

# Die Brownsche Bewegung.

Von A. Linsmeier S. J. in Innsbruck.

## A. Beschreibung.

Bald nach Erfindung der achromatischen Objektive entdeckte der Engländer Brown die nach ihm benannte „Brownsche Bewegung“ (1827). Man beobachtet sie an Teilchen, welche in einer Flüssigkeit schweben und so klein sind, dass man sie nur mit einem guten Mikroskop sehen kann. Je kleiner die Teilchen sind, um so lebhafter ist ihre Bewegung. Im Ultramikroskop werden noch Teilchen sichtbar, die ein gewöhnliches, wenn auch noch so gutes Mikroskop nicht mehr sehen lässt.

Professor Perrin, ein französischer Physiker der Gegenwart, beschreibt diese Bewegung also: Man bemerkt, „dass jedes in der Flüssigkeit befindliche Teilchen, anstatt je nach seiner Dichte zu fallen oder zu steigen, ganz und gar unregelmässige Bewegungen ausführt. Es geht und kommt, bleibt stehen, geht wieder weiter, wirbelt durcheinander, steigt, fällt, steigt wieder, ohne jemals zum gänzlichen Stillstand zu gelangen“<sup>1)</sup>.

In neuester Zeit wird mit Eifer und vielem Erfolg das Studium der Kolloide betrieben; hierbei gibt es vielfach Gelegenheit, die Brownsche Bewegung zu beobachten. Ein Forscher auf diesem Gebiete schreibt: „Die Erscheinung solcher ultramikroskopischer Teilchen, die nahe an der Grenze der Sichtbarkeit bei Sonnenlicht stehen, ist eine überraschend glänzende. Die Bewegung ist ungemein lebhaft, wie ein Schwarm tanzender Mücken im Sonnenlicht; es gibt da ein Hüpfen, Tanzen und Springen, ein Zusammen- und Auseinanderfliegen . . . Die Teilchen durcheilen fast blitzschnell in zickzackförmiger Bewegung das Gesichtsfeld (Zsigmondi). Eine naturgetreue Vorstellung dieser ultramikroskopischen Bewegung . . . erhält man jedoch nur durch eigene Anschauung“<sup>2)</sup>.

Schreiber dieser Zeilen hat selbst wiederholt Gelegenheit gehabt, die Brownsche Bewegung zu sehen. Hierbei wurde eine stark verdünnte Gummigutti-Lösung (ein vegetabilischer gelber Farbstoff) verwendet, ein Tropfen

<sup>1)</sup> Prof. Dr. J. Perrin, Die Brownsche Bewegung und die wahre Existenz der Moleküle. Uebersetzt von Dr. J. Donau (Dresden und Leipzig 1910, Theodor Steinkopf), S. 5.

<sup>2)</sup> Dr. Viktor Pöschl, Einführung in die Kolloidchemie (3. Aufl. Dresden und Leipzig 1911, Steinkopf), S. 56.

davon auf eine Glasplatte gebracht und mit einem sogenannten Deckgläschen zugedeckt. Das Mikroskop vergrösserte beiläufig 300—500 mal. Die Versuchsanordnung war nicht die beste, wie sie im zweiten Zitat angedeutet wird. Die Erscheinung war aber doch vollkommen deutlich zu sehen.

Professor Perrin hat die Erscheinung mit einem Projektionsapparat im vollständig verfinsterten Zimmer für eine grössere Zahl von Personen ersichtlich gemacht. Anderen ist sogar die kinematische Aufnahme dieser Bewegungen gelungen.

Die Brownsche Bewegung blieb durch Jahrzehnte hindurch ziemlich unbeachtet; wohl beschäftigten sich hie und da vereinzelt Physiker damit, aber erst die umfassenderen Arbeiten M. Gouys in den Jahren 1888, 1889 und 1895 weckten ein allgemeineres Interesse für diese Erscheinung und ihre Erklärung. „Die Arbeiten Gouys erregten sofort grosses Aufsehen, und erst seit dieser Zeit nahm die Brownsche Bewegung einen Rang unter den hervorragenden Problemen der theoretischen Physik ein“<sup>1)</sup>.

