

3D- Phänomene durch binokulare Betrachtung von Lichtbahnen

Schlichting, H. Joachim

Westfälische- Wilhelms- Universität Münster (schlichting@uni-muenster.de)

Kurzfassung

Lichtbahnen treten nicht nur auf welligem Wasser, sondern auch auf beliebigen Oberflächen auf, die regelmäßige oder unregelmäßige Riefen oder Kratzspuren aufweisen. Diese Lichtbahnen können bei binokularer Betrachtung zu 3D-Phänomenen führen. Die Beobachtung wird dazu ausgenutzt, konkrete 2D-Strukturen z.B. ein Quadrat so mit ringförmigen Ringsystemen zu umgeben, dass bei geeigneter Beleuchtung ein Würfel entsteht, der wie ein reales Objekt aus verschiedenen Winkeln betrachtet werden kann.

*Doch sich täuschen zu lassen,
gilt nach landläufiger Auffassung als elend.
Ich behaupte dagegen,
daß es das größte Unglück ist,
über alle Täuschungen erhaben zu sein.
Der Geist des Menschen ist nun einmal so angelegt,
daß der Schein ihn mehr fesselt als die Wahrheit.*

Erasmus von Rotterdam

Bei der zweidimensionalen Darstellung dreidimensionaler Objekte in Malerei und Fotografie spielt u.a. die perspektivische Darstellung eine wesentliche Rolle. Typisch für die dimensionale Reduktion ist die weitgehende Unabhängigkeit der Ansicht vom Standpunkt des Betrachters. Der Blick der Mona Lisa bleibt auch dann auf den Betrachter gerichtet, wenn er das Bild schräg von der Seite anschaut. Der Realität kommt man noch näher, wenn den Augen zwei auf den Augenabstand bezogene unterschiedliche Ansichten eines Gegenstandes dargeboten werden. Das menschliche Wahrnehmungssystem verschmilzt die beiden Ansichten zu einem täuschend echt wirkenden dreidimensionalen Gebilde.

1. Lichtbalken auf der CD

Aber es gibt noch eine surreale Steigerung, bei der etwas an sich Zweidimensionales dreidimensional in Erscheinung tritt. Betrachtet man eine CD im Lichte einer Punktlichtquelle, so scheint bei beidäugigem Sehen ein Lichtbalken aus der Fläche der konzentrischen Kreise wie zum Greifen herauszutreten. Schließt man ein Auge, dann fällt der Balken augenblicklich auf die spiegelnde Ebene zurück (Abb. 1). Nicht nur eine CD, auch eine Schallplatte und andere mit konzentrischen Ringen versehene Objekte wie der Plastikdeckel eines Honigglases, der Boden eines Edelstahltopfes oder ein Edelstahltablett (Abb. 2) zeigen bei geeigneter Beleuchtung einen 3D-Lichtbalken. Wie kommt es zu diesem Phänomen?

2. Schwert der Sonne im Kleinen

In der Lichtbahn erkennt man eine Art "Schwert der Sonne" im Kleinen (vgl. [1] und [2]). Wenn das Licht der Sonne auf die gewellte Oberfläche des

Wassers fällt, wird es auf vielfältige Weise ins Auge des Betrachters reflektiert (Abb. 3). Denn die zahlreichen Wellenflanken wirken wie geneigte Spiegel, die je nach Wellengang auch mehr oder weniger weit vom „Spiegelpunkt“ (Punkt P in Abb. 4; hier wäre bei glatter Wasseroberfläche das Spiegelbild der Sonne zu sehen.) entfernt dem Sonnenlicht passende Neigungen darbieten, so dass auch von dort Sonnenlicht gesehen werden kann. Die Gesamtheit



Abb. 1: Lichtbalken auf einer CD. Was in der Abbildung nicht zu sehen ist: Bei zweiäugiger Betrachtung scheint er schräg aus der Fläche der CD in Raum herauszutreten.



Abb. 2: Lichtbalken auf einem Edelstahltablett. Bei beidäugiger Betrachtung scheint der Lichtbalken aus dem Tablett herauszuragen.

der Lichtreflexe bildet ein flimmerndes quasikontinuierliches Lichtgebiet auf dem Wasser aus, das bei tief stehender Sonne die Form einer schmalen Lichtbahn annimmt.



