

Scott Curtis

# Die kinematographische Methode

## Das ‹Bewegte Bild› und die Brownsche Bewegung

Die Zeit würde fliehen, ich bändige sie.

– Charles Cros [1877]<sup>1</sup>

Das menschliche Wissen von der Materie ist Wissen um ihre Bewegungsformen.

– Mao Zsedong [1937]<sup>2</sup>

Ende 1907 präsentierte der junge Physiker Max Seddig in Marburg seine in langen Messreihen ermittelten Forschungsergebnisse «Ueber die Abhängigkeit der Brown'schen Molekularbewegung von der Temperatur».<sup>3</sup> Für seinen Versuch, die Argumente für und gegen das kinetische Molekularmodell von Hitz zu klären und gleichzeitig eine partielle Bestätigung von Albert Einsteins Theorien zur Brownschen Bewegung zu geben, stellte Seddig ein Gerät her, das bewegte Bilder von mikroskopischen Partikeln – angeregt durch molekulare Aktivität – aufzeichnen sollte. Seddigs Kombination aus Mikroskop und Kinematograph ermöglichte die objektive Aufzeichnung der Brownschen Bewegung. Auf deren Grundlage vermochte er die Partikelgeschwindigkeit zu berechnen. Dennoch war es nicht in erster Linie die Objektivität der Aufzeichnung, die Seddig unterstrich und pries, sondern die Fähigkeit der Maschine Zeitintervalle präzise zu messen. Seddigs Vorgehen steht repräsentativ für den Gebrauch des Films in der zeitgenössischen Forschung: so sehr die Wissenschaftler auch die Fähigkeit des Kinos bewunderten, flüchtige und sogar unsichtbare Phänomene einzufangen, noch mehr schätzten sie dessen Fähigkeit, ein Ereignis zerlegen und dessen zeitliche sowie räumliche Komponenten messen zu können.

Die Wissenschaftler benutzten den Film von seinen frühesten Anfängen an als Forschungsinstrument. Die bekannten Experimente von Eadweard Muybridge oder Etienne-Jules Marey bilden dabei nur einen kleinen Ausschnitt aus

1 «Time would flee, I subdue it» – Charles Cros (1964), S. 135–136, obige Übersetzung des Zitats, J. S.

2 «Man's knowledge of matter is knowledge of its forms of motion.» – Mao Zedong (1965), S. 319, obige Übersetzung des Zitats, J.S.

3 Seddig (1907), vgl. auch Seddig (1908), (1909), (1912) und (1912a).

dem breiten Anwendungsspektrum, das die Wissenschaft für das neue Medium fand. Forscher aus einer Vielzahl von Disziplinen – darunter Biologie, Botanik, Militäringenieurwesen, Arbeitswissenschaft, Meteorologie, Neurologie, Psychologie, Medizin, Physik usw. – bemächtigten sich der neuen Medientechnik. Wenn in den ersten zwanzig Jahren auch noch keine der Disziplinen (vielleicht mit Ausnahme der Medizin) für sich eine ausgedehnte Anwendung der Kinetographie beanspruchen konnte – die Apparatur war einfach zu teuer, zu klobig und zu kompliziert in der Handhabung –, so wurde sie doch in nahezu jedem Forschungsfeld auf die eine oder andere Weise benutzt. Mit gutem Grund: die Filmtechnik lockte den unerschrockenen Forscher mit eine Reihe von Vorteilen. Gleich der unbewegten Photographie liefert auch die Filmkamera eine mechanische und automatische, also eine «objektive» Aufzeichnung, die sich kaum anzweifeln lässt. Sie untermauerte wissenschaftliche Thesen mit dem Gewicht substantieller Beweiskraft.<sup>4</sup> Das indexikalische Bild der Photographie bietet ebenso wie das anderer graphischer Aufzeichnungstechniken (etwa des Elektrokardiographen) eine sofortige und permanente Aufzeichnung von jedem gegebenen Phänomen – eine Aufzeichnung, die man zudem mit Leichtigkeit aufbewahren und verbreiten kann.<sup>5</sup> Und weil das photographische Bild projizierbar und reproduzierbar ist, lässt es sich sowohl für Demonstrationen als auch für Experimente nutzen. Tatsächlich fand sich ein Filmprojektor aber eher im Hörsaal als im Laboratorium.<sup>6</sup>

Anders als die Standphotographie bot der Film nun eine einzigartige Möglichkeit, die Ereignisse so aufzuzeichnen, wie sie sich in der zeitlichen Dimension vollziehen. Dieses singuläre Merkmal besaß eine Reihe von Vorzügen. Die Kamera an sich kann als unermüdliche mechanische Prothese für das Auge des Wissenschaftlers agieren, als ein rastloser Beobachter von Ereignissen, der in der Lage ist, die leiseste Veränderung einzufangen ohne auch nur mit dem Auge zu zwinkern. Darüber hinaus hat der Wissenschaftler die Möglichkeit, die Zeit bei der Aufnahme (oder bei der Projektion) des Films durch verschiedene Geschwindigkeiten zu manipulieren. Sich langsam bewegende Gegenstände lassen sich mit Zeitraffer-Techniken beschleunigen, sich schnell bewegende Phänomene dagegen durch Hochgeschwindigkeitsaufzeichnung verlangsamen. Folglich werden temporale Ereignisse, die für unsere gewöhnliche Wahrnehmung unsichtbar sind, «sichtbar». Das Kino avanciert zu einem Mikroskop oder auch

4 Zur Frage der «mechanischen Objektivität» siehe Daston/Galison (1992).

5 Zur graphischen Methode siehe Borell (1986), Cartwright (1992), Cartwright (1995) insbes. S. 1–16 und Brain (2002).

6 Zur Differenz zwischen Instrumenten für das Experimentieren und für das Demonstrieren siehe Hankins/Silverman (1995), S. 37–71.

Teleskop der Zeit und bringt die fernen Naturwunder in der vierten Dimension näher an uns. Schließlich kann die Filmkamera auch als präzises Messinstrument agieren. Wenn eine bestimmte Menge Film mit einer festgesetzten Bildzahl pro Sekunde durch die Kamera läuft, und ein Phänomen sich über eine gewisse Distanz bewegt, so kann der Wissenschaftler die Geschwindigkeit der aufgezeichneten Bewegung berechnen. Das galt als einer der fesselndsten Aspekte des wissenschaftlichen Potentials von Film, und die Forscher wandten bemerkenswerte Energie auf, um diese Möglichkeit zu perfektionieren. Seddigs Kombination aus Mikroskop und Kinematograph ist eines unter vielen Beispielen, die Kinotechnik für den praktischen Zweck einzurichten und flüchtige Phänomene zu erforschen und Hypothesen zu überprüfen.

Neben derartigen praktischen Interessen existiert aber auch eine theoretische oder philosophische Verbindung zwischen Kino und Wissenschaft. Der nahezu sofortige Zugriff der Wissenschaftlergemeinschaft auf den Film bezeugt eine Verbindung, die weit über die bloße praktische Dienlichkeit hinausgeht. Offenbar bestand eine natürliche Anziehung zwischen dem Film und der wissenschaftlichen Forschung – eine Anziehung, die nicht allein vom Vermögen des Kinematographen zur Aufzeichnung abhängt, sondern sich auf die Grundform des Kinos selbst bezieht. Henri Bergson bot mehr als einen Fingerzeig, als er 1907 verkündete, dass die moderne Wissenschaft dem «kinematographischen Mechanismus» (Bergson 1912, S. 276) folge. Was heißt das, und wie manifestiert sich die Anziehung zwischen Kino und Wissenschaft in der Beziehung von wissenschaftlichem Experiment und Theorie? Wenn der Kinematograph 1907 – als Seddig ihn benutzte – noch als relativ marginale Forschungstechnologie galt, so behandelte Bergsons Werk *Schöpferische Entwicklung*, das im selben Jahr erschien, das Medium bereits als zentral für das Verständnis wissenschaftlicher Wahrnehmung schlechthin. Aber Bergsons Interesse richtete sich nicht auf das Kino selbst – es bot ihm eine Analogie, ein Modell für das Verstehen einer Fehlwahrnehmung der Welt durch die Wissenschaft (und durch uns).

