

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|----|
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Inhaltliche Motivation und Ausgangslage | 7 |
| 2.1 Konzepte und Forschungsbefunde zur Vermittlung von Magnetismus | 8 |
| 2.1.1 Vermittlungskonzepte für Magnetismus in der schulischen und universitären Lehre | 11 |
| 2.1.1.1 Modelle, Repräsentanten und Visualisierungen | 13 |
| 2.1.1.2 Experimentelle Zugänge | 23 |
| 2.1.2 Empirische Befunde zum konzeptuellen Verständnis und mentalen Modellen von Lernenden | 26 |
| 2.1.2.1 Konzeptuelles Verständnis von Lernenden | 28 |
| 2.1.2.2 Vorstellungen von Lernenden und mentale Modelle | 31 |
| 2.2 Befragung von Lehrpersonen zur aktuellen Behandlung von Magnetismus | 34 |
| 2.2.1 Durchführung und Konzeption | 35 |
| 2.2.2 Auswertung, Ergebnisse und Diskussion | 38 |
| 2.3 Inhaltliche Legitimation und Motivation des Lehrkonzeptes | 52 |
| 3 Struktur und Zielsetzung des Forschungsprojektes | 59 |
| 3.1 Lernen mit multiplen Repräsentationen | 62 |
| 3.1.1 Enaktive, ikonische und symbolische Repräsentationsebenen | 67 |
| 3.1.2 Informationsspeicherung und -verarbeitung nach dem Multimedia-Prinzip | 69 |
| 3.1.3 Relevante Repräsentationsformen und zugehörige Interdependenzen | 75 |
| 3.2 Forschungsmethode Design-Based Research | 79 |
| 4 Sachstruktur und fachliche Klärung | 85 |
| 4.1 Makroskopische Beschreibung von Magnetismus | 89 |
| 4.1.1 Phänomenologische Beschreibung der Erscheinungsformen von Magnetismus in Materie | 89 |
| 4.1.2 Magnetische Suszeptibilität und relative magnetische Permeabilität | 97 |

| | | |
|------------|--|-----|
| 4.1.3 | Kenngrößen magnetischer Felder | 99 |
| 4.1.3.1 | Verlauf magnetischer Feldlinien eines Stabmagneten | 102 |
| 4.1.3.2 | Diskussion verschiedener Größen zur Beschreibung magnetischer Felder | 109 |
| 4.1.4 | Magnetisierungsprozesse | 116 |
| 4.1.4.1 | Dia- und paramagnetische Magnetisierungen | 117 |
| 4.1.4.2 | Ferromagnetische Magnetisierungen und Modell der Weisschen Bezirke | 118 |
| 4.1.5 | Magnetismus stationärer Ströme und bewegter Ladungen | 123 |
| 4.1.5.1 | Elektromagnetismus zeitlich konstanter Felder | 124 |
| 4.1.5.2 | Elektromagnetismus zeitlich veränderlicher Felder | 133 |
| 4.1.6 | Zusammenfassung der makroskopischen Beschreibung von Magnetismus | 138 |
| 4.2 | Mikroskopische Beschreibung von Magnetismus | 141 |
| 4.2.1 | Klassische Beschreibung magnetischer Momente | 149 |
| 4.2.1.1 | Magnetische Momente in der Newtonschen Mechanik | 150 |
| 4.2.1.2 | Magnetische Momente in der Hamiltonschen Mechanik | 162 |
| 4.2.2 | Skipping Orbits und das Bohr-van Leeuwen-Theorem | 164 |
| 4.2.3 | Visuelle Repräsentationen quantenmechanischer Grundlagen | 169 |
| 4.2.3.1 | Ortszustand von Elektronen | 171 |
| 4.2.3.2 | Vektorpotential und Einfluss auf den Ortszustand von Elektronen | 180 |
| 4.2.3.3 | Spinzustand von Elektronen | 192 |
| 4.2.3.4 | Übergang von klassischer zu quantenmechanischer Beschreibung von Elektronenzuständen | 201 |
| 4.2.4 | Beiträge zum magnetischen Moment | 209 |
| 4.2.4.1 | Magnetisches Moment durch mikroskopische Ströme des Elektrons | 215 |
| 4.2.4.2 | Magnetisches Moment durch mikroskopische Ströme des Atomkerns | 223 |
| 4.2.4.3 | Magnetisches Moment des Elektronenspins | 224 |
| 4.2.4.4 | Magnetisches Moment des Kernspins | 228 |
| 4.2.4.5 | Vergleich und Zusammenfassung der Beiträge zum magnetischen Moment | 229 |
| 4.2.5 | Atomarer und molekularer Magnetismus bei nicht-wechselwirkenden magnetischen Momenten | 235 |
| 4.2.5.1 | Langevin-/Larmor-Diamagnetismus | 237 |
| 4.2.5.2 | Langevin-Paramagnetismus | 244 |

