

RESEARCH

Lars-Jochen Thoms

Spektrometrie im Fernlabor

Wirkung von Informationsdarbietungen
beim forschenden Lernen



Springer Spektrum

Spektrometrie im Fernlabor

Lars-Jochen Thoms

Spektrometrie im Fernlabor

Wirkung von Informationsdarbietungen
beim forschenden Lernen

 **Springer** Spektrum

Lars-Jochen Thoms
Ludwig-Maximilians-Universität München
München, Deutschland

Dissertation der Fakultät für Physik der Ludwig-Maximilians-Universität München, 2018

ISBN 978-3-658-25707-1 ISBN 978-3-658-25708-8 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-25708-8>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Spektrum

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Danksagung

Das Entstehen dieser Arbeit wurde durch viele Menschen unterstützt, die durch Anregungen und Kritik zu deren Gelingen beigetragen haben. Ihnen möchte ich an dieser Stelle danken.

Zunächst gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Dr. Raimund Girwidz, der mir den inhaltlichen und zeitlichen Freiraum und die nötigen Mittel für die Konzeption und Umsetzung des Projektes gewährt und diese Arbeit mit großem Interesse begleitet hat. Ich bin sehr dankbar für die stets vorhandene Gesprächsbereitschaft und die vielen gewinnbringenden Diskussionen. Darüber hinaus möchte ich mich für die weit über das Dissertationsprojekt hinausgegangene berufliche Förderung bedanken, durch die ich so viel kennenlernen, erfahren und lernen durfte.

Ich danke Prof. Dr. Jochen Kuhn für die Übernahme des Zweitgutachtens und die vielen bereichernden Gespräche auf Tagungen sowie im Rahmen des Kollegs Didaktik: digital.

Meinen Kolleginnen und Kollegen möchte ich für die vielen Fragen, Anregungen und Diskussionen danken. Allen voran Dr. Bianca Watzka und Stefan Richtberg, die den Entstehungsprozess dieser Arbeit von Anfang an begleitet haben, sowie Dr. Giuseppe Colicchia, Peter Mayer, Tim Storck, Tobias Schüttler, Matthias Schweinberger, Christoph Hoyer und Peter Groll. Außerdem möchte ich mich für die Unterstützung bei der technischen Umsetzung des ferngesteuerten Versuches bei Elmar Osterwinter und der Werkstatt der Fakultät für Physik bedanken. Weiterhin danke ich allen studentischen Hilfskräften, die bei der Durchführung und Auswertung der Studien geholfen haben.

Ich danke den Schülerinnen und Schülern sowie den begleitenden Lehrkräften für die Studienteilnahme.

Meiner Mutter danke ich für ihre unermüdliche Unterstützung und das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Ganz besonders möchte ich meiner Frau Tina und meinen Kindern Mila und Luis dafür danken, dass sie mir die Zeit für dieses Projekt eingeräumt haben.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-----------|---|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Ausgangspunkt und Forschungslücke | 1 |
| 1.2 | Fragestellungen und Ziele | 2 |
| 1.3 | Aufbau der Arbeit..... | 3 |
| I. | THEORIE | 7 |
| 2 | Physikalische Grundlagen optischer Spektrometrie | 9 |
| 2.1 | Beschreibung und Unterscheidung wichtiger Begriffe | 9 |
| 2.1.1 | <i>Spektrum</i> | 9 |
| 2.1.2 | <i>Spektroskopie und Spektrometrie</i> | 11 |
| 2.1.3 | <i>Spektrograph, Spektrometer, Spektrogramm</i> | 11 |
| 2.1.4 | <i>Begriffliche Unterscheidung zwischen visueller und optischer Spektrometrie, Spektralbereiche</i> | 12 |
| 2.2 | Relevante radiometrische und photometrische Größen für die Beschreibung experimenteller Daten..... | 13 |
| 2.2.1 | <i>Radiometrische Größen</i> | 13 |
| 2.2.2 | <i>Photometrische Größen</i> | 16 |
| 2.3 | Kosinus-Gesetz für Bestrahlungsstärkemessungen und Einfluss des Detektorsichtfelds..... | 19 |
| 2.4 | Spektrale Empfindlichkeit und Kalibrierung eines radiometrischen Detektors | 20 |
| 2.4.1 | <i>Spektrale Empfindlichkeit</i> | 20 |
| 2.4.2 | <i>Kalibrierung eines radiometrischen Detektors</i> | 22 |
| 2.4.3 | <i>Kalibrierung des eingesetzten Detektorsystems</i> | 23 |
| 2.5 | Berechnung der spektralen Bestrahlungsstärke aus einem aufgenommenen Spektrum..... | 25 |
| 2.6 | Wellenlängen- und frequenzabhängige Darstellungen der spektralen Bestrahlungsstärke | 27 |
| 2.7 | Messunsicherheiten | 27 |
| 2.8 | Biologische Wirkung sichtbaren Lichts auf den Menschen..... | 28 |
| 2.8.1 | <i>Das circadiane System</i> | 28 |
| 2.8.2 | <i>Photorezeptoren im Auge</i> | 29 |
| 2.8.3 | <i>Wirkung von Licht auf die Melatoninproduktion</i> | 29 |
| 2.8.4 | <i>Wirkung von Licht auf die kognitive Funktion des Gehirns</i> | 30 |
| 2.8.5 | <i>Einfluss von Farbe auf Motivation und Leistung</i> | 30 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3 | Lehr-Lernpsychologische Grundlagen..... | 33 |
| 3.1 | Interesse | 33 |
| 3.1.1 | <i>Situationales und individuelles Interesse</i> | 34 |
| 3.1.2 | <i>Interesse in den Naturwissenschaften</i> | 34 |
| 3.1.3 | <i>Sachinteresse, Fachinteresse und topologisches Interesse</i> | 34 |
| 3.1.4 | <i>Situationales Interesse und Textlernen</i> | 35 |
| 3.2 | Motivation..... | 35 |
| 3.2.1 | <i>Intrinsische Motivation</i> | 36 |
| 3.2.2 | <i>Aktuelle Motivation</i> | 37 |
| 3.2.3 | <i>Flow</i> | 40 |
| 3.3 | Wissen und Wissenserwerb..... | 42 |
| 3.3.1 | <i>Bildungsstandards</i> | 42 |
| 3.3.2 | <i>Adaptive Control of Thought Theory, intelligente Tutorensysteme, Chunks</i> | 43 |
| 3.3.3 | <i>Unterscheidung von Wissensarten</i> | 44 |
| 3.3.4 | <i>Klassifikation des Wissens beim Multimedialernen</i> | 47 |
| 3.3.5 | <i>Wissensart und Wissensqualität</i> | 47 |
| 3.4 | Wissensvermittlung aus informationstheoretischer Sicht..... | 48 |
| 3.4.1 | <i>Strukturell-attributive Theorien der Information</i> | 48 |
| 3.4.2 | <i>Funktional-kybernetische Theorien der Information</i> | 49 |
| 3.4.3 | <i>Theorie der pragmatischen Information</i> | 50 |
| 3.4.4 | <i>Komplementarität der vorgestellten Informationstheorien</i> | 51 |
| 3.4.5 | <i>Bezug der Informationstheorien zum Wissenserwerb</i> | 51 |
| 3.5 | Kognitive Belastung..... | 52 |
| 3.6 | Ausgewählte Lehr-Lernformen und deren psychologische Grundlagen..... | 53 |
| 3.6.1 | <i>Klassifikation von Lernumgebungen</i> | 54 |
| 3.6.2 | <i>Self-Directed Learning</i> | 54 |
| 3.6.3 | <i>Problembasiertes Lernen</i> | 55 |
| 3.6.4 | <i>Situiertes Lernen, Anchored Instruction und die Bedeutung von Authentizität</i> | 56 |
| 3.6.5 | <i>Knowledge Integration</i> | 59 |
| 3.6.6 | <i>Selbstgesteuertes Lernen</i> | 60 |
| 3.6.7 | <i>Entdeckendes Lernen</i> | 61 |
| 3.6.8 | <i>Forschendes Lernen</i> | 62 |
| 3.6.9 | <i>Unterschiede im Bearbeitungserfolg und in den Lernergebnissen bei Structured, Guided und Open Inquiry</i> | 63 |
| 3.7 | Einfluss domänenspezifischen Vorwissens beim entdeckenden Lernen | 64 |
| 3.8 | Kognitive Verarbeitung von Diagrammen | 65 |
| 3.8.1 | <i>Vorwissen, Schemata</i> | 66 |
| 3.8.2 | <i>Sakkadische Augenbewegungen</i> | 66 |
| 3.8.3 | <i>Drei Ebenen der Informationsverarbeitung</i> | 66 |
| 3.8.4 | <i>Expertisebedingte Unterschiede beim Verarbeiten von Visualisierungen</i> | 67 |
| 3.9 | Scaffolding | 68 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4 | Fachdidaktische Grundlagen | 71 |
| 4.1 | Erwerb naturwissenschaftlicher Kompetenzen..... | 71 |
| 4.2 | Experimentieren im Physikunterricht..... | 72 |
| 4.3 | Experimentieren im Fernlabor..... | 73 |
| 4.3.1 | <i>Notwendigkeit von Fernlaboren.....</i> | <i>73</i> |
| 4.3.2 | <i>Abgrenzung zwischen Fernlabor, ferngesteuertem Experiment, virtuellem Experiment, interaktivem Bildschirmexperiment und Simulation.....</i> | <i>74</i> |
| 4.3.3 | <i>Vergleich der Lernwirksamkeit von Präsenzlabor, virtuellem Labor und ferngesteuertem Labor</i> | <i>77</i> |
| 4.3.4 | <i>Bestehende ferngesteuerte Experimente.....</i> | <i>78</i> |
| 4.4 | Experimentieren in physikalischen Praktika..... | 79 |
| 4.5 | Schülervorstellungen in der Spektrometrie | 80 |
| II. | KONZEPTION | 83 |
| 5 | Konzeption des Fernlabors zur spektrometrischen, photometrischen und radiometrischen Untersuchung von Leuchtmitteln | 85 |
| 5.1 | Versuchsziele | 85 |
| 5.2 | Versuchsaufbau | 86 |
| 5.3 | Versuchsdurchführung | 86 |
| 5.4 | Datenverarbeitung und Distribution | 87 |
| 6 | Ergebnisse ausgewählter physikalischer Experimente | 91 |
| 6.1 | Kosinuskorrektur..... | 91 |
| 6.2 | Abfall der Beleuchtungsstärke mit steigendem Abstand..... | 92 |
| 6.3 | Räumliche Verteilung der Leuchtdichte..... | 96 |
| 7 | Unterrichtskonzepte „Atome senden Licht aus“ und „Leuchtmittel bewerten“ | 99 |
| 7.1 | Bezug zum Lehrplan für das achtjährige Gymnasium in Bayern | 99 |
| 7.2 | Bezug zum „LehrplanPLUS“ | 100 |
| 7.2.1 | <i>Kompetenzerwartungen</i> | <i>101</i> |
| 7.2.2 | <i>Inhalte zu den Kompetenzen:</i> | <i>102</i> |
| 7.3 | Unterrichtskonzept „Atome senden Licht aus“ | 103 |
| 7.3.1 | <i>Lernvoraussetzungen</i> | <i>103</i> |
| 7.3.2 | <i>Lernziele</i> | <i>104</i> |
| 7.3.3 | <i>Arbeitsmaterialien</i> | <i>105</i> |
| 7.4 | Unterrichtskonzept „Leuchtmittel bewerten“ | 109 |
| 7.4.1 | <i>Lernvoraussetzungen</i> | <i>109</i> |
| 7.4.2 | <i>Lernziele</i> | <i>109</i> |
| 7.4.3 | <i>Arbeitsmaterialien</i> | <i>110</i> |

