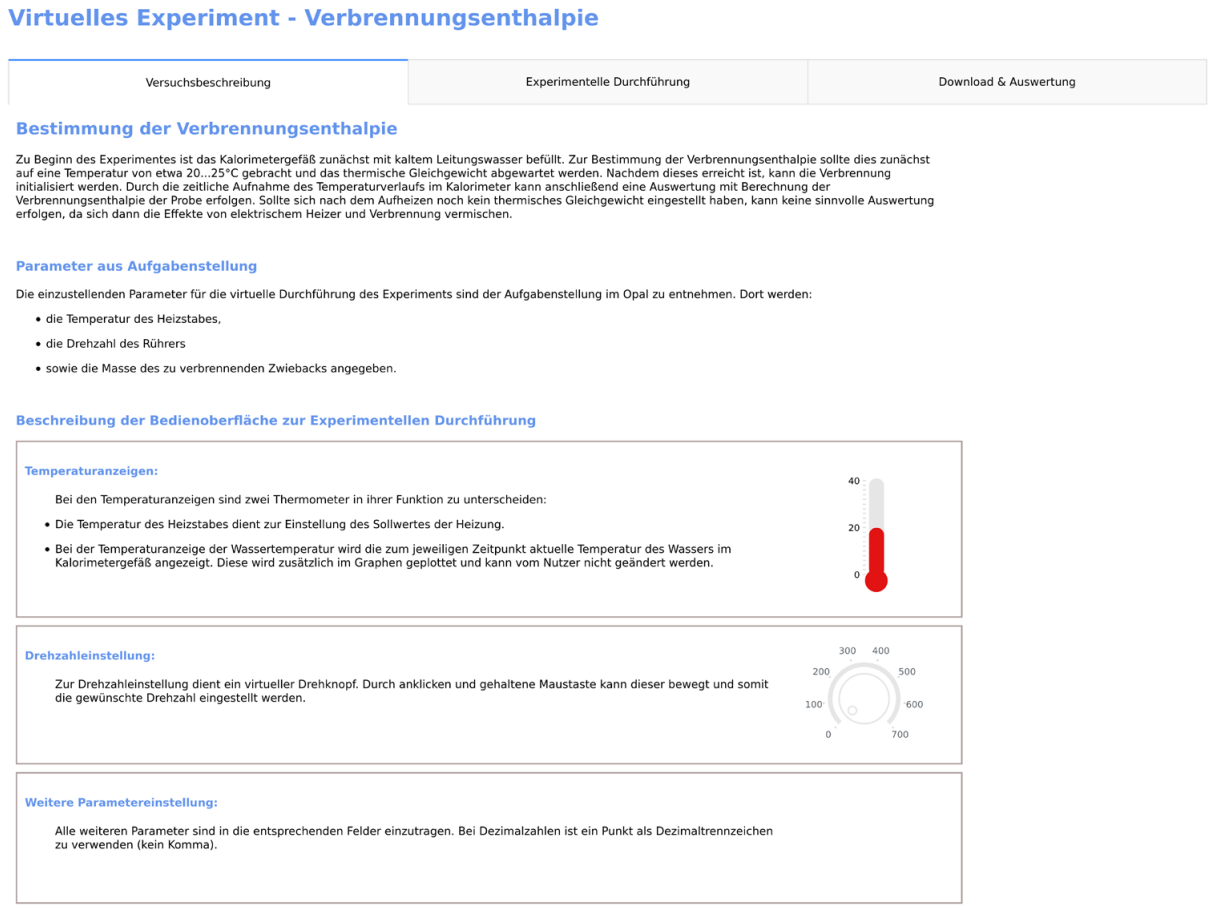


Abb. 4: Versuchsbeschreibung mit Erläuterung der Bedienelemente

Das zweite interaktive Arbeitsblatt dient der experimentellen virtuellen Versuchsführung. In Echtzeit werden dabei entsprechend den gewählten Anfangsbedingungen Messwerte auf dem Bildschirm generiert. Dies entspricht dem Ablesen von sich verändernden Messwerten (hier Temperaturen) während eines realen Versuches. Abbildung 5 zeigt zwei Momentaufnahmen aus einem solchen Versuchsablauf. Wie im realen Versuch muss der virtuelle Versuch bis zur Einstellung des thermischen Gleichgewichtes durchgeführt werden. Je nach gewählten Randbedingungen (Temperatur, Masse, Drehgeschwindigkeit des Rührers) kann dies zu unterschiedlichen Resultaten führen.