Mannigfaltiger, als es bis dahin geschehen war, änderte Gouy die äusseren Umstände ab; er beobachtete bei Tag, bei Nacht, in einem Stollen, auf freiem Feld, in belebter Strasse, bei möglichst schwacher und bei starker Belichtung der Teilchen, bei Licht verschiedener Spektralfarben. Bei all diesen und noch weiteren Aenderungen der äusseren Umstände blieb die Erscheinung unverändert.

Bringt man ein feines Pulver in Wasser und rührt um, dann kommen die Teilchen in lebhafte Bewegung, dabei bewegen sich benachbarte Teilchen in gleicher oder nahezu gleicher Richtung, überdies wird die Bewegung mit der Zeit immer geringer und zuletzt unmerkbar. Ganz anders ist die Brownsche Bewegung, sie bleibt immer gleich lebhaft, und zwei benachbarte Teilchen bewegen sich ohne Zusammenhang jedes selbständig für sich. Infolge der Belichtung entstehen zwar Strömungen im beobachteten Tropfen und die schwebenden Teilchen bewegen sich gemeinschaftlich in der Strömungsrichtung, dabei vollführt aber jedes Teilchen noch seine eigene Zickzackbewegung, es findet keine Aehnlichkeit statt in den Zickzackwegen zweier benachbarter Teilchen. Die Lebhaftigkeit der Bewegung ist grösser in Flüssigkeiten mit kleineren Reibungskoeffizienten, sie nimmt bei Temperatursteigerung zu.

### B. Erklärung.

Sieht man die Brownsche Bewegung das erste Mal, dann wird man wohl gleich an die lebhafte Bewegung erinnert, welche ein Mückenschwarm im Sonnenlichte vollführt. Aber schon Brown hat nachgewiesen, dass es sich in diesem Falle nicht um Lebewesen handeln kann. Es ist ja nicht schwer, eine Flüssigkeit vollkommen zu sterilisieren.

<sup>1)</sup> Perrin a. a. O. S.

Noch ein anderer Vergleich liegt nahe, nämlich das mannigfaltige Durcheinander von Bewegungen, welche die Sonnenstäubchen vollführen. Die Erscheinung ist bekannt. Diese Bewegungen werden hervorgerufen durch sanfte Luftströmungen, welche eintreten infolge geringer Wärme- und Druckunterschiede in der Luft. Bei genauerem Zusehen kann man bemerken, dass sich benachbarte Teilchen in gleicher oder nahezu gleicher Richtung bewegen. Bei der Brownschen Bewegung findet diese Gleichheit nicht statt; wenn sich Strömungen in der Flüssigkeit einstellen, so unterscheidet man doch die gleichgerichtete Strömungsbewegung benachbarter Teilchen von ihren Zickzackbewegungen, letztere allein sind Brownsche Bewegungen.

Nach Gouys mannigfaltigen Versuchen sind äussere Ursachen der Brownschen Bewegungen ausgeschlossen. Aber auch abgesehen von diesen Versuchen können wir uns eine äussere Ursache nicht denken, welche auf ein und dasselbe schwebende Teilchen rasch aufeinander folgend bald anziehend bald abstossend, jetzt nach rechts, dann nach links, plötzlich wieder nach oben oder nach unten ablenkend wirkt. Die Ursache der Brownschen Bewegung muss in der Flüssigkeit selbst liegen. Diese Ursache muss benachbarte Teilchen (in der Regel) nach verschiedenen Richtungen bewegen, sie muss ein und dasselbe Teilchen in rascher Abwechslung bald in dieser bald in jener Richtung bewegen, sie muss unbegrenzt andauernd wirken, sie muss kleinere schwebende Teilchen lebhafter bewegen als grössere. Es ist keine andere Ursache denkbar, welche all das zu bewirken vermöchte, als die bisher hypothetische Molekularbewegung. Nach dieser Hypothese sind die Molekeln (der Gase und) der Flüssigkeit in dauernder Bewegung, infolge ihrer Zusammenstösse ändern sie jeden Augenblick ihre Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit. Ist die Energiesumme der Molekelstösse, welche das schwebende Teilchen von einer Seite her treffen, grösser als die auf der Gegenseite, so muss sich das Teilchen im Sinne der ersten bewegen. (Von den Stössen, welche den betreffenden Querschnitt des Teilchens schief treffen, ist die Normalkomponente in Betracht zu ziehen.) Nur durch diese andauernde und ganz unregelmässige Molekelbewegung wird es begreiflich, dass die Brownsche Bewegung andauernd bleibt, dass benachbarte Molekeln gleichzeitig in ganz verschiedener Richtung sich bewegen, dass dieselbe Molekel nacheinander in den verschiedensten Richtungen des Raumes sich bewegt.

