

Lars Nowak

Bewegungsunschärfen

Zum Gebrauch der Langzeitbelichtung in der ballistischen Fotografie¹

Weil Schüsse und Explosionen aufgrund ihrer exorbitanten Geschwindigkeiten hohe Anforderungen an eine scharfe fotografische Abbildung stellen, hat sich die Historiografie der ballistischen und explosionsdynamischen Fotografie² bislang vor allem für solche Aufnahmen interessiert, die dieser Herausforderung durch kürzeste Belichtungsdauern zu entsprechen versuchen, wobei namentlich Ernst Machs Schlierenfotografien von den Druckwellen an Überschallgeschossen besondere Aufmerksamkeit erregt haben.³ Neben diesem rapidfotografischen Zweig besitzt die ballistische Fotografie aber auch noch einen entgegengesetzten Ansatz, der nicht mit besonders kurzen, sondern mit besonders langen Belichtungszeiten operiert. Da sich bei solchen Langzeitbelichtungen an der Geschwindigkeit der abzubildenden Vorgänge nichts ändert, müssen sie teilweise mit den gleichen avancierten Techniken wie die Kurzzeitbelichtungen, nämlich mit Emulsionen hoher Lichtempfindlichkeit und mit Objektiven großer Lichtstärke, arbeiten. Vor allem aber bieten sie gegenüber den Hochgeschwindigkeitsfotografien den Vorteil, dass sie nicht bloß einzelne Bewegungsmomente, sondern ganze Bewegungsabläufe abbilden. Dabei erfährt die Verräumlichung der Zeit, die prinzipiell bei allen Fotografien vergänglicher Ereignisse und damit auch bei allen ballistischen Fotografien gegeben ist, eine eigentümliche Steigerung. Denn wenn Momentaufnahmen die Zeit dadurch spatialisieren, dass sie die äußere Vergänglichkeit jener Ereignisse durch deren bildliche Konservierung aufheben, kommt im Fall von Dauerbelichtungen noch eine zweite Verräumlichung hinzu, bei der auch die innere Prozessualität des Ereignisses durch eine Synchronisierung seiner sukzessiven Phasen zum Verschwinden gebracht wird: Langzeitfotografien – so zumindest ihr Versprechen – verwandeln eine Bewegung, die nie in ihrer Totalität gegeben sein kann, weil die eine Bewegungsphase notwendigerweise in dem Augenblick verschwindet, in dem die nächste beginnt, in ein stets vollständig präsent Ding.⁴ Die folgenden Ausführungen werden sich auf

¹ Dieser Artikel basiert auf einem Vortrag, den ich auf dem Workshop *Fotografie im Dienst der Wissenschaft* (Deutsches Museum, München, 04.09.2014) gehalten habe, und wird demnächst in einem gleichnamigen Sammelband (Transcript, Bielefeld) erscheinen.

² Im Folgenden werde ich vereinfachend von ‚ballistischer Fotografie‘ sprechen, da Schüsse und Explosionen auf vielfältige Weisen miteinander verknüpft sind, die ich bereits an anderer Stelle erläutert habe. Vgl. Nowak, Speichern, 2011, S. 165.

³ Exemplarisch genannt seien Fuller, *Photography*, 1997; Berz, 08/15, 2001, S. 403ff.; Hoffmann/Berz, Schall, 2001; Hoffmann, Dauer, 2002.

⁴ Als besonders interessant erscheint der doppelte Spatialisierungseffekt von Langzeitfotografien aus der Perspektive des von mir geleiteten und mittlerweile abgeschlossenen DFG-Forschungsprojektes *Die Wissensräume der ballistischen Photo- und Kinematographie, 1860–1960* (Projekt NO 916/2-1), aus dem der vorliegende Aufsatz hervorgegangen ist. Ich danke meiner ehemaligen Projektmitarbeiterin Regina Wuzella für ihre Recherchen zu Étienne-Jules Mareys protoballistischen Chronofotografien und zur fotografischen Messung der Gammastrahlung bei den amerikanischen Atombombentests, die ich weiter unten thematisiere.

die ballistische Langzeitfotografie innerhalb des Zeitraumes 1880–1920 konzentrieren, der im Mittelpunkt dieses Sammelbandes steht, am Rande aber auch spätere Weiterentwicklungen streifen.

Epistemische Nutzung unmarkierter Bewegungsunschärfen

Angesichts des Umstands, dass lange Expositionszeiten bewegte Objekte in Unschärfe auflösen, koinzidiert die wissenschafts- und medienhistorische Vernachlässigung der ballistischen Langzeitfotografie mit einer dezidierten Ablehnung bewegungsunscharfer Bilder in der Frühzeit der Fotografie, in der solche Unschärfen aufgrund der langsamen Verschlüsse und Emulsionen durchaus häufiger vorkamen. Obgleich Thomas Skaife mit seiner von ihm entwickelten Pistolgraph-Kamera dank eines federbetriebenen Verschlusses Belichtungsdauern von immerhin 1/50 s erreichte, erschien in einer Aufnahme, die er mit diesem Fotoapparat im Juli 1858 bei einem Manöver der Britischen Armee in den Plumstead Marshes produzierte und bei der es sich um eine der ersten ballistischen Fotografien überhaupt handelt, eine fliegende Granate als verwischte Spur (Abb. 1).⁵ Während Skaife seine ballistischen Lichtbilder noch im selben Jahr in zwei Leserbriefen an die *Times* als fotografische Pionierleistung darstellte⁶ und in einer Anzeige im *Liverpool and Manchester Photographic Journal* eine von ihnen sogar zum Verkauf anbot,⁷ wurden Bewegungsunschärfen in den Aufnahmen mobiler Objekte damals im Allgemeinen als störende Fehler empfunden, weil man die einzige angemessene Repräsentation von Bewegung in einer scharfen Abbildung des betreffenden Objekts erblickte.⁸

Doch obwohl lange Belichtungszeiten die Darstellung einer Bewegung tatsächlich dann unmöglich machen, wenn sie ein völliges Verschwinden des bewegten Objekts zur Folge haben, lassen sich gegen die Unterordnung der langen unter die kurze Belichtungszeit mehrere Einwände geltend machen: Zum einen kann ontologisch angemerkt werden, dass es eine Momentfotografie im strengen Sinne, also eine Fotografie, deren Aufnahmedauer unendlich klein ist, nicht geben kann, weil jede noch so kleine Belichtungsdauer eine endliche Größe besitzt und somit alle Fotografien nicht etwa Zeitpunkte, sondern Zeiträume repräsentieren. Zum anderen ist epistemologisch darauf hinzuweisen, dass neben scharfen Kurzaufnahmen von Bewegungen auch bewegungsunscharfe Langzeitbelichtungen dem Betrachter wichtige Einsichten vermitteln können. Denn bewegungsbedingte Unschärfen lassen sich nicht nur als ein Hindernis zur Bewegungsdarstellung, sondern ebenso gut als eine eigene Form derselben begreifen, weil sie sich von Unschärfen, die auf einer mangelnden Fokussierung der Kamera beruhen, unterscheiden. Während nämlich die letzteren Unschärfen, die aus einer räumlichen Divergenz von Gegenstand und Kamera resultieren, eine kreisrunde Form besitzen, zeichnen sich Bewegungsunschärfen, die ihren Grund in einer zeitlichen Diskrepanz haben, durch eine

⁵ Vgl. Geimer, *Picturing*, 2004, S. 478.

⁶ Vgl. Thomas Skaife: A Feat in Photography. To the Editor of The Times. In: The Times Nr. 23006 vom 29.05.1858, S. 12; Thomas Skaife: Photography. To the Editor of The Times. In: The Times Nr. 23064 vom 05.08.1858, S. 9.

⁷ Vgl. Skaife, Patent, 1858.

⁸ Vgl. Schnelle-Schneyder, *Photographie*, 1990, S. 51, 59.

lineare Morphologie aus.⁹ Obgleich Bewegungsunschärfen also den Gegenstand, der sich vor der Kamera bewegte, verschleiern mögen, verweisen sie mit großer Suggestivkraft auf den Umstand, *dass* sich dieses Objekt bewegte.¹⁰

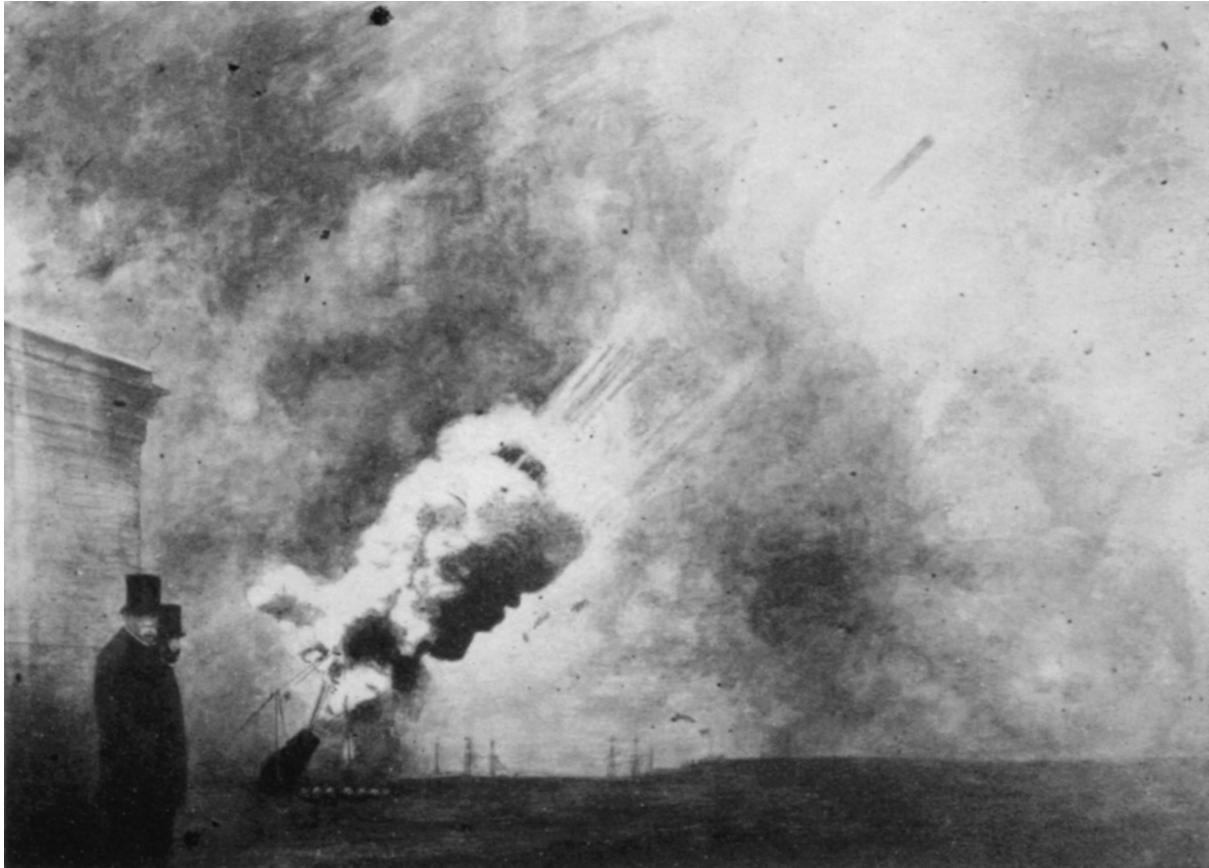


Abb. 1: Thomas Skaife, Teil einer Stereofotografie von einer abgeschossenen Granate, Plumstead Marshes nahe Woolwich Arsenal, 28. Juli 1858. Aus: Keller, Corey (Hrsg.): *Fotografie und das Unsichtbare. 1840-1900*. Wien 2009, S. 33.

Dieses epistemische Potenzial der Bewegungsunschärfe wurde auch in der ballistischen Fotografie erkannt, wo es sich sogar nicht mehr nur auf qualitative Gesichtspunkte beschränkte, sondern auch quantitative Aspekte einbezog. So konstatierte Hans Rumpff in seinem 1921 erschienenen Buch *Die wissenschaftliche Photographie als experimentelle Grundlage des Maschinenbaues*, welches er zwei Jahre vorher als Dissertation an der Technischen Hochschule Berlin-Charlottenburg eingereicht hatte, dass sich aus dem Maß einer Bewegungsunschärfe auf die Geschwindigkeit der zugrunde liegenden Bewegung schließen lasse.¹¹ Zwar dachte Rumpff hierbei lediglich an den Schwärzungsgrad der Unschärfe, der von einigen mitunter schwer zu ermittelnden Konstanten beeinflusst werde und daher allein eine *relative*

⁹ Vgl. Schnelle-Schneyder, *Photographie*, 1990, S. 47.

¹⁰ Vgl. Frizot, *Geschwindigkeit*, 1998, S. 244.

¹¹ Vgl. Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 23, 25.

Geschwindigkeitsbestimmung dergestalt erlaube, dass eine gleichmäßige Schwärzung auf eine gleichförmige, eine in Bewegungsrichtung abnehmende Schwärzung auf eine beschleunigte und eine in Bewegungsrichtung zunehmende Schwärzung auf eine abgebremste Bewegung hindeute.¹² Kennt man jedoch die Belichtungsdauer und den Abbildungsmaßstab, so kann man aus der Länge der bewegungsunscharfen Form auch die *absolute* Geschwindigkeit der Bewegung ableiten.

