

## Kugelblitz und Blitzforschung

K. Berger\*

Zollikon, Schweiz

The author's 30 years of research into lightning phenomena on Mount San Salvatore near Lugano, Switzerland, including scrutiny of thousands of photographs and more than 1000 oscillograms, failed to confirm the existence of "ball lightning". On the basis of the extensive literature and his own experience, the author stresses the need to distinguish between subjective and objective observations. All published photographs of "ball lightning" have proved to have a physical explanation. To explain the numerous reported visual observations, the author recommends physiological research on "after-images" produced by lightning flashes on the human retina. New reports of ball lightning should be examined on the spot by high-voltage engineers and physicists.

### Problemstellung

Zum Abschluß einer 30jährigen Periode der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore bei Lugano (Schweiz) wurde dem Autor von verschiedenen Seiten nahegelegt, sich zum Problem des „Kugelblitzes“ zu äußern. Wenn dabei das Wort „Kugelblitz“ in Anführungszeichen gesetzt wurde, so ist damit bereits angedeutet, daß es sich nicht nur um ein ungelöstes, sondern auch um ein umstrittenes, fragwürdiges Problem handelt. Wird einerseits die große Menge von mehr oder weniger glaubwürdigen Einzelberichten, andererseits der enorme wissenschaftliche Aufwand zur Klärung der rätselhaften Beobachtungen betrachtet, für die bisher keine befriedigende Erklärung gefunden werden konnte, so ist man wohl berechtigt, von einem Problem zu sprechen.

Die erste Frage, die zu beantworten ist, betrifft die *Definition des Begriffs* „Kugelblitz“. Was soll unter einem Kugelblitz verstanden werden? Eine Antwort ist nur möglich auf Grund des Studiums vieler Einzelbeobachtungen und der wesentlichen Literatur. Diese besteht aus rund tausend Einzelberichten, der Großteil aus weit zurückliegenden Jahren. Glücklicherweise sind diese Berichte bereits von mehreren Autoren in Sammelwerken zusammengestellt und oft auch diskutiert worden. Die ältesten solcher Berichtsammlungen gehen auf die Physiker F. Arago [1] und G. Planté [2] zurück. Als neueste Bearbeitung ist das Buch von Stanley Singer [9] zu nennen, eine wertvolle Darstellung der Geschichte und des heutigen Standes des Problems samt einem Verzeichnis von 594 Literaturstellen. Dieses Buch kann Interessenten warm empfohlen werden; ihm sind auch viele Literaturangaben dieses Berichtes entnommen. Die wesentlichen in den

letzten rund 100 Jahren über den „Kugelblitz“ geschriebenen Sammelwerke werden nachstehend als Basis der Kugelblitz-Forschung mit einer kurzen Inhaltsangabe in historischer Reihenfolge erwähnt:

F. Sauter [3]: Über Kugelblitze. 213 Einzelbeobachtungen.

A. Gockel [4]: Das Gewitter.

C. de Jans [5]: A Retrospective Glance at the Attempts to Explain Ball Lightnings. Viele Literaturstellen von Einzelberichten sowie Erklärungsversuche.

W. Brand [6]: Der Kugelblitz. Dieses Buch fand große Verbreitung und ist seit langem vergriffen. Es enthält ca. 600 Einzelbeobachtungen, davon 111 Beschreibungen, den Rest als Angabe der Literaturstellen, wo die Beschreibungen zu finden sind.

W. J. Humphreys [7]: Ball Lightning. 280 Einzelberichte, die infolge von Aufrufen in verschiedenen Zeitungen eingingen und von Humphreys ausgewertet wurden. Humphreys ist auf Grund dieser Forschungsarbeit von einem gläubigen zu einem ungläubigen Anhänger der Theorien eines objektiven Kugelblitzes geworden.

R. A. Leonov [8]: The Enigma of Ball Lightning. Gesammelte Beobachtungen und eine Kritik der offenbar nicht befriedigenden Theorien.

