

Was haben Briefumschlagsfenster und Nebel gemeinsam?

Ein experimenteller Zugang zu einem interessanten Streuphänomen

H. Joachim Schlichting WWU Münster (schlichting@uni-muenster.de)

Kurzfassung

Obwohl Papier- und Folienfenster von Briefumschlägen einen ungetrübten Blick auf die dicht dahinter liegende Schrift ermöglichen, zeigen sie frappierende Gemeinsamkeiten mit Nebel und anderen alltäglichen Streuphänomenen. Einfache Modellexperimente mit Folien und trüben Flüssigkeiten dienen zunächst dazu, wesentliche physikalische Aspekte des Nebels zu veranschaulichen, die umgekehrt herangezogen werden, einen weit verbreiteten Typ „nebelhafter“ Briefumschlagsfenster zu erklären. Über die Erklärung hinausgehend soll beispielhaft demonstriert werden, wie physikalischen Gemeinsamkeiten von Phänomenen aus ganz unterschiedlichen Kontexten des Alltags zu einer wechselseitigen Aufklärung herangezogen werden können.

*Der Nebel ...schien eine einzige leuchtende Masse zu sein,
ein Leuchten, welches von nirgends und überall herkam,
und bisweilen sah man ganz oben den Mond
darin schwimmen,
eine milchige Münze von ständig wechselnder Helle*

Hans Lebert

1 Vernebelte Sicht

Was haben Nebel, Schnee, transparente Fenster von Briefumschlägen und trübe Flüssigkeiten gemeinsam? Die Frage ist nicht so abwegig, wie sie auf den ersten Blick erscheint.

Jeder weiß, dass Nebel die Sicht auf kurze Entfer-



Abb. 1: Nebel. Die Sicht nimmt mit der Entfernung ab.

nungen kaum beeinträchtigt. Der durch den Ausdruck, man könne seine Hand vor Augen nicht sehen, beschriebene Eindruck ist wohl eher der durch den Nebel herabgesetzten Lichtintensität als der Undurchsichtigkeit zuzuschreiben (Abb. 1). Denn

selbst im dichtesten Nebel bleiben dünne Nebelschichten durchsichtig.

Denkt man sich eine Nebelwand in dünne transparente Schichten zerlegt, so stellt sich die Frage, ab welcher Anzahl solcher Schichten die Transparenz ins Nebellose übergeht. Verhalten sich andere dünne transparente Schichten vielleicht ganz ähnlich?

2. Einfache Modellversuche mit transparenten Folien

Um diese Frage zu beantworten, untersuchen wir das Verhalten transparenter Folien¹. Legt man eine oder wenige Folien übereinander, so ist der Blick auf einen Gegenstand – im vorliegenden Fall die Abbildung einer Person (Abb. 2) – erwartungsgemäß so gut wie ungetrübt. Dies ändert sich überraschenderweise mit zunehmender Folienzahl. Schon bei einer Folienzahl von 5 (Abb. 2 (rechts oben)) kann man gegenüber dem Original (Abb. 2 (links oben)) einen gewissen Schleier erkennen, der sich mit zunehmender Folienzahl verstärkt und ab einer kritischen Folienzahl zu einer völligen Verschleierung der abgebildeten Person führt. Die Folien erscheinen grauweiß wie Nebel.

Die Ursache kann leicht darin gefunden werden, dass das Licht viele Male an der Vorder- und Rückseite der Folien reflektiert wird (Mehrfachstreuung). Schließlich sieht man nur noch das reflektierte Licht und nichts mehr von dem Licht, das von der Person hinter den Folien ausgeht. (Da bei jeder Reflexion an den Folien die Absorption mit anschließender Emission im Infrarotbereich ebenfalls zunimmt, nimmt die Lichtintensität insgesamt ab).

¹ Für die folgenden Versuche sind Overheadfolien ebenso geeignet wie manche Typen von Briefensterfolien. Wie im folgenden noch zu zeigen sein wird, muss diese Einschränkung gemacht werden, weil andere Folientypen ein anderes physikalisches Verhalten zeigen können.