Umgekehrt ließ sich der Länge der Unschärfe bei bekannter Objektgeschwindigkeit die Belichtungsdauer entnehmen. Obwohl sich Ernst Mach bei seinen Fotografien von Geschosswellen zwecks scharfer Abbildung um kurze Belichtungsdauern bemühte, räumte schon er 1889 in einem gemeinsam mit seinem Sohn Ludwig verfassten Artikel Bewegungsunschärfen in den Bildern ein, die er dann aber produktiv wendete: Da die Fotografien das Projektil durch die Unschärfe optisch dehnten, mit dem Winkel zwischen den Druckwellenästen und der Geschossachse aber die Projektilgeschwindigkeit offenbarten, könne man aus ihnen die Dauer des Beleuchtungsfunkens ermitteln. Dabei ergebe sich bei einer Geschwindigkeit des Geschosses von 500 m/s und dessen optischer Verlängerung von 23 auf 24 mm eine Belichtungszeit von $1/500\,000$ s.¹³ Rund 20 Jahre später stellte in ganz ähnlicher Weise Friedrich Wächter fest, dass man die Belichtungszeit einer Fotografie errechnen könne, die ein mit bekannter Geschwindigkeit fliegendes Projektil in Originalgröße wiedergebe, indem man den Längenunterschied zwischen dem abgebildeten bewegten und dem realen ruhenden Geschoss bestimme.¹⁴ Schließlich hielt auch Rumpff fest, dass sich aus dem Schwärzungsgrad einer Bewegungsunschärfe ebenso gut die Belichtungszeit ableiten lasse, sofern alle anderen Faktoren – wie die Lichtquelle, die Fotoplatte und die Entwicklung – bekannt seien.¹⁵

Markierte Langzeitbelichtungen mit statischem Bildträger

Bewegungsunschärfen wurden in der ballistischen Fotografie aber nicht nur nebenher epistemisch verwertet, sondern wegen dieser Verwertbarkeit auch gezielt hergestellt, wobei sie nicht selten die Gestalt von Linien annahmen. Solche Linien wurden seinerzeit auch in anderen Gattungen der wissenschaftlichen Fotografie produziert, zum Beispiel in Étienne-Jules Mareys physiologischen oder in Frank B. und Lillian M. Gilbreths ergonomischen Bewegungsspuraufnahmen, wo sie oft auch ähnliche Eigenschaften, wie etwa eine periodische

¹² Vgl. Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 32ff. Ähnlich produktiv ging Rumpff übrigens auch mit den Verzerrungen um, die sich bei Aufnahmen mit der in den 1910er Jahren von ihm und Hans Lehmann konstruierten Mehrfachzeitlupenkamera daraus ergaben, dass sich der Film gleichmäßig, das durch einen achtseitigen rotierenden Spiegel reflektierte Bild aber ungleichmäßig bewegte: Anstatt diese Abbildungsfehler zu minimieren oder zu kompensieren, könne man auch sie dafür verwenden, „einen Rückschluß auf die Objektgeschwindigkeit zu ziehen“. Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 65.

¹³ Vgl. Mach/Mach, *Versuche*, 1889, S. 1311, 1313.

¹⁴ Vgl. Wächter, *Überprüfung*, 1911, S. 930.

¹⁵ Vgl. Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 28ff. 1938 sollte auch Max Steenbeck erkennen, dass die Blitzlichtdauer der von ihm entwickelten Röntgenröhre bei maximal $1/1\,000\,000$ s lag, indem er mit der Röhre ein Projektil fotografierte und dessen Bewegungsunschärfe mit der allgemeinen Unschärfe des Bildes aufgrund der räumlichen Ausdehnung der Lichtquelle, des Brennflecks auf der Anode, verglich. Vgl. Steenbeck, *Verfahren*, 1938, S. 14f., 18.

Unterbrechung oder eine stereoskopische Verdopplung, aufwiesen. Mit M. Norton Wise kann sogar generell festgestellt werden, dass die Linie, die in den Wissenschaften vor 1800 nur vereinzelt in Erscheinung getreten war,¹⁶ im 19. Jahrhundert zu jenem zentralen Instrument der Erkenntnisgewinnung und -vermittlung aufstieg, das sie bis heute geblieben ist.¹⁷ Denn erstens begann man damals, die Verteilung bestimmter physikalischer und meteorologischer Phänomene auf und unter der Erdoberfläche durch Begrenzungs- oder Richtungslinien darzustellen.¹⁸ Zweitens wurden diverse Naturgesetze, die beispielsweise den elektrischen Stromfluss in belebten Körpern oder auch die physikalische Arbeit von Organismen und Maschinen betrafen, in Kurven übersetzt, was ab den 1830er Jahren auch mittels zahlreicher selbstaufzeichnender Apparate geschah.¹⁹ Einerseits suchte Hermann von Helmholtz nach dem idealtypischen Verlauf solcher Kurven,²⁰ andererseits zählten jetzt Forscher wie Gustav Lejeune Dirichlet, Heinrich Wilhelm Dove und Georg Simon Ohm auch die irregulären Kurven natürlicher Phänomene zu den mathematischen Funktionen und demonstrierten, dass sie sich mit den Mitteln der Fourier-Analyse mathematisch formalisieren ließen.²¹ Dabei vollzog sich die Etablierung der Linie als eines wissenschaftlichen Standards insbesondere in Berlin, wo in der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts eine Reihe bedeutender Wissenschaftler und Künstler zusammentrafen, in einem größeren kulturellen Kontext, der auch die Kunst und das Kunstgewerbe umfasste. Denn die Linie spielte auch in der projektiv-deskriptiven Geometrie eine wichtige Rolle und galt auch in der neoklassischen Ästhetik als eine ideale Naturform.²² Folgt man einigen verstreuten Hinweisen von Wise, so wurde offensichtlich ein besonderer Beitrag zur szientifisch-ästhetischen Durchsetzung der Linie durch das Militärwesen geleistet. Abgesehen davon nämlich, dass sich unter jenen Kurven, denen schon vor dem 19. Jahrhundert eine wissenschaftliche Bedeutung zukam, auch Galileo Galileis ballistische Parabeln befanden,²³ wurde die deskriptive Geometrie in Deutschland auch an den militärischen Hochschulen unterrichtet,²⁴ an denen auch die Befürworter der Fourier-Analyse lehrten.²⁵ Und

¹⁶ Beispielsweise hatte Thomas Hobbes ihr eine große Überzeugungskraft zugeschrieben, die sich vor allem in der Geometrie zeige, wo mit ihrer Hilfe Uneinigkeiten unter den Menschen geschlichtet werden könnten, während in der Politik der wölfische Naturzustand nur schwer zu überwinden sei. Vgl. Bredekamp, *Erkenntniskraft*, 2002, S. 153f.

¹⁷ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 61. So erklärt etwa Sybille Krämer den Strich zum „Elementarmedium“ dessen, was sie „operative[r] Bildlichkeit“ nennt: „Wir müssen den Strich als die Basishandlung operativer Bildlichkeit ansehen, ob in Gestalt diskreter Anordnung wie bei Notationen, ob als Einschluss von Kontinua und Kurven wie bei Diagrammen, oder als umgrenzte Flächen wie in der Karte, die selbst Höhenunterschiede (heute) durch Anzahlen von Linien präsentiert.“ Krämer, *Bildlichkeit*, 2009, S. 100. Besonders gut eignet sich die Linie zur Darstellung von Raum und Zeit, mit denen sie die Eigenschaft der Kontinuität teilt. Versieht man sie mit einer Pfeilspitze, so kann sie außerdem die Gerichtetheit der Zeit zum Ausdruck bringen; dabei kann ein Pfeil sogar unterschiedliche Zeitkonzepte artikulieren, je nach dem, ob er die Form einer Geraden, eines Kreises oder einer Spirale annimmt.

¹⁸ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 84ff.

¹⁹ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 90ff. Diese Geräte bedienten sich häufig anderer als fotografischer Mittel.

²⁰ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 97f.

²¹ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 79ff.

²² Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 67ff., 76ff.

²³ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 61.

²⁴ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 76ff.

²⁵ Vgl. Wise, *Line*, 2010, S. 80, 82f.

schließlich gingen auch viele der automatischen Kurvenschreiber aus der Ballistik hervor.²⁶

Die einfachste Form der fotografischen Produktion einer ballistischen Linie bestand darin, dass man die Kamera bei lange geöffnetem Verschluss auf ein Projektil richtete, das zwecks deutlicherer Abhebung vom Hintergrund mit einer Lichtquelle markiert worden war und auf der lichtempfindlichen Oberfläche eine lineare Lichtspur hinterließ, welche dem von ihm zurückgelegten Weg entsprach.²⁷ Damit traten an die Stelle der einzelnen Bewegungsphasen, wie man sie mit den Mitteln der Momentfotografie einfing, komplette Bewegungsbahnen. Und manchmal wurde die Belichtung dabei so auf die Markierung abgestimmt, dass sich das Bild auf die Bahn reduzierte, während der Hintergrund vollständig in Finsternis versank.

Als Erfinder der ballistischen Lichtspuraufnahme darf Friedrich Neesen, Professor an der Militärtechnischen Akademie in Berlin, gelten,²⁸ der seine diesbezüglichen Versuche 1902 aufnahm.²⁹ Diese wurden von der Königlich Preussischen Artillerie-Prüfungs-Commission ausgeführt³⁰ und fanden ähnlich wie Ernst Machs fotografisch-artilleristische Experimente auf den Schießplätzen der Firma Krupp statt.³¹ Neesens Idee bestand darin, das Geschoss mit einer seitlichen Bohrung zu versehen und in diesem einen Leuchtsatz aus Magnesium zu platzieren, der beim Abschuss durch den Zünder in Brand gesetzt wurde und daraufhin eine helle Flamme ausstieß.³² Da das Projektil während des Fluges um seine Längsachse rotierte, war die Flamme bald der neben der Flugbahn aufgestellten Kamera zugewandt, bald von ihr abgewandt.³³ Bei jeder Umdrehung entstand aber ein eigenes Bild, welches infolge des Umstands, dass die Zuwendung der Flamme zur Kamera stets einen etwas längeren Zeitraum ausfüllte, nicht aus einem Punkt, sondern aus einem Strich bestand.³⁴ Zusammen ergaben die Striche eine regelmäßig durchbrochene Linie (Abb. 2). Da der Leuchtzünder der Kamera in der Mitte jedes Striches am stärksten zugekehrt war, war dieser hier entweder am hellsten oder – wie auf der Abbildung 2, einer Zusammenstellung von zwei mit zwei Kameras synchron aufgenommenen Fotografien, zu erkennen – am breitesten.³⁵ Rumpff zufolge leuchtete die Flamme grundsätzlich so hell, dass sie sich auch aus großer Entfernung und bei Nacht sogar ohne Verschluss

²⁶ Vgl. Wise, Line, 2010, S. 67.

²⁷ Diese Präparierung des Untersuchungsgegenstandes zum Zwecke seiner zeitlichen Fixierung lässt sich mit jener Präparierung zwecks räumlicher Vergrößerung vergleichen, der man in der Mikroskopie und -fotografie begegnet, wo das Objekt gefärbt, mit einer Goldschicht überzogen oder zentrifugiert wird.

²⁸ Vgl. Heydenreich, Verwendung, 1905, S. 376.

²⁹ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 40f.

³⁰ Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 380; Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 113.

³¹ Vgl. Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 693. Während Mach den Schießplatz beim niedersächsischen Meppen nutzte, griff Neesen daneben auch auf denjenigen beim sächsisch-anhaltinischen Tangerhütte zurück. Vgl. Mach/Salcher, Pola, 1889, S. 41f.; Rumpff, Photographie, 1921, S. 13; Heydenreich, Verwendung, 1905, S. 576.

³² Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 381; Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 112f.; Neesen, Photographie, 1915, S. 450; Neesen, Photographie, 1917, S. 149; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 692; Huberth, Aufnahme, 1915, S. 61; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115.

³³ Vgl. Neesen, Photographie, 1915, S. 450; Neesen, Photographie, 1917, S. 149; Rumpff, Photographie, 1921, S. 40f.

³⁴ Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 381f.; Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 113; Neesen, Photographie, 1917, S. 149; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115.

³⁵ Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 382; Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 113; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 694; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115.

fotografieren ließ.³⁶ Damit die Lichtspur in den Fotografien aber besonders gut zu erkennen war, wurde nur das Einschießen am Tage, die Aufnahme dagegen in den Abend- oder Nachtstunden vorgenommen.³⁷ Und um die Fotoplatte trotz der zu diesen Zeiten herrschenden Dunkelheit vor anderen Lichtquellen zu schützen, wurde der Kameraverschluss erst direkt vor dem Schuss geöffnet und unmittelbar danach wieder geschlossen.³⁸

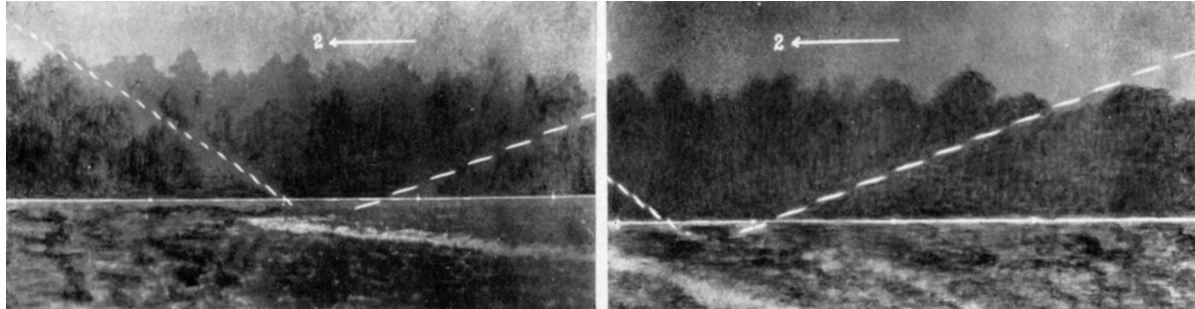


Abb. 2: Friedrich Neesen, Doppelte Lichtspuraufnahme vom Aufprall eines Artilleriegeschosses. Aus: Neesen, Friedrich: Photographie fliegender Geschosse. In: Umschau 19 (1915), H. 23, S. 448–452, hier S. 451.