| | | |
|------------|---|------------|
| 8 | Konzeption der Online-Lernumgebung | 115 |
| 8.1 | Didaktische Vorüberlegungen | 115 |
| 8.2 | Untersuchungsbedingte Vorüberlegungen | 115 |
| 8.3 | Lernvoraussetzungen..... | 117 |
| 8.4 | Lernziele | 117 |
| 8.4.1 | <i>Grobziele</i> | 117 |
| 8.4.2 | <i>Feinziele</i> | 118 |
| 8.5 | Aufbau der Online-Lernumgebung | 119 |
| 8.5.1 | <i>Einstieg, Motivierung, Aktivierung von Vorwissen</i> | 119 |
| 8.5.2 | <i>Funktionsweise eines Spektrometers</i> | 120 |
| 8.5.3 | <i>Einführung in die Atomphysik - Gasentladung</i> | 124 |
| 8.5.4 | <i>Einführung in die Atomphysik - Energiebetrachtungen</i> | 124 |
| 8.5.5 | <i>Einführung in die Atomphysik – Entstehung diskreter Spektren</i> | 125 |
| 8.5.6 | <i>Einführung in die Atomphysik – Entstehung kontinuierlicher Spektren</i> | 125 |
| 8.5.7 | <i>Einführung in die Atomphysik – Entstehung monochromatischer Spektren</i> | 125 |
| 8.5.8 | <i>Versuchsaufbau und Benutzeroberfläche</i> | 125 |
| 8.5.9 | <i>Zuordnung der vorhandenen Leuchtmittel zu Spektrenkategorien</i> | 127 |
| 8.5.10 | <i>Vergleichen und Bewerten von Leuchtmitteln</i> | 127 |
| III | EMPIRISCHE UNTERSUCHUNGEN..... | 129 |
| 9 | Voruntersuchungen | 131 |
| 9.1 | Kognitive Verarbeitung von Diagrammen | 131 |
| 9.1.1 | <i>Einleitung</i> | 131 |
| 9.1.2 | <i>Methoden</i> | 132 |
| 9.1.3 | <i>Ergebnisse</i> | 133 |
| 9.1.4 | <i>Diskussion</i> | 136 |
| 9.2 | Pilotierung des Arbeitsmaterials | 136 |
| 9.2.1 | <i>Einleitung</i> | 136 |
| 9.2.2 | <i>Methoden</i> | 137 |
| 9.2.3 | <i>Ergebnisse</i> | 138 |
| 9.2.4 | <i>Diskussion</i> | 140 |
| 9.3 | Experimentelle Laborvorstudie | 140 |
| 9.3.1 | <i>Einleitung</i> | 141 |
| 9.3.2 | <i>Methoden</i> | 143 |
| 9.3.3 | <i>Ergebnisse</i> | 162 |
| 9.3.4 | <i>Zusammenfassung und Diskussion</i> | 178 |
| 9.4 | Zusammenfassende Diskussion und Implikationen für die Hauptstudie | 180 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 10 | Forschungsinteresse und Fragestellungen | 183 |
| 10.1 | Einfluss des Inquiry-Levels auf den Wissenserwerb | 184 |
| 10.2 | Einfluss der Informationsdarbietungsart auf den Wissenserwerb | 185 |
| 10.3 | Effektive Kombinationen von Inquiry-Level und Informationsdarbietungsart | 187 |
| | 10.3.1 Zum Erwerb instanzbasierten Wissens | 187 |
| | 10.3.2 Zum Erwerb strukturellen Wissens | 188 |
| | 10.3.3 Zum Erwerb strategischen Wissens | 188 |
| 10.4 | Bedeutung motivationaler und kognitiver Aspekte | 189 |
| 10.5 | Gliederung der Forschungsfragen und Versuchsplan | 189 |
| 11 | Konzeption der Erhebungsinstrumente der Hauptstudie | 193 |
| 11.1 | Messung des Wissenserwerbs | 194 |
| | 11.1.1 Testaufbau | 195 |
| | 11.1.2 Testauswertung | 197 |
| 11.2 | Messung des Bearbeitungserfolges | 197 |
| | 11.2.1 Vorwissen und Aktivierung | 198 |
| | 11.2.2 Aufgabenbereich „Orientieren“ | 198 |
| | 11.2.3 Aufgabenbereich „Verknüpfen“ | 199 |
| | 11.2.4 Aufgabenbereich „Handeln“ – Informationen aus Spektren entnehmen | 199 |
| | 11.2.5 Aufgabenbereich „Handeln“ – Berechnungen durchführen | 200 |
| | 11.2.6 Wählen eines geeigneten Leuchtmittels für einen vorgegebenen Einsatzzweck | 202 |
| 11.3 | Messung der kognitiven Belastung | 202 |
| | 11.3.1 Validität und Reliabilität der Messung kognitiver Belastung mit Single-Item-Self-Rating-Skalen | 203 |
| | 11.3.2 Durch Text verursachte mentale Belastung | 203 |
| | 11.3.3 Messung der wahrgenommenen mentalen Anstrengung | 203 |
| | 11.3.4 Messung der wahrgenommenen Text-/Aufgabenschwierigkeit | 204 |
| | 11.3.5 Leseaufmerksamkeit | 204 |
| 11.4 | Messung der aktuellen Motivation | 204 |
| 11.5 | Messung des Flow-Erlebens | 204 |
| 11.6 | Messung der intrinsischen Motivation | 205 |
| 11.7 | Abschätzung der kognitiven Leistungsfähigkeit und des domänenspezifischen Vorwissens | 205 |
| 11.8 | Weitere erhobene Daten | 205 |
| 12 | Anmerkungen zu den verwendeten statistischen Methoden | 207 |
| 12.1 | Qualitative Inhaltsanalyse | 207 |
| 12.2 | Interraterreliabilität und InterCODERreliabilität | 208 |
| 12.3 | Deskriptive Statistik - Kategorisierung von Mittelwerten | 210 |
| 12.4 | Effektstärken | 210 |
| 12.5 | Logistische Regressionsanalyse | 211 |

