

Physikalische Melange

Wissenschaft im Kaffeehaus



Leopold
Mathelitsch

SACHBUCH

EBOOK INSIDE



Springer

Physikalische Melange

Leopold Mathelitsch

Physikalische Melange

Wissenschaft im Kaffeehaus



Springer

Leopold Mathelitsch
Institut für Physik
Universität Graz
Graz, Österreich

ISBN 978-3-662-59259-5 ISBN 978-3-662-59260-1 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-59260-1>

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

© Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2019

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Einbandabbildung: © piyagoon/stock.adobe.com
Planung/Lektorat: Lisa Edelhäuser

Springer ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Dank

Ohne die tatkräftige Unterstützung vor allem meiner Familie, aber auch von vielen Kollegen und Freunden hätte ich dieses Buch nie in dieser Form umsetzen können. Ich bedanke mich aus ganzem Herzen für die selbstlose Mithilfe bei Inhalt und Gestaltung und für aufmunternden Zuspruch.

Im Besonderen danke ich folgenden Personen für die genaue Durchsicht einzelner oder sämtlicher Kapitel: Klaus Beck, Claudia Haagen-Schützenhöfer, Artur Habicher, Franz Hopfer, Christian Lang, Heimo Latal, Sandra Mathelitsch, Ernst Meralla, Gerhard Rath und Claudia Strunz. Eure Rückmeldungen waren äußerst wichtig, sie haben mich in meiner Arbeit bestärkt, aber auch vor etlichen Fehlern bewahrt. Mögliche verbleibende Irrtümer gehen allein auf mein Konto.

Bei der Erstellung der Abbildungen haben maßgeblich mitgewirkt: Hans Eck, Christian Lang, Maximilian Mathelitsch, Sandra Mathelitsch, Josef Pilaj, Gerhard Rath, Wolfgang Schweiger, Claudia Strunz, Christian Strunz, Bernd Thaller und Ivo Verovnik. Vielen Dank für diese wertvolle Hilfe.

Die Idee dieses Buches stammt von Lisa Edelhäuser vom Springer Verlag. Ich bedanke mich für ihr Vertrauen zur Umsetzung sowie für die stete und profunde Unterstützung während der Arbeit an dem Manuskript.

Physikalische Melange

„Melange“ steht in diesem Buch für zweierlei. Einerseits für „Wiener Melange“, eine österreichische Kaffeespezialität. Damit wird angedeutet, dass ein Kaffeehaus im Mittelpunkt der Handlung steht. Andererseits ist mit Melange die ursprüngliche, französische Bedeutung gemeint, nämlich Mischung. Der Titel *Physikalische Melange* weist also darauf hin, dass in diesem Buch eine breite Mischung von Inhalten geboten wird, die einen physikalischen Bezug haben, die aber zusätzlich – und damit kommen wir wieder zur ersten Bedeutung des Wortes „Melange“ zurück – auch eine Verbindung zum Kaffeehaus aufweisen: zu typischen Getränken und Speisen, zu speziellen Personen, zu einschlägigen Tätigkeiten, zu Gästen und ihren Gesprächen in einem Wiener Kaffeehaus.

Kaffeehäuser, Cafés, gibt es in aller Welt. Allerdings war Stefan Zweig der Meinung

„[...] , dass das Wiener Kaffeehaus eine Institution besonderer Art darstellt, die mit keiner ähnlichen der Welt zu vergleichen ist.“

Was ist das Besondere eines Wiener Kaffeehauses? In anderen Ländern geht man in ein Café, um schnell einen Kaffee zu trinken oder einen Aperitif oder ein Glas Wein. Man vereinbart eine Verabredung mit einem Bekannten in einem benachbarten Café. Man kehrt ein, um etwas zu essen – vom kleinsten Häppchen bis zu einem vollständigen Menü.

All dies trifft auch auf ein Wiener Kaffeehaus zu. Allerdings ist das oft nur Mittel zum Zweck des Besuchs.

Warum geht man denn dann in ein Wiener Kaffeehaus?

Um sich wohl zu fühlen! Um eine bestimmte Zeit in angenehmer Atmosphäre zu verbringen! Wenn man öfters zur selben Tageszeit in ein Kaffeehaus kommt, so sieht man häufig dieselben Personen. Das zeigt, dass sich diese regelmäßig dort einfinden. Es heißt aber nicht, dass diese Leute dorthin gehen, um einander zu treffen. Sie sitzen auch nicht miteinander dort, sondern eigentlich nebeneinander. Am treffendsten hat dies der Wiener Literat Alfred Polgar ausgedrückt:

„Im Kaffeehaus sitzen Leute, die allein sein wollen, aber dazu Gesellschaft brauchen.“

In dem Sinne wird im Kaffeehaus nicht ein Gespräch gesucht, es wird gefunden – mit bekannten und unbekanntem Nachbarn. Man unterhält sich über Gott und die Welt.

In diesem Buch werden solche Gespräche nachvollzogen. Allerdings wird nur ein Teil der Welt näher betrachtet, nämlich der naturwissenschaftliche, noch genauer der physikalische. Warum? Ganz einfach, weil der Autor Physiker ist. Weil es ihm seit Jahren Vergnügen bereitet, anderen zeigen zu dürfen, wie faszinierend und spannend der physikalische Blickwinkel sein kann. Und dass es nicht langweiliger, sondern noch faszinierender wird, wenn man Zusammenhänge versteht. Unverständliche Phänomene führen zu einem Staunen, Bestaunen und Wundern, verstandene jedoch zu einem Bewundern.

Ein Verstehen soll auch mit einer Weitergabe des Verstandenen verbunden sein, einem Erklären für andere. Ein solches Erklären physikalischer Abläufe kann auf mehreren Ebenen erfolgen:

- Die Zusammenhänge können in der Sprache der Physik ausgedrückt werden, das heißt in mathematischen Symbolen und Formeln. Diese Form ist die kürzeste und für die Experten (aber häufig nur für diese) auch die verständlichste.
- Die Anwendung von Formeln führt zu Ergebnissen, meist in Form von Zahlenwerten. Diese können in grafischer Form anschaulich dargestellt werden, als Diagramme und Schaubilder. Eine solche Visualisierung wird sowohl in wissenschaftlichen Abhandlungen als auch in Zeitschriften und im TV genutzt und geschätzt.
- Man kann einen Zusammenhang aber auch einfach mit Worten umgangssprachlich erörtern. Das Wort „einfach“ trägt jedoch. Häufig ist diese Art der Darstellung die schwierigere. Etwas Komplexes allgemein verständlich, aber dennoch richtig zu erklären, wird selbst von Wissenschaftlern manchmal als Herausforderung gesehen.