Abb. 3: Schwert der Sonne, wie man es auf dem welligen Wasser beobachten kann.

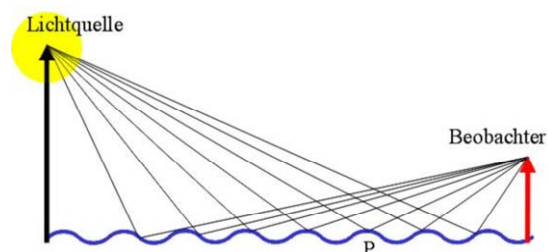


Abb. 4: Die Neigungen der Wellen ermöglichen vielfältige Reflexionen des Sonnenlichtes ins Auge des Beobachters.

Solche Lichtbahnen kann man aber auch auf völlig unbewegten festen Oberflächen beobachten, wenn sie Kratzer oder Riefen aufweisen. Je nachdem, wie die Riefen relativ zur Lichtquelle und zum Beobachter orientiert sind, rufen sie charakteristische Lichtbahnen hervor.

Oft kann man die Riefen mit unbewaffnetem Auge gar nicht sehen und nur aus dem Vorhandensein

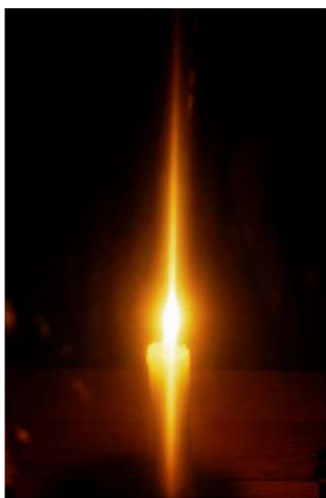


Abb. 5: Lichtschweif einer in einem Edelstahlspiegel reflektierten Kerze, die von den herstellungsbedingten Riefen im Spiegel herrühren.

charakteristischer Lichtbahnen erschließen. Beispielsweise kann man aus den Lichtschweiften oberhalb und unterhalb des Reflexes einer Lichtquelle in einem Edelstahlspiegel folgern, dass winzige parallele Riefen vorhanden sein müssen, die aufgrund der Herstellung des Spiegels der Oberfläche eingepägt wurden (Abb. 5).

Damit das an einem breiten Band von Riefen reflektierte Licht das Auge des Betrachters erreicht, müssen diese so profiliert sein, dass das von der Lichtquelle kommende Licht in einen entsprechend breiten Winkelbereich gestreut wird. Das Riefenprofil muss daher von der Art sein, wie es in Abb. 6 schematisch dargestellt ist.

Solche Lichtbahnen bekommt man im Alltag häufig zu Gesicht. In Abb. 7 sieht man zahlreiche Lichtbänder in einem Fahrstuhl, die von Halogenleuchten an der Decke herrühren. Der schräge Anschnitt der

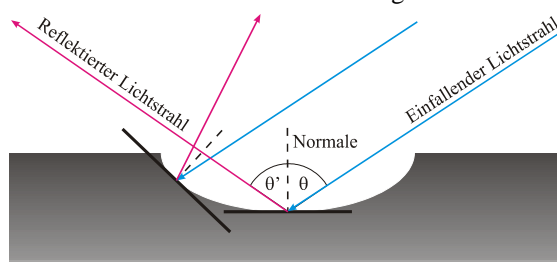


Abb. 6: Querschnitt durch ein Rillenprofil.

Lichtkegel durch die Wände führt für das Licht der unmittelbar benachbarten Leuchten zu kegelschnittartig gekrümmten Formen (siehe auch [3]). Die weitgehend geraden aber lichtschwächeren Bänder sind auf die entfernteren gegenüberliegenden Leuchten zurückzuführen.

Im Falle von zylindrischen Gefäßen (Abb. 8) kommt es sowohl auf der konkaven als auch auf der konvexen Seite selbst bei ausgedehnten Lichtquellen zu einer schmalen Lichtbahn.