Bergson richtet seine holistische und vitalistische Philosophie gegen jenen mechanistischen Zugang zur Lebenswelt, den er in den modernen wissenschaftlichen Methoden verkörpert sieht. Seine Diskussion des Kinos verweist auf die zugrunde gelegte Verbindung zwischen Film und Wissenschaft. Der vorliegende Aufsatz wird dieser Affinität von Kino und wissenschaftlicher Methode nachgehen – zuerst, indem Bergsons Gedanken über die philosophische Beziehung diskutiert werden, um danach Seddigs Fall als ein Beispiel für die eigentümliche Adaptierbarkeit dieser Technologie auf wissenschaftliche Theorien darzustellen.

## Bergson, die Wissenschaft und das Kino

Die *Schöpferische Entwicklung* von 1907, die bald als Bergsons bekanntestes Werk gelten sollte, beschäftigt sich auf dieselbe Weise mit der Evolutionsbiologie wie sich sein älteres Werk *Materie und Gedächtnis* (1907) [frz. 1896] mit der Psychologie beschäftigte und sein späteres *Durée et simultanéité á propos de la théorie d'Einstein* (1922) mit der Physik.

In *Schöpferische Entwicklung* nimmt er die Evolution des Lebens als eine Tatsache, ist aber von deren wissenschaftlicher Erklärung nicht befriedigt. Nach Bergson macht der mechanistische Ansatz in der Biologie (für den in Deutschland solche «Biophysiker» wie Hermann von Helmholtz und Emil Du Bois-Reymond stehen, der demonstrieren wollte, dass das Leben denselben physikalischen und chemischen Gesetzen unterliegt, wie andere Phänomene auch), einen verbreiteten analytischen Fehler: er zerlegt Organismen und Lebensprozesse, um deren Teile zu verstehen. Aber er versteht wegen dieser Zerlegung die Totalität der Lebenswirklichkeit letztlich nicht. Im Ergebnis kann der mechanistische und reduktionistische Analysezugang den Wandel oder die Entstehung neuer Formen und neuer Lösungen nicht hinreichend erklären. Bergson band demgegenüber die Lebensrealität der Organismen an den Fluss der Zeit. Das heißt, Bergson macht den Fluss der Zeit, wie er uns allen individuell bewusst ist, zum Modell des Lebens selbst. Die zentrale Idee ist die Vorstellung der *durée* – oder «Dauer». Bergson wendet die weit verbreitete traditionelle Sichtweise radikal um, wonach der Wandel eine Aufeinanderfolge von Zuständen sei – eine Sicht, die die Zustände logisch dem Wandel gegenüber betont. Bergsons argumentiert hingegen, dass der Wandel primär sei. Man missverstehe die wahre Realität der Welt, die im ewigen Fließen, Werden oder in der *durée* liegt, wenn man diesen Wandel als eine Folge diskreter Zustände begreift. Organismen existieren in der Zeit, in der Dauer. Davon können sie nicht abgesondert werden, ohne dass man das Verständnis ihrer lebenden Wirklichkeit verliert.

Für Bergson ist allein die Dauer real. Er sieht das Universum in konstantem Fluss. Wandel und Bewegung sind die einzigen Konstanten, die einzige wahre Wirklichkeit. Stoff, Form oder Festigkeit seien nur stabile Ansichten dieser essentiellen Instabilität. Unsere einfache, alltägliche analytische Wahrnehmung kann diesen Fluss nicht erfassen; sie kann nur bestimmte Momente herauslösen und diese für die Realität halten. Selbst unser Körper sei keine feste Größe, sondern ändere

seine Form in jedem Augenblick. Oder besser, es gibt keine Form, da Form ein Unbewegtes ist, Wirklichkeit aber Bewegung. Real ist einzig

die kontinuierliche Formveränderung; Form ist nur eine von einem Sich-Wandeln genommene Momentaufnahme. (Bergson 1912, S. 306)

Darum sei auch hier «unsere Wahrnehmung darauf eingestellt, die fließende Kontinuität des Wirklichen in diskontinuierlichen Bildern zu verfestigen» (ebd.). Wir können nicht anders, als auf diese Weise zu denken, und den Fluss der Welt und der Zeit in einzelne Intervalle aufzugliedern, aber die Inadäquatheit dieser Denkgewohnheit erfordert die Orientierung auf ein übergreifendes Ziel, nämlich: «die angestammte Richtung der Gedankenarbeit umzukehren» (Bergson 1909, S. 52). Das heißt, Bergson setzt voraus, dass die beschriebene Art der Analyse oder der Weltwahrnehmung mehr oder weniger habitualisiert und notwendig ist, und er deklariert daher, dass für die Erkenntnis der *durée* «der Geist sich selbst Gewalt antun muss, dass er die Richtung jener Operation umkehren muss, mit der er gewohnheitsmäßig denkt, dass er beständig all seine Kategorien zu revidieren, oder genauer gesagt: umzuarbeiten, hat.» (Ebd., S. 51)

Die Beziehung zwischen der Kontinuität des *durée* und der Diskontinuität unserer Wahrnehmung erinnert an den Film, der aus einer Serie von unbewegten Bildern besteht, die projiziert wirkliche Bewegung imitieren. Der Mechanismus des Films ist mithin unserem gewöhnlichen Wahrnehmungsprozess analog, ja er reflektiert ihn. Dieser Prozess, so führt Bergson weiter aus, bestehe darin,

aus allen Eigenbewegungen aller Figuren eine unpersönliche, abstrakte und einfache Bewegung herauszulösen, die *Bewegung überhaupt* sozusagen; darin diese Bewegung im Apparat niederzulegen, und dann die Individualität jeder Einzelbewegung durch Zusammensetzung dieser anonymen Bewegung und der persönlichen Stellungen zu rekonstruieren. Dies ist der Kunstgriff des Kinematographen. Dies auch der Kunstgriff unseres Erkennens. [...] Ob es sich nun darum handle, das Werden zu denken oder auszudrücken, ja es wahrzunehmen – wir tun nichts weiter, als einen inneren Kinematographen in Tätigkeit zu setzen. Derart also, dass alles vorhergehende sich in den Worten zusammenfaßt: *der Mechanismus unseres gewöhnlichen Denkens ist kinematographischen Wesens.* (Bergson 1912, S. 309 – Herv. im Original)

Auf dieselbe Weise «verfährt auch die moderne [Wissenschaft] nach der kinematographischen Methode. Zum Wesen der Wissenschaft nämlich gehört Handhabung von Zeichen, die sie an Stelle der Gegenstände selbst setzt»(ebd., S. 332). Diese Zeichen geben «eine starre Ansicht der Wirklichkeit unter festgelegter Form» (ebd.). Und: «Um Bewegung zu denken bedarf es einer unablässig