Idee und Inhalt dieses Buches ist die Darstellung verschiedenster Phänomene auf allen drei Ebenen. Die verbale Erklärung erfolgt in Diskussionsform, in einem Gespräch, wie es sich in einem Kaffeehaus ergeben kann. Dabei kommen verschiedene Meinungen zum Ausdruck, auch solche, die sich letztlich als nicht richtig herausstellen. Die Gesprächspartner sind eine bunt zusammen gewürfelte Gruppe, mit gleicher oder variabler Zusammensetzung – typische Kaffeehausbesucher.

Dieser Diskurs soll bei der Leserin und dem Leser darüber hinaus die Neugier wecken, die Zusammenhänge tiefer, genauer erfahren zu wollen. Zusätzliche Informationen werden im Anschluss an die Diskussion geboten. Darin werden Daten auch in Form von Diagrammen gegeben, und es kann überprüft werden, inwieweit eine Formelsprache das wirklich klarer zeigt, was auch im gemeinsamen Diskurs bereits ausgedrückt worden ist. Am Ende mancher Kapitel ist eine weitere mathematische Vertiefung in Kästen eingegrenzt.

Der bereits zitierte Alfred Polgar hat über ein bestimmtes Wiener Kaffeehaus geschrieben:

„Das Café Central ist nämlich kein Caféhäus wie andere Caféhäuser, sondern eine Weltanschauung, und zwar eine, deren innerster Inhalt es ist, die Welt nicht anzuschauen. Was sieht man schon?“

In unserem Kaffeehaus geht es weniger pessimistisch zu. Die Gäste schauen die Welt um uns an und sehen Bedeutendes und Unwichtiges, Lustiges und Ernstes, Persönliches und allgemein Gültiges. Sie bringen ihre Meinung und ihr Wissen ein und versuchen, gemeinsam das Dahinterliegende zu sehen.

Zum Abschluss noch zwei Zitate von Bertolt Brecht zu den beiden Themen dieses Buches. Zu Wien und seinen Kaffeehäusern schreibt er:

„Wien ist eine Stadt, die um einige Kaffeehäuser herum errichtet ist, in welchen die Bevölkerung sitzt und Kaffee trinkt.“

Und bezüglich der Faszination zur Physik lässt er Galileo Galilei im Theaterstück *Leben des Galilei* sagen:

„Und es ist eine große Lust aufgekommen, die Ursachen aller Dinge zu erforschen: warum der Stein fällt, den man loslässt, und wie er steigt, wenn man ihn hochwirft.“

Wie bereits gesagt, geht man in ein Wiener Kaffeehaus, um eine bestimmte Zeit in angenehmer Atmosphäre zu verbringen. Ich würde mich freuen, wenn Sie bei der Lektüre dieses Buches dasselbe empfinden.

Im Kaffeehaus

In einem Kaffeehaus treffen unterschiedliche Personen zusammen. Auch in unserem Kaffeehaus begegnen wir solchen, die sich dort häufig oder selten, regelmäßig oder gelegentlich, freiwillig oder berufsmäßig, von verschiedensten Interessen inspiriert, einfinden. Da diese Personen in den einzelnen Kapiteln nicht immer präsent sind, werden sie hier in alphabetischer Reihenfolge kurz vorgestellt.

- Carmen:* Die Journalistin einer lokalen Zeitung widmet viel Zeit ihrem Hobby, der Beschäftigung mit geschichtlichen Themen, von der Antike bis in die Neuzeit.
- Die Chefin:* Der Besitzerin des Kaffeehauses ist neben geschäftlichen Interessen auch die Tradition des Hauses ein großes Anliegen.
- Frau Hofrat:* Ihre spitzen Bemerkungen beleben die Gespräche. Ihre Ungeduld führt dazu, dass sie immer auf kürzestem Weg zum Kern eines Themas kommen will.
- Frau Karla:* Sie ist eingebettet in eine sehr weitverzweigte Verwandtschaft. Familienmitglieder besuchen sie häufig und begleiten sie auch manchmal ins Kaffeehaus.
- Herr Kuno:* Als Handlungsreisender hat er es immer eilig, obwohl der Gegenstand seiner Handlungen den anderen Gästen nicht klar ersichtlich ist.
- Maurice:* Der Küchenchef des Kaffeehauses spricht gerne über seine Erfahrungen in fernen Ländern.

XII Im Kaffeehaus

- Der Maestro:* Er beglückt die Gäste mit begleitender Klaviermusik, wobei seine Improvisationen besondere Zustimmung finden.
- Norbert:* Obwohl er bereits seit Jahrzehnten in Wien wohnt, zeigt er in Wort und Tracht, dass er immer noch stark mit seiner ländlichen Heimat verbunden ist.
- Herr Oskar:* Er ist als Ober für den Teil des Kaffeehauses zuständig, in dem sich unsere Gruppe zusammenfindet. Aufgrund seiner langjährigen Berufserfahrung steht er über den Dingen.
- Der Professor:* Er genießt nach seiner Pensionierung als Hochschullehrer für Physik die Annehmlichkeiten des Kaffeehauses und die Gelegenheit, das Interesse von Stammgästen an naturwissenschaftlichen Themen wecken zu können.
- Der Prokurist:* Er ist ein wissensdurstiger Gast, der die Gespräche gerne durch eigene Geschichten bereichert.
- Renée:* Sie studiert Gesang und bestreitet ihren Lebensunterhalt durch Auftritte bei feierlichen Anlässen.
- Der Student:* Er hat bereits eine Reihe von abgebrochenen Studien hinter sich. Es wird gemunkelt, dass die Anzahl der Semester mit seiner Verweildauer im Kaffeehaus zusammenhängt.

Inhaltsverzeichnis

1	Heißer Kaffee	1
2	Ein Hauch von Parfum	13
3	Klavierklänge	23
4	Wetterkapriolen	33
5	Wiener Würstel	47
6	Beam me up	57
7	Fußball Derby	71
8	Eine schöne Stimme	81
9	Dann wird champagnisiert	97
10	Die Zukunft steht in den Sternen	109
11	Chaotisches Billard	121
12	Dreidimensionale Bilder	135
13	Tarock	147

14	Papierln	157
15	Gefährliches Telefonieren	169
16	Groß und Klein	183
17	Ein Traum aus Schaum	197
18	Alles fließt	211
19	Unter Donner und Blitz	225
20	Gebogenes Holz	239
21	Farben – das Lächeln der Natur	253
22	Hopfen und Malz	273
23	Ein Diamant für die Ewigkeit	287
24	Schnee und Eis	299
25	Finales Feuerwerk	313
	Abbildungsnachweis	323
	Literatur	331
	Stichwortverzeichnis	337

1

Heißer Kaffee

„Immer wenn ich es besonders eilig habe, ist der Kaffee noch heißer als sonst“, befindet Herr Kuno. Herr Kuno ist Handlungsreisender, und eigentlich hat er es immer besonders eilig. Frau Hofrat, die am Nebentisch sitzt, will helfen: „Gießen Sie halt rasch die Milch in den Kaffee, dann wird er schneller kalt.“ Nun mischt sich auch Renée ein: „Ich habe einmal gehört, dass der Kaffee schneller abkühlt, wenn man die Milch nicht sofort rein gibt.“ „Das ist wohl wieder so ein Blödsinn, wie er nur Künstlerinnen einfallen kann“, moniert die Frau Hofrat in Richtung Renée. Renée absolviert eine Gesangsausbildung und wird deshalb von Frau Hofrat der Sparte „Künstler“ zugeordnet.