Bisher haben wir nur geordnete (konzentrische und parallele) Riefensysteme betrachtet. Auch völlig ungeordnete Riefen bzw. Kratzer, die als meist unsichtbare Gebrauchsspuren auf glatten Oberflächen entstanden sind, kristallisieren sich unter geeigneter



Abb. 7: Die Edelstahlverkleidung dieses Fahrstuhls zeigt ein ganzes Netzwerk von Lichtbändern, die durch die an der Decke angebrachten Halogenleuchten hervorgerufen werden.

Beleuchtung zu interessanten Lichtbahnen. Bei streifendem Lichteinfall ergibt sich analog zum Sonnenuntergang am Meer eine linear erscheinende Lichtbahn. Bei senkrechtem Einfall des Lichts sieht es so aus, als ob der Reflex der Lichtquelle von einem System konzentrischer Ringe umgeben ist (Abb. 9).



Abb. 8: Ein Gefäß aus glänzendem Metall mit zwei ausgeprägten Lichtbahnen.

Die Ursache für diese auf den ersten Blick merkwürdige Anordnung der Reflexionen an den Gebrauchsspuren besteht darin, dass die statistisch verteilten Riefen nur in den Abschnitten Licht ins Auge des Beobachters reflektieren und damit an diesen Stellen sichtbar werden, die dem Reflexionsgesetz entsprechend „günstig“ gelegen sind (ausführlichere Darstellung siehe [2]).

Solche Gebrauchsspuren treten auch auf transparenten Flächen, z.B. Fensterscheiben auf, durch die man auf eine Lichtquelle blickt (Abb. 10). Während beim Blick zur Sonne die Reflexe eindeutig mit der

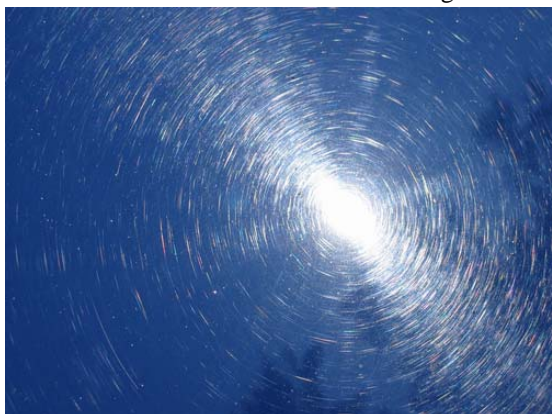


Abb. 9: Lichtbahnen an Gebrauchsspuren auf einer Autokarosserie.

Scheibe in Verbindung gebracht werden, hat man bei weniger intensiven Lichtquellen etwa einer Straßenbeleuchtung eher den Eindruck, die Lichtreflexe seien Bestandteil der Leuchte (Abb. 11). Offenbar verhindert die starke Blendung durch die Sonne,

dass diese als Lichtquelle überhaupt in den Anblick mit einbezogen wird.

Indem die Leuchte in das Bild integriert wird, werden nur noch die in Abb. 10 erkennbaren Lichtbahnen, die das konzentrische Ringsystem überlagern,

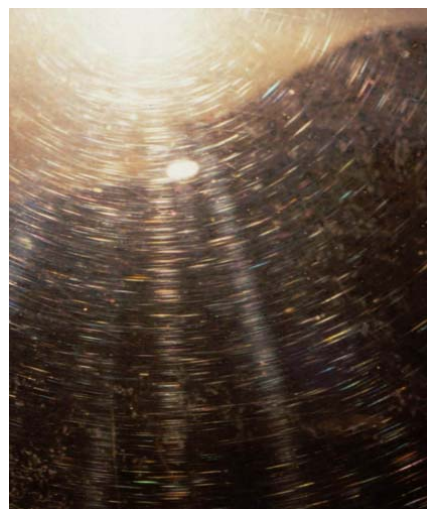


Abb. 10: Beim Blick auf die Sonne durch ein Flugzeugfenster abschnittsweise aufleuchtende Kratzspuren, die konzentrisch um die Lichtquelle orientiert zu sein scheinen.

