

Matthias Rang, Olaf L. Müller

## Newton in Grönland

Das umgestülpte *experimentum crucis* in der Streulichtkammer

### Zusammenfassung

Newtons *experimentum crucis* hat ein komplementäres Gegenstück, d.h. ein Experiment, in dem die Rollen von Licht und Schatten genau ausgetauscht sind. Statt wie Newton in der Dunkelkammer zu experimentieren, müssen wir das Komplement des *experimentum crucis* in einer Streulichtkammer aufbauen (deren Wände sog. Lambertstrahler sind). Wenn es dieses umgestülpte Experiment wirklich gibt, dann liefert es für jeden newtonischen Beweis einen umgestülpten Gegenbeweis, dessen Konklusion die Heterogenität der Schatten wäre (also die Behauptung, dass nicht weißes Licht, sondern schwarze Schatten eine heterogene Mischung verschiedenfarbiger Strahlen mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften seien). Dass Newtons *experimentum crucis* in diesem Sinne umgestülpt werden kann, wird von Newtons eigener Theorie impliziert. Mehr noch, inzwischen ist der empirische Nachweis der Umstülpung gelungen.

### Abstract

Newton's *experimentum crucis* has a complementary counterpart, i.e., an experiment in which the roles of light and shadow are switched. Instead of experimenting in the dark room, à la Newton, we propose to perform the complement of the *experimentum crucis* in a bright room (whose walls consist of Lambertian radiators). If Newton's experiment can be turned upside-down, then for each Newtonian conclusion (derived from the original experiment) there is a counterconclusion (derived from the new experiment). Thus, we arrive at the heterogeneity of darkness, which is an unorthodox hypothesis: Darkness and shadows (rather than white light) consist of rays that differ with respect to colour and refrangibility. Newton's own theory implies that in his *experimentum crucis* the roles of light and darkness can be interchanged; moreover, their very interchangeability can be demonstrated empirically.

## I. Einleitung

Das *experimentum crucis* ist die berühmteste experimentelle Leistung des Physikers Isaac Newton.<sup>1</sup> Bis heute streiten sich die Gelehrten darüber, was Newton genau mit diesem Experiment zeigen wollte, auf welche Weise er dies hat zeigen wollen und wie erfolgreich er dabei war.<sup>2</sup> Klar ist nur, dass Newton mit dem Experiment auf die Heterogenität des Sonnenlichts abzielte. Diesem newtonischen Lehrsatz zufolge besteht Sonnenlicht (entgegen seinem homogenen Anschein) aus Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften,<sup>3</sup> ja, aus Lichtstrahlen unterschiedlicher bunter Farben.<sup>4</sup>

Ein Nebenschauplatz der Streitigkeiten um Newtons Experiment hat mit einer bemerkenswerten optischen Symmetrie der Natur zu tun, mit einer Symmetrie, die im Schulwissen der Physik nicht kanonisiert ist. Es handelt sich um eine Symmetrie zwischen weißem Licht und Finsternis sowie zwischen beliebigen Farben und deren komplementären Gegenstücken – also um eine Symmetrie zwischen Schwarz und Weiß, zwischen Grün und Purpur, zwischen Gelb und Blau sowie zwischen Türkis und Rot. Es ist dieselbe farbliche Symmetrie, die zwischen einem Farbphoto und dessen Negativ herrscht (zumindest, wenn man davon absieht, dass die Komplementärfarben der Farbnegative – aus technischen Gründen – zusätzlich rostrot getönt sind).

Wo zeigt die Natur diese Symmetrie? Sie zeigt sie in den prismatischen Experimenten, deren Pionier Newton war. Nehmen Sie ein einfaches prismatisches Experiment Newtons und vertauschen Sie darin die Rollen von weißem Licht und Schatten, drehen es gleichsam optisch um, invertieren es. Dann liefert Ihnen die Natur ein anderes prismatisches Experiment, das in *allen* seinen Aspekten wie ein exaktes Farbnegativ des Ausgangsexperiments aussieht. Die Vertauschung von Weiß und Schwarz führt also zur Umkehrung *aller anderen Farben* des Ausgangsexperiments. Wo z.B. in Newtons Grundexperiment ein Prisma den weißen Sonnenstrahl in Strahlen der Regenbogenfarben Blau, Grün, Rot (mit vielen fein abgestuften Zwischentönen) zerspaltet, da sieht man im invertierten Gegenexperiment das Komplement der Regenbogenfarben, deren Farbnegativ, also die Farben Gelb, Purpur, Türkis, ebenfalls mit Zwischentönen (vergl. Abb. 1 und Abb. 2 mit Abb. 3). Zur Farbterminologie: Um der Kürze willen werden wir bei Newtons Spektrum ebenso wie bei dessen Komplement jeweils nur von den drei erwähnten Farben

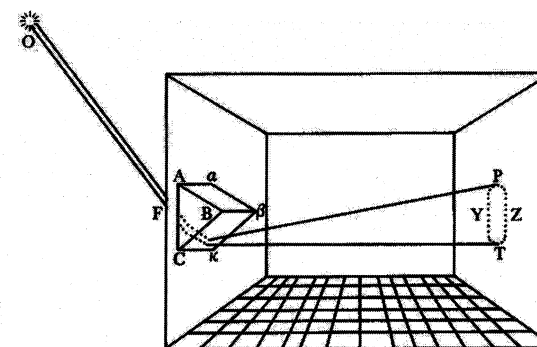


Abb. 1: Newtons Grundexperiment. Ein weißer Lichtstrahl reist von der Sonne O durchs Fensterladenloch F in die Dunkelkammer; dort wird er sogleich beim Eintritt ins Prisma (an der Fläche AC $\kappa\alpha$ ) zum Lot hingebrochen und beim Austritt aus dem Prisma (an der Fläche BC $\beta\kappa$ ) vom Lot weggebrochen. Bei dieser zweifachen Refraktion fächert sich der weiße Lichtstrahl in seine regenbogenbunten Bestandteile auf und zeichnet ein längliches Spektrum PYTZ an die gegenüberliegende Wand. (Aus Newtons *Lectiones opticae* ([LOOL]:50).

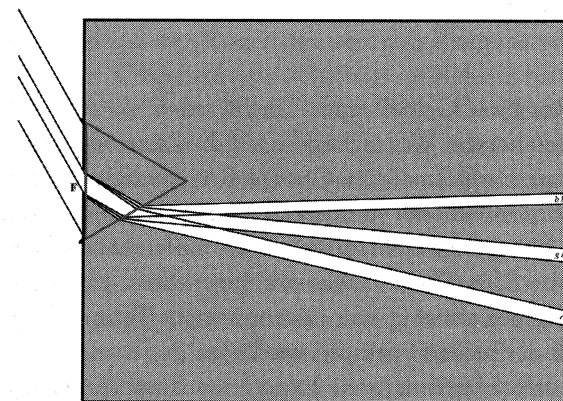


Abb. 2: Schematische Darstellung des Strahlengangs in Newtons Grundexperiment. Wir haben drei Strahlenbündel unterschiedlicher Refrangibilität hell hervorgehoben. Das obere (blaue) Strahlenbündel wird am stärksten von seinem Weg abgelenkt, das untere (rote) am schwächsten; mittlere Ablenkung erfährt das (grüne) Strahlenbündel in der Mitte. Die Farbnuancen zwischen diesen drei Hauptfarben des newtonischen Spektrums haben wir hier ausgeblendet; wir werden uns auch in den anderen Abbildungen auf jeweils drei Farben beschränken. Für diese und die nächsten Abbildungen haben wir Newtons Vereinfachungen beim Zeichnen der Abbildungsstrahlen unendlich entfernter Lichtquellen übernommen.

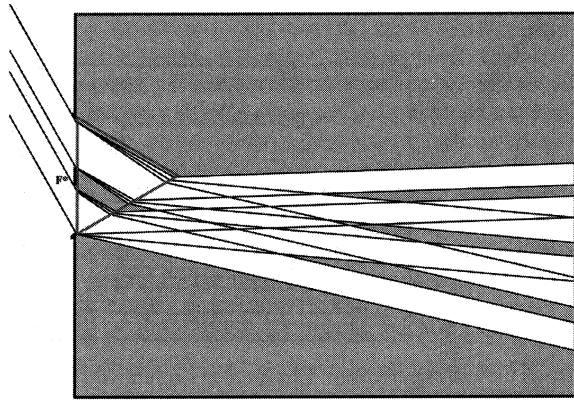


Abb. 3. Schematische Darstellung des newtonischen Strahlengangs im invertierten Grundexperiment.<sup>7</sup> Grau unterlegt haben wir diejenigen Richtungen, in denen sich laut Newton kein eigenes optisches Geschehen fortpflanzt. (Es sind dieselben Richtungen, die in der Abb. 2 weiß hervortreten). Aus newtonischer Perspektive pflanzen sich die drei Lichtstrahlensorten in den hier weiß hervorgehobenen Richtungen jeweils *doppelt* fort, einmal oberhalb des Schattenwerfers F\*, einmal darunter.

Blau-Grün-Rot bzw. Gelb-Purpur-Türkis reden; sie treten dort jeweils am deutlichsten hervor. Wer nicht gern auf die *Zwischentöne* in Newtons Spektrum Blau-Hellblau-Grün-Orange-Rot verzichten möchte, kann diese *Zwischentöne* überall in unserer Argumentation mitlaufen lassen; dasselbe gilt für die *Zwischentöne* im Komplementärspektrum Gelb-Hellrot-Purpur-Blau-Türkis. (Was wir hier kursiv hinzugefügt haben, gibt natürlich ebensowenig wie unsere ärmere Terminologie die volle Farbenvielfalt der beiden Spektren wieder).

Dass sich *einfache* prismatische Experimente invertieren lassen, ist seit Newtons Tagen bekannt; Goethe hat in seiner Newton-Kritik besonders deutlich darauf hingewiesen.<sup>6</sup> Doch bislang konnte nicht endgültig geklärt werden, ob sich auch Newtons *experimentum crucis* invertieren lässt.<sup>7</sup>

Wir möchten ein neues Experiment beschreiben, das dies leistet. Newtons Theorie sagt voraus, dass die Invertierung des *experimentum crucis* funktionieren muss. Sollte das stimmen, so wirft dies Ergebnis ein kritisches Licht auf Newtons Anspruch, mit seinem Experiment einen *eindeutigen* Beweis zugunsten seiner Theorie geliefert zu haben.

## II. Newtons berühmtestes Experiment

Bevor wir Newtons *experimentum crucis* beschreiben, möchten wir betonen, dass Newton in seiner Beschreibung des Experiments aus dem Jahr 1672 keinerlei Farben erwähnt. Das gesamte Experiment könnte erfolgreich von einem völlig farbenblinden Physiker durchgeführt werden. Wir werden gleich dennoch allerlei Farben ins Spiel bringen, weil man dadurch besser verstehen kann, was in dem Experiment vor sich geht; das ist ein didaktisches Mittel der Darstellung, kein wesentlicher Zug des Experiments selbst.

Betrachten Sie Abb. 4, die einer Abbildung aus Newtons *Opticks* nachempfunden ist.<sup>8</sup> Newton lässt Sonnenlicht durch ein Prisma ABC scheinen, baut aber – anders als in dem Grundexperiment, das wir in Abb. 1 und Abb. 2 dargestellt haben – unmittelbar hinter diesem Prisma einen Schirm DE auf. Nun können sich die verschiedenfarbigen (und divers refrangiblen) Lichtstrahlen unmittelbar hinter dem Prisma ABC noch nicht weit genug voneinander entfernt haben, um auf dem Schirm DE ein farbiges (und merklich in die Länge gezerrtes) Spektrum zu hinterlassen. Nur an den äußeren Enden des dort aufgefangenen Bildes werden sich Farben zeigen. Oben auf dem Schirm zeigt sich ein blauer Farbleck (da dorthin aus dem durchs Prisma kommenden Gesamtstrahlenbündel nur die oberen der stärker refrangiblen Lichtstrahlen gelangen können, ohne von irgendwelchen schwach refrangiblen Lichtstrahlen überlagert werden zu können); und am unteren Ende des Bildes auf dem Schirm DE zeigt sich ein roter Farbleck (da dorthin aus dem durchs Prisma kommenden Gesamtstrahlenbündel nur die unteren der schwach refrangiblen Lichtstrahlen gelangen können, ohne Störung durch irgendwelche stärker refrangiblen Strahlen). Kurzum, der größte Teil des Bildes auf dem Schirm DE ist weiß; und genau in seiner Mitte versammeln sich (i) vom unteren C-Ende des Prismas die stark refrangiblen blauen Strahlen, (ii) vom oberen A-Ende des Prismas die schwach refrangiblen roten Strahlen, und (iii) aus der Mitte des Prismas die mittelmäßig refrangiblen grünen Strahlen (siehe Abb. 5 im Anhang).<sup>9</sup>

Nun hat Newton in der Mitte dieses Schirms ein winziges Loch G gebohrt. Nur Strahlen aus dem eben erwähnten weißen Lichtgemisch können durch das Loch hindurch, und zwar je nach Farbe in unterschiedlicher Richtung.<sup>10</sup> In hinreichender Entfernung hinter dem Loch werden sich alle diese Lichtstrahlen weit genug voneinander entfernt

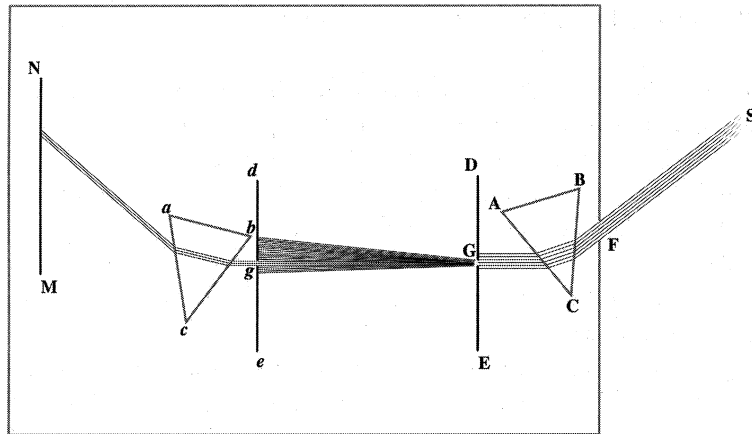


Abb. 4. Nachzeichnung des *experimentum crucis*. Wir haben alle Wände der Dunkelkammer eingezeichnet, die in Newtons Zeichnung zum größten Teil fehlen. Zudem haben wir eine idealisierte Pointe des newtonischen Versuchs berücksichtigt, die in Newtons Zeichnung untergeht: Anders als es seine Theorie im Idealfall verlangt, reisen in Newtons Zeichnung die Lichtstrahlen vom zweiten Prisma abc nicht parallel zum Schirm NM; das haben wir berichtigt. Der empirischen Realität angemessener ist dennoch Newtons Zeichnung. (Einen anderen Fehler der newtonischen Zeichnung haben wir nicht berichtigt; in seiner und in unserer Zeichnung verlaufen alle Strahlen zwischen Prisma ABC und Schirm DE parallel; sie müssten das Prisma aber in unterschiedlicher Richtung verlassen – sonst können sie sich hinter der Blendenöffnung G im Schirm DE kaum auffächern, wie richtigerweise in beiden Zeichnungen angedeutet).

haben, ohne sich noch in die Quere kommen zu können. Das bestätigt der weitere Verlauf des Experiments: Zwölf Fuß hinter dem Schirm DE bringt Newton einen zweiten Schirm de an. Auf diesem Schirm zeigt sich das bereits bekannte newtonische Farbenspektrum in seiner vollen Entwicklung: ganz oben blau, dann grün und rot – mit beliebig feinen Zwischenstufen. Und seine Länge übersteigt seine Breite um ein Vielfaches. Wenn man diese Farbenvielfalt auf drei Farben reduziert, so ergibt sich ein Bild wie in Abb. 6 im Anhang.

Bis hierhin entspricht Newtons *experimentum crucis* dem Grundexperiment aus Abb. 1 und Abb. 2. Fast könnte man sagen, dass das Grundexperiment als Bestandteil im *experimentum crucis* enthalten ist. Zwar zwingt Newton diesmal das Licht durch ein winziges Loch unmittelbar *hinter* dem Prisma; anders als im Grundexperiment, wo das Licht

vor dem Prisma durch ein Loch hindurch musste: durch das Loch im Fensterladen.<sup>11</sup> Aber dieser Unterschied in der Versuchsanordnung fördert keine unterschiedlichen Spektren zutage und bringt zunächst keine wesentlichen theoretischen Unterschiede mit sich.<sup>12</sup>

Jetzt kommt Bewegung ins Spiel: Newton dreht das Prisma ABC langsam um seine Achse hin und her. Was beobachtet er? Auf dem ersten Schirm DE wird das überwiegend weiße Bild (mit seinem blauen bzw. roten Ende) auf- und abwandern. Doch solange Newton das Prisma nicht zu stark dreht, solange also durchs Loch G im ersten Schirm DE immer noch ein Ausschnitt der weißen Mitte des Bildes hindurchkommt, solange wird sich auf dem zweiten Schirm de immer noch das gesamte Farbenspektrum sehen lassen. Es wird dort allerdings im Rhythmus der Prismendrehung ebenfalls auf- und abwandern.

Nun hat Newton auch in den zweiten Schirm ein winziges Loch g gebohrt; es hat denselben Durchmesser wie das Loch G im ersten Schirm. Durch dieses Loch kann immer nur ein winziger Ausschnitt des kompletten Lichtspektrums hindurch, und zwar je nach Drehung des Prismas ABC manchmal der Anteil, den das Prisma besonders stark von seinem Weg abgelenkt hat, manchmal der Anteil mit besonders schwacher und manchmal der mit mittlerer Wegablenkung.

Was geschieht jeweils mit diesen diversen Lichtstrahlen, wenn sie noch einmal durchs Prisma gesandt werden? Um das zu untersuchen, bringt Newton hinter dem zweiten Loch g ein zweites Prisma abc an. Und er fängt das Licht, das durch dies Prisma gelangt, in gewisser Entfernung auf einem Schirm NM auf, um es dort zu betrachten.

Hier die Ergebnisse des raffinierten Experiments: Lichtstrahlen, deren Richtung sich beim Weg durchs erste Prisma am stärksten geändert hat, ändern ihre Richtung beim Weg durchs zweite Prisma abermals am stärksten; und Lichtstrahlen, deren Richtung sich beim Weg durchs erste Prisma am wenigsten geändert hat, ändern ihre Richtung beim Weg durchs zweite Prisma wiederum am wenigsten; genauso für Lichtstrahlen, deren Refrangibilität (beim Weg durchs erste Prisma) zwischen den beiden Extremen gelegen hat.<sup>13</sup>

Was genau beweisen diese Ergebnisse? Und inwiefern beweisen sie, dass weißes Sonnenlicht aus Lichtstrahlen mit unterschiedlichen Brechungseigenschaften besteht? Darüber verliert Newton wenig Worte. Für ihn scheint es sich von selber zu verstehen, dass er mithilfe des Experiments nachgewiesen hat, dass die Brechungseigenschaften – die jeweili-

lige Refrangibilität – intrinsisch in den Lichtstrahlen stecken, also nicht von externen Kausalfaktoren abhängen (wie z. B. dem Einfallswinkel der Strahlen ins Prisma).