Eine Erhöhung der Lichtintensität schafft keine Abhilfe, im Gegenteil: Modelliert man die Zunahme der Lichtintensität dadurch, dass man durch einen



Abb. 2: Durch eine zunehmende Zahl von Folien wird der Durchblick immer vernebelter. (Vorlage: Eva Conzalès: Eine Loge im „Théâtre des Italiens“) (40 Lagen)

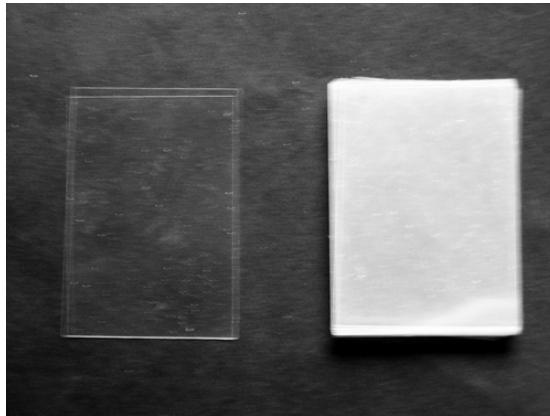


Abb. 3: Eine zweilagige Folienschicht ist nach wie vor transparent. Eine viellagige Schicht erscheinen weiß.

dunklen Hintergrund die Rückstrahlung reduziert, so erkennt man, dass eine Schicht aus wenigen Folien transparent und eine Schicht aus vielen Folien in einem hellen Weiß erscheint (Abb. 3).

Jeder Autofahrer weiß, dass der Durchblick durch eine dicke Nebelwand nicht dadurch verbessert werden kann, dass man sie mithilfe einer höheren Lichtintensität (Aufblenden) zu durchstrahlen versucht. Die Rückstreuung des blendend weißen Lich-

tes ist so intensiv, dass das schwache Licht, das von den Gegenständen ausgeht, vollends überstrahlt wird. Man hat den Eindruck der Nebel selbst werde zu einer leuchtenden Masse (vgl. das Eingangszitat von Hans Lebert).

3. Einfache Modellversuche mit stark verdünnter Milch

Milch ist weiß, weil die im Wasser (dem Hauptbestandteil von Milch) suspendierten Fettteilchen das Licht auf ähnliche Weise streuen wie Wassertröpfchen in der Luft. Daher ist stark verdünnte Milch hervorragend geeignet, wesentliche Eigenschaften des Nebels zu modellieren [1]. Eine starke Verdünnung der Milch ist deshalb erforderlich, weil schon relativ dünne Milchschichten völlig undurchsichtig sind.

In den folgenden Versuchen gehen wir von einem Milch-Wasser-Gemisch im Verhältnis von 1:25 aus. Die Flüssigkeit wird in schwarze Schalen gegeben, um Störungen durch Rückstreuung an den Behälterwänden zu vermindern.

Im ersten Versuch verschaffen wir uns einen Eindruck vom Einfluss der Mischungsverhältnisse (Milchkonzentration im Wasser) auf die Intensität des zurückgestreuten Lichtes. Dazu vergleichen wir



Abb. 4: Milchwassergemisch. Links: 100 ml, Mischungsverhältnis: 1:25. Rechts 50 ml, Mischungsverhältnis 1:25.

eine Schicht von 100 ml mit einer Schicht von 50 ml Milchlösung derselben Konzentration von 1:25 (Abb. 4). Es ist deutlich zu erkennen, dass die höhere Schicht in einem intensiveren Weiß erscheint als die niedrigere. Das war zu erwarten, denn die Flüssigkeitsschicht enthält aufgrund der größeren Milchkonzentration eine größere Zahl von Streuzentren. Infolgedessen wird mehr Licht zurückgestreut als in der dünnen Schicht. Das Ergebnis entspricht im Versuch mit den Folien dem intensiveren Weiß bei einer größeren Anzahl von Folien.