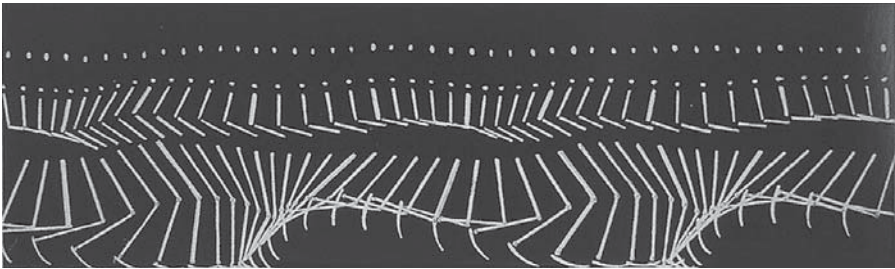


Abb. 1

erneuten Anstrengung des Geistes. Die Zeichen seien dazu da, uns dieser Anstrengung dadurch zu entheben, daß sie die bewegte Kontinuität der Dinge durch eine künstliche für die Praxis gleichwertige Nachbildung ersetzt, die den Vorteil müheloser Handhabung hat» (ebd.). Die Absicht der Wissenschaft, die «in der Steigerung unseres Einflusses auf die Dinge» bestehe, sei darum immer eine praktische. Selbst wenn sie sich zur hoher Theorie aufschwinde, muss die Wissenschaft handlungsfähig sein, und das wäre nicht möglich, «wenn ihr Rhythmus von jenem des Handelns ganz und gar abweiche» (ebd.). Für Bergson vollzieht sich Handlung durch Sprünge von Moment zu Moment, von Gruppierung zu Neugruppierung. Die Wissenschaft mag die Zahl der von ihr isolierten Momente steigern können – «Momente aber bleiben es stets, die sie isoliert. [...] sie geht nicht auf das Intervall, sie geht auf die Endpunkte» (ebd., S. 333). Mit anderen Worten, für Bergson funktioniert die moderne Wissenschaft essentiell kinematographisch.

Bergson denkt offenkundig an Mareys Chronophotographen, wenn er Kino und Wissenschaft diskutiert. Wissenschaftler wie Marey (oder in Deutschland Wilhelm Braune und Otto Fischer)<sup>7</sup> nutzten die Chronophotographie, um die Bewegung zu erforschen. Ihre Technik reduzierte das Objekt auf seine abstraktesten Elemente (Abbildung 1). Ihre Methode lief darauf hinaus, die innere Geometrie ihrer Objekte – in diesem Fall des menschlichen Körpers – zu finden und sie in mathematische Begriffe zu übersetzen. Die Chronophotographie war wesentlich für diese Operation, weil sie – in Bergsons Worten – «bestimmte Momente» aus dem Fluss der Bewegung zu isolieren vermochte, so dass die inhärenten geometrischen Aspekte des Körpers hervorgehoben und studiert werden konnten. Bergson argumentiert:

7 Vgl. zum Beispiel Braune/Fischer (1895).

Dennoch besteht eine annähernd mathematische der Materie innewohnende Ordnung, eine objektive Ordnung, der unsere Wissenschaft sich je und je im Maß ihres Fortschritts nähert. Denn wenn die Materie ein Erschlaffen des Unausgedehnten zu Ausgedehntem und dadurch der Freiheit zu Notwendigkeit ist, dann hat sie sich – und ob sie auch mit dem reinen homogenen Raum niemals völlig zusammenfalle – doch durch die Bewegung gebildet, die auf ihn hinführt, und ist somit auf dem Wege der Geometrie. Allerdings werden Gesetze von mathematischer Form sich mit der Materie nie völlig decken. Denn dazu wäre vonnöten, daß die Materie reiner Raum würde und aus der Dauer ausschiede. (ebd., S. 222)

Das heißt, wenn Materie und Form nur als ‚Momentaufnahmen‘ der Dauer denkbar sind, nur als momentane Isolierungen aus dem Fluss der Wirklichkeit, dann tendieren Materie und Form zu zeitloser Geometrie oder zum ‚reinen Raum‘. Aber die reine Form und der reine Raum der Geometrie decken sich niemals vollkommen mit der Materie des untersuchten Gegenstandes, einfach weil der Gegenstand in der Zeit existiert. Mareys Methode zeigt an, wie weit die Wissenschaft gehen muss, um die *Dauer* des Objekts (wie momentan auch immer) mit dem *Raum* der Geometrie in Einklang zu bringen und auf diese Weise die ‚der Materie innewohnende‘ mathematische Ordnung nutzbar zu machen. Bergsons Schlussfolgerung lautet daher: «Nie genug kann die Künstlichkeit der mathematischen Form eines physikalischen Gesetzes [...] betont werden» (ebd., S. 223).

Dennoch ist die Wissenschaft erfolgreich. Bergson bietet dafür folgende Erklärung an:

Einleuchtend also bleibt nur eine einzige Hypothese: die nämlich, daß die mathematische Ordnung nichts Positives hat, daß sie die Form ist, der eine gewisse *Unterbrechung* von selbst zudrängt, und daß alle Materialität eben in einer solchen Unterbrechung besteht. (ebd., S. 224)

Mit anderen Worten, Bergson sieht eine Homologie zwischen der wissenschaftlichen Methode, *Zeit* zu fixieren und jener momentanen Unterbrechung der *Dauer*, die *Materialität* ist. Oder, mit anderen Worten, die Neigung der Wissenschaft zur *Verräumlichung* der *Zeit* ist analog der ‚Erschlaffung‘ der *Dauer* hin zu *Form* und *Materie*. Auf jeden Fall basiert für Bergson der Erfolg der Wissenschaft, mathematische Entsprechungen zu finden, auf der *Unterbrechung* der *Zeit*.

## Die Brownsche Bewegung und der ›Zwischenraum‹

Max Seddigs Versuch, Einsteins Theorie der Brownschen Bewegung zu bestätigen, ist eine interessante Fallstudie, weil seine – die Kinematographie und die Chronophotographie nutzende – Methode wichtigen Merkmalen jener Theorie genau entspricht. Einsteins Theorie hebt, wie ich noch im Detail zeigen werde, eine Lücke oder Unterbrechung hervor: mehr die Ortsveränderung, die Verschiebung der Teilchen als ihren tatsächlichen Weg. Ganz ähnlich rückt Seddigs experimentelle Methode das Intervall zwischen den filmischen Belichtungen ins Zentrum. Seddigs Ergebnisse kamen Einsteins Theorie näher als die meisten anderen, eben weil seine Methode jenen wichtigen Theorieaspekt bot, den die älteren Forscher ausließen oder ignorierten: die Lücke oder den ›Zwischenraum‹.

Einsteins Erklärung des Phänomens der Brownschen Bewegung fußt auf der molekularkinetischen Theorie der Materie und gilt allgemein als

one of the fundamental pillars (or even the main one) supporting atomism in its victorious struggle against phenomenological physics in the early years of this century. (Maiocchi 1990, S. 257, vgl. auch Clark 1976, S. 41–106, sowie Kerker 1974 und insbes. Nye 1972).

Im Verlauf des 19. Jahrhunderts herrschten zwei verschiedene Paradigmen zur Erklärung von Thermalphänomenen vor. Erstens die mechanische Wärmetheorie. Sie hat gestützt auf allgemeine empirische Gesetze (das erste und zweite thermodynamische Gesetz) eine phänomenologische Thermodynamik entwickelt, strebte aber nicht nach der letzten Erklärung der Natur der Sache. (Darum gilt dieser Zugang zur Physik als phänomenologisch – er befasst sich mit der Deskription und Klassifikation der Phänomene, nicht aber mit ihrer Ursache und deren Erklärung.) Das heißt, die mechanische Wärmetheorie beschreibt gewisse Phänomene, wie etwa die Wärmeübertragung, und leitet aus der reinen (nicht erklärten) Beobachtung Gesetze ab, warum Materie und Energie sich auf diese Weise verhalten. Diese thermodynamischen Gesetze funktionierten mithin sehr ähnlich den Gesetzen der klassischen Physik wie etwa Newtons Gesetz von der Schwerkraft. Von solchen Phänomenen konnte man erwarten, dass sie ungeachtet ihrer Größe oder der Situation den Gesetzen folgen. Mit anderen Worten, die Gesetze wurden im allgemeinen als absolut gültig angesehen.