Und in der Tat, alle Lichtstrahlen, die im Experiment durch das zweite Prisma geschickt werden, genühten beim Eintritt ins zweite Prisma exakt denselben externen Bedingungen: Sie treten an exakt derselben Stelle im exakt gleichen Winkel in exakt dasselbe Prisma ein, und doch verlassen sie das Prisma in unterschiedlichen Richtungen! Da dies nicht auf *externen* Bedingungsänderungen beruhen kann, muss die Ursache für deren unterschiedliche Refraktion in den Lichtstrahlen selber liegen, in ihrem Wesen gleichsam. Und das bedeutet offenbar, dass jedem Lichtstrahl stets ein und dieselbe Refrangibilität innewohnt, ganz gleichgültig, durch wieviele Prismen er geschickt wird. Mithin steckten schon vor der ersten prismatischen Refraktion Lichtstrahlen mit ihrer je eigenen Refrangibilität im weißen Sonnenlicht, Q.E.D.

Wohlgemerkt: Aus Newtons Schriften ergibt sich kein eindeutiger Beweisgang; wir haben eben nur einen der denkbaren Beweise skizziert, die Newton im Auge gehabt haben könnte.<sup>14</sup> Und schon über diese Beweisskizze könnte man ausgiebig streiten. Wir wollen diesen Streit links liegen lassen und stattdessen versuchen, Newtons Experiment zu invertieren.

### III. Vorsortiertes Weiß! Vorsortiertes Schwarz? – Schwierigkeiten beim Invertieren

Wir möchten jetzt herausarbeiten, an welcher Stelle derjenige stecken-zubleiben droht, der versuchen will, Newtons *experimentum crucis* zu invertieren. Wer die Rollen von Licht und Schatten in Newtons *experimentum crucis* vertauschen will, wird vielleicht zuerst den Fensterladen weit aufreißen und anstelle des Fensterladenlochs F einen gleich großen Schattenwerfer F\* anbringen. Gehen wir dieser Idee nach, und lassen wir dabei das Prisma ABC unverändert. Wenn wir den Schirm DE weit vom Prisma ABC entfernten und das Loch G in diesem Schirm außer Betracht ließen, dann hätten wir ein Komplement des newtonischen Grundexperiments (siehe Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3); wir würden dann auf dem Schirm DE das bereits bekannte komplementäre Spektrum auffangen. (Vergleichen Sie Abb. 7 mit Abb. 3). Jetzt aber schieben wir den Schirm immer

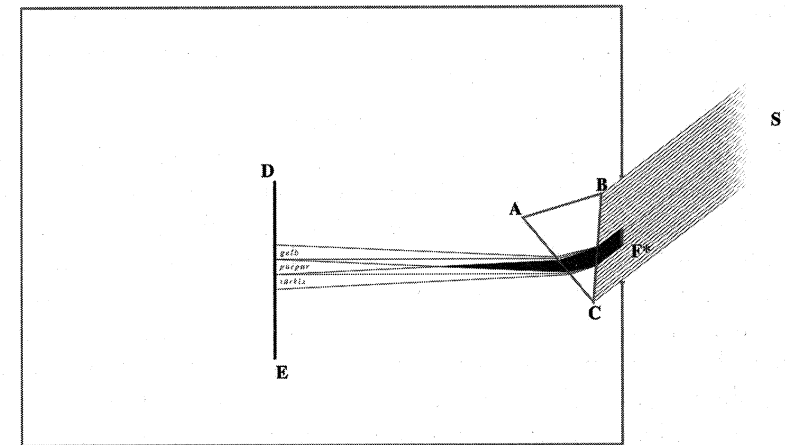


Abb. 7. Versuch einer Invertierung des *experimentum crucis* (Auftakt). Dem breiten Sonnenlichtstrahl, der durchs jetzt weit aufgerissene Fenster in die Dunkelkammer eintritt, setzen wir einen Schattenwerfer F\* entgegen, der an die Stelle des Fensterladenlochs F der vorigen Abbildungen tritt. Wenn wir den Auffangschirm DE vom Prisma ABC wegrücken, so taucht auf dem Schirm das Komplementärspektrum auf: oben Gelb, darunter Purpur, unten Türkis. (Die Abstände entsprechen also denen der Grundexperimente, vergl. Abb. 2, Abb. 3).

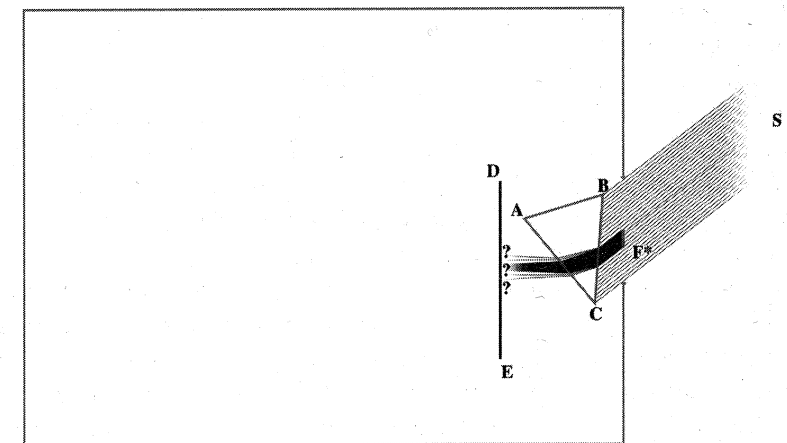


Abb. 8. Versuch einer Invertierung des *experimentum crucis* (Zwischenüberlegung). Anders als in Abb. 7 bringen wir jetzt den Schirm DE näher ans Prisma ABC heran, also dorthin, wo in Newtons *experimentum crucis* die erste Lochblende DGE steht. Was zeigt sich auf dem Schirm?

näher an das Prisma ABC heran. (Siehe Abb. 8). Was erwarten Sie zu sehen? Erwarten Sie das Komplement dessen, was sich in der newtonischen Situation gezeigt hat?

Zur Erinnerung: In der analogen newtonischen Situation (mit Fensterladenloch F anstelle des Schattenwerfers F\*) erschien auf dem Schirm ein weißer Lichtfleck, der nur am oberen und unteren Rand farbig gesäumt war. Zwischen dem roten und blauen Ende des Lichtflecks gelangten auf den Schirm alle Lichtstrahlenarten zugleich, vermischten sich und bildeten einen weißen Fleck. Dieses Weiß, das sich unmittelbar hinter dem Prisma auffangen ließ, möchten wir als vorsortiertes Weiß bezeichnen. Es war kein gewöhnliches Weiß. Zwar bestand es aus Lichtstrahlen aller Regenbogenfarben, aber anders als vor deren Eintritt ins Prisma verliefen diese farbigen Strahlen nicht allesamt parallel; vielmehr hatte jede dieser Farbstrahlenarten eine eigene Richtung: Die grünen Lichtstrahlen (mittlerer Refrangibilität) verließen das Prisma allesamt in horizontaler Richtung (und waren nur untereinander parallel); die blauen strebten aufwärts (und waren nur jeweils untereinander parallel), die roten Strahlen strebten abwärts (und waren ebenfalls nur jeweils untereinander parallel). Ausschließlich in diesem vorsortierten Weiß operierte Newton; seine Blendenöffnung G im Schirm DE ließ immer nur irgendwelche Teile des vorsortierten Weiß hindurch.

Man kann mit dieser Blende testen, ob man wirklich in vorsortiertem Weiß operiert oder in unsortiertem Weiß. Wer unsortiertem weißen Licht eine Lochblende entgegenstellt, wird hinter der Lochblende keine Farberscheinungen ausmachen.<sup>15</sup> Anders bei vorsortiertem weißen Licht. Die Blendenöffnung sorgt dafür, dass sich die vorsortierten Lichtstrahlen in unterschiedliche Richtungen aufspreizen, und in gebührendem Abstand von der Blende kann man denn auch sämtliche Farben des newtonischen Regenbogenspektrums auffangen.

Jetzt haben wir genug Material beisammen, um zu erklären, warum der eben anvisierte Versuch der Invertierung nicht funktionieren konnte. Wenn wir nämlich am Fenster die Rollen von Licht und Schatten vertauschen, also das Fensterladenloch F durch einen Schattenwerfer F\* ersetzen und dann den Fensterladen aufreißen, wie in Abb. 9 im Anhang angedeutet, so fangen wir zwar unmittelbar hinter dem Prisma ABC das Komplement dessen auf, was wir vorhin beschrieben haben: einen schwarzen Fleck mit farbigen Rändern (am oberen Ende gelblich, am unteren Ende türkis).

Doch lässt sich die schwarze Mitte hinter dem Prisma *nicht* als vorsortiertes Schwarz auffassen, weder gedanklich noch experimentell. Dass es dort kein vorsortiertes Schwarz gibt, zeigt experimentell derselbe Blendentest wie eben: Wer in die schwarze Mitte hinter dem Prisma einen Schirm mit kleiner Blendenöffnung einbringt, kann hinter der Lochblende keine Farben sehen; vorsortiertes Schwarz müsste sich aber (in hinreichendem Abstand von der Blende) in seine verschiedenfarbigen Bestandteile entmischen. Doch nichts davon wird sichtbar.

Warum sich aus dem angeblich vorsortierten Schwarz mittels Lochblende keine Farben (des Komplementärspektrums) hervorlocken lassen, zeigt eine einfache theoretische Überlegung. Sie basiert auf Newtons Theorie und lautet: Die Dunkelheit hinter dem Schattenwerfer F\* ist optisch unwirksam; nur das weiße Licht, das am Schattenwerfer vorbeikommt, zieht optische Prozesse nach sich. Über und unter dem Schattenwerfer bewegen sich alle Regenbogenfarbenstrahlen in schöner weißer Eintracht hin zur Prismenoberfläche BC. Die Mitte dieser Fläche bleibt schwarz, aber ihr oberer und unterer Teil wird in gleißend weißes Licht getaucht. Während diese Lichtstrahlenbündel durchs Prisma reisen, werden sie sortiert, und hinter dem Prisma zeigen sich dann *zwei* Bereiche von vorsortiertem Weiß: Der eine liegt oberhalb der schwarzen Mitte, der andere unterhalb. Und dort, wo das obere bzw. untere vorsortierte Weiß an die schwarze Mitte hinter dem Prisma angrenzt, zeigen sich die beobachteten Farbsäume. Sie mögen so wirken, als träten sie aus dem schwarzen Bereich hinter dem Prisma hervor – so, als entmischte sich dort ein angeblich vorsortiertes Schwarz. In Wirklichkeit treten sie aus den zwei weißen (vorsortierten) Nachbarschaften der schwarzen Mitte hervor. Dass es sich so verhält, zeigt der Test mit der Lochblende. Wer die Blendenöffnung in einer der weißen Nachbarschaften der schwarzen Mitte placiert, kann hinter der Blende bunte Farben auffangen – und wer sie in der schwarzen Mitte placiert, sieht keine Farben, nur schwarz.

Wie wir in den nächsten beiden Abschnitten dartun werden, war unser Anlauf für die Invertierung des *experimentum crucis* zu halbherzig. Wir haben bloß ein einziges Element der newtonischen Versuchsanordnung invertiert, und das sozusagen nur *architektonisch*: nämlich die Situation am Fenster der Dunkelkammer. Dort – an der Grenze zwischen dem Innern der Dunkelkammer und ihrer äußeren Umgebung – haben wir ein Fensterladenloch durch einen gleich großen Schattenwerfer ersetzt;

das war nur eine kleine bauliche Veränderung. Wer die *gesamte* newtonische Konstellation invertieren will, muss sich stärker anstrengen. Er muss einerseits die äußere Umgebung der Dunkelkammer in ihr Farbnegativ überführen, andererseits muss er Newtons Dunkelkammer in eine *helle* Kammer verwandeln. Das erste Manöver werden wir im bevorstehenden Abschnitt theoretisch durchspielen, das zweite Manöver im Abschnitt V. (Und wie wir sehen werden, muss dann ausgerechnet an der architektonischen Grenze zwischen Innen und Außen, am Fenster, keine Invertierung vorgenommen werden.) Das Ziel unserer Überlegungen – die vollständige und rein *optische* Invertierung – werden wir im folgenden als *optische Umstülpung* bezeichnen oder kürzer einfach als Umstülpung. Dieser Fachbegriff dient uns zur Abgrenzung von halbherzigen und inkonsequenten (z. B. bloß architektonischen) Invertierungsbemühungen.

#### IV. Cambridge umstülpfen

Analysieren wir als erstes die Situation, die vom Prisma aus gesehen wird. Aus Newtons Dunkelkammer schaut man durch ein ziemlich großes Fensterladenloch in die Cambridger Umgebung. Dominiert wird das Gesehene Bild von der gleißenden Sonne. Der Himmel und die Cambridger Umgebung sind im Vergleich zur Sonne geradezu dunkel. (Natürlich bieten auch das Weiß der Wolken und das Himmelsblau keine in sich dunklen Farbeindrücke, aber sie erscheinen im Kontrast zur gleißenden Sonne *vergleichsweise* dunkel. Diese Richtigstellung werden wir nicht jedesmal wiederholen).

Newton hat mit seinem Loch im Fensterladen nur das nachgebaut, was ohnehin tagtäglich zu sehen ist – eine beinahe punktuelle helle Leuchte, umgeben von viel Dunklerem. Fast könnte man den Spieß umdrehen und sagen: Die Sonne wirkt wie ein kosmisches Fensterladenloch. Deshalb blieb die Invertierung, die wir mit dem Schattenwerfer F\* versucht haben, auf halbem Wege stehen. Denn dieser Schattenwerfer verdeckt nur in seinem Kernschattenbereich die Sonne, das ist alles.

Um unser Ziel ganz zu erreichen, müssten wir zuallererst die Umgebung (außerhalb der Dunkelkammer Newtons) umstülpfen. Wir brauchen eine Umgebung, die wie das Farbnegativ der tatsächlichen Umgebung aussähe: eine strahlend helle Umgebung mit einer tief schwarzen Sonne!

(Die – rein hypothetischen – Beobachtungen, die wir gleich beschreiben werden, entspringen Gedankenexperimenten und werden von Newtons Theorie vorausgesagt; ganz am Ende unseres Textes werden wir ein echtes Experiment aufbieten, mit dem wir demonstrieren wollen, dass unsere Überlegungen zur empirischen Realität passen).

Unter den anvisierten neuen Bedingungen außerhalb der Dunkelkammer lassen wir Newtons Versuchsanordnungen in deren Innern erst einmal unverändert. Was erschiene auf dem Schirm DE, wenn wir ihn weit weg vom Prisma placierten wie in Newtons Grundexperiment? Dort erschiene erst jetzt das *vollkommene* Komplement zum Spektrum aus Newtons Grundexperiment. Selbst die optischen Einflüsse, die etwa das rot leuchtende Nachbardach ursprünglich auf Newtons Spektrum ausgeübt hat und die wir bislang nicht berücksichtigt haben, hätten jetzt ein komplementäres Gegenstück; denn unter den neuen Bedingungen (Umstülpung der gesamten Umgebung der Dunkelkammer) würde ein türkisfarbenes leuchtendes Dach des Nachbarhauses durchs Fensterladenloch in das komplementäre Spektrum hineinfunkeln.

Wie wird aber der Schirm DE aussehen, wenn wir ihn dicht ans Prisma heranrücken, so wie im *experimentum crucis*? – Er wird keineswegs schwarz sein, sondern er wird ziemlich hell aussehen, sogar heller als in Newtons Experiment. Denn bei Newton kam das Licht fast nur aus Richtung der Sonne; in der umgestülpten Umgebung hingegen kommt das Licht von überall, nur nicht aus Richtung der Sonne. Und weil diesmal insgesamt viel mehr Licht im Spiel ist, wird auch der Schirm heller sein – auch dort, wo bei Newton die weiße Mitte leuchtete und wo wir nun auf eine schwarze Mitte gehofft haben. (Zwar bricht das Prisma dorthin keine Lichtstrahlen, die von der pechschwarzen Sonne ausgehen; aber dieser Lichtmangel in der fraglichen Mitte des Schirms wird bei weitem ausgeglichen von denjenigen Lichtstrahlen, die aus allen anderen Richtungen aufs Prisma treffen und z.T. in die Schirmmitte gebrochen werden. Bedenken Sie, dass diesmal kein nahezu paralleles Sonnenlicht aufs Prisma trifft, sondern sonnenhelles Licht aus allen erdenklichen Richtungen).

Sind wir also beim theoretischen Versuch, vorsortiertes Schwarz zu erzeugen, endgültig gescheitert? Nein; durchdenken wir, was man vom Ort des Schirms DE aus sehen müsste.

Wird das Prisma ABC fortgenommen, so sähe man vom Schirm DE aus die komplementärfarbige Cambridger Umgebung, dominiert von

einer pechschwarzen Sonne in gleißend blendender Umgebung. Nun stellen wir das Prisma ABC wieder an seinen angestammten Ort. Dann erschienen (beim Blick durchs Prisma) in der Himmelumgebung der pechschwarzen Sonne die komplementären Farben des wirklichen Cambridger Himmels. Und da der ursprüngliche Cambridger Himmel recht dunkel ist, würde die jetzt ins Auge gefasste komplementäre Ansicht von einer (fast) sonnenhellen Umgebung dominiert, an der fast keine Farben entstünden. Nur in der Mitte dieser Ansicht, am optischen Ort der schwarzen Sonne, zeigte sich ein ziemlich dunkles komplementärfarbiges Spektrum. Es müsste offenbar vom Schwarz der umgestülpten Sonne herrühren, denn der sie umgebende helle Himmel wiese keinerlei Neigung zu Farben auf.

Ohne Umstülpung der Umgebung ist beim Blick durchs Prisma (vom Schirm DE aus) im Vergleich zur Sonne eine nahezu schwarze Umgebung zu sehen, die ebenfalls wenig Neigung zur Farbigkeit aufweist. In der Mitte dieser Ansicht ist das Weiß der Sonne hingegen zu einem newtonischen Regenbogenspektrum geworden. Wie ist das möglich? Immerhin erscheint der Ort, von dem aus wir dies sehen – nämlich der Schirm DE – weiß beleuchtet. Unsere Antwort: Das vorsortierte Weiß auf dem Schirm DE ist nur dann gut vorsortiert, wenn *vom Schirm aus* durchs Prisma keinerlei Weiß zu sehen ist, sondern das volle Regenbogenspektrum, umgeben von Dunkelheit. Der Blendentest aus Abschnitt III hat uns dies klargemacht. Denn die Blende DGE samt dahinterliegendem Schirm de funktioniert zusammen wie ein einfach nachgebautes Auge, wie Pupille samt Retina. Auf dem Schirm de erscheint genau das, was man vom Ort G aus durchs Prisma sieht. Kurzum, unser Auge kann im Ergebnis auch ohne Bewaffnung mit Blenden und Schirmen das durchführen, was wir vorhin als Blendentest bezeichnet haben.<sup>16</sup>

Wiederholen wir jetzt solche Blendentests für die umgestülpte Cambridger Umgebung, mit Prisma hinter dem Fensterladenloch! Auf dem Schirm de muss dann genau das erscheinen, was vom Ort G zu sehen wäre – und das ist bis ins feinste Detail das Farbnegativ der nicht umgestülpten Umgebung, dominiert von einem komplementären dunklen Vollspektrum in sonnenheller Umgebung.