Es wurden zwar Versuche unternommen, die Brownsche Bewegung auf andere Weise als durch Molekularstösse zu erklären; sie waren aber alle unbefriedigend, teilweise auch unvereinbar mit beobachteten Tatsachen<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Näheres hierüber ist zu finden in dem Werk von L. Cassuto, Der kolloide Zustand der Materie, übersetzt von J. Matula (Dresden und Leipzig 1913, Theod. Steinkopf). S. 48. — Eingehender werden diese Erklärungsversuche widerlegt in den „Annalen der Physik“ 1906, S. 759–764.

Mit Berechtigung sehen daher die Physiker in der Brownschen Bewegung einen augenfälligen Beweis für die bisher hypothetische Molekularbewegung<sup>1)</sup>. Was der Foucaultsche Pendelversuch für den Beweis der Axendrehung der Erde ist, das ist die Brownsche Bewegung für den Beweis der Molekularbewegung und der Atomtheorie überhaupt.

### C. Lösung eines experimentellen Widerspruches durch die Brownsche Bewegung.

Die Experimente, welche hier zu besprechen sind, gelten der Aufindung des sogenannten Elementarquantums der Elektrizität (Elektron), d. h. jener Elektrizitätsmenge, welche bei der Elektrolyse von einem einzelnen Wasserstoffatom zur Kathode übergeführt wird, oder der ihr gleichen Elektrizitätsmenge, welche ein Kathodenstrahlteilchen in der Röntgenröhre, oder ein  $\beta$ -Teilchen der radioaktiven Körper besitzt.

Eine genauere Beschreibung der Apparate, der Versuche und der Berechnungsmethoden wäre weitläufig, für den vorliegenden Zweck genügt eine Andeutung des Wesentlichsten. In einem kleinen allseitig abgeschlossenen Raum liegen zwei Metallplatten einander gegenüber, sie sind isoliert, ebenso die Drähte, welche von ihnen zu den Polen einer konstanten Batterie führen. Die Platten können von der Batterie aus bequem geladen, umgeladen und wieder entladen werden. Die Platten bilden einen Luftkondensator.

Der Physiker Millikan ionisierte die Luft zwischen den Platten und blies mittelst eines Zerstäubers winzige Oeltröpfchen in den Zwischenraum. Die durch das Ionisieren frei gewordenen Elektronen lagerten sich an die Oeltröpfchen an und machten sie elektrisch. Nun beobachtete er das Fallen eines einzelnen Tröpfchens mit dem Mikroskop; war dieses der unteren Platte nahegekommen, dann lud er das Plattenpaar so, dass das Tröpfchen infolge Abstossung gehoben wurde; war das Tröpfchen der oberen Platte nahegekommen, dann entlud er das Plattenpaar, und das Tröpfchen begann wieder zu fallen. Er beobachtete das Fallen und Steigen des Tröpfchens mehreremale. Eine Mikrometerteilung auf Glas, im Brennpunkt des Okulars

<sup>1)</sup> So schliesst z. B. Dr. Walter Nernst die Besprechung der Brownschen Bewegung mit folgendem Satze ab: „Angesichts so augenfälliger Bestätigungen der Auffassung, die uns die kinetische Theorie über die Welt der Moleküle liefert, wird man zugestehen müssen, dass diese Theorie ihren hypothetischen Charakter zu verlieren beginnt“ (Theoretische Chemie, 6. Aufl. Stuttgart 1909, Ferd. Enke, S. 212). Dr. Max Planck, eine andere Zelebrität der Universität in Berlin, urteilt: „Die kinetische Theorie . . . hat in der Erklärung der sogenannten Brownschen Bewegung den direkten, sozusagen handgreiflichen Beweis für ihre Berechtigung und ihre Notwendigkeit geliefert“ (Vortrag in der Naturforscher-Versammlung 1910, abgedruckt in der „Naturwissenschaftlichen Rundschau“ 1910, S. 523).