Das andere zur Erklärung von Wärmephänomenen benutzte Paradigma war die kinetische Theorie der Materie, die von spezifischen Annahmen über die Natur der Materie ausging – das heißt: «[...] that it was discrete, molecular, ulti-



mately atomic, and that heat was a «concealed» form of motion associated with the molecules of a substance.» (Clark 1976, S. 42) Der Vorzug dieser Theorie war es, eine tatsächliche *Erklärung* für die Natur der Wärme zu versuchen, der Nachteil aber, nicht unmittelbar der Beobachtung zugänglich zu sein. Während atomistische Materietheorien schon auf die Griechen zurückgehen, widerstrebte den modernen Wissenschaftlern die Vorstellung, dass die Materie aus Teilchen bestehe – so klein, dass sie nicht sichtbar sind. Sollte die kinetische Theorie Erfolg haben, so musste sie die Existenz dieser Partikel aus deren Wirkungen ableiten. Einstein ging nun theoretisch davon aus, dass diese Wirkungen mathematisch abgeleitet werden könnten von den zufälligen Schwankungen in einem beobachtbaren System, wie etwa in einem mit einer bestimmten Gassorte gefüllten Behälter. Diese zufälligen Schwankungen würden *per definitionem* nicht existieren, wenn die Gesetze der Thermodynamik absolute Gültigkeit besäßen. Mit anderen Worten, der Beweis für die wirkliche Existenz von Molekülen war auf das engste mit dem Beleg verbunden, dass die klassische Thermodynamik nur im statistischen, nicht aber im absoluten Sinne wahr sei. Um die Jahrhundertwende waren die atomistische Materietheorie und deren statistische Korrelationen aber weit entfernt davon, allgemein akzeptiert zu sein. Die Theorie und die Bestätigung der Brownschen Bewegung war ein wesentlicher Sieg in diesem Kampf.

Die Brownsche Bewegung ist seit 1827 bekannt. Damals richtete der schottische Botaniker Robert Brown sein Mikroskop auf zytoplasmische Pollenkörner. Bei der Untersuchung der Gestalt von in Wasser suspendierten Teilchen, bemerkte Brown deren rasche, irreguläre Bewegungen. Er beobachtete, dass diese Bewegungen «[...] arise neither from currents in the fluid, nor from its gradual evaporation, but belonged to the particle itself.» (Brown, zit. in Kerker 1974, S. 765)

Es gab eine ganze Reihe von Erklärungsversuchen für diese Erscheinung, doch erst am Ende des Jahrhunderts kam Georges Gouy zu dem Schluss, dass die Brownsche Bewegung eine klare Demonstration für die Existenz von Molekülen in einer kontinuierlichen Bewegung sei, die eine sichtbare Wirkung auf die kleinen, in Flüssigkeit schwebenden Teilchen habe (vgl. Gouy 1895).

Allerdings arbeitete Gouy keine mathematische Theorie aus, die experimentell hätte verifiziert werden können. Das blieb 1905 Einstein vorbehalten. Nicht dass Wissenschaftler zuvor keinen Versuch unternommen hätten, aber die Bemühungen um die experimentelle Klärung des Phänomens wurden durch die mangelnde Übereinstimmung der Beobachtungen behindert. Die Forscher konnten sich einfach nicht auf die Grundmerkmale der Brownschen Bewegung einigen. Die Bewegungen waren nicht nur zu schnell und zu unregelmäßig, um

sie einer regulären Beobachtung zu unterwerfen, die Forscher konnten nicht einmal über grundlegende Fragen Einverständnis erzielen, wie die nach der Abhängigkeit der Bewegung von der Flüssigkeitstemperatur. Diese Verwirrung zeigt, zumindest Roberto Maiocchi,

how difficult it is to make a meaningful and conclusive scientific «observation» and, as a result, how any inductivist conception, which claims to start from an empirical base in order to then construct theories of some importance, is unsustainable. (Maiocchi 1990, S. 260)

Daraus folgt die Wichtigkeit der Photographie und der Kinematographie für die Untersuchung der Brownschen Bewegung. Diese Medien boten zumindest die Möglichkeit einer «objektiven» Aufzeichnung, auf die sich die Beobachter wechselseitig beziehen konnten. Aber noch einmal sei betont, dass ohne hinreichende technische Mittel und ohne eine Theorie, die den Einsatz dieser Mittel leitet, diese Hoffnung ein Trugbild bleiben musste. Nehmen wir zum Beispiel den Fall von Felix Exner. Er versuchte durch direkte photographische Aufnahme «die Grösse der Partikeln und ihre Geschwindigkeit zu messen» (Exner 1900, S. 844). Die photographischen Platten waren aber um diese Zeit leider noch nicht empfindlich genug, um das wenige Licht aufzuzeichnen, das durch die Linse des Mikroskops drang. Unerschrocken beobachtete er die Bewegungen und spürte, wie er selbst – zu Recht – einräumte: «Natürlich sind die Werte nicht sehr genau.» (Ebd., S. 845) Exner wollte eine numerische Beziehung zwischen der Flüssigkeitstemperatur und der Geschwindigkeit der suspendierten Partikel nachweisen. Die Bedeutung seines Artikels liegt darin, der erste Versuch zu sein, Merkmale der Brownschen Bewegung, die zuvor nur qualitativ beschrieben worden war, zu quantifizieren. Selbst wenn seine Resultate die bis dahin genauesten Daten darstellten, so waren sie doch nicht hinreichend. Das überrascht angesichts seiner Methode kaum. Aber Exner warf ein Schlaglicht auf die Notwendigkeit systematischer Beobachtung und Messung und auf die zukünftige Rolle, die die Photographie dabei spielen sollte.

Auf Einsteins Theorie hatten frühere Beobachtungen indes sehr wenig Einfluss. Tatsächlich ignorierte Einstein frühere Ergebnisse geradezu. Das Wirrwarr widerstreitender Beobachtungen konnte für seine Ziele nur von begrenztem Nutzen sein. Er beabsichtigte nicht, die Brownsche Bewegung mathematisch zu beschreiben. Und er war auch nicht in erster Linie daran interessiert, eine theoretische Erklärung für das verwirrende Phänomen zu liefern. Statt dessen betrachtete er die Brownsche Bewegung als System, dessen Beobachtbarkeit es denkbar machte, die Debatte zwischen klassischer Thermodynamik und dem molekularkinetischem Modell aufzulösen. Insbesondere argumen-

tierte er, dass die Bestätigung seiner Gleichung die Existenz von Molekülen demonstrieren und zugleich zeigen würde, dass die klassische Thermodynamik auf Partikel molekularer Dimension nicht absolut anwendbar sei. In einem Aufsatz zu diesem Thema verwies Einstein 1905 zum einen auf die Inadäquatheit der älteren Beobachtungen und zum anderen auf Grundsätze zukünftiger Beobachtungen:

In dieser Arbeit soll gezeigt werden, daß nach der molekularkinetischen Theorie der Wärme in Flüssigkeiten suspendierte Körper von mikroskopisch sichtbarer Größe infolge der Molekularbewegung der Wärme Bewegungen von solcher Größe ausführen müssen, daß diese Bewegungen leicht mit dem Mikroskop nachgewiesen werden können. Es ist möglich, daß die hier zu behandelnden Bewegungen mit der sogenannten *«Brownschen Molekularbewegung»* identisch sind; die mir erreichbaren Angaben über letztere sind jedoch so ungenau, daß ich mir hierüber kein Urteil bilden konnte.