Im zweiten Versuch füllt man zunächst in beide Schalen 50 ml des Milch-Wasser-Gemisches im Verhältnis von 1:25. Die Flüssigkeitsmenge der linken Schale wird durch Zugabe von 50 ml klarem Wasser auf 100 ml aufgefüllt, so dass die Milchkonzentration auf 1:50 erniedrigt wird (Abb. 5).

Auf den ersten Blick mag das Versuchsergebnis erstaunlich erscheinen. Denn von einer größeren Schichtdicke könnte man eine geringere Transparenz

und somit eine größere Intensität des zurückgestreuten Lichts erwarten. Da jedoch durch die Zugabe von klarem Wasser, die Flüssigkeitsmenge in gleichem Maße erhöht wie die Konzentration verringert wird, bleibt die Anzahl der Streuzentren und damit die Intensität des zurückgestreuten Lichtes konstant. Beide Flüssigkeiten erscheinen daher in etwa gleich transparent bzw. gleich weiß. („in etwa“, weil in den

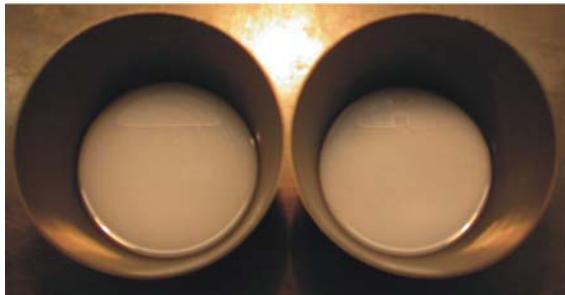


Abb. 5: Milchwassergemisch: Links 100 ml, Mischungsverhältnis 1:50. Rechts 50 ml, Mischungsverhältnis 1:25.

benutzten Behältern der Querschnitt mit zunehmender Flüssigkeitshöhe etwas größer wird).

Im dritten Versuch werden 50 ml einer relativ niedrig konzentrierten Lösung von 1:100 in beide Schalen gegeben. In die linke Schale werden zusätzliche 100 ml Wasser hinzugefügt, so dass sich ein Mischungsverhältnis von 1:300 ergibt. Nach dem vorangegangenen Versuch würde man erwarten, dass wegen der gleich bleibenden Zahl der Streuzentren in der Flüssigkeitsschicht die Helligkeit der Lösung in beiden Schalen in etwa gleich ist. Denn die Zahl der Streuzentren ist auch hier in beiden Schalen gleich. Bei genauerem Hinsehen erscheint jedoch die



Abb. 6: Milchwassergemisch: Links 150 ml, Mischungsverhältnis 1:300. Rechts 50 ml, Mischungsverhältnis 1:100.

rechte Schale mit der physikalisch dünnern Schicht etwas heller (Abb. 6).

Ursache für diesen Effekt ist die Tatsache, dass der mittlere Abstand zwischen den Streuzentren in der linken Schale größer ist als in der rechten. Daher erreicht in ihnen mehr Streulicht die schwarzen Gefäßwände, wo es absorbiert wird und nicht mehr als Streulicht ins Auge gelangt.

Legt man in einem vierten Versuch in diese beiden Schalen eine Münze, so beobachtet man einen unerwarteten Effekt. In der helleren, milchiger erscheinenden Flüssigkeit (Abb. 7 rechts) ist die Münze

wesentlich deutlicher zu erkennen, als in der transparenteren Flüssigkeit (links). Müsste es nicht genau umgekehrt sein?



Abb. 7: Milchwassergemisch: Links 150 ml, Mischungsverhältnis 1:300. Rechts 50 ml, Mischungsverhältnis 1:100. Man blickt in beiden Fällen auf eine Münze.

4. Vorwärtsstreuung

Die Ursache für diese scheinbare Paradoxie kann nur darin liegen, dass die linke Schale eine größere physikalische Schichtdicke aufweist als die rechte.