| | |
|--|----------------|
| 13 Hauptstudie | 213 |
| 13.1 Einleitung | 213 |
| 13.2 Methoden | 213 |
| 13.2.1 Stichprobe und Datenbereinigung | 213 |
| 13.2.2 Lehr-Lernumgebung, Material und Aufgaben | 214 |
| 13.2.3 Unabhängige Variablen | 214 |
| 13.2.4 Durchführung | 215 |
| 13.3 Ergebnisse | 217 |
| 13.3.1 Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb instanzbasierten Wissens | 220 |
| 13.3.2 Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb strukturellen Wissens | 224 |
| 13.3.3 Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb strategischen Wissens | 227 |
| 13.3.4 Störvariablen/Kovariaten | 231 |
| 13.4 Zusammenfassung der Ergebnisse und Zwischendiskussion | 234 |
| IV. DISKUSSION UND AUSBLICK | 237 |
| 14 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse | 239 |
| 14.1 Zusammenfassung der Ergebnisse der Konzeption | 239 |
| 14.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der empirischen Untersuchung | 240 |
| 14.3 Grenzen und Einschränkungen der gewonnenen Erkenntnisse | 241 |
| 15 Ausblick | 243 |
| 15.1 Ausbau der Lernangebote | 243 |
| 15.2 Offene Forschungsfragen | 244 |
| Literaturverzeichnis | 245 |
| V. ANHANG | 271 |
| A Arbeitsmaterialien | 273 |
| B Fragebögen | 307 |
| C Lernzielzuordnungen | 327 |
| D Coding-Manuale | 335 |
| E Qualitative Inhaltsanalysen | 353 |
| F Deskriptive Statistik | 357 |
| G Skalendokumentation | 361 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------------------|---|-----|
| Abb. 1.1: | Übersicht über die Gliederung der Dissertationsschrift..... | 6 |
| Abb. 2.1: | Definition der Strahldichte. | 15 |
| Abb. 2.2: | Die Hellempfindlichkeitskurve | 17 |
| Abb. 2.3: | Gemessenes Spektrum einer Halogenlampe..... | 21 |
| Abb. 2.4: | Spektrale Empfindlichkeit des verwendeten Detektorsystems. | 21 |
| Abb. 2.5: | Vom Hersteller mitgelieferte Kalibrierdaten des radiometrischen Standards zur Verwendung mit einem Kosinuskorrektor bzw. mit einem Lichtleiter..... | 24 |
| Abb. 2.6: | Vom aufgenommenen Spektrum zur spektralen Bestrahlungsstärke. | 26 |
| Abb. 3.1: | Das Grundmodell der „klassischen“ Motivationspsychologie. | 39 |
| Abb. 3.2: | Modelle des Flow-Erlebens..... | 41 |
| Abb. 3.3: | Die vier aufeinanderfolgenden Phasen der kognitiven Verarbeitung von Diagrammen und die drei Ebenen der Informationsverarbeitung. | 67 |
| Abb. 4.1: | Hierarchie der Arten von Fernlaboren..... | 75 |
| Abb. 5.1: | Außenansicht des Versuchsaufbaus | 88 |
| Abb. 5.2: | Detektorsystem und Versuchsaufbau. | 88 |
| Abb. 5.3: | Anpassbare grafische Benutzeroberfläche..... | 89 |
| Abb. 5.4: | Schema der für Aufnahme, Verarbeitung, Distribution und Anzeige der Spektren verwendeten Module..... | 89 |
| Abb. 6.1: | Gemessene Beleuchtungsstärke in Abhängigkeit vom Einfallswinkel und vom Kosinus des Einfallswinkels..... | 92 |
| Abb. 6.2: | Der zwischen den Oberflächenelementen übertragene Strahlungsfluss. | 93 |
| Abb. 6.3: | Abfall der Beleuchtungsstärke mit steigendem Abstand..... | 95 |
| Abb. 6.4: | Koordinatentransformation: | 97 |
| Abb. 6.5: | (a) Nahaufnahme von vier verschiedenen LED-Lampen (b) gemessene Beleuchtungsstärke in einem Kreis um jede Lampe. . | 97 |
| Abb. 7.1: | Überblick über das Instruktionsmaterial zum Unterrichtskonzept „Einführung in die Atomphysik“..... | 106 |
| Abb. 7.2: | Spektrum in wellenlängen- und photonenergiebezogener Darstellung (Screenshots aus der Lernumgebung)..... | 108 |
| Abb. 7.3: | Auszug aus dem Instruktionsmaterial zum Unterrichtskonzept „Leuchtmittel bewerten“..... | 111 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Abb. 8.1: | Übersicht über die Faktorstufen der Interventionsfaktoren in der größeren experimentellen Laborvorstudie (links) und der Hauptstudie (rechts). | 116 |
| Abb. 8.2: | Leitfrage zur Motivierung. | 121 |
| Abb. 8.3: | Verkaufsverpackung einer Halogenlampe und Tabelle mit Eigenschaften. | 121 |
| Abb. 8.4: | Aktivierung von Vorerfahrungen zur Aufspaltung von Licht in Spektralfarben. | 122 |
| Abb. 8.5: | Schülergerechte Visualisierung der Funktionalität eines Spektrometers. | 122 |
| Abb. 8.6: | Aufgabe zur Gasentladung in der Lernumgebung. | 126 |
| Abb. 8.7: | Beispiel für Freihandeingabe (Sketch). | 126 |
| Abb. 9.1: | Versuchsablauf der Voruntersuchung zur kognitiven Verarbeitung von Diagrammen. | 133 |
| Abb. 9.2: | Beispiel für die Blickpfadkategorie <i>Sprunghaftes Blickverhalten</i> | 134 |
| Abb. 9.3: | Beispiel für die Blickpfadkategorie <i>Kleinschrittige Leiter</i> | 135 |
| Abb. 9.4: | Beispiel für die Blickpfadkategorie <i>Orientierung an waagerechten Hilfslinien</i> | 135 |
| Abb. 9.5: | Instruktionsmaterial zum Unterrichtskonzept „Einführung in die Atomphysik“. | 148 |
| Abb. 9.6: | Wissenstest zum Unterrichtskonzept „Atome senden Licht aus“. | 151 |
| Abb. 9.7: | Auszug aus dem Instruktionsmaterial zum Unterrichtskonzept „Leuchtmittel bewerten“. | 153 |
| Abb. 9.8: | Screenshot aus dem Online-Codiersystem. | 154 |
| Abb. 9.9: | Wissenstest zum Unterrichtskonzept „Leuchtmittel bewerten“. | 157 |
| Abb. 9.10: | Mittelwerte der mentalen Anstrengung und der mentalen Belastung während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ nach Inquiry-Leveln. | 170 |
| Abb. 9.11: | Vereinfachte Ablaufsequenz. | 173 |
| Abb. 9.12: | Absolute Häufigkeiten der Antwortkategorien zum Flow-Erleben während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“. | 175 |
| Abb. 11.1: | Auszug aus dem Wissenstest zur Online-Lernumgebung in der Hauptstudie (Druckversion). | 195 |
| Abb. 13.1: | Absolute Häufigkeiten des Leistungsstands (Schulnoten nach Einschätzung der Lehrkraft). | 216 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tab. 2.1: | Wellenlängenbereiche der optischen Strahlung nach DIN 5031-7. | 12 |
| Tab. 2.2: | Vergleich der für die Experimente relevanten radiometrischen und photometrischen Größen. | 14 |
| Tab. 2.3: | Größen zum Vergleich photometrischer und radiometrischer Größen. | 19 |
| Tab. 2.4: | Vergleich der lichtempfindlichen Zelltypen in der menschlichen Netzhaut. | 29 |
| Tab. 4.1: | Vergleich von ferngesteuertem Experiment, Interaktivem Bildschirmexperiment und Simulation. | 76 |
| Tab. 9.1: | Kategorien und Häufigkeiten im 1. und 2. Durchgang. | 134 |
| Tab. 9.2: | Kategorien und Häufigkeiten im 1. und 2. Durchgang. | 136 |
| Tab. 9.3: | Kategorien und deren Häufigkeiten bei dem verbalen Beschreiben bildlich dargestellter Spektren: kontinuierlich, monochromatisch und diskret. | 139 |
| Tab. 9.4: | Kategorien und deren Häufigkeiten bei dem Benennen dargestellter Spektren: kontinuierlich, monochromatisch und diskret. | 139 |
| Tab. 9.5: | Prozentuale Häufigkeiten der Zuordnung der Spektren einzelner Lampen zu Spektrenkategorien. | 139 |
| Tab. 9.6: | Übersicht der Testsequenzen aller Untersuchungsgruppen. | 144 |
| Tab. 9.7: | Kategoriensystem zur Bewertung der Schülerantworten zum Prinzip der Quantisierung bei Licht. | 161 |
| Tab. 9.8: | Zusammenfassung der Varianzanalysen zur Prüfung der Eignung einer Skala als Kovariate im Modell zur Untersuchung des Einflusses der Informationsdarbietungsart auf den Bearbeitungserfolg und den Wissenserwerb in der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“. | 164 |
| Tab. 9.9: | Zusammenfassung der Varianzanalysen zur Prüfung der Eignung einer Skala als Kovariate im Modell zur Untersuchung des Einflusses des Inquiry-Levels auf den Wissenserwerb und den Bearbeitungserfolg in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“. | 167 |
| Tab. 9.10: | Anteil richtiger bzw. plausibler Lösungen bei der Aufgabe zur Zuordnung von Leuchtmitteln zu Beleuchtungssituationen in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“. | 168 |
| Tab. 9.11: | Zusammenfassung der Ausprägungen der Kovariaten. | 174 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| Tab. 9.12: | Effekte der Informationsdarbietungsart während der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“ auf die Flow-Erleben-Gruppenzugehörigkeit in der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“..... | 177 |
| Tab. 9.13: | Effekte des Inquiry-Levels während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ auf die Flow-Erleben-Gruppenzugehörigkeit in der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“..... | 177 |
| Tab. 9.14: | Effekte des Inquiry-Levels während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ auf die Flow-Erleben-Gruppenzugehörigkeit in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie)..... | 179 |
| Tab. 10.1: | Zusammenfassung der Hypothesen zum Einfluss des Inquiry-Levels und der Informationsdarbietungsart auf den Wissenserwerb..... | 189 |
| Tab. 10.2: | Ablauf der größeren Vorstudie..... | 191 |
| Tab. 10.3: | Ablauf der Hauptstudie..... | 192 |
| Tab. 11.1: | Bewertung der Items z01 bis z06..... | 199 |
| Tab. 12.1: | Klassierung von Mittelwerten von 7-Punkt-Lickert-Skalen..... | 210 |
| Tab. 13.1: | Klassierung des <i>Leistungsstands</i> (Schulnoten nach Einschätzung der Lehrkraft) in die Störvariable <i>Leistungsklasse</i> | 215 |
| Tab. 13.2: | Modellvergleiche zur Prüfung der Modellpassung beim Erwerb instanzbasierten Wissens..... | 221 |
| Tab. 13.3: | Einfache Effekte und kumulierte Interaktionseffekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb instanzbasierten Wissens..... | 222 |
| Tab. 13.4: | Effektstärken der einfachen und kumulativen Effekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb instanzbasierten Wissens..... | 222 |
| Tab. 13.5: | Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse zum Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb instanzbasierten Wissens..... | 223 |
| Tab. 13.6: | Modellvergleiche zur Prüfung der Modellpassung beim Erwerb strukturellen Wissens..... | 225 |
| Tab. 13.7: | Einfache Effekte und kumulierte Interaktionseffekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb strukturellen Wissens..... | 225 |
| Tab. 13.8: | Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse zum Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb strukturellen Wissens..... | 226 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| Tab. 13.9: | Effektstärken der einfachen und kumulativen Effekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb strukturellen Wissens. | 227 |
| Tab. 13.10: | Modellvergleiche zur Prüfung der Modellpassung beim Erwerb strategischen Wissens. | 228 |
| Tab. 13.11: | Einfache Effekte und kumulierte Interaktionseffekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb strategischen Wissens. | 229 |
| Tab. 13.12: | Effektstärken der einfachen und kumulativen Effekte der Interventionsbedingungen auf den Erwerb strategischen Wissens. | 229 |
| Tab. 13.13: | Ergebnisse der logistischen Regressionsanalyse zum Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Erwerb strategischen Wissens. | 230 |
| Tab. 13.14: | Zusammenfassung der Ausprägungen der Kovariaten (Hauptstudie). | 232 |
| Tab. C.1: | Zuordnung der Items des Arbeitsmaterials der Vorstudie, Teil I „Atome senden Licht aus“ zu den damit abgeprüften Lernzielen. | 328 |
| Tab. C.2: | Zuordnung der Felder des ersten Wissenstests in der Vorstudie, Teil I „Atome senden Licht aus“ zu Items der qualitativen Inhaltsanalyse sowie zu abgeprüften Lernzielen. ... | 329 |
| Tab. C.3: | Zuordnung der Felder des Wissenstests in Vorstudie, Teil II „Leuchtmittel bewerten“ zu Items der qualitativen Inhaltsanalyse sowie zu abgeprüften Lernzielen. | 330 |
| Tab. C.4: | Zuordnung der Items der Benutzereingaben in der Online-Lernumgebung zu abgeprüften Lernzielen. | 331 |
| Tab. C.5: | Zuordnung der Items des Wissenstests in der Hauptstudie zu abgeprüften Lernzielen. | 332 |
| Tab. D.1: | Kategorisierung und Bewertung von Item e06. | 346 |
| Tab. D.2: | Kategorisierung und Bewertung von Item e07. | 348 |
| Tab. D.3: | Kategorisierung und Bewertung von Item e08. | 348 |
| Tab. D.4: | Kategorisierung und Bewertung von Item e10. | 349 |
| Tab. D.5: | Kategorisierung und Bewertung von Item e11. | 351 |
| Tab. D.6: | Kategorisierung und Bewertung von Item e12. | 351 |
| Tab. E.1: | Benennung der Einzelteile des Versuchsaufbaus im ersten Wissenstest (Vorstudie). Musterlösungen und Beispielantworten. | 354 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Tab. E.2: | Kategoriensystem der qualitativen Inhaltsanalyse der Begründungen für die Wahl eines bestimmten Leuchtmittels für einen vorgegebenen Einsatzzweck in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ | 355 |
| Tab. F.1: | Kreuztabelle der Kodierungen der Aufgabe zur Zuordnung von Leuchtmitteln zu Beleuchtungssituationen (Item × Inquiry-Level) in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ – vorgegebene Leuchtmittel (Vorstudie). | 358 |
| Tab. F.2: | Kreuztabelle der Kodierungen der Aufgabe zur Zuordnung von Leuchtmitteln zu Beleuchtungssituationen (Item × Inquiry-Level) in der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ – plausible Leuchtmittel (Vorstudie). | 359 |
| Tab. G.1: | Items des Fragebogens zur Messung der kognitiven Belastung (Vor- und Hauptstudie). | 362 |
| Tab. G.2: | Items des Fragebogens zur Messung der aktuellen Motivation (Hauptstudie). | 362 |
| Tab. G.3: | Items des Fragebogens zur Messung des Flow-Erlebens (Hauptstudie). | 363 |
| Tab. G.4: | Items des Fragebogens zur Messung der intrinsischen Motivation (Vor- und Hauptstudie). | 363 |
| Tab. G.5: | Items des Kurztests zur Messung der Aufgabenschwierigkeit, der wahrgenommenen Authentizität und des Interesses (Vorstudie). | 364 |
| Tab. G.6: | Korrelationen der Subskalen der kognitiven Belastung nach Ausgabe der Vorinformation (Vorstudie). | 365 |
| Tab. G.7: | Skalendokumentation: Kognitive Belastung beim Lesen der Vorinformation (Vorstudie). | 365 |
| Tab. G.8: | Korrelationen der Subskalen der kognitiven Belastung während der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“ (Vorstudie). | 365 |
| Tab. G.9: | Skalendokumentation: Kognitive Belastung während der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“ (Vorstudie). | 366 |
| Tab. G.10: | Korrelationen der Items zur Messung des Interesses während der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“ (Vorstudie). | 366 |
| Tab. G.11: | Skalendokumentation: Interesse bei Durchführung der ersten Lerneinheit „Atome senden Licht aus“ (Vorstudie). | 367 |
| Tab. G.12: | Korrelationen der Subskalen der kognitiven Belastung während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie). | 367 |