| | | |
|------------|--|------------|
| 4.2.5.3 | Van Vleck-Paramagnetismus | 248 |
| 4.2.6 | Magnetismus quasifreier Elektronen bei nicht-wechselwirkenden magnetischen Momenten | 249 |
| 4.2.6.1 | Landau-Diamagnetismus | 254 |
| 4.2.6.2 | Pauli-Paramagnetismus | 267 |
| 4.2.6.3 | Vergleich magnetischer Erscheinungen quasifreier Elektronen ohne Wechselwirkung | 272 |
| 4.2.7 | Ferromagnetismus als kollektives Phänomen | 274 |
| 4.2.8 | Zusammenfassung der mikroskopischen Beschreibung von Magnetismus | 290 |
| 4.2.9 | Magnetismus an den Grenzen der Physik | 294 |
| 4.2.9.1 | Magnetische Phänomene in ultrastarken Magnetfeldern . . | 295 |
| 4.2.9.2 | Temperaturabhängigkeit magnetischer Erscheinungen . . | 299 |
| 4.3 | Übersicht und Zusammenfassung der Sachstruktur | 304 |
| 5 | Experimentelle Zugänge | 309 |
| 5.1 | Magnetisches Pendel | 314 |
| 5.1.1 | Versuchsaufbau und Durchführung | 317 |
| 5.1.2 | Messergebnisse und Diskussion | 320 |
| 5.2 | Magnetische Torsionsdrehwaage | 324 |
| 5.2.1 | Versuchsaufbau und Durchführung | 325 |
| 5.2.2 | Messergebnisse und Diskussion | 329 |
| 5.3 | Magnetismuswaage | 331 |
| 5.3.1 | Theoretischer Hintergrund | 337 |
| 5.3.2 | Versuchsaufbau und Durchführung | 343 |
| 5.3.2.1 | Bestimmung des Massenunterschiedes | 347 |
| 5.3.2.2 | Bestimmung der Probenabmessungen | 348 |
| 5.3.2.3 | Bestimmung des Magnetfeldgradienten | 350 |
| 5.3.3 | Messergebnisse und Diskussion | 358 |
| 5.3.3.1 | Messergebnisse der Waage mit 0.01 g-Genauigkeit | 359 |
| 5.3.3.2 | Messergebnisse der Waage mit 0.001 g-Genauigkeit | 361 |
| 5.3.3.3 | Vergleichende Diskussion | 363 |
| 5.4 | Magnetooptischer Kerr-Effekt | 368 |
| 5.4.1 | Theoretischer Hintergrund | 371 |
| 5.4.2 | Versuchsaufbau und Durchführung | 378 |
| 5.4.3 | Messergebnisse und Diskussion | 384 |