Wenn sich die hier behandelte Bewegung samt den für sie zu erwartenden Gesetzmäßigkeiten wirklich beobachten läßt, so ist die klassische Thermodynamik schon für mikroskopisch unterscheidbare Räume nicht mehr als genau gültig anzusehen und es ist dann eine exakte Bestimmung der wahren Atomgröße möglich. Erwiese sich umgekehrt die Voraussage dieser Bewegung als unzutreffend, so wäre damit ein schwerwiegendes Argument gegen die molekularkinetische Auffassung der Wärme gegeben. (Einstein 1922, S. 5)

Einstein stellte sich den großen Problemen; seine Gleichungen sollten die atomistische Theorie der Materie und der klassischen Thermodynamik entweder bestätigen oder widerlegen.

Da er sich weder auf frühere Forschungen berief noch eigene Experimente durchführte, kann Einsteins Theorie der Brownschen Bewegung nicht als empirisch ermittelt gelten, sondern eher als ein System, das mathematisch abgeleitet, ja erfunden wurde, das aber nachträglich beobachtet und gemessen werden konnte.<sup>8</sup> Einstein ging es weniger darum, die Brownsche Bewegung zu *beschreiben* als sie mathematisch zu *bewältigen*. Auf diese Weise bot er den Forschern die erforderliche theoretische Anleitung – eine mathematische Richtschnur, wonach Ausschau zu halten sei. Maiocchi bemerkt in diesem Sinne:

8 Die beste Erklärung von Einsteins Gebrauch der Brownschen Bewegung als ein statistisches System gibt Klein (1982). Klein: «Einstein had *invented* the Brownian motion. To say anything less, to describe this paper in the usual way, that is, as his *explanation* of the Brownian motion, is to undervalue it.» (S. 47)

Only when Einstein had constructed, *independently* of the experimental accounts, a sufficiently articulated theory, did the experimenters know *what had to be observed* and only after this theoretical clarification did the observations turn out to be conclusive. (Maiocchi 1990, S. 260 – Herv. im Original)

Einsteins Theorie fing und lenkte mehr als irgendeine Technologie spätere Beobachtungen durch ein Netz nutzbarer Daten.

Bevor die Forscher aber entsprechend orientiert werden konnten, mussten sie natürlich erst einmal Einsteins Arbeit verstehen, was sich durchaus nicht von selbst verstand. Denn – so Mary Jo Nye – Einsteins Aufsätze von 1905 und 1906 enthalten mathematische Ableitungen, die ausgesprochen komplex waren und «[...] certainly beyond the ken of even the more precocious experimentalist» (Nye 1972, S. 111). Die Neuigkeit von Einsteins Gleichungen lag darin, dass sie die vollzogene Ortsveränderung, *die Verschiebung* der Teilchen stärker betonten als deren tatsächlichen Weg oder deren Geschwindigkeit. Einstein war, wie schon erwähnt, am Existenznachweis der Moleküle interessiert und auch daran, zu zeigen, dass die Thermodynamik im statistischen und nicht im absoluten Sinn wahr sei. Die zwei Ziele waren eng miteinander verbunden, da jede kinetische Molekulartheorie ein gründliches Verständnis statischer Mechanik einzuschließen hatte.

Die beobachteten Eigenschaften etwa von Gas hängen vom Durchschnittsverhalten der Moleküle ab. Aber in jedem System, das hinreichend zufällig ist – und für das als Beispiel herangezogene Modell von Gas als ein System von Molekülen kann diese Zufälligkeit unterstellt werden –, wird es Schwankungen um dieses Durchschnittsverhalten geben. Wenn die Schwankungen groß genug sind, dann ziehen sie die Stabilität der gemessenen Eigenschaften in Zweifel und werfen Fragen hinsichtlich der klassischen Thermodynamik auf. In der Brownschen Bewegung vermutete Einstein ein System beobachtbarer Schwankung, welche die Existenz von Molekülen bezeugt. Diese Schwankung ist in seinen Gleichungen ausgedrückt, so in der vom durchschnittlichen Quadrat der Verschiebung  $(\Delta x)^2$  eines Partikels in einer gegebenen Richtung in einem gegebenen Zeitintervall. Maiocchi erklärt:

While previously the attempt had always been made to estimate the length of the trajectory actually traversed by a particle, Einstein's theory deals with the *displacement* effected in a given time, i.e. the intervening distance between the points of departure and arrival, *independently of the path followed*. This is a change of radical importance because it changes completely *the object of the observation*: it is no longer a matter of

trying to measure the velocity of the Brownian movements (obtained by dividing the length actually traversed during the observation time by the time itself), but of a different quantity. (Maiocchi 1990, S. 263-264 – Herv. im Original)

Einstein bemerkte, dass die Teilchengeschwindigkeiten so hoch waren, dass sie niemals direkt beobachtet und folglich nicht akkurat gemessen werden könnten. Seine Lösung war es daher, die Ortsveränderung der Partikel als Indikator der Systemfluktuation anzusehen.<sup>9</sup> Vorhergehende Experimente, wie etwa die von Exner im Jahr 1900, hatten sich gerade auf den Weg der Partikel konzentriert. Seit der Erfindung des Ultramikroskops im Jahr 1903 und weiter angespornt durch Einsteins Studie von 1905 hatten sich die Forscher der Brownschen Bewegung mit erneuertem Interesse zugewandt. Einige folgten weiter Exner und suchten den tatsächlichen Weg zu messen, ohne Einsteins Einsicht zu erfassen. Die von Victor Henri 1908 publizierten Ergebnisse zum Beispiel sind bemerkenswert, weil auch er die Kinematographie zur Aufzeichnung der Teilchenbewegung und der Verfolgung ihres tatsächlichen Weges nutzte (vgl. Henri 1908 und 1908a). Seine Resultate stimmten nicht mit Einsteins Theorien überein und sähten mithin vorübergehend Zweifel an dessen Gleichungen. Aber es wurde bald klar, dass experimentelle Irrtümer Henris Ergebnisse negierten.<sup>10</sup>

Der Gewinner im Rennen um die Brownsche Bewegung war Henris Landsmann Jean Perrin. Der führte eine Reihe von Experimenten durch, die 1908 publiziert wurden. Ursprünglich hatte sich Perrin wenig um Einsteins Aufsätze gekümmert, aber als er sie nach 1908 eingehender studierte, bemerkte er, dass seine Experimente Einsteins Vorhersagen bestätigten. Weitere Arbeiten von Perrin brachten die überzeugendste experimentelle Bestätigung von Einsteins Theorie. Danach bezweifelte in der Wissenschaftlergemeinschaft nahezu niemand mehr die Existenz von Atomen, und Perrin erhielt 1926 für seine Arbeit den Nobelpreis.<sup>11</sup>

9 Einstein vereinfachte das System weiter, so dass er seine mathematischen Folgerungen auf zwei Dimensionen beschränkte und folglich nur die horizontale Verschiebung der Partikel in Rechnung stellte. Auf diese Weise korrespondiert Einsteins Theorie mit der experimentellen Praxis in der Hinsicht, dass das Beobachtungsfeld dem flachen, zweidimensionalen Feld des Mikroskops entspricht.

10 Zur Kritik der Ergebnisse von Henri siehe Cotton (1908).

11 Perrin (1909) gilt als seine einflussreichste Studie. Die beste Kommentierung der Arbeit Perrins findet sich in Nye (1972); zu Perrins Diskussion von Henri, Seddig und anderen siehe Perrin (1914).