Stanley Singer [9]: The Nature of Ball Lightning. Ausgezeichnete Darstellung des heutigen Wissens, von Beobachtungen und Hypothesen, mit geschichtlichem Rückblick und 594 exakten Literaturangaben.

Die Aufzählung dieser Sammelwerke ist durchaus nicht vollständig. Andererseits sind darin eine Anzahl Beobachtungen wiederholt erwähnt, so daß die Summe aller in den Sammelwerken genannten Zahlen nicht maßgebend ist für die wirkliche Gesamtzahl der rund 1000 Einzelbeobachtungen.

Die *einzelnen Beobachtungen* sind einerseits *visueller Art*, andererseits *photographische Aufnahmen*. Besonders geschätzt werden gleichzeitige Beobachtungen von Auge und mit Photokamera. Die Photos werden meist so gewonnen, daß die Kamera in der Dunkelheit mit offenem Verschuß auf ein Fensterbrett gestellt

\* Adresse: CH-8702 Zollikon, Gstadstr. 31.

oder in den Händen gehalten wird, bis das Vorkommen eines Blitzes im Blickfeld zu vermuten ist. Die visuellen Beobachtungen sind, wie zu erwarten ist, viel häufiger als die Photoaufnahmen von Kugelblitzen.

#### *Definition der Kugelblitze*

Nach diesem Abstecher in die außerordentlich vielfältige Literatur dürfte es möglich sein, die Frage nach der Definition des Ausdruckes „Kugelblitz“ zu beantworten. *1. Definition:* Die Beobachter verstehen darunter in den meisten Fällen eine mehr oder weniger kugelförmige Lichterscheinung von ca. 1 cm bis zu ca. 1 m, in einem Ausnahmefall [10] über 10 m Durchmesser, die eine bis mehrere Sekunden dauert und unmittelbar bei oder nach Blitzen wahrgenommen wird. Die leuchtende Kugel bewegt sich auf einfachen oder auch sehr komplizierten Bahnen langsam bis sehr rasch über dem Boden oder durch die Luft, passiert gelegentlich Fensterscheiben und Schlüssellocher [3], wandert auch durch Zimmer oder Ganzmetall-Flugzeuge hindurch [11] und verschwindet schließlich mit lautem oder ohne Knall. Bezüglich Häufigkeit, Farbe, Geruch und Dauer bestehen Angaben innerhalb sehr weiter Grenzen. Bei nahen Kugelblitzen wird teilweise ein Geruch von Schwefel, Ozon oder Stickoxid angegeben.

Eine *zweite, kürzere Definition* könnte auch so lauten: Unter „Kugelblitz“ werden unverständliche optische Erscheinungen in der Atmosphäre verstanden, die zeitlich mit Blitzen verbunden sind.

Auch bezüglich der *Wirkungen des Kugelblitzes* bestehen sehr unterschiedliche Angaben: Während die Kugelblitze für Menschen harmlos und „kalt“ sind, müssen sie doch oft beträchtlichen mechanischen Schaden (Sprengwirkungen) [12] oder thermische Wirkungen (Wasser zum Kochen bringen) [13] zur Folge haben, wenn den Angaben der Berichterstatter Glauben geschenkt wird.

#### *Versuche zur Deutung des Kugelblitzes*

##### Theorien und Versuche

Von der großen Anzahl der seit Planté und Arago aufgestellten Theorien sollen nur jene erwähnt werden, die u.E. auf wissenschaftlicher Basis beruhen. Anschließend sollen auch ein zum Zweck der Deutung des Kugelblitzes gemachtes Preisausschreiben des Deutschen Ausschusses für Blitzableiterbau (ABB) sowie die Resultate der Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore angeführt werden.