Wie sich dies auf die Schärfe der durch die Schicht hindurch betrachteten Münze auswirkt, kann man sich anhand einer Skizze (Abb. 8) verdeutlichen: Das von dem Punkt L einer Lichtquelle, in diesem Fall der Münze, ausgehende Licht gelangt gleichzeitig direkt und indirekt durch elastische Streuung an einem Streuzentrum S zum Beobachter B. Da das Auge von der Änderung des Lichtweges durch „Umlenkung“ des Lichts an S nichts „merkt“ und davon ausgeht, dass das Licht aus Richtung der rückwärtigen Verlängerung von SB, also von L' kommt, sieht es den Punkt L auch bei L', so dass es zu einer Überlagerung mit dem direkt von L' stammenden Licht kommt. Die Münze ist daher einerseits von einem

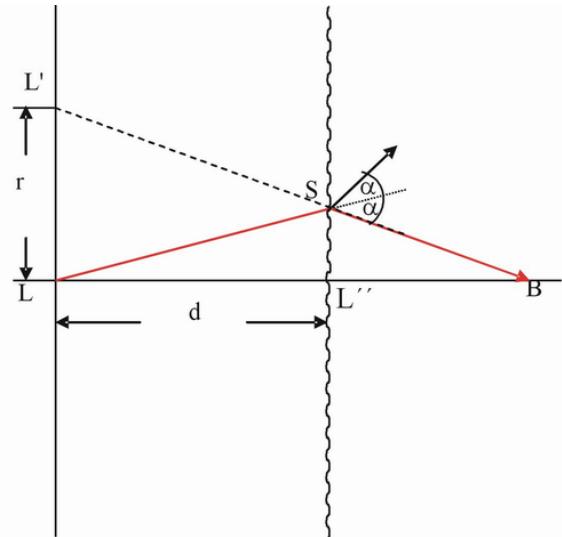


Abb. 8: Das von der Punktlichtquelle L ausgehende Licht wird auf einer streuenden Oberfläche zum Beobachter B gestreut. B erhält nicht nur direkt von L Licht, sondern auch aus anderen Richtungen, so dass es den Anschein hat, L sei von einem nach außen abnehmenden Halo umgeben.

Streulichthalo umgeben und wird andererseits durch Licht von L' verwässert. Das wird als mehr oder weniger starke Verschmierung wahrgenommen (Abb. 7 links).

Das Maß der Verschmierung hängt zum einen von der Art der Streuung ab, die hier pauschal durch den Winkel α charakterisiert werde. α ist ein Maß für die Abnahme der Intensität (z.B. auf die Hälfte) in der durch α angegebenen Richtung. Da sowohl Nebelteilchen als auch Milchteilchen in der Regel wesentlich größer als die Wellenlänge des Lichtes sind, handelt es sich um *Mie-Streuung*, durch die das Licht um so stärker vorwärts gestreut wird, je größer die Streuteilchen im Vergleich zur Wellenlänge des Lichtes sind. Mit anderen Worten: α nimmt ab, wenn die Größe der Streuteilchen zunimmt (Abb. 10).

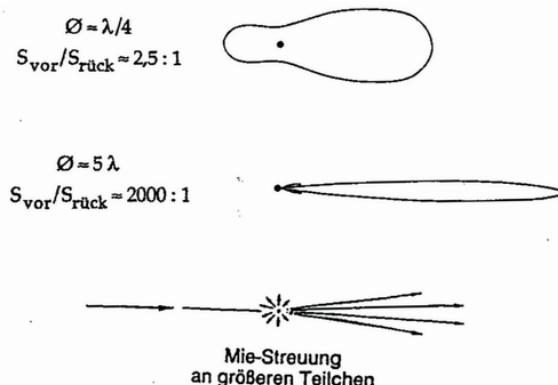


Abb. 10: Vorwärtsstreuung an Teilchen die größer als die Wellenlänge λ des Lichtes sind.

5 Briefumschlagsfenster

Weiter oben wurde eine Transparentfolie als Modell für eine dünne Nebelschicht herangezogen. Mit mehreren übereinander gelegten Folien konnte illustriert werden, dass die Durchsicht mit zunehmender Schichtdicke vernebelt und schließlich ganz verhindert wird. Die Transparenz geht in der mit der zunehmenden Zahl von Grenzschichten wachsenden Intensität des zurück gestreuten weißen Licht verloren.