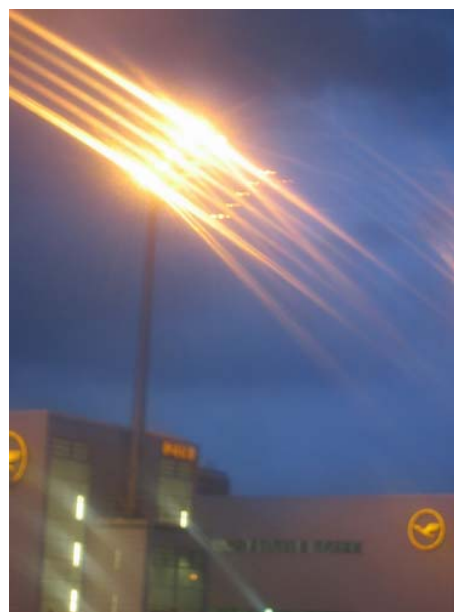


Abb. 11: Blick durch ein Flugzeugfenster auf eine Flughafenleuchte, die mit Lichtschweifern versehen zu sein scheint.

wahrgenommen, weil die feineren Reflexe überstrahlt werden.

Diese Lichtschweife scheinen bei günstiger Perspektive von der Lichtquelle ins Auge des Betrachters zu laufen und damit räumlich zu werden (siehe unten). Stark räumlich geprägt sind auch die Lichtschweife, mit denen die Scheinwerfer des entgegenkommenden Verkehrs versehen erscheinen, wenn man beim Autofahren durch die Windschutzscheibe eines nicht zu neuen Kraftfahrzeugs blickt. Die Windschutz-

scheibe enthält nämlich natürlicherweise konzentrisch gekrümmte Gebrauchspuren infolge der Tätigkeit der Scheibenwischer. Diese Riefen werden beim Blick auf die Lampen anderer Fahrzeuge abschnittsweise zum Leuchten gebracht und wachsen wie ein Lichtbalken von den Lampen zum Auge aus der Fläche heraus.

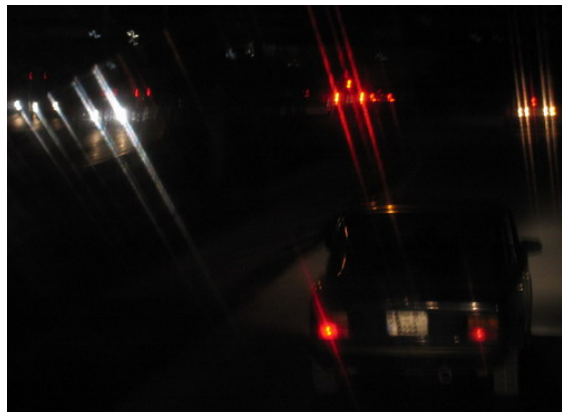


Abb. 12: Blickt man durch die Windschutzscheibe auf die Leuchten anderer Kraftfahrzeuge, so erscheinen senkrecht zu den Riefen in der Frontscheibe orientierte Lichtschweife, die zuweilen wie Lichtbalken von der Lichtquelle zum Auge im Raume zu schweben scheinen.

3. Räumlicher Eindruck der Lichtbahnen

Um den räumlichen Gesichtseindruck der Lichtbahnen zu erklären, vergegenwärtigen wir uns zunächst, wie es zum beidäugigen räumlichen Sehen kommt: Beim Blick auf ein räumliches Objekt nimmt jedes Auge dem Augenabstand entsprechend eine geringfügig verschobene Teilansicht wahr, die man sich jeweils als Projektion des Objekts auf eine Fläche senkrecht zur Sehrichtung vorstellen kann, über deren Entfernung keine direkten Informationen zur Verfügung stehen¹.

Um beide Netzhautindrücke zu einem Bild zu vereinigen, werden anschaulich gesprochen, die Projektionen jeweils so weit in Blickrichtung verschoben, bis die Einheitlichkeit des Bildes gegeben ist. Damit ist aber das Objekt im Raum fixiert und wird räumlich gesehen.