Abb. 5: Momentaufnahmen zu verschiedenen Zeitpunkten des Versuches

Nach Beendigung des Versuches steht ein drittes interaktives Aufgabenblatt zur Verfügung und ermöglicht die Sicherung der experimentellen Daten. Abbildung 6 veranschaulicht diesen Arbeitsschritt.

Mit den Messdaten kann basierend auf der theoretischen Vorbereitung die Versuchsauswertung gestartet werden. Die Versuchsergebnisse können anschließend in das OPAL/ONYX-Formular eingegeben werden und stehen für die Professur als abrechenbare Ergebnisse zur Verfügung. Durch die Vorgabe unterschiedlicher Startwerte kann bei einer größeren Gruppe auch geprüft werden, ob der Versuch tatsächlich eigenständig durchgeführt wurde. In Abbildung 7 ist dieser Fragenteil abgebildet.

Abb. 6. Messdatenerfassung

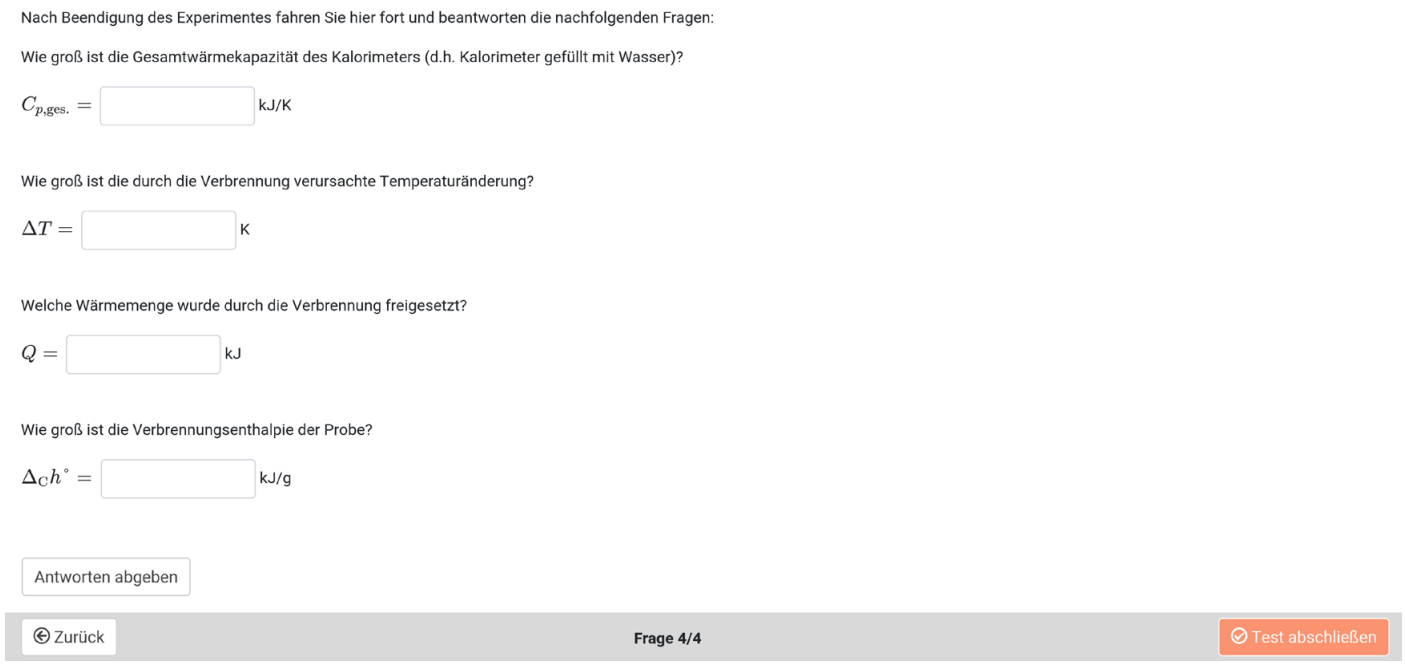


Abb. 7: Versuchsauswertung und Eingabe der Ergebnisse

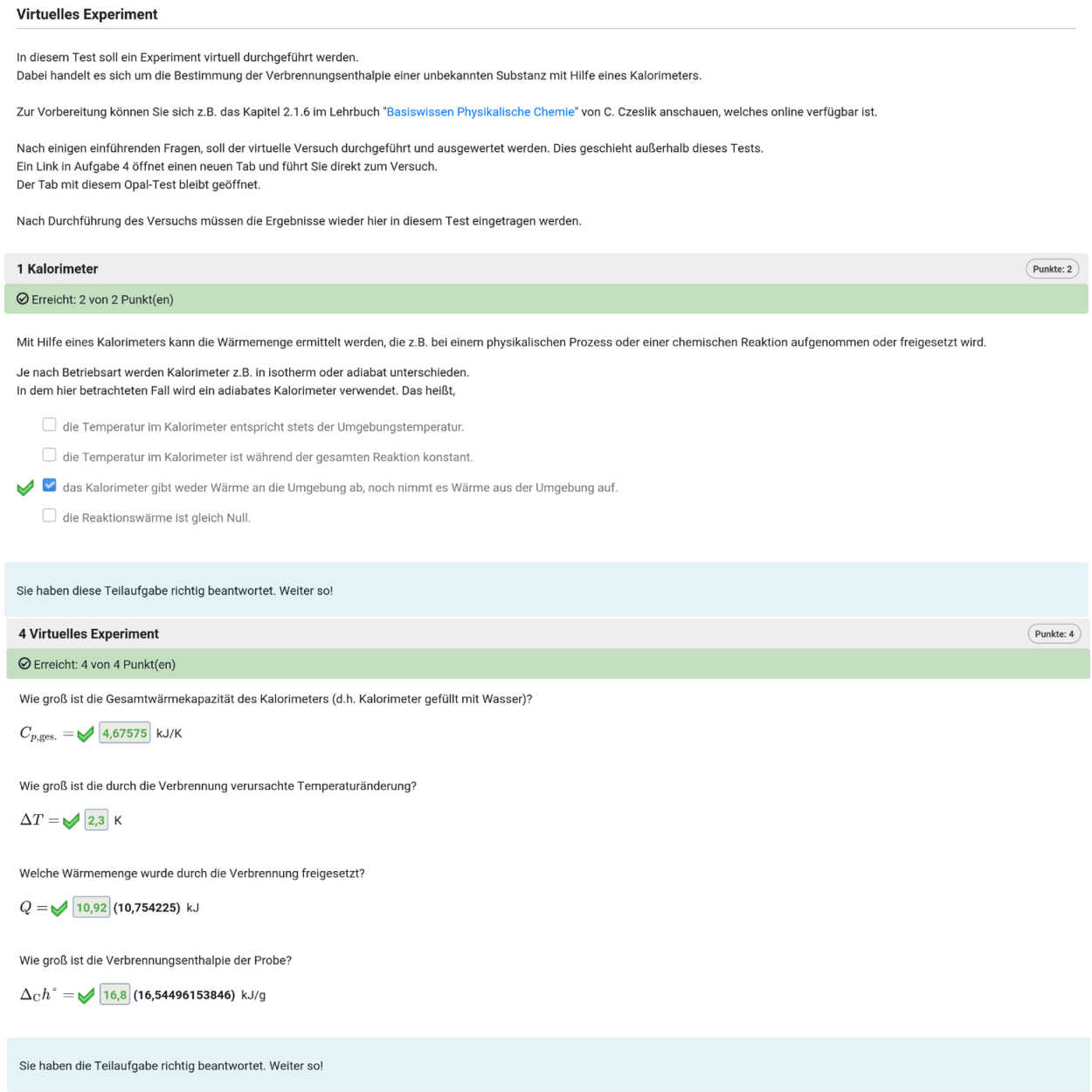
2.2. Technische Umsetzung

Die technische Umsetzung des Antestats und die Rückmeldung der Versuchsergebnisse erfolgt in OPAL/ONYX. Das virtuelle Experiment selbst wird über einen Link extern gestartet und besteht aus interaktiven Arbeitsblättern. Die Umsetzung der interaktiven Arbeitsblätter erfolgt in der Programmiersprache Python in Verbindung mit Jupyter Notebook oder Plotly Dash. Beide Systeme ermöglichen die Nutzung vorgefertigter Widgets wie Diagramme, Eingabefelder, Schaltflächen und Schieberegler. In Python stehen zudem zahlreiche wissenschaftliche Bibliotheken für Stoffdatenberechnung, Numerik etc. zur Verfügung.