*Stark ionisierte Luft- oder Gasmengen*, als Plasma oder Plasmoid bezeichnet, welche *direkt aus dem Blitzkanal* stammen, oder durch *Hochfrequenzstrahlung vom Blitz* erzeugt werden. Versuche von Kapitsa [14] haben gezeigt, daß es mit Hilfe starker Kurzwellensender großer Leistung bei Wellenlängen von einigen cm möglich ist, ein kleines Luftvolumen durch allseitige Bestrahlung so stark zu ionisieren, daß ein gut leitendes Plasma entsteht. Es ist nach Kapitsa mit einigen 100 W Hochfrequenzleistung möglich, ein räumlich begrenztes Plasma in atmosphärischer Luft aufrecht zu halten. Kapitsa sieht jedoch keine Möglichkeit für das Vorkommen der benötigten Strahlungsenergie-Konzentration aus dem Blitz. Über die ausführlichen

Untersuchungen von Kapitsa berichtet Stanley Singer [9]; ebenso über die in der Folge entstandenen Theorien.

*Plasma oder Plasmoidbildung durch Radiowellen.* Als Energiequelle für die Erzeugung eines Plasmas, wie es künstlich von Kapitsa hergestellt wurde (s. oben), wird hier die *hochfrequente Strahlungsenergie aus Radiosendern* angenommen. Nach dieser Hypothese wären Kugelblitze in erster Linie in der Nähe von Sende-Antennen zu erwarten. Aber es scheint selbst in der Nähe von Radiosendern ausgeschlossen, die erforderliche Energiekonzentration in der Atmosphäre zu finden. Würde diese Hypothese richtig sein, so wäre der Monte San Salvatore ein außerordentlich günstiger Ort für die Entstehung von Kugelblitzen, denn der Meßsturm auf dem Berggipfel ist mit einer Menge von Kurzwellen-Sendeantennen ausgerüstet. Trotzdem konnte in 20 Jahren nächtlicher Blitzphotographie mit rund 1000 Blitzeinschlägen nie eine Lichterscheinung beobachtet werden, die als Kugelblitz angesprochen werden könnte.

*Plasmabildungen in Hochvakuum-Kavitäten*, wie sie bei starken Hochfrequenzfeldern, z.B. bei 50 MHz und 50 kV, zwischen ebenen Platten bei ungenügendem Hochvakuum sehr deutlich erscheinen, können nicht auf atmosphärische Luftdichte übertragen werden.

*Kernreaktionen im Blitzkanal infolge des Pinch-Effekts.* Blitzströme überschreiten äußerst selten Werte von 200—300 kA. Fusionsreaktionen benötigen dagegen Ströme von mehreren 1000 kA. Eine Kernreaktion tritt im Blitzkanal nach bisherigem Wissen nicht auf. Die Temperaturen im Blitzkanal reichen nicht für Kernreaktionen [30].

*Elektronenwirbel*, die von einem sehr starken und sehr rasch veränderlichen Magnetfeld, z.B. von Blitzströmen, induziert werden. Wird ein ringförmig geschlossenes Quarzrohr, das mit einem Gas bei mehr oder weniger reduziertem Druck gefüllt ist, einem kurzen und starken Magnetfeldimpuls und der entsprechenden Induktionsspannung unterworfen, so entsteht ein Induktionsstrom in Form eines kreisförmigen Lichtbogens (Plasma). Er dauert jedoch nicht länger als das veränderliche Magnetfeld. Nachleuchten während einer oder mehrerer Sekunden, wie es beim Kugelblitz vorkommen soll, tritt nicht auf. Elektronenwirbel, die sich vom Blitzkanal ablösen, konnten weder beim natürlichen Blitz noch bei Entladungen mit künstlichen Blitzströmen beobachtet werden.

*Ruckstufen des Leitblitzes* (stepped leader) werden als neueste mögliche Erklärung von Kugelblitzen in Betracht gezogen [9]. Während rund 20jähriger Blitzphotographie auf dem Monte San Salvatore wurde trotz der großen Anzahl photographierter Ruckstufen in keinem Fall die Bildung einer leuchtenden Kugel oder einer ähnlichen Lichterscheinung beobachtet, die länger als die der Ruckstufen des leader-Kopfes dauerten. Diese Dauer liegt in der Größenordnung von 50  $\mu$ s, d.h. sie ist viel kürzer als die Dauer von Kugelblitzen. Die Hypothese ist also durch die optische Blitzforschung widerlegt.