Um für diese Situation einen griffigen Namen parat zu haben, werden wir weiterhin von vorsortiertem Schwarz reden, selbst wenn dessen Schwärze nicht buchstäblich zu verstehen ist. Ungeachtet des hellen Farbeindrucks, den sie bieten, werden wir diejenigen Strahlzonen als

vorsortiertes Schwarz bezeichnen, die beim Blendentest kein newtonisches Farbenspektrum erzeugen, sondern dessen Komplement.

Trotzdem werden Sie fragen: Wenn wir durch die Umstülpung der Umgebung eine solche Zone erzeugt haben, warum erscheint dann der Schirm DE so hell erleuchtet? Warum sehen wir dort nicht Schwarz, das Komplement der weißen Mitte, die wir dort im newtonischen Experiment gesehen haben?

Wir müssen es zugeben – die Mitte des Schirms wird nach der Umstülpung viel heller erscheinen als davor. Sie wird fast so hell gleißen wie die Umgebung außerhalb des Zimmers, sogar fast so hell wie beim direkten Blick in die Sonne. Im Vergleich damit ist das sogenannte vorsortierte Weiß extrem dunkel. Nur: Es war voreilig zu meinen, dass das vorsortierte Weiß aus Newtons Experiment absolut weiß gewesen wäre oder maximal weiß. Also braucht auch dessen Komplement (beim Umstülpfen) keineswegs absolut schwarz zu sein oder maximal dunkel. Und wenn, wie sich nun ergeben hat, das vorsortierte „Weiß“ dunkler ist als das vorsortierte „Schwarz“, so verträgt sich dies überraschende Ergebnis sehr wohl damit, dass das eine das Komplement des anderen ist.

Warum dies weniger verrückt ist, als zunächst scheinen mag, zeigt folgende Überlegung. Je besser eine weiße Strahlenzone vorsortiert ist, desto dunkler erscheint sie auf dem Schirm. Denn um ihre Vorsortierung zu verbessern, müssen wir die zugrundliegende Lichtquelle verkleinern. Umgekehrt steht es beim vorsortierten Schwarz. Es zeigt sich auf dem Schirm in umso hellerer Beleuchtung, je besser es vorsortiert ist.<sup>17</sup> Um das zu begründen, betrachten wir die vorsortierten Zonen als Strahlzonen im Sinne der newtonischen Theorie. Das vorsortierte Weiß ist eine Strahlenzone, in der jede Strahlenart nur in einer Richtung vorkommt. Wie erreicht man das? Durch Aussortieren *aller anderen* Strahlenarten in dieser Richtung. Die so erzeugte Strahlenzone ist also ziemlich dunkel. In der Zone des vorsortierten Schwarz kommt hingegen jede Strahlenart in genau einer Richtung *nicht* vor, alle anderen Strahlenarten kommen in dieser Richtung vor. Man erreicht dies also durch Aussortieren *nur einer* Strahlenart in der entsprechenden Richtung. Daher ist diese Strahlenzone immer sehr hell, ihrem Namen zum Trotz.

Kurz und gut, wer vorsortierte Strahlzonen schaffen will, muss immer irgendwelche Strahlenarten aussortieren; vorsortiertes Weiß unterscheidet sich von vorsortiertem Schwarz nur durch Vertauschung von Einsortiertem und Aussortiertem. Damit haben wir aus Newtons



Voraussetzungen abgeleitet, dass beide Vorsortierungen existieren müssen. Aus mengentheoretischer Sicht könnte man sagen, dass sie sich zueinander verhalten wie eine Teilmenge  $W$  aus der Gesamtmenge  $L$  aller Lichtstrahlenarten aller Richtungen und deren Komplement  $S = L \setminus W$ .<sup>18</sup> Der Begriff des vorsortierten Schwarz hat also im Rahmen der newtonischen Orthodoxie guten Sinn. Es bleibt aber zu untersuchen, ob sich solche vorsortierten Strahlenzonen realisieren lassen und ob sie die geforderten Eigenschaften haben. Dafür muss das Experiment befragt werden. Bevor wir auf die Empirie zu sprechen kommen, müssen wir allerdings eine weitere Schwierigkeit aus dem Weg räumen, die nichts mit den optischen Parametern außerhalb der Experimentierkammer zu tun hat, sondern mit den Parametern im Innern der Kammer. Wie wir im nächsten Abschnitt sehen werden, müssen wir die Dunkelkammer optisch umstülpen und in eine Lichtkammer verwandeln.

## V. Freunde, baut die Streulichtkammer!

Der Stand der Dinge, den wir im letzten Abschnitt erreicht haben, bleibt unbefriedigend. In beiden Fällen (bei Newton und bei der anvisierten Umstülpung) hatten wir einen Schirm, der durchs Fensterladenloch hell beleuchtet wurde. In der Umgebung der beleuchteten Partien des Schirms war es beidemal dunkel. Sowohl vorsortiertes Weiß als auch vorsortiertes Schwarz erschienen als Helligkeit auf dem Schirm, *umgeben von Dunkelheit*. Und wenn in beiden Fällen eine dunkle Umgebung zu sehen ist, dann kann man den einen Fall kaum als konsequente Umstülpung des anderen ausrufen.

Wer im *experimentum crucis* nur die Fensterläden aufreißt und dann einen Schattenwerfer genau dort installiert, wo ehemals das Fensterladenloch klaffte, der hat, wie wir gesehen haben, das Experiment nicht konsequent genug umgestülpt. Aber hat denn derjenige, der die kosmische Tat vollbringt und ganz Cambridge, ja den Himmel umstülpt, alles getan, was er muss? Bedenken Sie: Die Backen der Lochblenden, mit denen Physiker zu arbeiten pflegen, sind schwarz. Wer die Rollen von Licht und Schatten, von Weiß und Schwarz, von Helligkeit und Dunkelheit konsequent vertauschen will, muss die Blendenbacken weiß erscheinen lassen. Sie müssen also auf jeden Fall weiß angemalt werden, sonst können sie nie und nimmer weiß erscheinen.

Und damit nicht genug. Newton hat sorgsam alle seine (undurchsichtigen) Ausrüstungsgegenstände geschwärzt: schwarz angemalt, mit schwarzem Samt beklebt, usw.<sup>19</sup> Er tat dies, weil er meinte, dass Schwärze und Finsternis soviel bedeuteten wie abwesendes Licht – nur im Finstern ist laut Newton sichergestellt, dass kein störendes Streulicht die Experimente behindert oder verfälscht.<sup>20</sup> Diese newtonische Abwesenheit von Störfaktoren müssen wir vollständig rückgängig machen, wenn wir Newtons *experimentum crucis* umstülpen wollen.

Was ist demzufolge zu tun? Müssen wir auch die Wände der Dunkelkammer weiß anmalen? Ja, aber das genügt nicht. Es genügt nicht, die Dunkelkammerwände weiß anzumalen, denn ohne genug Licht wird sie eine *Dunkelkammer* bleiben. Die Wände der Kammer müssen nicht weiß *sein*, sondern weiß *scheinen* – weiß leuchten.

Wir brauchen eine Streulichtkammer, keine Dunkelkammer. Wie könnte das gehen? Im Abstrakten ist die Sache einfach: An jedem Wandpunkt der Streulichtkammer muss eine Lichtquelle installiert sein, die in alle Richtungen weißes Licht abstrahlt – diffuses Licht. Was bedeutete das konkret? Stellen wir uns Millionen kleiner Glühlämpchen an den Wänden der Streulichtkammer vor – sie müssten sehr klein sein und sich so eng aneinanderdrängen, dass der Eindruck einer zusammenhängenden, gleichmäßig leuchtenden Fläche entsteht. (Physiker reden in solchen Zusammenhängen von Lambertstrahlern, siehe Bergmann et al [O]:673/4). Es gibt bestimmte Folien, die so leuchten – und damit sind wir nahe an einem praktikablen Vorschlag dafür, wie die erforderliche Streulichtkammer realisiert werden könnte. (Wir werden allerdings erst im Abschnitt VII auf echte empirische Resultate eingehen).

Zu Newtons Zeiten gab es weder Glühlampen noch Folien, die diffuses weißes Licht abgeben. Halten wir kurz inne und fragen: Was hätten Newton und seine Zeitgenossen tun können, um die Streulichtkammer zu realisieren, die für die Umstülpung des *experimentum crucis* nötig ist?

Eine Antwort darauf findet sich bei Goethe. Goethe hat viele der hier verhandelten Gedanken vorweggenommen oder jedenfalls Vorahnungen dieser Gedanken kultiviert. In unseren augenblicklichen Zusammenhang passt folgender Ausruf Goethes:

Freunde, flieht die dunkle Kammer [...]!<sup>21</sup>

In der Tat, wer in die freie Natur ausweicht, der experimentiert – auch – in diffusem Streulicht. Wird derjenige, der Goethes Ratschlag befolgt,

draußen im Freien *immer* geeignete Bedingungen vorfinden, um Newtons *experimentum crucis* umzustülpen? Nein, damit ist nicht zu rechnen. Ob wir im Freien nahe genug an die optischen Bedingungen der anvisierten Streulichtkammer herankommen, hängt vom Wetter ab und von den im Wetter verstreuten Gegenständen. Ideal wäre ein nebelverhangener Schneetag, an dem die Sonne genug Licht spendet, ohne dass sich ihr genauer Ort am Himmel ausmachen ließe. Ideal wäre es, wenn die Lichtverhältnisse so diffus wären, dass der Horizont vage verschwimmt, weil die mattweiß leuchtende Schnee-Ebene dieselbe Helligkeit und denselben Farbmangel aufweist wie der vernebelte Himmel. Es gibt solche Tage.<sup>22</sup>

Wäre Newton Eskimo gewesen, hätte er vielleicht zuerst das umgestülpte *experimentum crucis* ausprobiert und wäre nie auf die Idee gekommen, im diffusen Schwarz seiner Dunkelkammer zu operieren. Bedenken Sie: Eskimos hatten vor Ankunft der Europäer keine Dunkelkammern, in denen sie mit der Sonne hätten experimentieren können. Ihre Iglus ähnelten dem, was wir als Streulichtkammer bezeichnet haben, jedenfalls bei bestimmten Wetterbedingungen. (Soviel zur Entschuldigung für die verspielte Überschrift unseres Aufsatzes).

Bevor wir weitergehen, möchten wir einem Einwand entgegenreten, der sich aufdrängt. Wir haben im vorliegenden Abschnitt dafür plädiert, Newtons *experimentum crucis* konsequenter umzustülpen, als man im ersten Anlauf für nötig halten könnte. Es genügt nicht, die Rollen von Helligkeit und Finsternis nur in den Elementen des Experiments zu vertauschen, die durchs Prisma hindurchgehen; Rollentausche sind auch weiter innen im Experiment nötig, etwa da, wo bei Newton Finsternis herrscht. Und das löst folgenden Einwand aus: Wieso sind uns diese weitergehenden Rollentausche nicht schon vorher begegnet, etwa beim Grundexperiment und seinem komplementären Gegenstück? Müssen wir nicht darauf bestehen, dass beim Umstülpen immer genau dieselben Spielregeln eingehalten werden? – Wir stimmen zu: Jedes Experiment Newtons soll am Ende nach genau denselben Spielregeln umgestülpt werden; das *experimentum crucis* darf keine Sonderbehandlung beanspruchen. Aber das spricht in unseren Augen nicht gegen den jetzt eingeschlagenen anspruchsvollen Weg, auf dem das *experimentum crucis* umgestülpt werden soll. Vielmehr spricht es dagegen, das komplementäre Grundexperiment als *exakte* Umstülpung seines newtonischen Gegenstücks aufzufassen; es bietet nur eine gleichsam *architektonische* Blendeninvertierung.

## VI. Newtons Theorie impliziert vorsortiertes Schwarz

Wo stehen wir? In der erdachten Streulichtkammer herrscht viel diffuses weißes Streulicht, das aus allen Richtungen in alle Richtungen strahlt. Wenn die Streulichtkammer leer ist, so ist es darin an jeder Stelle exakt gleich hell, wie man sich leicht klarmachen kann.<sup>23</sup> Wer nun an einer der weiß leuchtenden Wände der Streulichtkammer einen schwarzen Fleck anbringt, verringert die Gesamthelligkeit in der Streulichtkammer und hat mithin gleichsam eine Dunkelheitsquelle geschaffen.<sup>24</sup> In unmittelbarer Nähe des schwarzen Flecks der Streulichtkammer ist es besonders dunkel, und je weiter man sich vom schwarzen Fleck entfernt, desto schwächer wird die bemerkbare Dunkelheit, desto stärker überwiegt der Einfluss des diffusen Streulichts aus allen Richtungen – aus allen Richtungen bis auf *eine*, um genau zu sein, denn vom schwarzen Fleck geht genau kein Streulicht aus. Wie stark also die Dunkelheitsquelle auf einen Beobachter wirkt, hängt vom Abstand zwischen beiden ab – genauso wie bei Lichtquellen. Steigt der Abstand, so sinkt die wahrnehmbare Kraft der Licht- bzw. Dunkelheitsquelle, und zwar in beiden Fällen mit dem Quadrat der Entfernung.<sup>25</sup>

Man könnte sagen, dass der schwarze Fleck Dunkelheit in die Streulichtkammer wirft – aber es ist kein hundertprozentig schwarzer Schatten mit klar umrissenen Grenzen, sondern eine sich graduell ändernde Abschattung oder Verdunklung: dunkel in unmittelbarer Nähe des schwarzen Flecks, heller grau weiter von ihm entfernt. Es handelt sich allerdings nicht um vorsortiertes Schwarz oder Weiß. Denn wer in den verdunkelten Bereich eine Lochblende hineinstellt, wird hinter der Blende keine Farben sehen – weder die Farben des Newtonspektrums noch die seines Komplements.

Jetzt placieren wir ein Prisma in unmittelbarer Nähe des schwarzen Flecks. Wer sich nah hinter das Prisma stellt und durch das Prisma auf den schwarzen Fleck schaut, wird (so sagt Newtons Theorie voraus) den schwarzen Fleck fast ohne merkliche Verfärbung seiner Ränder erblicken. Und was die Retina auffängt, wird (bei geeigneten Lichtverhältnissen) auch ein Schirm hinter einer Blende auffangen können.<sup>26</sup>

An dieser Stelle können wir die Frage nach dem vorsortierten Schwarz aus Abschnitt IV neu aufgreifen. Wir bauen in der erdachten Streulichtkammer das newtonische *experimentum crucis* auf, verwenden aber zunächst die Blende als Schirm, um mithilfe der Lochblende DGE

den Blendentest zu wiederholen, wie wir ihn für die umgestülpte Cambridge Umgebung in Newtons Dunkelkammer vorgeschlagen hatten. Mithilfe der Streulichtkammer sind wir jetzt beim Umstülpen weiter vorangekommen als vorhin, denn jetzt haben wir auch Newtons Dunkelkammer umgestülpt. Newton hatte an zwei Stellen seiner Gesamtkonstellation eine kleine Quelle der Helligkeit vor vergleichsweise dunklem Hintergrund; einerseits im Außenraum die Sonne, andererseits in seiner Kammer die Fensteröffnung. Er hat konsequent, doppelt, im Dunklen gearbeitet. Wir wollen daher konsequent und doppelt im Hellichten experimentieren. Nur so wird es uns gelingen, das *experimentum crucis* vollständig umzustülpen. Also arbeiten wir einerseits mit wenig Dunkelheit vor hellem Himmelshintergrund, andererseits in der Streulichtkammer.

Betrachten wir in Abb. 10 im Anhang den mittleren Fleck p des Auffangschirms de. Was für Strahlen kommen dort an? Unter newtonischer Betrachtung sind das ziemlich viele. Aus jeder Richtung kommen in p Lichtstrahlen aller Regenbogenfarben an – Folge des diffusen Lichts in unserer Kammer.

Aus *jeder* Richtung? Nein, aus *fast* jeder Richtung. Zwar kommen erstens in p von vielen Wänden der Streulichtkammer weiße Strahlen an (also Strahlen aller Regenbogenfarben), aber natürlich nur von den Wänden, die vor dem Auffangschirm de und hinter der Lochblende DGE liegen (also insgesamt von den Lichtkammerwänden, die von p aus sichtbar sind). Und zweitens kommen in p zwar von den weißen Blendenbacken weiße Strahlen an (also Strahlen aller Regenbogenfarben) – aber nicht unbedingt auch aus der Blendenöffnung G. So, wie Auffangschirm, Blende und Prisma angeordnet sind, können auf dem Schirm in p nur ganz bestimmte Lichtstrahlen aus Richtung der Blendenöffnung auftreten: nämlich solche Strahlen, die zuvor durch die Prismenfläche AC hindurchgereist sind – also Lichtstrahlen, die vom Prisma irgendwie gebrochen wurden und letztlich von der Lichtkammerwand herkommen müssen.<sup>27</sup> Da von dieser Wand der Streulichtkammer – wie von allen ihren anderen Wänden – diffuses Streulicht ausgeht, wird regenbogenbuntes Licht von dort in allen erdenklichen Richtungen durchs Prisma hindurchkommen und dabei in hunderterlei Weise vom Weg abgelenkt werden.

In diesem Durcheinander verliert man schnell die Übersicht. Vielleicht ist es instruktiver, zu fragen, auf welchen Pfaden genau *keine* Lichtstrah-

len irgendeiner Farbe durchs Prisma kommen. Abb. 11 im Anhang zeigt z.B. die grünfreien Pfade, sie sind durch Ketten grüner Minuszeichen angedeutet („Minus“ für *abwesendes* Grün). Ein Teil dieser grünfreien Pfade endet an den vorderen Backen der Blende DGE. An der weißen Rückseite dieser Backen setzen sich die grünfreien Pfade deshalb nicht fort, weil diese Rückseiten weiß angemalt und weiß beleuchtet sind, also auch in der fraglichen Richtung grüne Strahlen abgeben. (Man beachte, dass es zur Unterbrechung grünfreier Pfade nicht genügt, ihnen ein Hindernis in den Weg zu stellen. Vielmehr muss die Rückseite des Hindernisses in geeigneter Weise beleuchtet sein. Wäre z.B. die Rückseite des Hindernisses schwarz oder läge sie im Dunkeln, so ginge der grünfreie Pfad durch das Hindernis hindurch!)

Aber bestimmte grünfreie Pfade setzen sich in den Raum hinter der Blende fort, wie der Abb. 11 zu entnehmen ist; nämlich diejenigen grünfreien Pfade, die sich schnurstracks durch die Blendenöffnung hindurch verlängern lassen. Dass diese grünfreien Pfade auch hinter der Blende weiterlaufen, liegt letztlich daran, dass in der Blendenöffnung genau keine weiße opake Oberfläche installiert ist, die weißes Streulicht reflektieren könnte, also auch grüne Lichtstrahlen in derjenigen Richtung abgäbe, die uns interessiert.

Analog für blaufreie Pfade in Abb. 12 und für rotfreie Pfade in Abb. 13. In Abb. 14 (alle im Anhang) sehen Sie die drei vorigen Abbildungen übereinander. Dadurch wird deutlich, dass die drei betrachteten Arten grün-, blau- und rotfreier Pfade nicht exakt in derselben Richtung verlaufen. Wer also einen Schirm weit genug hinter der Blende vor- und zurückschiebt, der wird einen idealen Abstand entdecken können, an dem sich die blau- und rotfreien Pfade so weit vom grünfreien Pfad entfernt haben, dass auf dem Schirm eine hinreichend große grünfreie Zone p aufreißt. (Genauer gesagt, eine Zone, in der exakt aus Richtung der Blendenöffnung keinerlei grüne Lichtstrahlen ankommen; aus allen anderen Richtungen kommt dort allerlei diffuses weißes Licht an, also auch allerlei grünes Licht).