Der Programmieraufwand für eine derartige Umsetzung real/virtuell ist im Vergleich zu den uns bekannten OPAL/ONYX Aufgabentypen um ein Vielfaches höher. Nachteilig wirken sich hier die oftmals kurzen Vertragszeiten von Studentischen Hilfskräften (SHK) im Projektzeitraum aus. Die kurzen Vertragszeiten und die Bezahlung als SHK stehen im Kontrast zu einem erhöhten Einarbeitungsaufwand und der Komplexität. Ohne die massive Mitbeteiligung der wissenschaftlichen Mitarbeiter aus der Professur wäre die Realisierung nicht möglich gewesen. Für eine nachhaltige Umsetzung derartiger digitaler Konzepte ist mehr notwendig als zeitlich und finanziell begrenzte Projketförderung!

3. ERGEBNISSE DER ERPROBUNGSPHASE

Der Versuch wurde erstmals zu Beginn des Sommersemesters 2020 im Rahmen der Vorlesung



Virtuelles Experiment

In diesem Test soll ein Experiment virtuell durchgeführt werden.
Dabei handelt es sich um die Bestimmung der Verbrennungsenthalpie einer unbekannten Substanz mit Hilfe eines Kalorimeters.

Zur Vorbereitung können Sie sich z.B. das Kapitel 2.1.6 im Lehrbuch "Basiswissen Physikalische Chemie" von C. Czeslik anschauen, welches online verfügbar ist.

Nach einigen einführenden Fragen, soll der virtuelle Versuch durchgeführt und ausgewertet werden. Dies geschieht außerhalb dieses Tests.
Ein Link in Aufgabe 4 öffnet einen neuen Tab und führt Sie direkt zum Versuch.
Der Tab mit diesem Opal-Test bleibt geöffnet.

Nach Durchführung des Versuchs müssen die Ergebnisse wieder hier in diesem Test eingetragen werden.

1 Kalorimeter Punkte: 2

Erreicht: 2 von 2 Punkt(en)

Mit Hilfe eines Kalorimeters kann die Wärmemenge ermittelt werden, die z.B. bei einem physikalischen Prozess oder einer chemischen Reaktion aufgenommen oder freigesetzt wird.

Je nach Betriebsart werden Kalorimeter z.B. in isotherm oder adiabat unterschieden.
In dem hier betrachteten Fall wird ein adiabates Kalorimeter verwendet. Das heißt,

- [ ] die Temperatur im Kalorimeter entspricht stets der Umgebungstemperatur.
- [ ] die Temperatur im Kalorimeter ist während der gesamten Reaktion konstant.
- [x] das Kalorimeter gibt weder Wärme an die Umgebung ab, noch nimmt es Wärme aus der Umgebung auf.
- [ ] die Reaktionswärme ist gleich Null.

Sie haben diese Teilaufgabe richtig beantwortet. Weiter so!

4 Virtuelles Experiment Punkte: 4

Erreicht: 4 von 4 Punkt(en)

Wie groß ist die Gesamtwärmekapazität des Kalorimeters (d.h. Kalorimeter gefüllt mit Wasser)?

$C_{p,\text{ges.}} =$ 4,67575 kJ/K

Wie groß ist die durch die Verbrennung verursachte Temperaturänderung?

$\Delta T =$ 2,3 K

Welche Wärmemenge wurde durch die Verbrennung freigesetzt?

$Q =$ 10,92 **(10,754225)** kJ

Wie groß ist die Verbrennungsenthalpie der Probe?

$\Delta_C h^\circ =$ 16,8 **(16,54496153846)** kJ/g

Sie haben die Teilaufgabe richtig beantwortet. Weiter so!

Abb. 8. Ausschnitte aus dem Bearbeitungsprotokoll des Versuches

„Reaktionstechnik für Energietechniker“ bereitgestellt. Die Bearbeitung des Versuches ist ein Angebot zum erweiterten Selbststudium und steht zunächst ohne zeitliche Einschränkung zur Nutzung bereit.