*Diffusionsverbrennung.* C. Nauer untersuchte viele Möglichkeiten für einen physikalisch-chemischen Vorgang, der die beim Kugelblitz beobachteten Erscheinungen möglichst genau wiedergibt [15]. Es gelang ihm, ein Methan/Luft-Gemisch in der Atmosphäre her-

zustellen, das beim Anzünden eine oberflächliche Verbrennung (Diffusionsverbrennung) liefert, die langsam nach innen fortschreitet, bis das Methan verbraucht ist, um dann mit oder ohne Knall zu enden. Die Erscheinung kommt auch mit Sumpfgas vor und dürfte die sog. Irrlicher über Sümpfen erklären. Für den Kugelblitz kommt diese Reaktion jedoch allgemein kaum als Ursache in Frage, weil in der Atmosphäre das nötige Gasgemisch fehlt. Es muß anerkannt werden, daß es C. Nauer bisher als einzigem gelang, einen in der Natur möglichen Vorgang zu reproduzieren, der den üblichen Beschreibungen des Kugelblitzes entspricht.

#### Preis Ausschreiben des ABB

In den Jahren 1959/60 wurde vom Deutschen Ausschuß für Blitzableiterbau (ABB) ein Preis Ausschreiben für die Aufnahme eines Kugelblitzes veranstaltet. Es sollten mindestens zwei kurz nacheinander gemachte Bilder eines Kugelblitzes vorgelegt werden. Erwünscht waren in erster Linie Aufnahmen mit einem Kinoapparat („Filmen“ eines Kugelblitzes). Es gingen über 50 Aufnahmen ein, aber keine Mehrfachaufnahmen. Die 50 Bilder wurden durch Prof. M. Israël (Aachen) ausgewertet [16]. Nach Prof. Israël ist das Problem des Kugelblitzes bis heute ungelöst, denn die Bilder lieferten keinen Anhaltspunkt für ein rätselhaftes Phänomen.

#### Blitzforschung am Monte San Salvatore und Kugelblitz

##### Kurzbericht zur Blitzforschung

Am Monte San Salvatore wurde von 1943—1971 systematisch der Stromverlauf bei Blitzeinschlägen in den Berg gemessen [17—21]. Zu diesem Zweck wurde 1943 ein erster, 70 m hoher Blitzmeßsturm aufgestellt, dem 1950 ein zweiter Meßsturm auf einem ca. 300 m entfernten Vorgipfel folgte. Damit wurde es möglich, Blitzeinschläge in einen Turm vom andern aus zu photographieren. Aus einem weiteren Photoraum in Lugano-Breganzona konnten bei guten optischen Bedingungen Einschläge in beide Türme aus ca. 3 km Abstand des Nachts photographiert werden. Ferner wurde auf dem Berggipfel ein Photoraum mit acht Leicas für die volle Rundumsicht eingerichtet. Damit lassen sich die Blitzeinschläge in die wegen der ringsum freien Lage des Monte San Salvatore weithin sichtbare Umgebung festhalten. Die Einschlagsstellen wurden in die Landkarte eingetragen [19]. Seit 1967 werden diese elektrischen und optischen Untersuchungen ergänzt durch die Messung des elektrischen Feldstärkenverlaufs auf dem Berg und in drei Außenstationen vor, während und nach Einschlägen in den Berg bzw. in die Meßtürme.

Die Messung des Blitzstromes soll in erster Linie eine wissenschaftliche Grundlage für alle Arten des Blitzschutzes schaffen, sei es für Personen oder für Sachen. Blitzphotographie und Feldmessung dienen dagegen in erster Linie der Erfassung der elektrischen Vorgänge in der Atmosphäre bis zur Ausbildung des Blitzkanals. In zweiter Linie soll mit der nächtlichen Überwachung aller Blitzschläge in der Umgebung die Frage nach dem umstrittenen „Kugelblitz“ geklärt werden, soweit dies objektiv möglich ist.

