

BestMasters

Patrick Schürmann

Experimente zur optischen Interferenz aus dem 3D-Drucker



Springer Spektrum

BestMasters

Mit „**BestMasters**“ zeichnet Springer die besten Masterarbeiten aus, die an renommierten Hochschulen in Deutschland, Österreich und der Schweiz entstanden sind. Die mit Höchstnote ausgezeichneten Arbeiten wurden durch Gutachter zur Veröffentlichung empfohlen und behandeln aktuelle Themen aus unterschiedlichen Fachgebieten der Naturwissenschaften, Psychologie, Technik und Wirtschaftswissenschaften. Die Reihe wendet sich an Praktiker und Wissenschaftler gleichermaßen und soll insbesondere auch Nachwuchswissenschaftlern Orientierung geben.

Springer awards “**BestMasters**” to the best master’s theses which have been completed at renowned Universities in Germany, Austria, and Switzerland. The studies received highest marks and were recommended for publication by supervisors. They address current issues from various fields of research in natural sciences, psychology, technology, and economics. The series addresses practitioners as well as scientists and, in particular, offers guidance for early stage researchers.

Weitere Bände in der Reihe <http://www.springer.com/series/13198>

Patrick Schürmann

Experimente zur optischen Interferenz aus dem 3D-Drucker

 Springer Spektrum

Patrick Schürmann
Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Münster, Deutschland

ISSN 2625-3577

ISSN 2625-3615 (electronic)

BestMasters

ISBN 978-3-658-28893-8

ISBN 978-3-658-28894-5 (eBook)

<https://doi.org/10.1007/978-3-658-28894-5>

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

© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2020

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

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

Mein Dank gilt in erster Linie zwei Personen, die mich auf verschiedenen Ebenen der Arbeit unterstützt haben. So danke ich meinem Betreuer Dr. Alexander Pusch für viele hilfreiche Ideen in Bezug auf die Strukturierung und die Gewichtung der Themenbereiche dieser Arbeit sowie insbesondere in Bezug auf die Entwicklung und Ausgestaltung der Experimente. Bei der konkreten Umsetzung des 3D-Drucks danke ich in ganz besonderem Maße Carsten Bruns, der nicht nur die Druckvorgänge durchführte, sondern auch hilfreiche Hinweise für die Konstruktionen gab. Prof. Dr. Stefan Heusler und allen anderen Mitarbeitern des Instituts danke ich für tatkräftige Unterstützung und Ideengebung im Entwicklungsprozess. Für das Korrekturlesen dieser Arbeit bedanke ich mich bei meinen Freunden Britta Schweers und Lukas Reckfort sowie meiner Schwester Pia Schürmann und meiner Mutter Andrea Schürmann.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	XI
1 Einleitung	1
2 Interferenz im Lehrplan	3
2.1 Inhaltsfelder und Kompetenzerwartungen	4
2.2 Übergeordnete Kompetenzen	7
3 Physikalische Grundlagen	11
3.1 Interferenz und ihre Voraussetzungen	11
3.2 Interferometer	14
3.2.1 Michelson-Interferometer	14
3.2.2 Mach-Zehnder-Interferometer	19
3.2.3 Sagnac-Interferometer	23
3.2.4 Jamin-Interferometer	26
3.3 Fresnel-Doppelspiegel	31
3.4 Interferenz an dünnen Schichten	34
3.5 Interferenz durch Beugung	36
3.5.1 Einzelspalt	37
3.5.2 Gitter	42
4 3D-Druck im Unterricht	47
5 Entwicklung und Analyse der Instrumente	51
5.1 Kriterien für 3D-Druck-gestützte Instrumente im Schulunter- richt	51
5.2 Grundlegende Ideen für die Entwicklung der Instrumente	53
5.3 Entwicklung und Analyse einfacher Instrumente	55