Oberstleutnant Willy Heydenreich, der wie Neesen eine Professur an der Militärtechnischen Akademie bekleidete, stellte fest, dass die Langzeitbelichtungen seines Kollegen „geradezu als epochemachend auf dem Gebiete der Ballistik bezeichnet werden müssen, und dies sowohl in rein theoretischer wie auch in praktischer Hinsicht“.³⁹ Diese Einschätzung war insofern berechtigt, als Neesens Fotografien die aus diversen Komponenten zusammengesetzte Geschossbewegung in ihrer ganzen Komplexität einzufangen vermochten. So erschlossen auch sie die Längsbewegung des Projektils sowohl qualitativ als auch quantitativ, indem sie „die Gestalt der Bahn“⁴⁰, genauer: die „geometrische[n] Gestalt der Bahn“⁴¹, sichtbar machten und damit eine Bestimmung des Winkels zwischen der Flugbahntangente und der Erdoberfläche, insbesondere des Abgangs-, Fall- und Abprallwinkels, erlaubten.⁴² Weitere quantitative Momente kamen hinzu: Die periodische Unterbrechung der Lichtspur machte es möglich, den während einer Umdrehung vom Geschoss zurückgelegten Weg zu ermitteln;⁴³ auf dieser Basis

³⁶ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 40f.

³⁷ Vgl. Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 112, 114; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 693; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115.

³⁸ Vgl. Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 114; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 694; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115.

³⁹ Heydenreich, Verwendung, 1905, S. 576f.

⁴⁰ Neesen, Photographie, 1915, S. 450 (Hervorhebung getilgt, L.N.).

⁴¹ Neesen, Photographie, 1915, S. 448.

⁴² Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 383; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 696f.; Rumpff, Photographie, 1921, S. 40f.; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 115f.

⁴³ Vgl. Neesen, Geschwindigkeit, 1902, S. 380; Neesen, Photographie, 1915, S. 450; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 692; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 316.

ließ sich wiederum die variierende Geschwindigkeit der Längsbewegung,⁴⁴ insbesondere deren Anfangs- und Endgeschwindigkeit,⁴⁵ ermitteln. Auch über die Rotationsgeschwindigkeit gaben Neesens Bilder Auskunft,⁴⁶ wobei sich zeigte, dass sie wesentlich stärker abnehme, als man bislang angenommen hatte,⁴⁷ auch wenn die hierfür verantwortliche Gesetzmäßigkeit vorerst nicht gefunden werden konnte.⁴⁸ Schließlich lieferten die Aufnahmen Informationen über die beiden vom Geschoss vollführten Pendelbewegungen, die Nutation, die durch die nachdrängenden Pulvergase verursacht wird, und die konische Pendelung, die aus dem ungleichmäßigen Luftwiderstand resultiert.⁴⁹ Denn zum einen befanden sich die Teilstücke der Lichtspur, wie die Abbildung 2 zeigt, nicht auf einer Linie, sondern waren gegeneinander versetzt, was Neesen damit erklärte, dass der Leuchtsatz nicht in der Mitte, sondern an der Spitze des Geschosses angebracht war und sich der Winkel zwischen der Geschossachse und der Flugbahn aufgrund der Nutation änderte.⁵⁰ Zum anderen wurde aus Aufnahmen von längeren Stücken der Geschossbahn ersichtlich, dass das quantitative Verhältnis zwischen den Strich- und den Abstandslängen variierte.⁵¹

Dabei boten die Langzeitaufnahmen diverse Vorteile gegenüber anderen Methoden zur Ermittlung der genannten Parameter: Einer Bestimmung des Tangentenwinkels mittels einer vom Geschoss durchschlagenen Scheibe waren sie insofern überlegen, als sie das Projektil nicht ablenkten.⁵² Der chronografischen Messung der Flugzeiten hatten sie voraus, dass sie eine Eruierung der Endgeschwindigkeit ohne den Gebrauch von Drahtnetzen, die trotz ihrer Sperrigkeit schwer zu treffen und zu durchstoßen waren, sowie eine Ermittlung der Umdrehungsgeschwindigkeit erlaubten.⁵³ Schließlich ermöglichte Neesens Verfahren eine zuverlässigere Bestimmung der Endgeschwindigkeiten und der Fallwinkel, als sie mit Schusstafeln zu erreichen war, bei denen diese Größen aus anderen Werten – den Anfangsgeschwindigkeiten, Abgangswinkeln und Schussweiten – errechnet worden waren;⁵⁴

⁴⁴ Vgl. Neesen, *Photographie*, 1917, S. 150f.; Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 692; Cranz, *Lehrbuch*, 1927, S. 315f.; Heydenreich, *Verwendung*, 1905, S. 577.

⁴⁵ Vgl. Neesen, *Geschwindigkeit*, 1902, S. 380; Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112; Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 40f.; Cranz, *Lehrbuch*, 1927, S. 316.

⁴⁶ Vgl. Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112, 117; Neesen, *Photographie*, 1915, S. 450; Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 692; Cranz, *Lehrbuch*, 1927, S. 315.

⁴⁷ Vgl. Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112; Neesen, *Photographie*, 1915, S. 450; Heydenreich, *Verwendung*, 1905, S. 577.

⁴⁸ Vgl. Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 705f.

⁴⁹ Vgl. Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112; Heydenreich, *Verwendung*, 1905, S. 577; Neesen, *Photographie*, 1915, S. 451.

⁵⁰ Vgl. Neesen, *Geschossachsenrichtung*, 1903, S. 110f.

⁵¹ Vgl. Neesen, *Photographie*, 1915, S. 451f.; Neesen, *Photographie*, 1917, S. 163ff. – Die theoretischen verbanden sich mit praktischen Funktionen, sollten die markierten Langzeitbelichtungen doch auch eine Erhöhung der Treffgenauigkeit und eine genauere Einschätzung der zerstörerischen Wirkung beim Einschlag ermöglichen. Vgl. Neesen, *Geschossachsenrichtung*, 1903, S. 110f.; Heydenreich, *Verwendung*, 1905, S. 577.

⁵² Vgl. Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 706. Hierauf wird weiter unten noch genauer eingegangen.

⁵³ Vgl. Neesen, *Geschwindigkeit*, 1902, S. 380; Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112; Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 692, 706.

⁵⁴ Vgl. Neesen, *Geschwindigkeit*, 1902, S. 380; Heydenreich, *Verwendung*, 1905, S. 577; Cranz, *Lehrbuch*, 1927, S. 316.

hierbei wurden die Tafeln insofern berichtigt, als sich die Geschwindigkeiten als kleiner, die Winkel als größer herausstellten.⁵⁵

In den 1910er Jahren folgten Neesen mit Josef Berger, Andreas von Huberth und Rumpff drei weitere Ballistiker, die sich mit der Anfertigung von Langzeitbelichtungen fliegender Geschosse befassten, welche sie mit aktinischen – also fotochemisch wirksamen – Leuchtsätzen präpariert hatten. Dabei machten auch Berger und von Huberth ihre Aufnahmen bei Nacht.⁵⁶ Gleichzeitig schützte auch von Huberth seine Fotoplatten vor anderen Lichtquellen durch Kameraverschlüsse, die mit der Hand geöffnet und geschlossen oder durch das Abfeuern des Schusses geöffnet und durch die Einwirkung der Geschosswelle auf hinter allen Kameras platzierte Schalltrommeln geschlossen wurden.⁵⁷

Zugleich wurde Neesens Methode der Langzeitbelichtung auf unterschiedliche Weisen weiterentwickelt. So ergänzte von Huberth die Unterbrechungen der Lichtspur infolge der Geschossrotation um längere und weiter auseinander liegende Unterbrechungen durch einen rotierenden Kameraverschluss, der die Fotoplatte für jeweils 1/200 s abwechselnd ab- und aufdeckte.⁵⁸ Ferner fügte er eine Induktionsuhr hinzu, bei der eine rotierende Scheibe pro Sekunde 100, 1000 oder 10 000 Stromimpulse von jeweils 1/200 s oder 1/2000 s Dauer bewirkte, welche mittels eines Induktionsfunkens auf einer geruhten oder mit Fotopapier bespannten Trommel eine gepunktete Linie hinterließen. Gegebenenfalls kam ein zweiter Zylinder hinzu, auf dem jedesmal Zeitmarken erzeugt wurden, wenn das Geschoss einen chronografischen Messrahmen durchstieß.⁵⁹ Schließlich bezog von Huberth im Unterschied zu Neesen, dessen primäre Aufmerksamkeit – wie in der Abbildung 2 zu sehen – dem Auftreffen und eventuellen Abprallen des Geschosses galt, den gesamten Verlauf der Geschossbahn ein, die er in Abschnitte von je 100 m aufteilte, welche jeweils von einer eigenen Kamera erfasst wurden.⁶⁰

Hierüber ging Berger noch einmal hinaus, der ebenfalls „[e]in lückenloses, vollständiges Bild der Geschoßflugbahn“ anstrebte,⁶¹ dies aber nicht mehr durch mehrere Kameras, welche die Flugbahn unter sich aufteilten, sondern durch einen einzigen Fotoapparat erreichen wollte: „Die Platten sind während der ganzen Dauer des Geschoßfluges, d.i. von der Schußabgabe bis zum Geschoßaufschlag, zu belichten.“⁶² Das hatte zur Voraussetzung, dass die Kamera in großer Distanz aufgestellt wurde, was wiederum den Gebrauch besonders heller Leuchtsätze verlangte.⁶³ Um die Anforderungen an die Lichtemission dennoch so gering wie möglich zu halten, griff Berger auf eine Kamera mit besonders großem Bildwinkel zurück, nämlich auf Theodor Scheimpflugs Panoramaapparat, der eigentlich für Luftbilder bestimmt

⁵⁵ Vgl. Neesen, *Geschwindigkeit*, 1902, S. 383f.; Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 117ff.; Schmidt, *Bestimmung*, 1907, S. 692, 702ff.

⁵⁶ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 239; Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 61.

⁵⁷ Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 63ff., 68f.

⁵⁸ Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 68f.

⁵⁹ Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 65ff.

⁶⁰ Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 63f.

⁶¹ Berger, Hauptmann, 1914, S. 232.

⁶² Berger, Hauptmann, 1914, S. 239.

⁶³ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 232.

war und eine Öffnung von 152° besaß.⁶⁴ Bei einem Schuss mit der damals weit verbreiteten 15 cm-Haubitze, der eine Weite von 6000 m und eine Scheitelhöhe von 1600 m erreichte, genügte hier für eine komplette Erfassung der Flugbahn, wie Berger vorrechnete, ein Abstand von lediglich 1000 m, während bei einer Kamera mit einem üblichen Weitwinkelobjektiv von durchschnittlich nur 110° eine Distanz von 2350 m nötig gewesen wäre.⁶⁵ Die Helligkeit der verfügbaren Leuchtzünder konnte aber nur bei der kleineren, nicht bei der größeren Entfernung eine fotografische Lichtspur von ausreichender Breite erzeugen.⁶⁶

Schließlich wurde die gesamte Geschossbahn auch von Rumpff fotografiert, der seine ersten Versuche mit ballistischen Bewegungsspuraufnahmen aus Anlass des Ersten Weltkriegs im Sommer 1917 unternahm (Abb. 3).⁶⁷ Eine wichtige Neuerung Rumpffs bestand darin, dass dieser das Geschoss nicht mehr nur mit einem, sondern mit zwei Leuchtsätzen markierte, die am Kopf und am Boden befestigt wurden, wodurch die Stellung des Geschosses zur Bahntangente noch deutlicher angezeigt wurde.⁶⁸ Um die sehr dicht beieinander liegenden Bewegungsspuren der beiden Leuchtsätze unterscheiden zu können, verwendete Rumpff eine sehr große Fotoplate von 54 x 54 cm,⁶⁹ nachdem Neesen bereits mit Platten von 22 x 16 cm gearbeitet hatte.⁷⁰ Rumpff präparierte mit den beiden Leuchtsätzen Minen und konnte zeigen, dass diese, wenn man sie mit einem Winkel von über 60° abschoss, überstabilisiert wurden und sich deshalb in ihrer Lage lange Zeit nicht an die Geschossbahn anpassten.⁷¹ Um periodisch unterbrochene Langzeitbelichtungen auch bei Tageslicht zu erhalten, entwickelte Rumpff außerdem gemeinsam mit L. Günther eine Kamera, bei der ein zentraler Lamellenverschluss und ein Rouleau-Schlitzverschluss so miteinander kombiniert wurden, dass Ersterer für die eigentlichen Belichtungen sorgte, während Letzterer lediglich eine *Überbelichtung* verhinderte, indem er mit einer auf die Geschossgeschwindigkeit abgestimmten Geschwindigkeit über die Platte glitt. Schnellere Geschosse wurden freilich auch hier mit einem – zum Beispiel aus Zinkäthyl bestehenden – Leuchtzünder ausgestattet.⁷² Da der Erste Weltkrieg für Deutschland jedoch mit einer Niederlage endete, konnte Rumpff einen Teil seiner langzeitfotografischen Projekte nicht mehr abschließen.⁷³

Neesen befürchtete zwar, dass die Präparierung des Geschosses dessen Flugverhalten verändern und damit die Versuchsergebnisse verfälschen könnte.⁷⁴ Doch Berger ging davon aus, dass die Leuchtgeschosse der gleichen Bahn wie die entsprechenden gewöhnlichen Geschosse folgen würden.⁷⁵ Zu einer ähnlichen Einschätzung kam auch von Huberth, der sich dabei insbesondere auf das geringe Gewicht der Leuchtzünder – beispielsweise würden für eine

⁶⁴ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 232f.

⁶⁵ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 235f.

⁶⁶ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 236f.

⁶⁷ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 8, 10, 44, 93.

⁶⁸ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 13.

⁶⁹ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 41.