Dagegen wird der physikalische Vorgang, der zur elektrischen Ladungstrennung in der Gewitterwolke

führt, am Monte San Salvatore nicht bearbeitet. (Hierzu sei auf eine neue Arbeit von J. Doyne Sartor: *The Electrification of Thunderstorms and the Formation of Precipitation* [22] verwiesen.)\*

Die Hauptresultate der Gewitterforschung auf dem Monte San Salvatore finden sich in [17—21]. Sie lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die oszillographische Messung des Stromes bei Blitzeinschlägen in die beiden Meßtürme, ebenso die Photographie dieser Einschläge auf einem rasch bewegten Photofilm (Schmierkamera) und schließlich auch die Messung des elektrischen Feldes an und bei den Meßtürmen lassen zwei grundsätzlich verschiedene Blitzarten erkennen, nämlich Abwärtsblitze und Aufwärtsblitze. Bei ersteren beginnt innerhalb der Gewitterwolke eine Entladung, die sich als Blitzkanal (Leader) mit gut meßbarer Geschwindigkeit in wenigen hundertstel Sekunden zur Erde bewegt. Verästelungen des Kanals weisen nach unten (Fig. 1). Bei den Aufwärtsblitzen dagegen setzt ein Blitzkanal an der Turmspitze an, der dann zur Gewitterwolke hinauf wächst. Verästelungen weisen nach oben (Fig. 2). Die Feinstruktur des vorwachsenden Blitzkanals kann mit rasch bewegtem Photo-Film sichtbar gemacht werden (Fig. 3 und 4). Negativ geladene Blitzkanäle zeigen ein Ruckstufenartiges Vorwachsen, wobei der mittlere zeitliche Abstand zweier Stufen etwa 50  $\mu$ s beträgt. Positiv geladene Kanäle zeigen keine ausgeprägten Stufen, sondern Lichtspuren, die viel schwächer sind als bei negativen Kanälen, so daß sie photographisch nur in Ausnahmefällen festzuhalten sind. Auf Grund beider Vorwachsrichtungen und Polaritäten des Blitzstroms lassen sich somit vier Blitzarten unterscheiden. Die Häufigkeit ihres Vorkommens in den Jahren 1963—1971 ist in Tabelle 1 dargestellt. Danach sind auf dem Monte San Salvatore Aufwärtsblitze nach negativ geladenen Wolken mit rund 70% die häufigste Blitzart. Die Meßtürme bilden dabei die positive „Spitzenelektrode“. Positive und negative Aufwärtsblitze machen zusammen rund 80% aller gemessenen Blitze aus. Nur ca. 13% sind Abwärtsblitze, davon 106 negative und 27 positive Blitze.

Die Verteilung der Einschlagstellen wurde in einer früheren Berichtsperiode über eine Zeitspanne von 10 Jahren untersucht [17]. Es zeigen sich Einschläge in alle Lagen, in die Ebene, den See, die Abhänge und

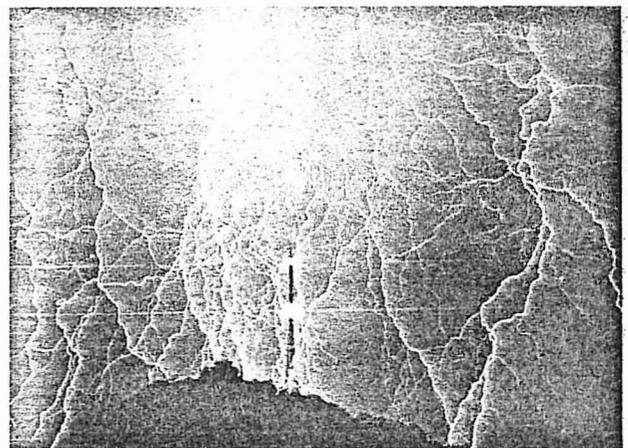


Fig. 1. Abwärtsblitze zum Monte San Salvatore

\* Ferner: A. N. Aufdermaur and D. A. Johnson: Charge separation due to riming in an electric field. *Ray. Met. Soc.* 98, Nr. 416 (1972).