Welchen Farbeindruck erwarten wir, wenn wir auf einen Fleck starren, auf den aus allen Richtungen diffus schwaches Licht aller Farben eintrifft – und aus einer einzigen prominenten Richtung Licht aller Farben mit *Ausnahme des grünen Lichts*?

Grünes Licht ist an dieser Stelle des Auffangschirms *unterrepräsentiert*. Ein regenbogenbuntes Lichtgemisch mit deutlicher Unterrepräsent-

tation einer Lichtsorte bietet den farblichen Eindruck des Komplements der unterrepräsentierten Lichtsorte, also in unserem Fall den Eindruck von Purpur.

Genauso macht man sich klar, warum über dem purpurnen Fleck p auf dem Schirm ein gelber Farbfleck sichtbar wird und unter p ein blauer Farbfleck. Die Blende DGE holt also aus der Mitte der Strahlenzone hinter dem Prisma ein Komplementärspektrum heraus. Und das bedeutet, dass diese Zone das bietet, was wir vorhin vorsortiertes Schwarz genannt haben.

Schauen wir vom Prisma ABC aus auf den Schirm DGE, dann sehen wir dort – sagt Newtons Theorie – die äußeren Randbereiche hell erleuchtet, denn sie werden von überall gleichmäßig bestrahlt. In der Mitte des Schirms, dort wo sich die Blendenöffnung G befindet, ist es etwas dunkler, da sich in diesem Bereich die Abdunkelung der schwarzen Fläche S\* fortsetzt. Es kommen dort also weniger Lichtstrahlen an als an allen anderen Orten auf dem Schirm, und daher ist dieser Bereich dunkler als die anderen Schirmorte. Er wird begrenzt von schwach farbigen Säumen, die den Komplementärfarben der Säume bei Newtons vorsortiertem Weiß entsprechen. In der Streulichtkammer erscheint jetzt also auch der Bereich des vorsortierten Schwarz dunkler als die gesamte homogen helle Umgebung. Mithin ist es gerechtfertigt, diesen Bereich als vorsortiertes Schwarz zu bezeichnen. Dass es dort nicht ganz schwarz sein kann, haben wir uns in Abschnitt IV klargemacht. (Überlegen wir uns noch im Vorübergehen, wie die Strahlenzone des vorsortierten Weiß in der Streulichtkammer aussehen wird. Wir hatten bemerkt, dass sie erheblich dunkler erscheinen muss als das vorsortierte Schwarz. Im Vergleich mit der jetzt überall homogenen Helle wirkt sie geradezu schwarz, zeigt aber die farbigen Ränder wie in Newtons Dunkelkammer, nur diesmal umrandet von Hellem).

Wo stehen wir? Wir haben unser Zwischenziel erreicht und endlich mit dem vorsortierten Schwarz in der Streulichtkammer ein echtes Pendant zum vorsortierten Weiß in Newtons Dunkelkammer erreicht, auf dem theoretischen Boden der newtonischen Optik.

Es ist wichtig, sich klarzumachen, dass unser theoretischer Existenznachweis entscheidend von der optischen Gesamtkonstellation abhängt und nur dort triftig sein kann, wo diffuses weißes Licht herrscht, das u.a. von den weißen Backen der Blende DGE zurückgeworfen wird.<sup>28</sup> Wäre die Blende schwarz oder läge ihre Rückseite im Dunkeln, so ginge der

Test anders aus. Aber das ist bei vorsortiertem Weiß genauso, auch hier kommt es auf die optische Umgebung des Tests an. Er funktioniert im Finstern (bei schwarzen Blendenbacken in Dunkelkammern). Aber vermöge einer Blende mit weißen Blendenbacken in der Streulichtkammer lässt sich vorsortiertes Weiß nicht nachweisen. Weiße Hindernisse, die von hinten diffus beleuchtet sind, eignen sich nicht zur effektiven Unterbrechung von Lichtpfaden.

Wenn die bisherigen Betrachtungen ins Schwarze trafen, dann impliziert Newtons Theorie: Das *experimentum crucis* lässt sich zumindest bis zu dem Punkt optisch umstülpen, an dem vorsortiertes Schwarz per Blende DGE in ein komplementäres Spektrum entmischt wird, das auf einem Schirm de aufgefangen werden kann.

Wie steht es mit dem Rest des *experimentum crucis*? Lässt es sich ebenfalls umstülpen? Bevor wir auf diese Frage zurückkommen, ist es vielleicht an der Zeit, genauer zu erklären, an welchen Regeln man sich beim optischen Umstülpen orientieren muss. Wir möchten diese Regeln in erstens geometrische Regeln und zweitens Hell-Dunkel-Regeln einteilen. Sie fordern ein extremes Ideal, taugen also nicht unbedingt für die Praxis.

Zuerst zur Geometrie: Jede Grenzfläche eines fürs umzustülpende Experiment relevanten Körpers (etwa eines Prismas oder einer Kammerwand oder einer Blende) muss auf eine kongruente Körpergrenzfläche des umgestülpten Experiments passen, und auch die geometrischen Gesamtkonfigurationen aller dieser Grenzflächen aus den beiden Experimenten müssen zueinander kongruent sein. Kommt Ihnen der Ausdruck „relevant“ zu vage vor? Keine Sorge. Sollte Streit darüber aufkommen, ob ein Körper fürs Experiment relevant sei oder nicht, dann wollen wir ihn sicherheitshalber zu den relevanten Körpern zählen. – Nebenbei möchten wir darauf aufmerksam machen, dass unsere geometrischen Regeln nicht verlangen, Lochblenden in Schattenwerfer zu verwandeln. Im Gegenteil; wo im ursprünglichen Experiment ein Loch klafft, muss auch beim Umstülpen ein Loch gleicher Größe vorgesehen sein. (Die Architektur des Experiments wird also beim Umstülpen genau nicht invertiert).

Zweitens zur Verteilung der Hell-Dunkel-Anteile in den Experimenten. Zur Vereinfachung wollen wir annehmen, dass alle relevanten Lichtquellen des umzustülpenden Experiments weißes Licht liefern. (Das verhält sich so in Newtons *experimentum crucis*, jedenfalls dann, wenn wir

die optischen Effekte des blauen Himmels, der Sterne mit Rotverschiebung, der Cambridger roten Dachziegel usw. aus dem Spiel lassen). Wir markieren alle noch so kleinen Körperoberflächen, an denen Lichtquellen installiert sind, und sorgen ebendort im umgestülpten Experiment für Finsternis. Diejenigen Körperoberflächen, an denen es im umzustülpenden Experiment finster war, stattdessen hingegen mit Lichtquellen aus, die weißes Streulicht liefern. (Sollten im umzustülpenden Experiment farbige Lichtquellen vorkommen, so müssten für dessen Komplement an Ort und Stelle Lichtquellen installiert werden, die alle Lichtsorten emittieren *mit Ausnahme* des fraglichen farbigen Lichts).

Wenn wir alles richtig gemacht haben, dann gibt es zu jedem *weißen* Lichtstrahl, der irgendeine Grenzfläche des umzustülpenden Experiments mit einer anderen der involvierten Grenzflächen verbindet, eine *lichtfreie* Verbindungslinie zwischen den kongruenten Grenzflächen aus dem umgestülpten Experiment – und umgekehrt. Aus alledem ergibt sich: Wer die Umstülpung irgendeines Experiments abermals umstülpt, kommt dadurch zum ursprünglichen Experiment zurück. Welcher der beiden Fälle als optische Umstülpung bezeichnet wird, hängt einfach davon ab, womit man begonnen hat. Wäre Newton Eskimo gewesen und hätte er im Iglu experimentiert, so hätten wir in unserem Aufsatz Dunkelkammern, keine Streulichtkammern ins Spiel gebracht, um die grönländischen Experimente Newtons umzustülpen.

## VII. Fortgesetzt umgestülpt in Theorie und Empirie: Vollständiges Farbnegativ des *experimentum crucis*

Um die Fortsetzung des newtonischen *experimentum crucis* umzustülpen, hantieren wir mit den Strahlen, die wir im letzten Abschnitt gedanklich aus dem vorsortierten Schwarz hervorgeholt haben.<sup>29</sup> Wir bohren in den Schirm *de* ein Loch *g*, das denselben Durchmesser hat wie das Loch *G* der Blende *DGE*. Damit haben wir eine zweite Lochblende ins Spiel gebracht; ihre Backen sollen wieder weiß sein. Hinter der zweiten Blende bringen wir ein Prisma *abc* an, und in gebührendem Abstand hinter diesem zweiten Prisma placieren wir einen Auffangschirm *NM*, siehe Abb. 15 im Anhang. Was sagt Newtons Theorie für diese Konstellation voraus?

Nehmen wir an, wir hätten das Loch *g* dort in den Schirm *de* gebohrt,

wo wir vorher den purpurnen Fleck *p* des komplementären Spektrums aufgefangen haben. (Dieser Farbfleck lag in der Mitte jenes Komplementärspektrums).

Jetzt verlängern wir in Gedanken diejenige Gerade, die von der Rückseite *AC* des ersten Prismas durch die Blendenlöcher *G* und *g* zur Vorderseite *bc* des zweiten Prismas führt. Bis zum Punkt *g* liegt auf jener Geraden jedenfalls das, was wir einen grünfreien Pfad genannt haben; auf diesem Pfad verbreitet sich allerlei Licht, jedoch genau kein grünes Licht. Auch hinter der Blendenöffnung *g* setzt sich der grünfreie Pfad in gerader Linie fort und trifft im Punkt *p* aufs Prisma *abc*.

Die ungrünen Lichtstrahlen, die demzufolge in *p* aufs Prisma treffen, werden beim Weg durchs Prisma z. T. stärker abgelenkt (blau), z. T. weniger stark (rot), siehe Abb. 15 im Anhang.

Und da auf dem grünfreien Pfad naturgemäß keine grünen Lichtstrahlen (denen mittelgroße Refrangibilität zukommt) reisen, bleibt beim Weg durchs Prisma *abc* ein mittlerer Pfad grünfrei, der in Abb. 16 im Anhang wieder durch grüne Minuszeichen angedeutet ist.

Es gibt also auf dem Auffangschirm einen Ort  $\pi$ , an dem (aus Richtung der Geraden *Gg*) keine grünen Lichtstrahlen ankommen. Kommen dort andersfarbige Lichtstrahlen an? Allerdings. Von den diffus leuchtenden weißen Backen der zweiten Blende *dge* kommt allerlei Streulicht aller Regenbogenfarben, das ebenfalls auf dem Weg durchs Prisma abgelenkt wird; in der Abb. 15 haben wir einen roten und einen blauen dieser Strahlen eingezeichnet.

Man beachte, dass von den weißen Blendenbacken keinerlei grünes Licht durch den Punkt *p* des Prismas zum Punkt  $\pi$  auf den Schirm gelangen kann; denn solches grünes Licht (mittlerer Refrangibilität) müsste zuvor exakt die beiden Blendenlöcher *g* und *G* passiert haben. Und wir haben uns klargemacht, dass diese beiden Blendenlöcher auf einem grünfreien Pfad liegen. Alles das bedeutet, dass im Punkt  $\pi$  allerlei Licht aller Regenbogenfarben auftreffen muss – mit deutlicher Unterrepräsentation grünen Lichts aus besonders prominenter Richtung. Als Farbeindruck resultiert wieder das Komplement der unterrepräsentierten grünen Farbe: purpur.

Welchen Farbeindruck erwarten wir in der Umgebung des purpurnen Farbflecks  $\pi$ ? Einen weißen Farbeindruck. Denn dort kommen Lichtstrahlen aller Regenbogenfarben an, auch grüne Lichtstrahlen.

Betrachten wir etwa einen Fleck  $\beta$  knapp oberhalb von  $\pi$ . Dort kommt

erstens blaues Licht aus der Blendenöffnung an, zweitens grünes Licht aus dem Streulicht von oberhalb der Blendenöffnung und drittens rotes Licht von noch weiter oben. Der entscheidende Unterschied zwischen  $p$  und  $\beta$  liegt darin, dass in  $p$  eine Lichtsorte aus Richtung der Blendenöffnung fehlt (grün), während in  $\beta$  keine Lichtsorte aus dieser Richtung fehlt; dort ist keine Lichtsorte unterrepräsentiert. (Analog für einen weißen Fleck  $\alpha$  unterhalb von  $\pi$ ).

Alles das bedeutet: Wer den purpurnen Teil  $p$  des Komplementärspektrums (der sich durch Refraktion im Prisma ABC hinter einer Blende DGE auf einem Schirm  $d$  zeigt) mittels einer Blendenöffnung  $g$  aussondert und dann abermals durchs Prisma  $abc$  schickt, der wird am Ende einen purpurnen Fleck vor weißem Hintergrund auffangen; das Purpur zerlegt sich also nicht weiter in seine Bestandteile.<sup>30</sup>

Jetzt folgen wir Newtons Beispiel und bringen Bewegung ins Experiment. Newton hat in seinem *experimentum crucis* das erste Prisma ABC um seine Achse gedreht; im komplementären Experiment tun wir dasselbe. Drehen wir also das Prisma ABC so, dass nicht der purpurne Teil des Spektrums durch die Blendenöffnung  $g$  fällt, sondern dessen gelber Teil: Das ist der obere Teil des komplementären Spektrums, der aus allem Licht besteht mit Ausnahme blauer Lichtstrahlen (aus Richtung der Blendenöffnung  $G$ ). Verfolgen wir den zugehörigen blauosen Pfad auf seinem weiteren Weg durch das Experiment. In Abb. 17 im Anhang ist dieser Pfad mithilfe blauer Minuszeichen angedeutet. Das Prisma  $abc$  spaltet die grünen und roten Lichtstrahlen auf, die auf dem blaufreien Pfad durch die beiden Blendenöffnungen  $G$  und  $g$  hindurchkommen. Alle diese Lichtstrahlen sind weniger refrangibel als blaues Licht, das genau auf diesem Pfad fehlt. Und das bedeutet, dass uns auf dem Schirm NM besonders weit oben ein Farbeffekt ins Auge springen wird – nämlich die Unterrepräsentation blauer Lichtstrahlen. Wir sehen dort einen gelben Fleck, die Komplementärfarbe von Blau. Dass die Umgebung dieses gelben Flecks weiß sein wird, kann man sich wieder so klarmachen wie bei der weißen Umgebung des purpurnen Flecks  $\pi$  (die sich bei der ursprünglichen Ausrichtung des Prismas ABC zeigte).

Für uns wichtig ist nicht die Farbe des aufgefangenen Flecks, sondern sein Ort – etwas, das auch von Farbenblinden registriert werden kann. Er liegt *über* dem Ort  $\pi$ , an dem wir vorher die purpurne *Mitte* des Komplementärspektrums aufgefangen haben. Und da sich gelb auch im ursprünglichen Komplementärspektrum über der purpurnen Mitte fin-

det, hat sich an der räumlichen Beziehung zwischen den beiden Farben durch nochmalige Refraktion nichts geändert.

Allgemeiner gesagt: Die relativen Positionen bestimmter Teile des komplementären Spektrums bleiben bei mehrfacher Refraktion *in der Streulichtkammer* erhalten. Wir haben diese Behauptung zwar nur fürs räumliche Verhältnis zwischen (purpurner) Mitte und oberem (gelben) Extrempol des Komplementärspektrums gezeigt, aber man macht sich schnell klar, dass sich unser Argument leicht auf andere Teile des Komplementärspektrums übertragen lässt, etwa auf dessen unteren (türkisfarbenen) Extrempol.

Mit der allgemeinen Behauptung, die wir eben aufgestellt haben, sind wir am Ziel angekommen. Wir haben auf der Grundlage der newtonischen Theorie nachgewiesen, dass sich Newtons *experimentum crucis* optisch umstülpen lässt. Dort, wo in Newtons *experimentum crucis* Licht vorkommt, herrscht im umgestülpten Experiment Finsternis; und umgekehrt. Mehr noch, alle Farben in Newtons Experiment haben im umgestülpten Gegenexperiment eine komplementäre Entsprechung. Dort, wo im newtonischen Experiment z.B. mittelstark refrangible – grüne – Lichtstrahlen vorkommen, zeigen sich im komplementären Experiment mittelstark refrangible – purpurne – Schattenstrahlen. Genauso für die stark refrangiblen blauen Strahlen Newtons, denen im umgestülpten Experiment stark refrangible gelbe Strahlen entsprechen, und so weiter für alle anderen Strahlenarten. Und diese Komplemente zeigen im *gesamten* umgestülpten Experiment dasselbe Verhalten wie ihre Gegenstücke bei Newton; während bei Newton grüne Lichtstrahlen an *beiden* Prismen mittelstark gebrochen werden, zeigen die purpurnen Strahlen im umgestülpten Experiment ebenfalls an beiden Prismen mittelstarke Brechung. Wenn (laut Newton) den homogenen grünen Strahlen bei jeder Brechung stets ein und dieselbe Refrangibilität zukommt, dann gilt dasselbe für die purpurnen Strahlen.

In einer ersten Version können wir sogar eine experimentelle Realisierung vorweisen. Als Streulichtkammer wurde ein Plexiglasgehäuse verwendet, das mit Blumenseide beklebt war. Es muss von außen mit möglichst vielen weißen Lampen beleuchtet werden, und zwar möglichst einheitlich; dann entsteht im Innern ein gleichmäßig heller Raum. Darin wurde ein verkleinertes *experimentum crucis* aufgebaut. Auf dem Boden des Gehäuses lag ein länglicher schwarzer Papierstreifen, der als Komplement der Sonne verwendet wurde und der von der Helligkeit

der Streulichtkammerwand begrenzt erschien. Aufgrund der Nichtlinearität unseres Hellempfindens ergab die Betrachtung des Schirmbilds NM aber keine befriedigende Ansicht. Wird der Schirm durch eine Kamera ersetzt, so kann das umgestülpte *experimentum crucis* gut dokumentiert werden. Die Ergebnisse sind in Abb. 18 im Anhang gezeigt.

Werden die Lampen ausgeschaltet, die unsere Streulichtkammer beleuchten, so verwandelt sie sich in eine Dunkelkammer. Jetzt muss nur noch der schwarze Papierstreifen durch einen gleich dimensionierten leuchtenden Streifen ersetzt werden, so haben wir ein miniaturisiertes *experimentum crucis* nach Newtons Vorbild. Es zeigt die erwarteten Ergebnisse, die bei sonst vollkommen gleichen Bedingungen mit der Kamera aufgenommen wurden und ebenfalls in Abb. 18 gezeigt werden. Der Vergleich der beiden Bildreihen bestätigt unsere theoretische Untersuchung befriedigend.<sup>31</sup>

Kurz und gut, das neue Experiment in der Streulichtkammer sieht aus wie ein vollständiges Farbnegativ des *experimentum crucis* in der Dunkelkammer, und zwar einerseits in all seinen dynamischen und statischen Aspekten (also mit und ohne Rotation des ersten Prismas), andererseits in all seinen farblichen und geometrischen Aspekten. Newtons wichtigstes Experiment lässt sich optisch umstülpfen.