⁷⁰ Vgl. Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 113.

⁷¹ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 41.

⁷² Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 45f.

⁷³ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 44, 87. Vermutlich verhinderten die militärischen Bestimmungen des Versailler Vertrages einen Abschluss der Experimente.

⁷⁴ Vgl. Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 112; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 693.

⁷⁵ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 233.

Flugbahn von 5000 m nicht mehr als 10 g Zünder benötigt – bezog.⁷⁶ Johann Schmidt schließlich wies darauf hin, dass seine empirischen Vergleiche zwischen einem präparierten und einem unpräparierten Geschoss keine signifikanten Unterschiede zutage gefördert hätten.⁷⁷

In drei wichtigen Merkmalen stimmten die markierten Langzeitbelichtungen aller vier Ballistiker überein: Erstens war die Lichtspur in allen Fällen periodisch unterbrochen. Wie oben angedeutet, erlaubte das, neben dem räumlichen Verlauf der Bewegung auch deren variierende Geschwindigkeit zu erschließen. Denn je länger ein Abschnitt der Spur zwischen zwei benachbarten Unterbrechungen war, desto schneller musste die Bewegung dort gewesen sein; je kürzer, desto langsamer.⁷⁸ Die Unterbrechungen der Lichtspur implizierten aber zugleich, dass hier die durch die Markierung des Projektils bewirkte Zerlegung des Raumes um eine Fragmentierung der Zeit ergänzt wurde. Das näherte die Langzeitaufnahme an jene Variante der seriellen Momentfotografie an, bei der die verschiedenen Einzelaufnahmen auf demselben Bildträger Platz fanden. Auch diese Technik der momentfotografischen Mehrfachbelichtung wurde bereits im hier fokussierten Zeitraum auf ballistische Motive appliziert: Kein geringerer als Marey, der übrigens von Machs Geschosswellen-Aufnahmen Kenntnis erlangte,⁷⁹ fertigte zwischen 1882 und 1890 in seiner Station Physiologique bei Paris eine Reihe von Chronofotografien an, die zwar nicht Schüsse oder Explosionen, aber das Werfen und Katapultieren von Bällen und Stöcken zeigen.⁸⁰ Und obwohl die einzelnen Belichtungen in diesem Fall so kurz waren, dass sie das betreffende Objekt zu einzelnen Zeitpunkten wiedergaben, folgten diese so dicht aufeinander, dass sie sich ebenfalls zur Bewegungsbahn zusammenfügten. Überdies wurde die Erkennbarkeit der geworfenen oder katapultierten Gegenstände auch hier dadurch erhöht, dass diese eine helle Farbe besaßen und vor einen dunklen Hintergrund gestellt wurden.⁸¹

⁷⁶ Vgl. Huberth, Aufnahme, 1915, S. 69.

⁷⁷ Vgl. Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 701. – Außer mit einer Lichtquelle konnte das Projektil auch so präpariert werden, dass es eine Rauchspur hinterließ. Das geschah etwa bei Versuchen, welche die Firma Krupp um 1900 mit Ballongeschossen durchführte. Auch hiervon berichtete Neesen, wobei er auch ein Beispielbild wiedergab, welches zu einer Serie gehörte, von der sich im Historischen Archiv Krupp insgesamt sieben Aufnahmen erhalten haben. Vgl. Neesen, Photographie, 1915, S. 450; Neesen, Photographie, 1917, S. 154; Historisches Archiv Krupp, Essen, WA 16 f/16.2. Solche Rauchspuraufnahmen entstanden auch noch nach 1920. Beispielsweise wurden im September und Dezember 1941 auf dem amerikanischen Aberdeen Proving Ground die Rauchspuren fotografiert, die beim Durchschlagen von Platten durch selbstentzündliche Infanteriegeschosse entstanden. Vgl. National Archives and Records Administration, Washington, Nr. 156-GAM-62-50059 bis 156-GAM-62-50078, Nr. 156-GAM-68-54711 bis 156-GAM-68-54717 und Nr. 156-GAM-68-54870 bis 156-GAM-68-54886. Nach dem Zweiten Weltkrieg hat man Rauchspuren auch durch spezielle Raketen erzeugt, um mittels ihrer optischen Unterbrechung oder ihrer mechanischen Verschiebung die Druckwellen von konventionellen und atomaren Explosionen zu visualisieren. Vgl. Nowak, Pilzwolken, 2013, S. 40ff. Allerdings geben Rauchspuren die Flugbahn des Geschosses nicht selten aufgrund eines gezackten Verlaufs nur ungenau wieder. Und vor allem bleibt der Rauch im Unterschied zum ephemeren Licht eines Leuchtzünders für eine gewisse Zeit in der Luft stehen, so dass keine Langzeitaufnahme benötigt wird, sondern bereits eine Kurzzeitbelichtung genügt. Vgl. Neesen, Photographie, 1915, S. 450; Neesen, Photographie, 1917, S. 154.

⁷⁸ Vgl. Neesen, Photographie, 1917, S. 149f.

⁷⁹ Vgl. Vивиé, Bull, 1967, S. 12.

⁸⁰ Vgl. Marey, Analyse, 1891, S. 7f.; Rieckeheer, Photographie, 1900, S. 384f.; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 328.

⁸¹ Mareys erhaltene protoballistische Chronofotografien befinden sich im Fonds Marey des Collège de France, Paris. Ein Gesamtverzeichnis dieser Aufnahmen wurde auf [https://salamandre.college-de-france.fr/ead.html?id=FR075CDF_00PV0003#!{"content":\["FR075CDF_00PV0003_tt1-17",false,""\]}](https://salamandre.college-de-france.fr/ead.html?id=FR075CDF_00PV0003#!{) (Aufruf am 02.12.2015) veröffentlicht, wo einige der Bilder auch *online* angesehen werden können. In anderen,

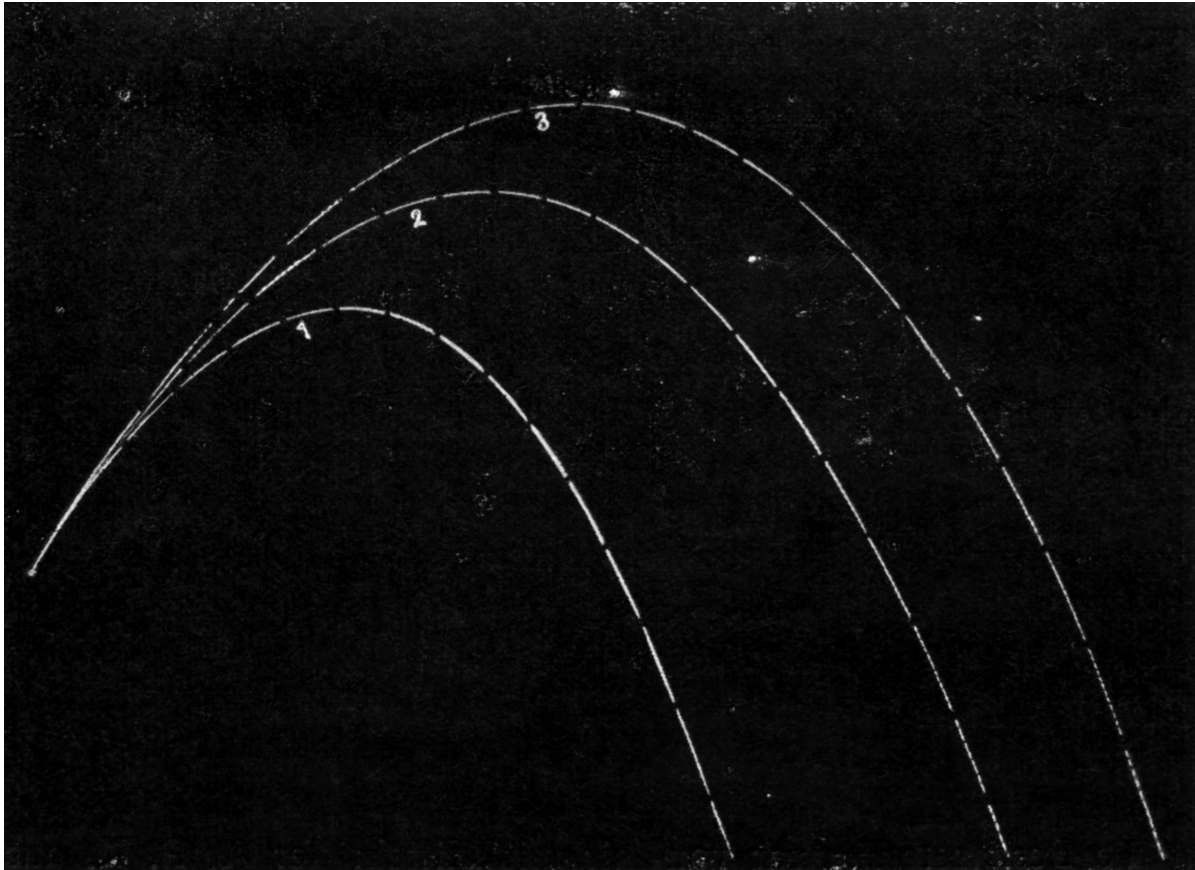


Abb. 3: Hans Rumpff, Lichtspuraufnahme von drei vollständigen Geschossbahnen. Aus: Rumpff, Hans: Die wissenschaftliche Photographie als experimentelle Grundlage des Maschinenbaues. Düsseldorf 1921, S. 43.

Zweitens waren alle vier Varianten der ballistischen Langzeitbelichtung stereoskopisch oder multiperspektivisch, was eine Lokalisierung des Geschosses im dreidimensionalen Raum möglich machte. Schon Neesen konnte jeweils den genauen Ort des Projektils ermitteln, indem er dieses, wie die Abbildung 2 demonstriert, aus zwei unterschiedlichen Perspektiven fotografierte,⁸² für Rumpff galt Ähnliches.⁸³ Von Hubert und Berger nahmen sogar stereofotografische Bildpaare auf, die sie anschließend mit einem Stereokomparator auswerteten.⁸⁴ Dabei stellte Berger die beiden Fotoapparate in weit größerer Entfernung als dem Augenabstand auf,⁸⁵ was dazu geführt haben dürfte, dass die aus den großen Distanzen der

physiologischen Zusammenhängen hat Marey übrigens auch markierte und intermittierte Dauerbelichtungen produziert, auf denen die Bewegungsbahnen nicht aus Punkten, sondern aus Strichen zusammengesetzt sind. Momentfotografische Mehrfachbelichtungen von eigentlichen Schüssen und Explosionen wiederum wurden später von Harold E. Edgerton aufgenommen. Einige dieser Fotografien, die aus den Jahren 1951–62 stammen, werden durch das MIT Museum, Cambridge, *online* zugänglich gemacht auf <http://edgerton-digital-collections.org/galleries/museum> (Aufruf am 02.12.2015).

⁸² Vgl. Neesen, *Geschwindigkeit*, 1902, S. 380; Neesen, *Umdrehungsgeschwindigkeit*, 1903, S. 112f., 115f.; Neesen, *Photographie*, 1915, S. 450; Neesen, *Photographie*, 1917, S. 149f.; Cranz, *Lehrbuch*, 1927, S. 115.

⁸³ Vgl. Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 41f.

⁸⁴ Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 61ff.; Berger, Hauptmann, 1914, S. 233ff., 239.

⁸⁵ Vgl. Berger, Hauptmann, 1914, S. 235f.

Kameras vom Objekt resultierende Abschwächung der Tiefenwirkung bei der Betrachtung der Bilder durch den Komparator ausgeglichen wurde.⁸⁶

Drittens schließlich lieferten alle vier Formen der markierten Langzeitbelichtung – vor allem aber jene drei Varianten, denen es auf eine Erfassung des gesamten Schusses ankam⁸⁷ – die ersten indexikalischen Bilder, welche die Gestalt der ballistischen Kurve im luftgefüllten Raum richtig wiedergaben. Denn schon Galilei hatte zwar, wie oben angedeutet, in seinen *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze* (1638) behauptet, dass die ballistische Bewegungsbahn im Schwerfeld der Erde einer Parabel entspreche, und als empirischen Beleg hierfür ein Experiment angeführt, bei dem ein in Farbe getauchter Ball entlang eines Brettes in die Höhe geworfen worden war und tatsächlich eine parabolische Farbspur hinterlassen hatte.⁸⁸ Doch ist die Parabelform nur im luftleeren und damit widerstandsfreien Raum gegeben und dürfte von dem Ball nur deshalb gezeichnet worden sein, weil der Luftwiderstand hier aufgrund der geringen Geschwindigkeit sehr gering ausfiel. Wie jedoch in der Nachfolge Galileis in einem langwierigen Prozess, an dem insbesondere Isaac Newton, Robert Hooke, Johann Bernoulli, Christiaan Huygens, Benjamin Robins und Leonard Euler beteiligt waren,⁸⁹ entdeckt wurde, macht sich der Luftwiderstand bei höheren Geschwindigkeiten, wie sie bei Schüssen durchaus erreicht werden können, in einer Abbremsung des Objekts bemerkbar, die dessen Bewegungsbahn mit einer zunehmend stärkeren Krümmung versieht und ihr damit die bei einer Parabel gegebene Achsensymmetrie nimmt. Dabei hängt die Stärke des Luftwiderstands von der genauen Geschwindigkeit ab: Mit Neesen kann festgehalten werden, dass der Widerstand bei mittleren Geschwindigkeiten diesen direkt proportional ist, bei höheren Geschwindigkeiten mit deren Quadrat wächst und bei Überschallgeschwindigkeiten von bis zu 500 m/s sogar noch rascher zunimmt.⁹⁰ Durch Bewegungsspuraufnahmen konnten aber die *Auswirkungen* des Luftwiderstands auf die Gestalt der Geschossbahn in allen diesen Fällen erfasst werden. Und damit bildeten diese Fotografien auch ein Komplement zu jenen ballistischen Momentaufnahmen, welche mit den Druckwellen und den Wirbelbildungen an Überschallgeschossen die *Ursachen* für den hohen Luftwiderstand bei Projektilgeschwindigkeiten oberhalb der Schallgeschwindigkeit sichtbar machten. Da auf die Geschossbahn neben der Gravitation und dem Luftwiderstand außerdem noch weitere Faktoren, wie zum Beispiel Winde, einwirken, wird für sie heute in der Regel keine analytische Formel mehr angegeben. Wenn sich die ballistische Kurve aber letztlich einer exakten mathematischen Beschreibung entzieht, so ist ihre Visualisierung mit den Mitteln der

⁸⁶ Sowohl Neesen als auch Rumpff wiesen darauf hin, dass die periodische Unterbrechung der Bewegungsbahn infolge der Rotation des Projektils die Zuordnung gleicher Bewegungsphasen in den beiden Bildern erleichtere. Für nicht rotierende Geschosse entwickelte Rumpff einen speziellen Mechanismus, der die beiden Belichtungen in regelmäßigen Zeitabständen mit hoher Genauigkeit simultan unterbrechen sollte. Vgl. Neesen, *Photographie*, 1915, S. 450; Neesen, *Photographie*, 1917, S. 150; Rumpff, *Photographie*, 1921, S. 42ff.