Der Prokurist blickt von seiner Zeitung auf. „Ich glaube auch schon gehört zu haben, dass man die Milch erst später dazugeben soll.“ Diese Bemerkung stachelt Frau Hofrat jedoch weiter auf: „Ein Blödsinn bleibt ein Blödsinn, auch wenn er von mehreren Personen geäußert wird. Heißer Kaffee und kalte Milch ergeben immer dasselbe, egal wann und wie schnell ich mische.“ „Und dennoch vermeine ich im Gedächtnis zu haben, dass ein Physiker dies behauptet hat“, lässt der Prokurist nicht locker. Nun ist es aber dem Studenten zu viel: „Ich kann mir nicht vorstellen, dass sich die Physiker mit so etwas Trivialem wie dem Abkühlen von Kaffee beschäftigen. Die erklären die Abkühlung des Universums.“

Hier muss die Unterhaltung mit einer Beobachtung unterbrochen werden. In jedem Kaffeehaus, auch in jenem, in dem wir uns gegenwärtig befinden, gibt es Stammgäste und solche, die nur einmalig in diese Gegend kommen. Letztere werden von den Stammgästen zwar nicht als Eindringlinge gesehen, sie werden jedoch ignoriert, sind eigentlich nicht existent. Anders sieht es aus, wenn ein Neuling mehrmals auftaucht. Ein solcher wird umso intensiver beäugt, je öfter er erscheint. Und genau dies ist in den letzten Wochen geschehen. Ein älterer Herr hatte die Aufmerksamkeit auf sich gezogen, weil er nicht nur bereits mehr als einmal pro Woche das Kaffeehaus besuchte, sondern weil die Verweildauer weit über die eines zufälligen Gastes reichte. Besonders auffällig war, dass er die Zeit nicht nur zum Lesen von im Kaffeehaus aufliegenden Zeitschriften, sondern auch von mitgebrachten Journalen verwendet hat.

Und eben jener Herr wird während der Diskussion immer unruhiger, bis er letztlich einen Entschluss fasst: „Ich bitte um Entschuldigung und möchte Ihre Unterhaltung nicht stören. Aber wenn es gewünscht wird, könnte ich etwas zur Klärung Ihrer Diskussion beitragen.“ Nach einem generellen Aufschauen gilt das folgende Interesse, besser gesagt die Neugierde, vorerst weniger der Sache als vielmehr der Person.

„Herr ...“, beginnt Renée mit einer Anrede, der eine auffordernde Pause folgt. „Franz ist mein Name.“ „Herr Franz, darf ich fragen, welchen Beruf Sie ausüben, dass Sie über das Kühlen von Kaffee Bescheid wissen?“ „Ich bin Physiker, bin allerdings seit einigen Monaten in Pension.“ Das kollektive Nicken zeigt an, dass der neue Gast damit für sein Erscheinen in den letzten Wochen eine zufriedenstellende Erklärung gegeben hat. „Und Sie haben in der Lebensmittelbranche gearbeitet?“ „Nein, überhaupt nicht, ich war an der Universität tätig.“ „Da sind Sie ja Universitätsprofessor.“ „Ja, ich war viele

Jahre Hochschullehrer.“ „Herr Universitätsprofessor ...“, beginnt Renée wiederum, wird aber unterbrochen: „Herr Franz, bitte.“ „Herr Professor ...“

Der letzte Teil des Dialogs zeigt die Macht eines Titels. Das Personelle eines Namens wird erdrückt, schlichtweg vernichtet. Lediglich aus dem sperrigen Universitätsprofessor wurde der handlichere Professor. „Herr Professor“ bleibt auch in der Folge die Anrede für Herrn Franz. Ist Herr Franz nicht anwesend, ist er nur „der Professor“.

„Herr Professor, können Sie uns jetzt aber doch aufklären, wie das so mit der Milch und dem Kaffee ist?“ Diese Frage zeigt, dass Frau Hofrat meist den direkten Weg bevorzugt.

„Gerne. Beginnen möchte ich historisch: Die Gesetzmäßigkeit des Abkühlens eines festen oder flüssigen Stoffs wurde schon vor mehr als 300 Jahren vom großen Physiker Isaac Newton gefunden. Die Grunderkenntnis ist die folgende: Ein Körper kühlt in einer Umgebung umso rascher ab, je höher seine Temperatur im Vergleich zu jener der Umgebung ist. Ist er sehr heiß, geht seine Temperatur schneller runter, ist seine Temperatur nahe der Umgebungstemperatur, geht die Angleichung langsamer vor sich.“

„Das scheint mir sehr logisch zu sein, dass Wärme leichter und schneller abfließt, wenn es in der Umgebung sehr kalt ist. Es wird einem ja auch bei minus zwanzig Grad schneller kalt als bei plus zehn“, meint Herr Kuno.

„Genau. Aber das ist bereits die Lösung Ihrer ursprünglichen Frage. Gebe ich die Milch nicht gleich in den Kaffee, so ist er heißer und kühlt schneller ab. Gebe ich die kalte Milch dann nach einiger Zeit dazu, wird er noch kälter. Schüttele ich die Milch jedoch sofort hinein, wird der Kaffee kälter und kühlt somit langsamer ab. Also soll man die Milch erst später reingeben, wenn man den Kaffee schneller abkühlen möchte.“

Nach einer nachdenklichen Pause meint der Prokurist: „Aber das heißt doch umgekehrt: Wenn ich den Kaffee möglichst lange warm halten will, muss ich die Milch gleich dazugeben. Ich habe es bisher immer umgekehrt gehalten.“ „Ja, das haben Sie jetzt folgerichtig geschlossen“, bestätigt der Professor, der in Richtung des Handlungsreisenden fortfährt: „Sie haben aber noch Glück gehabt, dass Sie einen Braunen bestellt haben und keine Melange.“