Das bringt uns zu Seddig. Obschon Seddig zu vergleichbaren Ergebnissen kam, waren diese nach Nye weder so genau noch so überzeugend wie die von Perrin (vgl. Nye 1972, S. 97). Seddig wird daher überwiegend als Fußnote in der Wissenschaftsgeschichte behandelt. Indessen interessiert er hier, weil er eine Homologie zwischen einem Element seiner experimentellen Methode (Kinematographie und Chronophotographie) und einem Aspekt der Theorie (Verschiebung) entdeckte. Ebenso wie Exner war auch Seddig daran interessiert, die Abhängigkeit der Partikelgeschwindigkeit von der Flüssigkeitstemperatur zu verifizieren. Und wie Exner, Henri und andere versuchte er zuerst den tatsächlichen Weg der Teilchen mittels photographischer Aufnahmen durch ein Ultramikroskop aufzuzeichnen. Er hoffte, dass durch lange Belichtungszeiten bei der Aufnahme der Partikel, die Spuren, die sie auf der photographischen Platte hinterlassen mit ihrem Weg korrespondieren würden:

Naheliegend war es zu versuchen, die beweglichen Teilchen, die im Ultra-Mikroskop als leuchtende Punkte erscheinen, auf einer ruhenden photographischen Platte während einer gewissen Zeit (etwa 1 Sekunde) zu photographieren; die leuchtenden, sich bewegenden Punkte müßten dann auf der Platte schwarze Linien aufzeichnen, die dem während dieser Zeit in horizontale Richtung zurückgelegten Wege entsprechen; die Längen der in *gleichen Zeiten*, aber bei *verschiedenen* Temperaturen, erhaltenen Kurven müßten dann in dem von der Theorie geforderten gegenseitigen Verhältnis stehen. (Seddig 1909, S. 12)

Aber wiederum versagte diese Methode – wie schon bei Exner – wegen des schwachen Lichts im Ultramikroskop und der relativ unempfindlichen photographischen Emulsion, die damals zur Verfügung stand.

Dessen ungeachtet nutzte Seddig nach diesem Misserfolg ein reguläres Mikroskop, das er jetzt mit einem Kinematographen verband. Er wollte die Teilchenbewegung nun – wiederum wie Henri – kinematographisch aufzeichnen. In der ersten Darstellung seiner Arbeit bemerkte er: «Eine danach versuchte kinematographische Methode gab schon einige Resultate, die mit einem Präzisionskinematographen wohl auch eine genügende Genauigkeit gezeigt hätten» (Seddig 1907, S. 185). Auch wenn sein kinematographischer Apparat eine gewisse Genauigkeit erreichte, so war er doch angesichts der Instabilität des filmischen Bildes – in Hinsicht auf die Verfolgung des Weges der Teilchen – unbefriedigt. So blieben seine letztendlichen Ergebnisse durch die Nutzung eines Ultramikroskops und einer Serie von multipel belichteten photographischen Platten determiniert. Aber während Seddig mit der Kinematographie experimentierte, stieß er auf die Lösung eines Verwirrung stiftenden Problems. Er be-

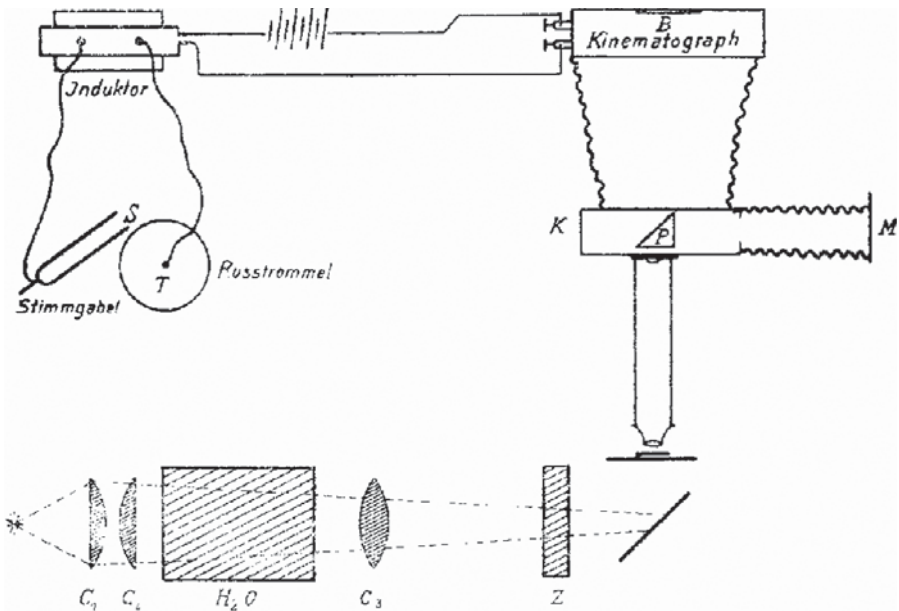


Abb. 2

merkte, dass das starke, zur Beleuchtung der Teilchen notwendige Licht zugleich die Flüssigkeit, in der die Teilchen suspendiert sind, aufheizte. Dieser Temperaturanstieg konnte nicht vorausgesagt werden und gefährdete daher seine Messwerte. Er löste das Problem, indem er die kontinuierliche Lichtquelle durch eine intermittierende ersetzte. Diese Lampe feuerte im Abstand einer Zehntelsekunde zwei aufeinanderfolgende Blitze, während die Kamera mit einem System gekoppelt war, das exakt das Zeitintervall zwischen den Blitzen gemessen hat (Abbildung 2). Das Licht passierte eine Vielzahl kühlender und polarisierender Filter und wurde dann von einem Spiegel in das mit der Kamera verbundene Mikroskop gelenkt. Die Kamera war mit einem elektrischen Schaltkreis verbunden, der sich mit jeder Belichtung öffnete und schloss. Das erzeugte einen elektrischen Funken, der auf einer routierenden, mit geschwärztem Papier bedeckten Trommel graphisch aufgezeichnet wurde. Mithin diente die graphische Aufzeichnung als Kontrolle der Bildrate, und das Intervall zwischen den Belichtungen konnte präzise gemessen werden.

Mit diesem Mechanismus konnte Seddig die Bewegung jedes gegebenen Partikels aufzeichnen. Aber nicht gänzlich – der intermittierende Lichtblitz zeichnete nur zwei Punkte auf dessen Weg auf, sagen wir: Punkt A und Punkt B. Der zufällige und nicht vorhersagbare Weg der Partikel hinterließ keine Spur und

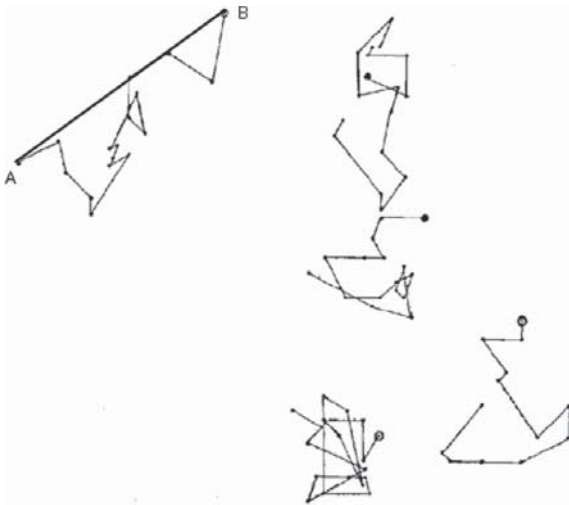


Abb. 3

wurde gleichsam experimentell ausgelassen. Alles was der Messung zugänglich war, war die gerade Linie zwischen zwei Punkten (Abbildung 3). *Das war genau die empirische Übersetzung von Eisensteins Verschiebungsgleichung.* Mit anderen Worten, Seddig hat eine experimentelle Methode entwickelt, die mit Einsteins Theorie korrespondierte und diese auch partiell bestätigte.