angebracht, ermöglichte die genaue Messung der Wegelänge. Er fand, dass die Fallzeiten desselben Teilchens durch ein und dieselbe Wegstrecke unter sich gleich waren<sup>1)</sup>. Theoretisch abgeleitete Formeln gestatteten, die Ladung und Masse des Tröpfchens zu berechnen, denn alle anderen Grössen der Formeln waren entweder schon anderweitig bekannt oder aus dem Versuche zu entnehmen. Millikan wiederholte seine Versuche an vielen Tröpfchen und an jedem einzelnen mehreremale. Alle Werte, welche er hierbei für die Elementarladung ( $e$ ) fand, wichen nur wenig voneinander ab und lagen um  $e = 4.9 \times 10^{-10}$  e. st. e herum.

Ein anderer Physiker, Ehrenhaft, beobachtete nach derselben Methode, zerstäubte aber nicht Oel, sondern verschiedene Edelmetalle im elektrischen Bogen. Diese Teilchen kamen schon vom Bogen her elektrisch geladen in den Beobachtungsraum. Er beobachtete aber bei jedem Teilchen nur je eine Fall- und Steigzeit. Die  $e$ -Werte, welche er ähnlich wie Millikan berechnete, wichen sehr weit (um einige Einheiten) von einander ab. Er war deshalb der Ansicht, dass es eine konstante Elementarladung ( $e$ ) nicht gebe. Zwischen den Resultaten von Millikan und Ehrenhaft bestand somit ein greller Widerspruch.

An der Bearbeitung dieser Streitfrage beteiligten sich mehrere Physiker, eine Klärung brachte endlich Professor Edmund Weiss von der Prager deutschen Universität<sup>2)</sup> insofern, als er die Tatsache feststellte, dass mikroskopisch kleine Teilchen bei unveränderter Fallhöhe sehr verschiedene Fallzeiten aufweisen. Er wiederholte Ehrenhafs Versuche, indem er chemisch reines Silber im elektrischen Bogen zerstäubte. Er machte aber an jedem Teilchen nicht bloss eine Doppelbeobachtung, wie Ehrenhaft meistens tat, sondern viele (20 und darüber). Diese Beobachtungen wiederholte er an vielen verschiedenen Teilchen. Dabei stellte sich heraus, dass die einzelnen Fallzeiten desselben Teilchens durch die gleiche Höhe sehr verschieden waren, öfters ums doppelte und mehr, überhaupt um so mehr, je kleiner die Teilchen waren. Ehrenhafs Berechnung und Resultat hing daher sehr vom Zufall ab.

Diese Verschiedenheit der Fallzeiten wird durch die Brownsche Bewegung verständlich. Ueberdies berechnete Ehrenhaft seine Beobachtung nach einer älteren Formel (von Stokes), in welcher auf die Brownsche Bewegung keine Rücksicht genommen ist; Weiss rechnete sowohl nach dieser als auch nach einer neueren (von Einstein), in welcher die Brownsche

<sup>1)</sup> Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik. Bd. 8 (1911), S. 434. Es wurde ein und dasselbe Tröpfchen ununterbrochen  $4\frac{1}{2}$  Stunden beobachtet, die Fallzeit im Erdfeld für 1'01 cm Weg war 23 Sek. Die Abweichungen hiervon betrug nur wenige Zehntel einer Sekunde, mit Ausnahme nur eines Falles (23.9 Sek.). Die Fallzeit wurde 17 mal beobachtet und gemessen.

<sup>2)</sup> Sitzungsberichte der Wiener Akademie der Wissenschaften, Abteilung IIa (1911) S. 1021—1073.

Bewegung berücksichtigt wird, und die „theoretisch und experimentell viel sicherer begründet ist“ (Weiss 1030). Die Rechnung nach der Stokesschen Formel lieferte ihm  $\epsilon$ -Werte, die zwischen  $1\frac{1}{3}$  und  $4\frac{1}{5} \times 10^{-10}$  ziemlich gleichmässig verteilt waren; die Berechnung nach Einstein dagegen lieferte Werte, die sämtlich zwischen 4 und  $5 \times 10^{-10}$  lagen (1035)<sup>1)</sup>. Zwischen denselben Grenzen, meistens näher der oberen, liegen die  $\epsilon$ -Werte, welche in den letzten Jahren verschiedene Physiker teils auf dem beschriebenen Wege, teils auf anderen wesentlich verschiedenen Wegen gefunden haben. Hierüber wurde Genaueres bereits im Philos. Jahrb. Bd. 25 (1912) S. 5 f. mitgeteilt.