Das folgende Erstaunen muss für den Nichtkaffeetrinker und wohl auch Nichtwiener unterbrochen werden. In Wien gibt es um die 30 verschiedene Arten und Namen für Kaffee. Diese können ungewohnte Bezeichnungen wie Einspänner, Kapuziner, Fiaker oder Obermayer tragen, wobei Menge und Art der Zutaten, wie Milch, Sahne, Liköre oder Schnäpse, den Unterschied ausmachen. Häufig wird jedoch ein Brauner bestellt. Dies ist ein Espresso („Schwarzer“) in den Formen „groß“ oder „klein“, zu dem zusätzlich ein kleines Kännchen Kaffeesahne serviert wird, sodass der Gast das Mischungsverhältnis von Kaffee und Sahne selbst bestimmen kann. Was in der Diskussion umgangssprachlich als Milch bezeichnet wurde, war mit großer Wahrscheinlichkeit Kaffeeobers, außer Herr Kuno hätte explizit Milch verlangt. Bei einer Melange ist dem Espresso die Milch bereits zugefügt (in diesem Fall wirklich Milch und nicht Sahne). Das Besondere an der Melange ist jedoch ein Häubchen mit Milchschaum.

„Das möchte jetzt aber ich genauer wissen“, meldet sich Frau Karla zum ersten Mal zu Wort. Frau Karla trinkt immer eine Melange, weil sie der Meinung ist, dass die Luft-Milch-Mischung des Schaums dem Kaffee beim Trinken einen besonderen Geschmack verleiht.

„Luft kann, im Vergleich etwa zu Wasser, nur relativ wenig Wärme aufnehmen und auch nicht gut weiterleiten.“ „Und was hat dies mit Karlas Melange zu tun?“ Frau Hofrat kann der Aussage des Professors sichtlich wenig abgewinnen. „Sehr viel. Denn es erwärmt sich deshalb nur die unmittelbar angrenzende Luft über dem heißen Kaffee. Will man den Abkühlvorgang beschleunigen, kann man diese warme Luft wegblasen, sodass neue kalte Luft zum Kaffee gelangt und sodann Wärme aufnimmt. Der Milchschaum behindert, dass die gewärmte Luft weiter befördert wird.“

Darum kühlt eine Melange weit weniger rasch ab.“ „Das leuchtet mir ein“, meint Frau Karla, „meine luftige Wolljacke wärmt auch wunderbar. So etwa hält der Schaum den Kaffee warm.“

Nun springt aber Herr Kuno auf. „Jetzt habe ich wegen der Diskussionen doch meinen Termin versäumt“, und eilt von dannen. „In der Zwischenzeit war sein Kaffee ohnehin schon kalt, ob mit oder ohne Milch“, beendet Frau Hofrat den Diskurs.

Abkühlen

Theoretische Überlegungen

Bezeichnen wir mit $T(t)$ die Temperatur T des Kaffees zum Zeitpunkt t . Die Abkühlung hängt von der Differenz der Anfangstemperatur des Kaffees T_0 und der Umgebungstemperatur T_U ab. Bei vielen physikalischen Prozessen erfolgt die Änderung eines Zustands, in unserem Fall der Temperatur, mit einer Exponentialfunktion (siehe Kasten am Ende des Kapitels). Dass sich verschiedene Körper unterschiedlich rasch abkühlen, wird durch eine Konstante k in der Hochzahl berücksichtigt. Damit ergibt sich das *Newtonsche Abkühlungsgesetz* zu

$$T(t) = T_U + (T_0 - T_U) \cdot e^{-k \cdot t}.$$

Für große Zeiten t geht der letzte Faktor, die e -Potenz, gegen null, die Temperatur des Gegenstands $T(t)$ nähert sich damit der Umgebungstemperatur T_U an.

Wenden wir nun diese Gesetzmäßigkeit explizit auf unsere Frage, die zwei Arten der Abkühlung von Kaffee, an:

1. Wir geben die Milch sofort in den Kaffee: Nehmen wir an, dass 60 ml Kaffee mit einer Temperatur von 80°C serviert werden. Es werden 20 ml Milch mit einer Kühlschranktemperatur von $T_K = 5^\circ\text{C}$ hinzugefügt. Damit ergibt sich eine Mischungstemperatur T_M von

$$T_M = \frac{60 \text{ ml} \cdot 80^\circ\text{C} + 20 \text{ ml} \cdot 5^\circ\text{C}}{60 \text{ ml} + 20 \text{ ml}} = 61,25^\circ\text{C}.$$

Diese Mischung kühlt nach dem Newtonschen Gesetz ab. Die Konstante k hängt nicht nur von der Art der Flüssigkeit, sondern auch von der Oberfläche ab. Wenn wir den Wert $k = 0,002 \text{ s}^{-1}$ annehmen, so ergibt sich mit einer Umgebungstemperatur von $T_U = 20^\circ\text{C}$ die Endtemperatur T_{E1} der Mischung nach 5 min (300 s) als

$$T(300) = 20 + (61,25 - 20) \cdot e^{-0,002 \cdot 300} = 42,6,$$

- d. h. $T_{E1} = 42,6^\circ\text{C}$ (Abb. 1.1, gestrichelte Kurve).

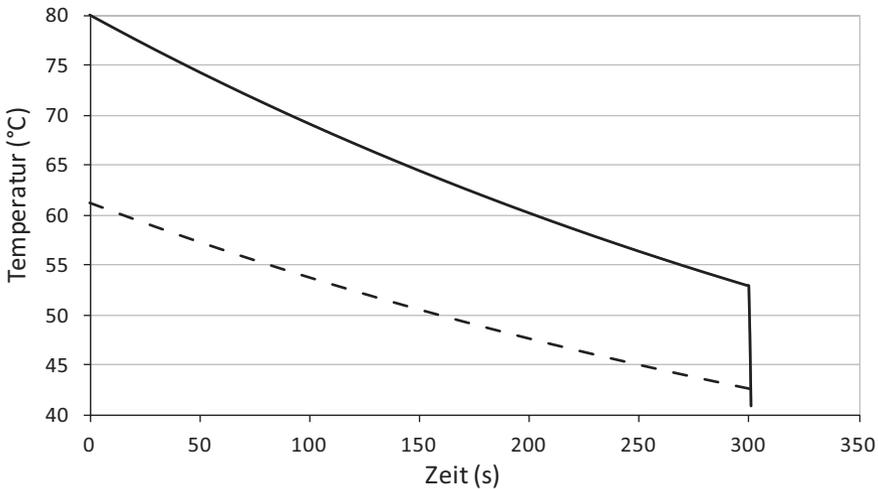


Abb. 1.1 Theoretische Abkühlkurven des Kaffees. Milch wird nach 5 min dazugegeben (durchgezogene Linie), Milch wird zu Beginn in den Kaffee gegeben (gestrichelte Linie)

2. Wir geben die Milch 5 min später dazu: Vorerst kühlt der Kaffee nach dem Abkühlungsgesetz mit derselben Konstanten k ab (Abb. 1.1, durchgezogene Linie). Nach 5 min hat er eine Temperatur von $52,9^\circ\text{C}$. Mischt man nun die Milch hinzu, ergibt sich wiederum mit der Mischungsformel eine Endtemperatur von $T_{E2} = 40,9^\circ\text{C}$. Gibt man also die Milch sofort hinein, erhält man eine Endtemperatur von $42,6^\circ\text{C}$. Gießt man die Milch nach 5 min dazu, ist die Mischung $40,9^\circ\text{C}$ warm. Will man den Kaffee schneller kühlen, soll man die Milch später hinzugeben. Will man den Kaffee länger warm halten, soll man die Milch sofort reingießen.