Warum war «Verschiebung» so wesentlich für Einsteins Theorie? Weil diese Idee einem der Haupteinwände gegen die kinetische Theorie zuarbeitete – der Disparität zwischen theoretischer Geschwindigkeit und beobachteter Geschwindigkeit auf molekularem Niveau. Wie Maryan Smoluchowski (1906) ausführte, würde die experimentelle Beobachtung der Teilchengeschwindigkeit niemals mit der Theorie korrespondieren, weil die theoretische Geschwindigkeit durch Beobachtungsprozeduren einfach nicht messbar ist:

What we see is only the mean position of the particle, driven 10-20 times a second, each time in a different direction, by that velocity. Its center will describe an unpredictable zig-zag path made up of straight lines *much shorter in length than the size of the particle*. Its displacement becomes visible only when the geometric sum of these lines is raised to an appreciable value. (zit. in Maiocchi 1990, S. 264)

Das heißt, die aufs Geratewohl von den Molekülen durchgerüttelten Partikel bewegen sich stets leicht in eine Vielzahl von Richtungen – diese Zickzackbewegungen, die kleiner als die Teilchen selbst sind, können nicht beobachtet werden und folglich auch nicht gemessen oder empirisch bestätigt. Durch das Reduzieren der Gleichung auf die Frage nach der Verschiebung *ohne Richtung*, steht die Geschwindigkeit (Tempo und Richtung) nicht mehr zur Debatte.

Daraus folgt die Lücke. Einsteins Theorie lässt den tatsächlichen, zeitlich vollzogenen Weg der Partikel aus; er tilgte ihn aus seiner Gleichung und schuf



auf diese Weise eine theoretische Unterbrechung (à la Bergson), die mit Seddigs kinematographischer Unterbrechung übereinstimmte. Dadurch, dass er den dunklen Raum zwischen den Bildern – oder chronophotographisch gesprochen: zwischen den Aufnahmen – in den Mittelpunkt rückte, näherte sich Seddigs Methode Einsteins theoretischen Bemühen an, den Raum zwischen zwei Punkten auf dem nicht vorhersehbaren Weg der Teilchen zu tilgen. Folglich bewältigt Einsteins Theorie erfolgreich die exzessive Natur der Molekularbewegung in Hinsicht auf deren empirische Bestätigung, während Seddigs Methode erfolgreich das exzessive Detail des kinematographischen oder photographischen Bildes dadurch bewältigt, dass sie mehr den Raum zwischen den Bildern oder Aufnahmen beachtet. Darüber hinaus impliziert Einsteins Vorstellung von der Verschiebung eine Anerkennung der Verformbarkeit von Zeit auf molekularem Niveau. Indem er die Richtung der Partikel tilgt (ob die Bewegung von Punkt A zu Punkt B läuft oder von Punkt B zu Punkt A ist irrelevant für die Zwecke der Theorie), erkennt Einstein die Reversibilität von Zeit auf molekularem Niveau an<sup>12</sup> – eine Reversibilität, die durch Seddigs belichteten Filmstreifen oder dessen photographische Platte nachgeahmt wurde, wobei die Richtung ebenso irrelevant ist, sobald die Punkte festgelegt sind. Wenn – wie Mary Ann Doane anmerkt – «visible time in the cinema is yoked to the body, movement, space, and the potential excesses of «real time»» (Doane 2002, S. 190), dann bestand Seddigs (vielleicht zufälliger<sup>13</sup>) Geniestreich darin, seinen Apparat von dieser Bindung zu befreien, während er dessen einmalige Fähigkeit benutzte, Zeit und Raum zu messen und zu korrelieren.

## Resümee

Der Erfolg der Kinematographie in der Wissenschaft und deren relativ schnelle Anwendung war nicht allein ihrer gewachsenen Verfügbarkeit zu danken, sondern den guten Adaptationsmöglichkeiten in Hinsicht auf ganz unterschiedliche wissenschaftliche Unternehmungen. Seddig rückte den Raum zwischen den Einzelbildern in den Mittelpunkt, also die *analytische*, die zerlegende Fähigkeit des Films. Für Wissenschaftler anderer Disziplinen, etwa der Biologie, war aber das Bild des Gegenstands, das Einzelbild an sich, ausschlaggebend. So können zum Beispiel Alexis Carrel in den Vereinigten Staaten und Hermann

12 Ausführlicher zur Reversibilität der Zeit, siehe Park (1980), Serres (1982, S. 70–71), Prigogine/Stengers (1984) und Fagg (2003).

13 Maiocchi besteht darauf, dass Seddig durch Zufall auf seine kinematographische Technik stieß, ich meine aber, dass immerhin die Möglichkeit besteht, dass Seddig wusste, was er tat.

Braus in Deutschland als zwei von vielen Biologen gelten, die den Film zur Wachstumserforschung von Zellen in Gewebekulturen nutzten. Sie verwendeten die Mikrokinematographie und die Zeitraffer-Techniken zur Visualisierung des Wachstums und der Eigenarten von lebenden Zellkulturen. Für sie besaß das einzelne Filmbild analytisch kaum Bedeutung, stattdessen konzentrierten sie sich auf die *Synthese* der Bilder. Solchen Biologen galt mithin die Lücke als wesentlich für die Konstruktion des Films, aber die Ellipse erfolgt zugunsten temporaler Kontinuität und biologischer Teleologie. «Wachstum» ist nicht reversibel. Das heißt nicht, dass die analytischen Fähigkeiten des Films allein auf die physikalischen Wissenschaften beschränkt blieben (oder für sie geeigneter seien) und dessen synthetische Natur am besten zu den Lebenswissenschaften passe. Die Vielfalt der Anwendungen im ganzen Spektrum der Disziplinen widerlegte jegliche Generalisierung dieser Art. Tatsächlich ist das Adaptionspotential der Kinematographie nicht kleiner oder größer als das jeder anderen Technologie, die man mit Erfolg als wissenschaftliches Instrument angewandt hat – vom Mikroskop bis zum Computer.<sup>14</sup>

Dennoch existiert eine verblüffende Homologie. Die Technik der Gewebekultur-Extrahierung reproduziert technisch «Leben» und verlängert es. Sie kann es auch künstlich beschleunigen oder verlangsamen. Was ist Kino nun aber anderes als eine Technologie, die Körper von ihrer «natürlichen» Zeit und ihrem «natürlichen» Raum extrahiert, um sie mechanisch zu reproduzieren und praktisch endlos (noch lange nachdem der «Spender» verschwunden ist) zu reanimieren – schneller oder langsamer, je nach Bedarf? Die Idee, dass das Gewebe, die Organe und das Leben selbst vom Körper abtrennbar seien (eine Idee, die impliziert, dass der Tod dem Organismus nicht inhärent sei), ist ebenso wie das Kino eine durch und durch moderne Vorstellung. Die Kinematographie ist eine gut adaptierbare Technologie und ein nützliches Werkzeug. Die eigentümliche Form ihrer Aneignung von Zeit, Raum und «Leben» aber lässt sie darüber hinaus zu einem Medium werden, das auf ideale Weise zur Gegenüberstellung mit den neuen Ideen in der modernen Wissenschaft einlädt. Sowohl in Hinblick auf Einsteins und auf Seddigs flexible Vorstellungen von Zeit in der unsichtbaren, zufälligen und reversiblen Welt der Molekularphysik, als auch auf Carrels und Brauses Konzeption des Lebens als separierbarer, zeitlich manipulier- und technisch reproduzierbarer Erscheinung – in all diesen Fällen nutzten die Wissenschaftler den Film nicht allein, weil er beobachten und aufzeichnen kann, sondern weil sie in ihm einen Geistesverwandten fanden, einen Partner, der ihre Vision teilte und die Welt ganz ähnlich repräsentierte. Der Kinematograph ist

14 Zur Frage solcher Adaptierbarkeit, siehe Latour (1986).

nicht nur ein handliches Werkzeug. In einem weiteren Sinne als von Bergson gedacht artikuliert die mediale Form des Kinematographen selbst die Agenda der modernen Wissenschaft.

