
Wissenschaftliche Hausarbeit im Rahmen der Ersten Staatsprüfung für
das Lehramt an Gymnasien im Fach Physik, eingereicht der Hessischen
Lehrkräfteakademie - Prüfungsstelle Darmstadt.

Thema: Integration digitaler Kompetenzen im Kompetenzbereich
Simulation und Modellierung im Demonstrationspraktikum
Physik der TU Darmstadt

Verfasser: Felix Nelson Wiening, Wienerstraße 40, 64287 Darmstadt

Gutachterin: Dr. Juliane Wessely

Wissenschaftliche Hausarbeit in der Physik

**Integration digitaler Kompetenzen im
Kompetenzbereich Simulation und Modellierung im
Demonstrationspraktikum Physik der TU Darmstadt**

Verfasser: Felix Wiening (2615639)

Betreuerin: Dr. Juliane Wessely

Datum: 21. Juli 2021



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vorwort

Um auf eine geschlechtergerechte Sprache wertzulegen, wurde bei Verwendung des Wortes Schüler immer von Schüler und Schülerin gesprochen und mit SuS abgekürzt.

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Materialien und Fragebögen sind als Anhang auf einer CD beigelegt. Eine Auflistung ist unter dem Kapitel Anhang zu finden.

Falls nicht anders angegeben, sind die Abbildungen in dieser Arbeit eigenständig erstellt.

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	IV
1. EINLEITUNG	2
2. MODELLIERUNG UND SIMULATION.....	4
2.1. Der Begriff des Modells	4
2.2. Computergestützte Modelle.....	6
2.3. Modellieren im Allgemeinen	7
2.4. Modellieren im digitalen Kontext.....	8
2.5. Simulation im digitalen Kontext	8
2.6. Bedeutung von Simulation und Modellierung im Physikunterricht	9
2.7. Modellieren und Simulieren im Lehramtsstudium	11
3. DER MODELLGAS-VERSUCH ALS LERNUMGEBUNG	13
3.1. Der Modellgas-Versuch.....	13
3.2. Geschwindigkeitsverteilung.....	14
3.2.1. Physikalische Grundlagen.....	14
3.2.2. Versuchsbeschreibung.....	16
3.3. Barometrische Höhenformel	18
3.3.1. Physikalische Grundlagen.....	18
3.3.2. Versuchsbeschreibung.....	19
4. GESTALTUNG DER LERNUMGEBUNG	22
4.1. Wahl der Modellbildungs-Software.....	22
4.1.1. Erkenntnisse aus der physikdidaktischen Forschung	22
4.1.2. Institutionelle Gegebenheiten der Veranstaltung.....	23
4.1.3. Inhaltliche Gegebenheiten des Modellgas-Versuchs.....	24
4.2. Interaktive Simulationen als Mittel zur Kompetenzentwicklung.....	25
4.3. Modellbildung mit Python.....	27
5. SIMULATION DER GESCHWINDIGKEITSVERTEILUNG	30
5.1. Übersicht des Programms.....	30
5.2. Das mathematische Modell	31
5.3. Funktionen des Programms.....	35
5.3.1. Parameter der Simulation.....	36
5.3.2. Animation der Teilchenbewegung.....	38
5.3.3. Die Geschwindigkeitsverteilung	39
5.4. Limitierungen des Simulationsmodells	42
5.5. Vergleich zwischen Simulation und Versuch	45
6. ERSTE ERPROBUNG.....	48
6.1. Forschungsmethode	48

6.2. Ablauf	50
6.3. Begründung der Forschungsmethode	51
6.4. Ergebnisse und Auswertung	52
6.4.1. Kompetenzentwicklung.....	52
6.4.2. Einfluss der Ergebnissicherung und Funktionsweise des Programms 55	
6.4.3. Bezug zum Modellgas-Versuch	56
6.4.4. Interesse und Motivation	56
6.4.5. Niveauangemessenheit	57
7. SIMULATION DER BAROMETRISCHEN HÖHENFORMEL	58
7.1. Übersicht des Programms	58
7.2. Mathematisches Modell	59
7.3. Funktionen des Programms	62
7.4. Parameter der Simulation	62
7.4.1. Animation der Teilchenbewegung.....	63
7.4.2. Darstellung der höhenabhängigen Teilchenzahl.....	64
7.4.3. Vergleich der Simulationsergebnisse.....	66
7.5. Limitierungen des Simulations-Modells	67
7.6. Vergleich zwischen Simulation und Versuch	70
8. ZWEITE ERPROBUNG	71
8.1. Forschungsmethode	71
8.2. Ablauf 72	
8.3. Begründung der Forschungsmethode	73
8.4. Ergebnisse 74	
8.4.1. Erkenntnisse für die Gestaltung von simulationsbasierten Lernumgebungen	74
8.4.2. Vorteile der Simulation als Methode der Erkenntnisgewinnung.....	76
8.4.3. Limitierung des Lehrens mit Simulationen	77
9. FAZIT	78
10. LITERATURVERZEICHNIS	80
10.1. Abbildungsverzeichnis	81
11. ANHANG	83
12. SELBSTSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	84

1. Einleitung

Die Digitalisierung hat in den letzten Jahren Einzug in viele unserer Lebensbereiche gefunden und verändert zunehmend das Leben und Arbeiten. Sie bietet auch im Schulbereich eine Vielzahl neuer Möglichkeiten Prozesse der Erkenntnisgewinnung im Unterricht neu zu gestalten. Aktuell zeigt die bestehende Corona-Pandemie eindrücklich die Notwendigkeit und die Chance digitaler Formate für die Aufrechterhaltung des Schulunterrichts auf. Computergestützte Verfahren bieten Ansatzmöglichkeiten den Schulunterricht anschaulicher und interaktiver zu gestalten, aber gehören mittlerweile auch in vielen Berufsfeldern zu wichtigen Basiskompetenzen.

Das computergestützte Arbeiten kann SuS zum Beispiel im Physikunterricht individuell den Zugang zu komplexen physikalischen und mathematischen Problemen eröffnen, da sich dadurch komplizierte Rechnungen in den Hintergrund verlagern lassen. SuS können sich damit schon frühzeitig mit realistischen, alltagsnahen Problemen beschäftigen, die, ohne solcher Verfahren, die mathematischen Fähigkeiten der SuS weit übersteigen würden. Die dafür notwendige Übersetzung von mathematischen Modellen in computergestützte Modelle erfordert jedoch ihrerseits neue Kompetenzen im Bereich der Modellierung und Simulation, sowohl von Seiten des Schülers, als auch von Seiten der Lehrkraft. Bei der konkreten Umsetzung kommt den Lehrkräften eine entscheidende Rolle zu. Wichtig hierbei ist eine bereits im Rahmen der Lehrkräftebildung vermittelte Kenntnis zu Inhalten der methodisch-didaktischen Umsetzung digitaler Lernformate.

Um dem durch die Digitalisierung wachsenden Anforderungsprofil an die Lehrkräfte gerecht zu werden und neue Wege der Erkenntnisgewinnung im Physikunterricht aufzuzeigen, wurde in dieser Arbeit eine Lernumgebung zur Förderung der digitalen Kompetenzen von Lehramtsstudierenden, im Bereich Simulation und Modellierung im Fach Physik ausgearbeitet.

Diese Lernumgebung soll in den Rahmen des Demonstrationspraktikums der Technischen Universität Darmstadt eingebunden werden. Es handelt sich um

eine Veranstaltung die am Ende des Lehramtsstudiums im Fach Physik stattfindet und in der sich Studierende intensiv mit Aufbau, Durchführung und Präsentation von physikalischen Demonstrationsexperimenten beschäftigen. Aus einer Reihe von Versuchen wurde der Modellgas-Versuch als Grundlage für die Gestaltung der Lernumgebung ausgewählt. An den Versuch anknüpfend, wurden zwei Simulations-Programme entwickelt, mit denen Lehramtsstudierenden an zwei Erprobungen gearbeitet haben. Dabei wurde untersucht, ob das Arbeiten mit den Programmen die digitalen Kompetenzen der Lehramtsstudierenden im Bereich der Simulation und Modellierung fördern kann und sich daraus didaktische Prinzipien für die Gestaltung einer Lernumgebung ergeben. Die Ergebnisse dieser Erprobungen werden in dieser wissenschaftlichen Hausarbeit dargestellt. Ziel ist es, das Lehramtsstudium längerfristig so zu gestalten, dass den Studierenden eine Möglichkeit zur Erweiterung ihrer Kompetenzen im Bereich der computergestützten Simulation und Modellierung bereitgestellt wird.

Zunächst werden im zweiten Kapitel die Kompetenzen des Modellierens und Simulierens im Allgemeinen, sowie im digitalen Kontext beschrieben und die Bedeutung dieser Kompetenzen im hessischen Bildungsapparat aufgezeigt.

Im dritten Kapitel wird der Modellgas-Versuch als Ausgangslage für die Gestaltung von Lernsituationen genauer beleuchtet. Dabei wird neben den physikalischen Grundlagen des Versuchs auch die Durchführung skizziert. Ziel davon ist es, die Entscheidungen, die auf Grundlage des Versuchs in die Gestaltung der Lernumgebung geflossen sind, nachvollziehbar zu machen.

Ausgehend vom physikalischen Inhalt des Versuchs und den institutionellen Gegebenheiten der Veranstaltung, wird im vierten Kapitel die Gestaltung einer Lernumgebung diskutiert. Die Wahl einer angemessenen Modellbildungs-Software ist ein wichtiger Schritt bei der Übersetzung physikalischer Modelle in computergestützte Modelle und wird daher in diesem Zusammenhang intensiv beleuchtet.

Im fünften Kapitel wird das Simulations-Programm zur Geschwindigkeitsverteilung vorgestellt. Dabei wird neben den Funktionen auch das mathematische Modell beschrieben, auf dessen Grundlage die Simulation entwickelt wurde.

Anschließend wird im sechsten Kapitel die Erprobung des Simulations-Programms zur Geschwindigkeitsverteilung beschrieben und die daraus gewonnenen Ergebnisse vorgestellt und diskutiert.

Nach der ersten Erprobung wurde ein weiteres Simulations-Programm zur Barometrischen Höhenformel entwickelt. Der Aufbau und die Funktionen des Programms werden im siebten Kapitel beschrieben. Die Erprobung des zweiten Programms wird im achten Kapitel beschrieben.

Im neunten Kapitel erfolgt der Abschluss der Arbeit in Form eines Fazits.

2. Modellierung und Simulation

In diesem Kapitel soll auf die Bedeutung der Begriffe Modellierung und Simulation im Allgemeinen und im digitalen Kontext, sowie unter dem Gesichtspunkt des Kompetenzmodells, eingegangen werden. Da sich diese Arbeit mit der Gestaltung des Lehramtsstudiums befasst, werden die im Text beschriebenen Erkenntnisse auch regelmäßig auf den Physikunterricht projiziert.

Um den Prozess des Modellierens beschreiben zu können und dessen Bedeutung in der physikalischen Erkenntnisgewinnung zu begreifen, soll zunächst auf den vielfältig eingesetzten Begriff des Modells eingegangen werden.

2.1. Der Begriff des Modells

Modelle begegnen uns in unterschiedlichen Erscheinungsformen und Situationen. Es handelt sich dabei keinesfalls um rein wissenschaftliche Konstrukte. Sie begegnen uns ebenso in der Alltagswelt und stellen sogar, in Form von kognitiven Modellen, die Grundlage für soziale Interaktionen dar (Landriscina, 2013, S. 13). Der Begriff des Modells besitzt dementsprechend eine enorme Bedeutungsvielfalt. Grundsätzlich lässt sich jedoch festhalten, dass es sich bei Modellen stets um vereinfachte Ab- bzw. Nachbildungen oft realer Systeme handelt. Kircher beschreibt ein solch zugrundeliegendes System als Modellobjekt (Kircher, Girwidz, Häußler, 2015, S. 786). Die Abbildung, also das Modell, stellt dabei lediglich ein Teil der Eigenschaften des Modellobjekts dar, gleichzeitig kann das Modell aber auch neue Eigenschaften aufweisen, die beim Objekt nicht

zu finden sind (Mikelskis-Seifert, 2010, S.2). Kircher bezeichnet dieses Merkmal eines Modells als Verkürzungsmerkmal und bestimmt es zugleich als wesentliche Voraussetzung eines Modells (Kircher, Girwidz, Häußler, 2015, S.790). Schüler besitzen oftmals nicht die Fähigkeit physikalische Erkenntnisse bzw. Modelle von der realen Erlebniswelt zu unterscheiden. Im Hinblick auf die verkürzte Darstellung von Modellen, ist es daher wichtig, dem naiven Realismus der Schüler zu begegnen und die Unterschiede zum Modellobjekt gemeinsam herauszuarbeiten und zu reflektieren, insbesondere dann, wenn diese schwer ersichtlich oder bewusst verschleiert sind (Mikelskis-Seifert, Thiele, Wünscher, 2005, S. 31).

Spricht man in der Physik von einem Modell, geht man in der Regel entweder von einem gegenständlichen Modell aus, welches als Anschauungsobjekt dient und das Modellobjekt vereinfacht und oft in anderen Maßstäben darstellt oder von einem theoretischen Modell, wie zum Beispiel einem Gedankenmodell oder mathematischem Modell (Schecker, 1998, 22).

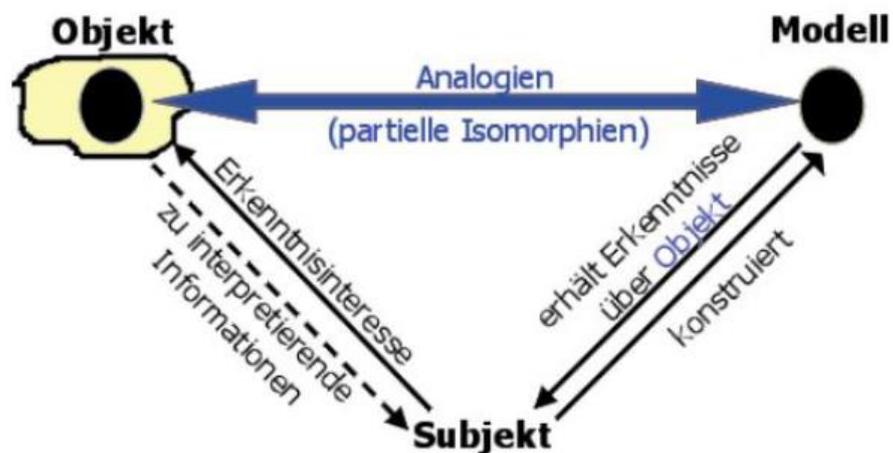


Abbildung 1: Relationsgefüge zwischen Objekt, Modell und Subjekt (Mikelskis-Seifert, 2005)

Um den Begriff des Modells vollständig beschreiben zu können, sollte das Relationsgefüge zwischen Modell M und Modellobjekt O noch um das Modellsubjekt S erweitert werden (vgl. Abbildung 1)

Die Beziehung zwischen Subjekt und Objekt wird in der Regel durch eine Unfähigkeit der unmittelbaren Erkenntnisgewinnung charakterisiert, wodurch die Notwendigkeit eines Modells, als Lern- bzw. Erkenntnisbrücke, klar wird.

Ausgehend von diesem Relationsgefüge definiert Mikelskis den Begriff des Modells wie folgt: „Ein Modell ist ein Gegenstand oder theoretisches Konstrukt, das von einem Subjekt für einen entsprechenden Zweck geschaffen bzw. verwendet wird. Dabei bestehen zwischen bestimmten Eigenschaften des Modells und bestimmten Eigenschaften des präsentierten Objekts Analogien.“ (Mikelskis, 2006, S.128)

In der Regel begegnen wir Hindernissen in der Erkenntnisgewinnung bei Problemen, die sich nicht in den alltäglichen Maßstäben abspielen, also in Szenarien, die Dimensionen weit weg von unserer Körpergröße oder Fortbewegungsgeschwindigkeiten besitzen, in denen wir unser Gefühl für Größen und Abhängigkeiten verlieren (Mikelskis-Seifert, Thiele, Wünscher, 2005, S. 30). Will man zum Beispiel die Eigenschaften von Gasen untersuchen, bewegt man sich gedanklich in mikroskopischen Größenordnungen, die einem kaum vorstellbar sind. Modelle, wie das Modell des idealen Gases, erlauben es wiederum, Vorstellungen von Prozessen innerhalb eines Gases zu vermitteln, die es einem ermöglichen, Aussagen über die Eigenschaften von Gasen zu formulieren. Weitere Beispiele wären quantenmechanische Prozesse, die weit weg der menschlichen Vorstellungskraft liegen oder komplexe Beziehungsgefüge innerhalb von Wettersystemen, die Prognosen ohne weiteres nicht möglich machen. Erst Modelle ermöglichen es uns also die Grenze der direkten Erkennbarkeit zu überschreiten (Mikelskis-Seifert, Thiele, Wünscher, 2005, S. 31).

2.2. Computergestützte Modelle

Durch die zunehmende Rechenleistungsfähigkeit von Computerchips, erlangten computergestützte Modelle in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung. Im physikalischen Kontext handelt es sich dabei um gegenständliche, meist zweidimensionale Modelle, die, auf Grundlage von mathematischen Modellen, eine graphische Oberfläche des zugrundeliegenden Netzwerkes aus physikalischen Begriffen und Beziehungen darstellen (Schecker, 1998, S. 23).

Erstellt werden diese Modelle in der Regel mit Modellbildungssystemen, die dem Nutzenden unterschiedliche Bedienungsmöglichkeiten an die Hand geben. Diese reichen von graphischen Benutzeroberflächen, die dem Nutzenden einen leichten Zugang zur Erstellung von Modellen ermöglichen, bis hin zu textbasierter Eingabe, die eine systemspezifische Syntax verlangt und damit wesentlich mehr Vorkenntnisse in dem Modellbildungssystem erfordert.

2.3. Modellieren im Allgemeinen

Modellierung spielt neben dem Experimentieren eine entscheidende Rolle bei der physikalischen Erkenntnisgewinnung. Dabei beschreibt das Modellieren einen Prozess, der mehr als nur das Erstellen eines Modells umfasst. Die Konstruktion eines Modells ist zwar ein wesentlicher Bestandteil der Modellierung, jedoch wäre eine Reduktion des Begriffs auf dieses Merkmal eine verkürzte Beschreibung. Wichtige Fähigkeiten, die unter die Kompetenz des Modellierens fallen, können erst durch einen vollständigen Blick auf den Prozess ersichtlich werden (van Buuren, 2014, S.76). Dieser umfasst zunächst das Analysieren des Modellobjekts, welches in der Regel komplexe Strukturen besitzt, die im Folgenden auf wesentliche Eigenschaften vereinfacht werden müssen. Diese wesentlichen Eigenschaften gilt es dann in ein Modell zu übersetzen. Das Übersetzen erfordert wiederum spezifische Fähigkeiten, die von der Art des Modells abhängen. Beispielsweise braucht man für das Erstellen einer Modellzeichnung handwerkliche Fähigkeiten und Kenntnisse über bestimmte Konventionen. Wurde das Modell erstellt, müssen interpretierbare Daten generiert werden, die es mit dem Modellobjekt zu vergleichen gilt. Die Interpretation der Daten erfordert ebenfalls spezifische Fähigkeiten vom Nutzenden. Im physikalischen Kontext werden oftmals Diagramme zur Auswertung bestimmter Modelle erstellt, die vom Nutzenden gedeutet werden müssen.

Dieser Prozess (siehe Abbildung 3) des Modellierens wird oft als Kreislauf beschreiben, der mit dem Vergleich zwischen den vom Modell und Modellobjekt den Prozess von neuem einleitet (van Buuren, 2014, S.76).

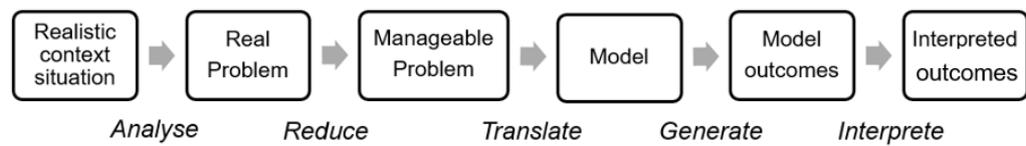


Abbildung 2: Schematische Darstellung vom Prozess des Modellierens (van Buuren, 2014, S.76)

2.4. Modellieren im digitalen Kontext

Naturgesetze die im Physikunterricht erarbeitet und diskutiert werden, sind unter genauerer Betrachtung nur in bestimmten Geltungsbereichen, die durch Bedingungen bzw. Annahmen begrenzt sind, gültig. Damit verlieren viele der im Unterricht erarbeiteten Gesetze ihre Praxisrelevanz.

Durch ihre Rechenleistung, besitzen Computer die Möglichkeit physikalische Modellbildungen zu unterstützen und komplexere Vorgänge zu analysieren, wodurch der Geltungsbereich physikalischer Betrachtungen erweitert werden kann und der Unterricht an Relevanz für alltägliche Probleme gewinnt (Mikelskis, 2006, S.139). Klassische Beispiele aus dem Physikunterricht sind mechanische Probleme, bei denen ideale Systeme betrachtet werden, in denen Reibung vernachlässigt wird, da das Aufstellen von damit verbundenen Bewegungsgleichungen sich den schulmathematischen Mitteln entzieht. Computersimulationen können hierbei die Rechenarbeit übernehmen und die Bearbeitung solcher Fragestellungen im Unterricht ermöglichen.

2.5. Simulation im digitalen Kontext

Wird von Simulationen gesprochen, geht man im wissenschaftlichen bzw. didaktischen Kontext von einer interaktiven Nachbildung eines zu untersuchenden Systems auf Grundlage eines Modells aus (Landriscina, 2013, S. 6). Im digitalen Kontext und im Kontext dieser Arbeit handelt es sich bei dem zugrunde liegenden Modell um ein computergestütztes Modell, welches auf Grundlage eines mathematischen Modells erstellt wurde. Oftmals spricht man dann von Computersimulationen.

Ein wichtiges Merkmal einer Simulation ist die Interaktivität. Sie unterscheidet eine Simulation von einer reinen Animation, bei der dem Nutzenden keine bis kaum Interaktionen ermöglicht werden. Simulationen besitzen hingegen Variationsmöglichkeiten, gegeben durch Parameter und Randbedingungen, die vom Nutzenden verändert werden können und die das Simulationsergebnis beeinflussen. Eine scharfe Trennung zwischen Animationen und Simulationen ist jedoch teilweise nicht möglich, da Simulationssysteme oftmals ihre Ergebnisse mit einfachen Grafiken animieren und somit Mischformen entstehen (Mikelskis, 2006, S.140).

2.6. Bedeutung von Simulation und Modellierung im Physikunterricht

Wie schon im vorangegangenen Kapitel (Kapitel 2.4) beschrieben, spielt Modellierung eine wichtige Rolle in der physikalischen Erkenntnisgewinnung und ist damit ein elementarer Bestandteil des Physikunterrichts. Es ist somit nicht verwunderlich, dass das Arbeiten und Erstellen von Modellen einen großen Beitrag zur Kompetenzorientierung im Fach Physik beisteuern. Im hessischen Kerncurriculum der Sekundarstufe I für das Fach Physik heißt es, durch die „Erarbeitung von tragfähigen Modellen zur Orientierung in einer zunehmend durch Naturwissenschaften und Technik geprägten Welt“ trägt das Fach Physik einen wesentlichen Aspekt zur Erlangung einer umfassenden Bildung bei (Hessisches Kultusministerium, 2021, S.12). Auch im fachspezifischen Kompetenzbereich der Erkenntnisgewinnung findet sich das Arbeiten mit Modellen als Teilbereich wieder und umfasst neben dem Entwerfen geeigneter Modelle auch die Prüfung und Beurteilung von Modellen im Hinblick auf Anwendbarkeit und Aussagekraft (Hessisches Kultusministerium, 2021, S.14). In der gymnasialen Oberstufe wird der Teilbereich noch erweitert, neben der Entwicklung und Bewertung von Modellen, sollen die Lernenden zunehmend komplexe Sachverhalte als Modelle darstellen, verändern, in ihrem Gültigkeitsbereich anwenden und innerhalb eines definierten Bereichs Prognosen ableiten können (Hessisches Kultusministerium, 2016, S.20).