Ausführung des Experiments

Bei der Berechnung sind einige Bedingungen eingegangen, die sicherlich nur näherungsweise stimmen: Die Umgebungstemperatur ist nicht konstant, sondern erhöht sich, weil sich auch die Luft etwas erwärmt; Wärme wird nach oben zur Luft und über die Tasse unterschiedlich schnell abgegeben; der Kaffee kühlt nicht gleichmäßig ab, sondern zuerst an den Randflächen. Um diese Einflüsse abschätzen zu können, haben wir Versuche in einem Kaffeehaus durchgeführt. Der Kaffee wurde mit einem handelsüblichen Automaten zubereitet und dann auf unsere Bitte rasch serviert. Die Milch war zuvor im Kühlschrank. Das Ergebnis der Messungen ist in Abb. 1.2 abgebildet.

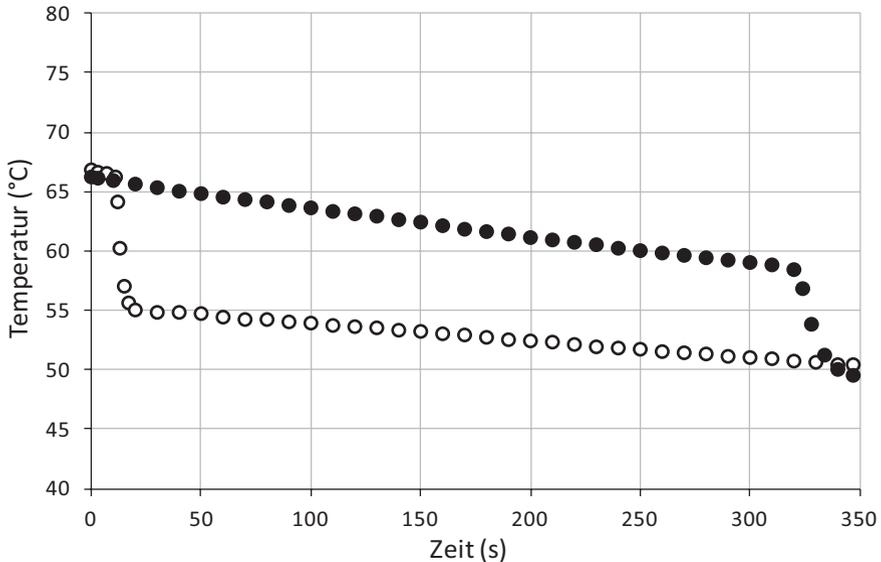


Abb. 1.2 Experimentelle Abkühlkurven von Kaffee. Milch wird zu Beginn (offene Punkte) bzw. nach etwa 5 min (schwarze Punkte) hinzugegeben

Es zeigen sich einige Unterschiede zu den theoretischen Kurven: Obwohl der Kaffee bei etwa $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ aus der Maschine kommt, hat er beim Servieren meist nur eine Temperatur von $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis höchstens $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Abkühlung verläuft aber beträchtlich langsamer, als bei der Berechnung (Abb. 1.1) angenommen wurde. Die experimentellen Werte der Konstanten k sind dementsprechend kleiner, nämlich $k = 0,0005\text{ s}^{-1}$ für die offenen Punkte und $k = 0,0006\text{ s}^{-1}$ für die schwarzen. Obwohl die Anfangstemperaturen aufgrund des Serviervorgangs nicht exakt gleich sind, kann man dasselbe Resultat wie in der Berechnung ablesen: Der später mit der Milch gekühlte Kaffee ist am Ende kälter. Jedoch ist der Unterschied von nur $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ so gering, dass es bei einer Tasse Kaffee letztlich wohl kaum einen Unterschied ausmacht, wann man die Milch hinzugibt.

Ein größerer Unterschied wird durch den Milchschaum bei einer Melange erzielt. Abb. 1.3 zeigt, wie sehr der Schaum das Abkühlen verlangsamt, sodass sich nach 3 min ein Unterschied von fast $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt.

Ein beträchtlicher Effekt bezüglich der Abkühlung des Kaffees ergibt sich aus der Konsistenz der Tasse. Viele Personen würden fürs Erste annehmen, dass Kaffee in einer dünnen Tasse rascher abkühlt, weil die Wärme leichter nach außen dringen kann. Abb. 1.4 zeigt jedoch das Gegenteil.

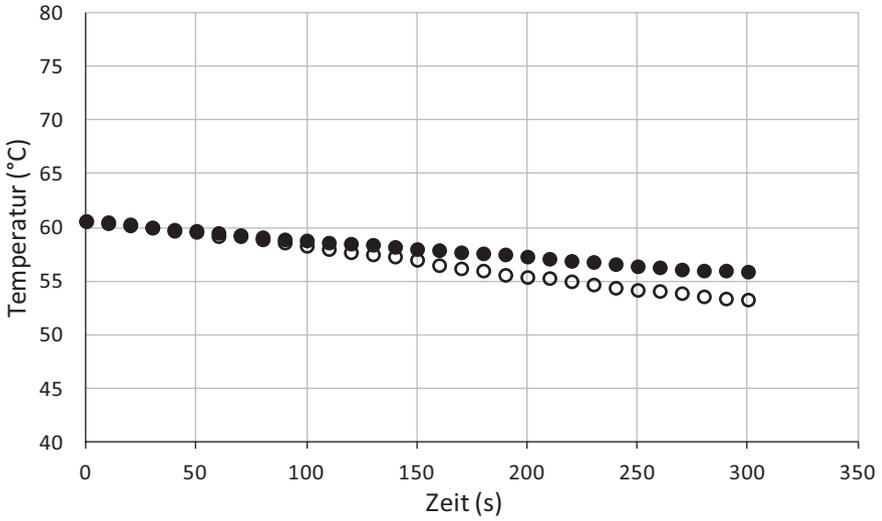


Abb. 1.3 Abkühlkurven eines großen Schwarzen (offene Punkte) und einer Melange (schwarze Punkte)

