

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 Projekthinhalte 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 (Projectteaser)	621
G.2 Ergebnisse Befragung Multimedia Science Slam 2015 (Projectteaser)	622
G.3 Ergebnisse geschlossene Items Einstellung der Studierenden (Widget)	623
Danksagung	625