| | | |
|-------------------|---|-----|
| Tab. G.13: | Skalendokumentation: Kognitiven Belastung bei Durchführung der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie). | 368 |
| Tab. G.14: | Häufigkeiten des Items zum Flow-Erleben während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie). | 368 |
| Tab. G.15: | Korrelationen der Items zur Messung des Interesses während der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie). | 369 |
| Tab. G.16: | Skalendokumentation: Interesse bei Durchführung der zweiten Lerneinheit „Leuchtmittel bewerten“ (Vorstudie). | 369 |
| Tab. G.17: | Skalendokumentation: intrinsische Motivation (Vorstudie). | 370 |
| Tab. G.18: | Skalendokumentation: Interesse/Vergnügen, Subskala der intrinsischen Motivation (Vorstudie). | 371 |
| Tab. G.19: | Skalendokumentation: Wahrgenommene Wahlfreiheit, Subskala der intrinsischen Motivation (Vorstudie). | 371 |
| Tab. G.20: | Skalendokumentation: Wahrgenommene Kompetenz, Subskala der intrinsischen Motivation (Vorstudie). | 372 |
| Tab. G.21: | Skalendokumentation: Druck/Anspannung, Subskala der intrinsischen Motivation (Vorstudie). | 372 |
| Tab. G.22: | Korrelationen der Subskalen zur Messung der intrinsischen Motivation (Vorstudie). | 373 |
| Tab. G.23: | Flow-Erleben während der Hauptstudie. | 373 |