Lichtbahnen sind an sich keine räumlichen Gegenstände mit unterschiedlichen Ansichten. Jedes Auge sieht aber seiner eigenen Blickrichtung entsprechend andere Stellen an Rillen und Riefen der jeweiligen Oberfläche aufblitzen und nimmt somit die Lichtbahn mit jedem Auge an einer geringfügig verschiedenen Stelle wahr. Für das visuelle System stellt sich jedoch die Situation genauso dar, als würde ein und dasselbe Objekt aus unterschiedlichen Winkeln gesehen. Daraus ergibt sich nach derselben Argumentation wie bei der Wahrnehmung räumlicher

Objekte die Räumlichkeit der Lichtbahnen. Es handelt sich also um eine optische Täuschung.

4. Zur Herstellung virtueller räumlicher Gebilde

Das Phänomen eines räumlichen Lichtbalkens legt den Gedanken nahe, gezielt virtuelle räumliche Gegenstände herzustellen. Entscheidend ist dabei, dass es gelingt, von einer Figur, die man räumlich darstellen möchte, ein geeignetes System von reflektierenden Flächenelementen zu schaffen. Ein solches Reflektorsystem muss so beschaffen sein, dass es in Abhängigkeit von der Blickrichtung stets eine passende Neigung aufweist, an der das Licht einer Lichtquelle reflektiert werden kann. Die konzentrischen Rillen einer CD oder eines Edeltalstopfes können dabei als Vorbild dienen.

Umgibt man einen Punkt mit einer kreisförmigen Riefe und betrachtet beidäugig den Reflex einer Punktlichtquelle an der entsprechenden Flanke der Riefe, so scheint er im Raume zu schweben. Denn auch in diesem Fall sieht jedes Auge einen anderen Reflex und beide Reflexe werden zu einem räumli-



Abb. 13: In eine Plexiglasplatte ist (unten) das Wort „PHYSIK“ gepunktet dargestellt. Um jeden Punkt als Zentrum wurde ein Kreis geritzt, von dem bei Beleuchtung mit einer Punktlichtquelle die Teile aufleuchten, die das an den Flanken des Ritzes reflektierte Licht ins Auge senden. Da jedes Auge ein geringfügig verschobenes Reflexionsmuster wahrnimmt, scheint das Wort im Raume zu schweben und sich die Lage mit dem Blickwinkel zu verändern.

chen Bild zusammengesetzt. Voraussetzung ist natürlich, dass das Profil der Ritzung nicht exakt V-förmig, sondern eher gerundet ist, damit in einem größeren Winkelbereich „passende“ Neigungen für die Reflexion vorgefunden werden (vgl. Abb. 6). Dies scheint aber stets gegeben zu sein, wie die 3D-Phänomene zufällig entstandener Gebrauchspuren zeigen.

Ritzt man anschließend einen weiteren Kreis mit demselben Radius um einen Nachbarpunkt, so sieht man zwei benachbarte Reflexe im Raume schweben. Geritzte Kreise um weitere Punkte entlang einer Linie führen zu einer räumlichen Linie aus entsprechenden Reflexen, die aufgrund des konstanten Abstandes zu den Ausgangspunkten streng mit diesen korreliert sind. Ein System geritzter Kreise, das auf dieselbe Weise ein aus gepunkteten Buchstaben bestehendes Wort umgibt, lässt dieses Wort auf geradezu geheimnisvoll anmutende Weise im Raume über der geritzten Fläche erscheinen. In Abb. 13 wird das (in der Fotografie leider nur als flächenhaf-

¹ Bei einem bekannten Objekt wird die Entfernung allein aus der Kenntnis der Größe des Originals und der Größe des Netzhautbildes ermittelt.

te Projektion zu erkennende) Ergebnis am Beispiel des in eine Plexiglasscheibe gepunkteten Wortes „PHYSIK“ dargestellt. Durch Beleuchtung mit einer Punktlichtquelle erscheint das Wort über der Scheibe zu schweben. Die Lage des schwebenden Wortes verschiebt sich je nach dem Blickwinkel, weil sich die Reflexe auf den Riefen entsprechend verschieben.