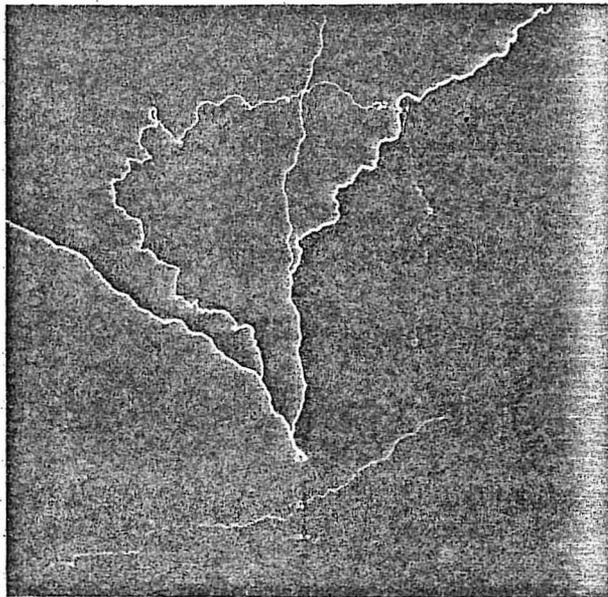


Fig. 2. Aufwärtsblitze am Turm 1 des Monte San Salvatore

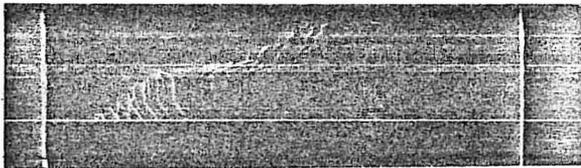


Fig. 3. Beispiel für das Vorwachsen eines negativen Aufwärtsblitzes, Aufnahme mit Schmierkamera. Zeitintervall zwischen den hellen Marken ca. 2 ms

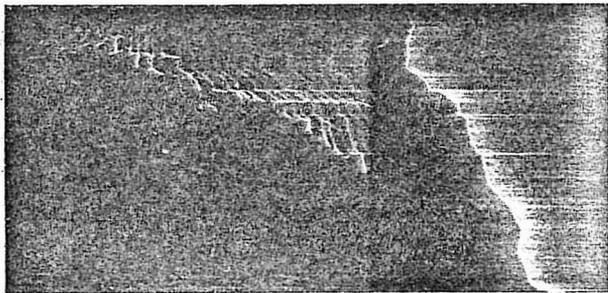


Fig. 4. Beispiel für das Vorwachsen eines negativen Abwärtsblitzes, Aufnahme wie Fig. 3

Tabelle 1. Gesamtzahl der 1963—1971 aufgenommenen Oszillogramme. ↓ Abwärtsblitz, ↑ Aufwärtsblitz, — Blitzstrom aus negativer Wolke, + Blitzstrom aus positiver Wolke

Jahr	↓ -	↑ -	↓ +	↑ +	Bipolar		Total
					↓	↑	
1963	22	83	3	5	1	4	118
1964	6	37	1	6	0	6	56
1965	3	91	1	15	0	8	118
1966	6	120	5	19	3	7	160
1967	12	90	9	26	0	13	150
1968	2	85	4	5	0	3	99
1969	3	38	2	6	1	2	52
1970	32	68	0	2	0	6	108
1971	20	120	2	18	0	5	165
1963 bis 1971	106	732	27	102	5	54	1026

ausnahmsweise auch in Berggipfel oder Berggrate. Eine systematische Abhängigkeit der Einschlagdichte von der geologischen Bodenbeschaffenheit läßt sich statistisch nicht feststellen; Lage und Anzahl der Einschläge variieren von Jahr zu Jahr stark. Für die Beurteilung der Einschlagshäufigkeit im Flachland sind nur die Abwärtsblitze maßgebend.