5.4	Entwicklung und Analyse justierbarer Instrumente	63
5.5	Summative Bewertung der Analyse	72
6	Testung und Analyse der experimentellen Aufbauten	75
6.1	Kriterien für experimentelle Aufbauten im Schulunterricht	75
6.2	Testung und Analyse der Interferometer	77
6.2.1	Michelson-Interferometer	77
6.2.2	Mach-Zehnder-Interferometer	80
6.2.3	Sagnac-Interferometer	84
6.2.4	Jamin-Interferometer	86
6.3	Testung und Analyse des Fresnel-Doppelspiegels	92
6.4	Testung und Analyse der Interferenz an dünnen Schichten . .	94
6.5	Testung und Analyse der Interferenz durch Beugung an Spalt und Gitter	96
6.5.1	Verstellbarer Einzelspalt	96
6.5.2	CD-Gitter	98
6.6	Summative Bewertung der Analyse	100
7	Vergleich mit herkömmlichen Instrumenten und Experi- menten	103
8	Funktionale Analyse und Einsatzmöglichkeiten im Unterricht	107
8.1	Funktionen des entwickelten Sets	107
8.2	Einsatz in Demonstrationsexperimenten	110
8.3	Einsatz in Schülerexperimenten	111
8.3.1	Methodische Einbindung	111
8.3.2	Differenzierungsvielfalt	114
8.3.3	Weitere Lernmöglichkeiten	115
8.4	Ausgearbeitetes Beispiel: Experimente zu Beugung und In- terferenz in arbeitsteiliger Gruppenarbeit mit anschließenden Vorträgen in rotierenden Kleingruppen	117

8.4.1	Einbindung in den Kontext	117
8.4.2	Vorstellung der Materialien	118
8.4.3	Zugeschnittene didaktische Analyse	120
9	Zusammenfassung und Ausblick	123
	Zugang zu den Dateien für den Nachbau	127
	Literaturverzeichnis	129
	Anhang: Unterrichtsmaterialien zum ausgearbeiteten Beispiel	131

Abbildungsverzeichnis

3 Physikalische Grundlagen

1	Konstruktive und destruktive Interferenz	12
2	Veranschaulichung zeitlicher und räumlicher Kohärenz im ein-dimensionalen Fall	13
3	Schematischer Aufbau des Michelson-Interferometers	15
4	Verlauf der durch Aufweitung verursachten Strahlengänge beim Michelson-Interferometer	17
5	Schematischer Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers	20
6	Phasenverschiebung bei Reflexion	22
7	Schematischer Aufbau des Sagnac-Interferometers	24
8	Schematischer Aufbau des Jamin-Interferometers	26
9	Skizze zur Herleitung der Formel zur Bestimmung der Lichtwellenlänge durch das Jamin-Interferometer	28
10	Schematische Funktionsweise des Fresnel-Doppelspiegels	32
11	Abstand der Maxima in Abhängigkeit vom Abstand der virtuellen Quellen beim Fresnel-Doppelspiegel	33
12	Transmission und Reflexion von Licht an dünnen Schichten	35
13	Beugung am Einzelspalt	37
14	Entstehung der Extrema im Interferenzmuster des Einzelspalts	38
15	Modell zur Entstehung von Maxima und Minima durch den Einzelspalt	40
16	Entstehung der Extrema im Interferenzmuster des Gitters	44

5 Entwicklung und Analyse der Instrumente

17	CD-Gitter	56
18	Feststehende Plexiglasscheibe	56
19	Einfacher und doppelter Strahlteiler	58
20	Schirm	59

21	Smartphone-Halter	60
22	Halter der Linsen	61
23	Positionsvorlage, exemplarisch für das Mach-Zehnder-Interferometer	62
24	Feststehender Spiegel	63
25	Einzelteile des Spiegels	65
26	Fresnel-Doppelspiegel	67
27	Bewegliche Plexiglasscheibe	68
28	Laserpointer in justierbarer Halterung	69
29	Verstellbarer Einzelspalt	70
30	Instrument zur Untersuchung der Interferenz an dünnen Schichten	72