Dies Ergebnis halten wir für bemerkenswert; und Newton hätte darüber gestaunt. Welche weiterführenden Überlegungen könnten Wissenschaftsphilosophen und Physiker daran anknüpfen? Dazu zunächst eine philosophische Andeutung. Unserer Ansicht nach zerstört Newtons Theorie (ebenso wie die optische Empirie, die wir zum Schluss beschrieben haben) die erkenntnistheoretischen Ansprüche, die Newton mit ebendieser Theorie verbunden hat. Damit hätten wir eine *reductio ad absurdum* der Gesamtposition Newtons (die einerseits seine optische Theorie enthält und andererseits erkenntnistheoretischen Optimismus mit Blick auf die Beweisbarkeit dieser optischen Theorie). Aber diese *reductio* bietet nicht alleine negative Konsequenzen; vielmehr liefert sie ein positives Beispiel für die umstrittene These von der Unterbestimmtheit der Theorie durch *ihre* Daten; solche Beispiele sind bislang rar.<sup>32</sup>

Zum Abschluss deuten wir einen weiterführenden Gedanken für die Physik an: Die Symmetrie, die wir in diesem Artikel durch Umstülpung des *experimentum crucis* herausgearbeitet haben, legt es geradezu nahe, die beiden – perfekt symmetrischen – Fälle auch symmetrisch zu erklären. Lichtstrahlenmodelle à la Newton tun dies nicht und sind (im

Falle des umgestülpten Experiments) alles andere als komfortabel, wie wir unfreiwillig vorgeführt haben. Aber die physikalischen Verhältnisse erfordern offenbar keine asymmetrische Erklärung der vorgestellten Experimente. Denn in der Streulichtkammer können mit den hier vorgestellten Umstülpungsregeln alle newtonischen Experimente umgestülpt werden (sogar, wie man sich leicht klarmacht, *alle denkbaren* spektroskopischen Experimente in der Dunkelkammer).

In der Tat, bei der Theoriebildung pflegen Physiker aktiv nach Symmetrien zu suchen – selbst dort, wo die Phänomene dies in viel geringerem Maße nahelegen.<sup>33</sup> Die Ergebnisse unserer Untersuchung zeigen, dass es möglich sein müsste, die optischen Phänomene in einer Theorie zu fassen, deren Symmetrie die Symmetrie der Phänomene abbildet. Newtons Theorie und ihre modernen Nachkommen tun dies nicht. Von zwei geometrisch und optisch äquivalenten Experimentalsituationen zeichnen sie *eine* als primäre aus und leiten die andere daraus ab. Aber nichts spricht dafür, dass die umgestülpte Situation sekundär ist!<sup>34</sup>

#### Anmerkungen

- 1 Newton beschreibt das Experiment sehr knapp in Newton [NTaL]:3078-3079. Das Experiment taucht ausführlicher auch in den *Opticks* auf, aber ohne den Namen „experimentum crucis“ oder dessen englische Übersetzung, siehe Newton [O]:31-33 (= Book I, Part I, Proposition II, Experiment 6).
- 2 Siehe z. B. Sabra [ToLf]:231 ff, Westfall [NDHF], Westfall [NHCo], Westfall [NRtH], Lohne [EC], Gruner [DFL], Shapiro [GAoN], Lampert [NvG].
- 3 Siehe Newton [NTaL]:3079. In den *Opticks* kommt diese Behauptung ebenfalls vor, siehe Newton [O]:21 (= Book I, Part I, Proposition II).
- 4 Diese zweite Behauptung steht in Newton [NTaL]:3083, Punkt 7. In den *Opticks* findet sie sich nicht als Proposition mit eigener Nummer, sie folgt aber logisch aus der ersten Behauptung und aus dem ersten Teilsatz der Proposition II des zweiten Teils des ersten Buchs der *Opticks* (siehe Newton [O]:78).
- 5 Streng genommen bietet dieses Experiment keine perfekte Umstülpung des Grundexperiments; es genügt nicht den Spielregeln, die wir am Ende des Abschnitts VI explizieren werden. Denn Blenden werden bei echten Umstülpungen genau nicht in ihr Gegenteil (einen Steg) verwandelt.
- 6 Siehe Goethe [EF]:§215, Goethe [ETN]:§132, Goethe [EzGF]:68. Siehe auch Kirschmann [USSK]:197 ff, Kirschmann [USS], Kirschmann [USSF], Bjerke [NBzG], Müller [GPub], Nussbaumer [zF]:177/8, Rang / Grebe-Ellis [KS]. Bjerke, Kirschmann, Nussbaumer, Rang und Grebe-Ellis brin-

- gen objektive Versionen invertierter Experimente (in denen das Spektrum auf einen Schirm geworfen wird); Goethe bringt teils objektive, teils subjektive Versionen (in denen anstelle des Auffangschirms die menschliche Netzhaut steht; mehr zum Unterschied zwischen subjektiven und objektiven Experimenten in Fußnote 16). Die frühesten beiden invertierten Versionen prismatischer Experimente (die Newton gekannt hat) finden sich in zwei Briefen des Jesuiten Lucas. Beide Versionen sind subjektive Experimente. Die erste Version findet sich in einem Brief vom 17.5.1776 (datiert auf den 27.5.1776), siehe Newton [CoIN]/II:8-12, dort Punkt 7 auf p. 11. Der Brief ging über Oldenburg an Newton und wurde von Newton in mehreren Briefen beantwortet (vergl. Newton [CoIN]/II:8), allerdings erwähnt Newton den Punkt 7 in seinen Antworten nicht. Die zweite Version findet sich in einem Lucas-Brief vom Februar 1677/8 (siehe Newton [CoIN]/II:246-251), und zwar dort auf p. 249. Der Brief ging über Hooke an Newton und wurde von Newton am 5.3.1677/8 beantwortet (vergl. Newton [CoIN]/II:254-260). Newton reagiert dort auf diese zweite Version des invertierten Experiments, siehe p. 257. In den *Opticks* bringt und erklärt Newton dasselbe (subjektive) Experiment, siehe Newton [O]:104 (= Book I, Part II, Proposition VIII, Problem III).
- 7 Die Frage liegt seit langer Zeit in der Luft. Vor einem halben Jahrhundert hat der norwegische Physiker Torger Holtsmark zusammen mit dem norwegischen Dichter und Publizisten André Bjerke in einem Studienkreis Invertierungen der meisten newtonischen Experimente angesteuert; sie sind in einem brillanten Buch Bjerkes wiedergegeben; siehe Bjerke [NBzG]. Die Invertierung des *experimentum crucis* wird dort allerdings nicht ausführlich genug diskutiert, um es anderen Arbeitsgruppen zu ermöglichen, die Sache zu replizieren (vergl. Bjerke [NBzG]:87). Ein Jahrzehnt später hat Holtsmark einen eigenen Anlauf genau zum *experimentum crucis* veröffentlicht und Vorschläge dafür unterbreitet, wie man dort die Rollen von Licht und Schatten vertauschen müsste (siehe Holtsmark [NECR]). Ob er dieses Experiment wirklich durchgeführt hat, geht aus dem Aufsatz nicht hervor. Holtsmarks schwedischer Kollege Pehr Sällström hat dann die fraglichen Experimente durchgeführt und in einem spektakulären Experimentalfilm dokumentiert, der erst kürzlich fertiggestellt worden ist; siehe Sällström [MS]. (Diese Experimente haben gewisse Nachteile; sie erfüllen nicht alle Wünsche, die man beim Invertieren hegen sollte. Siehe Fußnote 29). – Abgesehen davon haben sich deutsche Physiker aus der Tradition der phänomenologischen Optik an die Invertierung des newtonischen *experimentum crucis* herangetastet (Grebe-Ellis [NECa], Rang [MS]). Zudem hat der Wiener Maler und Farbexperimentator Ingo Nussbaumer eine Reihe aufsehenerregender Experimente durchgeführt und veröffentlicht, die in eine ähnliche Richtung weisen, also z.T. ebenfalls darauf abzielen, Newtons Experimente zu invertieren. Mehr dazu unten in Fußnote 29.
- 8 Das newtonische Original findet sich dort als *figure 18* auf der Tafel „LIB. I.TAB.IV. Par.I.“ und gehört zum sechsten Experiment des ersten Teils des ersten Buchs von Newtons *Opticks*. Eine ältere Skizze desselben Experiments stammt aus Newtons zweitem Brief an Pardies vom 9.7.1672; (siehe

- Newton [INPL]:101; die Abbildung entnimmt der Herausgeber Cohen den *Philosophical Transactions* 85 (1672)).
- 9 Dass die breite Mitte des Bildes auf dem Schirm DE weiß ist, erwähnt Newton weder in seiner Darstellung des *experimentum crucis* aus dem Jahr 1672 noch in der Parallelpassage aus den *Opticks*. – Dies hat viele seiner Leser in die Irre geführt, wie wir in der nächsten Fußnote anhand eines prominenten Newton-Kenners dartun werden.
- 10 Selbst dem sonst so gewissenhaften Shapiro unterläuft an dieser Stelle ein grober Fehler. Er schreibt: „The hole [...] in the first board allowed only a small portion of the *spectrum* cast by the prism placed in front of it to be transmitted, but when this prism was rotated different portions would be transmitted” (Shapiro [GAoN]:73/4; unser Kursivdruck). Denselben Fehler macht Shapiro auch an anderer Stelle (siehe [ESoN]:212). Um den Fehler namhaft zu machen, möchten wir zunächst daran erinnern, dass man auf der *dem Fensterladenloch zugewandten Seite* des ersten Schirms DE noch kein Spektrum sehen kann (nur ein weißes Bild mit farbigen Enden); denn der Schirm DE mit dem Loch G steht viel zu nah am Prisma ABC, um das Licht dort schon spektral aufzufächern. Anders steht es, wenn man *von der Rückseite* des Schirms DE durchs Loch G in Richtung des Fensterladenlochs und des Prismas ABC schaut. Wer diese Blickrichtung wählt und sich unmittelbar hinter dem Loch G placiert, wird durch dieses Loch das volle Newtonspektrum erblicken – und das auch dann, wenn das Prisma ABC um seine Achse gedreht wird; anders als Shapiro nahelegt, werden durch diese Rotation also durchaus keine unterschiedlichen Portionen des Spektrums durchs Prisma geschickt. Wer diese Blickrichtung dagegen beibehält, sich vom Loch G entfernt und kurz vor dem Schirm DE stehen bleibt, der wird dann in der Tat nur jeweils verschiedene Portionen des Spektrums sehen, je nach Rotation des Prismas ABC.
- 11 Auch im *experimentum crucis* schickt Newton das Licht zuallererst durch ein Fensterladenloch F, siehe Abb. 4. Das Loch darf aber so groß sein, dass es das gesamte Prisma ausleuchtet. In den *Opticks* spricht Newton daher auch von einem sehr breiten Loch („in the window-shut a much broader hole“, siehe Newton [O]:31 (= Book I, Part I, Proposition II, Experiment 6)). In Newtons älteren Abbildungen fehlen Loch und Fensterladen; dort sieht es so aus, als käme das Licht fürs Experiment geradewegs und ungehindert von der Sonne. Daher darf man vermuten, dass Fensterladen und Fensterladenloch für Newtons *experimentum crucis* nicht wesentlich sind. Wozu sind sie überhaupt da? Offenbar kann das Experiment nicht gut im Freien stattfinden (weil es sonst von Licht aus allen Richtungen gestört würde); die Aufgabe des Fensterladenlochs besteht also nur darin, überhaupt Licht in die Dunkelkammer hineinzulassen, und zwar grob in ein und derselben Richtung. Ganz anders im Grundexperiment aus Abb. 1 und Abb. 2; dort bietet das Loch einen entscheidenden Parameter des Experiments. In Newtons ursprünglicher Präsentation aus dem Jahr 1672 kommt nicht deutlich heraus, welche unterschiedliche Rolle und Größe das Fensterladenloch in den beiden Experimenten hat; dort kann das *experimentum crucis* wie eine Fortsetzung des Grundexperiments wirken, mit identischem Lochdurch-



- messer. Beim Grundexperiment sagt Newton: „[...] and made a small hole in my window-*shuts*“ (Newton [NTaL]:3076, unser Kursivdruck); beim *experimentum crucis* heißt es dagegen: „I took two boards, and placed one of them close behind the prism at the *window*“ (Newton [NTaL]:3078, unser Kursivdruck). Ob Newton in der Zwischenzeit die Fensterläden wieder aufgemacht hat oder ob er ein größeres Loch in den Fensterladen gebohrt hat, sagt er uns nicht.
- 12 An diesem Punkt seiner ausführlicheren Darstellung aus den *Opticks* verweist Newton daher zurück auf das dritte Experiment, also auf den dortigen Nachfolger des Grundexperiments aus dem Jahr 1672 (Newton [O]:21–24; 32 (= Book I, Part I, Proposition II, Experimente 3 und 6)). – Warum wir vorsichtigerweise gesagt haben, dass die neue Lochposition nur „zunächst“ keine wesentlichen Unterschiede mit sich bringt, wird in Abschnitt III deutlich werden; dort tauchen einige Probleme auf, die bei der ursprünglichen Lochposition nicht aufgetaucht wären. In Abschnitt VII werden diese Probleme gelöst, und die Behauptung oben im Text gilt dann ohne Einschränkung.
  - 13 Wer den Weg nachvollziehen will, den die einzelnen Lichtstrahlen Newton zufolge in dem Experiment zurücklegen, sollte sich die 4. Folie aus Lamperts „Lösung 2“ ansehen, siehe Lampert [zWF]:113.
  - 14 Lampert hat bei Newton eine ähnliche Beweisidee ausgemacht; er grenzt diese Idee erfolgreich von allerlei suboptimalen Beweisrekonstruktionen ab, siehe Lampert [NvG]:264–267 *et passim*.
  - 15 Nur wenn die Blende eine extrem kleine Öffnung hat und das durchreisende Licht *beugt*, zeigen sich Farben. Wir werden von nun an alle Beugungsphänomene unberücksichtigt lassen.
  - 16 Aus historischen Gründen spricht man bei einem Experiment, bei dem ein Bild direkt von der Retina des Auges aufgefangen wird, von einem *subjektiven* Experiment. Wird hingegen das Bild zunächst von einem Schirm aufgefangen, so spricht man von einem *objektiven* Experiment. Wir werden uns Newtons Vorliebe für objektive Experimente weitgehend anschließen. Dennoch werden wir Sie manchmal einladen, sich vorzustellen, dass Sie *in* den objektiv ausgeführten Experimenten von bestimmten Punkten aus mit einem gedachten Auge beobachten. Durch diesen Kniff lassen sich die Experimente besser verstehen. Das gedachte Auge wirkt hier immer wie ein Richtungsanalysator; es löst die Gesamthelligkeit eines Raumpunktes nach den richtungsspezifischen Anteilen auf. Jederzeit könnte es durch einen apparativen Richtungsanalysator ersetzt werden, ohne dass sich an unserer Argumentation etwas ändern würde. Newton hat sowohl seine Augen als auch einfachere apparative Richtungsanalysatoren eingesetzt. Der Schirm hinter einer Blende ist immer ein solcher Richtungsanalysator. Fest steht: Nur wer beide Beobachtungsmodi – den subjektiven und den objektiven – miteinander kombiniert, dringt zur vollkommenen physikalischen Beschreibung vor; der subjektive Beobachtungsmodus liefert die richtungsspezifische Abbildungsstruktur eines Raumpunktes, der objektive die daraus resultierende integrierte Gesamthelligkeit im fraglichen Raumpunkt.

- 17 Das vorsortierte Weiß ist deshalb dunkler als das vorsortierte Schwarz, weil das Sonnenlicht in dem Experiment vom Dunklen abgegrenzt wird; erstens erfüllt die Sonne selbst nicht den gesamten Himmel, vielmehr scheint sie vor dem Hintergrund des fast ganz finsternen Weltalls. Nehmen wir an, die Sonne würde leuchtend das ganze Weltall ausfüllen, dann gäbe es hinter dem Prisma keine vorsortierte Strahlenzone. Diese unsortierte Zone wäre perfekt weiß. Sobald wir sie prismatisch vorsortieren lassen wollen, müssen wir die Lichtquelle begrenzen, und dadurch verringern wir die Helligkeit in jener Zone. Kurz, vorsortierte Strahlenzonen sind nur mit Helligkeitsverlusten zu haben, in der technischen Optik spricht man von Lichtbündelbegrenzung, vergl. Bergmann et al [O]:105, 270. (Theoretische Ausnahme: Falls die Lichtquelle – anders als die Sonne und anders als jede real existierende Lichtquelle – unendlich stark leuchtete, wäre die Helligkeit der durch sie erzeugten vorsortierten Strahlenzone auch dann unendlich groß, wenn diese Strahlenzone per Prisma mithilfe von Begrenzungen erzeugt würde). Das vorsortierte Schwarz kann aber nur aus kleinen, entfernten dunklen Flächen entstehen und muss mithin von Weißem bzw. Leuchtendem begrenzt werden.
- 18 Für die vorsortierten Zonen können wir daher schließen, dass die nur gedanklich existierende Zone des perfekt vorsortierten Weiß keine Intensität hätte, demnach schwarz wäre und dass umgekehrt die Zone des vorsortierten Schwarz im Extremfall einfach nur weiß wäre. Das klingt paradox, besagt aber im Fall des vorsortierten Weiß nichts Rätselhaftes: Das Einsortierte geht gegen 0, das Aussortierte geht hingegen gegen 1 (sofern die Gesamtheit der vorsortierten Lichtstrahlen auf den Wert 1 normiert wird). Im Falle des vorsortierten Schwarz wären die Verhältnisse genau umgekehrt. Zwar mag man es daher bei genauem Hinsehen terminologisch irreführend finden, dass wir der newtonischen Heterogenität des weißen Lichts die unorthodoxe Heterogenität der *Finsternis* entgegensetzen. Doch aus propädeutischen Gründen bleiben wir bei unserer Terminologie, da sie die Komplementarität der Verhältnisse deutlich herausstreicht, die der Sache nach vorliegt.
- 19 So schreibt Newton: „[...] ,tis requisite that the Room be made *very dark*, least any scattering light, mixing with the colour, disturb and allay it“ (Newton [NTaL]:3087, unser Kursivdruck). Was das heißt, sagt Newton weit deutlicher in den *Opticks*, in denen er schon beim ersten Experiment und gleichsam ein für allemal alles mögliche schwärzt, siehe Newton [O]:17 (= Book I, Part I, Proposition I, Experiment 1).
- 20 Goethe hat unseres Wissens als erster darauf aufmerksam gemacht, dass die newtonische Ausschaltung von Störeinflüssen keineswegs so nebensächlich ist, wie sie bei Newton daherkommt. Siehe Goethe [ETN]:§35.
- 21 Aus *Zahme Xenien VI*, zitiert nach Schöne [GF]:209.
- 22 Als ob er einen Beitrag zu unserem augenblicklichen Problem hätte liefern wollen, schreibt einer der Pioniere der phänomenologischen Optik (in einem anderen Zusammenhang): „Die Erfahrung bei einer Bergwanderung, wenn im frischen Schnee plötzlich Nebel aufkommt, belehrt uns: Es kann blendend hell sein, aber wir haben keine Ahnung mehr, wo es aufwärts, wo