⁸⁷ Auch von Huberth ging es explizit darum, neben Erkenntnissen über den Tangentenwinkel, die Fortbewegungsgeschwindigkeit und die Geschossrotation auch eine Einsicht in die Gestalt der Flugbahn zu gewinnen. Vgl. Huberth, *Aufnahme*, 1915, S. 61.

⁸⁸ Vgl. Sonar, *Entwicklung*, 2008, S. 223; Wohlwill, *Discovery*, 2000, S. 653ff.

⁸⁹ Vgl. Steele, *Muskets*, 1994, S. 349f., 353, 361, 366; Sonar, *Entwicklung*, 2008, S. 224ff.

⁹⁰ Vgl. Neesen, *Photographie*, 1917, S. 146f.

fotografischen Langzeitbelichtung, wie von Huberth folgerte, besonders „wünschenswert“.⁹¹

Neben den Geschossen wurden für ballistische Langzeitbelichtungen auch die Schusswaffen präpariert, um deren Bewegungsbahnen, etwa den Rückstoß, ebenfalls zu visualisieren. So schlug beispielsweise der Österreicher Giuseppe Pizzighelli vor, am Rohr oder an der Lafette eines Geschützes ein schwarzes Brett mit einer hellen Quecksilberkugel zu befestigen, die dann bei frontaler Beleuchtung so fotografiert wurde, dass man „einen hellen Strich auf dunklem Grunde [erhielt], der umso länger [war], als der Rückstoss stärker [wirkte]“.⁹² Die beiden Amerikaner Albert C. Crehore und George O. Squier wiederum brachten an der Mündung eines Gewehres ein Blech mit Löchern an, die auf die Fotoplatte Gegenlicht fallen ließen.⁹³ Während die Präparierung die vergleichsweise kleinen Projektile lediglich vom Hintergrund abheben sollte, diente sie im Falle der wesentlich größeren Geschütze auch einer optischen Reduktion des Objekts auf einen Punkt. Denn nur so zeigte die Langzeitbelichtung anstelle eines Gewirrs unterschiedlicher bewegungsunscharfer Formen eine einzelne – durch die Markierung gezeichnete – Bewegungsbahn, welche sich leicht entziffern ließ. Damit stand hier der Ausdehnung der Belichtungszeit von einem Zeitpunkt auf eine längere Zeitdauer eine Schrumpfung des Gegenstandes auf einen Raumpunkt gegenüber. Diese Schrumpfung implizierte aber, dass das betreffende Objekt zum Verschwinden gebracht und die Bewegung von ihm abgelöst wurde. An die Stelle des realen Körpers trat freilich mit der Bewegungsbahn ein neuer, imaginärer Körper.

Langzeitbelichtungen mit bewegtem Bildträger

Während sich in allen bisher beschriebenen Fällen nur das ballistische Objekt – das Geschoss oder das Geschütz – bewegte, der fotografische Bildträger dagegen ruhte, führte Neesen schon in den 1890er Jahren auch Experimente durch, bei denen er den Bildträger mit dem Objekt verband und dessen Bewegung mitvollziehen ließ. Hierzu platzierte er im Innern des Projektils nicht mehr eine Lichtquelle, sondern einen fotografischen Film, auf den durch ein kleines Loch das Sonnenlicht fiel. Wurde das epistemische Objekt – das Geschoss oder die Waffe – bereits

⁹¹ Huberth, Aufnahme, 1915, S. 60. – Auch in nicht-indexikalischen Bildern wurde die Geschossbahn lange Zeit falsch wiedergegeben: Zum einen setzten wissenschaftliche Abbildungen bis zur frühen Neuzeit die Bahn in der Regel auf der Basis von Aristoteles' Unterscheidung zwischen natürlichen und gewaltsamen Bewegungen und Euklids Beschränkung der Geometrie auf die Gerade und den Kreis aus zwei geraden Linien – einer schräg aufsteigenden und einer senkrechten abfallenden Linie – zusammen und verbanden diese Teilstücke manchmal noch durch einen Kreisbogen. Vgl. Sonar, Entwicklung, 2008, S. 206; Büttner u.a., Images, 2003, S. 5, 7. Zwar waren sich die Autoren bisweilen darüber im Klaren, dass dies keine korrekte Repräsentation der realen Bahngestalt darstellte, und verfolgten einen anderen Zweck, der in einer geometrischen Bestimmung des Zusammenhangs von Elevation und Schussweite bestand. Doch kamen sie auch hier zu keinen validen Ergebnissen. Ein gutes Beispiel hierfür ist Niccolò Tartaglias *Nova scientia* (1537). Vgl. Büttner u.a., Images, 2003, S. 13ff.; Sonar, Entwicklung, 2008, S. 220ff. Zum anderen konnten künstlerische Bilder die Geschossbahn zwar schon damals auf realistischere Weise, nämlich als kontinuierlich gekrümmt, darstellen, was ebenfalls durch das Titelblatt der *Nova Scientia* exemplifiziert wird. Vgl. Büttner u.a., Images, 2003, S. 13f. Doch auch diese durchgängig gekrümmten Kurven trugen der enormen Komplexität der bei Schüssen herrschenden Bedingungen keinerlei Rechnung.

⁹² Rieckeheer, Photographie, 1900, S. 397.

⁹³ Vgl. Neesen, Photographie, 1917, S. 165.

bei der Markierung durch eine Lichtquelle mit einem Teil des technischen Objekts – der fotografischen Aufnahmeapparatur – fusioniert,⁹⁴ so bezog sich diese Verschmelzung nun sogar auf den Fotoapparat, da Neesen das Geschoss in eine „Lochkamera“ verwandelte.⁹⁵ So wie also bei jener Form der ballistischen Momentfotografie, welche die Belichtungszeit ausschließlich durch elektrisches Blitzlicht regulierte und deshalb ohne einen Kameraverschluss auskam, der gesamte Laborraum als eine *camera obscura* fungierte,⁹⁶ wurde diese Rolle hier vom Projektil übernommen. Auch dieses nahm in einer Langzeitbelichtung Lichtspuren auf, die in diesem Fall zwar von der Sonne gezeichnet wurden, aber Rückschlüsse auf die Pendelbewegungen des Geschosses selbst erlaubten (Abb. 4).⁹⁷

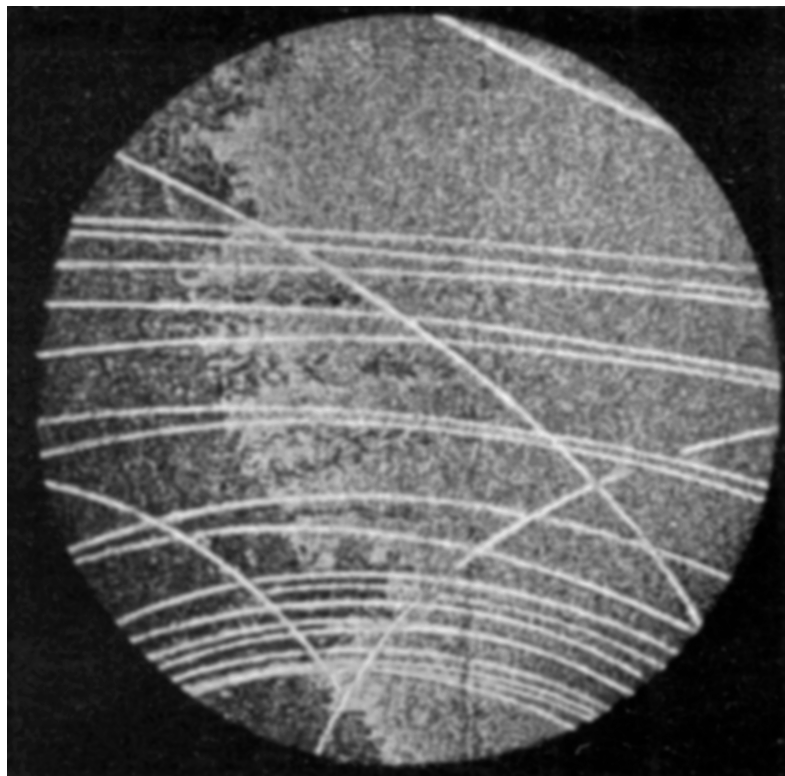


Abb. 4: Friedrich Neesen, Langzeitbelichtung von den Pendelbewegungen eines als Lochkamera fungierenden Geschosses. Aus: Neesen, Friedrich: Photographie fliegender Geschosse. In: Umschau 19 (1915), H. 23, S. 448–452, hier S. 451.

⁹⁴ Zur Unterscheidung von epistemischem und technologischem Ding vgl. Rheinberger, Experiment, 1992, S. 67ff.

⁹⁵ Neesen, Photographie, 1915, S. 451; Neesen, Photographie, 1917, S. 162.

⁹⁶ Vgl. Berz, 08/15, 2001, S. 436.

⁹⁷ Vgl. Neesen, Photographie, 1915, S. 451; Neesen, Photographie, 1917, S. 161ff. – Später wurden in der Ballistik auch Langzeitbelichtungen hergestellt, die ausschließlich die Bewegungen des Bildträgers zeigen sollten: Bei den oberirdischen Atombombentests der USA platzierte Edgerton in der Bombenkabine Blitzlichtlampen und dauerhaft leuchtende 1000-W-Lampen, die er vom Kameraturm aus fotografierte, um anhand der resultierenden Lichtspuren die Vibrationen dieses Turmes infolge des Windes zu bestimmen. Vgl. Edgerton, Photography, 1959, S. 77f.; Elkins, Edgerton, 2004, S. 76.

Eine weitere Variante der ballistischen Dauerbelichtung bestand darin, dass das Objekt und der Bildträger oder ein anderer Bestandteil der fotografischen Apparatur nicht *dieselbe* Bewegung, sondern zwei *unterschiedliche* – oft im rechten Winkel zueinander stehende – Bewegungen vollführten, die sich in der Aufnahme überlagerten. Bei solchen Fotografien handelte es sich nicht mehr um Bilder von zwei oder drei Dimensionen des Raumes, sondern um Diagramme, die sich auf eine Raumdimension beschränkten und diese in ein Verhältnis zur Zeit als der vierten Dimension setzten.

Dieses Verfahren wurde auf verschiedene ballistische Bewegungen angewendet, die dabei auf unterschiedliche Weisen mit der zweiten Bewegung kombiniert wurden. Zunächst ließen sich fotografische Kurvendiagramme von Geschossen erstellen. Dem diente etwa der so genannte ‚Schaulinienzeichner‘, den Rumpff zwar aufgrund der deutschen Niederlage im Ersten Weltkrieg ebenfalls nicht mehr praktisch erproben konnte, den er aber immerhin schon gebaut hatte. Die Bewegung, mit der die Projekttilbewegung hier überlagert wurde, war diejenige einer in der Kamera befindlichen Scheibe, die in ihrer eigenen Ebene um ihren Mittelpunkt rotierte. Auf dieser Scheibe wurde der Flug des Geschosses mittels einer Schlitzblende als spiralförmige Kurve abgebildet, aus der sich bei bekannter Objektivbrennweite und bekanntem Abstand zwischen Objekt und Bildebene die zurückgelegten Strecken ableiten ließen. Eine zweite Spaltblende setzte die Vibrationen einer Stimmgabel in einen gepunkteten Kreis um, aus dem man die Zeiten ablesen konnte (Abb. 5).⁹⁸

Neesen wiederum benutzte für seine Langzeitaufnahmen von den präparierten Artilleriegeschossen neben den beiden stereoskopischen noch zwei weitere Kameras, von denen die eine einen ruhenden Bildträger enthielt, die andere aber einen Bildträger, der auf einem rotierenden Zylinder befestigt war. Diese Mobilisierung des Bildträgers ähnelte dem Transport eines kinematografischen Filmes, unterschied sich von ihm jedoch darin, dass hier keine Serie von Momentaufnahmen, sondern ebenfalls eine bewegte Langzeitbelichtung produziert wurde. Während die aufgenommenen Geschosse in diagonalen Richtung flogen, wurde der zweite Bildträger von der Trommel in vertikaler Richtung bewegt. Dabei konnten beide Bewegungen nach oben ebenso wie nach unten verlaufen. Waren ihre Richtungen gleich, so wurden die Flugbahnabschnitte und die zwischen diesen liegenden Lücken gestaucht; waren sie einander entgegengesetzt, so wurden die Abschnitte und die Lücken gedehnt. Da die Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders mittels einer Stimmgabel gemessen wurde, bot ein Vergleich zwischen den senkrechten Abständen der Flugbahnstücke in der bewegten und jenen in der unbewegten Fotografie eine weitere Möglichkeit, die Geschwindigkeiten von Geschossflug und -rotation zu bestimmen.⁹⁹

⁹⁸ Vgl. Rumpff, Photographie, 1921, S. 67ff.