Auch im hessischen Kerncurriculum des beruflichen Gymnasiums ist das Modellieren im Kompetenzbereich 3 (Entwickeln und Modellieren) fest verankert.

Zudem wird die Kompetenz des Modellierens beschrieben als „Reduktion komplexer realer Verhältnisse auf vereinfachte Abbildungen, Prinzipien und wesentliche Einflussfaktoren. Hierzu gehört sowohl das Konstruieren passender Modelle als auch das Verstehen oder Bewerten vorgegebener Modelle.“ (Hessisches Kultusministerium, 2018, S.15).

In Bezug auf computergestütztes Modellieren oder Simulieren finden sich insbesondere im Kerncurriculum des allgemeinbildenden Gymnasiums wenig Hinweise oder Vorgaben zur Gestaltung des Unterrichts. Während im Curriculum der Sekundarstufe weder von computergestützten Modellen, noch von Simulationen gesprochen wird, sieht das Curriculum der gymnasialen Oberstufe die Verwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen zur numerischen Simulation innerhalb der Mechanik eines Massenpunktes im unverbindlichen Themenfeld E.4 vor. Ebenfalls obligatorisch, wird im Themenfeld der Chaostheorie Q4.4 vorgeschlagen mit Tabellenkalkulation oder Programmierumgebungen zu arbeiten, um Grenzen numerischer Berechnungsverfahren zu diskutieren (Hessisches Kultusministerium, 2016).

Auch wenn das computergestützte Modellieren und Simulieren noch kaum Einzug in den Curricula gefunden hat, darf das Potential dieses Weges der Erkenntnisgewinnung nicht unterschätzt werden. Einige Forschungsergebnisse aus Studien mit SuS und Studierenden im Bereich der Mechanik ergaben, dass das Arbeiten mit Modellbildungssystemen und dem damit verbundenen mathematischen Modellieren, die Problemlösungskompetenzen auch in anderen Situationen im Kontext der Mechanik fördern kann. Schüler, die über längere Zeit mit Modellbildungssystemen arbeiten, besitzen nachweislich ein fundierteres newtonsches Argumentationsmuster, als Schüler aus Kontrollgruppen. Insbesondere wurde auch gezeigt, dass das Arbeiten mit solcher Software die Alltagsrelevanz von Physikunterricht steigern kann, was sich wiederum mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2.5 deckt (Wilhem, 2018, S.8). Aber auch abseits der physikalischen Erkenntnisgewinnung liegt auf der Hand, dass computergestütztes Modellieren Arbeitstechniken vermittelt, die einen wichtigen Beitrag zur Förderung von Berufsbildungskompetenzen, insbesondere im Bereich der Naturwissenschaften, leistet.

2.7. Modellieren und Simulieren im Lehramtsstudium

Über viele Jahre hinweg blieb das didaktische Potential von Computereinsatz im Physikunterricht ungenutzt. Während Fachdidaktiker und Computerexperten von nachweislich positiven Wirkungen auf die Lehr-Lern Umgebung im Unterricht berichten, blieb der tatsächliche Nutzungsgrad auf einem unbefriedigenden Tiefstand (Schecker, 1998, S.49). Schecker macht die Hauptursachen des geringen Nutzungsgrades an folgenden konzeptuellen Mängeln aus:

- mangelnde fachdidaktische Reflexion des Computereinsatzes
- falsche Schwerpunkte der Inhalte und Formen des Computereinsatzes
- schlechte didaktische und medientechnische Qualität des Angebots an Unterrichtssoftware

(1998, S.49)

Während die von Schecker beschriebene Situation mittlerweile einige Jahre zurückliegt, kann man davon ausgehen, dass sich durch die zunehmende Digitalisierung unserer Gesellschaft das Bild mittlerweile verändert hat. Insbesondere das Angebot an Unterrichtssoftware hat sich im Bezug auf das Modellieren in den letzten Jahren stark verbessert. Modellbildungssysteme wie z.B. Coach, STELLA oder Newton II wurden insbesondere für Unterrichtsszenarien entworfen und ermöglichen eine benutzerfreundliche Modellbildung. Doch trotz des größer werdenden Angebots an unterstützender Software, weisen Studien weiterhin darauf hin, dass der Computereinsatz im Bereich der Modellierung weiterhin gering ausfällt. Eine Erhebung aus dem Jahr 2009, die den Computereinsatz im Physikunterricht in Bayern untersuchte, weist darauf hin, dass zwar Interesse am Unterrichtseinsatz von Modellbildung besteht, jedoch ein Großteil der Lehrer keine Kenntnisse im Bereich der Modellbildung besitzt (Ludwig, 2012, S.12).

Um dem mangelnden Wissen über computergestützte Modellbildung und dem fachdidaktischen Einsatz im Unterricht zu begegnen, sollte das Lehramtsstudium Lernumgebungen bereithalten, die es den Lehramtsstudierenden ermöglichen ihre Kompetenzen in diesem Bereich zu fördern. Im Hinblick auf die derzeitige Ausführungsbestimmung des Lehramtsstudiengangs im Fach Phy-

sik der TU Darmstadt (Stand 2017/18) fällt auf, dass im Studium keine Veranstaltungen vorgesehen sind, die sich spezifisch mit Modellieren oder dem Durchführen von Simulationen beschäftigt. Es liegt also in der Hand der jeweiligen Dozenten, ihr Lehrangebot so zu gestalten, dass sich Studierende im Bereich der Modellierung und Simulation weiterbilden können. Auch bleibt ein veranstaltungsübergreifendes Lernkonzept in diesem Bereich noch aus, was durch den Kontakt zu einigen Professoren bestätigt wurde. Sowohl der Umfang des Einsatzes von Modellbildungssystemen, als auch das verwendete System selbst, variiert dabei von Dozent zu Dozent. Meist begründet sich die Wahl des Systems durch die eigenen Vorkenntnisse im Bereich der computergestützten Modellierung bzw. der systemspezifischen Programmiersprache.

3. Der Modellgas-Versuch als Lernumgebung

Als Rahmen für diese Arbeit wurde das Demonstrationspraktikum, eine Lehrveranstaltung im Fach Physik für Lehramtsstudierende, gewählt. Der Lerninhalt dieser Veranstaltung liegt vor allem in der Funktionsweise und dem Einsatz von typischen Geräten aus schulischen Physiksammlungen, um physikalische Experimente und Versuche angemessen für SuS aufzubauen und durchzuführen. Hierbei wird auch die Messunsicherheit und die Analyse der Daten berücksichtigt. Zwar beinhaltet diese Aufzählung nicht explizit das Durchführen von Simulationen oder Modellierungen, jedoch bietet die Veranstaltung eine Reihe von Anknüpfungspunkten für das Arbeiten mit computergestützten Modellen. Ziel bei der Wahl der Anknüpfungspunkte ist es, dass das Arbeiten mit computergestützten Modellen eine Bereicherung des jeweiligen Demonstrationsexperiments bzw. -versuchs darstellt und es sich dabei, in Bezug auf Umfang und Inhalt, gut in den Ablauf der Veranstaltung integrieren lässt.

Als ein möglicher Anknüpfungspunkt, hat sich im Laufe dieser Arbeit der Modellgas-Versuch herausgestellt. Auf dessen Grundlage soll versucht werden eine Lernumgebung zu schaffen, die es den Studierenden ermöglicht, ihre Kompetenzen im Bereich der Simulation und Modellierung zu entwickeln und zu fördern.

Daher wird in diesem Kapitel der Modellgas-Versuch und die zugrundeliegende Physik beschrieben, da diese den Kern der Ausgangslage für die Gestaltung der Lernumgebung widerspiegeln.

3.1. Der Modellgas-Versuch

Wie der Name schon sagt, handelt es sich bei diesem Physikalischen Versuch bereits um ein Modell des realen Gases, indem Eigenschaften des realen Gases bereits in ein ideales Gas Modell überführt wurden. Die verwendete Modellgasapparatur adaptiert hierbei nochmals die Parameter des Modells, um eine mechanische Abbildung eines realen Gases zu generieren.

In dem Versuch wird die Teilchenbewegung von Gas mithilfe des Modellgasapparates simuliert. Dazu werden Teilchen in Form von Glaskügelchen in eine Kammer gefüllt und über eine motorbetriebene Rüttelplatte in Bewegung versetzt. Die Bewegung der Glaskügelchen stellt eine modellhafte Nachbildung der Bewegung von Gasteilchen dar. Ziel des Versuches ist es, anhand der Nachbildung, eine quantitative Messung der Barometrischen Höhenformel vorzunehmen, sowie die Maxwell-Boltzmann-Verteilung qualitativ darzustellen. Die eigentliche Durchführung des Experiments findet in diesem Versuch in Form von Simulationen statt, die an einem analogen Modell, also dem Versuchsapparat, durchgeführt werden. Neben dem Umgang mit den verwendeten Geräten und der Aufnahme von Messwerten, wird bei dem Versuch insbesondere Modellkompetenzen vermittelt. Physikalische Annahmen der kinetischen Gastheorie, die auf einer modellhaften Beschreibung von Gasen beruhen, sollen durch das Experimentieren überprüft werden. Dabei sollen Studierende die Unterschiede zwischen dem physikalischen Modell und dem Versuchsmodell diskutieren, um mögliche Abweichungen der Versuchsergebnisse von den aus dem physikalischen Modell gewonnenen Ergebnissen zu begründen.

Um das Arbeiten mit computergestützten Modellen in den Versuch zu integrieren, wird der Ablauf des Versuchs im Folgenden kurz beschrieben werden. Der Versuch lässt sich entsprechend der Versuchsziele in zwei Teile gliedern. Zum einen wird die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen im Modellapparat quantitativ dargestellt und mit der Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung verglichen. Zum anderen wird die Teilchenzahl in Abhängigkeit der Höhe innerhalb der Kammer des Modellapparats gemessen und die Daten mit denen der Barometrischen Höhenformel abgeglichen.

3.2. Geschwindigkeitsverteilung

3.2.1. Physikalische Grundlagen

Als physikalische Grundlage des gesamten Versuchs dient die kinetische Gastheorie. Sie wurde in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts von Stefan Boltzmann, Rudolf Clausius und James Clerk Maxwell entwickelt (Demtröder, 2015, S.189). Die Grundidee dieser Theorie fußt auf dem Modell des idealen

Gases. In den Annahmen dieses Modells geht man davon aus, dass ein Gas aus Atomen bzw. Molekülen besteht, die sich mit statistisch verteilten Geschwindigkeiten bewegen. Wechselwirkungen der Teilchen finden nur durch elastische Stöße untereinander und mit der Wand des Gefäßes statt. Bei den Stößen gilt sowohl Energie- als auch Impulserhaltung. Je nach Betrachtung werden die Teilchen als Massepunkte definiert. Teilchen besitzen demnach nur Freiheitsgrade entsprechend der Anzahl der zu betrachtenden Raumrichtungen. Dieses vereinfachte Modell eines realen Gases erlaubt es, die makroskopischen und mikroskopischen Eigenschaften von Gasen, unter einem vergleichsweise geringen mathematischen Aufwand, zu beschreiben. Die aus dem Modell gewonnen Erkenntnisse erlauben es, Aussagen über die Eigenschaften von realen Gasen zu treffen, die unter bestimmten Voraussetzungen näherungsweise erfüllt werden (Demtröder, 2015, S.189).

Vorausgesetzt die mittlere Energie des Gases ist groß gegenüber der Differenz der potentiellen Energie innerhalb des zu betrachtenden Volumens, lässt sich unter den getroffenen Bedingungen die Verteilungsfunktion der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten innerhalb des Gases als

$$f(v_i) = \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \cdot \exp\left(-\frac{mv_i^2}{2k_B T}\right)$$

Schreiben (vgl. Demtröder, 2015, S.197). Dies gilt nur unter obiger Voraussetzung, wonach es keine ausgezeichnete Raumrichtung gibt und sich die Verteilungsfunktionen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten nicht unterscheiden.

Möchte man nicht nur die einzelnen Geschwindigkeitskomponenten betrachten, sondern interessiert sich auch für die Wahrscheinlichkeit ein Gasteilchen mit der Geschwindigkeit $\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$ anzutreffen, bildet man das Produkt der Einzelwahrscheinlichkeiten. Für die Verteilungsfunktion gilt dann

$$f(v_x)f(v_y)f(v_z) = f(v_x, v_y, v_z) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{m\vec{v}^2}{2k_B T}\right).$$

Von besonderem Interesse ist in der Regel die Häufigkeitsverteilung der Geschwindigkeitsbeträge $v = |\vec{v}|$. Dazu muss ein Integral über das Kugelschalenvolumen, welches die Spitzen aller Geschwindigkeitsvektoren \vec{v} mit einer

Länge zwischen $v + dv$ beinhaltet, gebildet werden. Grund dafür ist, dass höhere Geschwindigkeitsbeträge mehrere Geschwindigkeitszustände beinhalten können als kleinere Geschwindigkeitsbeträge.

Für die Häufigkeit der Geschwindigkeitsbeträge folgt nach Integration

$$p(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right).$$

Dies ist die Maxwell-Boltzmann Geschwindigkeitsverteilung.

3.2.2. Versuchsbeschreibung

Um die Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen innerhalb des Modellgasapparats darzustellen, befindet sich auf einer Seite der Kammer eine Austrittsöffnung, die für diesen Teil des Versuches geöffnet wird. Direkt im Anschluss zur Öffnung wird dem Modellgasapparat eine Rasterkammer hinzugefügt. Die Austrittsöffnung ist so konzipiert, dass nur Teilchen mit horizontalen Geschwindigkeitskomponenten v_x durchgelassen werden können. Die ausgetretenen Teilchen werden durch die Registrierkammer aufgefangen und entsprechend ihrer Geschwindigkeit in der Registrierkammer sortiert. Der Versuch wird bei betriebener Rüttelplatte über einen bestimmten Zeitraum durchgeführt. Um die Teilchenzahl annähernd konstant zu halten, werden regelmäßig, entsprechend der Austrittsrate, Glaskügelchen nachgefüllt.



Abbildung 3: Foto des Versuchsaufbaus zur Darstellung Geschwindigkeitsverteilung



Abbildung 4: Verteilung der Glaskügelchen in der Registrierkammer

3.3. Barometrische Höhenformel

3.3.1. Physikalische Grundlagen

Durch das Eigengewicht entsteht innerhalb eines Gases ein Schweredruck. Die Gewichtskraft einer Luftsäule, die auf einer Fläche A in der Höhe h lastet und damit für den Druck $p(h)$ verantwortlich ist, nimmt mit zunehmender Höhe ab.

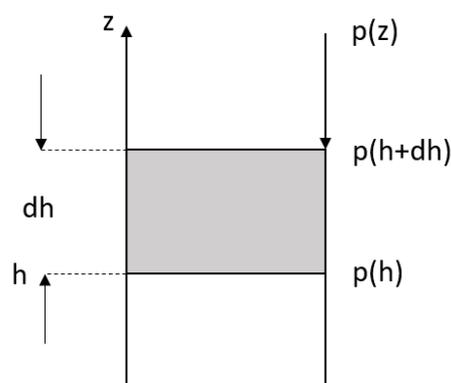


Abbildung 5: Skizze zur Herleitung der barometrischen Höhenformel

Beim Anstieg von h auf $h + dh$ nimmt die Gewichtskraft der Luftsäule um $\rho \cdot g \cdot A \cdot dh$ ab. Der Druck sinkt dementsprechend um $dp = -\rho g dh$. Unter Annahme einer isothermen Atmosphäre gilt für ein Ideales Gas

$$\rho = \frac{pM}{Nk_B T}.$$

Einsetzen in ρ und Separation der Variablen liefert

$$\int_{p_0}^{p(h)} \frac{1}{p} dp = -\frac{Mg}{Nk_B T} \int_{h_0}^h dh.$$

Aus dem Lösen der Integrale und Delogarithmieren folgt die barometrische Höhenformel

$$p(h) = p_0 \exp\left(-\frac{gM}{Nk_B T} \cdot (h - h_0)\right).$$

Unter Annahme einer isothermen Atmosphäre gilt

$$\frac{\rho}{\rho_0} = \frac{p}{p_0},$$

woraus man eine zum Druck analoge Gleichung für die Dichte in Abhängigkeit der Höhe ableiten kann:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp\left(-\frac{gM}{Nk_B T} \cdot (h - h_0)\right).$$

Unter einer mikroskopischen Betrachtung, lässt sich die Dichteabnahme in der Höhe auch über die Geschwindigkeitsverteilung der Gasteilchen erklären. Für die Teilchenzahldichte $n(h)$ von Teilchen der Masse m erhält man, ausgehend von der Barometrischen Höhenformel für die Dichte, wegen $n = \rho/m$ und $M = N \cdot m$,

$$n(h) = n_0 \exp\left(-\frac{mgh}{k_B T}\right).$$

Die Teilchenzahl nimmt zwar mit zunehmender Höhe exponentiell ab, die Geschwindigkeitsverteilung bleibt jedoch gemäß der Annahme einer isothermen Atmosphäre gleich.

3.3.2. Versuchsbeschreibung

Mithilfe einer Lichtschranke werden Teilchen in verschiedenen Höhen der Kammer des Modellapparats erfasst. Bei laufendem Betrieb des Modellgasapparats werden die Dunkelzeiten durch vorbeifliegende Teilchen von der Messelektronik gezählt. Die Messungen werden in gleichen Zeiträumen für verschiedene Kammerhöhen durchgeführt und anschließend graphisch aufgetragen. Die Lichtschranke erfasst dabei lediglich einen punktuellen Teil der Kammerhöhe, für eine repräsentative Messung muss daher der Zeitraum der Messung groß genug gewählt werden. Durch die Limitierung der Messwertfassung, kann es passieren, dass zwei oder mehrere Teilchen als eines gezählt werden, da sich Dunkelzeiten überlappen können und als eine gezählt werden. Dieser Effekt tritt vor allem im unteren Bereich der Kammer auf, da dort die Teilchendichte wesentlich höher ist.

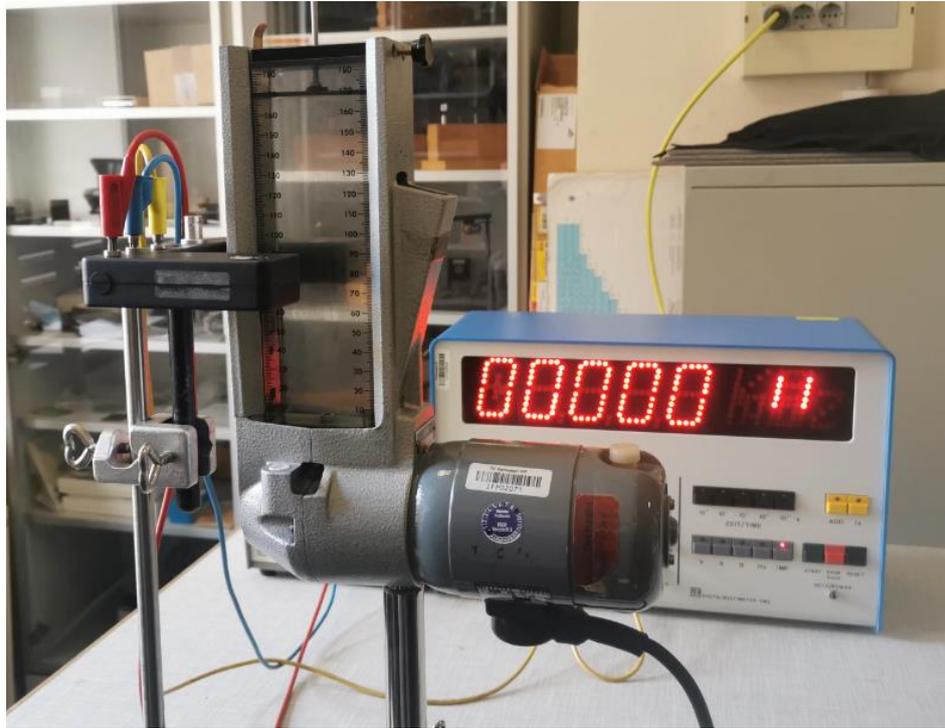


Abbildung 6: Foto zum Versuchsaufbau zur Barometrischen Höhenformel

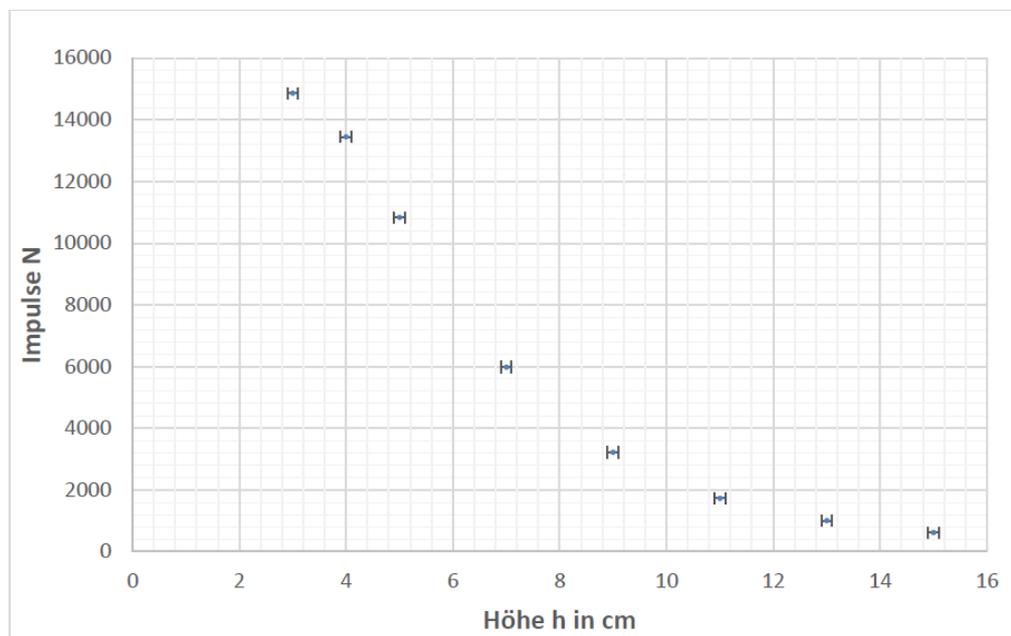


Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse aus dem Modellgas-Versuch zur quantitativen Beschreibung der Barometrischen Höhenformel

In beiden Teilen des Versuchs wird intensiv mit Modellen gearbeitet, wobei der Vergleich zwischen physikalischem Modell und experimentellen Modell immer wieder im Fokus steht. Die Arbeit mit computergestützten Modellen könnte sich daher als Ergänzung anbieten und sich methodisch in den experimentellen Ablauf integrieren lassen.

Nachdem in diesem Kapitel die Ausgangslage skizziert wurde, auf dessen Grundlage nun Lernsituationen im Bereich der Modellierung und Simulation gestaltet werden sollen, wird im folgenden Kapitel eine mögliche Umsetzung diskutiert. Dabei soll insbesondere auch die Wahl des Modellbildungssystems bzw. der Software im Mittelpunkt der Diskussion stehen.

4. Gestaltung der Lernumgebung

4.1. Wahl der Modellbildungs-Software

4.1.1. Erkenntnisse aus der physikdidaktischen Forschung

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Anzahl der Programme, die eine Modellbildung ermöglichen, stark vergrößert. Nachdem Computer Einzug in die Universitäten erhielten und die ersten computergestützten Simulationen in physikalischen Forschungsszenarien zur Anwendung kamen, wurden die zugrunde liegenden Modelle ausschließlich mithilfe von Programmiersprachen entwickelt (Weber & Wilhelm, 2020, S.5). Frühere Programmiersprachen waren aufgrund der maschinennahen Syntax sehr anspruchsvoll und zeitintensiv in der Erlernung. Weitreichende Kenntnisse waren daher für das Modellieren erforderlich. Heutzutage gibt es jedoch eine Reihe von Modellbildungssystemen, die dem Nutzenden Werkzeuge und Bedienungselemente zur Verfügung stellen, die es erlauben, mit relativ wenig Aufwand einfache Modellierungen und Simulationen vorzunehmen. Unter Modellbildungssystemen versteht man dabei Computerprogramme, mit deren Hilfe man physikalische Modelle konstruieren kann. Das Programm übernimmt die Berechnungen und stellt die Ergebnisse meist in graphischer Form, zum Beispiel als Diagramm oder Animation dar. Als Grundlage der Berechnungen dienen dabei mathematische Modelle (Ludwig, 2012, S.8). Ein wesentlicher Unterschied zwischen Modellbildungssystemen ist die Art der Ein- und Ausgabe.