Abbildung 8 zeigt zwei Ausschnitte aus einem Ergebnisprotokoll vom 12.5.2020. Es sind hier exemplarisch die Ergebnisse aus dem Eingangstest und der Rückübermittlung der finalen Versuchsergebnisse dargestellt. In OPAL ist nachzuvollziehen, dass durchschnittlich zwei Versuche durch die Studierenden absolviert werden.

Bislang sind keine Probleme im Ablauf aufgetreten. Spezifische Rückmeldungen über ein Feedback wurden aufgrund der Kürze der Zeit nicht abgefragt. Dies ist jedoch für das Wintersemester in größerem Umfang geplant.

In Präsenzzeiten der Vorlesung wird für besonders interessierte Studierende die Möglichkeit geboten, den Versuch auch real durchzuführen. Diese Möglichkeit ist jedoch aufgrund des großen Aufwands bei fehlendem Personal nur in reduzierter Anzahl zu realisieren, soll jedoch frühzeitig motivierte Studierende an den Lehrstuhl binden.

4. RESÜMEE

Mit dem Projekt *VirtuaLab* konnte gezeigt werden, dass auch komplexe thermodynamische Praktikumsversuche virtuell realisiert werden können. Die Umsetzung ist im Vergleich zu den bekannten Aufgabenformaten aus ONYX wesentlich zeitaufwendiger und erfordert erheblichen Programmieraufwand. Insgesamt trägt dieses neue Element jedoch nachweislich zu einer verbesserten Stoffvermittlung thermodynamischer Zusammenhänge bei und ermöglicht einen Blick auf bislang nicht mögliche Lernformen, wie Praktika. Der Nutzen (im Vergleich zum Aufwand) wird sich erst in den nächsten Jahren zeigen, wenn diese virtuellen Versuche wiederholt in der Lehre eingesetzt werden.

5. DANKSAGUNG

Herr Alexander Zyla hat als studentische Hilfskraft im Rahmen des Projektes für 5 Monate sehr engagiert Teile zur Erarbeitung des virtuellen Versuches beigetragen. Unter massiver Anleitung von Herrn Pinnau (Programmierung) und Herrn Lorenz (fachliche Bearbeitung) hat er die ersten Versuchselemente in Python umgesetzt. Die finale Version des jetzigen Versuches ist von Herrn Pinnau grundlegend überarbeitet und vor allem mit weiteren Elementen (VPN-Zugang, Serveranbindung, komplette Änderung des Versuchsablaufes) ergänzt worden.

LITERATUR

Freudenreich, Ronny; Breitkopf Cornelia; Kretzschmar, Hans-Joachim (2016). E-Assess-MINT - Elektronische Übungen im MINT-Bereich, in: Kawalek, Jürgen; Herning, Klaus; Schuster, Enrico (Hsrg.): Tagungsband zum Workshop on eLearning 2016 - Hochschule Zittau/Görlitz, Görlitz, 49-58.

Breitkopf, Cornelia; Kretzschmar, Hans-Joachim; Köhler, Thomas (2015). thermoE - Entwicklung eines online-basierten E-Assessments in ONYX am Beispiel der Technischen Thermodynamik. Projektabschlussbericht - Vorhaben zur Entwicklung des E-Learning in strategischen Handlungsfeldern im Rahmen der Initiative „Bildungsportal Sachsen“ 2013/14, in: Schulz, Jens; Brenneke, Katrin & Günter, F. (Hrsg.): Bericht zur Zielvereinbarung 2014 zwischen dem Arbeitskreis E-Learning der Landesrektorenkonferenz Sachsen und dem Sächsischen Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst, 159-184.

NACHTRAG

Das aufgebaute VirtuaLab als interaktive Lernplattform für Praktika der Thermodynamik erhielt einen Lehrpreis 2020 für den Bereich Ingenieurwissenschaften. Ausgelobt wurde der Preis von der Gesellschaft von Freunden und Förderern der TU Dresden e. V. (GFF E. V.)

Die Vergabe des diesjährigen Lehrpreises der GFF e.V. trägt den besonderen Herausforderungen der Corona-Pandemie Rechnung und würdigt herausragende Beispiele auf dem Gebiet der virtuellen Lehre.