⁹⁹ Vgl. Neesen, Umdrehungsgeschwindigkeit, 1903, S. 112f., 118f.; Neesen, Photographie, 1917, S. 150f.; Heydenreich, Verwendung, 1905, S. 576; Schmidt, Bestimmung, 1907, S. 694, 697ff.; Rumpff, Photographie, 1921, S. 66; Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 316. – Auch die Erfassung von Geschossbewegungen in fotografischen Weg-Zeit-Diagrammen sollte später weitergeführt werden. So entwickelte etwa Joseph Kampé de Fériet 1924 ein weiteres derartiges Verfahren, das er übrigens außer auf den freien Geschossflug auch auf den Austritt der Projektile und Pulvergase aus der Mündung applizierte. Vgl. Cranz, Lehrbuch, 1927, S. 339f. Und Rumpff stellte drei Jahre später eine ‚Universal-Meß-Kamera‘ vor, deren Verschluss während der vollständigen Rotation einer Filmtrommel geöffnet blieb. Vgl. Rumpff, Fortsetzung, 1927, S. 34f. Rumpff zufolge bot diese Kamera gegenüber der Serienfotografie den doppelten Vorteil, dass hier für die Bestimmung der Projekttilgeschwindigkeit nicht zwei

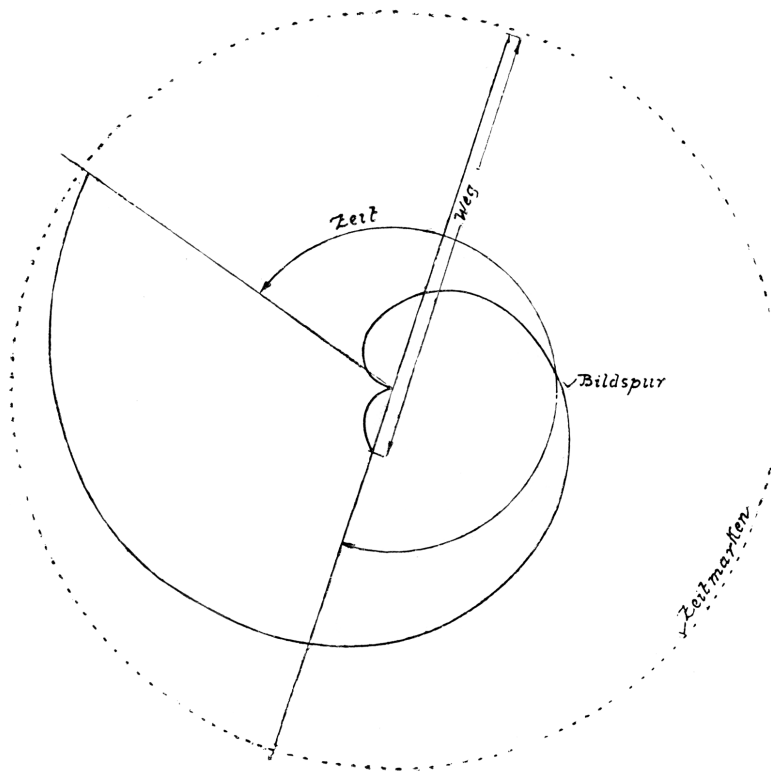


Abb. 5: Hans Rumpff, Prinzip des Schaulinienzeichners. Aus: Rumpff, Hans: Die wissenschaftliche Photographie als experimentelle Grundlage des Maschinenbaues. Düsseldorf 1921, S. 68.

Die Dauerbelichtungen mit bewegtem Bildträger konnten sich aber auch auf die Bewegungen der Schusswaffe beziehen, was insbesondere bei dem bekannten deutschen Ballistiker Carl Cranz geschah. 1898 wandte sich dieser gemeinsam mit Karl Richard Koch einer Klärung der Frage zu, ob der häufig zu beobachtende Abgangsfehler bei Gewehren durch vertikale Schwingungen des Laufs verursacht werde. Cranz und Koch brachten am Gewehrlauf ein zu diesem paralleles Drahtstück an, stellten auf der einen Seite im rechten Winkel hierzu eine Spaltblende mit einer davor befindlichen Lichtquelle auf und platzierten auf der anderen Seite eine Fotoplatte, auf die der durch den Spalt sichtbare Teil des Drahtes einen Schatten warf. Während das Drähtchen durch den Schuss in vertikale Schwingungen versetzt wurde, glitt die Platte in horizontaler Richtung an ihm vorbei, so dass auf ihr eine Kurve entstand, deren Ausschläge den Schwingungen entsprachen. Daneben wurden als Zeitmaß auch hier die Schwingungen einer Stimmgabel aufgezeichnet; um den Einfluss der Schwingungen des Laufs auf den Abgangsfehler bestimmen zu können, wurde auf der Platte schließlich der Zeitpunkt des Geschossabgangs registriert. Diese Versuchsanordnung kam in verschiedenen Abständen von der Gewehrmündung zur Anwendung. Die resultierenden Aufnahmen zeigten, dass der Lauf in senkrechter Richtung eine rasch gedämpfte, aber vergleichsweise komplexe Schwingung

Bilder benötigt wurden, sondern eine Aufnahme genügte und dass die Weg-Zeit-Kurve des Geschosses hier nicht erst umständlich aus den Bildern abgeleitet werden musste, sondern in diesen bereits unmittelbar gegeben war. Vgl. Rumpff, Geschwindigkeitsmessungen, 1927, S. 2.

ausführte, die sich aus zwei Frequenzen – einem Grundton und dem ersten Oberton – zusammensetzte. Der Einfluss auf den Abgangsfehler, so Cranz und Koch, hänge davon ab, in welcher Schwingungsphase sich der Lauf im Augenblick des Geschossaustritts befinde, was wiederum durch die Größe der Ladung bedingt sei.¹⁰⁰

Ungefähr zur gleichen Zeit entwickelte Cranz auch zwei langzeitfotografische Methoden, mit denen sich der Rückstoß der Gewehre aufzeichnen ließ. Beim ersten dieser beiden Rücklaufmesser wurde der Draht am Lauf im rechten Winkel befestigt. Senkrecht zur Bewegung des Drahtes stand wieder die – rotatorische oder translatorische – Bewegung des Fotopapiers. Um im Fall der Rotation Mehrfachbelichtungen zu vermeiden, wurde das Fotopapier hier nur für eine begrenzte Zeit durch eine bewegliche Blende freigegeben. Das visuelle Resultat war ein nach oben ausschlagender Streifen in der Breite des Drahtes. Cranz' zweiter Rücklaufmesser verband den Gewehrlauf dagegen mittels Zapfenführung mit einem drehbaren Spiegel, der einen Lichtstrahl auf die bewegte Fotoplatte lenkte, wo auf diese Weise dünne Kurven entstanden (Abb. 6).¹⁰¹ Obwohl diese Kurven den typischen Bewegungsbahnen von Artillerieprojektilen ähneln konnten, wie sie bei Langzeitbelichtungen mit ruhendem Bildträger aufgenommen wurden, hatten sie eine völlig andere Bedeutung. Denn abgesehen davon, dass sie anstelle der Bewegung des Geschosses diejenige der Schusswaffe wiedergaben, stand die eine ihrer beiden Dimensionen eben nicht für eine der drei Raumachsen, sondern für die Zeit.

Schließlich konnten auch fotografische Weg-Zeit-Diagramme von Explosionen erstellt werden. Zum ersten Mal geschah dies 1888, als die beiden deutsch-estnischen Chemiker Arthur von Oettingen und Arnold von Gernet mit Metallsalzen präpariertes Knallgas zur Explosion brachten, das sie in eine 40 cm lange Glasröhre eingeschlossen hatten. Um die Explosion auf eine Raumdimension zu reduzieren, versahen sie das Rohr entlang seiner Achse mit einem 3 mm breiten Sichtschlitz, durch den das Explosionslicht auf einen schnell rotierenden Spiegel fiel, der es in einen Fotoapparat mit dauerhaft geöffnetem Verschluss umlenkte. Die Aufnahmen zeigten jeweils mehrere Streifen, die für die Fortpflanzung der Verdichtungswelle und für deren Reflexionen an den Enden der Röhre standen. Da die Rotationsgeschwindigkeit des Spiegels bekannt war, ließ sich von den Neigungswinkeln der Streifen eine Anfangsgeschwindigkeit von 2500 m/s und eine Endgeschwindigkeit von 600 m/s ablesen. Mit diesem Experiment begründeten von Oettingen und von Gernet das Prinzip der Schmierkamera, die zwar mit vergleichsweise kurzen Belichtungsdauern, nichtsdestotrotz aber ebenfalls mit Bewegungsunschärfen arbeitet.¹⁰²

¹⁰⁰ Vgl. Cranz/Koch, Untersuchungen, 1899; Cranz/Koch, Untersuchung, 1900; Rieckeheer, Fortsetzung, 1900, S. 439ff.; Neesen, Photographie, 1917, S. 166.

¹⁰¹ Vgl. Cranz, Notizen, 1907, S. 347f.

¹⁰² Vgl. Oettingen/Gernet, Knallgasexplosion, 1888. Im Jahre 1931 konstruierten in Großbritannien William H. Payman und Donald W. Woodhead ebenfalls eine Schmierkamera, mit der sie die Druckwellen explodierender Gasmischungen in Röhren fotografierten. Dabei ergänzten sie den rotierenden Spiegel um eine rotierende Trommel und ordneten den Schlitz zur Reduktion der Explosion auf eine Raumdimension senkrecht zu ihrer Ausbreitungsrichtung an. Nach einigen Verbesserungen in den folgenden Jahren erreichten Payman und Woodhead eine Schreibgeschwindigkeit von 500 m/s. Vgl. Krehl, History, 2009, S. 493, 1017.

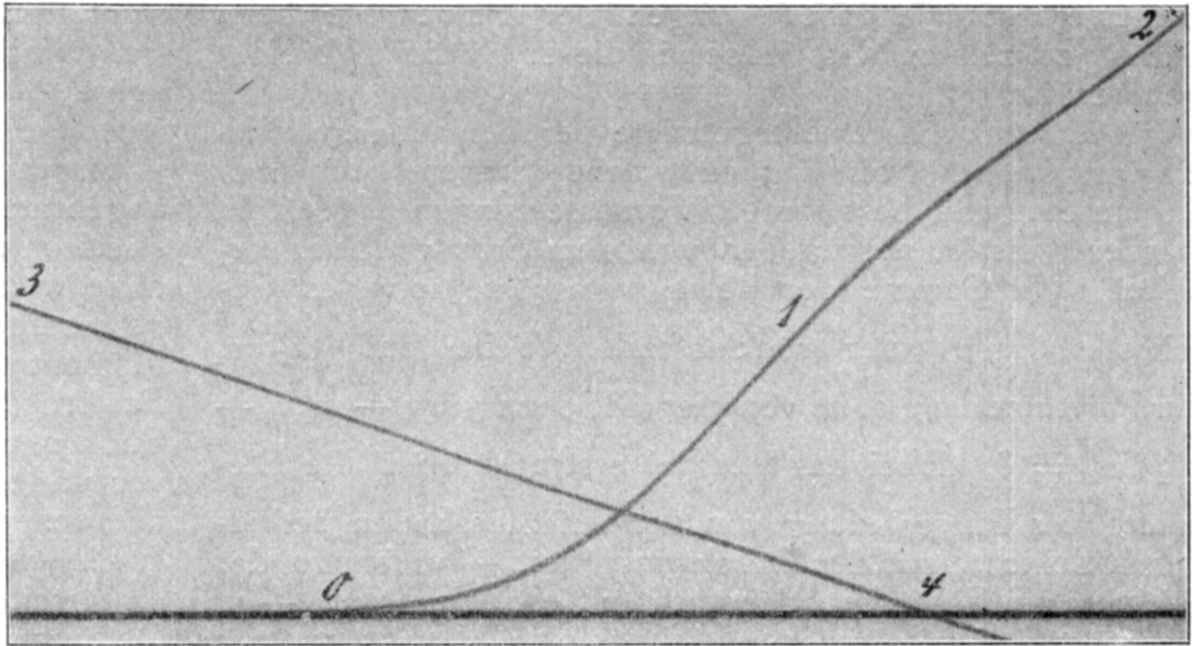


Abb. 6: Carl Cranz, Aufzeichnung eines fotografischen Gewehrrücklaufmessers mit Spiegelfühlhebel, ca. 1900. Aus: Cranz, Carl: Vermischte ballistische Notizen. In: Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen 2 (1907), H. 18, S. 345–348, hier S. 348.

Indexikalische Weg-Zeit-Kurven ließen sich in der Ballistik auch mit anderen als mit fotografischen Mitteln generieren, zum Beispiel dadurch, dass sich die Schwingungen einer am Gewehrlauf befestigten und durch den Rückstoß verschobenen Stimmgabel in eine berußte Zinkplatte einscrieben.¹⁰³ Doch gegenüber solchen mechanischen Diagrammen, bei denen das Objekt mit dem Bildträger in einen materiellen Kontakt tritt, boten fotografische Diagramme, bei denen die Verbindung allein durch einen immateriellen Lichtstrahl hergestellt wird, generell den Vorteil, dass es zu keinen verfälschenden Reibungen kommen konnte.¹⁰⁴ Das gilt auch für den ballistischen Kontext, weshalb hier beispielsweise Otto Heinrich Theodor Schmitz den fotografischen Kurvenzeichner dem mechanischen vorzog.¹⁰⁵

Die letzte im hier interessierenden Zeitraum entwickelte Form der ballistischen Langzeitbelichtung bestand darin, dass die für das Verfließen der Zeit stehende Bewegung des fotografischen Bildträgers oder einer anderen Komponente des bildgebenden Apparates mit einer Bewegung überlagert wurde, welche nicht mehr eine Raumdimension, sondern eine andere physikalische Größe – in der Regel die von Explosionen und Schüssen ausgehenden Druckveränderungen – repräsentierte. Bei dieser Sorte fotografischer Diagramme war noch der letzte Bezug zum physischen Raum aufgegeben und damit die Übersetzung non-spatialer Phänomene in die Spatialität des Bildes selbst auf die Spitze getrieben.