1 Einleitung

Für den Aufbau naturwissenschaftlicher Kompetenzen als Teil einer umfassenden Allgemeinbildung ist die Durchführung von Experimenten von zentraler Bedeutung. Wenn der Aufbau eines Experiments zu komplex, kosten- oder zeitaufwendig ist oder das Experimentiermaterial nicht zur Verfügung steht, ist Experimentieren im Fernlabor eine alternative Möglichkeit, um experimentelle Fertigkeiten und Kompetenzen zu vermitteln und zu selbstreguliertem Lernen anzuregen. Es gibt aber nur wenige ferngesteuerte Labore für unerfahrene Lernende und die Bedingungen für das Lernen im ferngesteuerten Labor wurden, bezogen auf Schülerinnen und Schüler, kaum empirisch untersucht. Ziel der Arbeit ist die Konzeption eines Fernlabors zur Spektrometrie und die Untersuchung geeigneter Informationsdarbietungsarten zur Unterstützung des forschend-entdeckenden Lernens im Fernlabor.

1.1 Ausgangspunkt und Forschungslücke

Die fachdidaktische Entwicklungsforschung rund um die Jahrtausendwende ist geprägt von zwei ganz unterschiedlichen, aber sich ergänzenden Ansätzen. Erstens wurde basierend auf der Theorie des *situierten Lernens* der *Anchored-Instruction*-Ansatz entwickelt und die Bedeutung der Kontexteinbindung auf vielfältige Weise herausgestellt und empirisch abgesichert. Zweitens wurde durch fortlaufend verbesserte und sich neu ergebende Möglichkeiten der Einsatz neuer Medien im Unterricht lehr-lerntheoretisch fundiert und fand zunehmende Verbreitung.

Ein besonders geeigneter Kontext für den Physikunterricht ist die spektrometrische Untersuchung handelsüblicher Leuchtmittel:

1. Die Zusammensetzung des abgestrahlten Lichts eines Leuchtmittels hat eine hohe Gegenwartsbedeutung für Schülerinnen und Schüler:
 - a) Die Lichterzeugung sollte möglichst energieeffizient sein.
 - b) Farben (z. B. von Schminke oder von Kleidung in der Umkleidekabine) dürfen nicht verfälscht dargestellt werden, so dass sie unter Tageslicht ganz anders wahrgenommen werden würden.
 - c) Licht hat vielfältige Wirkungen auf den Menschen und beeinflusst sowohl physiologische Prozesse als auch psychologische Zustände. Schülerinnen und Schüler kennen z. B. *Nightshift*-Einstellungen bei mobilen Endgeräten.

- d) Unterschiedliche Beleuchtungssituationen verlangen also unterschiedliche Leuchtmittel. Während eine kaltweiße Kompaktleuchtstofflampe im Bad am Morgen beim Wachwerden hilft, wäre dies nicht die erste Wahl für ein romantisches Dinner.
2. Die verschiedenen Möglichkeiten der Lichterzeugung führen in mehrere Fachgebiete der Physik ein:
- a) Klassische Glühfadenlampen sind als thermische Strahler eng mit der Festkörperphysik und der Thermodynamik verbunden.
 - b) Kompaktleuchtstofflampen („Energiesparlampen“) erzeugen Licht durch Gasentladung und lassen sich daher sehr gut bei der Einführung in die Atomphysik nutzen. In einem zweiten Schritt kann dann die Fluoreszenzkonversion in der Leuchtstoffschicht betrachtet werden.
 - c) LED-Lampen als modernes Leuchtmittel vereinen die Vorteile der Glühfadenlampen (Vollspektrum) und der Kompaktleuchtstofflampen (Energieeffizienz) und sind ein Beispiel für die große Bedeutung der Halbleiterphysik in der Lebenswelt der Lernenden.

Leider ist die Anschaffung eines Spektrometers kostenintensiv, weswegen nicht jede Schule über ein eigenes Spektrometer verfügt. Außerdem sind für Energiemessungen und Vergleiche der Strahlungsstärke bei verschiedenen Wellenlängen aufwendige Kalibrierungen erforderlich. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Fernlabor zur spektrometrischen, photometrischen und radiometrischen Untersuchung von Leuchtmitteln konzipiert, entwickelt und über das Internet frei zugänglich gemacht.

Die entwickelten Unterrichtskonzepte „Atome senden Licht aus“ und „Leuchtmittel bewerten“ basieren auf eigens dafür konzipierten Schülerexperimenten, die in dem neu entwickelten Fernlabor von den Lernenden eigenständig durchgeführt werden. Zwar sind bereits diverse ferngesteuerte Experimente über das Internet verfügbar, jedoch richten sich diese zumeist an Studierende und nur gelegentlich auch an Schülerinnen und Schüler der Oberstufe. Es gibt nur wenige ferngesteuerte Labore für unerfahrene Lernende und die Bedingungen für das Lernen im ferngesteuerten Labor wurden, bezogen auf Schülerinnen und Schüler, kaum empirisch untersucht (Lowe, Newcombe & Stumpers, 2013).