- es abwärts geht“ (Maier [LiGv]:324). Das Phänomen ist als „white-out“ bekannt und kann manchmal in arktischen Regionen beobachtet werden: „A condition that occurs in polar regions, when all visual clues to direction and distance are lost, leading to a dangerous state of disorientation. When the sky is uniformly overcast and snow cover is complete, the horizon, clouds, and the surface itself cannot be distinguished. An equal amount of light is received from all directions, so no shadows are cast and all depth perception is lost. Contrary to popular belief, a white-out does not necessarily involve blizzard conditions, i.e. blowing snow“ (Dunlop [DoW]:252 mit weggelassenen Querverweisen). Siehe auch Blüthgen [AK]:94, Putnins [CoG]:66/7.
- 23 Siehe Rang [HaBz]:49 ff.
- 24 Viele Autoren, die sich mit Invertierung und Umstülpung newtonischer Experimente abgeplagt haben, suchten nach einem finsternen Analogon zur herkömmlichen Rede von Lichtquellen. So hat Bjerke der newtonischen „Lichtlehre“ ein polemisches Analogon gegenübergestellt – die „Opakik“, siehe Bjerke [NBzG].
- 25 Rang [HaBz]:49ff.
- 26 Anders als im Fall des pechschwarzen Komplements der Sonne kann man diesmal bei geeigneten Abmessungen (des Flecks sowie des Abstandes des Prismas von diesem Fleck) beim Blick durchs Prisma zwischen den Farberscheinungen eine schwarze Mitte sehen, also zwei getrennte Kantenspektren anstelle des damaligen (komplementären) Vollspektrums. (Dass wir beim prismatischen Blick auf die pechschwarze Sonne keine schwarze Mitte sehen, liegt erstens an den Dispersionseigenschaften unserer Prismen und zweitens daran, dass die Sonne – so wie ihr pechschwarzes Komplement – am Himmel immer denselben Winkel von rund 30 Bogenminuten einnimmt; weder ändert sich der Sonnendurchmesser nennenswert, noch unser Abstand von der Sonne). Wir geben zu: Diese schwarze Mitte im Kantenspektrum ist kein vorsortiertes Schwarz. Schadet das unserem Argumentationsziel? Keineswegs! Denn wir behaupten (und können empirisch nachweisen): Bei nochmaliger Vertauschung der Rollen von Licht und Finsternis (also in einer newtonischen Situation) entsteht unmittelbar hinter dem Prisma ebenfalls eine weiße Mitte, die ebenfalls kein vorsortiertes Weiß ist! Denn ein Blendenloch wie G im Schirm DGE macht nichts anderes als das Auge; es nimmt eine Richtungsanalyse der Beleuchtungsrichtungen am Ort des Auges bzw. Lochs vor. Im Rahmen der newtonischen Argumentation gilt: Am fraglichen Ort liegt keine ausreichende Lichtbündelbegrenzung vor, dort überlagern sich lauter Punktlichtquellen; die Superposition aller Einzelspektren erzeugt ein spektral völlig unsortiertes Weiß. Daher war Goethe im Recht, als er darauf verwies, dass die newtonische Theorie der Superposition lauter spektral zerlegter Punktlichtquellen nicht empirisch belegt werden kann. Newton dürfte sich dieser Schwierigkeit bewusst gewesen sein; das erklärt vielleicht, warum er so wenig Wert auf den fraglichen Bereich des vorsortierten Weiß gelegt und stattdessen das komplizierte *experimentum crucis* konstruiert hat.
- 27 In aller Allgemeinheit stimmt die Notwendigkeit („müssen“) dieser

- Behauptung nicht, und das aus zwei Gründen. Erstens könnten die fraglichen Lichtstrahlen zwar von der Prismenoberfläche AC herkommen, aber ohne aus dem Innern des Prismas herauszutreten; sie könnten das Ergebnis einer Reflexion an der Prismenoberfläche sein. Und zweitens könnte man die erforderlichen weißen Strahlen auch punktgenau an Ort und Stelle leiten, dann müssen sie nicht von der Lichtkammerwand ausgehen.
- 28 Der Ausdruck „nur“ in diesem Satz bringt eine Übertreibung mit sich, die streng genommen nicht stimmt. Hier gilt dasselbe *caveat*, das wir in der vorigen Fußnote angebracht haben.
- 29 Hier unterscheidet sich der Ansatz, den wir favorisieren, am schärfsten von dem Ansatz, den Bjerke, Holtsmark und Sällström verfolgt haben. Auch dort, wo sie Newtons Experiment umstülpen, experimentieren sie im vorsortierten Weiß; ihre Umstülpung beginnt sozusagen erst an späteren Stationen des *experimentum crucis*. Siehe Holtsmark [NECR]:1234/5. Sehr überzeugende Varianten des umgestülpten *experimentum crucis* stammen von Ingo Nussbaumer. Eines seiner *objektiven* Experimente hat Nussbaumer am 17.6.2009 an der Humboldt-Universität zu Berlin erstmals einer größeren Öffentlichkeit vorgeführt; Nussbaumer sondert aus einem komplementären Spektrum mittels einer Spiegelstegvorrichtung einzelne farbige Abschnitte heraus und bettet sie in weißes (sowohl vorsortiertes wie unsortiertes) Licht ein, um diese weiß eingebetteten Farben des Komplementärspektrums durch ein zweites Prisma zu schicken. Mit diesem Experiment kann gezeigt werden, dass sich die Farben Türkis, Purpur und Gelb (aus dem komplementären Spektrum) in einer umgestülpten Situation ebenso ablenken lassen wie deren newtonische Gegenstücke Rot, Grün und Blau. Dass sich die Farben des komplementären Spektrums in einer umgestülpten Situation ebenso ablenken lassen wie die Farben des normalen Spektrums in der newtonischen Situation, haben Bjerke und Nussbaumer mittels *subjektiver* Experimente bereits gezeigt (Bjerke [NBzG]:66, 86, 88, Nussbaumer [zF]:86, 104, 150, 151, 188, insbesondere Tafeln VIII und IX). Mehr noch, Nussbaumer hat insgesamt sechs weitere strukturerhaltende Transformationen der newtonischen Experimente entdeckt, die paarweise komplementär sind. (Siehe Nussbaumer [zF]:159/160, sowie Tafeln XVIII bis XX).
- 30 Dass es sich nicht in seine newtonischen Bestandteile blau und rot zerlegt, hängt von den optischen Gesamtbedingungen in der *Streu*lichtkammer ab; in einer *Dunkel*kammer lassen sich die newtonischen Bestandteile des Purpur dagegen sehr wohl prismatisch auffächern. Schickt man den purpurnen Teil des komplementären Spektrums in der Dunkelkammer erst durch eine Blende mit schwarzen Backen und dann durch ein Prisma, so kann man auf einem Schirm (in gebührendem Abstand vom Prisma) die Farben blau und rot auffangen. Das jedenfalls sagt Newtons Theorie voraus.
- 31 Eine ausführlichere Darstellung und Diskussion dieses Experiments findet sich in einem gesonderten Artikel, siehe Rang [HaBz]. Dort werden auch ausführlicher Hellräume als Invertierung von Dunkelräumen beschrieben und in ihren Eigenschaften diskutiert. Die dortige Argumentation unterscheidet sich von der hier vorgelegten dadurch, dass sie sich nicht an der

newtonischen Theorie orientiert, sondern die Sache mit den Begriffen einer phänomenologischen Beschreibung behandelt.

- 32 Der Ausdruck „underdetermination“ stammt von Quine, siehe Quine [WO]:78; *locus classicus* ist Quine [oEES]. Mehr dazu demnächst in Müller [PE]. Weitere wissenschaftsphilosophische Schlüsse aus den vorgeführten Symmetrien bietet Müller [IA].
- 33 Dass Physiker in ihren Theorien und Experimenten nach Symmetrien suchen, wird oft mit dem Schönheitssinn der Physiker in Verbindung gebracht und mit dessen erkenntnistheoretischer Funktion. Eine Fallstudie zu diesem Thema liefert Müller [FK].
- 34 Dieser Aufsatz geht auf eine informelle Tagung in Adlershof vom Februar 2009 zurück, bei der Newtons *experimentum crucis* analysiert wurde. Im Lichte einiger Adlershofer Gespräche mit Matthias Rang verfasste Olaf Müller ein Arbeitspapier, um einen Gedankengang zu fixieren, dessen Vollendung ihm jahrelang nicht gelungen war, wegen der Schwierigkeiten mit dem vorsortierten Schwarz; erst in Adlershof erfuhr er, dass sich Matthias Rang längst die Ressourcen zur Lösung dieser Schwierigkeiten erarbeitet hatte, und so bildeten dessen (bis dahin unveröffentlichte) Ideen zum Hellraum eine wichtige Grundlage für Olaf Müllers Arbeitspapier. Das stark gekürzte Arbeitspapier ist dann gemeinsam von Matthias Rang und Olaf Müller überarbeitet worden. Wir danken Johannes Grebe-Ellis, Marc Müller, Ingo Nussbaumer und einem anonymen Gutachter für zahlreiche Anregungen und Verbesserungsvorschläge. Olaf Müller dankt Anna Welpinghus, Thomas Schmidt, Eric Oberheim und Timm Lampert für Kritik an früheren Fassungen seines Arbeitspapiers. – Die Abbildungen hat Matthias Herder zunächst nach Ideen von Olaf Müller entworfen; sie wurden von ihm nach den Wünschen der beiden Autoren mehrfach überarbeitet.

### Anhang 1: Farbige Abbildungen

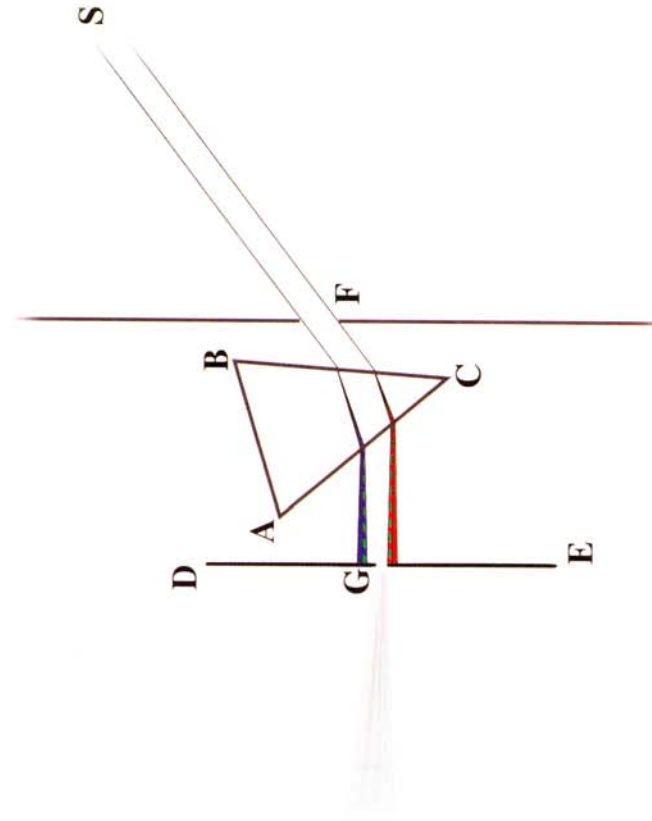


Abb. 5. Auftakt des *experimentum crucis* (vergrößerter Ausschnitt aus Abb. 4). Da der Schirm DE nah am Prisma ABC aufgebaut ist, zeigen sich hier die sogenannten Kantenspektren. Ganz oben haben wir eine blaue Zone eingezeichnet, an die eine hier grün-blau schraffierte Zone angrenzt (die vom menschlichen Auge türkis wahrgenommen wird, also als ein Zwischenton, den wir im Newton-Spektrum weiter konsequent nicht berücksichtigen wollen). Entsprechend an der unteren Kante des gebrochenen Lichtbündels; die rote Zone ganz unten grenzt an eine hier grün-rot schraffierte Zone an (die vom menschlichen Auge gelb wahrgenommen wird). Die – additiven – Mischungsregeln, die wir hier voraussetzen, sind von den RGB-Bildschirmen her wohlbekannt.

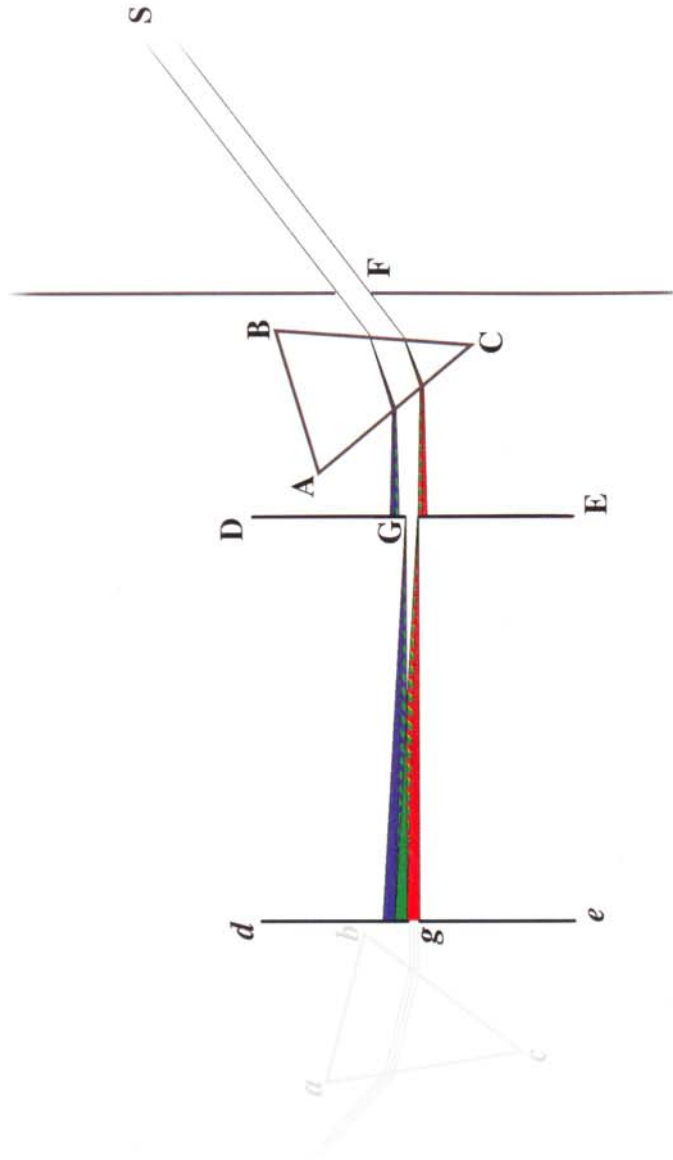


Abb. 6. Fortsetzung des *experimentum crucis*. Wir führen das Loch G der Lochblende DGE in die Zone des vorsortierten Weiß ein und fangen auf dem Schirm de das newtonische Spektrum auf. Der Schirm ist so weit vom Loch G entfernt, dass sich dort bereits das gesamte newtonische Grundspektrum zeigt.

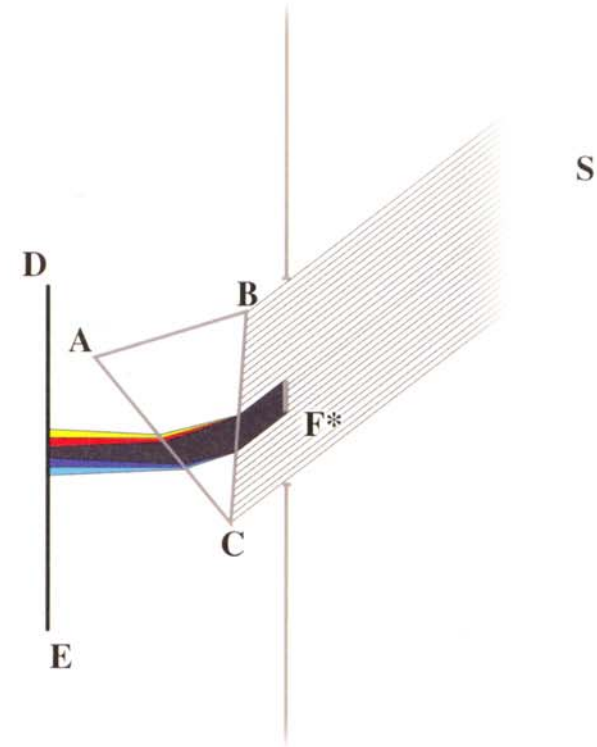


Abb. 9. Die komplementären Kantenspektren in Abb. 5. Wir geben die Farben an, die sich tatsächlich zeigen. Ganz oben ein gelber Rand (daneben rot), ganz unten ein türkisfarbener Rand (daneben blau), in der Mitte schwarz.

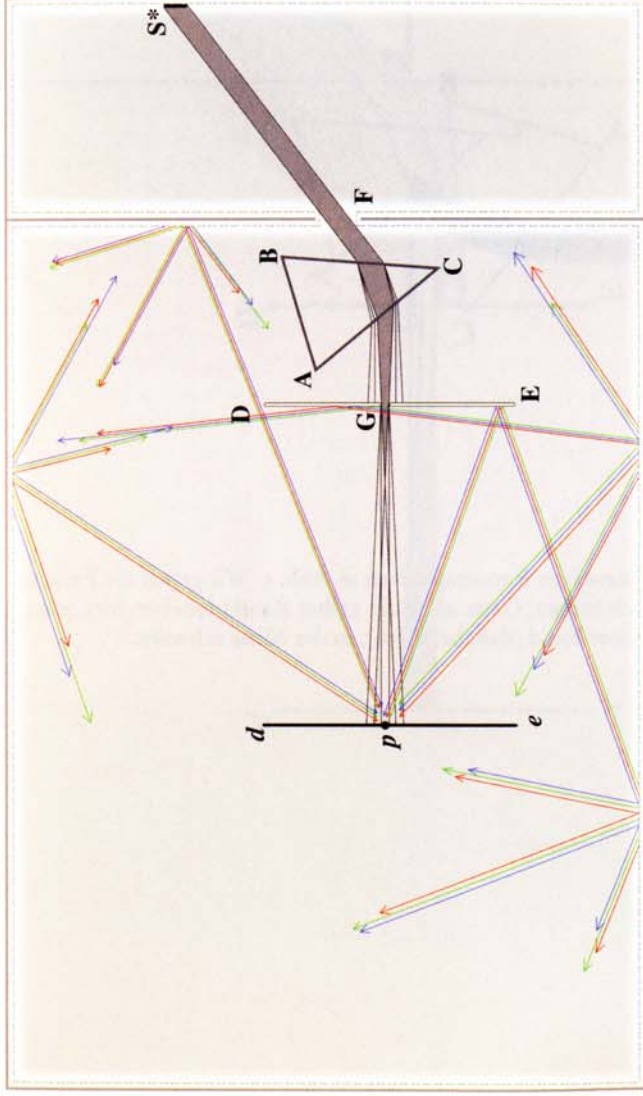


Abb. 10. Streulichtkammer – neuer Anlauf für die Umstülpung des *experimentum crucis*. Der Schattenwerfer  $F^*$  des ersten gescheiterten Anlaufs (Abb. 9) wird wieder durch ein Fensterladenloch  $F$  ausgetauscht; rechts davon stülpen wir den Himmel um, setzen also an die Stelle der Sonne  $S$  (bei Newton) deren pechschwarzes Komplement, die Unsonne  $S^*$ . Die Wände im Innern der Streulichtkammer (linker Teil der Abbildung) sind Lambertstrahler, sie emittieren newtonische Lichtstrahlen aller Farben, und zwar in alle Richtungen. Die Blende  $DGE$  hat dieselbe Geometrie wie bei Newton, aber ihre Blendenbacken sind nicht schwarz, sondern weiß.