Anschließend wurde mit Hilfe wässriger Milch gezeigt, dass trotz gleicher Anzahldichte der Streuzentren ein größerer Abstand zwischen den streuenden Teilchen die Durchsicht verschlechtert.

Ganz ähnlich verhält sich ein Typ transparenter Folien, der häufig für Briefumschlagsfenster aber auch z.B. bei Folien zur Laminierung von Schriftstücken benutzt wird. Legt man eine solche Folie auf ein Objekt, so erweist es sich als völlig transparent. Hält man sie jedoch in einem größer werdenden Abstand zum Objekt, so erscheint das Objekt zunehmend eingetrübt. Seine Transparenz verliert sich in einem immer homogener werdenden Weißgrau (Abb. 9).

Dieser Folientyp zeigt ein ähnlich nebulöses Verhalten wie das milchige Wasser, das durch Zugabe von

klarem Wasser den Blick auf die Münze verschleiert, obwohl die Zahl der streuenden Teilchen dadurch unverändert bleibt. Der Unterschied besteht lediglich darin, dass anders als bei der Flüssigkeit die Streuteilchen der Folie auf eine dünne Schicht beschränkt bleiben.

Von den Streuzentren der Folie merkt man so gut wie nichts, wenn der Abstand zum dahinter befindlichen Objekt verschwindend klein ist. Sie macht sich aber um so stärker bemerkbar, je weiter der Abstand vom betrachteten Objekt zu den Streuzentren ist.

In Abb. 9 wurde eine derartige Fentsterfolie eines Briefumschlags zunehmend von einem Schriftstück

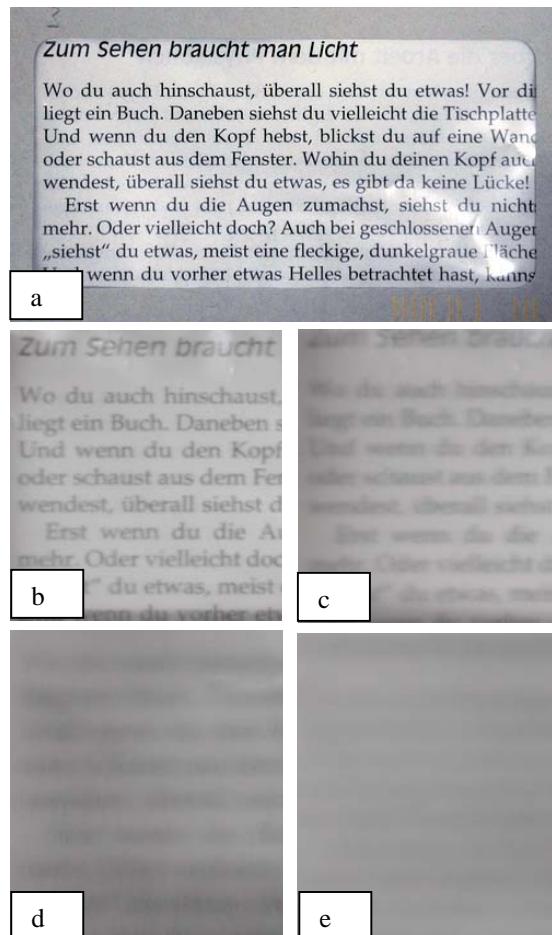


Abb. 9: Briefumschlagsfenster in zunehmender Entfernung von einem Schriftstück (a: 0 cm, b: 1 cm, c: 2 cm, d: 4 cm, e: 8 cm).

entfernt. Während bei direkter Auflage (a) eine unbehinderte Sicht auf die Schrift besteht, wenn man einmal von den für transparente Folien typischen Störungen durch Reflexionen absieht (links im Bild), zeigen sich mit nehmender Entfernung drastisch zunehmende Einschränkungen des Durchblicks. Schon bei einer Entfernung von 3 cm zwischen Folie und Schrift (c), kann die Schrift nicht mehr entziffert werden.