Die Ausgabe kann in Form von Tabellen und Diagrammen erfolgen, dazu gehören Programme wie Excel, Newton II, Coach 7 oder STELLA. Einige Modellbildungssysteme können zusätzlich noch Animationen ausgeben, die den SuS die Interpretation erleichtern. Dazu gehören zum Beispiel Programme wie VPython und Easy Java Simulations.

Hinsichtlich der Eingabe unterscheidet man zwischen graphischen und gleichungsorientierten Modellbildungssystemen. Graphische Modellbildungssysteme bieten eine Eingabe über Symbole und Verknüpfungen auf einer

graphischen Oberfläche an. Dies wird zum Beispiel von Programmen wie STELLA und Coach 7 angeboten.

Modellbildungssystem, die mit gleichungsorientierten Eingaben arbeiten, fordern wesentliche Gleichungen zur Erstellung von Modellen. Beispiele hierzu wären Programme wie Newton II, Modellus 4 und VPython.

Wilhem empfiehlt bei der Implementierung der Modellierung im Schulunterricht die Verwendung von einfach zu verwendenden Programmen, die den SuS niederschwellig Lernerfolge ermöglichen (Weber & Wilhem, 2020, S.15). Für den Einsatz in der Schule eignen sich dementsprechend Modellbildungssysteme die speziell für den didaktischen Zweck entworfen sind und eine benutzerfreundliche Ein- und Ausgabe bereitstellen. Von offenen Programmiersprachen rät Wilhelm dagegen ab. Studien haben in diesem Kontext gezeigt, dass SuS noch deutlich mehr Probleme beim Lernen von Programmiersprachen haben, als Studierende (Weber & Wilhem, 2020, S.15).

Neben der Bedienung von Modellbildungssystemen unterscheiden sich diese auch in der Nutzbarkeit für bestimmte Anwendungszwecke. Während die meisten Programme bei der Simulation auf mechanische Probleme einzelner Körper beschränkt sind, gibt es deutlich weniger Programme, welche die Simulation von Mehrkörperproblemen ermöglichen. Insbesondere die eingabefreundlichen Modellbildungssysteme Coach 7, STELLA, Modellus 4 und Newton II bieten dafür keine Optionen.

4.1.2. Institutionelle Gegebenheiten der Veranstaltung

Aufgrund der institutionellen Gegebenheiten der Lehrveranstaltung und den inhaltlichen Gegebenheiten des Modellgas-Versuchs, lassen sich ebenfalls einige Bedingungen an die zu verwendende Software und die Gestaltung der Lernumgebung formulieren. Zunächst wird der Blick auf die institutionellen Gegebenheiten gerichtet.

Im Kapitel 2.7 wurde im Hinblick auf das Lehramtsstudium im Fach Physik festgestellt, dass es kein veranstaltungsübergreifendes Lehrkonzept bezüglich der Kompetenzen Modellierung und Simulation gibt, auf welches bei der Gestaltung der Lernumgebung aufgebaut werden kann. Demzufolge kann bei der Erstellung von computergestützten Modellen und Simulationen nicht auf ein

allgemein vorhandenes Wissen der Studierenden zurückgegriffen werden, denn dazu sind softwarespezifische Kenntnisse erforderlich, die sich in ihrer Tiefe von Software zu Software unterscheiden. Die Kompetenzen der Modellierung und Simulation umfassen jedoch mehr als nur die Erstellung von Modellen bzw. Simulationen. Die Studierenden haben sich im Laufe ihres Studiums intensiv mit physikalischen und mathematischen Modellen auseinandergesetzt und dabei ein ausgeprägtes Modellverständnis entwickeln können. Auch die Anwendung und die Reflexion von Modellen sind essenzieller Bestandteil des Lehramtsstudiums im Fach Physik. Diese Kompetenzen können als Grundvoraussetzung im Folgenden angenommen werden.

Möchte man eine Lernumgebung konzipieren, in denen die Studierenden computergestützte Modelle und Simulationen entwickeln, muss man also, bei Betrachtung der Ausgangslage, auf Modellbildungssysteme zurückgreifen, die den Studierenden einen unkomplizierten, intuitiven Zugang ermöglichen, da ansonsten der Rahmen der Veranstaltung sowohl inhaltlich, als auch zeitlich überschritten werden würde.

4.1.3. Inhaltliche Gegebenheiten des Modellgas-Versuchs

Auf Grundlage der bisherigen Überlegungen und den Erkenntnissen aus der physikdidaktischen Forschung spricht vieles dafür, bei Gestaltung der Lernumgebung, auf zugängliche Modellbildungssysteme zurückzugreifen. Wie jedoch schon zu Beginn des Kapitels angedeutet, bringen diese Systeme entscheidende Limitierungen im Hinblick auf die Anwendbarkeit bei komplexen physikalischen Problemen mit sich. Diese Limitierungen und ein möglicher Lösungsansatz sollen im Folgenden diskutiert werden.

Da sich der Modellgas-Versuch mit der mikroskopischen Betrachtung des idealen Gases beschäftigt, liegt der inhaltliche Fokus des Versuchs auf der Beschreibung der Teilchenbewegung und den statistischen Größen, die daraus abgeleitet werden können. Ein solches physikalisches Problem, lässt sich nicht auf die Betrachtung eines einzelnen Körpers bzw. einzelnen Massenpunktes reduzieren. Auch würden makroskopische Betrachtungen der Größen Temperatur, Dichte und Druck, die sich über differenzielle Abhängigkeiten ausdrücken lassen, dem eigentlichen Inhalt des Versuchs nicht gerecht werden.

Bei der Erstellung computergestützter Modelle, die eine Teilchenbewegung großer Teilchenzahlen abbilden können, muss man auf die Verwendung anspruchsvollerer Software zurückgreifen. Offene Programmiersprachen wie Python oder Java oder Programmpakete wie Mathematica ermöglichen die Erstellung solcher Modelle, benötigen jedoch einige Vorkenntnisse in der jeweiligen Programmier- bzw. Eingabesprache. Da man institutionell bedingt leider auf keine Vorkenntnisse in einer der Sprachen zurückgreifen kann, wird der Prozess der Erstellung und damit ein wesentlicher Teil der Modellierung nicht von den Studierenden selbst vorgenommen werden können. Möchte man den Fokus auf diesen Aspekt der Modellierung legen, sollten weniger komplexe physikalische Inhalte als Anknüpfungspunkte in Betracht gezogen werden. Längerfristig könnte ein veranstaltungsübergreifendes Lehr-Lernkonzept ausgearbeitet werden, in dem Studierende im Umgang mit Modellbildungs-Software geschult werden. Dieses Lehr-Lernkonzept könnte in Zukunft als Grundlage einer solchen Arbeit dienen.

Eine Möglichkeit, den beschriebenen Umständen zu begegnen, wäre den Übersetzungsprozess von mathematischen Modellen in computergestützte Modelle für die Studierenden auszublenden und den Prozess des Simulierens in den Vordergrund zu stellen. Im Folgenden wird daher diskutiert, in wie weit sich Kompetenzen im Bereich der Modellierung und Simulation durch das Arbeiten mit Simulationen fördern lassen.

4.2. Interaktive Simulationen als Mittel zur Kompetenzentwicklung

In Kapitel 2.3 wurde der Prozess des Modellierens dargestellt und die einzelnen Aspekte beleuchtet. Das Übersetzen eines Problems in ein computergestütztes Modell beschreibt demnach jedoch nur ein Teil des Prozesses. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist das Generieren und Interpretieren von Daten, ausgehend von dem zugrunde liegenden Modell, bei dem insbesondere das Diskutieren von Limitierungen, also erkenntnistheoretischen Grenzen des Modells, eine wichtige Rolle spielt. Das interaktive Generieren und Interpretieren von Daten, ausgehend von dem zugrunde liegenden Modell wird durch den Begriff des

Simulierens beschrieben (siehe Kapitel 2.5). Interaktiv bedeutet dabei, dass bestimmte Größen, die einen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben, vom Subjekt verändert werden können. Solche Einflussgrößen werden in der Regel als Parameter einer Simulation bezeichnet. Doch lassen sich Kompetenzen im Bereich der Modellierung und Simulation durch das Variieren von Parameterwerten fördern?

Landriscina beschäftigt sich in seiner Arbeit zum Thema *Simulation and Learning* intensiv mit dem Potential von Simulationen im Bereich der Erkenntnisgewinnung. Er teilt das Lernen durch modell-basierte Simulationen in zwei Wege auf und unterscheidet dabei zwischen dem Lernen durch das Erstellen von Simulationen und dem Lernen durch das Arbeiten an bereits bestehenden Simulationen (Landriscina, 2013, S.99). Landriscina kommt zum Schluss, dass Lernende beim Arbeiten mit schon bestehenden Simulationen ihre Modellkompetenzen im Bereich der Modellierung und Simulation fördern können, vorausgesetzt die kognitiven Prozesse von Lernenden im Umgang mit Simulationen werden in die Gestaltung der Lernumgebung miteinbezogen (Landriscina, 2013, S.108). Dabei ist es wichtig zu begreifen, dass das bei bestehenden Simulationen zugrunde liegende (computergestützte) Modell dem Lernenden in der Regel verschleiert bleibt. Das kann beim Lernenden zu Fehlvorstellungen führen, da Simulationsergebnisse nicht auf Modelleigenschaften zurückgeführt werden können und ohne eine Reflexion in die Erlebniswelt, also den realen Kontext, überführt werden (Landriscina, 2013, S.103). Zudem ist beim Arbeiten mit bestehenden Simulationen nicht gegeben, dass sich Lernende überhaupt mit dem zugrunde liegenden Modell auseinandersetzen. Denn die Bedienung einer Benutzeroberfläche setzt nicht voraus, dass sich der Lernende kognitiv mit dem Modell befasst. Aufgabe der Lehrkraft ist es, dafür zu sorgen, die Lernumgebung so zu gestalten, dass sich die Lernenden strukturiert mit der Simulation und dem zugrunde liegenden Modell befassen (Landriscina, 2013, S.108). Dazu gehört, dass die Lernenden die Simulation zielgerichtet in Abhängigkeit des Lernziels bedienen, Erwartungen basierend auf ihrem eigenen kognitiven Modell formulieren, diese mit den Simulationsergebnissen vergleichen und schließlich ihr Verständnis durch die Erkenntnisse aus dem Umgang mit der Simulation erweitern (Landriscina, 2013, S.101).

Basierend auf den zugrunde liegenden Erkenntnissen und den institutionellen sowie inhaltlichen Bedingungen, wird die Lernumgebung nun auf Grundlage von bestehenden Simulationen gestaltet. Bestehend heißt hierbei, dass die Studierenden nicht in die Erstellung der Simulation involviert werden. Es wird jedoch nicht auf bereits bestehende Simulations-Programme zurückgegriffen, sondern im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Simulationen entwickelt, die als Grundlage der Lernumgebung dienen werden.

Bevor die Simulations-Programme genauer in ihrer Funktionsweise und ihrer Bedienung beschrieben werden und die Ergebnisse der Testdurchläufe präsentiert und diskutiert werden, wird im letzten Teil dieses Kapitels die Programmiersprache Python, als Werkzeug zur Erstellung naturwissenschaftlicher Modelle und Simulationen, vorgestellt.

4.3. Modellbildung mit Python

Wie im Kapitel 4.1.3 diskutiert wurde, schränken die inhaltlichen Gegebenheiten die Wahl der Modellbildungs-Software ein. Daher wird in dieser Arbeit auf die Programmiersprache Python bei der Erstellung der Simulations-Programme zurückgegriffen. An dieser Stelle sei anzumerken, dass es neben Python auch andere Programmiersprachen bzw. Programmpakete gibt, die für die Arbeit geeignet gewesen wären. Python wurde insbesondere deshalb ausgewählt, weil es sich dabei um eine frei zugängliche, kostenlose Software zur Erstellung von Simulationen handelt und die gängigen Betriebssysteme Windows, macOS und Linux unterstützt. Außerdem bietet Python nahezu endlose Anwendungsmöglichkeiten, die Python derzeit zu einer der beliebtesten Programmiersprachen weltweit machen.

Python wurde mit der Intention entwickelt einen möglichst einfachen und übersichtlichen Programmcode aufzuweisen. Dadurch liest und schreibt sich die Programmiersprache vergleichsweise intuitiv. Eine weitere Stärke von Python ist die große Zahl an Bibliotheken, auf die zurückgegriffen werden kann. Insbesondere im wissenschaftlichen Bereich gibt es einige nützliche Bibliotheken, die eine große Unterstützung beim Erstellen von Figuren, Animationen und graphischen Benutzeroberflächen (**G**raphical **U**ser **I**nterface - **G**UI) bieten.

Einige Beispiele, die auch im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden sind Numpy, Matplotlib und PyQt.

Doch trotz der intuitiven Syntax und der Unterstützung durch vorhandene Bibliotheken, sowie nützlichen Entwicklungsumgebungen, erfordert das Erstellen von Modellen für den physikalischen Kontext einige Vorkenntnisse, deren Erwerb den Rahmen des Demonstrationspraktikums in dem diese Simulation eingesetzt werden soll überschreitet.

Um einen ersten Eindruck von der Programmiersprache und der Unterstützung durch bereits existierende Bibliotheken zu bekommen, ist im Folgenden der Programmcode und die Ausgabe einer einfachen Sinusfunktion abgebildet. Das Programm wurde in der Entwicklungsumgebung Spyder geschrieben.

```
1  #Import der Bibliotheken
2  import numpy as np
3  import matplotlib.pyplot as plt
4
5  #Erstellen einer Liste für die x-Werte (Start, Ende, Schrittweite)
6  x = np.arange(0, 4*np.pi, 0.01)
7
8  #Erstellen einer Liste für die y-Werte
9  y = np.sin(x)
10
11 #Erzeugen eines Plots und Übergeben der Listen als Werte
12 plt.plot(x, y)
13
14 #Achsenbeschriftung und Hilfsgitter
15 plt.xlabel('x')
16 plt.ylabel('y')
17 plt.grid()
18
19 #Diagramm anzeigen
20 plt.show()
```

Abbildung 8: Programmcode zur Darstellung einer Sinusfunktion in Spyder

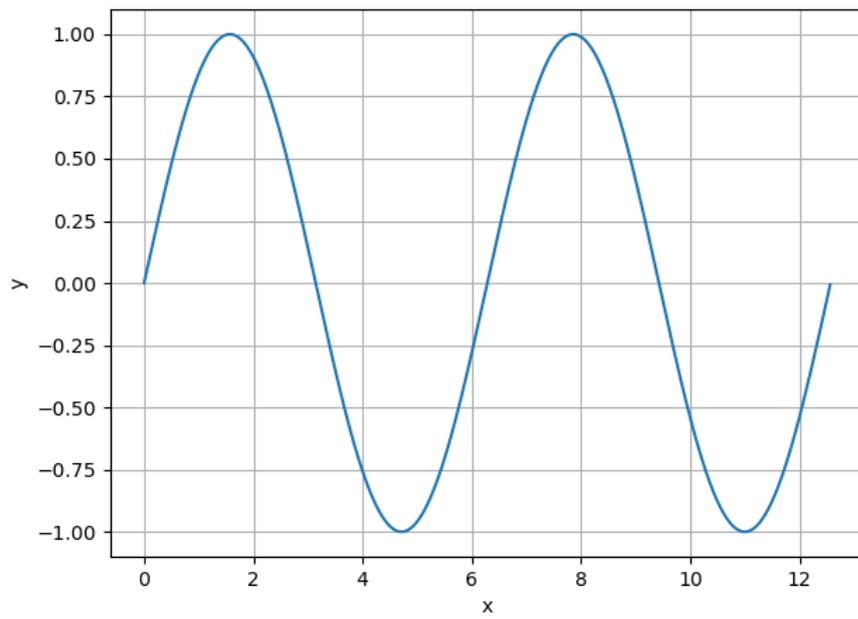


Abbildung 9: Konsolenausgabe des Programmcodes

5. Simulation der Geschwindigkeitsverteilung

Der Modellgas-Versuch lässt sich in zwei Unterthemen gliedern, wie in Kapitel 0 ausführlich beschrieben wurde. Zu jedem dieser zwei Themen wurde ein Simulations-Programm entwickelt. Zunächst wird das Programm zur Simulation der Geschwindigkeitsverteilung vorgestellt. Darauf aufbauend wird im nächsten Kapitel (6) eine Erprobung des Programms mit einer Stichprobe von Studierenden vorgestellt und die daraus gewonnenen Ergebnisse diskutiert.

5.1. Übersicht des Programms

Die Simulation der Geschwindigkeitsverteilung basiert auf der Berechnung von Teilchenbewegungen in einem abgeschlossenen Kasten. Die Wechselwirkungen, auf deren Grundlage die Berechnungen erfolgen, beschränken sich auf ideal-elastische Stöße der Teilchen untereinander und mit den Wänden des Kastens. Ziel ist es dabei, das physikalische Modell des idealen Gases möglichst genau abzubilden. Gleichzeitig soll jedoch auch ein Vergleich mit dem Modellgasapparat möglich sein, um die erkenntnistheoretischen Grenzen beider Modelle miteinander vergleichen und diskutieren zu können.

Das Simulationsergebnis der Teilchenbewegungen wird durch eine Animation veranschaulicht. Zudem wird das Simulationsergebnis der Teilchengeschwindigkeiten über zwei Live-Diagramme dargestellt. In den Diagrammen werden sowohl die momentane Geschwindigkeitsverteilung, als auch eine über die vergangenen Zeitschritte aufsummierte Geschwindigkeitsverteilung animiert.

Ziel dieser Darstellung ist es, zum einen die mikroskopische Teilchenbewegung auf Grundlage des physikalischen Modells zu veranschaulichen und zum anderen das Simulationsergebnis mit den Erwartungen der Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung vergleichen zu können.

Um Studierenden einen interaktiven Umgang mit der Simulation gewährleisten zu können, wird die Eingabe der Parameterwerte sowie die Ausgabe der Simulationsergebnisse auf einer graphischen Benutzeroberfläche angeboten.

Das mathematische Modell auf dessen Grundlage sich die Simulation stützt, soll im Folgenden beschrieben werden, um dadurch einen Einblick in die Funktionsweise des Programms zu bekommen.

5.2. Das mathematische Modell

Um die Teilchenbewegung ausgehend vom physikalischen Modell in das computergestützte Modell zu übersetzen, muss die Teilchenbewegung zunächst mathematisch beschrieben werden. Der anspruchsvollere Teil der Beschreibung liegt dabei bei der Beschreibung der Stöße untereinander, sowie mit der Gefäßwand. Gemäß der bei der Maxwell-Boltzmann-Verteilung zugrundeliegenden Annahme, wird das Wechselwirkungspotential der Teilchen innerhalb des Gefäßes beschrieben als

$$V(r) = 0 \text{ für } |r| > 2r_0$$

$$V(r) = \infty \text{ für } |r| \leq 2r_0 ,$$

wobei r für den Abstand der Teilchen zueinander steht und r_0 den Radius der Teilchen beschreibt. Finden also keine Stöße statt, bewegen sich die Teilchen mit konstanten Geschwindigkeiten fort.

Da ideal-elastische Stöße angenommen werden, wird im Folgenden der zentrale Stoß zweier starrer Kugeln exemplarisch beschrieben.

Unter Impuls und Energieerhaltung gilt für die Impulse der Teilchen vor und nach dem Stoß

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2$$

sowie für die kinetische Energie der Teilchen vor und nach dem Stoß

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 (v'_1)^2 + \frac{1}{2} m_2 (v'_2)^2 .$$

Lösung der beiden Gleichungssysteme ergibt für die Geschwindigkeiten der Kugeln nach dem Stoß

$$v_1' = \frac{2m_2v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}$$

und

$$v_2' = \frac{2m_1v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2}.$$

Im Allgemeinen handelt es sich bei Stößen zwischen den Teilchen jedoch um schräge Stöße, mit beliebigen Geschwindigkeiten.

Aufgrund einer vereinfachten Darstellung und um die Rechenzeit der Simulation zu minimieren, stützt sich die Simulation auf eine zweidimensionale Betrachtung der Teilchenbewegung. Folglich wird der schräge Stoß aus im zweidimensionalen Raum betrachtet.

Um die Geschwindigkeiten beim schrägen Stoß zu ermitteln, wird eine Hilfsgerade am Berührungspunkt der Kugeln angelegt. Die Geschwindigkeiten der Kugeln lassen sich in eine senkrechte und eine tangentielle Komponente in Bezug zu dieser Hilfsgeraden aufteilen (vgl. Abbildung 10).

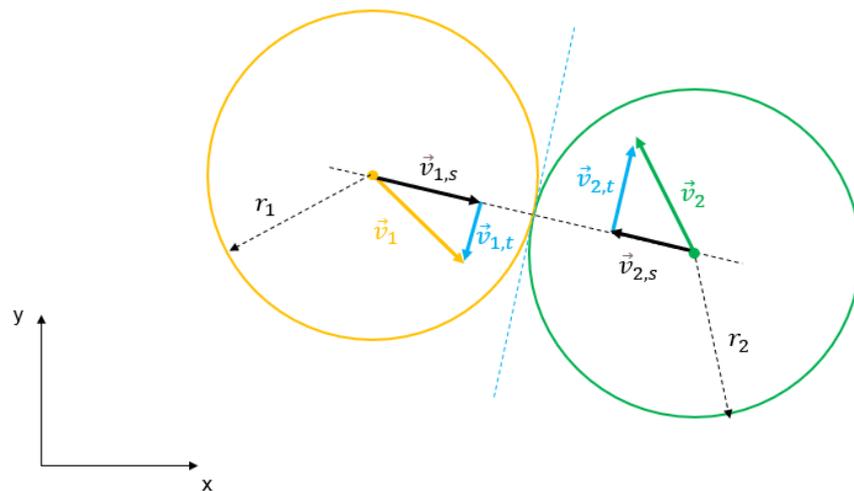


Abbildung 10: Skizze zur Berechnung eines schrägen Stoßes

Da von glatten Kugeln ausgegangen wird, können die Kugeln nicht in Eigenrotation versetzt werden. Für die tangentialen Geschwindigkeitskomponenten gilt somit

$$\vec{v}_{1,t} = \vec{v}_{1,t}' \text{ und } \vec{v}_{2,t} = \vec{v}_{2,t}'.$$

Für die senkrechten Komponenten gelten die Bedingungen des zentralen Stoßes. Aus Energie- und Impulserhaltung folgt äquivalent zur vorherigen Betrachtung

$$v'_{1,s} = \frac{2m_2 v_{2,s} + (m_1 - m_2)v_{1,s}}{m_1 + m_2}$$

und

$$v'_{2,s} = \frac{2m_1 v_{1,s} + (m_2 - m_1)v_{2,s}}{m_1 + m_2}.$$

Die Wände des Gefäßes als Geradenfunktion in hessescher Normalform beschrieben als

$$\vec{x} \cdot \vec{n} - d = 0,$$

mit dem Abstand d zum Ursprung und dem Normalvektor \vec{n} .

Die Geschwindigkeit bei der Kollision zwischen einer Kugel und einer Wand berechnet sich mithilfe des Skalarprodukts zwischen dem Geschwindigkeitsvektor und dem Normalvektor der Wand wie folgt:

$$\vec{v}' = \vec{v} - 2(\vec{v} \cdot \vec{n})$$

Um die Bewegung der Teilchen vollständig beschreiben zu können, muss die Zeit bis zum nächsten Stoß der Teilchen untereinander bzw. mit den Wänden ermittelt werden. Im Programmcode werden dann mithilfe von Schleifen über einen Zeitraum T alle Teilchen bis zum Zeitpunkt der nächsten Kollision mit konstanten Geschwindigkeiten bewegt, dann werden die Geschwindigkeiten der beteiligten Kugeln neu berechnet und wieder bis zur nächsten Kollision weiterbewegt.