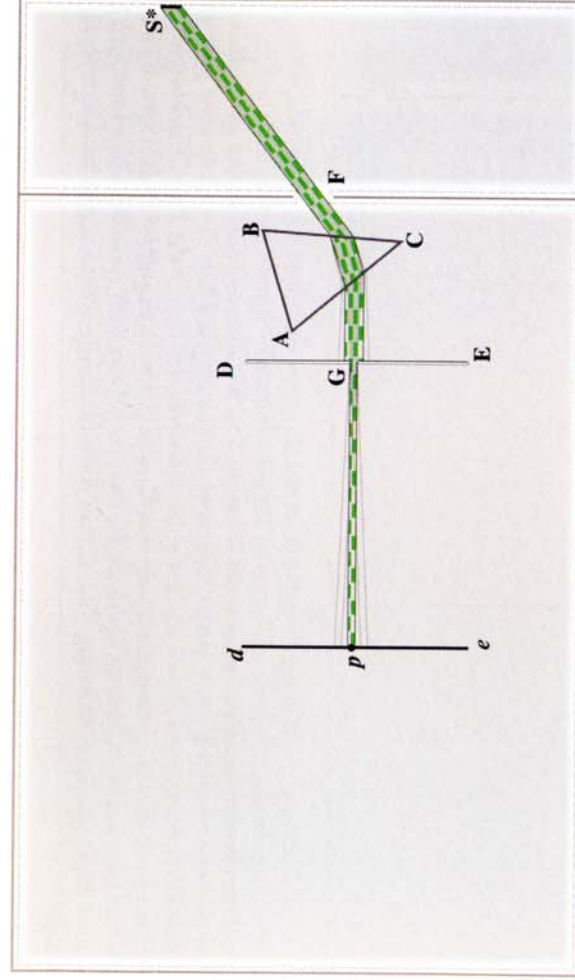


Abb. 11. Grünfreie Pfade in der Streulichtkammer (symbolisiert durch grüne Minuszeichen). In genau einer Richtung – nämlich aus Richtung der pechschwarzen Unsonne  $S^*$  – dringen keinerlei grüne Lichtstrahlen durchs Fensterladenloch in die Streulichtkammer ein. Wo diese grünfreien Pfade die erste Prismenfläche  $BC$  schneiden, kommt zwar grünes Streulicht an (von den Wänden der Streulichtkammer und von der weißen Umgebung der Unsonne; hier nicht eingezeichnet). Aber es kommt aus *anderen* Richtungen; dies diffuse grüne Streulicht wird an der Prismenfläche  $BC$  also genau nicht auf die grünfreien Pfade gebrochen, die wir im Innern des Prismas eingezeichnet haben. (Die grünfreien Pfade ändern also an  $BC$  ihre Richtung genau so, wie grünes Licht an  $BC$  gebrochen würde, wenn es auf einem grünfreien Pfad auf das Prisma aufräfe). Entsprechend für die zweite Prismenfläche  $AC$ , an der unsere grünfreien Pfade zwar ihre Richtung abermals ändern, ohne allerdings mit richtungsgleichem grünen Licht aufgemischt zu werden. Die grünfreien Pfade werden von den Blendenbacken der Blende  $DGE$  unterbrochen, da deren Rückseiten weiß sind und weiß (also u.a. grün) bestrahlt werden. Dieser Effekt tritt nur beim Loch  $G$  nicht ein. Das bedeutet, dass sich die grünfreien Pfade gleichsam durch das Loch  $G$  hindurchziehen können. Sie enden auf dem weißen Schirm  $d$  im Punkt  $p$ . Dort trifft viel grünes Licht aus allen Richtungen ein, nur nicht aus der einen – horizontalen Richtung – die wir jetzt verfolgen haben. Ergebnis: Unterrepräsentation grünen Lichts in  $p$ .

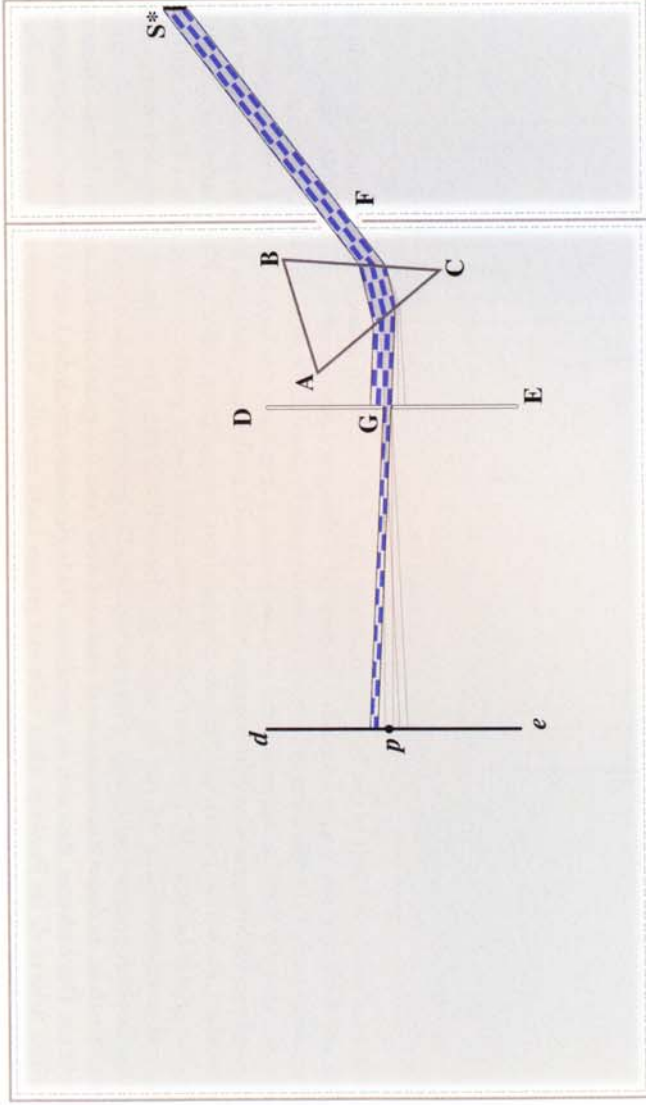


Abb. 12. Blaufreie Pfade in der Streulichtkammer. In genau derselben Richtung, wie rechts in Abb. 11 mittels grüner Minuszeichen angedeutet, dringen auch keinerlei blaue Lichtstrahlen durchs Fensterladenloch in die Streulichtkammer ein (nämlich wieder aus Richtung der pechschwarzen Sonne S\*). Wo auch diese blaufreien Pfade die erste Prismenfläche BC schneiden, kommt zwar zusätzlich noch blaues Streulicht an; *dies diffuse blaue Streulicht wird aber an der Prismenfläche BC nicht in dieselben Richtungen gebrochen wie das grüne Streulicht. Im Innern des Prismas nehmen die blaufreien Pfade also einen leicht anderen Verlauf als die grünfreien Pfade.* Sie pflanzen sich nach denselben Regeln fort, die wir bei Abb. 11 erklärt haben, enden aber auf dem weißen Schirm *de oberhalb des Punktes p.* Dort trifft viel blaues Licht aus allen Richtungen ein, nur nicht aus der einen – leicht schrägen Richtung – die sich in Abb. 12 verfolgen lässt. Ergebnis: Unterrepräsentation blauen Lichts oberhalb von p.

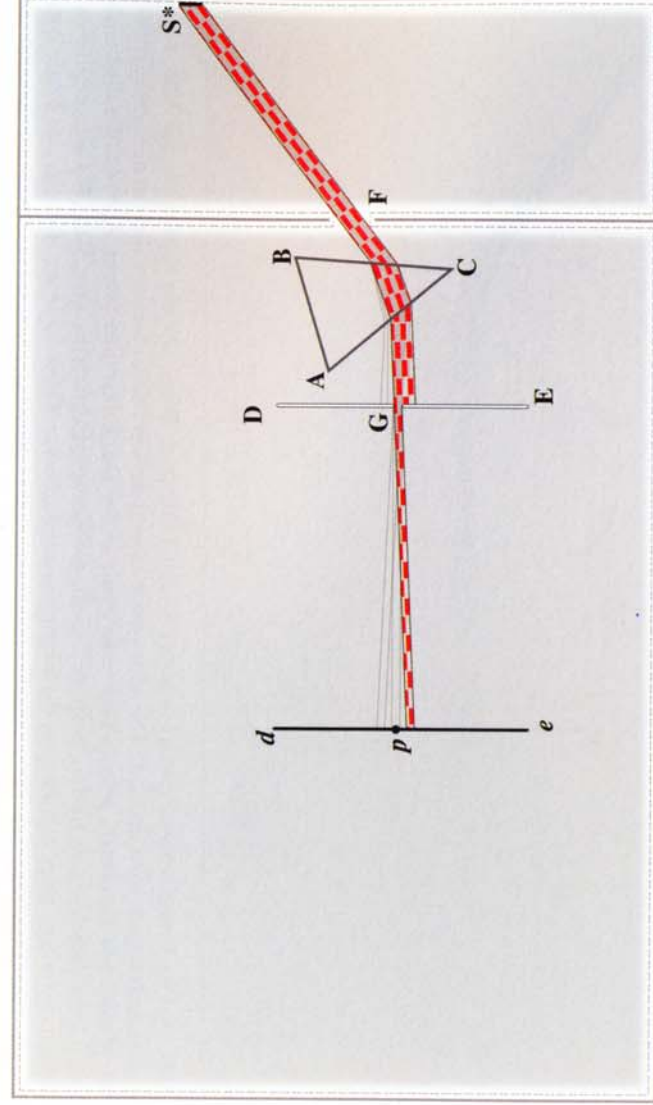


Abb. 13. Rotfreie Pfade in der Streulichtkammer. Der Weg rotfreier Pfade lässt sich nach denselben Regeln verfolgen wie (bei Abb. 11 und Abb. 12) für grün- und blaufreie Pfade erläutert. Ergebnis: Unterrepräsentation roten Lichts *unterhalb* von p.

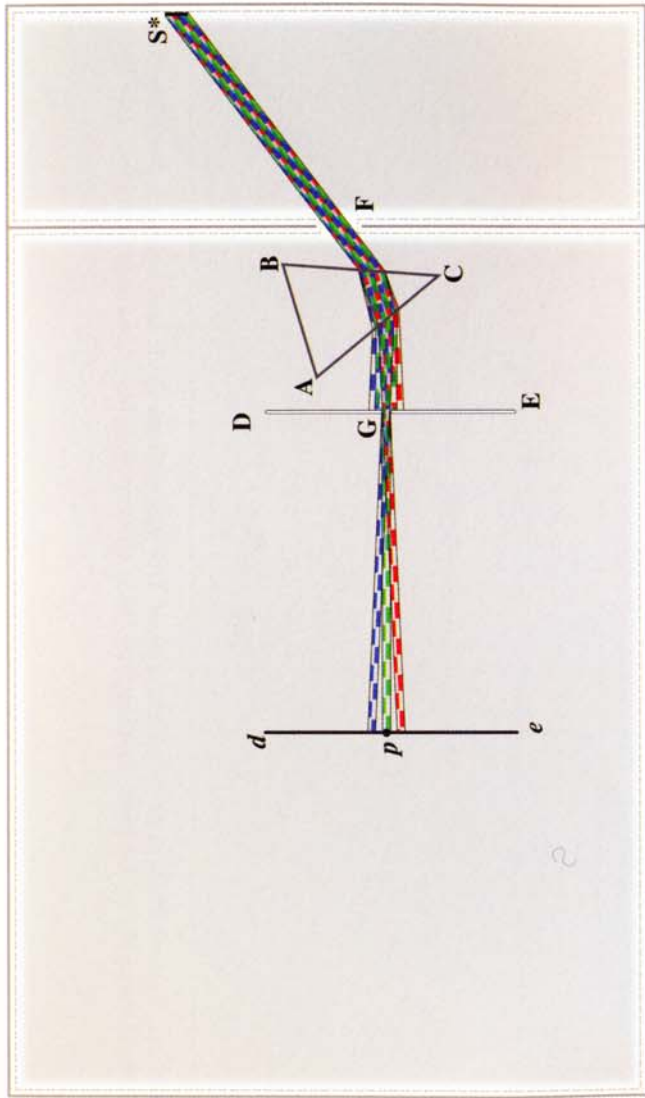


Abb. 14. Das Komplementärspektrum in der Streulichtkammer. Wenn wir die Ergebnisse aus Abb. 11, Abb. 12 und Abb. 13 übereinanderlegen, wird deutlich: Die blau-, grün- und roten Pfade entfalten sich (in der Streulichtkammer) nach demselben Muster wie die blauen, grünen und roten Pfade in der Dunkelkammer (vergl. Abb. 6). Wo die blaufreien Pfade oberhalb von p auf den Schirm de treffen, zeigt sich Gelb, die Komplementärfarbe von Blau. Wo die grünfreien Pfade bei p auf den Schirm de treffen, zeigt sich Purpur, die Komplementärfarbe von Grün. Und wo die rotfreien Pfade unterhalb von p auf den Schirm de treffen, zeigt sich Türkis, die Komplementärfarbe von Rot.

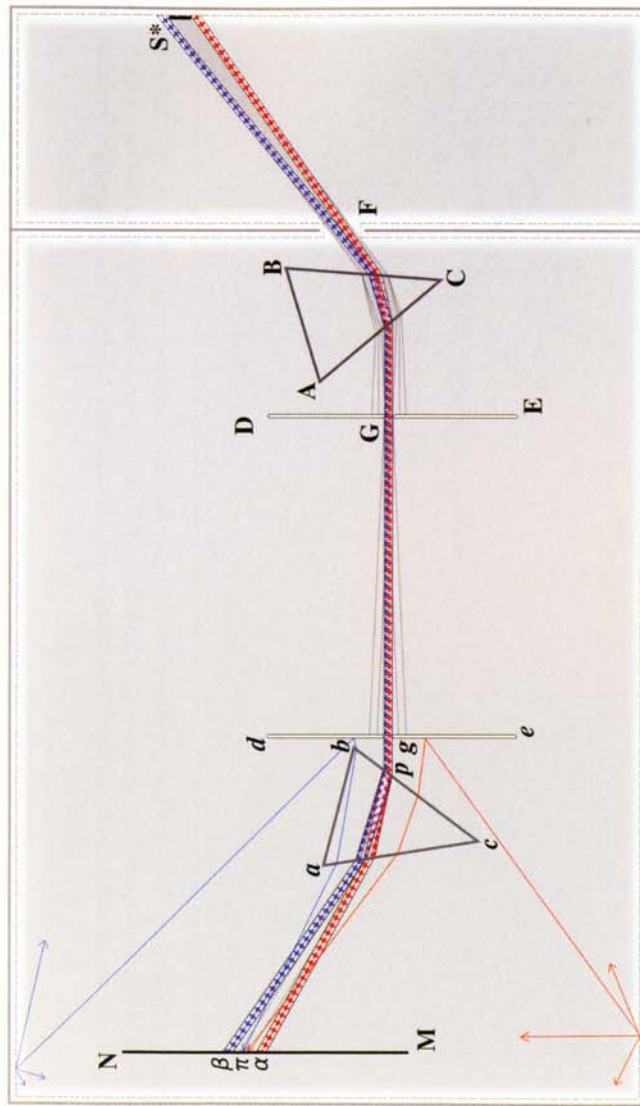


Abb. 15. Effekte des zweiten Prismas bei Umstülpung des *experimentum crucis* in der Streulichtkammer. Die grünfreien Pfade stehen sich durchs erste Loch g der Blende dge genauso hindurch wie durchs erste Loch G der Blende DGE (vergl. Erläuterungen bei Abb. 11). Hier haben wir zwei newtonische Lichtsorten eingezeichnet, die auf diesen grünfreien Pfaden durch die Streulichtkammer reisen, einerseits blaue, andererseits rote (jeweils angedeutet durch farbige Pluszeichen). Sie gelangen durchs Loch g hindurch und werden beim Weg durchs Prisma abc in verschiedene Richtungen abgelenkt. Wo sie hinter dem Prisma auseinanderdriften, reißt eine Lücke auf, in der es natürlich auch noch an grünem Licht (der erforderlichen Richtung) mangelt; das zeigt sich insbesondere bei  $\pi$ . – Da es in der Streulichtkammer nirgends an blauem oder rotem Licht mangelt, haben wir *pars pro toto* einige weitere blaue und rote Lichtstrahlenbündel eingezeichnet. Hätten wir alle blauen oder roten Lichtstrahlenbündel einzeichnen wollen, so hätten wir das Bild überbevölkern müssen. Wie man aber sehen kann, kommen sogar bei  $\pi$  blaue und rote Lichtstrahlenbündel an.

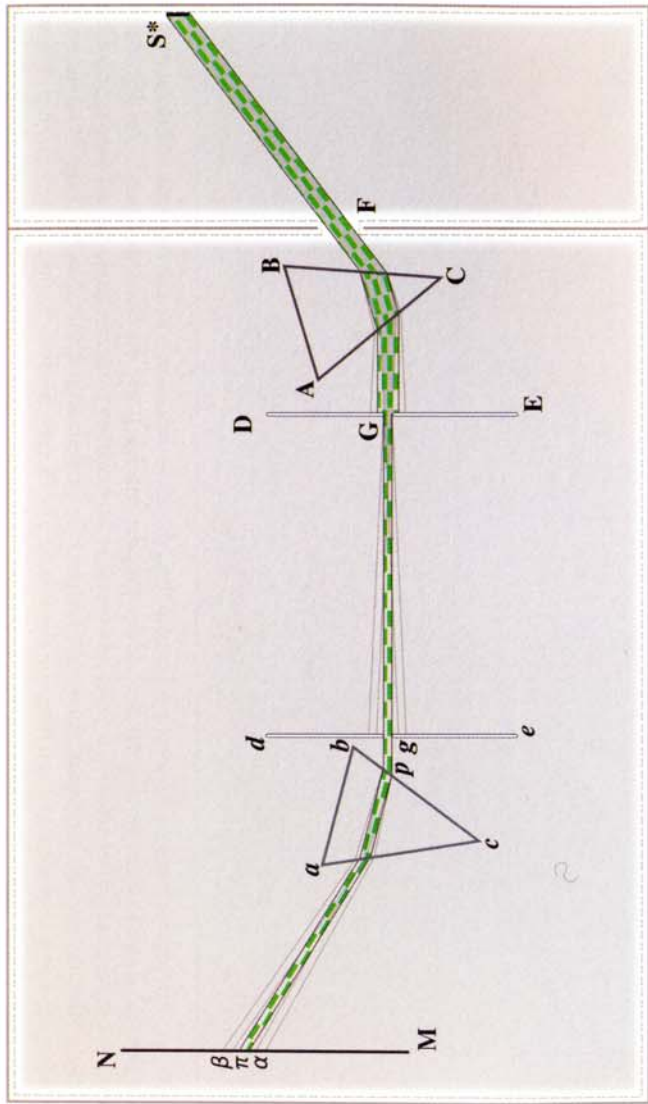


Abb. 16. Grünfreie Pfade bei vollständiger Umstülpung des *experimentum crucis* in der Streulichtkammer. Was wir in Abb. 15 mittels blauer und roter Lichtstrahlen gezeigt haben (d.h. in unserer reduzierten Sprechweise mittels aller Lichtstrahlen mit Ausnahme der grünen), zeichnen wir hier abermals ein, diesmal mithilfe des Konzepts grünfreier Pfade.