Ein erstes Beispiel für ballistische Druck-Zeit-Diagramme stellte ein von Joseph Petavel konstruierter Apparat zur Messung des zeitlichen Verlaufs von Drücken dar, die durch die

¹⁰³ Vgl. N.N., Bestimmung, 1894.

¹⁰⁴ Vgl. Brenni, Instruments, 1997, S. 745.

¹⁰⁵ Vgl. Schmitz, Versuche, 1913, S. 486.

Explosionen fester und gasförmiger Stoffe in sphärischen und zylindrischen Explosionskammern hervorgerufen wurden. Die Explosionsdrücke bewirkten den Ausschlag eines Kolbens, an dem ein Spiegel befestigt war, welcher diese Bewegung durch die Reflexion eines Lichtstrahls auf eine sich drehende und mit Fotopapier bespannte Trommel übertrug und dabei verstärkte. Eine Besonderheit der auf diese Weise produzierten Kurvendiagramme bestand darin, dass sich auf der Abszisse mehrere Zeitabschnitte überlagerten, weil der Zylinder während mehrerer Umdrehungen belichtet wurde, so dass auf dem Fotopapier mehrere aufeinander folgende Abschnitte der Kurven übereinander erschienen.¹⁰⁶

Außer von Explosionen wurden fotografische Druck-Zeit-Kurven auch von der Verbrennung des Pulvers im Innern von Schusswaffen erstellt. Beispielsweise konstruierte Schmitz im Auftrag von Krupp ein innenballistisches Messinstrument, das zwar explizit nur an den zweiten der oben erwähnten Rücklaufmesser von Cranz angelehnt war, aber auch gewisse Ähnlichkeiten mit Petavels Apparat aufwies. Denn auch hier wurde eine Verbrennungskammer mit einem gefederten Kolben versehen, der durch die Verbrennung des Schießpulvers hinausgetrieben wurde. Und auch hier saß auf dem Kolben ein Spiegel, welcher den Lichtstrahl einer Kohlebogenlampe auf eine mit Fotopapier ummantelte Trommel warf, die mit variabler Geschwindigkeit rotierte. Im Strahlengang zwischen der Lampe und der Trommel positionierte Schmitz freilich neben zwei Objektiven auch einen Verschluss, der die Belichtungszeit auf die Dauer der Verbrennung beschränkte.¹⁰⁷

Schließlich kam das fotografisch erzeugte Diagramm zeitlicher Druckverläufe auch in der äußeren Ballistik, also bei der Untersuchung des Geschosses während des freien Fluges nach Verlassen der Waffe, zur Anwendung. Um etwa einem vermuteten Zusammenhang zwischen dem im Ersten Weltkrieg häufig auftretenden Phänomen des *shell shock* und den Druckwellen großer Geschütze auf den Grund zu gehen, führte der amerikanische Physiker Dayton C. Miller vom April 1918 bis zum November 1919 auf dem Schießplatz von Sandy Hook diverse Schallaufzeichnungen durch, von denen die meisten auf das Medium der Fotografie zurückgriffen.¹⁰⁸ So maß Miller unter anderem in verschiedenen Abständen die Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Geschützschallwellen mit Hilfe von Mikrofonen, welche mit Saitengalvanometern verbunden waren, deren Ausschläge auf bewegten Film aufgenommen wurden.¹⁰⁹ Daneben brachte Miller das so genannte ‚Phonodeik‘ zum Einsatz,

¹⁰⁶ Vgl. Lehmann, Apparate, 1906, S. 327ff.

¹⁰⁷ Vgl. Schmitz, Versuche, 1913, S. 485ff. Schmitz stützte sich hierbei auf innenballistische Experimente von Prosper-Jules Charbonnier, bei denen dieser eine von Paul Vieille entwickelte Registriervorrichtung benutzt hatte. Da diese aber nur sehr kleine und undeutliche Aufzeichnungen lieferte, hatte sich Charbonnier damit begnügen müssen, die Wendepunkte der Druckkurven und die Maximaldrücke abzulesen. Schmitz' Apparat stellte insofern eine Verbesserung von Vieilles Instrument dar, als er durch die Integration des Spiegels die Ausschläge um den Faktor 100 vergrößerte. Vgl. Schmitz, Versuche, 1913, S. 483, 485ff.

¹⁰⁸ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 91f.

¹⁰⁹ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 121ff. Das Saitengalvanometer war 1903 von dem holländischen Physiologen Willem Einthoven erfunden worden. Es besteht aus einem elektrisch leitfähigen Faden in einem magnetischen Feld, der beim Hindurchfließen von Strom seitlich ausschlägt, wobei die Stärke des Ausschlages Aufschluss über die Stromstärke gibt. Bei Millers Messungen kam es freilich weniger auf die Stärke als vielmehr auf den Zeitpunkt des Stromflusses an, der hier durch die Mikrofone geliefert wurde, welche ihn aus dem empfangenen Schall erzeugt hatten. Übrigens entwickelte auch Lucien Bull, ein Mitarbeiter des Institut Marey, während des Ersten Weltkriegs gemeinsam mit dem Physiker Charles Nordmann einen Apparat, bei dem ein Mikrofon die Schallwellen von Geschützsalven empfangt und in einen elektrischen Strom verwandelt, welcher ein

von dem er auch eine tragbare Variante für den Feldeinsatz entwickelt hatte.¹¹⁰ Ähnlich wie die Apparate von Petavel und Schmitz griff das Phonodeik auf einen Spiegel zurück, der die von ihm empfangenen Bewegungen mittels eines Lichtstrahls auf einen Film umlenkte und dabei um den Faktor 3000 verstärkte.¹¹¹ Der Film konnte auch hier während der Belichtung mit Hilfe zweier Spulen oder einer Trommel bewegt werden; oder aber ein zweiter beweglicher Spiegel ließ das Bild über einen unbewegten Film gleiten.¹¹² Die Kamera besaß neben einem Kurzauch einen Langzeitverschluss, der für Belichtungsdauern zwischen 1/40 s und 1/20 s sorgte.¹¹³ Und erneut wurde am Rande des Filmes mittels einer Stimmgabel eine Zeitskala generiert.¹¹⁴ Da Miller das Phonodeik jedoch bei außenballistischen Experimente benutzte, wurde der Spiegel hier nicht mit einem Kolben, sondern mit Glas-Membranen unterschiedlicher Stärke verbunden, deren Schwingungen der Spiegel in Drehbewegungen umsetzte.¹¹⁵ In Sandy Hook produzierte Miller mit dem Phonodeik 29 fotografische Kurvendiagramme von den Schallwellen unterschiedlicher Geschütze, die er dabei aus verschiedenen Winkeln und Abständen erfasste. In der Regel zeigten die Aufnahmen am Anfang einen starken positiven Ausschlag und einen etwas schwächeren, aber längeren negativen Ausschlag, die beide vom Geschütz herrührten, später zwei deutlich schwächere Ausschläge aufgrund des Einschlags im Zielobjekt und der dortigen Reflexion des Geschützknalls sowie unterschiedliche Vibrationen, die teils durch andere Reflexionen, teils durch die Membran selbst verursacht waren. Bei Schüssen mit Überschallgeschwindigkeit ging dem Geräusch des Geschützes noch dasjenige des Geschosses voraus (Abb. 7).¹¹⁶ Während also Mach und andere mit ihren ballistischen Momentfotografien, auf die Miller in seinem Buch über die Experimente in Sandy Hook übrigens Bezug nahm,¹¹⁷ die *räumliche* Gestalt der Druckwellen von Überschallgeschossen sichtbar gemacht hatten, zeichnete Miller den *zeitlichen* Verlauf der von diesen Geschossen und den Geschützen ausgehenden Druckwellen auf.¹¹⁸

Saitengalvanometer anregte, dessen Auslenkungen schließlich auf einem 35-mm-Film registriert wurden. Allerdings diente dieses Gerät nicht einer Messung der Schallgeschwindigkeiten an bekannten Abständen vom Geschütz, sondern einer trigonometrischen Lokalisierung feindlicher Geschütze, deren Standorte zunächst unbekannt waren. Tatsächlich brachte die britische Armee Bulls Apparat zu diesem Zweck im Ersten Weltkrieg zum Einsatz. Vgl. Vivié, Bull, 1967, S. 15ff.

¹¹⁰ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 33f.

¹¹¹ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 11, 15f.

¹¹² Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 11, 35, 38.

¹¹³ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 28f.

¹¹⁴ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 24f., 38.

¹¹⁵ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 10, 14, 36f.

¹¹⁶ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 94, 112ff.

¹¹⁷ Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 67ff. Miller ließ solche Aufnahmen auch selbst von einem Assistenten anfertigen. Vgl. Miller, Sound, 1937, S. 73ff.

¹¹⁸ Auch die ballistische Verwendung des nicht-räumlichen fotografischen Diagramms setzte sich nach 1920 fort. Ein Beispiel hierfür waren Oszillografen, welche die temporale Veränderung des zu erfassenden Phänomens in die Ablenkungen eines Elektronenstrahls auf dem Bildschirm einer Braunschen Röhre übersetzten, die wiederum fotografisch festgehalten wurden. So maßen Hans Joachim und Hans Illgen 1932 den zeitlichen Druckverlauf im Innern der Schusswaffe mit Hilfe eines piezoelektrischen Quatzkristalls, in dem die Druckänderungen Spannungen induzierten, welche in einen Oszillografen eingespeist wurden, der sich eines rotierenden, mit Fotopapier bespannten Zylinders bediente. Vgl. Krehl, History, 2009, S. 494, 1013. – Bei den amerikanischen Atombombentests dienten fotografische Langzeitbelichtungen schließlich der Erfassung eines anderen nicht-räumlichen Phänomens, nämlich der durch die Testexplosionen emittierten Gammastrahlung. Die langfristige

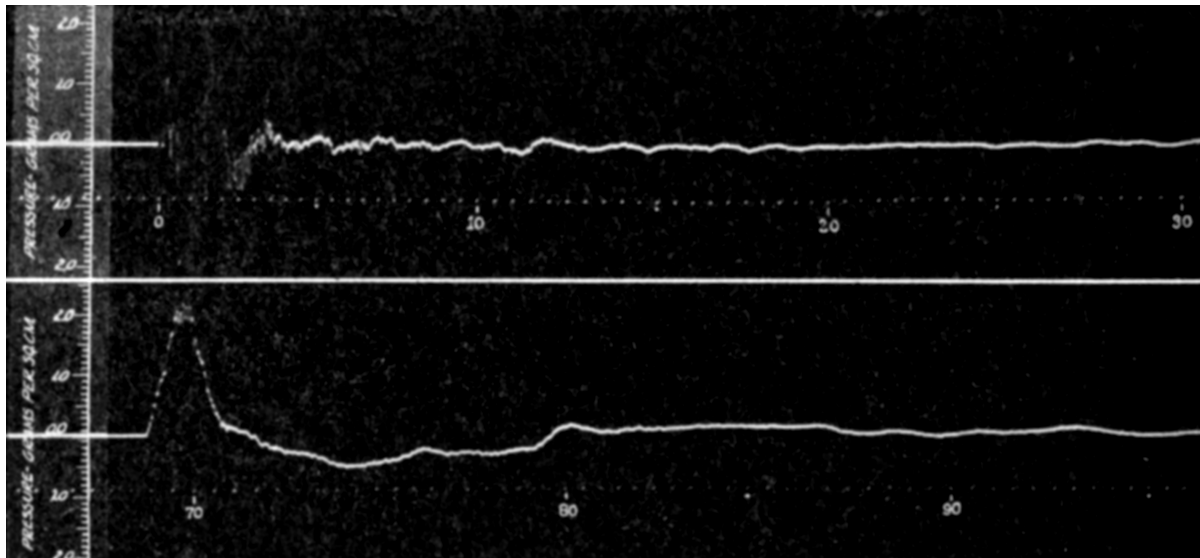


Abb. 7: Dayton C. Miller, Phonodeik-Aufnahme von den Geschosswellen (oben) und den Geschützwellen (unten) einer 14-Zoll-Kanone, Sandy Hook Proving Ground, 1918–19. Aus: Miller, Dayton C.: *Sound Waves. Their Shape and Speed. A Description of the Phonodeik and Its Applications and a Report on a Series of Investigations Made at Sandy Hook Proving Ground*. New York 1937, S. 120.