Das mathematische Verfahren um die Zeit bis zur nächsten Kollision zu berechnen, wird im Folgenden beschrieben. Zunächst wird die Kollision zwischen zwei Teilchen betrachtet.

Die Bedingung für die Kollision zweier Teilchen lautet

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = R_1 + R_2.$$

Es findet also dann eine Kollision statt, wenn der Abstand der Teilchen gleich die Summe der Radien R ist, die Teilchen sich also berühren.

Der Ort r eines Teilchens ist zeitabhängig und lässt sich im Allgemeinen schreiben als

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}t.$$

Der Abstand zweier Teilchen hängt daher ebenfalls von der Zeit ab. Die Bedingung einer Kollision lässt sich umformulieren zu

$$|(\vec{r}_1 + \vec{v}_1 t) - (\vec{r}_2 + \vec{v}_2 t)| = R_1 + R_2$$

Quadriert man die obige Gleichung, lässt sie sich in die quadratische Form

$$t^2 + 2pt + q = 0,$$

mit

$$p = \frac{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2) \cdot (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)}{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2} \quad \text{und} \quad q = \frac{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \cdot (R_1 + R_2)}{(\vec{v}_1 - \vec{v}_2)^2}.$$

Der Zeitpunkt der Kollision wird durch Lösen der Gleichung

$$t = -p \pm \sqrt{a^2 - b}$$

bestimmt.

Besitzt die Gleichung keine Lösung, so findet keine Kollision zwischen den Kugeln statt. Bei genau einer Lösung streifen sich die Kugeln. Erhält man zwei Werte als Lösungen der Gleichung, findet eine Kollision statt. Der kleinere Wert steht dabei für den relevanten Zeitpunkt der Kollision. Der größere Wert beschreibt den Wiederaustritt der Kugeln und ist somit nicht relevant für diese Betrachtung.

Schlussendlich wird die Berechnung der Zeit bis zur Kollision zwischen einer Kugel und einer Wand beschrieben.

Die Bedingung einer Kollision ist genau dann erfüllt, wenn die Kugel die Wand berührt, also der Vektor

$$\vec{x} = \vec{r}_0 + \vec{v}t + \vec{n}R$$

auf der Geraden liegt, welche die Wand beschreibt. Setzt man die Bedingung in die hessesche Normalform der Geradengleichung ein

$$\vec{n}(\vec{r}_0 + \vec{v}t + \vec{n}R) = d$$

und löst nach der Zeit auf, folgt

$$t = \frac{d - \vec{n} \cdot \vec{r}_0 - R}{\vec{n} \cdot \vec{v}}.$$

In Python lassen sich Rechnungen für eine große Anzahl an Teilchen gleichzeitig durchführen. Dies erfolgt mit so genannten Arrays. Ein Array ist ein Datentyp, mit dessen Hilfe sich gleichartig strukturierte Daten verarbeiten lassen. Vereinfacht kann man sich Arrays als Listen, ähnlich wie Matrizen vorstellen, mit denen Rechenoperationen durchgeführt werden können. Um beispielsweise den nächsten Zeitpunkt einer Kollision zu bestimmen, legt man ein $N \times N$ Array an, wobei N die Zahl der Teilchen ist. Jeder Eintrag der Liste repräsentiert dann die Zeit bis zur Kollision der Teilchen der jeweiligen Spalte bzw. Zeile.

Die Übersetzung des mathematischen Modells in den Programmcode wird in dieser Arbeit nicht weiter thematisiert. Der Programmcode findet als Anhang auf der beigelegten CD wieder und ist ausführlich kommentiert.

5.3. Funktionen des Programms

Führt man den Programmcode aus, öffnet sich ein GUI (Abbildung 11). Dieses bietet zum einen eine Fläche für die Darstellung der Simulationsergebnisse und zum anderen werden dem Nutzenden eine Reihe von Schieberegler und Button zur Verfügung gestellt, mit denen die Parameterwerte der Simulation verändert werden können und die Animation gesteuert werden kann.

Die Funktionen die das Programm dem Nutzenden zur Verfügung stellt und die Darstellung der Simulationsergebnisse werden im Folgenden erklärt.

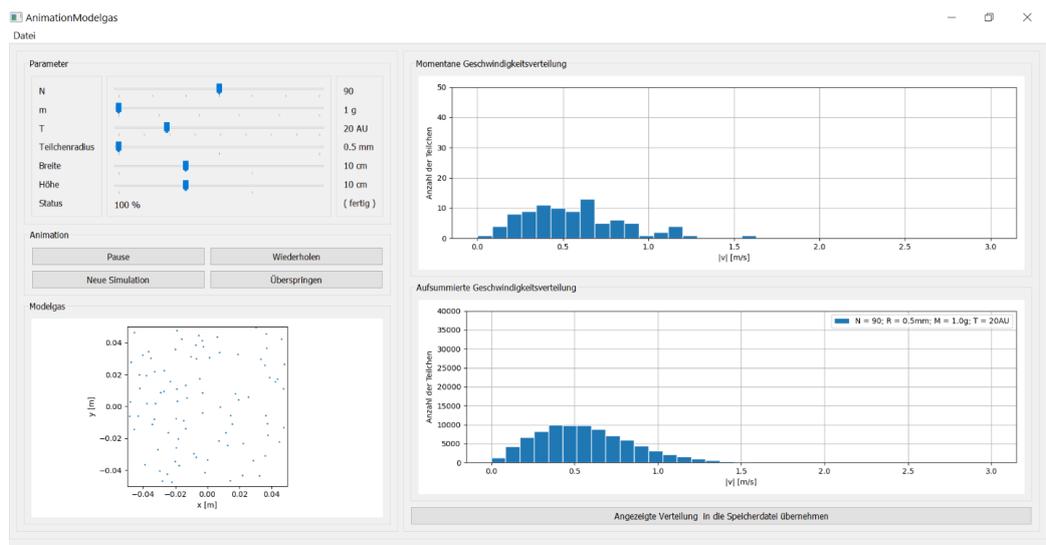


Abbildung 11: GUI für die Simulation der Geschwindigkeitsverteilung

5.3.1. Parameter der Simulation

Zunächst werden die Parameter der Simulation (vgl. Abbildung 12) genauer betrachtet und deren Einfluss auf die Simulation erklärt.

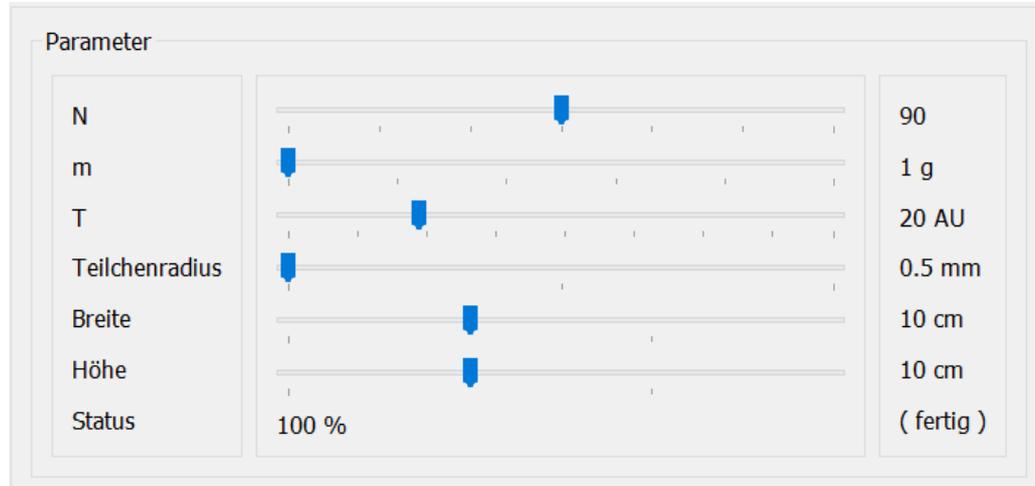


Abbildung 12: Parameter der Simulation

Die Parameterwerte dienen als Startwerte bei der Berechnung der Teilchenbewegung. Wie die Teilchenbewegung berechnet wird, wurde im letzten Kapitel über das mathematische Modell beschrieben. Zuvor jedoch müssen sie im Programm erzeugt werden.

Ein Teilchen wird über eine Ortskoordinate des Mittelpunkts, einer Geschwindigkeitskoordinate, einem Radius und einer Masse definiert. Der Anfangsort eines jeden Teilchens wird mithilfe der Funktion `numpy.random.rand()` erzeugt. Diese Funktion erzeugt ein Array mit zufälligen Gleitkommazahlen zwischen 0 und 1. Durch wenige Rechenschritte können den Teilchen dadurch zufällige Koordinaten innerhalb eines definierten Kastens zugewiesen werden (vgl. Abbildung 13, Zeile 26).

Ein ähnliches Verfahren wird auch zum Festlegen der Startgeschwindigkeiten der Teilchen angewendet. Dabei ist es wichtig zu erwähnen, dass den Teilchen zwar zufällige Geschwindigkeitsrichtungen zugewiesen werden, jedoch durch Normalisieren alle Teilchen den gleichen Geschwindigkeitsbetrag bekommen (vgl. Abbildung 13, Zeile 33). Dieser Schritt ist wichtig, da durch das Normalisieren die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen durch Wahl der Parameter festgelegt werden kann. Der Einfluss dieses Verfahrens auf das Simulationsergebnis wird in Kapitel 5.4 diskutiert.

```
24 # Zufällige Anfangsposition der Teilchen innerhalb dem Bereich -5cm...+5cm
25 # in x- und y-Richtung. N = Teilchenzahl und dim = Dimensionen = 2
26 r0 = (np.random.rand(N, dim) - 0.5) * 10 * 0.01
27
28 # Erzeugen zufällige Geschwindigkeitskomponenten im Bereich -0.5 bis 0.5
29 v0 = -0.5 + np.random.rand(N, dim)
30
31 # Normieren de Geschwindigkeiten. Alle Teilchen bekommen den Betrag 1m/s
32 v0 /= (np.linalg.norm(v0, axis=1).reshape(-1, 1))
33
34 # Multiplizieren mit gewünschtem Betrag v_start in m/s
35 v_start = 0.5
36 v0 *= v_start
37
38 # Teilchen bekommen den gleichen Radius R = 0.001m
39 radius = 0.001 * np.ones(N)
40
41 # Teilchen bekommen die gleiche Masse M = 0.001kg
42 m = np.ones(N) * 0.001
```

Abbildung 13: Programmcode zur Definition der Startwerte der Simulation

Wie aus Abbildung 12 entnommen werden kann, gibt es kein Parameter für die durchschnittliche Teilchengeschwindigkeit. Stattdessen wird diese über den Wert des Parameters T , also der Temperatur, geregelt. Die mittlere Geschwindigkeit folgt dann aus der Gleichung

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}}$$

ausgehend von der Definition der Temperatur in einem idealen Gas mit konstanter Teilchenzahl im zweidimensionalen Raum

$$\frac{1}{2}m\bar{v}^2 = k_B T.$$

Die Darstellung der Teilchen in der Simulation findet innerhalb makroskopischer Größenordnungen statt. Dadurch kann die Teilchenbewegung bei der Animation nachverfolgt werden und die Ergebnisse der Simulation lassen sich mit denen des Modellgasapparats besser vergleichen. Da die Temperatur in gängigen Einheiten absurde Größen erreichen würde, wurde bei der Simulation nicht wie üblich mit der Boltzmann-Konstante k_B gerechnet, sondern mit einem willkürlichen Proportionalitätsfaktor k gerechnet. Die Einheit der Temperatur wird daher in AU (arbitrary unit) angegeben.

Die Parameter Höhe und Breite bestimmen die Maße des Kastens und ermöglichen dadurch den Vergleich mit dem Modellgasapparat.

5.3.2. Animation der Teilchenbewegung

Um die Teilchenbewegung zu veranschaulichen, wurde eine Animation der Teilchen auf Grundlage der Simulationsergebnisse erstellt (Abbildung 14). Nachdem die Startwerte aus dem GUI gelesen werden und darauf basierend die Berechnung der Teilchenbewegung entsprechend dem mathematischen Modell erfolgt, gibt das Programm eine Liste der Orte aller Teilchen zu jedem Zeitschritt aus. Wenn die Teilchenbewegung beispielsweise für $t = 10s$ in 1000 Zeitschritten mit $dt = 0,01s$ berechnet wird, besteht das Simulationsergebnis der Teilchenbewegung aus einer Liste der Dimension $1000 \times N \times 2$.

Ähnlich wie in dem Beispiel der Sinusfunktion in Kapitel 4.3, kann mit Matplotlib ein Diagramm erzeugt werden in dem anstelle des Linienplots, Kreise dargestellt werden. Die Mittelpunkte der Kreise werden in jedem Zeitschritt über die Ortsvektoren der Teilchen aus dem Simulationsergebnis definiert. Mithilfe einer Animationsfunktion werden die Positionen der Kreise zu jedem Zeitschritt animiert dargestellt.

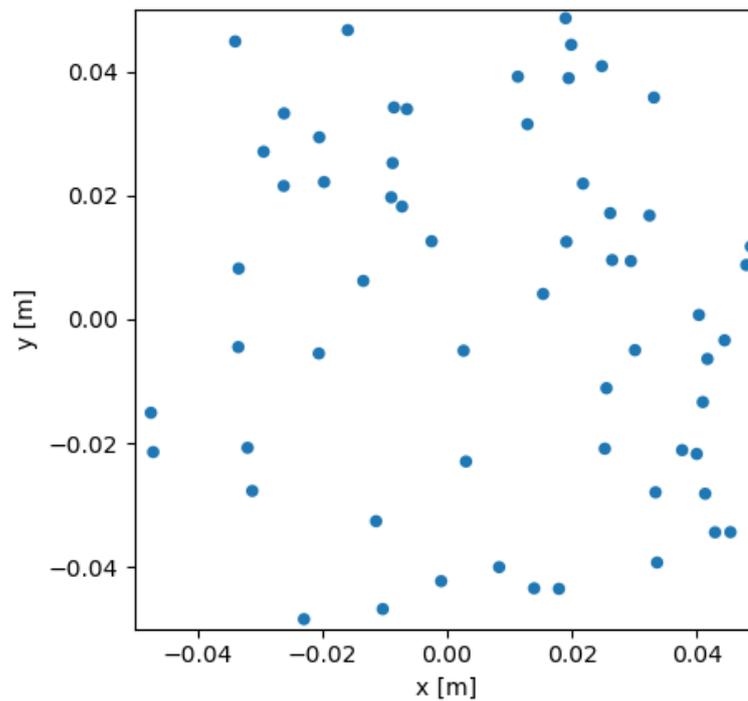


Abbildung 14: Bild der Animation der Teilchenbewegung

5.3.3. Die Geschwindigkeitsverteilung

Ein weiteres Ziel neben der Darstellung der Bewegung der Teilchen, ist die Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen. Zusätzlich zum Ort der Teilchen wird zu jedem Zeitschritt auch die Geschwindigkeit jedes Teilchens berechnet und in einer Liste gespeichert. Das Simulationsergebnis umfasst daher auch eine Liste der Geschwindigkeiten aller Teilchen zu jedem Zeitschritt. Die Dimension der Geschwindigkeitsliste entspricht der Dimension der Ortsliste.

Im GUI des Programms werden zwei Geschwindigkeitsverteilungen als Balkendiagramme animiert dargestellt (vgl. Abbildung 15). Zum einen die momentane Geschwindigkeitsverteilung, bei der die Geschwindigkeitsverteilung des derzeit animierten Zeitschritts angezeigt wird und eine aufsummierte Geschwindigkeitsverteilung, bei der die momentane Verteilung des Zeitschritts aufsummiert wird.

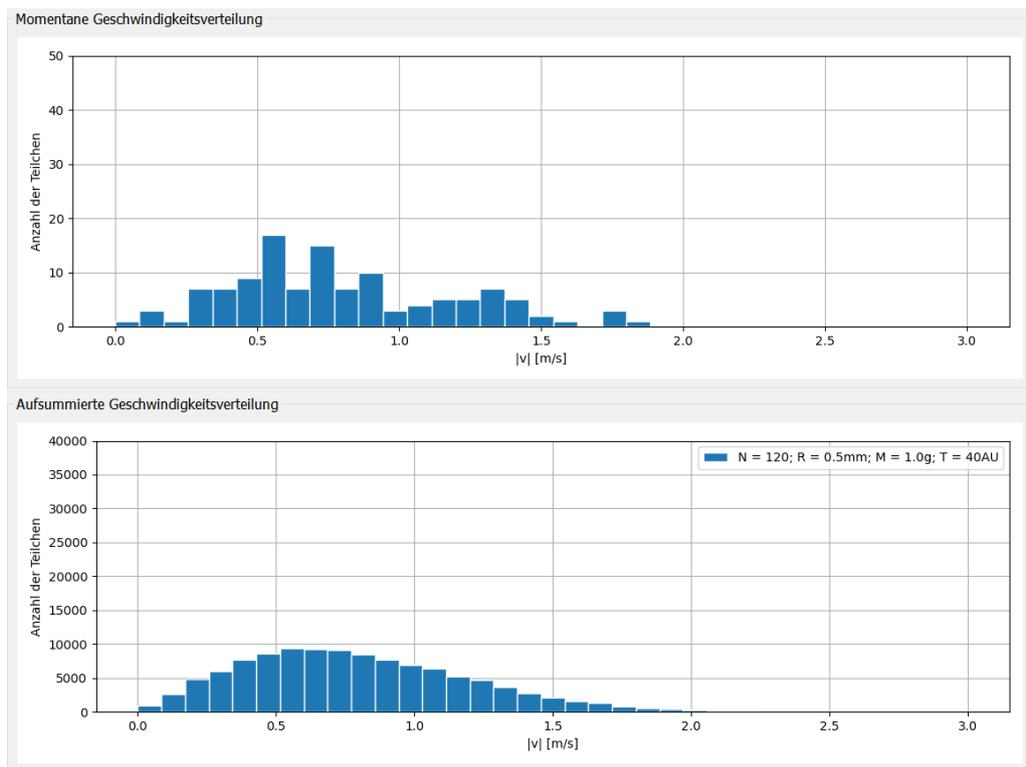


Abbildung 15: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilungen im GUI

Die momentane Geschwindigkeitsverteilung kann als Ergänzung der aufsummierten Verteilung verstanden werden, welche es erlaubt, die statistische Eigenschaft der Geschwindigkeit zusätzlich zu veranschaulichen. Die Bewegung der Glaskügelchen im Modellgasapparat lässt sich aufgrund der hohen Geschwindigkeiten kaum nachverfolgen. Zwar bekommt man durch die Registrierkammer Aufschluss über die Verteilung der Geschwindigkeiten über einen langen Zeitraum gemessen, jedoch können so gut wie keine Informationen über die momentanen Geschwindigkeiten der Teilchen gewonnen werden. Die Simulation ermöglicht dagegen eine genauere Betrachtung der momentanen Geschwindigkeitsverteilung. Die Darstellung der Teilchenbewegung (vgl. Abbildung 14) gewinnt dadurch einen zusätzlichen Informationsgehalt, da die Geschwindigkeitsverteilung passend zum Bild der Teilchenbewegung animiert wird. Eine gängige Schülervorstellung ist, dass sich Teilchen bei bestimmten Temperaturen alle gleich schnell bewegen (Landriscina, 2013, S.106). Durch die Veranschaulichung der momentanen Geschwindigkeitsverteilung kann dieser Vorstellung begegnet werden, ohne dass eine Interpretation des Endbildes der Verteilung nötig ist (vgl. Abbildung 4).

Durch die aufsummierte Darstellung der Geschwindigkeitsverteilung, können die Simulationsergebnisse mit den physikalischen Erwartungen aus der Maxwell-Boltzmann-Geschwindigkeitsverteilung verglichen werden. Der Vergleich kann zum Beispiel über eine Kurvendiskussion stattfinden, bei der zunächst die Einflüsse der verschiedenen Parameter auf die Form der Verteilung diskutiert werden und schließlich mit dem Simulationsergebnis verglichen werden.

Möchte man den Einfluss verschiedener Parameterwerte auf das Simulationsergebnis untersuchen, können die aufsummierten Verteilungen verschiedener Simulationen miteinander verglichen werden. Um Verteilung miteinander zu vergleichen, gibt es einen Button im GUI der eine Vergleichsfunktion im Programmcode aufruft. Dabei werden die Balken und die Legende der Geschwindigkeitsverteilung in ein neues Diagramm abgespeichert. Das Diagramm lässt sich in einem zweiten Fenster außerhalb des GUI's öffnen und bearbeiten (vgl. Abbildung 16).

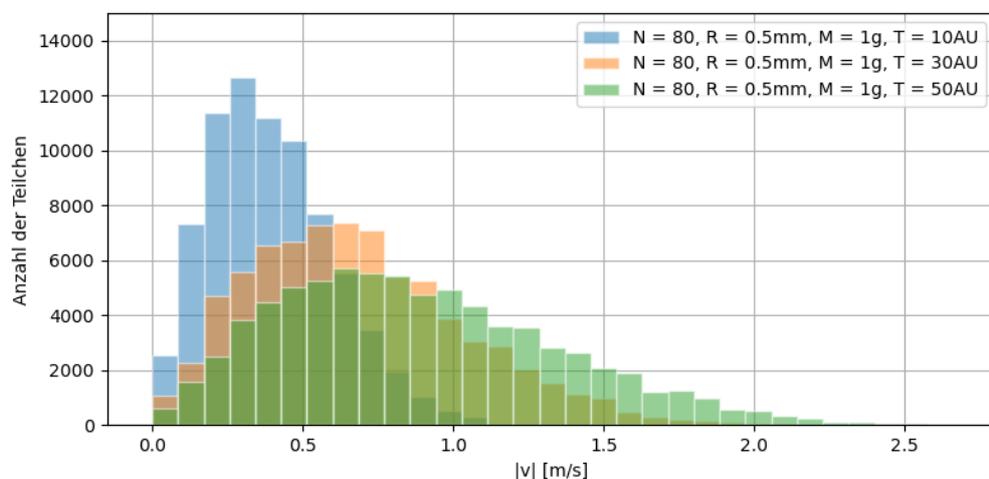


Abbildung 16: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Temperaturen

Lernende können mithilfe der Vergleichsfunktion ihre eigenen physikalischen Konzepte mit den Ergebnissen der Simulation vergleichen und durch Diskutieren der Abweichungen weiterentwickeln.

Um die Simulationsergebnisse interpretieren zu können werden im letzten Teil dieses Kapitels die Limitierungen des zugrunde liegenden Computermodells diskutiert.

5.4. Limitierungen des Simulationsmodells

Ziel der Simulation ist es, das physikalische Modell der kinetischen Gastheorie möglichst exakt abzubilden und gleichzeitig dem Lernenden, durch die graphische Darstellung der Ergebnisse, einen neuen Weg der Erkenntnisgewinnung zu ermöglichen. Um den Prozess der Erkenntnisgewinnung dabei förderlich zu gestalten und die Entwicklung von Fehlvorstellungen durch das Simulationsmodell zu vermeiden, müssen die Limitierungen des Modells in die Interpretation der Simulationsergebnisse miteinbezogen werden.

Ein wesentlicher Unterschied des Simulationsmodells zum physikalischen Modell des idealen Gases, sind die betrachteten Raumdimensionen. Im physikalischen Modell des idealen Gases, welches als Grundlage der Maxwell-Boltzmann-Verteilung dient, wird die Teilchenbewegung im dreidimensionalen Raum betrachtet. Hingegen wird im Simulationsmodell von einer zweidimensionalen Betrachtung der Teilchenbewegung ausgegangen. Die Reduzierung des Problems um eine Dimension vereinfacht zwar die Darstellung, wirkt sich aber auch auf die Form der Geschwindigkeitsverteilung aus, da bei der Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten die Normalverteilung der dritten Raumrichtung entfällt. Auch bei der Berechnung der Häufigkeit der Geschwindigkeitsbeträge wird nicht mehr über ein Kugelschalenvolumen, sondern über ein Kreisring integriert, wodurch sich ebenfalls die Form der Geschwindigkeitsverteilung verändert. Die Geschwindigkeitsverteilung bei einer zweidimensionalen Betrachtung hat die Form

$$p(v) = 2\pi v \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right) \cdot \exp\left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right).$$

Aus der Größenordnung der Simulationsparameter ergibt sich eine weitere Limitierung der modellbasierten Betrachtung des Problems.