*Aus dem Amerikanischen von Jörg Schweinitz*

## Literatur

- Bergson, Henri (1907) *Materie und Gedächtnis*. Jena: E. Diederichs [frz. Ausgabe *Matière et mémoire*. Paris: Félix Alcan, 1896].
- (1912) *Schöpferische Entwicklung*, übersetzt von Gertrud Kantorowicz. Jena: E. Diederichs [dt. Ausgabe von *L'évolution créatrice*. Paris: Félix Alcan, 1907].
- (1934) *Einführung in die Metaphysik*. Jena: E. Diederichs, 1909 [dt. Ausgabe von «Introduction à la métaphysique», in: *La pensée et le mouvant: essais et conférences*. Paris: F. Alcan, 1934].
- (1922) *Durée et simultanéité, à propos de la théorie d'Einstein*. Paris: F. Alcan.
- Borell, Merriley (1986) Extending the Senses: The Graphic Method. In: *Medical Heritage 2.2* (March/April), S. 114–121.
- Brain, Robert M. (2002) Representation on the Line: Graphic Recording Instruments and Scientific Modernism. In: *From Energy to Information: Representation in Science and Technology, Art, and Literature*. Hg. v. Bruce Clarke und Linda Dalrymple Henderson. Stanford, Calif.: Stanford University Press, S. 155–177.
- Braune, Wilhelm / Otto Fischer (1895) Versuche am unbelasteten und belasteten Menschen. In: *Abhandlungen der Mathematisch-Physischen Klasse der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften* 21.4, S. 151–322.
- Cartwright, Lisa (1992) «Experiments of Destruction»: Cinematic Inscriptions of Physiology. In: *Representations* 40 (Fall), S. 129–152.
- (1995) *Screening the Body: Tracing Medicine's Visual Culture*. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- Clark, Peter (1996) Atomism versus Thermodynamics. In: *Method and Appraisal in the Physical Sciences*. Hg. v. Colin Howson. Cambridge: Cambridge University Press.
- Cotton, Aimé (1908) Recherches récentes sur les mouvements browniens. In: *La Revue du mois* 5, S. 737–741.
- Cros, Charles (1964) Inscription [1877]. In: *Oeuvres complètes*. Hg. v. Louis Forestier und Pascal Pia. Paris: J.-J. Pauvert
- Daston, Lorraine / Peter Galison (1992) The Image of Objectivity. In: *Representations* 40 (Fall), S. 81–128.
- Doane, Mary Ann (2002) *The Emergence of Cinematic Time: Modernity, Contingency, the Archive*. Cambridge, Mass.: Harvard University Press.
- Einstein, Albert (1922) *Untersuchungen über die Theorie der «Brownschen Bewegung»*. Mit Anmerkungen hg. v. R. Fürth. Leipzig: Akademische Verlagsgesellschaft.

- Exner, Felix M. (1900) Notiz zu Brown's Molecularbewegung. *Annalen der Physik* 2.8, S. 843–847.
- Fagg, Lawrence W. (2003) *The Becoming of Time: Integrating Physical and Religious Time*. Durham: Duke University Press.
- Georges-Michel, Michel (2003) Henri Bergson spricht zu uns über das Kino. In: *KIN-top* 12, S. 9–11 [dt. Ausgabe von Henri Bergson «nous parle au cinema», in: *Le Journal* 20. Februar 1914, S. 7].
- Gouy, Georges (1895) Le Mouvement brownien et les mouvements moléculaires. In: *Revue générale des sciences pures et appliquées* 6.1 (15. Januar), S. 1–7.
- Hankins, Thomas L. / Robert J. Silverman (1995) The Magic Lantern and the Art of Demonstration. In: *Instruments and the Imagination*. Princeton, N.J.: Princeton University Press.
- Henri, Victor (1908) Études cinématographique des mouvements browniens. In: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 146.20 (18. Mai), S. 1024–1026.
- (1908a) Influence du milieu sur les mouvements browniens. In: *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des Sciences* 147 (6. Juli), S. 62–65.
- Kerker, Milton (1974) Brownian Movement and Molecular Reality prior to 1900. In: *Journal of Chemical Education* 51.12 (Dezember), S. 764–768.
- Klein, Martin J. (1982) Fluctuations and Statistical Physics in Einstein's Early Work. In: *Albert Einstein: Historical and Cultural Perspectives*. Hg. v. Gerald Holton und Yehuda Elkana. Princeton, NJ: Princeton University Press, S. 39–58.
- Latour, Bruno (1986) Visualization and Cognition: Thinking with Eyes and Hands. In: *Knowledge and Society: Studies in the Sociology of Culture Past and Present* 6, S. 1–40.
- Maiocchi, Roberto (1990) The Case of Brownian Motion. In: *British Journal for the History of Science* 23 (September), S. 257–283.
- Nye, Mary Jo (1972) *Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin*. New York: American Elsevier.
- Park, David (1980) *The Image of Eternity: Roots of Time in the Physical World*. Amherst: University of Massachusetts Press.
- Perrin, Jean (1909) Mouvement brownien et molécules. In: *Annales de chimie et de physique* 18, S. 1–114.
- Perrin, Jean (1914) *Die Atome*. Dresden: T. Steinkopff [dt. Ausgabe von *Les atomes*. Paris: F. Alcan, 1913].
- Prigogine, Ilya / Stengers, Isabelle (1984) *Order out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. New York: Random House.
- Seddig, Max (1907) Ueber Abhängigkeit der Brown'schen Molekularbewegung von der Temperatur. In: *Sitzungsberichte der Gesellschaft zur Beförderung der gesamten Naturwissenschaften zu Marburg* 18, S. 182–188.
- (1908) Über die Messung der Temperaturabhängigkeit der Brownschen Molekularbewegung. *Physikalische Zeitschrift* 9.14 (15. Juli), S. 465–468.
- (1909) *Messung der Temperatur-Abhängigkeit der Brown'schen Molekularbewegung* (Habilitationsschrift). Frankfurt a.M.: Akademie in Frankfurt a. M.

- (1912) Exacte Messung des Zeitintervalles bei kinematographischen Aufnahmen. In: *Jahrbuch für Photographie und Reproduktionstechnik* 26, S. 654–657.
- (1912a) Messung der Temperatur-Abhängigkeit der Brown-Zsigmondyschen Bewegung. In: *Zeitschrift für Anorganische Chemie* 73–74, S. 360–384.
- Serres, Michel (1982) *Hermes: Literature, Science, Philosophy*. Hg. v. Josuè V. Harari und David F. Bell. Baltimore: Johns Hopkins University Press.
- Smoluchowski, M. (1906) Essai d'une théorie cinétique du mouvement brownien et des milieux troubles. In: *Krakau Anzeiger* 7, S. 585–586.
- Zedong, Mao (1965) On Contradiction [1937]. In: ders., *Selected Works*, Bd. 1. Peking: Foreign Languages Press.