Besonders eindrucksvolle räumliche Muster ergeben sich, wenn man die Punkte einer flächenhaft dargestellten dreidimensionalen Figur mit Ritzkreisen

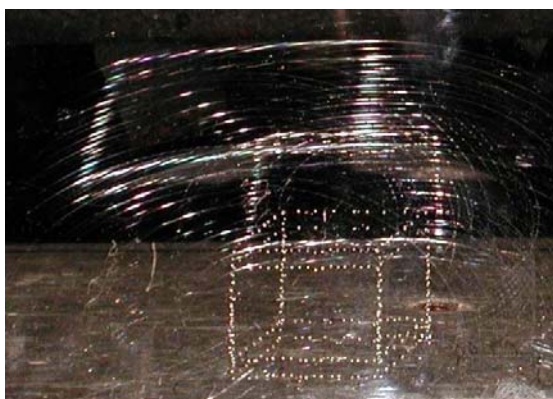


Abb. 14: Ein gepunkteter zweidimensionaler Würfel erscheint aus den Ritzkreisen um die Punkte räumlich hervorzugehen und je nach Blickrichtung an unterschiedlichen Stellen und mit entsprechender perspektivischer Verzerrung im Raum zu schweben. (Die doppelten Punktlinien beruhen auf einer Reflexion an der unteren Fläche der Plexiglasplatte) (aus [4]).

umgibt. In Abb. 14 sind zwei verschiedene Ansichten eines Reflexwürfels dargestellt, die sich ergeben, wenn man verschiedene Standpunkte einnimmt. Man kann noch einen Schritt weiter gehen und die von der CD und anderen konzentrischen Ringsystemen bekannte Tatsache ausnutzen, dass Linien auch durch ein konzentrisches System von Ringen hervorgerufen werden können. Auf diese Weise kann ein räumlicher Würfel auch durch eine Kombination von Kreisen mit festem Radius entlang der Linien eines Quadrats und einem konzentrischen Kreissystem um die Eckpunkte dieses Quadrats erzeugt wer-

den. Die geritzte, diffus beleuchtete Vorlage ist in Abb. 15 dargestellt. Im Lichte einer Punktlichtquelle ergibt sich daraus ein „räumlicher“ Würfel, wie er in Abb. 16 dargestellt ist.

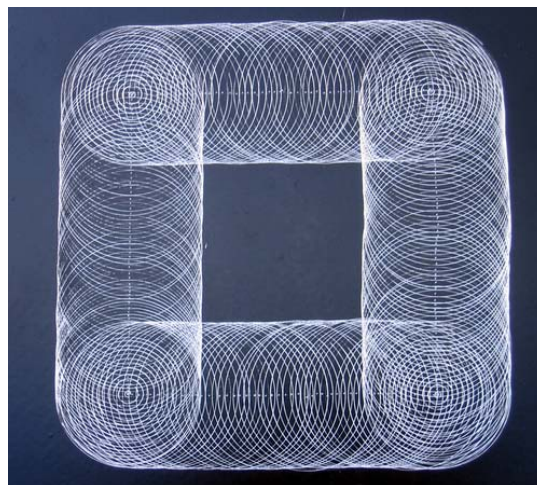


Abb. 15: Mit dieser Ringstruktur lässt sich aus einer quadratischen Vorlage ein räumlich erscheinender Würfel aus Reflexen erzeugen (Abb. 16) (aus [5]).

In allen Fällen ist deutlich zu erkennen, dass nicht nur ein Punkt auf der geritzten Riefe die Reflexionsbedingung erfüllt, sondern ein mehr oder weniger kurzer Kreisabschnitt. Das ist einerseits auf die Abweichung der Lichtquelle von der Punktförmigkeit andererseits aber auch auf gewisse Toleranzen des Profils der Ringe zurückzuführen, die das Licht stets innerhalb eines gewissen Winkelbereiches reflektieren.