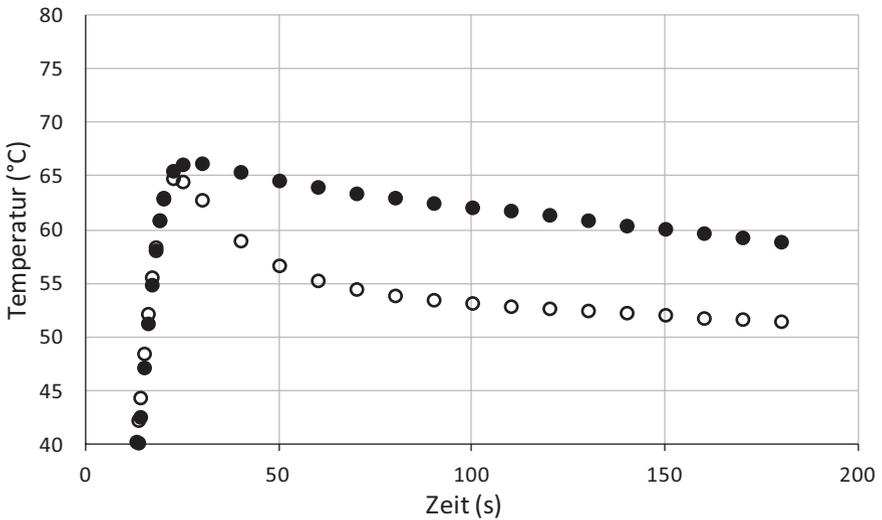


Abb. 1.4 Abkühlkurven eines Kaffees in einer dünnwandigen (schwarze Punkte) und einer dickwandigen Tasse (offene Punkte)

Dafür wurde Kaffee annähernd gleicher Temperatur in eine dickere Tasse (Masse 110 g) und in eine dünnere (45 g) gefüllt. Die dicke Tasse nahm in den ersten 50 s mehr Wärme auf als die dünnere. Danach verlaufen die Abkühlkurven annähernd parallel, der weitere Temperaturabfall war also sehr ähnlich. Dieses Verhalten erklärt auch, warum in italienischen Bars ein Espresso im Stehen, quasi im Vorbeigehen, getrunken werden kann: Die Kombination von relativ wenig Kaffee in eher dicken Tassen garantiert bereits beim Servieren annähernd Trinktemperatur.

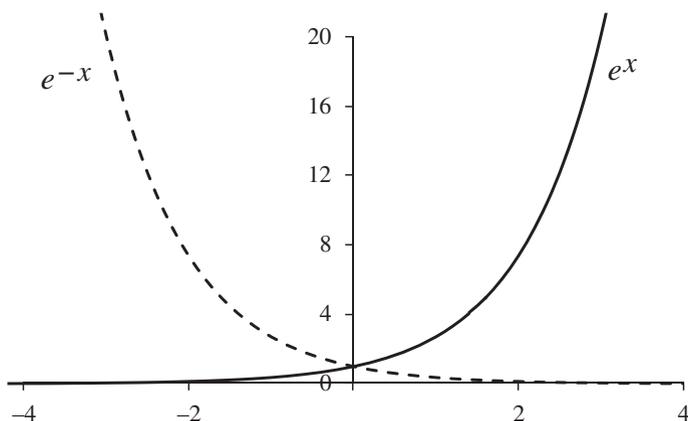


Abb. 1.5 Die Funktionen e^x und e^{-x}

Die Zahl e und die Exponentialfunktion

Die Zahl e ist genau wie die Zahl π eine reelle Zahl. Das heißt, dass sie sich nicht als Bruch von zwei ganzen Zahlen darstellen lässt. Sie ist eine Dezimalzahl mit unendlich vielen Dezimalstellen, die sich nicht wiederholen:

$$e = 2,71828182\dots$$

Das Symbol e für diese Zahl wurde zum ersten Mal 1731 vom Schweizer Mathematiker Leonhard Euler verwendet. Es ist aber nicht bekannt, warum er ausgerechnet den Buchstaben e genommen hat.

Große Bedeutung hat die Zahl e als Basis für die sog. Exponentialfunktion e^x . Diese Funktion spielt in vielen Bereichen der Naturwissenschaften, aber auch der Wirtschaft eine wichtige Rolle. Der radioaktive Zerfall, das Anwachsen eines Kapitals durch Zinsen oder ein mögliches Bevölkerungswachstum sind Beispiele dafür (Abb. 1.5).

Eine Exponentialfunktion ergibt sich, wenn die Änderung einer Größe vom Wert dieser Größe abhängt: Je mehr radioaktive Kerne vorhanden sind, desto mehr zerfallen pro Zeiteinheit; je größer die Bevölkerung ist, desto mehr nimmt sie pro Generation zu. Mathematisch ausgedrückt bedeutet dies, dass die Ableitung der Exponentialfunktion (der Grad der Änderung) wiederum die Exponentialfunktion selbst ist:

$$(e^x)' = e^x$$

Bezüglich der Abkühlung eines Körpers hängt die Temperaturänderung vom betrachteten Zeitraum Δt , von einer Materialkonstante k und von der Temperatur des Körpers T bzw. von der Differenz zur Umgebungstemperatur T_U ab:

$$\Delta T = k \cdot (T_U - T) \cdot \Delta t$$

Dass ΔT von T abhängt, führt zur Exponentialfunktion im Newtonschen Abkühlungsgesetz.

2

Ein Hauch von Parfum

Frau Hofrat steht auf und bewegt sich Richtung Toilette. Der Prokurist atmet tief durch und meint: „Uii, die Dame ist heute wohl ins Parfumfläscherl gefallen. Die zieht ja eine schöne Duftschleppe mit sich herum.“ Der neben Frau Hofrat sitzende Student meint: „Ich würde eher von einer ganzen Duftwolke um die Dame sprechen.“ „Ich habe nichts bemerkt“, meint Karla, die etwas weiter weg sitzt. „Aber wie hätte der Duft auch zu mir kommen sollen? Im Kaffeehaus geht kein Wind, wie soll sich dann das Parfum ausbreiten?“ „Das Parfum ist eine Geruchsquelle. Und von der strömen die Geruchsteilchen einfach nach außen“, gibt der Student eine simple Erklärung. „Ganz kann ich mich dem aber nicht anschließen“, entgegnet der Prokurist. „Wenn die Luft sonst ruhig ist, warum sollen dann ausgerechnet diese Teilchen aus der Geruchsquelle schießen und nach außen fliegen?“



Frau Hofrat erscheint und schlagartig verstummt das Gespräch. „Worüber habt ihr so aufgeregt diskutiert?“, fragt Frau Hofrat. Nach einer Schrecksekunde versucht der Prokurist die Situation zu retten: „In der Küche ist anscheinend was angebrannt. Und wir haben uns überlegt, wie dieser Gestank trotz geschlossener Tür zu uns rauskommen konnte.“ „Komisch, ich habe nichts gerochen, obwohl ich an der Küchentür vorbeigekommen bin. Aber die Antwort ist wohl klar, und aus Erfahrung weiß ich: Gestank verbreitet sich – genauso wie eine üble Nachrede.“

Es ist an dieser Stelle wohl nicht zu klären, ob dieser Vergleich von Frau Hofrat bewusst erfolgte oder unbewusst aus dem Gefühl heraus, dass an der Küchengeschichte vielleicht etwas faul sein könnte.