1.2 Fragestellungen und Ziele

Ein Fernlabor ermöglicht den Lernenden u. a. durch experimentelle Hausaufgaben eine eigenständige Erschließung neuer Wissensbereiche. Damit sie dies erfolgreich tun können, benötigen Schülerinnen und Schüler jedoch zusätzliche Infor-

mationen z. B. zum Aufbau und zur Durchführung des Versuches. Hieraus entstehen zentrale Fragestellungen dieser Untersuchung: *Welche* Informationen sollten Lernenden angeboten werden? *Wann* sollten sie bereitgestellt werden? Und *wie* sollten die Informationen präsentiert werden?

In dieser Arbeit wird die Bezeichnung *Informationsdarbietungsart* verwendet, um die Art der Information, die Gabe der Information und die Darstellung derselbigen in einem Begriff zu vereinen.

Da Experimentieren im Fernlabor über das Internet und somit auch mithilfe eines Computers oder mobiler Endgeräte erfolgt, ergeben sich vielfältige Möglichkeiten, das Lernen durch den Einsatz neuer Medien zu unterstützen. Unklar ist jedoch, in welchem Umfang diese Unterstützung erfolgen soll. Daher wurde weiterhin untersucht: Welcher Führungsgrad (*Inquiry-Level*) eignet sich für das forschend-entdeckende Lernen im Fernlabor zur spektrometrischen Untersuchung verschiedener Leuchtmittel?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit beschreibt die Ergebnisse zweier Prozesse zwischen denen starke wechselseitige Bezüge bestehen. Auf der einen Seite steht die theoriegeleitete Konzeption und Entwicklung eines neuen ferngesteuerten Experiments und die Einbindung dieses Versuches in ein Unterrichtskonzept sowie in eine Online-Lernumgebung. Auf der anderen Seite steht die empirisch fundierte Untersuchung der entwickelten Konzepte anhand lehr-lernpsychologischer Fragestellungen. Entsprechend ist diese Arbeit in vier auf diese Einleitung folgende Teile gegliedert:

1. Theorie,
2. Konzeption,
3. empirische Untersuchungen sowie
4. Diskussion und Ausblick.

In den drei Kapiteln des ersten Teils werden für diese Arbeit wichtige Begriffe definiert und theoretische Grundlagen zusammengefasst. *In Kapitel 2* werden die physikalischen Grundlagen optischer Spektrometrie angeführt. Nach der Beschreibung und Unterscheidung wichtiger Begriffe der Spektrometrie werden für die Beschreibung experimenteller Daten relevante radiometrische und photometrische Größen definiert und voneinander abgegrenzt. Anschließend werden für die Entwicklung des Experiments wichtige physikalisch-technische Aspekte diskutiert. Das Kapitel schließt mit der biologischen Wirkung von Licht, welche von

besonderer Bedeutung für die Kontextorientierung des Unterrichtskonzepts ist. *Das dritte Kapitel* beschreibt jene lehr-lernpsychologischen Grundlagen, welche nicht nur in der Konzeption, sondern auch für die empirischen Untersuchungen von besonderer Bedeutung sind. Dies sind in erster Linie die erhobenen Kovariaten Interesse, Motivation und kognitive Belastung sowie die Zieldimension des Wissenserwerbs. Eine Betrachtung der Wissensvermittlung aus informationstheoretischer Sicht führt auf den ersten Interventionsfaktor. Der Vergleich verschiedener Lehr-Lernformen bestimmt schließlich den zweiten Faktor der Intervention. Auf eine Diskussion lehr-lernpsychologischer Grundlagen, welche nicht Teil der empirischen Untersuchungen waren, wird hier bewusst verzichtet, auch wenn diese essentiell für die Konzeption der Unterrichtseinheiten, der Arbeitsmaterialien oder der Online-Lernumgebung waren. Hier muss auf die ein- und weiterführende Literatur verwiesen werden, z. B. „Physikdidaktik: Theorie und Praxis“ (Kircher, Girwidz & Häußler, 2015) und „The Cambridge Handbook of Multimedia Learning“ (Mayer, 2014). *Im vierten Kapitel* wird die Begründung für den Einsatz ferngesteuerter Experimente, die Auswahl des konkreten Experiments sowie fachdidaktische Aspekte des Experimentierens und des Lernens im Fernlabor diskutiert.

Der zweite Teil umfasst vier Kapitel und beschreibt zunächst die Grundlagen der Konzeption und Entwicklung des weltweit ersten öffentlich zugänglichen Fernlabors zur spektrometrischen, photometrischen und radiometrischen Untersuchung von Leuchtmitteln (*Kapitel 5*). Ausgewählte Ergebnisse physikalischer Experimente, welche in dem ferngesteuerten Labor durchgeführt wurden, werden *im sechsten Kapitel* präsentiert. Das siebte Kapitel fasst die Konzeption der Unterrichtseinheiten „Atome senden Licht aus“ und „Leuchtmittel bewerten“ zusammen. Es werden jeweils Lernvoraussetzungen genannt, Lernziele formuliert und die entwickelten Arbeitsmaterialien vorgestellt. Das achte Kapitel beschreibt die Konzeption der für die Hauptstudie entwickelten Online-Lernumgebung, welche die zuvor beschriebenen Unterrichtskonzepte vereint.

Teil III ist mit fünf Kapiteln der umfangreichste Teil dieser Arbeit und widmet sich den empirischen Untersuchungen. In *Kapitel 9* werden ausgewählte Voruntersuchungen vorgestellt. Besonders die dritte Voruntersuchung zu den Unterrichtskonzepten „Atome senden Licht aus“ und „Leuchtmittel bewerten“ wird ausführlicher beschrieben. Erstens, weil die entwickelten Arbeitsmaterialien dieser Unterrichtskonzepte gut evaluiert und bereits mehrfach im Unterricht verwendet wurden. Zweitens bilden die in dieser Voruntersuchung gewonnenen Erkenntnisse wichtige Grundlagen und Implikationen für die Konzeption der Online-Lernumgebung und die Planung und Durchführung der Hauptuntersuchung. *Im zehnten Kapitel* wird das Forschungsinteresse dargelegt und es werden die Forschungsfragen für die Hauptstudie spezifiziert. Aufgrund der Komplexität der verwendeten Erhebungsinstrumente werden diese in *Kapitel 11* explizit vorgestellt. Das *zwölfte*

Kapitel fasst einige wenige, aber wichtige Anmerkungen zu den verwendeten statistischen Methoden an zentraler Stelle zusammen. *Kapitel 13* beschreibt schließlich die Hauptuntersuchung zum Einfluss der Informationsdarbietungsart und des Inquiry-Levels auf den Wissenserwerb.

In *Kapitel 14* werden die Forschungsergebnisse zusammengefasst und gemeinsam diskutiert. Dabei wird auch auf Grenzen und Einschränkungen der erworbenen Erkenntnisse eingegangen. Das abschließende *15. Kapitel* gibt einen Ausblick auf den weiteren Ausbau der Lernangebote und schließt mit offengebliebenen Forschungsfragen.

In einfach umrandeten Kästen werden wichtige Konsequenzen aus den erörterten Theorien, wichtige Erkenntnisse aus Untersuchungen und Implikationen für die Konzeption sowie die empirischen Untersuchungen zusammengefasst.

In doppelt umrandeten Kästen werden zentrale Aspekte der Konzeption, Hypothesen der Hauptstudie sowie zentrale Ergebnisse der Hauptstudie hervorgehoben.

Abb. 1.1 dient der Übersicht über die Struktur dieser Arbeit.