Um den Vergleich mit dem Modellgasapparat zu ermöglichen wurden die Parameterwerte entsprechend angepasst. Auch wenn die Simulation in mikroskopischer Größenordnung im Bereich von Gasatomen bzw. -molekülen erfolgen würde, würde sich die Teilchenbewegung wegen der hohen Geschwindigkeiten der Teilchen nicht darstellen lassen und ebenfalls eine Modifikation erfordern.

Durch die Wahl der Größenordnung musste der Proportionalitätsfaktor angepasst werden, wodurch die Temperatur zu einer willkürlichen Einheit wurde.

Die Simulation beschreibt also modellhaft die Bewegung makroskopischer Teilchen, mit Teilchengeschwindigkeiten im Bereich alltäglich erfahrbarer Geschwindigkeiten. Um Fehlvorstellungen bei Lernenden zu vermeiden, muss diese reduzierte Darstellung diskutiert werden und auf die tatsächlichen Größenordnungen von Teilchen im Bereich atomarer Einheiten und Teilchengeschwindigkeiten von mehreren hundert bis über tausend Meter pro Sekunde bei gegebenen Temperaturen hingewiesen werden.

Durch das Zuweisungsverfahren der Teilchengeschwindigkeiten (vgl. Abbildung 13, Zeile 33) als Startwerte der Simulation, besitzen die Teilchen zu Beginn der Simulation alle denselben Geschwindigkeitsbetrag. Erst durch Stöße zwischen den Teilchen werden die Beträge über die Zeit statistisch verteilt. Dies lässt sich auch anhand der momentanen Geschwindigkeitsverteilung zu Beginn der Animation beobachten.

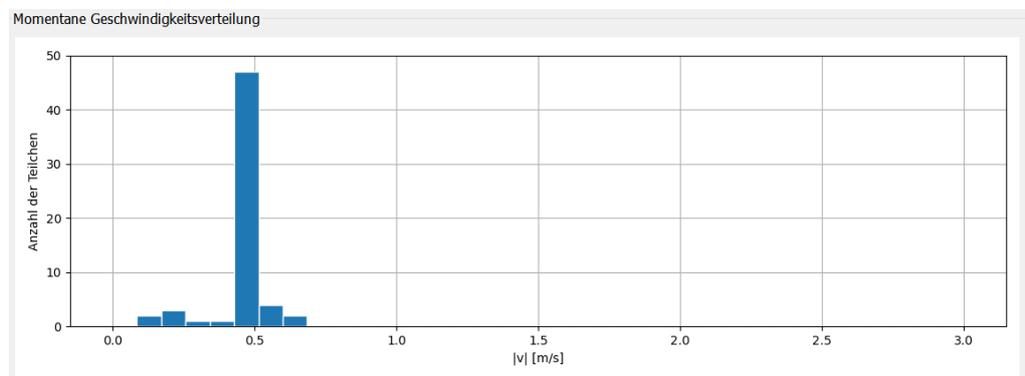


Abbildung 17: Momentane Geschwindigkeitsverteilung zu Beginn der Animation

Da sich die anfängliche Geschwindigkeitsverteilung aus Abbildung 17 im finalen Bild der Animation, für hohe Temperaturen und geringe Teilchenzahlen bemerkbar macht, wurde eine Anpassung bei dem Sammeln der Daten für die aufsummierte Verteilung vorgenommen. Die Daten der Geschwindigkeiten für die aufsummierte Geschwindigkeitsverteilung werden erst erzeugt, nachdem einige Zeitschritte vergangen sind und sich die Geschwindigkeitsbeträge verteilt haben.

Führt man die Simulation für eine geringe Teilchenzahl bei einem großen Kasten durch, kommt es zu wenig Stößen zwischen den Teilchen. Die aufsummierte Geschwindigkeitsverteilung weicht dadurch von der Maxwell-Boltzmann-Verteilung ab. Dies liegt vor allem daran, dass es sich um eine statistische Verteilungsfunktion handelt, die nur für die Betrachtung großer Teilchenzahlen oder die Betrachtung über einen langen Zeitraum angenähert werden kann. Beides trifft im Falle der niedrigen Teilchenzahl in Bezug zur Kastengröße nicht zu. Der Zeitraum der Simulation beträgt $t = 10s$ und lässt sich im GUI nicht verändern.

Im Folgenden ist das Simulationsergebnis verschiedener, exemplarischer Teilchenzahldichten n abgebildet. Die Simulationen wurden für

$$n_1 = \frac{N}{A_1} = \frac{80}{400cm^2} = 0,2cm^{-2} \quad \text{und} \quad n_2 = \frac{N}{A_2} = \frac{80}{25cm^2} = 3,2cm^{-2}$$

durchgeführt.

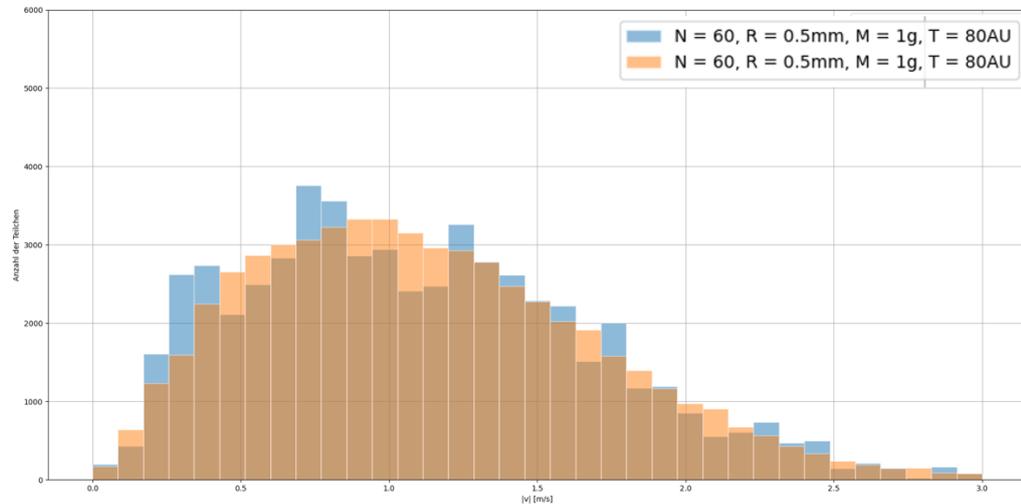


Abbildung 18: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung für verschiedene Teilchenzahldichten n_1 (blau) und n_2 (orange)

5.5. Vergleich zwischen Simulation und Versuch

Um die Ergebnisse der verschiedenen Methoden miteinander zu vergleichen, bietet es sich an, die Unterschiede der zugrundeliegenden Modelle zu dem physikalischen Modell des idealen Gases zu untersuchen. Die Frage die beantwortet werden soll, ist, wie genau der Modellgasapparat bzw. das Simulationsmodell das physikalische Modell abbildet und wie mithilfe der unterschiedlichen Modelle die Versuchs- bzw. Simulationsergebnisse erzeugt werden.

Zunächst fällt auf, dass ein wesentlicher Unterschied zwischen den Modellen die betrachteten Raumdimensionen ist. Das Simulations-Modell beschränkt sich auf zwei Dimensionen, wodurch eine andere Form der Verteilungsfunktion entsteht. Da im zweidimensionalen Fall aus dem quadratischen Faktor der Geschwindigkeit ein linearer Faktor wird, verschiebt sich das Maximum der Verteilung zu einer geringeren Geschwindigkeit:

Aus der Bedingung für die wahrscheinlichste Geschwindigkeit $dp(v)/dv = 0$, also dem Maximum der Verteilung folgt

$$\hat{v}_{3D} = \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \quad \text{und} \quad \hat{v}_{2D} = \sqrt{\frac{k_B T}{m}} .$$

Betrachtet man neben den Raumdimensionen die Eigenschaften des idealen Gases (vgl. Kapitel 3.2.1), werden diese von der Simulation genauer abgebildet als von dem Modellgasapparat. Die Wechselwirkung der Teilchen innerhalb des Modellgasapparats beschränken sich nicht nur auf elastische Stöße, sondern umfassen zudem Reibungskräften zwischen den Teilchen und Wänden, außerdem wirkt auf die Teilchen eine Erdanziehungskraft. Hinzu kommt noch, dass es sich bei den Glaskügelchen nicht um Massepunkte handelt, sondern um ausgedehnte Massen, die in Eigenrotation versetzt werden können. Beide Eigenschaften weichen von der idealisierten Beschreibung des idealen Gases ab.

In der Simulation wechselwirken die Teilchen ausschließlich durch elastische Stöße. Zwar handelt es sich bei den Teilchen nicht um Punktmasse, jedoch können die Teilchen durch die Definition der glatten Oberfläche nicht in Rotation versetzt werden.

Durch die Reibungskräfte innerhalb des Modellgasapparats, müssen die Teilchen kontinuierlich durch die Rüttelplatte beschleunigt werden, um eine annähernd konstante Temperatur zu simulieren. In der Simulation wird diese durch die Anfangsbedingung der mittleren Teilchengeschwindigkeit festgelegt und bleibt während der Simulation nahezu konstant. Lediglich Rundungsfehler bei den Berechnungen führen zu minimalen Abweichungen.

Bei dem Messverfahren im Versuch, wird mithilfe der Registerkammer die Geschwindigkeiten der austretenden Glaskügelchen qualitativ erfasst. Dabei kommt es zu Messunsicherheiten, da die Kügelchen regelmäßig auf die Trennwände der Kammern treffen und abgelenkt werden. Die Teilchenzahl in der Kammer beträgt $N \approx 200$. Bei einer Messung von 15min verlassen ca. 1.200 Kügelchen die Kammer. Um die Teilchenzahl annähernd konstant zu halten werden in Minutenabständen regelmäßig bei laufendem Betrieb der Rüttelplatte Kügelchen entsprechend der Austrittsrate nachgefüllt.

Die Teilchenzahl in der Simulation bleibt konstant und kann beliebig verändert werden. Die einzige Limitierung der Teilchenzahl wird durch die Rechenleistung und die damit verbundene Rechenzeit gegeben. Bei einer Laufzeit von $T = 10s$, einer Schrittweite von $dt = 10s$ und einer Teilchenzahl von $N = 100$, können mit wenigen Sekunden Rechenzeit $N \cdot \frac{T}{dt} = 100.000$ Geschwindigkeitswerte berechnet werden. Die Limitierungen aufgrund des Zuweisungsverfahrens der mittleren Geschwindigkeit wurde im letzten Kapitel (5.4) diskutiert.

Im Vergleich zwischen Versuchs-Modell und Simulations-Modell stellt man fest, dass mit der Simulation in wesentlich kürzerer Zeit wesentlich mehr Werte gewonnen werden können, die schlussendlich zu einem genaueren Abbild der Geschwindigkeitsverteilung sorgt. Dies geschieht jedoch unter der Einschränkung, dass die Geschwindigkeitsverteilung für einen zweidimensionalen Fall simuliert wird. Außerdem ist klar in den letzten Kapiteln klar geworden, dass die Simulation keinesfalls ein genaues Abbild des physikalischen Modells und noch viel weniger der Realität darstellt.

Auch wenn die Größenordnungen des Simulations-Modells an die des Versuchs-Modells angepasst wurden, ist ein Vergleich der Ergebnisse nur bedingt möglich. Dies liegt vor allem an der Einheit der Temperatur, die sich in beiden

Fällen nicht bestimmen lässt. Der Vergleich zwischen den Modellen erfordert jedoch ein hohes physikalisches Verständnis und kann daher zur Erkenntnisgewinnung beitragen.

Durch die verschiedenen Methoden der Erkenntnisgewinnung werden abseits der Datengewinnung Kompetenzen vermittelt die in diesem Vergleich nicht berücksichtigt werden. Es geht bei dem Vergleich nicht darum eine der Methoden für mehr oder weniger geeignet zu erklären, sondern lediglich darum, die wesentlichen Unterschiede der Datenerzeugung zu beschreiben.

6. Erste Erprobung

In der ersten Erprobung wurde eine Lernumgebung, die auf Grundlage des Simulations-Programms der Geschwindigkeitsverteilung entworfen wurde, mit einer Stichprobe aus Lehramtsstudierenden des Faches Physik evaluiert. Die Frage, die durch die Erprobung untersucht werden sollte, war, ob das Arbeiten mit dem Simulations-Programm die Kompetenzen der Lehramtsstudierenden im Bereich der Modellierung und Simulation fördert.

6.1. Forschungsmethode

Die Untersuchung erfolgte am 17. Juni 2021 um 13:30Uhr im Rahmen des Demonstrationspraktikums und nahm ungefähr 3 Stunden in Anspruch. An der Untersuchung nahmen sieben Lehramtsstudierende im Fach Physik teil. Fokus der Untersuchung lag darauf, die Kompetenzentwicklung der Studierenden während dem Ablauf stufenweise zu erfassen, um den Einfluss der einzelnen Phasen untersuchen zu können.

Um die Forschungsfrage beantworten zu können, wurde eine quantitative Forschungsmethode in Form eines dreiteiligen Fragebogens für die Studierenden entworfen. Um die Entwicklung des Kompetenzniveaus im Bereich der Modellierung und Simulation der Studierenden im Ablauf der Erprobung zu messen, wurden Fragen mit einer 6-stufigen Likert-Skala formuliert.

Die Fragen zur Erfassung der Kompetenzen orientieren sich zum Großteil an den Fragen aus dem Fragebogen der Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen für den Kompetenzbereich Simulation und Modellierung. Die Arbeitsgruppe hat digitale Kompetenzen für das Lehramt in Naturwissenschaften (DiKoLAN) formuliert und in verschiedene Bereiche unterteilt. Unter anderem den Bereich Simulation und Modellierung. Die Fragebögen enthalten die Kompetenzerwartung, die im Artikel Digitale Basiskompetenzen formuliert sind (Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen, 2020).

Der eingesetzte Fragebogen unterteilt sich in drei Unterfragebögen, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten des Lernprozesses während der Erprobung abgefragt wurden. Um den Lernfortschritt zu erfassen, wiederholten sich die Fragen zum Kompetenzniveau in allen drei Bögen. Die Fragebögen wurden zwischen den Phasen der Erprobung handschriftlich von den Studierenden ausgefüllt. Der eingesetzte Fragebogen ist im Anhang beigefügt.

Der erste Teil der Fragebögen wurde vor dem Arbeitsauftrag ausgegeben und sollte das Ausgangsniveau und die Vorkenntnisse im Bereich der Modellierung und Simulation erfassen. Er beinhaltet Fragen zu den Attributen Vorwissen und Interesse im Bereich der Modellbildung und Programmierung und Fragen zum Kompetenzniveau.

Der zweite Teil der Fragebögen wurde nach Abschluss der Arbeitsphase, vor Beginn der Ergebnissicherung ausgeteilt. Neben dem Frageteil zum Kompetenzniveau beinhaltete dieser Fragebogen auch Fragen zum Arbeitsauftrag und dem Umgang mit dem Programm.

Der dritte Teil der Fragebögen wurde nach der Ergebnissicherung und den Informationen zur Funktionsweise des Programms ausgeteilt. Neben dem Frageteil zum Kompetenzniveau wurden auch in diesem Teil explizit Fragen zum Inhalt bezogen auf den Inhalt vorangegangenen Phase gestellt.

Zum Zeitpunkt der Untersuchung herrscht die COVID-19-Pandemie. Die staatlichen und institutionellen Auflagen zum Gesundheitsschutz machten eine umfangreiche Untersuchung einer großen Stichprobe nicht möglich. Eine weitere Einschränkung kam durch die Anbindung zum Modellgas-Versuch hinzu. Da essentieller Bestandteil der Erprobung der Vergleich zwischen Simulationsmodell und Modellgasapparat war, konnten nur Studierende an der Erprobung teilnehmen, welche das Demonstrationspraktikum schon erfolgreich abgeschlossen haben. Die Stichprobe umfasst acht Lehramtsstudierende. Alle Studierenden hatten bis dahin den Modellgas-Versuch schon erfolgreich durchgeführt und waren mit den physikalischen Inhalten der kinetischen Gastheorie vertraut.

6.2. Ablauf

Vor der Erprobung erhielten die Studierenden per E-Mail eine Anleitung zur Installation der Entwicklungsumgebung Spyder und wurden mit der Installation beauftragt. Die Entwicklungsumgebung Spyder eignet sich zur Entwicklung und Ausführung von Python-Dateien und lässt sich unkompliziert auf den meisten Betriebssystemen installieren, abgesehen von z.B. Android, iOS und iPadOS.

Die Python-Datei der Simulation, wurde erst zu Beginn der Erprobung ebenfalls per E-Mail zur Verfügung gestellt. Dadurch wurde gewährleistet, dass die Kompetenzentwicklung der Studierenden im Umgang mit der Software vollständig erfasst werden konnte. Andernfalls wäre unsicher gewesen, in welchem Maße sich die Studierenden schon im Vorfeld mit der Simulation befasst hätten.

Der Ablauf der Erprobung wurde auf Grundlage der wissenschaftlichen Erkenntnisse aus den vorherigen Kapiteln entworfen und gliedert sich im Wesentlichen in zwei Teile.

Im ersten Teil der Erprobung führten die Studierenden Simulationen mit dem Programm durch und diskutierten die Simulationsergebnisse. Ihnen stand dabei ein Arbeitsblatt und eine Bedienungsanleitung zur Verfügung, welche die Arbeit mit dem Programm strukturieren sollte und die Studierenden zielgerichtet mit dem Aufbau und den Funktionen des GUI's vertraut machen sollte.

Da das Demonstrationspraktikum in der Regel in Zweier-Gruppen absolviert wird, arbeiteten die Studierenden in dieser Arbeitsphase ebenfalls in Partnerarbeit. Aufgrund der Stichprobengröße von sieben Studierenden, gab es eine Dreiergruppe. Die Bearbeitungszeit richtete sich nach dem Bedürfnis der Studierenden, wurde zunächst aber auf eine Stunde begrenzt.

Die Ergebnisse der Arbeitsphase wurden von den Gruppen auf der Plattform Mural dokumentiert. Mural stellt dem Nutzenden eine große virtuelle Arbeitsfläche zur Verfügung, auf der mehrere Personen gleichzeitig arbeiten und ihre Ergebnisse anschaulich präsentieren können. Zur Präsentation der Geschwindigkeitsverteilungen bietet Mural die Möglichkeiten, Verteilungen in Form von Bilddateien per Drag-and-Drop auf die Arbeitsfläche hinzuzufügen. Die

Präsentation und Sicherung der Ergebnisse fanden erst im zweiten Teil der Erprobung statt.

Während der Arbeitsphase wurden vorrangig technische Probleme geklärt, es sollten ansonsten nach Möglichkeit keine weiteren Fragen zum Inhalt beantwortet werden, um den Einfluss auf die Arbeit der Studierenden zu minimieren.

Im zweiten Teil der Erprobung erfolgte die Besprechung der Ergebnisse. Die Gruppen sammelten sich im Plenum und präsentierten sich gegenseitig ihre Ergebnisse in Mural über einen Projektor. Die Präsentation sowie die Diskussion der Ergebnisse wurden moderiert.

Im Anschluss der Ergebnissicherung wurde die Funktionsweise des Simulations-Programms in groben Zügen über eine Präsentation erläutert. Der Fokus lag dabei auf den wesentlichen mathematischen Überlegungen hinter dem Simulations-Modell und weniger auf der Übersetzung in Python.

Die gesamte Erprobung wurde durch eine Präsentation unterstützt. Die Präsentation, die Ergebnisse der Gruppenarbeit, sowie das Arbeitsblatt und die Bedienungsanleitung finden sich auf der beigefügten CD.

6.3. Begründung der Forschungsmethode

In Kapitel 4.2 wurde diskutiert, welche Bedeutung die Strukturierung der Lernumgebung für die Entwicklung von Modellkompetenzen beim simulationsbasierten Lernen besitzt. Durch die getrennte Betrachtung der einzelnen Phasen, kann der Einfluss der Lernumgebung genauer untersucht werden und einzelne Aspekte die für eine Kompetenzentwicklung notwendig sind hervorgehoben werden. Zudem wurde in den Kapiteln 2.1 und 4.2 davon gesprochen, dass für Lernende das bei Simulationen zugrundeliegende Modell in der Regle nicht zugänglich bzw. ersichtlich ist und dadurch modellspezifische Eigenschaften naiv in die Realität übernommen werden. Landriscina spricht in diesem Zusammenhang von einem Problem der Opazität beim simulationsbasierten Lernen (Landriscina, 2013). Durch die getrennte Betrachtung der Vermittlung der Funktionsweise des Programms durch den dritten Teil des Fragebogens, kann dieses Problem untersucht werden. Dieses Vorgehen könnte zum Beispiel die

Frage beantworten: „Ist es ausreichend, die Simulation mit einem Arbeitsblatt zu strukturieren oder kann ein Zuwachs der Kompetenzen nur durch die Aufklärung über das zugrunde liegende Computermodell erreicht werden?“

Von dem Ergebnis dieser Analyse hängt unter anderem ab, in welcher Form das ausgearbeitete Lehr-Lern-Material im Demonstrationspraktikum eingesetzt werden kann. Außerdem können durch diese Untersuchung Informationen gewonnen werden, die Aufschluss über den Lernprozess beim Arbeiten mit Simulationen geben.

6.4. Ergebnisse und Auswertung

6.4.1. Kompetenzentwicklung

Die Ergebnisse der Kompetenzentwicklung sind im Folgenden dargestellt. Dabei wurden für jeden Teil die Antworten der Teilnehmer zu jeder Frage gemittelt und graphisch aufgetragen. Je größer die Ausprägung, desto höher ist das gemessene Kompetenzniveau. Die Ausprägung reicht von den Werten 0 bis 5.

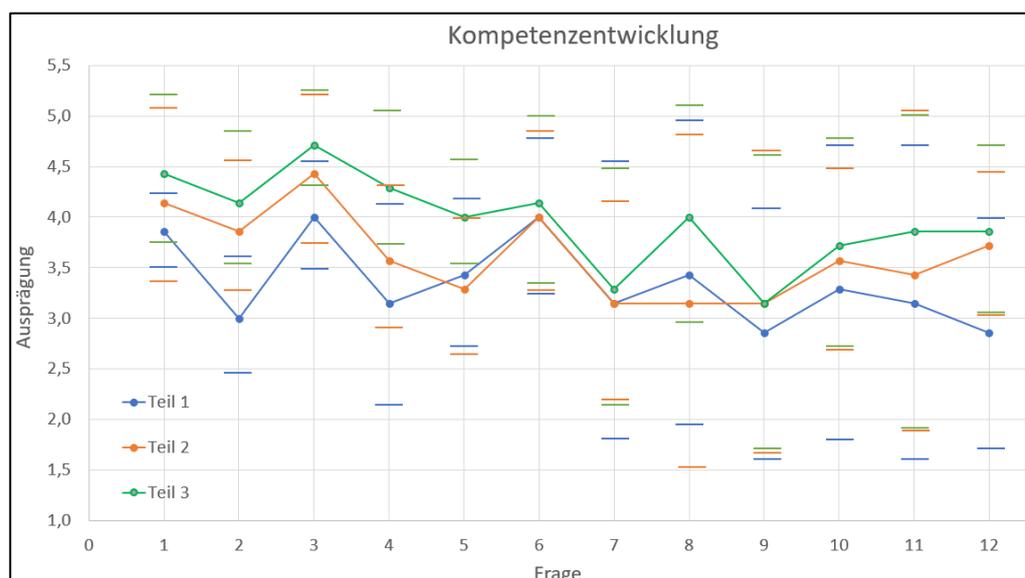


Abbildung 19: Ergebnis zur Kompetenzentwicklung

Die Punkte repräsentieren den Mittelwert der Ergebnisse aller Teilnehmer zu der jeweiligen Frage. Die Verbindungen der Punkte sind aus Gründen der Übersichtlichkeit aufgetragen und treffen keine inhaltlichen Aussagen. Die

Standardabweichung der Mittelwerte ist durch die gleichfarbigen Balken aufgetragen.