6 Testung und Analyse der experimentellen Aufbauten

31	Experimenteller Aufbau des Michelson-Interferometers	78
32	Interferenzmuster des Michelson-Interferometers	79
33	Experimenteller Aufbau des Mach-Zehnder-Interferometers	81
34	Interferenzmuster des Mach-Zehnder-Interferometers	83
35	Experimenteller Aufbau des Sagnac-Interferometers	84
36	Interferenzmuster des Sagnac-Interferometers	86
37	Experimenteller Aufbau des Jamin-Interferometers	87
38	Interferenzmuster des Jamin-Interferometers	89
39	Aufnahmen des Musters des Jamin-Interferometers mit der Kamera des Smartphones zur quantitativen Auswertung	90
40	Experimenteller Aufbau des Versuchs zum Fresnel-Doppelspiegel	93
41	Interferenzmuster des Fresnel-Doppelspiegels	93
42	Aufbau des Experiments zur Interferenz an dünnen Schichten	95
43	Muster der Interferenz an dünnen Schichten	95
44	Interferenzmuster der Beugung am Einzelspalt	97
45	Experimenteller Aufbau und Muster der Beugung am CD-Gitter	99



1 Einleitung

Das Phänomen der optischen Interferenz wird einerseits in etlichen technischen Anwendungen genutzt und ist andererseits von grundlegender Bedeutung für viele naturwissenschaftliche Experimente wie Theorien. Die wohl wichtigste technische Anwendung ist der Laser, welcher für mittlerweile unzählige Geräte in Alltag, Wirtschaft und Wissenschaft unverzichtbar ist. Auf experimenteller Ebene der Naturwissenschaften bildet Interferenz zum Beispiel die Grundlage für Interferometer, mit denen Stoffe auf Eigenschaften und Zusammensetzung hin untersucht werden können. Als Beispiel der theoretischen Ebene sind auch in der Quantenphysik viele Überlegungen ohne das Phänomen der Interferenz undenkbar.

Aufgrund dieser gesellschaftlichen Relevanz hat das Verständnis der Interferenz einen festen Platz in den Lehrplänen der Oberstufenphysik erhalten. Der konkrete experimentelle Zugang im Unterricht stellt die Lehrkräfte und Schulen jedoch häufig vor ein Problem. Viele herkömmliche Instrumente zur Durchführung der Experimente sind nur zu sehr hohen Preisen erhältlich, welche häufig das Budget des Fachbereichs überschreiten oder in einer Kosten-Nutzen-Analyse zur Ablehnung des Kaufs führen. Sollte eine Schule sich dennoch zum Kauf entscheiden, werden aufgrund des Preises gerade einmal so wenige Instrumente gekauft, dass diese Versuche nur als Demonstrationsexperimente von den Lehrkräften durchzuführen sind. Diese Problemstellung vor Augen entstand die Motivation Alternativen zu entwickeln, welche einerseits verhältnismäßig günstig in der Anschaffung sind und andererseits auch Schülerinnen und Schülern die Möglichkeit geben selbst experimentell tätig zu werden.

Aus dieser Motivation konkretisierte sich folgendes Ziel der Arbeit. Es soll ein Set an optischen Instrumenten entwickelt und untersucht werden, mit denen eine Gruppe von Schülerinnen und Schülern verschiedene Experimente zur optischen Interferenz durchführen kann, wobei der Schwerpunkt der Experimente auf Interferometern liegt. Dieses Set soll durch den Einsatz eines 3D-Druckers kostengünstig für Lehrkräfte nachbaubar sein.