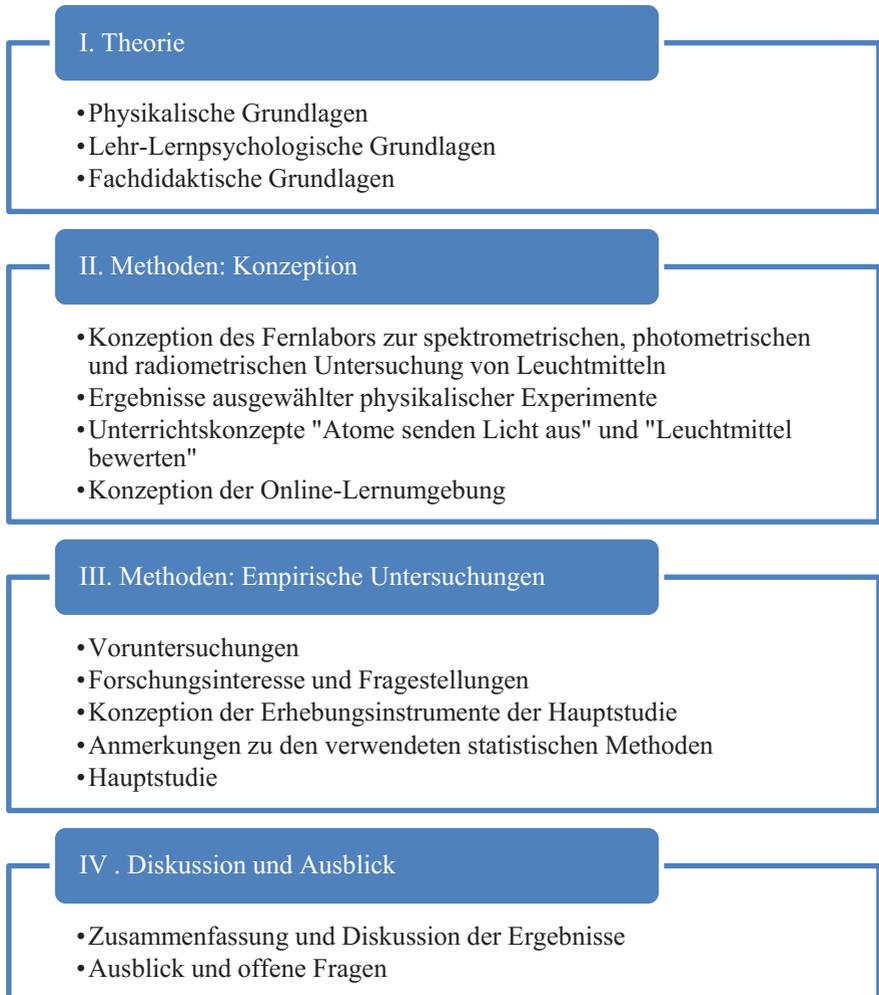


Abb. 1.1: Übersicht über die Gliederung der Dissertationsschrift.

I. Theorie



2 Physikalische Grundlagen optischer Spektrometrie

In diesem Kapitel erfolgt die fachliche Klärung jener Grundlagen optischer Spektrometrie, die für die Konzeption und Umsetzung des entwickelten ferngesteuerten Experimentes sowie der begleitenden Lernmaterialien und Unterrichtseinbindung von besonderer Bedeutung sind. An dieser Stelle können nur einzelne Aspekte berücksichtigt werden, die für Schülerinnen und Schüler und für Studierende bis zum Bachelor von Interesse sind. Für weiterführende Informationen muss auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen werden. Dazu werden mehrfach Literaturempfehlungen angeführt.

Im ersten Abschnitt werden wichtige grundlegende Begriffe definiert. Darüberhinausgehend werden für diese Arbeit anhand methodisch-didaktischer Gesichtspunkte für die Unterrichtsgestaltung ausgewählte Begriffe diskutiert. Im zweiten Abschnitt werden die für das Experiment wesentlichen radiometrischen und photometrischen Größen beschrieben und in Beziehung gesetzt. In den darauffolgenden Abschnitten werden die für Kalibrierung und Betrieb eines Spektrometers wichtigen physikalischen Grundlagen diskutiert. Das Kapitel schließt mit einer Betrachtung der biologischen Wirkung sichtbaren Lichts auf den Menschen. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden im späteren Unterrichtskonzept als authentische Lernanker verwendet, um Schülerinnen und Schüler für die durchzuführenden experimentellen Untersuchungen zu motivieren.

2.1 Beschreibung und Unterscheidung wichtiger Begriffe

2.1.1 *Spektrum*

Der Begriff *Spektrum* findet in vielen Teildisziplinen der Physik Verwendung, hat jedoch teils unterschiedliche Bedeutungen. Um den Sinngehalt des Begriffs Spektrum in der optischen Spektrometrie von denen anderer Disziplinen abzugrenzen, wird zunächst eine Übersicht der besonderen Aspekte in verschiedenen Disziplinen zusammengestellt. Anschließend werden Repräsentationsformen zur grafischen Darstellung von Spektren beschrieben.

Die Aufspaltung des Sonnenlichts durch Brechung an einem Prisma wurde erstmalig von Newton wissenschaftlich beschrieben. Die Gesamtheit der dabei sichtbar werdenden Farben bezeichnete er als *Spektrum* (Newton, 1671/72, S. 3076). Im Laufe der Zeit wurde der Begriff Spektrum derart ausgedehnt, dass er

nicht nur das Farbspektrum des sichtbaren Lichts, sondern als *elektromagnetisches Spektrum* im weiteren Sinne elektromagnetische Strahlung aller Wellenlängen umfasst und „im engeren Sinne die Intensität eines Gemisches elektromagnetischer Strahlung als Funktion der Frequenz“ beschreibt (Kilian & Weber, 2000, S. 117).

In der Akustik beschreibt ein Spektrum das Ergebnis der Zerlegung eines periodischen oder nichtperiodischen zeitabhängigen Signals in einzelne harmonische Komponenten unterschiedlicher Frequenz (Kilian & Weber, 2000) und gewöhnlich unterschiedlicher Amplitude und Phase (Gray, 1972) (vgl. Fourier-Analyse). In der Akustik wird der Begriff Spektrum auch verwendet, um einen kontinuierlichen und üblicherweise breiten Wellenlängen- oder Frequenzbereich zu kennzeichnen, in dem die Wellen bestimmte gemeinsame Eigenschaften haben, z. B. das von Menschen hörbare Audio-Frequenz-Spektrum (Gray, 1972).

Die Konzepte aus der Akustik wurden auch in die Elektrizitätslehre übertragen. Die Zerlegung von zeitabhängigen Signalen in harmonische Schwingungen und Obertöne findet ebenso in der Elektronik Anwendung. Desgleichen wird das elektromagnetische Spektrum in zusammenhängende breitere Bereiche unterteilt, die selbst wiederum als Spektrum bezeichnet werden können, wie z. B. das Mikrowellenspektrum, das Radiowellenspektrum oder das Gammasektrum (Kilian & Weber, 2000).

In der Atomphysik spielen Spektren in der Atom-Emissions-Spektroskopie und in der Atom-Absorptions-Spektroskopie eine besondere Rolle. In der Atom-Emissions-Spektroskopie wird die Gesamtheit der beobachteten Spektrallinien phänomenologisch als *diskretes Spektrum* oder ursächlich als *Atomspektrum* bezeichnet. Im Gegensatz dazu stehen die in der Atom-Absorptions-Spektroskopie als Referenz benötigten *kontinuierlichen Spektren*, die z. B. von thermischen Lichtquellen erzeugt werden.

Aus didaktischer Perspektive ist es wichtig, für einen bestimmten Vermittlungszweck jeweils eine geeignete Repräsentationsform auszuwählen. Spektren können und werden auf ganz unterschiedliche Arten und Weisen dargestellt. Atomspektren lassen sich z. B. in einem Energie-Term-Schema darstellen. Dabei werden die Energieniveaus in der Atomhülle als waagerechte Striche gezeichnet und mögliche Übergänge zwischen den Energieniveaus mit Pfeilen identifiziert. Die Energie des bei einem elektronischen Übergang ausgesandten Photons entspricht dann der Energiedifferenz der zugehörigen Energieniveaus. In anderen Darstellungen werden Emissionslinien entsprechend der Beobachtung in einem Spektroskop als senkrechte Striche nebeneinander über der Wellenlänge oder der Frequenz aufgetragen. Die Intensitätsverteilung wird deutlicher sichtbar, wenn die wellenlängen- oder frequenzabhängige Intensität über der Wellenlänge bzw. Frequenz in einem Histogramm oder einem x-y-Plot aufgetragen wird. Die Darstellung der Intensitätsverteilung in einem Histogramm wird häufig selbst als Spektrum bezeichnet.