Es kann zur Klärung dienen, wenn noch etwas angefügt wird über den Einfluss, welchen die Brownsche Bewegung auf die Fall- und Steigzeit kleiner Teilchen ausübt. Wegen der vollständigen Unregelmässigkeit der Molekelbewegungen in Gasen wird die Summe aller Molekelstösse, welche gleichzeitig ein Flächenelement treffen, in verschiedenen Zeitmomenten verschieden gross sein. Hat die getroffene Fläche eine merkliche Ausdehnung, dann wird die Summe der Molekelstösse auf die ganze Fläche nahezu gleich bleiben, weil das Zuviel mancher Flächenelemente durch das Zuwenig anderer ausgeglichen wird.

Die Oeltröpfchen Millikans und die Metallstäubchen Ehrenhafts wurden beim Fallen nicht bloss durch die Erdanziehung beeinflusst, sondern auch durch die Molekelstösse von oben herab und von unten hinauf; erstere verringern die Fallzeit, letztere verlängern sie. Der Querschnitt der Oeltröpfchen war sehr viel grösser als jener der Metallstäubchen aus zwei Gründen. Die nach den früher erwähnten Formeln berechnete Masse war bei jenen tatsächlich grösser als bei diesen; sodann haben Oeltröpfchen wegen ihrer weit geringeren Dichte selbst bei gleicher Masse mit den Metallstäubchen ein viel grösseres Volum und grösseren Querschnitt als diese. Wegen des viel grösseren Querschnittes der Oeltröpfchen erreichten die Stösse von oben und ebenso die von unten einen gleichbleibenden Mittelwert und hoben sich auf. Das folgt daraus, dass Millikan bei einem und demselben Tröpfchen konstante Fallzeiten fand (dieser Schluss ist hier berechtigt, weil unter B die Abhängigkeit der Brownschen Bewegung von der Molekularbewegung der Flüssigkeit nachgewiesen worden ist). Bei dem viel kleineren Querschnitt der Metallstäubchen war die Energiesumme der Stösse von oben in verschiedenen Zeitmomenten um so mehr verschieden, je kleiner die Teilchen waren; dasselbe gilt von den Stössen, welche von

<sup>1)</sup> Millikan rechnete nach einer „verbesserten“ Stokesschen Formel; Ehrenhaft rechnete mit der ursprünglichen Formel von Stokes, weil durch die „verbesserte“ nur die Rechnung vermehrt, die Verschiedenheit der Resultate aber nicht vermindert worden sei. Auch die „verbesserte“ Formel berücksichtigt die Brownsche Bewegung nicht. Millikans Teilchen waren so gross, dass die Brownsche Bewegung keinen erkennbaren Einfluss hatte.

unten her erfolgten. Ein Gleichsein und Sichaufheben der entgegengesetzten Stösse könnte verhältnismässig nur selten erfolgen; deshalb waren die Fallzeiten veränderlich. Hieraus ist zunächst zu ersehen, dass mit zerstäubten Öltröpfchen viel eher ein zuverlässiger Wert der Ladungseinheit ( $e$ ) zu gewinnen ist als mit Metallteilchen, die durch Zerstäubung im elektrischen Bogen erzeugt werden. Weiterhin folgt dann noch, dass die Brownsche Bewegung aus der Molekelbewegung nicht bloss irgendwie erklärt wird, sondern dass jene aus dieser mit ersichtlicher Notwendigkeit folgt, was für die Güte der Erklärung von Belang ist. Noch mehr, Prof. Perrin hat aufgrund mehrerer Versuche eine theoretische Formel abgeleitet, welche die lebendige Kraft eines schwebenden kleinen Teilchens zu berechnen gestattet; er fand hierfür einen Wert, welcher der Grössenordnung nach mit den in der kinetischen Gastheorie abgeleiteten Werten für Moleküle übereinstimmt. Ein grosser Teil seines eingangs zitierten Werkchens behandelt die hierauf bezüglichen Experimente und die dazu gehörige Theorie.