Die Arbeit strukturiert sich daher in nachstehende Abschnitte. Zu Beginn wird die unterrichtliche Behandlung der optischen Interferenz anhand einer Analyse des Nordrhein-Westfälischen Lehrplans für die Sekundarstufe II im Fach Physik legitimiert und eingeordnet. Um nachvollziehen zu können, wie die entwickelten Experimente funktionieren, wird in Kapitel drei auf die ihnen zugrundeliegenden physikalischen Grundlagen eingegangen. Dann folgt eine kurze Einführung in die aktuelle Nutzung und das Potential des 3D-Drucks für den Physikunterricht. Im anschließenden Kapitel werden Kriterien erarbeitet, welche unter Berücksichtigung der Zielsetzung der Arbeit von den Instrumenten erfüllt werden sollen. Mit Bezug auf diese Kriterien werden die Instrumente daraufhin analysiert. Analog dazu werden im sechsten Abschnitt zunächst Kriterien für die experimentellen Aufbauten hergeleitet, dann die Experimente in der Praxis getestet und mit Rückbezug auf die Kriterien analysiert. Auf den Ergebnissen der vorangegangenen Abschnitte basierend wird im siebten Kapitel ein Vergleich zwischen den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Instrumenten und Experimenten mit herkömmlichen Instrumenten und Experimenten gezogen. In Abschnitt acht werden dann Möglichkeiten für den Einsatz im Unterricht erarbeitet und didaktisch analysiert. Hier wird insbesondere auf die vorteilhaften Lernmöglichkeiten und die Differenzierungsmöglichkeiten im Einsatz als Schülerexperimente eingegangen. Das Kapitel wird durch konkret ausgearbeitete Materialien für den unterrichtlichen Einsatz abgerundet. Zum Ende der Arbeit wird auf einer Zusammenfassung aufbauend ein Ausblick gegeben.

Der Zugang zu den Dateien für den eigenen Nachbau wird auf Seite 127 beschrieben.



2 Interferenz im Lehrplan

Interferenz spielt wie in der Einleitung erwähnt eine wichtige Rolle für die Physik. Inwiefern sie auch im Physikunterricht behandelt werden soll, wird nun anhand einer Lehrplananalyse veranschaulicht. Dazu wurde der *Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen* herangezogen, da in der Sekundarstufe I Wellenoptik nicht behandelt wird. Aufgrund der föderalen Struktur der Bildungspolitik Deutschlands gibt es keinen bundeseinheitlichen Lehrplan, weshalb NRW als größtes Bundesland stellvertretend für die Analyse ausgewählt wurde. Aufgrund großer Überschneidungen sind die Ergebnisse der Analyse größtenteils auf andere Bundesländer übertragbar.

Der Lehrplan¹ ist kompetenzorientiert aufgebaut (MSW-NRW, 2014, S. 9). Das bedeutet, dass er gewisse *übergeordnete Kompetenzen* vorgibt, welche durch den Physikunterricht erworben werden sollen. Diese Kompetenzen gliedern sich dabei in die Bereiche *Umgang mit Fachwissen (UF)*, *Erkenntnisgewinnung (E)*, *Kommunikation (K)* und *Bewertung (B)*. Da der Erwerb von Kompetenzen immer an Inhalte gebunden ist, gibt der Lehrplan diese durch ausdifferenzierte *Inhaltsfelder* vor. Aus den übergeordneten Kompetenzen lassen sich dann anhand konkreter Inhalte gewisse *Kompetenzerwartungen* an die Schülerinnen und Schüler formulieren, welche zum Ende der Sekundarstufe II erfüllt sein sollen (ebd. S. 16ff.).

In diesem Kapitel wird nun zuerst abgeglichen, in welchen Inhaltsfeldern sich Experimente zur Interferenz wiederfinden und welche konkreten Kompetenzerwartungen durch diese (in Teilen) erfüllt werden können. Wie im Lehrplan selbst beschrieben, ist der Unterricht nicht allein auf das bloße Erreichen dieser fest umrissenen Erwartungen beschränkt (ebd. S. 17). Daher wird im zweiten Teil dieses Kapitels der Blick etwas weiter gefasst und analysiert, inwiefern einige der übergeordneten Kompetenzen durch Experimente zur

¹Im Folgenden wird der Kernlehrplan für die Sekundarstufe II Gymnasium/Gesamtschule in Nordrhein-Westfalen abgekürzt nur als Lehrplan bezeichnet.