Zunächst fällt auf, dass die Standardabweichung der Mittelwerte im Vergleich zum Abstand innerhalb eines Items sehr hoch ist. Dies ist mitunter der kleinen Stichprobe geschuldet. Die Signifikanz der Messwerte reicht demzufolge nicht aus, um eine eindeutige Aussage über den Einfluss der Simulation auf die Kompetenzentwicklung zu treffen. Es lassen sich jedoch im Bereich gewisser Kompetenzen Tendenzen erkennen, welche nun diskutiert werden sollen.

Die Fragen 1-3 beziehen sich auf die Fähigkeit die Begriffe und Prozesse des Modellierens beschreiben zu können. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass sich die Vorstellungen der Studierenden über die Begriffe und Prozesse weiterentwickelt haben. Da sich die Studierenden in der Arbeitsphase intensiv mit dem Prozess der Simulation auseinandergesetzt haben und auch im zweiten Teil der Erprobung die verschiedenen mathematischen, physikalischen und computergestützten Modelle diskutiert haben, ist das Ergebnis auch begründbar.

Frage 4 und 5 beziehen sich auf die Kompetenz des Übersetzens mathematischer Modelle in computergestützte Modelle. Der auffällige Anstieg zwischen der zweiten und dritten Erhebung kann sich dadurch erklären lassen, dass zwischen den Erhebungen die Funktionsweise der Simulation beschrieben wurde und das zugrunde liegende mathematische Modell diskutiert wurde.

Frage 6 bezieht sich auf die Fähigkeit physikalische Problemstellungen zu nennen, in denen Simulation den Erkenntnisgewinn fördern kann. Hier lässt sich kein Anstieg der Kompetenzen messen. Um in diesem Bereich möglicherweise einen Anstieg zu erreichen, müssten der Prozess der Erkenntnisgewinnung über Modelle intensiver beleuchtet werden. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass das Arbeiten mit Simulationen diesen Kompetenzbereich nicht fördern kann. Um Modellierung und Simulation im schulischen Kontext gewinnbringend anwenden zu können, muss sich die Lehrkraft über den Prozess der Erkenntnisgewinnung über Computermodelle im Klaren sein, um daraus mögliche Anwendungsbeispiele ableiten zu können. Es liegt nahe, dass diese Kompetenz im Prozess der Modellierung vermittelt wird und weniger im Umgang mit Simulationen.

Frage 7 und 8 beziehen sich auf das Nennen verschiedener Fähigkeiten und Voraussetzungen zum Modellieren. Da man aufgrund der ähnlichen Fragestellung auch eine ähnliche Ausprägung erwarten würde, könnte die Ursache der verschiedenen Ausprägungen in der Formulierung der Fragen liegen. Es ist nicht möglich weitere Aussagen zu treffen. Die Güte der Fragen sollte vor erneuter Verwendung genauer untersucht werden.

Frage 9 bezieht sich auf die Fähigkeiten eine Modellierung vorzunehmen. Der geringe Anstieg dieser Kompetenz liegt im Bereich des Erwartbaren. Auch wenn das Simulieren und Auswerten von Simulationsergebnissen als Teil des Modellierens verstanden wird, kann das Erstellen von Computermodellen mit allen zugehörigen Schritten nur begrenzt vermittelt werden. Um die Entwicklung in diesem Kompetenzbereich zu fördern, müsste die Lernumgebung mit Fokus auf Modellierung gestaltet werden. Das Ergebnis lässt darauf schließen, dass der Fragebogen tatsächlich auch das misst, was er messen soll, nämlich die Kompetenzen, welche die Simulation betreffen.

Frage 10 bezieht sich auf die Fähigkeit physikalische Szenarien zu nennen, in denen mit Simulationen und Modellierung gearbeitet wird. Neben dem physikalischen Kontext der Erprobung, also dem Beschreiben von Gasen, könnte der leichte Anstieg durch ein gefestigteres Konzept von Simulationen und Modellierung bei den Lernenden begründet werden.

Bei den Fragen 11 und insbesondere bei Frage 12 lässt sich ein starker Anstieg feststellen. Die Fragen beziehen sich auf die Fähigkeiten der Auswertung und Interpretation von Simulationsergebnissen. Da der Fokus der Lernumgebung auf diesen Kompetenzen lag und insbesondere die Limitierungen in der Ergebnissicherung intensiv von den Studierenden diskutiert wurden, lässt sich dieser Anstieg durchaus begründen.

Betrachtet man die Ausgangsfrage, also ob das Arbeiten mit dem Simulationsprogramm die Kompetenzen der Lehramtsstudierenden im Bereich der Modellierung und Simulation fördert, so lassen sich Tendenzen beobachten. Die Kompetenzen unter dem Begriff der Simulation scheinen durch das Arbeiten mit dem Programm gefördert zu werden. Kompetenzen im Bereich der Modellierung, insbesondere das von Modellen, können durch das Arbeiten mit der

Simulation nur begrenzt gefördert werden. Soll der Fokus auf den Kompetenzen der Modellierung liegen, müssten die Lernenden vermutlich stärker in den Modellbildungsprozess eingebunden werden. Die geringe Stichprobengröße lässt es jedoch nicht zu, signifikante Aussagen über die Kompetenzentwicklung zu treffen. Hinzu kommt, dass sich der Fragebogen für DiKoLAN in der Erprobungsphase befindet. Die Validität des Fragebogens muss daher kritisch betrachtet werden, auch wenn scheint, dass die Fragen in vielen Bereichen die Aspekte des Items abbilden.

6.4.2. Einfluss der Ergebnissicherung und Funktionsweise des Programms

Bei den Ergebnissen in Abbildung 19 fällt auf, dass ein wesentlicher Teil der Kompetenzentwicklung in der zweiten Phase der Erprobung stattgefunden hat. Die Ergebnissicherung und insbesondere der Einblick in die Funktionsweise des Programms scheinen demnach nicht unerheblich für die Kompetenzentwicklung zu sein. Dies bestätigten auch die Ergebnisse aus dem dritten Teil des Fragebogens, in dem sich einige Fragen auf die Ergebnissicherung und den Einblick bezogen.

Alle Studierenden stimmten zu, dass der Einblick in die Funktionsweise des Programms ihr Verständnis über Simulationen gefördert hat. Zudem stimmten alle Studierenden der Aussage nicht zu, dass der Einblick in die Funktionsweise überflüssig war. Der Umfang wurde von den Studierenden als angemessen empfunden.

Dies lässt darauf hindeuten, dass es für die Entwicklung eines besseren Verständnisses von Simulationen nicht nötig ist, tiefe Kenntnisse über den Programmcode zu vermitteln. Vielmehr scheint es für das Entwickeln eines Modellverständnisses ausreichend zu sein, die mathematischen Gedanken hinter dem Computermodell zu skizzieren und nur grundlegende Ideen zu vermitteln. Es sei jedoch anzumerken, dass sich dieses Erkenntnis zunächst auf die verwendete Simulation bezieht. Inwiefern sich dies auf andere Simulationen übertragen lässt, kann nur bedingt beantwortet werden und benötigt Untersuchungen mit anderen Simulationen.

Bei der Frage, an welcher Stelle des Simulationsprozesses ein Einblick in die Funktionsweise des Programms gegeben werden sollte, lässt sich aus den Ergebnissen der Fragebögen nicht eindeutig ableiten. Ein Teil der Studierenden hätte gerne schon während der Arbeitsphase mehr über die Funktionsweise des Programms gewusst und ein anderer Teil der Studierenden hielt dies nicht für erforderlich. Beide Wege sollten in der Praxis in Betracht gezogen und in weiteren Untersuchungen beobachtet werden.

6.4.3. Bezug zum Modellgas-Versuch

Aus den Ergebnissen sowohl des zweiten Fragebogens, als auch aus den Ergebnissen des dritten Fragebogens geht hervor, dass es sich als besonders förderlich für die Weiterentwicklung des Modellverständnisses der Studierenden erwiesen hat, einen starken Fokus auf den Vergleich zwischen dem Simulationsmodell und dem Modellgasapparat zu legen. Sowohl in der Arbeitsphase, als auch in der Ergebnissicherung wurden die Modelle intensiv diskutiert und miteinander verglichen. Diese Erkenntnis spricht für den Modellgasversuch als förderliche Lernumgebung im Bereich der Simulation.

6.4.4. Interesse und Motivation

Vergleicht man das Interesse und die Motivation der Studierenden vor und nach der Erprobung, können nur bedingt Veränderungen wahrgenommen werden. Studierende, die vor der Erprobung ein hohes Interesse am Thema der Simulation und Modellierung angaben, besitzen auch nach der Erprobung eine höhere Motivation, als Studierende, die ein geringes Interesse angegeben hatten. Der Interessenszuwachs durch das Arbeiten mit der Simulation fiel eher gering aus. Mögliche Gründe hierfür könnten in der Handhabung des Programms liegen, die zu dem Zeitpunkt noch stellenweise umständlich war. Gründe könnten aber auch außerhalb der Simulation liegen, zum Beispiel im Inhalt des Versuchs, aber auch an der allgemeinen Einstellung zur Nutzung von Computern in Lehr-Lern-Szenarios.

6.4.5. Niveauangemessenheit

Die Aufgabenstellung des Arbeitsblattes wurde von den Studierenden als verständlich empfunden und das Niveau als angemessen erklärt. Keiner der Studierenden fühlte sich während der Erprobung unter- bzw. überfordert.

Neben den diskutierten Limitierungen, handelt es sich bei dem untersuchten Lehr-Lern-Szenario um eine Untersuchungsumgebung, die viele unkontrollierbare Einflussfaktoren umfasst, welche durch die Forschungsmethode nicht ausgeschlossen werden konnte. Einige Faktoren sind zum Beispiel das Beziehungsgefüge zwischen der Lehrkraft und den Studierenden, der Auftritt der Lehrkraft, die Gestaltung der Präsentation, die Gestaltung der Ergebnissicherung oder institutionelle Rahmenbedingungen. Diese typischen Einflussfaktoren in Lehr-Lern-Szenarien besitzen einen Effekt auf den Lernerfolg und lassen sich nur schwer reduzieren. Bei der Bewertung der Messergebnisse und den daraus resultierenden Aussagen müssen diese Faktoren auf die Objektivität der Untersuchung berücksichtigt werden.

Neben diesen Limitierungen lassen sich jedoch Tendenzen erkennen, die zum einen wissenschaftliche Erkenntnisse im Bereich des simulationsbasierten Lernens bestätigen (vgl. Kapitel 4.2) und zum anderen Vermutungen zur Gestaltung einer förderlichen Lernumgebung zulassen (vgl. Kapitel 6.4.2). Außerdem wird deutlich, um den Kompetenzbereich der Modellierung vollständig abzudecken und Studierende damit zu befähigen Modellierung als Weg der Erkenntnisgewinnung in ihren eigenen Unterricht zu integrieren, ist die Arbeit mit Simulationen nicht ausreichend. Um an dieser Arbeit anzuknüpfen, könnten in Zukunft Lernumgebungen gestaltet werden, welche Studierenden damit befähigt computergestützten Modellierung selbstständig durchzuführen bzw. als Unterrichtsmethode einzusetzen.

Sicherlich können aus den Ergebnissen keine allgemeingültigen Aussagen über das Arbeiten mit Simulationen abgeleitet werden, der Einfluss der Gestaltung und der Transparenz des Simulations-Modells spielen dazu vermutlich eine zu große Rolle. Die Ergebnisse skizzieren jedoch Tendenzen, die als Grundlage weiterer Forschung dienen können und Lehrenden Ideen zur Gestaltung einer förderlichen Lernumgebung geben.

7. Simulation der Barometrischen Höhenformel

Der zweite Teil des Modellgas-Versuchs befasst sich mit der quantitativen Überprüfung der Barometrischen Höhenformel. Zu diesem Thema wurde ebenfalls ein Simulations-Programm entworfen, welches das physikalische Modell der Teilchenbewegung als Grundlage zur Simulation verwendet. Die mathematische Grundlage, sowie die Funktionen des Programms werden im Folgenden vorgestellt.

7.1. Übersicht des Programms

Äquivalent zur Simulation der Geschwindigkeitsverteilung werden in dem Programm die Teilchenbewegung innerhalb eines definierten Kastens simuliert. Die Berechnung der Simulation basiert ebenfalls auf dem physikalischen Modell des idealen Gases. Im Unterschied zur Simulation der Geschwindigkeitsverteilung, bei der sich die Wechselwirkungen innerhalb des Kastens nur auf Stöße belaufen, wirkt bei der Simulation der Barometrischen Höhenformel innerhalb des Kastens eine Kraft auf die Teilchen äquivalent zur Erdanziehungskraft ein.

Die Animation der Teilchenbewegung wird in diesem Programm durch ein Balkendiagramm ergänzt, bei dem die Teilchen in Abhängigkeit der Höhe aufsummiert dargestellt werden.

Das Ergebnis der Simulation in Form der animierten Teilchenbewegung, sowie des animierten Balkendiagramms, werden ebenfalls in einem GUI dargestellt.

7.2. Mathematisches Modell

Die Berechnung der Teilchenbewegung, die über die Stöße untereinander und mit den Wänden des Gefäßes definiert wird, basiert auf den gleichen mathematischen Überlegungen, wie in Kapitel 5.2 zur Simulation der Geschwindigkeitsverteilung bereits beschrieben wurde.

Um das physikalische Modell hinter der Barometrischen Höhenformel abbilden zu können, muss auf die Teilchen eine konstante Kraft in y-Richtung äquivalent zur Erdbeschleunigung wirken. Die Teilchen bewegen sich dann zwischen den Stößen nicht mehr mit konstanter Geschwindigkeit, sondern beschleunigt, entsprechend dem Einfluss der wirkenden Kraft. Erweitert man die Bewegungsgleichung der Teilchen erhält man für den Ort $r(t)$ eines Teilchens

$$\vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t + \frac{1}{2} \vec{a} t^2 .$$

Setzt man diese Gleichung in die Bedingung einer Kollision zwischen zwei Teilchen (vgl. Kapitel 5.2)

$$|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = R_1 + R_2$$

ein, folgt ein kompliziertes Gleichungssystem, welches zur Bestimmung der Kollisionszeit gelöst werden müsste.

Ein einfacheres Verfahren ergibt sich aus dem Euler-Verfahren zur numerischen Lösung von Gleichungssystemen.

Mithilfe des Euler-Verfahrens wird die konstant beschleunigte Bewegung eines Teilchens über Zeitintervalle konstanter Geschwindigkeit beschrieben durch

$$\vec{r}(t + dt) \approx \vec{r}(t) + \vec{v}(t) \cdot dt .$$

Die Geschwindigkeit für den nächsten Zeitschritt ergibt sich dann aus

$$\vec{v}(t + dt) = \vec{v}(t) + \vec{a} \cdot dt .$$

Die Bewegung der Teilchen wird durch dieses Verfahren in Näherung beschrieben. Die Abweichung der Näherung hängt dabei von der Größe der Zeitintervalle ab. Je kleiner die Zeitintervalle, desto exakter die Lösung.

In Abbildung 20 und Abbildung 21 ist das Ergebnis des Verfahrens am Beispiel des freien Falls (ohne Luftreibung) für verschiedene Schrittweiten dargestellt. Die rote Linie ist das Ergebnis eines analytischen Berechnungsverfahrens nach

$$h(t) = h_0 + \frac{1}{2}gt^2$$

und die blaue Linie stellt das Ergebnis des Euler-Verfahrens dar. Man kann aus den Abbildungen deutlich erkennen, dass die Näherung durch das Euler-Verfahren für kleinere Schrittweiten exakter wird.

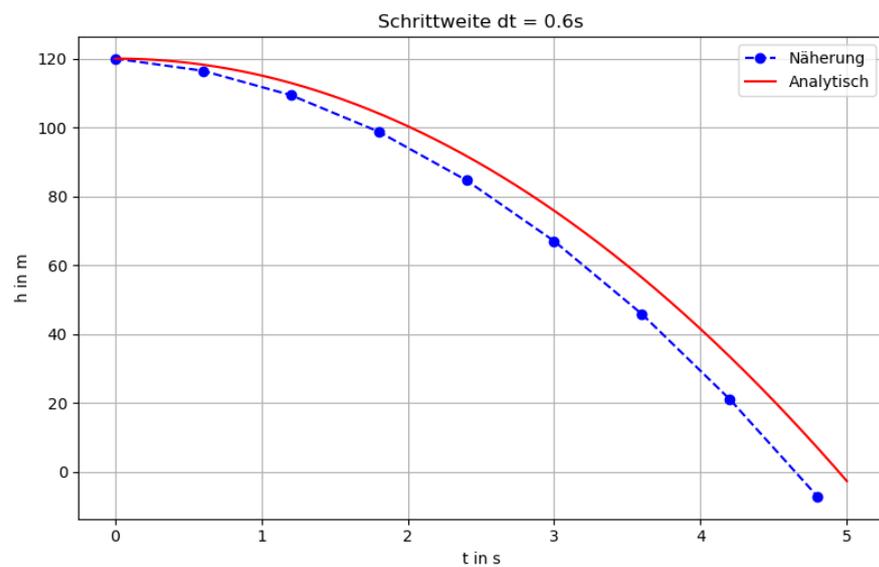


Abbildung 20: Vergleich Euler-Verfahren mit analytischem Verfahren für den freien Fall mit dt = 0,6s

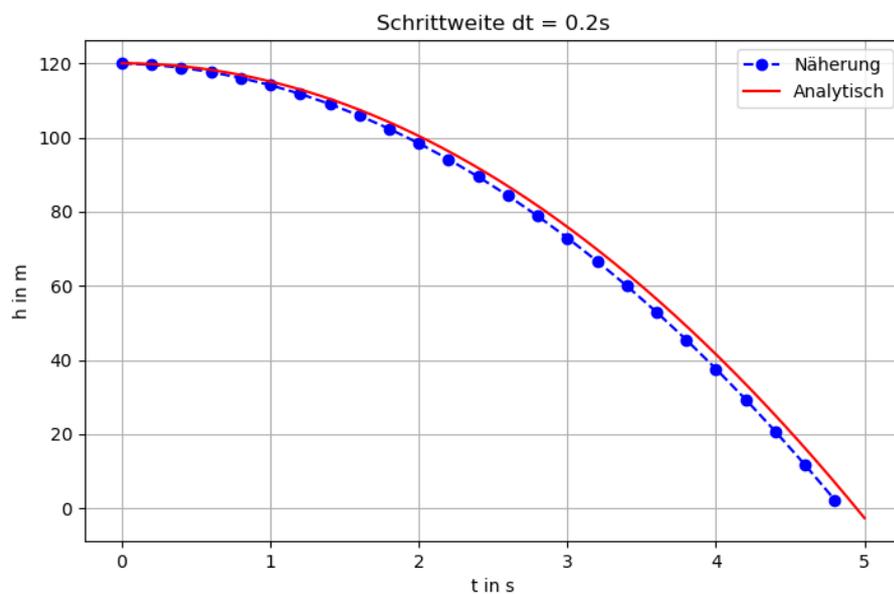


Abbildung 21: Vergleich Euler-Verfahren mit analytischem Verfahren für den freien Fall mit dt = 0,2s

Um mithilfe des Euler-Verfahrens die Berechnung der Teilchenbewegung im Simulations-Programm zu vereinfachen, wird die Bewegung der Teilchen im Zeitraum zwischen zwei Kollisionen mit konstanter Geschwindigkeit berechnet. Nach Berechnung der Kollision wird die y-Komponente der Geschwindigkeit eines Teilchens i gemäß

$$v_{i,y}(t + dt) = v_{i,y}(t) + g \cdot dt$$

neu berechnet. Das Zeitintervall dt beschreibt die Zeit, die zwischen den letzten zwei Kollisionen vergangen ist. Die Berechnung der Zeit bis zur nächsten Kollision wird mit der aktualisierten Geschwindigkeit vorgenommen. Da es sich bei den Kollisionen um Stöße zwischen Teilchen untereinander und Teilchen mit der Wand handelt, kommt es durch die hohe Teilchenzahl zu einer sehr großen Anzahl an Stößen im gesamten Zeitraum der Simulation. Die Zeitintervalle zwischen den Stößen sind dementsprechend sehr klein und das Verfahren kann somit als gute Näherung betrachtet werden.

Wie schon im Kapitel zur Simulation der Geschwindigkeitsverteilung, werden nun die Funktionen des Programms näher beschrieben.

7.3. Funktionen des Programms

Führt man das Programm aus, öffnet sich dem Benutzenden ein GUI über das die Simulationsergebnisse dargestellt werden und ähnlich wie beim Simulationsprogramm zur Geschwindigkeitsverteilung Simulationsparameter verändert werden können.

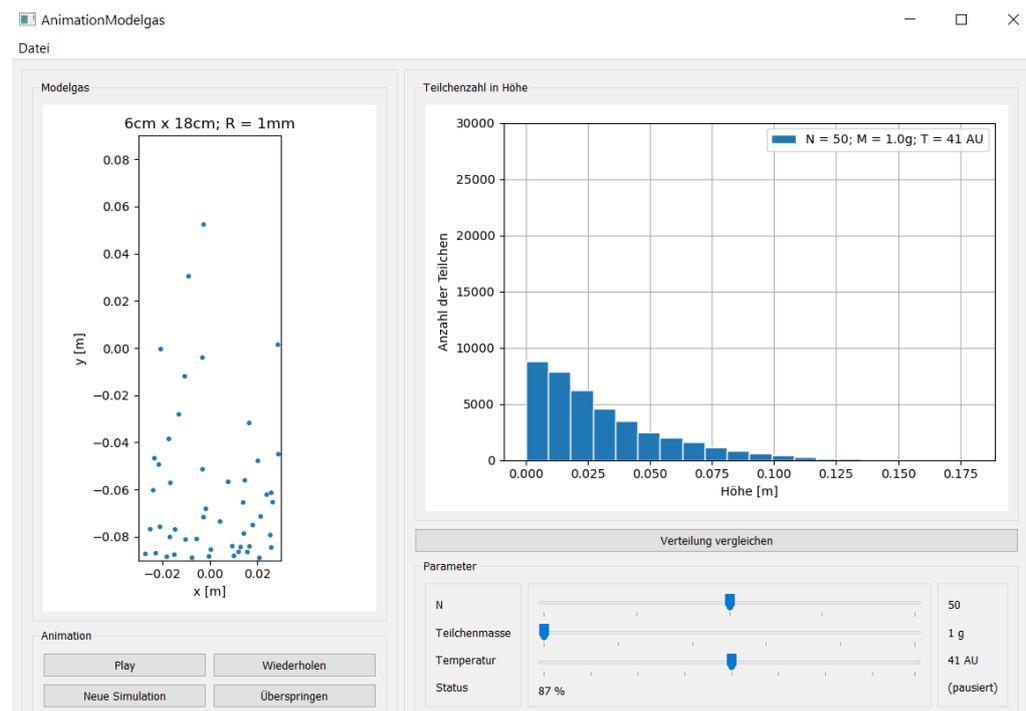


Abbildung 22: GUI für die Simulation der Barometrischen Höhenformel

7.4. Parameter der Simulation

Die Parameter bei der Simulation der Barometrischen Höhenformel (Abbildung 23) werden in gleicher Weise in den Programmcode implementiert wie dies bei der Geschwindigkeitsverteilung der Fall ist und ausführlich in Kapitel 5.3.1 beschrieben wurde. Im Vergleich zur Geschwindigkeitsverteilung wurden die Parameter um einige Größen reduziert, um die Arbeit mit dem Programm strukturierter und zielgerichteter zu gestalten. Außerdem wird dadurch ver-

hindert, dass die Berechnungszeit der Simulation zu groß wird, denn insbesondere für geringe Temperaturen finden viele Stöße statt, da die Teilchendichte am Boden des Kastens zunimmt.