Man hat versucht, die Verschiedenheiten in den  $\tau$ -Werten Ehrenhafts durch Abweichung der beobachteten Teilchen von der Kugelform zu erklären; Stokes' Formel setzt nämlich Kugelform der Teilchen voraus, jede Abweichung hiervon verlängert die Fallzeit. Eine andere Ursache glaubte man in einer Dichteänderung der Teilchen gegenüber dem gewöhnlichen Metall vermuten zu dürfen. Diese Aenderung konnte entstehen durch Krystallisieren der Teilchen beim Abkühlen oder durch chemische Verbindung der Teilchen mit Gasen im Lichtbogen. Es wurde auch die Ansicht ausgesprochen, dass diese winzigen Metallteilchen eine schwammartige Struktur haben könnten, wodurch Dichte und Luftreibung geändert würden. Diese Ursachen mögen immerhin wirksam sein, ihr Einfluss könnte aber doch nur untergeordnete Bedeutung haben. Dies scheint aus den zahlreichen Beobachtungen zu folgen, welche Weiss an je einem Teilchen angestellt hat, nämlich 20 und mehr, er fand sehr verschiedene Fallzeiten bei ein und demselben Teilchen, selbst ums doppelte und darüber verschieden.

Die Beobachtung geschah bei gewöhnlicher Temperatur; das feste Metallteilchen hat daher zwischen den einzelnen Beobachtungen Gestalt, Dichte und Struktur nicht mehr geändert. Bei gleichbleibender Beschaffenheit des Teilchens wird die grosse Verschiedenheit der Fallzeiten sehr schwer glaublich, dagegen aus der unregelmässigen Brownschen Bewegung bzw. den ganz unregelmässigen Molekularstössen auf die Ober- und Unterseite des Teilchens leicht begreiflich<sup>1)</sup>. Zu berücksichtigen ist überdies,

<sup>1)</sup> Einige Zahlenangaben dürften noch überzeugender wirken als die allgemeinen Aussagen. Die letzten und besten Beobachtungen von Weiss sind in seiner „Tabelle IV“ (S. 1059) enthalten. Ich habe mir die Angaben nach der Teilchengrösse fallend geordnet, es sind 24 verschiedene Teilchen. Die Massen des grössten und kleinsten verhalten sich wie 384 : 53. Beim grössten wurden 89 Beobachtungen gemacht, die Fallzeiten durch dieselbe Höhe schwankten

dass Weiss bei Berechnung nach Stokes weit voneinander abweichende  $\epsilon$ -Werte fand (1'3 bis 4'5), dagegen sehr viel näher aneinander liegende (sämtlich zwischen 4 und 5), wenn er nach Einstein rechnete; letzterer berücksichtigt in seiner Formel die Brownsche Bewegung, ersterer dagegen nicht. Das spricht ebenfalls sehr nachdrücklich für die oben gegebene Lösung des Widerspruches zwischen den Resultaten von Millikan und Ehrenhaft.

zwischen 6'6 und 10'1 Sekunden; beim kleinsten 30 Beobachtungen, Schwankung 8'8—26'5 Sek. Die Differenzen zwischen grösster und kleinster Fallzeit bei den 24 beobachteten Teilchen (nach ihrer Masse fallend geordnet) waren der Reihe nach: 3'5, 3'5, 2'5, 4'2, 5'3, 6'3, 4'5, 4'1, 5'2, 5'6, 6'3, 6'4, 5'9, 7'1, 11'6, 9'6, 13'6, 9'5, 9'0, 12'0, 7'7, 11'2, 12'9, 17'7. — Daraus ist zu ersehen, dass mit Abnahme der Masse die Unterschiede zwischen grösster und kleinster Fallzeit im ganzen immer grösser werden; das Ansteigen erfolgt aber recht unregelmässig. Aus dem früher Gesagten wird es begreiflich, dass der Einfluss der Molekularstösse um so grösser wird, je kleiner das Teilchen ist. Da kann es nicht befremden, dass die Schwankung der Fallzeiten grösser wird, wenn die Teilchenmasse abnimmt; ebenso dass die Zunahme viele Unregelmässigkeiten aufweist. Die Unregelmässigkeiten der Molekularstösse werden durch die Unregelmässigkeiten der Fallzeiten ersichtlich. Bei den anderen angeführten Ursachen bleiben diese ein Rätsel.