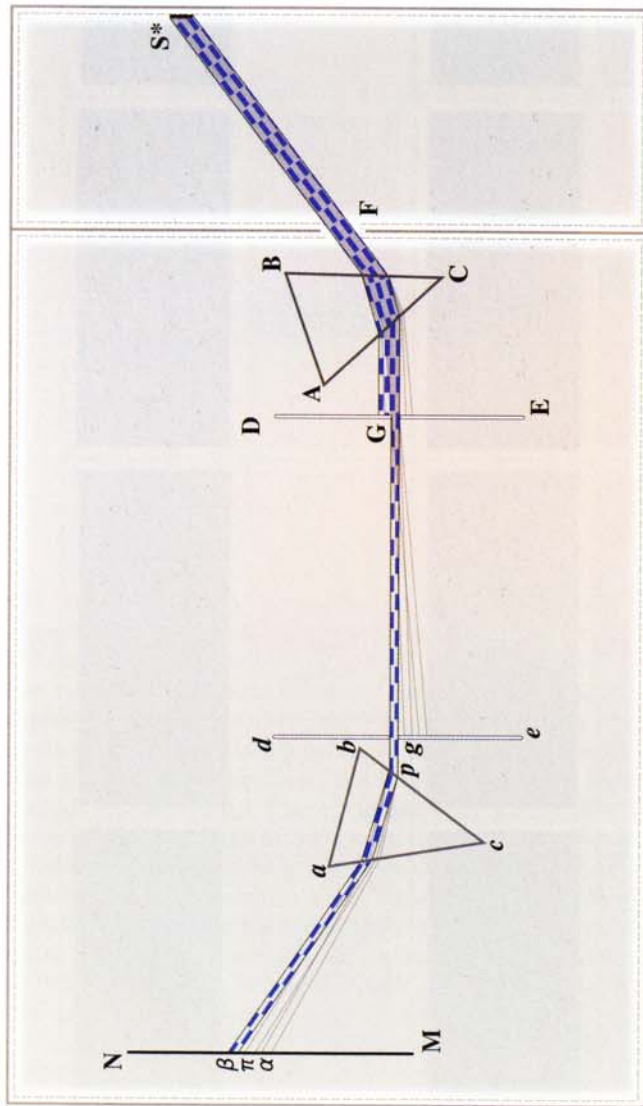


Abb. 17. Drehung des ersten Prismas bei Umstülpung des *experimentum crucis*. Sobald wir das erste Prisma  $ABC$  um seine Achse rotieren lassen, fällt ein anderer Teil des in Abb. 14 hergeleiteten Komplementärspektrums durchs Loch  $g$  der Blende  $d$ ge, z.B. der Bereich, der sich mithilfe blaufreier Pfade analysieren lässt (Abb. 12). Diese blaufreien Pfade treffen im selben Winkel und an derselben Stelle aufs Prisma  $abc$  wie vorher die grünfreien Pfade (Abb. 16). Sie verhalten sich nach denselben Spielregeln wie vorher die grünfreien Pfade, enden aber auf dem Schirm  $NM$  etwas oberhalb der Stelle  $\pi$ , an der die grünfreien Pfade endeten.



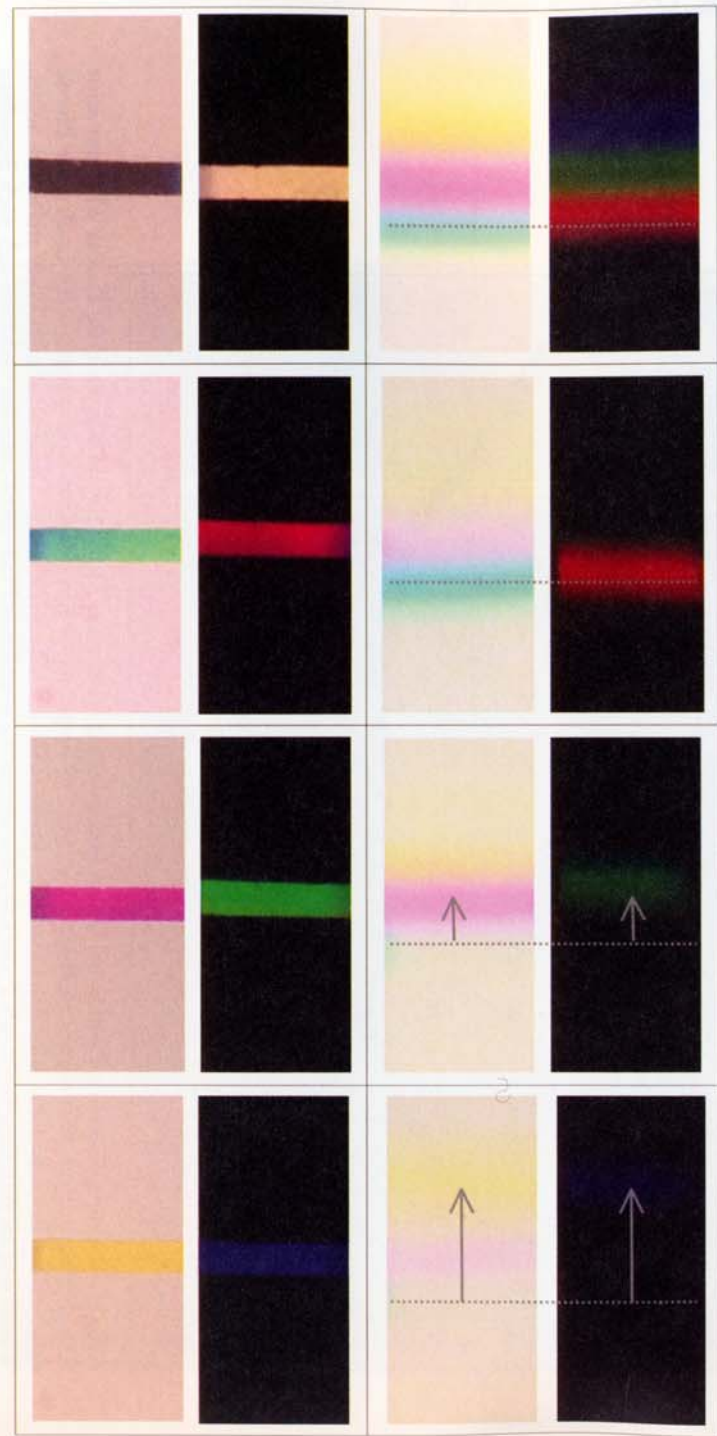


Abb. 18 (vorige Seite). Photographien des *experimentum crucis* und seines umgestülpten Gegenstücks in der Streulichtkammer. Kästchen mit dunkler Bildumgebung beziehen sich immer auf Newtons *experimentum crucis*, Kästchen mit heller Umgebung immer auf dessen Umstülpung. Linke Spalten: Hier ist photographiert, was die Kamera registriert, die vom Ort des Prismas abc durchs zweite Blendenloch g aufs erste Blendenloch G gerichtet ist (jeweils für beide Experimente nebeneinander). Das Prisma abc ist für diese Aufnahmen entfernt. Rechte Spalten: Photographien vom Schirm NM durch das Prisma abc auf die in der linken Spalte gezeigten Ansichten. Oberste Reihe: Anstelle der Sonne bzw. umgestülpten Sonne wurde eine ausgedehnte dunkle bzw. helle Fläche verwendet. Zweite bis vierte Reihe: Für das *experimentum crucis* in der Dunkelkammer wurde ein heller Spalt verwendet, für das umgestülpte Experiment ein gleich dimensionierter dunkler Steg. Innerhalb jeder Reihe bleibt die Prismenstellung ABC gleich. Doch von Reihe zu Reihe wird das Prisma ABC verdreht; dann wandert beim Blick durchs Prisma abc das farbige Bild auf und ab, wie durch die Pfeile angedeutet (rechte Spalte). Für beide Experimente ergeben sich gleiche geometrische Verhältnisse, und das bei komplementären Farb- und Helligkeitsverhältnissen.

Anhang 2: Tabelle für die Übersetzung der newtonischen Theorie in ihr Gegenstück

Begriffe aus der newtonischen Optik	Begriffe aus deren Umstülpung
<i>Phänomenologische Begriffe:</i>	<i>Phänomenologische Begriffe:</i>
Blau	Gelb
Grün	Purpur
Rot	Türkis
Weißes Licht	Schwarzer Schatten
(vor-) sortiertes Licht	(vor-) sortierter Schatten
Störendes Streulicht	Störender Streuschatten
<i>Theoretische Begriffe:</i>	<i>Theoretische Begriffe:</i>
Lichtstrahl	Schattenstrahl
Heterogenes Licht	Heterogene Finsternis
Homogenes Lichtbündel	Homogenes Schattenbündel
<i>Experimentelle Begriffe:</i>	<i>Experimentelle Begriffe:</i>
Kausal wirksamer optischer Faktor	Kausal wirksamer optischer Faktor
Prisma	Prisma
Spiegel	Spiegel
optische Begrenzung	optische Begrenzung
optisch (un-)durchlässige Struktur	optisch (un-)durchlässige Struktur
Lochblende	Lochblende
Blende mit schwarz erscheinenden Backen	Blende mit weiß erscheinenden Backen

Literatur

- Bergmann, Ludwig; Schaefer, Clemens, 2004 [O]: *Optik*, 10. Auflage. Berlin: de Gruyter. (= Niedrig, Heinz (Hrsg.): *Lehrbuch der Experimentalphysik*. Bd. 3).
- Bieri, Hanspeter; Zwahlen, Sara Margarita (Hrsg.), 2008 [TOAW]: „Trinkt, O Augen, was die Wimper hält...“. *Farbe und Farben in Wissenschaft und Kunst*. Bern: Haupt Verlag.
- Bjerke, André, 1961 [NBzG]: *Neue Beiträge zu Goethes Farbenlehre*. Stuttgart: Freies Geistesleben.
- Blüthgen, Joachim, 1980 [AK]: *Allgemeine Klimageographie*. Berlin/ New York: de Gruyter.
- Dunlop, Storm, 2005 [DoW]: *A dictionary of weather*. Oxford: Oxford University Press. (Erschien zuerst 2001).
- Glasauer, Stefan; Steinbrenner, Jakob (Hrsg.), 2007 [F]: *Farben*. Frankfurt/Main: Suhrkamp.
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1810 [EF]: *Entwurf einer Farbenlehre. Des ersten Bandes erster, didaktischer Teil*. In: Goethe [SzN] I.4, S. 11–266. (= LA I 4, S. 11–266).
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1810 [ETN]: *Enthüllung der Theorie Newtons. Des ersten Bandes zweiter, polemischer Teil*. In: Goethe [SzN] I.5. (= LA I 5).
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1810 [EzGF]: *Erklärung der zu Goethes Farbenlehre gehörigen Tafeln*. In: Goethe [SzN] I.7, S. 41–115.
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1955 [SzN] I.4: *Die Schriften zur Naturwissenschaft. Erste Abteilung, Band 4. Zur Farbenlehre: Widmung, Vorwort und didaktischer Teil*. Bearbeitet von Rupprecht Matthaei. Weimar: Hermann Böhlhaus Nachfolger. (= LA I 4).
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1958 [SzN] I.5: *Die Schriften zur Naturwissenschaft. Erste Abteilung, Band 5. Zur Farbenlehre: Polemischer Teil*. Bearbeitet von Rupprecht Matthaei. Weimar: Hermann Böhlhaus Nachfolger. (= LA I 5).
- Goethe, Johann Wolfgang von, 1957 [SzN] I.7: *Die Schriften zur Naturwissenschaft. Erste Abteilung, Band 7. Zur Farbenlehre: Anzeige und Übersicht, statt des supplementaren Teils und Erklärung der Tafeln*. Bearbeitet von Rupprecht Matthaei. Weimar: Hermann Böhlhaus Nachfolger. (= LA I 7).

- Grebe-Ellis, Johannes, in Vorbereitung [NECa]: Newtons experimentum crucis aus der Perspektive Goethes.
- Gruner, Sol M., 1973 [DFL]: Defending Father Lucas: A consideration of the Newton-Lucas dispute on the nature of the spectrum. In: *Centaurus* 17, S. 315–329.
- Holtmark, Torger, 1970 [NECR]: Newton's experimentum crucis reconsidered. In: *American Journal of Physics* 38, S. 1229–1235.
- Kirschmann, August, 1924 [USS]: Das umgekehrte Spektrum und die Spektralanalyse. In: *Zeitschrift für Instrumentenkunde* 44, S. 173–175.
- Kirschmann, August, 1926 [USsF]: Das umgekehrte Spektrum und seine Farben sowie seine Bedeutung für die optische Wissenschaft. In: Krüger (Hrsg.) [LF], S. 411–442.
- Kirschmann, August, 1917 [USsK]: Das umgekehrte Spektrum und seine Komplementärverhältnisse. In: *Physikalische Zeitschrift* 18, S. 195–205.
- Krüger, Felix (Hrsg.), 1926 [LF]: *Licht und Farbe*. Beck'sche Verlagsbuchhandlung: München. (= *Neue Psychologische Studien* Band 2. Drittes Heft).
- Lampert, Timm, 2008 [NvG]: Newton vs. Goethe: Farben aus Sicht der Wissenschaftstheorie und Wissenschaftsgeschichte. In: Bieri et al. (Hrsg.) [TOAW], S. 253–278.
- Lampert, Timm, 2000 [zWF]: *Zur Wissenschaftstheorie der Farbenlehre. Aufgaben, Texte, Lösungen*. Bern: Bern Studies for the History and Philosophy of Science, Libri Books on Demand.
- Lohne, Johannes A., 1965 [EC]: „Experimentum crucis“. *Notes and records of the Royal Society of London* 23, S. 169–199.
- Maier, Georg (Hrsg.), 2004 [BSS]: *Blicken, sehen, schauen: Beiträge zur Physik als Erscheinungswissenschaft*. In: Grebe-Ellis, Johannes (Hrsg.). Dürna: Verlag der Kooperative Dürna.
- Maier, Georg, 1996 [LiGv]: Das Licht im Gestrüpp von Missverständnissen. In: Maier [BSS], S. 324–338.
- Müller, Olaf L., 2010 [FK]: Farbspektrale Kontrapunkte: Fallstudie zur ästhetischen Urteilskraft in den experimentellen Wissenschaften. In: Nussbaumer [RE].
- Müller, Olaf L., 2007 [GPUb]: Goethes philosophisches Unbehagen beim Blick durchs Prisma. In: Glasauer et al. (Hrsg.) [F], S. 64–101.
- Müller, Olaf L., 2008 [IA]: Innen und Außen: Zwei Perspektiven auf analytische Sätze. In: *Philosophia naturalis* 45, S. 5–35.
- Müller, Olaf L., eingereichtes Manuskript [PE]: Prismatic equivalence:

- A new case of underdetermination? Goethe vs. Newton on the Prism Experiments.
- Newton, Isaac, 1960 [CoIN]/II: *The correspondence of Isaac Newton. Volume II. 1676–1687*. Turnbull, H. W. (Hrsg.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Newton, Isaac, 1958 [INPL]: *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy and related documents*. Cohen, Bernard (Hrsg.). Cambridge, Massachusetts: Harvard University Press.
- Newton, Isaac, 1984 [LOOL]: *Lectiones opticae – Optical lectures*. In: Newton [OPoI]/I, S. 46–279.
- Newton, Isaac, 1671 [NTaL]: A new theory about light and colors. *Philosophical Transactions* 80 (February 19, 1671/2), S. 3075–3087. (Abgedruckt in Cohen (Hrsg.) [INPL], S. 47–59). [Zitat nach der Originalpaginierung].
- Newton, Isaac, 1704 [O]: *Optics: or, A treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. In: Newton [OQEO]/IV, S. 1–264. [Erschien zuerst 1704; lateinisch 1706; überarbeitete englische Ausgabe 1717/8; die vierte englische Auflage, in der noch Newtons handschriftliche Änderungen der dritten Auflage berücksichtigt sind erschien 1730].
- Newton, Isaac, 1984 [OPoI]/I: *The optical papers of Isaac Newton*. Volume I. In: Shapiro, Alan E. (Hrsg.). Cambridge: Cambridge University Press.
- Newton, Isaac, 1964 [OQEO]: *Opera quae extant omnia*. Stuttgart: Friedrich Frommann Verlag. [Faksimile-Neudruck der Ausgabe von Samuel Horsley, London, 1779–1785, in fünf Bänden].
- Nordmeier, Volkhard; Grötzebauch, Helmuth (Hrsg.), 2010 [TFDP]: *Tagungsband der Frühjahrstagung 2009 der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*. Berlin: Lehmanns Media.
- Nussbaumer, Ingo, 2010 [RE]: *Rücknahme und Eingriff: Malerei der Anordnungen*. Nürnberg: Verlag für moderne Kunst.
- Nussbaumer, Ingo, 2008 [zF]: *Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren*. Wien: Edition Splitter.
- Orvig, S. (Hrsg.), 1970 [CoPR]: *The climate of the polar regions*. Amsterdam/London/New York. (= World Survey of Climatology Volume 14).
- Putnins, P., 1970 [CoG]: The climate of Greenland. In: Orvig (Hrsg.) [CoPR], S. 3–128.
- Rang, Matthias; Grebe-Ellis, Johannes, 2009 [KS]: Komplementäre Spek-

- tren. Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende. In: *Mathematisch-naturwissenschaftlicher Unterricht* 62 Heft 4, S. 227–230.
- Rang, Matthias, 2009 [HaBz]: Der Hellraum als Bedingung zur Invertierung spektraler Phänomene. In: *Elemente der Naturwissenschaft* 90 (2009), S. 46–79.
- Rang, Matthias, erscheint im Frühjahr 2010 [MS]: Mehrfachanwendung von Spiegelspaltblenden und Prismen – eine moderne Form von Newtons *experimentum crucis*. In: Nordmeier et al. (Hrsg.) [TFDP].
- Sabra, Abdelhamid I., 1981 [ToLf]: *Theories of light from Descartes to Newton*. Cambridge: Cambridge University Press. [Erschien zuerst 1967].
- Sällström, Pehr, 2010 [MS]: *Monochromatische Schattenstrahlen. Ein Experimentalfilm*. Dreisprachige DVD; Englisch, Deutsch, Schwedisch. Kassel. (In Produktion).
- Schöne, Albrecht, 1987 [GF]: *Goethes Farbentheologie*. München: Beck.
- Shapiro, Alan E., 1980 [ESoN]: The evolving structure of Newton's theory of white light and color. In: *Isis* 71, No. 2, S. 211–235.
- Shapiro, Alan E., 1996 [GAoN]: The gradual acceptance of Newton's theory of light and color, 1672–1727. In: *Perspectives on Science* 4, No. 1, S. 59–140.
- Westfall, Richard S., 1966 [NDHF]: Newton defends his first publication: The Newton-Lucas correspondence. In: *Isis* 57, S. 299–314.
- Westfall, Richard S., 1962 [NHCo]: Newton and his critics on the nature of colors. *Archives internationales d'histoire des sciences* 15, S. 47–58.
- Westfall, Richard S., 1963 [NRtH]: Newton's reply to Hooke and the theory of colors. In: *Isis* 54, S. 82–96.