Die Größenordnungen der Parameter orientieren sich wie schon bei der Simulation zur Geschwindigkeitsverteilung im Bereich des Modellgasapparats. Dies erlaubt die Ergebnisse der verschiedenen Modelle besser vergleichen zu können und die Bewegung der Teilchen zu veranschaulichen. Der Radius der Teilchen ist auf 1mm festgelegt und entspricht damit dem Radius der Glaskügelchen im Versuch.

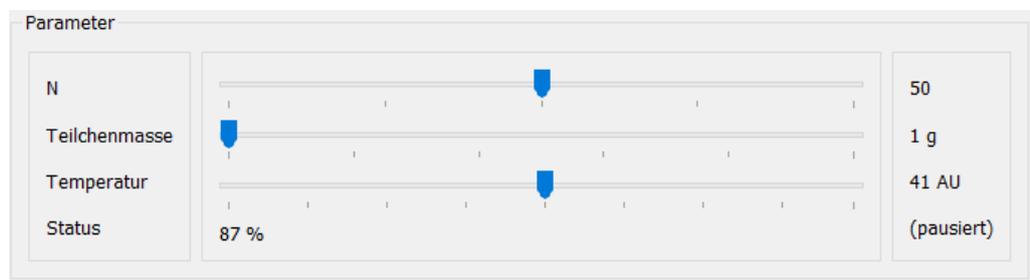


Abbildung 23: Parameter der Simulation zur Barometrischen Höhenformel

7.4.1. Animation der Teilchenbewegung

Auch in diesem Programm wird die Teilchenbewegung animiert dargestellt. Dazu wird im GUI ein Diagramm eingeblendet, auf dem die Teilchen als Kreise dargestellt sind. Die Maße des Kastens sind an die Maße des Modellgasapparats angepasst. Hierbei sind die Abmessungen des Kastens in der Simulation an die Abmessungen des Modellgasapparats angepasst. Auch der Radius der Teilchen wurde entsprechend dem realen Versuch gewählt.

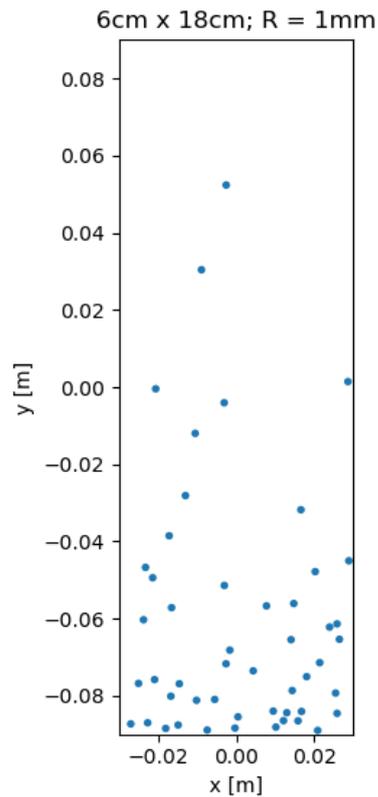


Abbildung 24: Bild der Animation der Teilchenbewegung

7.4.2. Darstellung der höhenabhängigen Teilchenzahl

Im Modellgas-Versuch wird die Teilchenzahl bei laufendem Modellgasapparat mit Hilfe einer Lichtschranke für verschiedenen Höhen punktuell ermittelt. Unter der Annahme, dass das Ergebnis einer Messung über einen längeren Zeitraum einen repräsentativen Wert für die Teilchenzahl der jeweiligen Höhe darstellt, werden die Ergebnisse zum Vergleich der Barometrischen Höhenformel herangezogen.

In dem Simulations-Programm der Barometrischen Höhenformel, wird in jedem Zeitintervall der Berechnung gezählt wie viele Teilchen sich in bestimmten Abschnitten des Kastens befinden. Die Zählungen werden über die bereits vergangenen Intervalle aufsummiert. Die daraus entstehende Verteilung der Teilchen in Abhängigkeit der Höhe wird über ein animiertes Balkendiagramm (vgl. Abbildung 25) dargestellt.

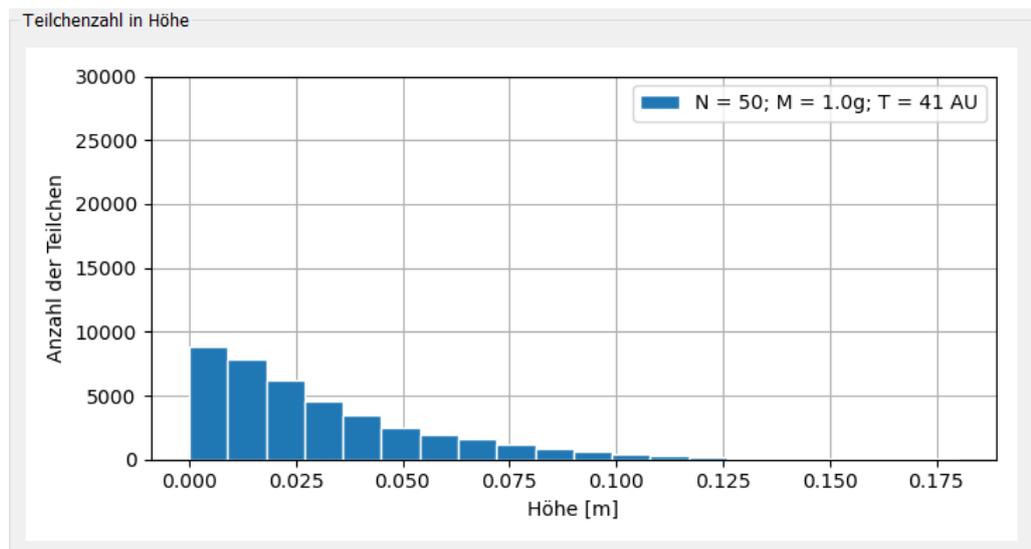


Abbildung 25: Teilchenzahl in Abhängigkeit der Höhe (Darstellung im GUI)

Die Abschnitte des Kastens in denen die Teilchen gezählt werden, lassen sich im Programmcode variieren. Je kleiner die Abschnitte, desto genauer wird die tatsächliche Verteilung abgebildet, aber die Einflüsse durch statistische Abweichungen fallen stärker ins Gewicht. Aufgrund der Erzeugung der Balken mithilfe von Matplotlib können die Abschnitte nicht beliebig klein gewählt werden, da es sonst zu Ungenauigkeiten im Bereich um den Nullpunkt kommt (vgl. Abbildung 26).

Ein wesentlicher Vorteil zum Versuch mit dem Modellgasapparat ist, dass die Teilchen in allen Abschnitten gleichzeitig gezählt werden und die Zählung vollständig und nicht punktuell erfolgt. Messunsicherheiten durch das Messverfahren mit der Lichtschranke werden dadurch ausgeschlossen.

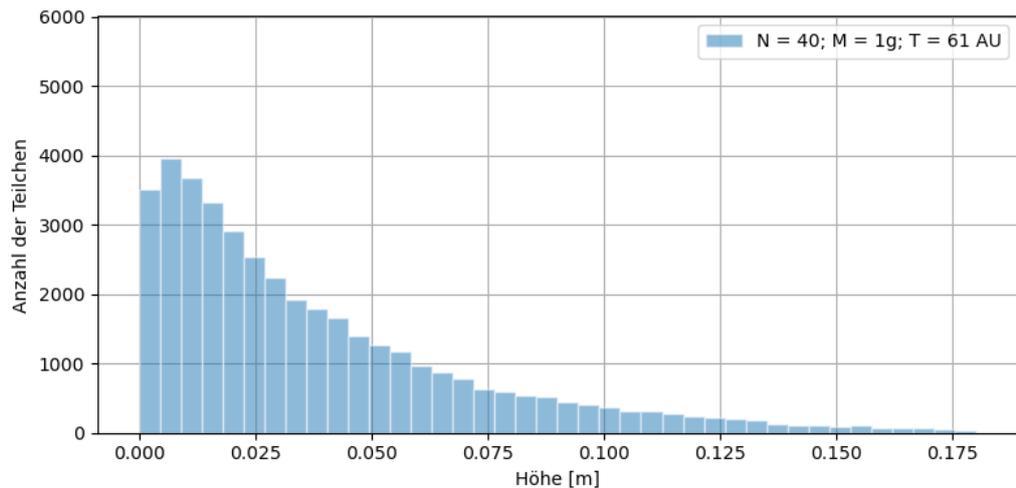


Abbildung 26: Darstellung des Simulationsergebnisses in kleinen Abschnitten

7.4.3. Vergleich der Simulationsergebnisse

Ziel des Versuchs ist es, die Messergebnisse mit den Erwartungen der Barometrischen Höhenformel zu vergleichen. Gleiches gilt auch für die Simulation. Lernende können wie schon bei der Simulation der Geschwindigkeit ihre Erwartungen aus ihren eigenen kognitiven Modellen oder dem physikalischen Modell des idealen Gases mit den Simulationsergebnissen vergleichen. Um dies tun zu können, müssen die Lernenden insbesondere den Einfluss der Parameter auf das Simulationsergebnis untersuchen können.

Wie auch bei der Simulation der Geschwindigkeitsverteilung, bietet das Programm zur Barometrischen Höhenformel eine Funktion um verschiedene Verteilungen miteinander zu vergleichen. In Abbildung 27 ist der Vergleich von Simulationsergebnissen für verschiedene Teilchenmassen dargestellt.

Um die exponentielle Eigenschaft der Barometrischen Höhenformel untersuchen zu können, lässt sich die Skalierung im Diagramm des Vergleichs-Schaubilds anpassen und logarithmieren (vgl. Abbildung 28). Diese Darstellung ermöglicht es die statistischen Abweichungen des Simulationsergebnisses zu veranschaulichen und zu untersuchen.

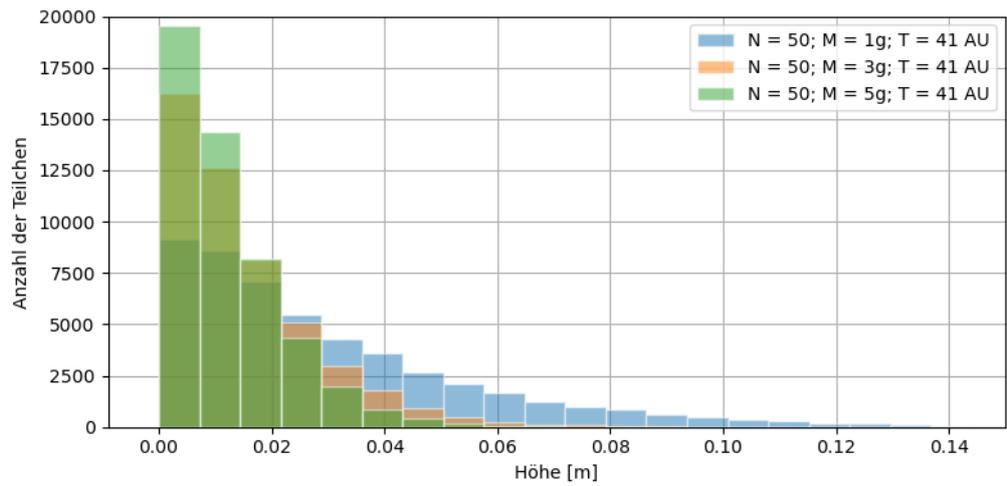


Abbildung 27: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Teilchenmassen

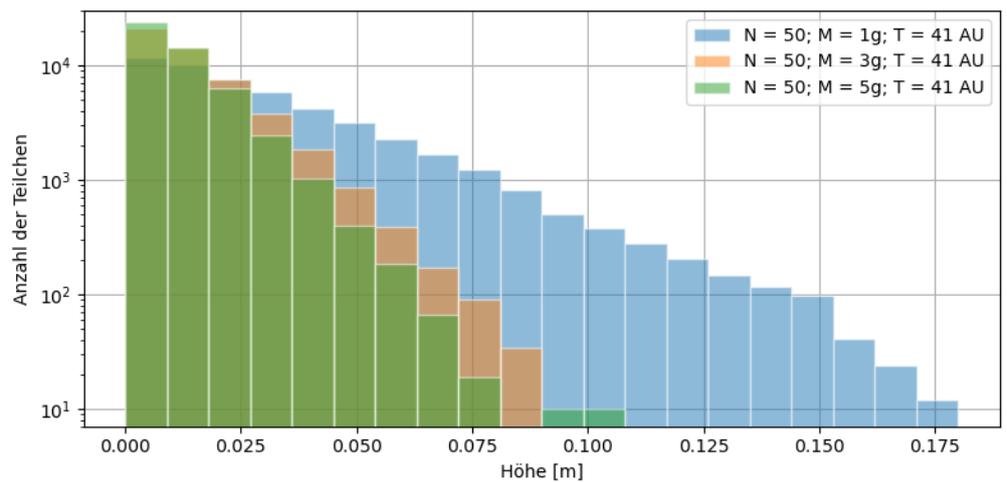


Abbildung 28: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Teilchenmassen logarithmisch aufgetragen

7.5. Limitierungen des Simulations-Modells

Die Limitierungen aufgrund der betrachteten Raumdimensionen und der betrachteten Größenordnung treffen für diese Simulation in gleicher Weise zu, wie bei der Simulation der Geschwindigkeitsverteilung.

Neben dem Zuweisungsverfahren der Geschwindigkeiten, das einen Anfangszustand erzeugt, der physikalisch betrachtet nicht möglich bzw. extrem unwahrscheinlich ist, ergibt sich bei dem Zuweisungsverfahren des Anfangsorts der Teilchen eine weitere Limitierung. Während eine zufällige Verteilung des

Anfangsorts bei der Geschwindigkeitsverteilung dem physikalischen Modell entspricht widerspricht dies in diesem Fall den physikalischen Erkenntnissen aus der Barometrischen Höhenformel. Hierbei wird von einer Verteilung der Teilchen ausgegangen, die exponentiell mit zunehmender Höhe abnimmt.

Zudem entsteht durch die zufällige Verteilung der Teilchen eine gewisse Unsicherheit im Bezug auf die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen. Denn je nachdem in welcher Höhe h ein Teilchen startet, besitzt es durch die vertikal wirkende Kraft g eine unterschiedliche potentielle Energie gemäß

$$E_{pot} = m \cdot g \cdot h$$

Folglich steigt die mittlere Geschwindigkeit der Teilchen, wenn sich zu Beginn der Animation im Schnitt mehr Teilchen im oberen Bereich des Kastens aufhalten.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 wird die Auswirkung des Anfangsortes der Teilchen dargestellt. In Abbildung 29 starten die Teilchen zufällig verteilt im unteren Drittel des Kastens zwischen $y = 0\text{cm}$ und $y = 6\text{cm}$. In Abbildung 30 starten die Teilchen zufällig verteilt im oberen Drittel des Kastens im Bereich zwischen $y = 12\text{cm}$ und $y = 18\text{cm}$.

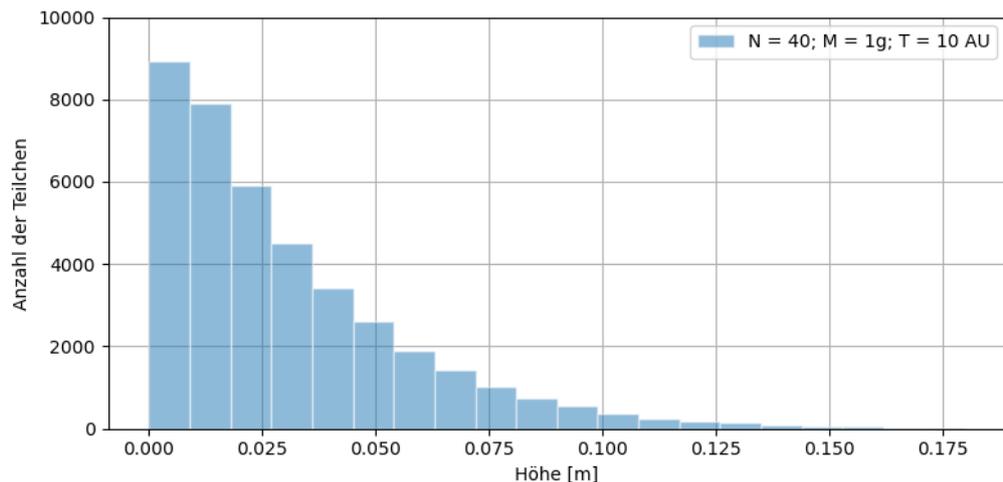


Abbildung 29: Anfangsort der Teilchen im unteren Drittel des Kastens

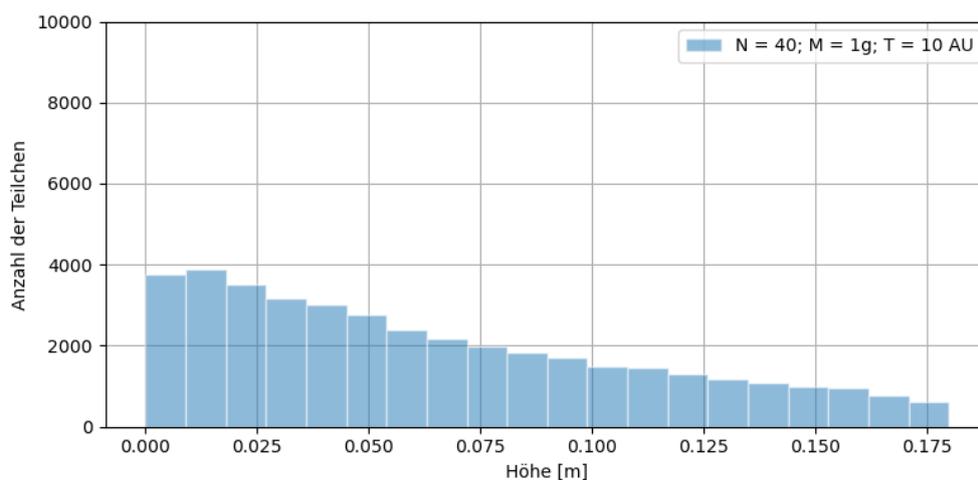


Abbildung 30: Anfangsort der Teilchen im oberen Drittel des Kastens

Um den Einfluss des Anfangsorts auf die Geschwindigkeit gering zu halten, starten die Teilchen in der Simulation im unteren Drittel des Kastens. Die Teilchen sind also zu Beginn der Simulation nur in grober Näherung entsprechend der Barometrischen Höhenformel verteilt.

Des Weiteren wird der Einfluss des Anfangsorts auf das Simulationsergebnis weiter reduziert, indem die Ortsdaten für das Diagramm, ähnlich wie bei der Simulation der Geschwindigkeitsverteilung, erst nach einigen Zeitschritten gesammelt werden, also nachdem sich die Teilchen in guter Näherung statistisch verteilt haben.

Im Modellgas-Versuch wird ähnlich verfahren. Die Messungen starten erst, nachdem die Rüttelmaschine eine gewisse Zeit lang in Betrieb war und die Glaskügelchen eine zufällige Verteilung im Kasten angenommen haben.

Die Limitierung des numerischen Berechnungsverfahrens über das Euler-Verfahren, wurde bereits im Kapitel 0 diskutiert und wird an dieser Stelle nur erwähnt.

7.6. Vergleich zwischen Simulation und Versuch

Die Modelle auf denen die Ergebnisse von Versuch und Simulation basieren, sind im Grunde die gleichen wie schon bei der Geschwindigkeitsverteilung (vgl. Kapitel 0). Lediglich das Simulationsmodell wurde um eine Beschleunigungskraft in y-Richtung erweitert. Durch die Erweiterung musste die Berechnung der Teilchenbewegung mithilfe des Euler-Verfahrens angepasst werden, wodurch es zu Abweichungen kommt.

Bei der Simulation werden in Abhängigkeit der Intervallgröße und des definierten Zeitraums in kurzer Zeit viele Messwerte in Form einer Liste generiert. Dabei wird in jedem Intervall gezählt, wie viele Teilchen sich in definierten Abschnitten des Kastens befinden. Die Limitierungen durch das Zuteilungsverfahren der Anfangsbedingung wurden vorherigen Kapitel beschrieben.

Im Versuch wird die Verteilung der Glaskügelchen im Modellgasapparat mithilfe einer Lichtschranke erfasst. Die Lichtschranke kann nur punktuell vorbeifliegende Kügelchen registrieren. Ist der zeitliche Abstand zwischen Kügelchen sehr klein, kann es dazu kommen, dass die Lichtschranke die Kügelchen nicht unterscheiden kann und somit Fehlmessungen entstehen. Um ausreichend Messwerte zu erfassen, muss die Messung in verschiedenen Höhen des Kastens wiederholt werden und nimmt dadurch viel Zeit in Anspruch.

Die Größenordnung des Simulationsmodells wurde an das Versuchs-Modell angepasst. Da durch die Begrenzung des Kastens Teilchen an der Decke des Kastens anstoßen können, kommt es in beiden Modellen zu Abweichungen der Verteilungsfunktionen von der Barometrischen Höhenformel. Dies fällt insbesondere bei der Simulation hoher Temperaturen ins Gewicht. Mit der Simulation kann die Abweichung für hohe Temperaturen anschaulich gezeigt werden. In [Abbildung 30](#): Anfangsort der Teilchen im oberen Drittel des Kastens [Abbildung 30](#) sieht man beispielsweise das Simulationsergebnis für eine hohe Teilchengeschwindigkeit. Es fällt auf, dass die Verteilung eine Abbruchkante an der Begrenzung des Kastens aufweist und die Verteilung von einer exponentiellen Funktion abweicht. Vorteil der Simulation ist jedoch, dass man die Maße des Kastens im Programmcode beliebig definieren kann.

8. Zweite Erprobung

Der Fokus der zweiten Erprobung lag darauf, ein unmittelbares Feedback der Studierenden zur Arbeit mit der Simulation der Barometrischen Höhenformel in einem gemeinsamen persönlichen Gespräch zu erhalten. Ziel der Erprobung war es, Eindrücke der Studierenden zur Arbeitsphase sammeln zu können. Dies erlaubt einen offenen Austausch über die Anwendung der Simulation, um dadurch neue Erkenntnisse für die Arbeit gewinnen zu können. Die Erprobung erfolgte mit sechs Studierenden.

8.1. Forschungsmethode

Die Untersuchung erfolgte am 08. Juli 2021 von 15:00 bis 16:00 Uhr im Rahmen des Demonstrationspraktikum. An der Untersuchung nahmen sechs Lehramtsstudierende im Fach Physik teil.

Wie schon bei der ersten Erprobung erhielten die Studierenden im Vorfeld per E-Mail eine Anleitung zur Installation der Entwicklungsumgebung Spyder und wurden mit der Installation beauftragt. Die Python Datei mit der Simulation der Barometrischen Höhenformel wurde den Studierenden am Tag der Erprobung zur Verfügung gestellt.

Mithilfe der Untersuchung sollten Informationen zur Arbeit mit Simulationen im Kontext des Lehramtsstudiums aus Sicht der Studierenden gewonnen werden.

Die qualitative Erhebung der Daten erfolgte über eine Gruppendiskussion, die direkt im Anschluss der Arbeitsphase ansetzte. Während der Gruppendiskussion lief ein Audioaufnahmegerät, das zur Sicherung des Gesprächs diente. Im Gegensatz zur ersten Erprobung befanden sich zur Zeit der Erprobung keine weiteren Beobachter im Raum. Dies sollte die Studierenden darin unterstützen sich frei zu äußern. Die Gruppendiskussion wurde moderiert und gegebenenfalls mit Fragen angereichert.

Die Diskussion wurde offen gestaltet, das heißt, die Studierenden bekamen die Möglichkeit frei zu sprechen. Gleichzeitig wurden im Vorfeld Fragen formuliert, die im Laufe der Diskussion gestellt werden konnten, falls diese offen blieben.

Die Fragen bezogen sich zum einen auf die Einstellung der Studierenden zur Arbeit mit dem Simulations-Programm und zum anderen auf die Erkenntnisse im Bereich des simulationsbasierten Lernens, welche die Studierenden im Rahmen der Erprobung für sich gewinnen konnten.