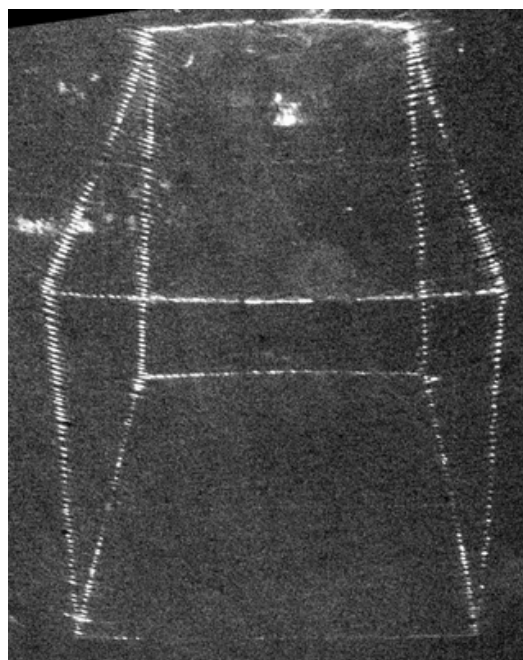


Abb. 16: Im Lichte einer Punktlichtquelle entwirft die Vorlage aus Abb. 15 würfelförmiges räumliches System reflektierender Ringabschnitte.

5. Physik und Kunst

Die Möglichkeit, durch Lichtreflexe an geeignet geritzten Oberflächen virtuelle räumliche Gebilde herzustellen, ist bereits lange vor der optischen Holografie gewissermaßen als mechanische Holografie im künstlerischen Bereich ausgewertet worden.



Abb. 17: Der Stahlstich „World Brain“ von Gabriel Liebermann entfaltet seine räumliche Struktur natürlich nur bei geeigneter Beleuchtung.

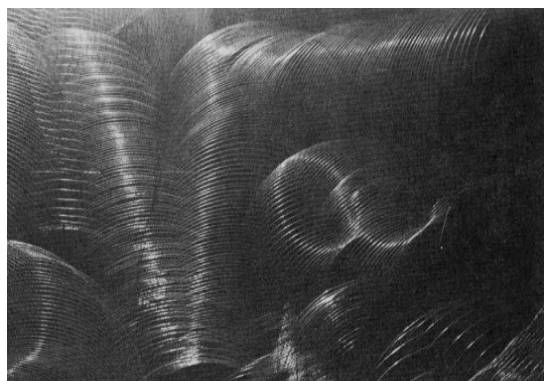


Abb. 18: Der Ausschnitt aus Abb. 17 lässt die reflektierenden Abschnitte der geritzten Linien deutlich erkennen.

Der wohl erste aber in Vergessenheit geratene Künstler, der sich mit dieser Technik virtueller räumlicher Bilder befasste, war Hans Weil (1902 - 1998), der diesen Effekt an geritztem Glas sowie an geschliffenem oder gedrehtem Metall beobachtete und künstlerisch nutzte. Er ließ sich seine Methode, gezielt dreidimensionale Bilder herzustellen, 1934 patentieren².

Später wurde die Methode von einem anderen Künstler, Gabriel Liebermann wiederentdeckt und sein Kunstwerk „World Brain“ (Abb. 17 und Abb. 18) als mechanisch holografisches Kunstwerk gefeiert.

² “directive reflections by grooving a metal surface or transparent sheet of glass ... [make it] possible to produce stereoscopic images which have a three-dimensional effect without any need for the observer to be equipped with special glass or the like“ [7].

Interessant ist, dass es zunächst Künstler waren, die diese Methode der Herstellung räumlicher Objekte entdeckten, beschrieben und nutzten.

Die physikalische Aufklärung des Phänomens erfolgte erst viel später (vgl. dazu den Beitrag [6] in diesem Band).

Der künstlerische Aspekt stellt auch im Rahmen der Schulphysik eine Möglichkeit dar, das künstlerische bzw. gestalterische Tun von Schülerinnen und Schülern mit dem physikalischen Hintergrund zu verbinden. Auf diese Weise kann das eigene Tun, der Herstellung von eindrucksvollen 3D- Gebilden zu einer Beschäftigung mit optischen Phänomenen führen und damit auch als Motivation für den Physikunterricht angesehen werden. Da die Herstellung der Ritzbilder im Prinzip einfach und kostengünstig ist, besteht die Möglichkeit, dass die Schülerinnen und Schüler sich auch außerhalb des Physikunterrichts mit der Herstellung der Bilder befassen.