Im Rahmen des mit Hilfe der transparenten Folien und des milchgetrübten Wassers entwickelten Modells lässt sich das Verhalten dieses

Nebelfolientyps verstehen. Wie man sich anhand von

Abb. 8 klarmachen kann, verschwindet der durch eine streuende Schicht im Abstand d hervorgerufene Halo, wenn d gegen Null geht, bzw. wenn sich die streuende Folie unmittelbar über dem durch die Folie hindurch betrachteten Objekt befindet. Denn die durch den Winkel α charakterisierte Abnahme der Intensität durch Streuung macht sich erst mit zunehmendem Abstand bemerkbar.

Untersucht man die Folien beliebiger Briefumschläge, so stellt man starke Variationen der Streuintensität fest. Es gibt Folien mit großem α (wie im Fall der in Abb. 9 untersuchten Folie) und solche, bei denen die Schrift erst in sehr viel größerem Abstand unleserlich wird (kleines α).

Die streuenden Brieffensterfolien stellen so etwas wie eine so stark komprimierte Nebelwand dar, dass die Streuteilchen auf die Dicke der Folie zusammengepresst erscheinen und daher durchsichtig sind. Erst wenn man den Abstand zum Objekt vergrößert, macht sich die durch die Streuung bedingte Vernebelung bemerkbar. Ob man einen entfernten Gegenstand durch eine solche Nebelfolie oder durch eine der Entfernung entsprechende Nebelwand hindurch betrachtet, macht zumindest qualitativ keinen Unterschied.

Wir vermuten, dass die Nebeleigenschaft der Folien eine zufällige Nebenwirkung des Materials bzw. des speziellen Herstellungsprozesses ist, der insofern ohne Belang ist, als nur Physiker auf die Idee kommen, den Brief aus einiger Entfernung durch die Folie zu betrachten, um sich anschließend über den Effekt zu wundern.

6 Fazit

Die Transparenz zahlreicher "transparenter" Medien ist abhängig von der Schichtdicke bzw. von der Entfernung zum Objekt. Transparenzfolien verhalten sich in mancher Hinsicht wie Nebel oder milchige Flüssigkeiten. Auch manche Badezimmerfenster oder Duschkabinen zeigen ein den Briefumschlagsfolien ähnliches Verhalten. Befindet sich ein Objekt unmittelbar hinter der Scheibe, so kann man es meist deutlich erkennen, während es mit zunehmender Entfernung sehr schnell im nicht wirklich vorhandenen Nebel verschwindet.

Schließlich sei ein weiteres natürliches Beispiel genannt: Schnee. Schnee ist zu Kristallen gefrorenes Wasser, das aufgrund der zahlreichen Grenzschichten zwischen den Kristallen ganz ähnlich wie die übereinander gelegten Folien seine Transparenz eingebüßt hat und damit zu einer Art Nebel geworden ist. Da die Schneekristalle sehr viel dichter gepackt sind als Wassertropfen im Nebel ist Schnee auch optisch dichter und damit bereits in verhältnismäßig dünnen Schichten weiß und undurchsichtig.

Die vorliegende Untersuchung soll einerseits auf ein physikalisch interessantes Alltagsphänomen aufmerksam machen. Sie soll darüber hinaus zeigen,

dass physikalische Ähnlichkeiten und Analogien aus völlig verschiedenen phänomenologischen Bereichen zur gegenseitigen Präzisierung und Veranschaulichung genutzt werden können. Schließlich wird implizit einmal mehr gezeigt, dass optische Konzepte wie Durchsichtigkeit und Undurchsichtigkeit Idealgestalten darstellen, zwischen denen zumindest bei alltäglichen Phänomenen alle möglichen Zwischenstufen auftreten können. Andererseits sollte aber auch der Wert solcher Idealgestalten als Bezugs- und Anhaltspunkte für eine physikalische Konzeptualisierung von Alltagsphänomenen deutlich geworden sein.

7 Literatur

Bohren, Craig F.: *Clouds in a glass of beer*. New York 1987