Damit nicht noch eine weitere peinliche Stille eintritt, schaltet sich der Professor ein. „Dass sich Gerüche und Gerüchte ausbreiten, ist eine wohlbekannte Tatsache. Aber wie dies bei Gerüchen genau vor sich geht, hat niemand Geringerer als Albert Einstein erst vor mehr als 100 Jahren herausgefunden. Wenn gewünscht kann ich versuchen, es zu erklären.“ „Ja, aber bitte so, dass ich es auch verstehe“, stellt Frau Hofrat eine wohl berechnete Forderung.

„Ich möchte mit einem Beispiel und einer Frage an Sie beginnen. Stellen Sie sich vor, ein Seemann kommt vollständig betrunken aus einer Spelunke. Auf dem Weg zu seinem Schiff trifft er auf eine Laterne. Er ist aber bereits so betrunken, dass er ab jetzt nur mehr zufällig einen Schritt nach vorne oder einen zurück machen kann. Die zufälligen Schritte können mit einem Münzwurf verglichen werden: Liegt die Zahl oben, geht er einen Schritt nach vorne in Richtung Schiff, kommt Adler, einen Schritt zurück. Nun meine Frage: Gelangt der Seemann von der Laterne weg? Oder geht er immer nur ein bisschen nach vorne und dann wieder zurück und verbleibt bei der Laterne, bis er wieder nüchtern wird?“



Frau Hofrat ist wieder einmal die Erste, die mit ihrer Meinung vorprescht: „Das ist völlig klar: Er kommt nicht weg. Er kann höchstens einmal ein bisschen weiter wegkommen, dann folgen aber sicher wieder einige Rückschritte. Soll er sich halt nicht so besaufen.“ Die anderen scheinen zumindest über den ersten Teil der Aussage derselben Meinung zu sein. Der Prokurist äußert sogar noch eine bekräftigende Überlegung: „Das ist so wie beim Roulette, da kann auch oftmals hintereinander dieselbe Farbe kommen, aber à la longue erscheinen Rot und Schwarz gleich häufig.“

Der Professor hat wohl keine andere Meinung erwartet.

„Das klingt nicht nur für Sie sehr logisch, sondern für die meisten Leute. Allerdings ist es nicht richtig. Wie schon gesagt, zeigte Albert Einstein 1905 – in dem Jahr hat er auch seine spezielle Relativitätstheorie veröffentlicht –, dass der Seemann mit der Zeit immer weiter von der Laterne wegkommt. Er hat sogar berechnet, wie schnell dies geht, und zwar kommt dabei eine Quadratwurzel ins Spiel: Macht der Seemann insgesamt 100 Schritte, so kommt er im Mittel zehn Schritte – also die Wurzel aus 100 – weg von der Laterne.“

Nach einer gewissen Nachdenkpause meldet sich der Student: „Bei aller Hochachtung vor Ihnen und vor Albert Einstein, aber ich verstehe es einfach nicht. Wenn die Schritte, nämlich vor und zurück, völlig willkürlich sind, woher kommt dann die Gewissheit der Richtung, dass er immer das Schiff erreicht? Das kann doch wohl nicht sein.“ „Nein, da haben Sie völlig recht“, stimmt der Professor zu. „Wohin der Seemann gelangt, ist zufällig, ob zum Schiff oder wieder in die Kneipe zurück. Würde er zehnmal starten, ginge er fünfmal Richtung Schiff und fünfmal zur Kneipe. Einstein hat nur gezeigt, dass er letztlich von der Laterne wekommt und nicht ewig dort herumkreist.“

Der Student lässt nicht locker: „Aber wenn dies stimmt, dann sollte man es doch einfach zeigen können: Wir werfen eine Münze und zeichnen am Papier die Schritte des Seemanns auf. Kommt die Zahl, Schritt nach rechts, beim Adler nach links.“ Dieser Vorschlag wird sofort aufgenommen, und alle versammeln sich um den Tisch des Studenten. Der Student wirft die Münze, der Prokurist protokolliert. Der Professor wird nicht in die Aktivität einbezogen.

Aufmerksam wird verfolgt, wie das Experiment verläuft: Zahl, Schritt nach rechts – Zahl, Schritt nach rechts – Adler, Schritt nach links – Zahl, Schritt nach rechts ... Nach dem zehnten Münzaufwurf wird Frau Hofrat, nach dem zwanzigsten werden auch die anderen ungeduldig. Es ist nämlich kein richtiger Trend zu erkennen. Und außerdem werden das Werfen und Zeichnen langsam langweilig. „Da sieht man ja nichts. Wie lange müssen wir dies denn durchziehen?“ Diese Frage ist jetzt jedoch wieder an den Professor gerichtet. „Im Prinzip haben Sie mit dem Experiment das völlig Richtige gemacht, um meine Aussage zu beweisen oder zu widerlegen. Da das Verhalten aber auf Zufall aufgebaut ist, dauert es doch ziemlich lange, um einen Trend zu erkennen.“ „Heißt das, dass wir dieses blöde Münzaufwerfen einige Hundert Mal machen müssten?“ empört sich Frau Hofrat. „Eigentlich schon“, stimmt der Professor zu. „Aber es gibt Gott sei Dank Computer, die das Würfeln und Berechnen viel schneller durchführen können. Und denen ist es egal, ob man den Seemann zehn, hundert oder tausend Schritte machen lässt. Mit solchen Computerexperimenten lässt sich jedoch das oben genannte Wurzelgesetz sehr schön erkennen. Einstein hatte allerdings noch keine Rechenmaschine zur Hand, er hat das Ergebnis aus physikalischen Überlegungen erhalten.“

„Und was hat dies nun mit dem Parf..., mit dem Küchengeruch zu tun? Macht der Geruch auch kleine Schritte?“, bemerkt Frau Karla eher skeptisch. „Ja, in gewissem Sinne schon. Bekanntlich besteht Luft aus kleinen Teilchen, zu fast 80 % aus Stickstoffmolekülen, zu etwa 20 % aus Sauerstoffmolekülen. Diese Teilchen sind selbst bei ruhiger Luft nicht in Ruhe, sondern sie bewegen sich. Je wärmer die Luft, desto schneller sausen sie herum.“ „Was heißt schnell? Wie schnell sind die wirklich?“, möchte der Prokurist wissen.