2.1.2 *Spektroskopie und Spektrometrie*

Vor allem im englischen Sprachgebrauch werden alle Verfahren, die Intensitäten oder Energien für verschiedene Wellenlängen oder Frequenzen bestimmen, unter dem Begriff *Spectroscopy* zusammengefasst.

Der Begriff *Spectrometry* wird nur für wenige Verfahren wie z. B. für die Atomemissionsspektrometrie oder die Massenspektrometrie verwendet. Die International Union of Pure and Applied Chemistry [IUPAC] (2014, S. 1421) definiert die Beziehung zwischen Spektroskopie und Spektrometrie allerdings wie folgt:

“Spectroscopy is the study of physical systems by the electromagnetic radiation with which they interact or that they produce. Spectrometry is the measurement of such radiations as a means of obtaining information about the systems and their components. In certain types of optical spectroscopy, the radiation originates from an external source and is modified by the system, whereas in other types, the radiation originates within the system itself.” (Herrmann & Onkelinx, 1986, S. 1378)

Spektroskopie beschreibt demnach Verfahren zur Untersuchung physikalischer Systeme durch die Analyse der Wechselwirkungen zwischen dem betreffenden System und elektromagnetischer Strahlung oder durch die Analyse einer von dem System ausgesandten Strahlung. Spektrometrie ist dann die Messung solcher Strahlung, um Informationen über das System zu erhalten.

Während der Begriff der Spektroskopie also auch Verfahren der subjektiven Betrachtung beinhaltet, welche im Schulkontext häufig eingesetzt werden, verlangt der Begriff der Spektrometrie ausdrücklich einen Messprozess.

Im Kontext dieser Arbeit wird der Begriff der *Spektrometrie* gegenüber dem Begriff der *Spektroskopie* bevorzugt, um die Notwendigkeit der Messung spektraler Größen in den konzipierten Experimenten herauszustellen.

2.1.3 *Spektrograph, Spektrometer, Spektrogramm*

Ein *Spektrograph* ist eine Kombination aus einem Spektralapparat und einer Kamera, die es ermöglicht, ein Bild des Spektrums auf einem fotografischen Film oder mithilfe eines zweidimensionalen Bildsensors aufzunehmen; ein *Spektrometer* ist die Kombination aus einem Spektralapparat und einem oder mehreren Detektoren, die es ermöglicht, die Intensität einer oder mehrerer Spektralbereiche zu messen; ein *Spektrogramm* ist das von einem Spektrometer aufgenommene Spektrum und nicht das von einem Spektrographen aufgenommene Bild (vgl. IUPAC, 2014).

In dem Arbeitsmaterial zur Einführung in die Atomphysik in der neunten Jahrgangsstufe sollen so wenig neue Fachbegriffe wie möglich eingeführt werden. Daher wird für alle Diagrammdarstellungen von wellenlängenabhängigen Messungen im Arbeitsmaterial anstelle des Begriffs *Spektrogramm* vereinfachend der Begriff *Spektrum* verwendet; gleiches gilt für daraus berechnete frequenz- oder photonenergiebezogene Darstellungen (z. B. Diagramme).

2.1.4 Begriffliche Unterscheidung zwischen visueller und optischer Spektrometrie, Spektralbereiche

Nach der DIN 5031 Teil 7 wird elektromagnetische Strahlung mit Photonenergien unter 12,4 eV und Wellenlängen zwischen 100 nm und 1 mm als optische Strahlung bezeichnet.

Das optische Spektrum wird nach der DIN 5031 Teil 7 wiederum grob in Ultraviolett, sichtbares Licht und Infrarot unterteilt (Tab. 2.1). Sichtbares Licht (= visuelles Spektrum) erstreckt sich über den Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm. Da die Empfindlichkeit des menschlichen Auges zu den Rändern des Spektralbereichs stark abfällt, ist es schwer, eine objektive Grenze zu bestimmen. Daher muss hier besonders auf eine festlegende Norm zurückgegriffen werden.

In dieser Arbeit wird vereinfachend und verallgemeinernd grundsätzlich der Begriff der optischen Spektrometrie verwendet, auch wenn faktisch nur Teilbereiche relevant sind, d. h. ungeachtet der spektralen Transmission verwendeter Bauteile oder der spektralen Empfindlichkeit des verwendeten Detektorsystems.

Tab. 2.1: Wellenlängenbereiche der optischen Strahlung nach DIN 5031-7.

| Strahlungsbereich | Strahlung | Abkürzung | Wellenlängenbereich |
|-------------------|------------------|------------|---|
| Ultraviolett | Vakuum-UV | UV-C (VUV) | 100 nm bis 200 nm |
| | Fernes UV | UV-C (FUV) | 200 nm bis 280 nm |
| | Mittleres UV | UV-B | 280 nm bis 315 nm |
| | Nahes UV | UV-A | 315 nm bis 380 nm |
| Sichtbares Licht | Sichtbares Licht | VIS | 380 nm bis 780 nm |
| Infrarot | Nahes IR | NIR (IR-A) | 780 nm bis 1,4 μm |
| | | NIR (IR-B) | 1,4 μm bis 3,0 μm |
| | Mittleres IR | IR-C (MIR) | 3 μm bis 50 μm |
| | Fernes IR | IR-C (FIR) | 50 μm bis 1 mm |

2.2 Relevante radiometrische und photometrische Größen für die Beschreibung experimenteller Daten

Die physikalischen Eigenschaften des Lichts als elektromagnetische Strahlung werden mit radiometrischen Größen beschrieben. Obwohl Licht diverse Effekte auf Menschen hat, ist der offensichtlichste, die visuelle Wahrnehmung zu ermöglichen. Daher ist es üblich, sichtbares Licht durch photometrische Größen so zu beschreiben, wie es vom menschlichen Auge wahrgenommen wird. Zu jeder radiometrischen Größe gibt es eine korrespondierende photometrische Größe (Tab. 2.2).

Die Verwendung und Definition radiometrischer sowie photometrischer Größen und Einheiten wird im Lehren von Physik häufig vernachlässigt. Daher ist es wichtig, diese Größen ordnungsgemäß zu definieren und zu verwenden. Jene Größen und Einheiten, die für die Experimente im Rahmen dieser Arbeit relevant sind, werden im Folgenden diskutiert. Für darüber hinausgehende Betrachtungen ist das *Handbook of Optics* empfehlenswert (Bass, 1995b, 1995a).

In der untersuchten Literatur ist die Darstellung radiometrischer und photometrischer Größen teils inkonsistent. Hier richtet sich die Darstellung physikalischer Größen nach den Empfehlungen der *International Union of Pure and Applied Physics* (Cohen & Giacomo, 1987). Radiometrische und photometrische Größen werden, wenn nötig durch die Indizes e und v unterschieden (*energetic* bzw. *visible*).

2.2.1 Radiometrische Größen

Die *Strahlungsenergie* Q_e ist die in Form von elektromagnetischer Strahlung emittierte, übertragene oder empfangene Energie.

Der *Strahlungsfluss* Φ_e ist die in Form von elektromagnetischer Strahlung emittierte, übertragene oder empfangene Leistung (Energie pro Zeiteinheit t):

$$\Phi_e = \frac{dQ_e}{dt}. \quad (2.1)$$

Die *Bestrahlungsstärke* E_e ist das Verhältnis des auf ein infinitesimales Element einer Oberfläche S einfallenden Strahlungsflusses zu der senkrecht zur Einfallrichtung projizierten Fläche dA_d des Elements dS_d ,

$$E_e = \frac{d\Phi_e}{dA_d} = \frac{d\Phi_e}{\cos \theta_d dS_d}, \quad (2.2)$$

mit dem Winkel θ_d zwischen der Strahlungsrichtung und der Flächennormale des Flächenelements dS_d .