| | |
|---|-----|
| 6 Digitale Inhalte und multimediale Visualisierungen | 391 |
| 6.1 Einführender Kurzfilm und Projektteaser | 392 |
| 6.1.1 Planung und Konzeption | 392 |
| 6.1.2 Gestaltungselemente und Realisierung | 399 |
| 6.2 Interaktive Simulationen | 402 |
| 6.2.1 Interaktive Simulation I - Magnetismuswaage | 405 |
| 6.2.1.1 Entwicklungsprozess und Entscheidungsfindung | 407 |
| 6.2.1.2 Beschreibung und fachlicher Bezug | 411 |
| 6.2.1.3 Real:Digital | 415 |
| 6.2.2 Interaktive Simulation II - Magnetisierungskurven | 416 |
| 6.2.2.1 Entwicklungsprozess und Entscheidungsfindung | 417 |
| 6.2.2.2 Beschreibung und fachlicher Bezug | 419 |
| 6.2.2.3 Real:Digital | 422 |
| 6.2.3 Ausblick Projekt <i>Real:Digital</i> | 423 |
| 7 Praktische Erprobung der Projektinhalte und empirische Untersuchung | 427 |
| 7.1 Untersuchungsplan und inhaltliche Gestaltung der praktischen Erprobung | 429 |
| 7.2 Allgemeine Beurteilung zu Inhalten und Gestaltung der Praxisdurchführung | 434 |
| 7.3 Entwicklung des konzeptuellen Verständnisses von Magnetismus | 439 |
| 7.3.1 Beschreibung der Methoden und Durchführung | 440 |
| 7.3.1.1 Problemzentrierte Leitfadeninterviews | 441 |
| 7.3.1.2 Offene Items - Fragebogen | 449 |
| 7.3.2 Ergebnisse und Diskussion | 453 |
| 7.3.2.1 Offene Items - Fragebogen | 453 |
| 7.3.2.2 Problemzentrierte Leitfadeninterviews | 464 |
| 7.3.2.3 Zusammenfassende Diskussion zur Untersuchung des konzeptuellen Verständnisses | 474 |
| 7.4 Studierendeneinstellungen zum Projektteaser | 476 |
| 7.4.1 Beschreibung der Methoden und Durchführung | 476 |
| 7.4.2 Ergebnisse und Diskussion | 480 |
| 7.5 Studierendeneinstellungen zu interaktiven Simulationen | 487 |
| 7.5.1 Beschreibung der Methoden und Durchführung | 488 |
| 7.5.2 Ergebnisse und Diskussion | 491 |
| 8 Fazit und Ausblick | 497 |
| Literaturverzeichnis | 505 |

| | |
|---|-----|
| Abbildungsverzeichnis | 553 |
| Tabellenverzeichnis | 556 |
| Anhang | 557 |
| A.1 Übersicht Grunddaten empirische Untersuchungen | 559 |
| B.1 Magnetische Anisotropie | 561 |
| B.2 Theorie des Mikromagnetismus | 565 |
| B.3 Feldlinienbilder bei Anziehung und Abstoßung zweier Permanentmagneten | 569 |
| B.4 Wellenfunktionen des Wasserstoffatoms | 572 |
| B.5 Reelle Atomorbitale des Wasserstoffatoms | 573 |
| B.6 Wahrscheinlichkeitsstromdichte im äußeren Magnetfeld | 574 |
| B.7 Magnetische Suszeptibilität des Magnetismus quasifreier Elektronen | 576 |
| C.1 Version A Fragebogen Lehrerbefragung | 579 |
| C.2 Version B Fragebogen Lehrerbefragung | 582 |
| D.1 Sprechertext zum einführenden Kurzfilm (deutsch) | 586 |
| D.2 Sprechertext zum einführenden Kurzfilm (englisch) | 588 |
| E.1 Materialien Praxisdurchführung | 590 |
| E.2 Forscherbuch Praxisdurchführung | 591 |
| F.1 Fragebogen FB1: Konzeptuelles Verständnis | 609 |
| F.2 Fragebogen FB2: Projektteaser | 613 |
| F.3 Fragebogen FB3: Widget Magnetisierungskurven | 615 |
| F.4 Interviewleitfaden: Konzeptuelles Verständnis | 617 |
| F.5 Codierleitfaden: Konzeptuelles Verständnis | 618 |
| G.1 Ergebnisse geschlossene Items Einstellung der Studierenden (Projektteaser) | 621 |
| G.2 Ergebnisse Befragung Multimedia Science Slam 2015 (Projektteaser) | 622 |
| G.3 Ergebnisse geschlossene Items Einstellung der Studierenden (Widget) | 623 |
| Danksagung | 625 |