„Gewaltig schnell, bei Raumtemperatur etwa 500 m in der Sekunde, das sind 1800 km/h. Allerdings fliegen sie nicht weit, weil sie sofort an ein anderes Molekül stoßen. Der Abstand zwischen zwei Stößen ist im Mittel nur etwa 0,0001 mm. Ein Geruchsteilchen ist viel größer und wird von den Sauerstoff- oder Stickstoffteilchen der Luft angestoßen und etwas weiter bewegt. Da die Luftteilchen von allen Seiten zufällig an das Geruchsteilchen stoßen, haben wir die Situation unseres Seemanns. Allerdings nicht nur vor und zurück, sondern in alle Richtungen.“

„Dass sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Temperatur ändert, kann ich Ihnen in einem sehr einfachen Versuch zeigen.“ Der Professor bestellt bei Herrn Oskar, dem für diese Tische zuständigen Ober, zwei durchsichtige Teegläser, eines mit heißem und eines mit kaltem Wasser, sowie zwei Teebeutel. Nachdem Herr Oskar, den solche ungewöhnlichen Bestellungen kaum aus der Ruhe bringen, serviert hat, hängt der Professor die beiden Teebeutel vorsichtig in die beiden Gläser und ersucht, genau hinzusehen, was passiert.

Während die Runde andächtig in die Gläser schaut, erklärt der Professor weiter:

„Dass sich größere Teilchen in einer Flüssigkeit in einem Zickzackkurs bewegen, wurde zu Beginn des 19. Jahrhunderts bei Bärlappsporen an der Oberfläche einer Flüssigkeit beobachtet. Diese Bewegung wurde fürs Erste einer inneren Lebenskraft zugeschrieben. Der schottische Biologe Robert Brown hat systematische Beobachtungen an alten und damit toten Sporen sowie an Staubteilchen vorgenommen und gesehen, dass das Phänomen allgemein bei kleinen Teilchen in Flüssigkeiten auftritt. Man nennt die Wärmebewegung von Teilchen deshalb auch Brownsche Bewegung.“



Inzwischen sieht man in den beiden Gläsern einen deutlichen Unterschied. Im Glas mit kaltem Wasser schwimmt der Teebeutel nur an der Oberfläche, im warmen Wasser hat sich eine bräunliche Wolke gebildet. „Das hat jetzt auch mich überzeugt“, meint Frau Hofrat. „Und ich verstehe, dass die Ausbreitung von Gestank genauso vor sich geht.“

„Ja, aber nicht nur. Die Ausbreitung aufgrund einer Zufallsbewegung und nach dem Einsteinschen Gesetz wurde inzwischen auf den verschiedensten Gebieten nachgewiesen. Auch der Transport von Material in biologischen Zellen erfolgt zum Teil nach diesem Prinzip. In der Biologie wurde es bei der Bewegung von Ameisen und von Vogelschwärmen gesehen, am Finanzmarkt in der Art, wie Preise steigen. Ein Beispiel gefällt mir besonders gut: Weinbergschnecken waren im Mittelalter eine Delikatesse und wurden speziell in der Fastenzeit als Ersatz für Fleisch von den Mönchen gerne verspeist. Diese führten die Schnecken aus Frankreich ein und züchteten sie in Schneckengärten. Allerdings büxten ihnen laufend Schnecken aus und entkamen in die Umgebung. Man registrierte das erste Auftreten von Weinbergschnecken an den verschiedenen Orten und hielt es in Chroniken fest. Daraus konnte man erstens erkennen, dass sich die Schnecken rund um Klöster verbreiteten. Zweitens konnte man nachträglich auch sehen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit dem Einsteinschen Gesetz folgte. Leider weiß ich nicht mehr, wo ich dies gelesen habe. Das Pensionsalter schlägt halt doch schon zu.“

„Das ist wirklich faszinierend, dass das System auch bei Schnecken funktioniert, selbst wenn die keine besoffenen Schritte machen oder gestoßen werden“, beschließt Frau Hofrat den Diskurs.

Diffusion

Der physikalische Begriff für die diskutierte Ausbreitung von Stoffen ist die Diffusion. Diffusion ist ein selbst ablaufender Prozess. Auf Diffusion beruht die Durchmischung zweier anfangs getrennter Substanzen; sie bewirkt auch den Ausgleich der Konzentrationsunterschiede einer Substanz. Unter Selbstdiffusion wird die Bewegung eines Teilchens in einem Medium verstanden.

Die Selbstdiffusion von Teilchen hat Albert Einstein in seiner Arbeit *Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen* untersucht. Er schreibt in der Einleitung: „Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der so genannten ‚Brownschen Molekularbewegung‘ identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.“ Heute wissen wir, dass Einstein mit dieser Arbeit die theoretische Grundlage der Brownschen Bewegung geschaffen hat.

Einstein zeigte, dass der mittlere Abstand x_m eines Teilchens vom Anfangsort $x_0 = 0$ nach einer Zeit t aufgrund der Wärmebewegung der Teilchen durch folgende Gleichung gegeben ist:

$$x_m = \sqrt{2 \cdot D \cdot t}$$

D ist die Diffusionskonstante, die in etwa als Maß für die Geschwindigkeit der Ausbreitung gesehen werden kann. Die Diffusionskonstante von Jod in Luft beträgt zum Beispiel $D = 8,5 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$. Daraus ergibt sich die Ausbreitung von Jod in die Umgebungsluft: In 1 min kommt Jod im Mittel etwa 3 cm weit und in 10 min etwa 10 cm; es geht also eigentlich relativ langsam.

Das große Verdienst von Einstein bestand darin, die Diffusionskonstante aus anderen Größen des Systems herzuleiten:

$$D = \frac{R \cdot T}{N_A} \cdot \frac{1}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot a}$$

R ist die allgemeine Gaskonstante, die den Druck, das Volumen und die Temperatur T der des Gases in Relation zueinander setzt. N_A , die Avogadro-Zahl, gibt die Anzahl der Teilchen an, η ist ein Maß für die Zähigkeit der Flüssigkeit und a der Radius des Brownschen Teilchens.

1906 kam der österreichisch-polnische Physiker Marian Smoluchowski unabhängig von Einstein zum selben Resultat.