Fazit

Dieser Artikel hat entgegen der bisherigen medienhistorischen Forschung zu zeigen versucht, dass die Verwendung der Fotografie in der Ballistik zwar zu Pionierleistungen auf dem Gebiet kurzer Expositionsauern führte, sich hierauf aber keineswegs reduzieren lässt. Denn obwohl Bewegungsunschärfen in der Lichtbildnerei meistens höchst unwillkommen sind, war im besagten Zweig der wissenschaftlichen Fotografie der Gebrauch langer Belichtungszeiten, die solche Unschärfen hervorrufen können, mindestens genauso wichtig: Nicht anders als die kurzen dienten auch die langen Aufnahmedauern dazu, Geschosse und Schusswaffen sowie Schüsse und Explosionen gleichermaßen einzufangen. Dieses breite Anwendungsspektrum der Langzeitbelichtung verdankte sich insbesondere dem Umstand, dass das aufzunehmende Objekt bisweilen markiert wurde, um es vom Hintergrund abzuheben und gegebenenfalls auch in seinen räumlichen Abmessungen zu verkleinern. Auf diese Weise präpariert, hinterließ der

Exposition des Fotomaterials hatte hier aber nicht einmal mehr eine Kurve und damit eine bestimmte Form, sondern nur noch einen spezifischen Schwärzungsgrad zum Ergebnis. Dabei wurde die Strahlungsintensität im Fall der Lochkameras, die beim *Trinity*-Test vom 16.07.1945 zum Einsatz kamen, immerhin noch zeitlich aufgelöst, da die in ihnen befindlichen Filme während der Belichtung in Bewegung waren. Vgl. Julian E. Mack an Kenneth T. Bainbridge, Moving-Film Slit Camera for Gamma Ray Measurements at TR, 13.04.1945, National Nuclear Security Administration, Nevada Site Office, Las Vegas, Nr. NV0059749; Hoddeson u.a., *Assembly*, 1993, S. 355. Bei den kumulativ messenden Filmdosimetern, die sowohl bei diesem als auch bei späteren Tests an das Personal ausgegeben, an Testobjekten befestigt und in der Umgebung verteilt wurden, entfiel diese zeitliche Differenzierung jedoch; hier wurde lediglich die gesamte Strahlungsmenge erfasst, die nach einer bestimmten Zeit erreicht worden war. Allerdings enthielten einige der Dosimeter wieder eine räumliche Bedeutungskomponente, die zwar nicht intern differenziert war, aber insofern die Aufzeichnung im Ganzen betraf, als diese die an einem bestimmten Ort gegebene Strahlungsmenge anzeigen sollte.

Gegenstand auf der lichtempfindlichen Schicht eine Linie, die seine eigene Bewegungsbahn repräsentierte und über zahlreiche Eigenschaften derselben Aufschluss gab, welche sich mit rapidfotografischen Mitteln nicht erschließen ließen. Damit fungierten Langzeitbelichtungen in der Ballistik als eine wertvolle Ergänzung der Momentfotografien. Wie zu sehen war, stimmte die ballistische Nutzung von Langzeitaufnahmen mit derjenigen von Kurzzeitbelichtungen ferner darin überein, dass auch ihre Geschichte nicht mit dem Jahr 1920, dem Ende des hier fokussierten Zeitraumes, zuende ging, sondern weit darüber hinaus reichte: Auch die Technik der langen Belichtungsdauer besaß derartig viel Entwicklungspotenzial, dass sie auch danach noch eine Vielzahl weiterer Formen hervorbrachte. Und wie im Fall der Hochgeschwindigkeitsfotografie wurde dabei auch hier die Grenze zwischen der konventionellen und der nuklearen Waffentechnik überschritten. Letztlich war das Verfahren der ballistischen Langzeitaufnahme sogar nicht nur bestimmten nicht-fotografischen Methoden, wie etwa der Chronografie, epistemisch überlegen. Es hatte zugleich der Kurzzeitfotografie voraus, dass es anders als diese nicht bloß konkrete Abbilder des dreidimensionalen Raumes lieferte. Wurde nämlich der Bildträger einer langen Belichtung in eine vom Bildobjekt unabhängige Bewegung versetzt, so entstanden fotografische Diagramme, welche die vierte Dimension, die Zeit, in eine Beziehung zu einer Dimension des Raumes oder sogar zu einem nicht-räumlichen Parameter setzten. Hier drang die ballistische Dauerexposition in eine Sphäre der Abstraktion vor, welche der Rapidfotografie verschlossen blieb.

Bibliografie

Berger, Josef V.: Hauptmann Scheimpflugs (†) aerophotogrammetrische Apparate im Dienste ballistischer Forschung. In: Artilleristische Monatshefte 87 (1914), S. 232–239.

Berz, Peter: 08/15. Ein Standard des 20. Jahrhunderts. München 2001.

Bredenkamp, Horst: Die Erkenntniskraft der Linie bei Galilei, Hobbes und Hooke. In: Hüttel, Barbara; Hüttel, Richard; Kohl, Jeanette (Hrsg.): Re-Visionen. Zur Aktualität von Kunstgeschichte. Berlin 2002, S. 145–160.

Brenni, Paolo: Physics Instruments in the Twentieth Century. In: Krige, John; Pestre, Dominique (Hrsg.): Science in the Twentieth Century. Amsterdam 1997, S. 740–757.

Büttner, Jochen u.a.: The Challenging Images of Artillery. Practical Knowledge at the Roots of the Scientific Revolution. In: Lefèvre, Wolfgang; Renn, Jürgen; Schoepflin, Urs (Hrsg.): The Power of Images in Early Modern Science. Basel, Boston, Berlin 2003, S. 3–27.

Cranz, Carl: Vermischte ballistische Notizen. In: Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen 2 (1907), H. 18, S. 345–348.

–: Lehrbuch der Ballistik. Bd. 3. Experimentelle Ballistik. Oder Lehre von den ballistischen Messungs-, Beobachtungs- und Registrier-Methoden. Berlin 1927.

Cranz, Carl; Koch, Karl Richard: Untersuchungen über die Vibration des Gewehrlaufs. In: Abhandlungen der Mathematisch-Physikalischen Classe der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften 19 (1899), H. 3, S. 745-775.

–: Untersuchung über die Vibration des Gewehrlaufes. In: Abhandlungen der Mathematisch-Physikalischen Classe der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften 20 (1900), H. 3, S. 589-612.

Edgerton, Harold E.: Photography of Very Early States of Nuclear Explosions. In: Journal of the Society of Motion Picture and Television Engineers 68 (1959), H. 2, S. 77–79.

Elkins, James: Harold Edgerton's Raptatronic Photographs of Atomic Tests. In: History of Photography 28 (2004), H. 1, S. 74–81.

Frizot, Michel: Geschwindigkeit in der Fotografie. Dauer und Bewegung. In: Frizot, Michel (Hrsg.): Neue Geschichte der Fotografie. Köln 1998, S. 242–257.

Fuller, Peter W. W.: High Speed Photography in Ballistics. In: Ray, Sidney F. (Hrsg.): High Speed Photography and Photonics. Oxford 1997, S. 205–232.

Geimer, Peter: Picturing the Black Box. On Blanks in Nineteenth-Century Paintings and Photographs. In: Science in Context 17 (2004), H. 4, S. 467–501.

Heydenreich, Willy: Eine neue Verwendung der Photographie für ballistische Zwecke. In: Kriegstechnische Zeitschrift 8 (1905), H. 10, S. 576–577.

Hoddeson, Lillian u.a.: Critical Assembly. A Technical History of Los Alamos During the Oppenheimer Years, 1943–45. Cambridge 1993.

Hoffmann, Christoph: Die Dauer eines Moments. Zu Ernst Machs und Peter Salchers ballistisch-fotografischen Versuchen 1886/87. In: Geimer, Peter (Hrsg.): Ordnungen der Sichtbarkeit. Fotografie in Wissenschaft, Kunst und Technologie. Frankfurt am Main 2002, S. 342–377.

Hoffmann, Christoph; Berz, Peter (Hrsg.): Über Schall. Ernst Machs und Peter Salchers Geschosßfotografien. Göttingen 2001.

Huberth, Andreas von: Stereophotogrammetrische Aufnahme der Geschosßflugbahn. In: Artilleristische Monatshefte 98 (1915), S. 60–69.

Krämer, Sybille: Operative Bildlichkeit. Von der „Grammatologie“ zu einer „Diagrammatologie“? Reflexionen über erkennendes „Sehen“. In: Heßler, Martina; Mersch, Dieter (Hrsg.): Logik des Bildlichen. Zur Kritik der ikonischen Vernunft. Bielefeld 2009, S. 94–122.

Krehl, Peter O. K.: History of Shock Waves, Explosions and Impact. A Chronological and Biographical Reference. Berlin 2009.

Lehmann, Richard: Apparate für Gasdruckbestimmungen bei festen und gasförmigen Explosivstoffen nach J. E. Petavel. In: Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen 1 (1906), H. 18, S. 326–330.

Mach, Ernst; Mach, Ludwig: Weitere ballistisch-photographische Versuche. In: Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften (Abtheilung IIa) 98 (1889), H. 8–9, S. 1310–1326.

Mach, Ernst; Salcher, Peter: Über die in Pola und Meppen angestellten ballistisch-photographischen Versuche. In: Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften (Abtheilung IIa) 98 (1889), H. 1, S. 41–50.

Marey, Étienne-Jules: L'Analyse des mouvements par la photographie. In: Paris-Photographie 1 (1891), S. 5–12.

Miller, Dayton C.: Sound Waves. Their Shape and Speed. A Description of the Phonodeik and Its Applications and a Report on a Series of Investigations Made at Sandy Hook Proving Ground. New York 1937.

N.N.: Über experimentelle Bestimmung der Bewegungsgesetze des Geschosses und der Handfeuerwaffe. In: Mitteilungen über Gegenstände des Artillerie- und Geniewesens 25 (1894), H. 4, S. 358–362.

Neesen, Friedrich: Bestimmung der Geschwindigkeit und Umdrehungszahl eines Geschosses am Ende der Flugbahn. In: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 4 (1902), H. 17, S. 380–384.

–: Bestimmung der Geschossachsenrichtung am Ende der Flugbahn. In: Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft 5 (1903), H. 5, S. 110–112.

–: Photographische Bestimmung der fortschreitenden und Umdrehungsgeschwindigkeit von Geschossen am Ende der Flugbahn. In: Kriegstechnische Zeitschrift 6 (1903), H. 2, S. 112–119.

–: Photographie fliegender Geschosse. In: Umschau 19 (1915), H. 23, S. 448–452.

–: Die Photographie in ihrer Verwendung bei Untersuchung der Bewegung und Wirkung von Geschossen. In: Artilleristische Monatshefte 124 (1917), S. 145–172.

Nowak, Lars: Speichern, um zu sehen. Zur Verräumlichung der Zeit in der ballistischen Photo- und Kinematographie. In: Filatkina, Natalia; Przybilski, Martin (Hrsg.): Orte – Ordnungen – Oszillationen. Raumerschaffung durch Wissen und räumliche Struktur von Wissen. Wiesbaden 2011, S. 165–191.

–: Pilzwolken. Zur epistemischen Multivalenz atomarer Explosionswolken. In: Paul, Dennis; Sick, Andrea (Hrsg.): Rauchwolken und Luftschlösser. Temporäre Räume. Hamburg 2013, S. 21–46.

Oettingen, Arthur von; Gernet, Arnold von: Über Knallgasexplosion. In: Annalen der Physik 269 (1888), H. 4, S. 586–609.

Rheinberger, Hans-Jörg: Experiment, Differenz, Schrift. Zur Geschichte epistemischer Dinge. Marburg an der Lahn 1992.

Rieckeheer: Die Photographie im Dienste des Heeres. In: Kriegstechnische Zeitschrift 3 (1900), H. 8, S. 383–397.

–: Die Photographie im Dienste des Heeres (Fortsetzung). In: Kriegstechnische Zeitschrift 3 (1900), H. 9, S. 439–450.

Rumpff, Hans: Die wissenschaftliche Photographie als experimentelle Grundlage des Maschinenbaues. Düsseldorf 1921.

–: Geschwindigkeitsmessungen mit der Universal-Meß-Kamera. In: Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen 22 (1927), H. 1, S. 1–4.

–: Geschwindigkeitsmessungen mit der Universal-Meß-Kamera (Fortsetzung). In: Zeitschrift für das gesamte Schiess- und Sprengstoffwesen 22 (1927), H. 2, S. 34–35.

Schmidt, Johann: Photographische Bestimmung der fortschreitenden und der Umdrehungsgeschwindigkeit der Geschosse. In: Mitteilungen über Gegenstände des Artillerie- und Geniewesens 38 (1907), H. 8–9, S. 692–706.

Schmitz, Otto Heinrich Theodor: Neuere Versuche der Fried. Krupp A.-G. über innere Ballistik. In: Artilleristische Monatshefte 84 (1913), S. 482–498.

Schnelle-Schneyder, Marlene: Photographie und Wahrnehmung am Beispiel der Bewegungsdarstellung im 19. Jahrhundert. Marburg 1990.

Skaife, Thomas: Skaife's Patent. In: Liverpool and Manchester Photographic Journal 2 (1. Oktober 1858), H. 19, S. 246.

Sonar, Thomas: Die Entwicklung der Ballistik von Aristoteles bis Euler. Ein Beitrag zum Euler-Jahr 2007. In: Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft 49 (2008), S. 203–230.

Steele, Brett D.: Muskets and Pendulums. Benjamin Robins, Leonhard Euler, and the Ballistic Revolution. In: Technology and Culture 35 (1994), H. 2, S. 348–382.

Steenbeck, Max: Über ein Verfahren zur Erzeugung intensiver Röntgenlichtblitze. In: Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus den Siemens-Werken 17 (1938), H. 4, S. 1–18.

Vivié, Jean: Lucien Bull. Brüssel 1967.

Wächter, Friedrich: Funkenphotographische Überprüfung der Bewegung automatischer Gewehrverschlüsse. In: Mitteilungen über Gegenstände des Artillerie- und Geniewesens 40 (1911), H. 10, S. 929–936.

Wise, M. Norton: What's in a Line?. In: Epple, Moritz; Zittel, Claus (Hrsg.): Science as Cultural Practice. Bd. 1. Cultures and Politics of Research from the Early Modern Period to the Age of Extremes. Berlin 2010, S. 61–102.

Wohlwill, Emil: The Discovery of the Parabolic Shape of the Projectile Trajectory. In: Science in Context 13 (2000), H. 3–4, S. 645–680.