6. Zur Herstellung von Ritzbildern

Die Ritzbilder lassen sich auf einfache Weise mit einem Zirkel herstellen, wenn man den üblichen Schreibstift durch eine Metallspitze ersetzt. Das herzustellende Objekt, z.B. ein Würfel wird gepunktet auf die Platte eingezeichnet oder bei transparenten Platten darunter gelegt. Anschließend zieht man mit einem festen der Größe des herzustellenden Objekts angemessenen Radius Ritzkreise um jeden Punkt. Auf diese Weise entsteht das Objekt noch einmal aus Linien aus Kreisen.

Als reflektierende Platten eignen sich u.a. Metallplatten (Edelstahl, Aluminium), Glas-, Plexiglasscheiben. Aber auch mit Overhead- und anderen transparenten Folien haben wir gute Erfolge erzielt. Bei den Plexiglasscheiben und Folien ist darauf zu achten, dass die Ritzung nicht zu tief gerät, so dass ein Materialsplan abgehoben wird. Dann sind die Flanken der Ritzung zu rau, und es kommt zu keiner spiegelnden, sondern nur zu einer diffusen Reflexion in alle Richtungen. Das erkennt man leicht daran, dass die Ritzungen weiß und nicht – wie es sein soll – transparent erscheinen. Vielmehr sollte die Folie mit dem Reizstift nur mehr oder weniger stark „eingedrückt“ werden. Mit einem nicht zu spitzen Zirkel oder dadurch, dass man die Zirkelspitze schräge über die Unterlage zieht, dürfte dies jedoch keine Schwierigkeit bereiten.

7. Schlussbemerkungen

Ausgehend von der Beobachtung, dass eine CD und Flächen mit ähnlich strukturierter Oberfläche Lichtbahnen aufweisen, die bei binokularer Betrachtung aus der Ebene herauszuragen und damit räumlich zu werden scheinen, sind wir zunächst dem Phänomen der Lichtbahnen in der Natur und im Alltag der wissenschaftlich- technischen Welt nachgegangen. Wir haben die gemeinsame Ursache dieser Phänomene qualitativ physikalisch beschrieben und gezeigt, dass sowohl regulär strukturierte wie durch

Abnutzung zufällig mit Kratzern versehene Oberflächen solche Lichtbahnen hervorbringen.

Wenn die Oberfläche, durch die die Lichtbahnen hervorgerufen werden, sich in der Nähe des Betrachters befinden, können ähnliche 3D- Phänomene auftreten, wie bei den mit konzentrischen Ringen versehenen Objekten. Typische Beispiele sind Windschutzscheiben im Gegenlicht von Scheinwerfern anderer Kraftfahrzeuge.

Vor diesem Hintergrund wurde schließlich die bewusste Herstellung von Ringsystemen beschrieben, mit denen sich im Lichte einer Punktlichtquelle dreidimensionale Reflexfiguren herstellen lassen.

Für eine quantitative Beschreibung dieser „Ritz-Phänomene“ oder mechanisch hergestellten Hologramme wird auf eine weitere Arbeit in diesem Tagungsband verwiesen [6]. Dort findet man auch weitere Literaturhinweise.

Literatur

[1] H. Joachim Schlichting: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. I. Lichtbahnen auf dem Wasser. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 51/7 (1998), S. 387- 397.

[2] H. Joachim Schlichting: Das Schwert der Sonne- Alltägliche Reflexionen im Lichte eines einfachen optischen Phänomens. II. Lichtbahnen in alltäglichen Situationen. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 52/6 (1999), S. 330- 336.

[3] H. Joachim Schlichting: Lichtkegel und Schattenhyperbeln. Ein optisches Alltagsphänomen aus physikalischer Sicht. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht 56/6 (2003) S. 348-350.

[4] Tapken, Anke: Räumliches Sehen zwischen Physik und Physiologie. Ein Thema für einen kontextorientierten Physikunterricht. Münster 2002.

[5] Renius, Malte: Physikalische Untersuchungen von mechanisch hergestellten Hologrammen mit schulischen Mitteln. Münster 2005.

[6] Renius, Malte: Wie entsteht der 3D-Effekt bei Lichtreflexen auf geritzten Oberflächen (in diesem Band)

[7] Weil, Hans H.: *Improvements in advertising and like signs*, UK Patent No. 37208/34 (1934).