Interferenz erworben werden können, wobei anwendungsnah auf das konkret entwickelte Set Bezug genommen wird.

2.1 Inhaltsfelder und Kompetenzerwartungen

In der Einführungsphase wird ausschließlich die Mechanik als Inhaltsfeld vorgegeben (ebd. S. 19). In der Qualifikationsphase sind je nach Kursart (Grundkurs/Leistungskurs) verschiedene Inhaltsfelder vorgegeben, in denen sich die optische Interferenz wiederfindet.

Im Grundkurs sind im Inhaltsfeld 2, *Quantenobjekte*, die meisten Anknüpfungspunkte zu finden, da ein inhaltlicher Schwerpunkt der Wellenaspekt des Photons ist (ebd. S. 30). Hier wird als möglicher Kontext die „Erforschung des Photons“ genannt, woran Basiskonzepte der Wechselwirkung wie „Lichtwellenlänge, Lichtfrequenz, Huygens’sches Prinzip, Kreiswellen, ebene Wellen, Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz“ erlernt werden sollen (ebd. S. 30). Zu diesem Inhaltsfeld findet man folgende ausformulierte Kompetenzerwartungen, welche durch die Behandlung von Experimenten zur Interferenz (in Teilen) erfüllt werden können:

Die Schülerinnen und Schüler . . .

. . . erläutern am Beispiel der Quantenobjekte Elektron und Photon die Bedeutung von Modellen als grundlegende Erkenntniswerkzeuge in der Physik,

. . . bestimmen Wellenlängen und Frequenzen von Licht mit *Doppelspalt* und *Gitter*,

. . . zeigen an Beispielen die Grenzen und Gültigkeitsbereiche von Wellen- und Teilchenmodellen für Licht und Elektronen auf.

(ebd. S. 31)

Darüber hinaus ist noch ein weiterer Anknüpfungspunkt im Inhaltsfeld 5, *Relativität von Raum und Zeit*, zu finden. Hier wird als inhaltlicher Schwer-

punkt die „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ genannt (ebd. S. 36). Diese kann über das Michelson-Morley-Experiment gezeigt werden, welches auf der Verwendung eines Interferometers beruht. Konkret wird dies sogar in einer Kompetenzerwartung erwähnt:

Die Schülerinnen und Schüler . . .

. . . interpretieren das *Michelson-Morley-Experiment* als ein Indiz für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

(ebd.)

Die Inhaltsfelder des Leistungskurses sind anders gegliedert. Hier ist die Interferenz hauptsächlich in dem Inhaltsfeld 3, *Elektrik*, unter dem inhaltlichen Schwerpunkt „Elektromagnetische Schwingungen und Wellen“ verortet (ebd. S. 40). Ein zu Experimenten zur Interferenz geeigneter Kontext wird zwar nicht genannt, dafür finden sich aber passende Basiskonzepte der Wechselwirkung wie „Licht und Mikrowellen – Reflexion, Brechung, Beugung, Interferenz, Huygens’sches Prinzip“ wieder (ebd. S. 41). In Bezug auf Kompetenzerwartungen, die durch Behandlung von Experimenten zur Interferenz (in Teilen) erfüllt werden können, lassen sich Folgende vorfinden:

Die Schülerinnen und Schüler . . .