Die Stichprobe der zweiten Erprobung setzte sich, bis auf eine Person, aus der Stichprobe der ersten Erprobung zusammen. Da die Erprobung in den Ablauf des zu dieser Zeit stattfindenden Demonstrationspraktikums eingebunden war, konnten zwei Teilnehmer der ersten Erprobung, welche das Demonstrationspraktikum im Semester zuvor absolvierten, aus terminlichen Gründen nicht teilnehmen. Die Stichprobe umfasste dadurch sechs Lehramtsstudierenden des Faches Physik, wobei fünf der Studierenden an der ersten Erprobung teilgenommen hatten.

8.2. Ablauf

Der Ablauf der zweiten Erprobung lässt sich in zwei Phasen gliedern. Die erste Phase war eine Arbeitsphase, in der die Studierenden anhand des Programms Simulationen durchführten und die Simulationsergebnisse diskutierten. Den Studierenden stand dabei ein Arbeitsblatt mit Aufgaben und eine Bedienungsanleitung zur Verfügung, welche das Arbeiten mit der Simulation strukturieren. Die Arbeitsphase wurde von den Studierenden in Partnerarbeit durchgeführt. Wie schon bei der Geschwindigkeitsverteilung, bildeten die Erkenntnisse aus Kapitel 4.2 die Grundlage für die Gestaltung des Arbeitsblatts. Da die Ergebnisse aus der ersten Erprobung darauf hindeuten, dass durch die Form der Aufgabenstellung die Kompetenzen im Bereich der Simulation fördern können, wurden die Aufgaben bei der zweiten Erprobung ähnlich formuliert. Das Arbeitsblatt mit der Aufgabenstellung ist im Anhang beigelegt.

Den Studierenden wurde in der ersten Erprobung exemplarisch gezeigt, wie man eine Lernumgebung für die Arbeit mit Simulationen gestalten kann. Dazu

gehörte auch eine intensive Ergebnissicherung. Hierbei hat sich Mural als geeignete Plattform erwiesen, um Simulationsergebnisse darzustellen und zu diskutieren. Bei der zweiten Erprobung lag der Fokus stärker auf dem Feedback zum Umgang mit dem Programm, die Ergebnissicherung geschah daher in in mündlicher Form. Dabei tauschten die Gruppen untereinander die Ergebnisse aus und diskutierten diese.

Aufgrund der Tatsache, dass die Studierenden mit der Funktionsweise der Simulation zur Geschwindigkeitsverteilung bereits vertraut waren und sich die Funktionsweise der Programme kaum unterscheidet (vgl. Kapitel 0), wurde das zugrundeliegende Modell der Simulation zur Barometrischen Höhenformel nicht weiter erläutert. Es wurde lediglich zu Beginn der Arbeitsphase erwähnt, dass das Simulations-Modell in den wesentlichen Zügen dem der Geschwindigkeitsverteilung entspricht.

Die zweite Phase der Erprobung knüpfte direkt nach der Ergebnissicherung der Arbeitsphase an und bestand aus Gruppendiskussion mit den Studierenden. Ziel des Gesprächs, war es, die Eindrücke und Meinungen der Studierenden einzufangen. Die Methode wird im Folgenden genauer beleuchtet.

8.3. Begründung der Forschungsmethode

Durch die vorstrukturierte Datenerhebung in der ersten Erprobung, konnten gewinnbringende Ergebnisse zur Kompetenzentwicklung der Studierenden gesammelt werden. Zusätzlich zu den Fragen, hatten die Studierenden in jedem Teil der Fragebögen die Möglichkeit Kommentare auf einer leeren Seite hinzuzufügen. Diese Möglichkeit wurde jedoch in der ersten Erprobung kaum von den Studierenden genutzt. Um einen Einblick in die Erfahrung und Eindrücke der Studierenden im Umgang mit der Simulation zu bekommen, bietet es sich an, die Antwortmöglichkeiten so offen wie möglich zu halten. Gleichzeitig soll sichergestellt werden, dass die Studierenden auch Feedback äußern und sich nicht enthalten. Die moderierte Gruppendiskussion bietet sich als eine Möglichkeit an, um Anforderungen gerecht zu werden.

Damit die Studierenden sich möglichst frei äußern können, wurde darauf Wert gelegt, dass keine externen Störgrößen bei der Diskussion vorhanden waren,

welche die Studierenden in ihren Antworten gehemmt hätten. Dazu gehört zum Beispiel die Anwesenheit von Betreuern oder das Filmen der Diskussion.

Durch die offene Gestaltung der Diskussion war damit zu rechnen, dass für die Untersuchung weniger relevante Themen Gegenstand der Diskussion werden können. Um Struktur in die Diskussion zu bringen und um den inhaltlichen Rahmen der Diskussion etwas zu lenken, wurden im Vorfeld Fragen formuliert. Die Fragen finden sich im Anhang dieser Arbeit wieder.

8.4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der Diskussion lassen sich in drei Themen unterteilen, die im Folgenden vorgestellt werden. Zuvor werden jedoch noch allgemeine Aspekte des Gesprächsablaufs angesprochen.

Die Diskussion erfolgte in einer ungezwungenen Atmosphäre. Die Studierenden äußerten sich frei und vergnügt, es herrschte ein produktives Gesprächsklima. Der Fokus des Gesprächs lag generell weniger auf der Arbeitsphase mit der Barometrischen Höhenformel, sondern richtete sich im Allgemeinen auf die Erfahrungen aus beiden Erprobungen. Es wurde lediglich auf die Bedienung des Programms eingegangen und von einigen Studierenden hervorgehoben, dass diese durch die Ähnlichkeit der Programme und einigen behobenen Bugs im zweiten Durchlauf wesentlich einfacher war. Des Weiteren wurde auf die Limitierung der Simulation zur Höhenformel eingegangen. Der Punkt wird im Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aufgegriffen.

8.4.1. Erkenntnisse für die Gestaltung von simulationsbasierten Lernumgebungen

In der Diskussion wurde unter anderem über die Gestaltung von Unterricht basierend auf der Verwendung von Simulationen gesprochen. Dabei schilderten die Studierenden ihre Erkenntnisse, welche sie während den Erprobungen gewonnen hatten. Ein Schwerpunkt war hierbei die exemplarische Strukturierung der Arbeit mit dem Simulations-Programm, durch die Arbeitsaufträge und die Bedienungsanleitung.

Einer der Studierenden äußerte: „Die Vorlage hat mich zum ersten Mal verstehen lassen, wie man mit so einem Applet arbeiten kann“ und führte weiter aus sich vorstellen zu können, eine Simulation in einer solchen Form im eigenen Unterricht einsetzen zu können. Die Aussage traf bei den anderen Studierenden auf Zustimmung. Dies zeigt, dass die Studierenden vor den Erprobungen noch wenig Vorstellung davon hatten, wie man eine förderliche Lernumgebung auf Grundlage einer Simulation gestalten kann. Umso wichtiger erscheint es, die Studierenden im Bereich der Modellierung und Simulation weiterzubilden. Die Lernumgebung, die in diesem Rahmen erprobt wurde, erwies sich dabei als eine Möglichkeit.

Die Studierenden schilderten, wie sie sich selbst dabei ertappten, die Bedienungsanleitung nicht gelesen zu haben und dies zu Problemen beim Umgang mit dem Programm führte. In diesem Zusammenhang wiesen sie darauf hin, wie wichtig eine vorgegebene Struktur im Umgang mit Simulationen, insbesondere mit Schulklassen ist.

Die Ergebnisse der Diskussion zeigen deutlich, dass die Studierenden während den Erprobungen wichtige Prinzipien im Umgang mit Simulationen in Lehr-Lern-Szenarios kennengelernt haben, die sich mit den wissenschaftlichen Erkenntnissen im Bereich des simulationsbasierten Lernens (vgl. 4.2) decken. Das Ergebnis der ersten Erprobung, dass die Kompetenzen der Studierende im Bereich der Simulation gefördert werden konnten, wird dadurch bestätigt.

In Zusammenhang der Kompetenzentwicklung, insbesondere im Bereich des Modellverständnisses wurde in der Diskussion deutlich, dass die Studierenden verstanden haben, die Aussagekraft von Modellen einzugrenzen und speziell im Unterricht zu diskutieren. In diesem Kontext äußerte einer der Studierenden: „Ich nehme aus der Arbeit mit den Simulationen mit, dass es für den Unterricht wichtig ist klarzustellen, dass es sich bei der Simulation um eine Abbildung handelt.“

Damit wird eine wichtige Eigenschaft eines Modells im Allgemeinen und einer Simulation im Speziellen beschrieben, die in der Physikdidaktik vermittelt wird (vgl. Kapitel 2.1).

Inwiefern diese Modellkompetenz tatsächlich auf die Arbeit innerhalb der Erprobungen zurückzuführen ist bleibt aufgrund der geringen Stichprobe zu prüfen, dennoch deuten einige Befunde aus der Diskussion darauf hin, dass die Studierenden dadurch ihr Modellverständnis im Bereich der Simulation weiterentwickeln konnten.

8.4.2. Vorteile der Simulation als Methode der Erkenntnisgewinnung

Insbesondere beim Vergleich des Simulations-Modells mit dem Versuchs-Modell wurden einige Punkte diskutiert, die darauf schließen lassen, dass den Studierenden die Chancen des simulationsbasierten Lernens verdeutlicht wurden. Zwei Aspekte wurden in diesem Kontext besonders von den Studierenden hervorgehoben.

Zum einen die Anschaulichkeit der Simulation und zum anderen die Vorteile der Simulationen gegenüber dem Modellgas-Versuch.

Im Kapitel 2 wurden die Vorteile der modellbasierten Erkenntnisgewinnung in verschiedenen physikalischen Szenarien diskutiert. In der Diskussion stellte sich heraus, dass die Studierenden diese Vorteile durch die Arbeit mit den Simulationen erfahren konnten. In der Diskussion stellten sie die Simulationen als vorteilhafte Abbildungen des Modellgases dar, da die Teilchenbewegung durch das Simulations-Programm anschaulich dargestellt wird und diese zum Beispiel über einen Projektor einfach vor einer Schulklasse zu präsentieren sind. Auch die Möglichkeit Parameter zu verändern, die in der Realität bzw. im Versuch nicht einfach veränderbar sind, wurde als Vorteil der Simulation hervorgehoben: „Der große Vorteil den ich bei den Simulationen sehe, ist, dass ich Variablen verändern kann, die ich in der Realität nicht einfach verändern kann.“ Als Beispiel wurde der Parameter der Teilchenmasse genannt, aber auch die Erdbeschleunigung, die über den Programmcode verändert werden könnte.

Des Weiteren wurden auch die Messunsicherheiten des Versuchs kritisch diskutiert. Insbesondere die Messung über die Lichtschranke (vgl. 3.3.2), als auch die Aufnahme der qualitativen Geschwindigkeitsverteilung über die Registrierkammer (vgl. 3.2.2) sorgen für Messunsicherheiten im Versuch. Die Studierenden haben hervorgehoben, dass die Simulation eine wesentlich genauere Abbildung des physikalischen Modells des idealen Gases repräsentiert und das

computergestützte Verfahren zu genaueren Ergebnissen führt. Unter dem Gesichtspunkt des Zeitaufwands und der Lautstärke durch die Rüttelmaschine, wurde das Potential der Simulation für ein Unterrichtsszenario betont.

Die Ergebnisse der Diskussion lassen vermuten, dass die Studierenden durch das erkannte Potential simulationsbasierten Lernens, auch in Zukunft verstärkt Simulationen zur Erkenntnisgewinnung in ihre Lehre integrieren werden. Neben den Vorteilen von Simulationen wurde jedoch auch eine Limitierung kritisch diskutiert.

8.4.3. Einschränkungen bestehender Simulationen

Ein wesentlicher Aspekt beim Arbeiten mit bereits bestehenden Simulationen ist, dass die meisten Simulationen dem Nutzenden keinen Einblick in das zugrundeliegende Modell gewähren. Unter diesem Gesichtspunkt wurde der Einsatz von bereits bestehenden Simulationen im Unterricht kritisch bewertet, denn Limitierungen des Modells bleiben damit sowohl der Lehrkraft, als auch den SuS verborgen. Gleichzeitig äußerten die Studierenden, dass sie sich nicht zutrauen würden eigene Simulationen für den Einsatz im Unterricht zu erstellen.

Heutzutage ermöglichen benutzerfreundliche Modellbildungssysteme schon mit einfachen Mitteln Simulationen für Unterrichtszwecke zu erstellen (vgl. 4.1). Die Aussagen der Studierenden lassen daher darauf schließen, dass ein Großteil keine bzw. nur geringe Kenntnisse im Bereich der Modellierung besitzt. Dies deckt sich mit den Befunden aus der ersten Erprobung. Hier wurde deutlich, dass ein Großteil der Studierenden sich nicht zutraut eigenständig eine Modellierung vorzunehmen. Basierend auf diesen Erkenntnissen, würde es sich lohnen, in Zukunft verstärkt den Blick auf die Förderung der Studierenden im Bereich der Modellierung zu richten, vor allem, weil die Erkenntnisgewinnung durch Modellierung viel Potential bietet und den SuS wichtige Basiskompetenzen vermittelt (vgl. Kapitel 2.3 und 2.4).

9. Fazit

Die in dieser Arbeit entwickelten Simulations-Programme erwiesen sich als Arbeitsgrundlage für die Gestaltung einer förderlichen Lernumgebung und könnten als Lehr-Lern-Material in das Lehramtsstudium eingebunden werden. Es konnte mit Hilfe der Programme im Rahmen der Limitierungen gezeigt werden, dass Studierende im Umgang mit bestehenden Simulationen ihre Kompetenzen im Bereich der computergestützten Modellierung weiterentwickeln können, auch ohne in den Modellbildungsprozess involviert zu sein. Die Ergebnisse der Erprobung zeigen insbesondere, dass sich durch das entwickelte Lehr-Lern-Material Kompetenzen im Bereich des Modell- bzw. Simulationsverständnisses fördern lassen. Die Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass Lehramtsstudierenden im Bereich der Simulation und Modellierung noch wenig Erfahrung haben. Da dieses Themengebiet bislang nur in einem geringen Umfang in das Lehrangebot für Lehramtsstudierende an der Technischen Universität Darmstadt integriert ist, war davon auch auszugehen. Umso wichtiger ist es in Zukunft daran weiterzuarbeiten, das Lehrangebot in diesem Bereich auszubauen.

Um jedoch tiefgreifendere Lernerfolge bei den Studierenden zu erzielen, ist es wichtig auch die Funktionsweise des zugrundeliegenden Simulations-Modells zu lehren. Erst dadurch können die Studierenden nachvollziehen, wie in Simulationen Daten erzeugt werden und welche Limitierungen die Simulation vorweist. Dabei wurde gezeigt, dass es nicht unbedingt notwendig ist, den Studierenden Programmiersprache beizubringen. Das mathematische Modell auf dem die Simulation basiert, ist für die Studierenden ausreichend, um die wesentlichen Eigenschaften, wie zum Beispiel die Limitierungen zu erkennen. Möchte man die Studierenden jedoch damit befähigen eigenständig computergestützte Modelle entwerfen zu können, ist die Arbeit mit bestehenden Simulationen nicht ausreichend.

Computergestütztes Modellieren bietet ein enormes Potential als Möglichkeit der Erkenntnisgewinnung und bereichert den Physikunterricht um eine neue Perspektive. Möchte man solche Methoden längerfristig in Lehrpläne integrieren, muss die computergestützte Modellbildung in das Lehramtsstudium integriert werden. Die Arbeit an übergreifenden Lehrkonzepten könnte die

Möglichkeiten im Bereich der Modellierung stark ausweiten. Mithilfe von benutzungsfreundlichen Modellbildungssystemen lassen sich jedoch auch schon mit geringen Mitteln einfache unterrichtstaugliche Modelle entwerfen. Die Gestaltung und Untersuchung von Lernumgebungen basierend auf Modellierungen, könnte einen möglichen Anknüpfungspunkt zu dieser Arbeit darstellen.

In der zweiten Erprobung konnte gezeigt werden, dass die Studierenden ein Gefühl für die Gestaltung von simulationsbasierten Lernumgebungen bekommen konnten. Da bestehende Simulationen erfahrungsgemäß gerne von Lehrkräften in Unterrichtsszenarien eingesetzt werden, ist es wichtig zu zeigen, was man dabei, um Lernerfolge zu verzeichnen, beachten muss. In der Gruppendiskussion kam heraus, dass sich die exemplarische Arbeit mit den Simulationen als gelungener Ansatz dafür erwiesen hat.

Die Einbindung der Simulation in den Modellgasversuch ermöglicht den Studierenden die zugrundeliegenden Modelle unmittelbar miteinander zu vergleichen und dadurch ihr Modellverständnis weiterzuentwickeln. Zudem werden die unterschiedlichen Wege der Erkenntnisgewinnung aufgezeigt und die Vor- und Nachteile der Ansätze können verglichen werden. Die Aussagen der Studierenden haben gezeigt, dass ihnen durch den Vergleich aufgezeigt wurde, in welchen Situationen sich die Arbeit mit Simulationen anbietet und dadurch Lernumgebungen bereichert werden können. Das Demonstrationspraktikum, insbesondere der Modellgas-Versuch, hat sich als förderliche Lernumgebung und damit als geeigneter Anknüpfungspunkt für die Arbeit mit Simulationen erwiesen. An welcher Stelle sich auch Modellierung in Versuche bzw. Experimente integrieren lässt, gilt es in Zukunft zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten jedoch darauf hin, dass die Verknüpfung von Demonstrationsversuchen bzw. -experimenten mit computergestützten Modellen großes Potential für die Gestaltung von digitalen Lernumgebungen birgt.

10. Literaturverzeichnis

- Arbeitsgruppe Digitale Basiskompetenzen: Becker, S., Bruckermann, T., Finger, A., Huwer, J., Kremser, E., Meier, M., Thoms, L.-J., Thyssen, C., & von Kotzebue, L. (2020). Orientierungsrahmen Digitale Kompetenzen für das Lehramt in den Naturwissenschaften – DiKoLAN. In S. Becker, J. Meßinger-Koppelt, & C. Thyssen (Hrsg.), *Digitale Basiskompetenzen – Orientierungshilfe und Praxisbeispiele für die universitäre Lehramtsausbildung in den Naturwissenschaften*, (S. 14–43). Hamburg: Joachim Herz Stiftung.
- Buuren, O. v. (2014). *Development Of A Modelling Learning Path*.
- Ernst Kircher, R. G. (2015). *Physikdidaktik: Theorie und Praxis*. Berlin: Springer.
- Jannis Weber, T. W. (2020). *The benefit of computational modelling in physics teaching: A historical overview*.
- Hessisches Kultusministerium. (2016). *Kerncurriculum der gymnasialen Oberstufe*.
- Hessisches Kultusministerium. (2018). *Kerncurriculum berufliches Gymnasium Elektrotechnik*.
- Hessisches Kultusministerium. (2021). *Bildungsstandards und Inhaltsfelder: Das neue Kerncurriculum für Hesse: Sekundarstufe I - Gymnasium*.
- Landriscina, F. (2013). *Simulation and Learning*. New York: Springer.
- Ludwig, J. (2012). *Vergleich verschiedener Modellbildungssysteme*.
- Mikelskis, H. F. (2006). *Physik Didaktik: Praxishandbuch für die Sekundarstufe I und II*. Berlin: Corneslon Verlag.
- Mikelskis-Seifert, S. (2010). Modelle - Schlüsselbegriff für Forschungs- und Lernprozesse in der Physik.
- Schecker, H. (1998). *Grafikorientierte Modellbildungssysteme im Physikunterricht*. Düsseldorf: Ernst Klett Verlag.
- Sebastian Becker, J. M.-K. (2020). *Digitale Basiskompetenzen*. Hamburg: Joachim Herz Stiftung.
- Silke Mikelskis-Seifert, M. T. (2005). Modellieren - Schlüsselfähigkeit für physikalische Forschungs- und Lernprozesse. *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule*, S. 30-46.
- Wilhelm, T. (2018). Zur Geschichte der mathematischen Modellbildung im Physikunterricht. *Plus Lucis*.

10.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Relationsgefüge zwischen Objekt, Modell und Subjekt (Mikelskis, 2005)	5
Abbildung 2: Schematische Darstellung vom Prozess des Modellierens (van Buuren, 2014, S.76).....	8
Abbildung 3: Foto des Versuchsaufbaus zur Darstellung Geschwindigkeitsverteilung	17
Abbildung 4: Verteilung der Glaskügelchen in der Registrierkammer	17
Abbildung 5: Skizze zur Herleitung der barometrischen Höhenformel	18
Abbildung 6: Foto zum Versuchsaufbau zur Barometrischen Höhenformel.....	20
Abbildung 7: Exemplarische Darstellung der Messergebnisse aus dem Modellgas- Versuch zur quantitativen Beschreibung der Barometrischen Höhenformel	20
Abbildung 8: Programmcode zur Darstellung einer Sinusfunktion in Spyder.....	28
Abbildung 9: Konsolenausgabe des Programmcodes.....	29
Abbildung 10: Skizze zur Berechnung eines schrägen Stoßes	32
Abbildung 11: GUI für die Simulation der Geschwindigkeitsverteilung	36
Abbildung 12: Parameter der Simulation.....	36
Abbildung 13: Programmcode zur Definition der Startwerte der Simulation	37
Abbildung 14: Bild der Animation der Teilchenbewegung.....	39
Abbildung 15: Darstellung der Geschwindigkeitsverteilungen im GUI.....	40
Abbildung 16: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Temperaturen	41
Abbildung 17: Momentane Geschwindigkeitsverteilung zu Beginn der Animation .	43
Abbildung 18: Vergleich der Geschwindigkeitsverteilung für verschiedene Teilchenzahldichten n_1 (blau) und n_2 (orange).....	44
Abbildung 19: Ergebnis zur Kompetenzentwicklung.....	52
Abbildung 20: Vergleich Euler-Verfahren mit analytischem Verfahren für den freien Fall mit $dt = 0,6s$	60
Abbildung 21: Vergleich Euler-Verfahren mit analytischem Verfahren für den freien Fall mit $dt = 0,2s$	60
Abbildung 22: GUI für die Simulation der Barometrischen Höhenformel.....	62
Abbildung 23: Parameter der Simulation zur Barometrischen Höhenformel.....	63
Abbildung 24: Bild der Animation der Teilchenbewegung.....	64
Abbildung 25: Teilchenzahl in Abhängigkeit der Höhe (Darstellung im GUI).....	65
Abbildung 26: Darstellung des Simulationsergebnisses in kleinen Abschnitten	66
Abbildung 27: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Teilchenmassen	67

Abbildung 28: Vergleich der Simulationsergebnisse für verschiedene Teilchenmassen logarithmisch aufgetragen.....	67
Abbildung 29: Anfangsort der Teilchen im unteren Drittel des Kastens.....	68
Abbildung 30: Anfangsort der Teilchen im oberen Drittel des Kastens.....	69

11. Anhang

Folgende Anhänge sind auf der beigelegten CD zu finden:

- Material zur ersten Erprobung
 - Präsentationsfolien
 - Arbeitsauftrag
 - Ergebnisse der Gruppenarbeit
 - Fragebogen
 - Simulations-Programm zur Geschwindigkeitsverteilung
 - Bedienungsanleitung
- Material zur zweiten Erprobung
 - Fragen zur Gruppendiskussion
 - Arbeitsauftrag
 - Simulations-Programm zur Barometrischen Höhenformel
 - Bedienungsanleitung
- Anleitung zur Ausführung der Python-Dateien

12. Selbstständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe.

Ich habe keine anderen, als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und die Stellen, die anderen benutzten Druck- und digitalisierten Werken im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, mit Literaturangaben kenntlich gemacht. Auch Zeichnungen und Skizzen sowie bildliche und sonstige Darstellungen sind mit den entsprechenden Literaturangaben versehen, genauso wie verwendete Ton- und Datenträger.

Darmstadt, den 21.07.2021