. . . beschreiben qualitativ die lineare Ausbreitung harmonischer Wellen als räumlich und zeitlich periodischen Vorgang,

. . . beschreiben die Phänomene Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz im Wellenmodell und begründen sie qualitativ mithilfe des Huygens’schen Prinzips,

. . . beschreiben die Interferenz an Doppelspalt und Gitter im Wellenmodell und leiten die entsprechenden Terme für die Lage der jeweiligen Maxima n -ter Ordnung her,

. . . ermitteln auf der Grundlage von Brechungs-, Beugungs- und Interferenzerscheinungen (mit Licht- und Mikrowellen) die Wellenlängen und die Lichtgeschwindigkeit,

... erläutern konstruktive und destruktive Interferenz sowie entsprechende Bedingungen mithilfe geeigneter Darstellungen.

(ebd. S. 42ff)

Über dieses Inhaltsfeld hinaus finden sich Anknüpfungspunkte einerseits in dem Inhaltsfeld 2, *Relativitätstheorie*. Analog zum Grundkurs wird auch hier die „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ als inhaltlicher Schwerpunkt genannt (ebd. S. 38). Die zugehörige Kompetenzerwartung weicht nur leicht von der des Grundkurses ab und lautet:

Die Schülerinnen und Schüler ...

... begründen mit dem Ausgang des *Michelson-Morley-Experiments* die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

(ebd. S. 39)

Andererseits wird im Inhaltsfeld 4, *Quantenphysik*, „Licht und Elektronen als Quantenobjekte“ als inhaltlicher Schwerpunkt genannt (ebd. S. 44). Im Zusammenhang mit Experimenten zur Interferenz stehen hier folgende Kompetenzerwartungen:

Die Schülerinnen und Schüler ...

... stellen anhand geeigneter Phänomene dar, wann Licht durch ein Wellenmodell bzw. ein Teilchenmodell beschrieben werden kann,

... erläutern bei Quantenobjekten das Auftreten oder Verschwinden eines Interferenzmusters mit dem Begriff der Komplementarität.

(ebd. S. 45)

Zusammenfassend lässt sich also feststellen, dass sowohl im Grundkurs als auch im Leistungskurs viele Anknüpfungspunkte für Experimente zur Interferenz vorhanden sind. Es gibt jeweils ein Inhaltsfeld, in dem sich diese

Experimente fest verankern lassen. Darüber hinaus ist eine Anwendung in mindestens einem anderen Inhaltsfeld je Kursart ebenfalls denkbar, wenn auch nicht besonders tiefgehend.

2.2 Übergeordnete Kompetenzen

Nun wird analysiert inwiefern übergeordnete Kompetenzen durch das konkret entwickelte Experimentierset gefördert werden können. Es ließe sich zu jeder im Lehrplan angegebenen Kompetenz in gewisser Weise eine Verbindung zu Experimenten zur Interferenz herstellen. Hier sollen aber nur jene Kompetenzen analysiert werden, die sich unmittelbar aus der Behandlung dieser Experimente ergeben. Um der Analyse eine sinnvolle Struktur zu geben, werden die Kompetenzen nicht nach Kompetenzbereichen gesondert betrachtet, sondern in Gruppen nach der Art und Weise gegliedert, wie sie durch den Umgang mit den Experimenten erworben werden können.

Die erste Gruppe von Kompetenzen wird allgemein durch die Durchführung von Experimenten gefördert. Da das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Experimentierset einen großen Umfang an sowohl qualitativen als auch quantitativen Experimenten liefert, eignet es sich durch diese Vielfalt besonders zum Erwerb folgender Kompetenzen:

Die Schülerinnen und Schüler können ...

UF1 - Wiedergabe: ... physikalische Phänomene und Zusammenhänge unter Verwendung von Theorien, übergeordneten Prinzipien/Gesetzen und Basiskonzepten beschreiben und erläutern.

E5 - Auswertung: ... Daten qualitativ und quantitativ im Hinblick auf Zusammenhänge, Regeln oder mathematisch zu formulierende Gesetzmäßigkeiten analysieren und Ergebnisse verallgemeinern.

K1 - Dokumentation: ... bei der Dokumentation von Untersuchungen, Experimenten, theoretischen Überlegungen und Problemlösungen eine