Bei Annäherung eines Abwärtsblitzes an die Erde oder an geerdete Objekte, z.B. die beiden Meßtürme, entsteht am Boden in 1 bis 3 hundertstel Sekunden ein rasch wachsendes elektrisches Feld, das beim Einschlag zusammenbricht oder die Polarität wechselt (Fig. 5). Die größten, vor der Feldmühle gemessenen Spitzenwerte der Feldstärke liegen bei 200—400 kV/m. Auf die umgebende Ebene reduziert, sind dies Feldstärken von 100—150 kV/m.

Beim Einschlag des Abwärtsblitzes entlädt sich der von der Gewitterwolke aus geladene Blitzkanal impulsartig zur Erde unter Bildung eines beträchtlichen Stoßstromes, der bei negativen Blitzen rund 1 ms, bei positiven weniger als 10 ms dauert. Ein Blitz besteht aus mehreren Teilblitzen. Über die Anzahl der Teilblitze („Strokes“) im Gesamtblitz („Flash“) orientiert Tabelle 2. Der erste Teilblitz ist in der Regel der stromstärkste. Die folgenden Teilblitze („Folgeblitze“) weisen demgegenüber einen rascheren Stromanstieg auf: Ströme von Folgeblitzen haben Anstiegszeiten von 0,5—1  $\mu$ s, gegenüber 2—10  $\mu$ s beim ersten Teilblitz. Über die statistische Auswertung von mehr als 200 Abwärtsblitzen der Meßperiode 1963/71 finden sich ausführliche Angaben in [20].

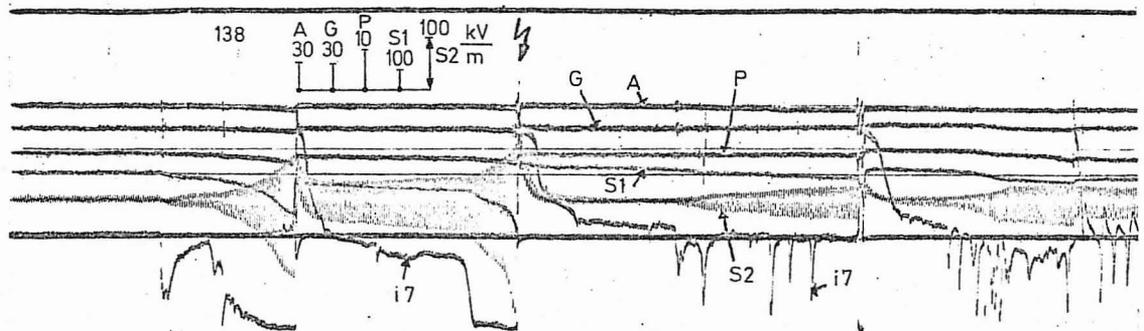


Fig. 5. Feldverlauf bei Annäherung und Einschlag eines Abwärtsblitzes zum Turm 1. S1 und S2 sind die mit zwei verschiedenen Feldmühlen gemessenen Feldstärken auf dem Monte San Salvatore, A, G und P die Feldstärken in 3 Außenstationen,  $i_7$  ist ein Strom im 7-mA-Bereich, der den Beginn des Blitzes in der Gewitterwolke anzeigt

Tabelle 2. Gesamtblitze und Anzahl der Teilblitze

Jahr	Ausgewertete Oszillogramme	Teilblitze im Gesamtblitz										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	> 10
1963	118	92	7	5	3	4	2	1	—	—	1	3
1964	56	42	6	2	3	1	2	—	—	—	—	—
1965	117	89	9	7	1	4	—	—	—	—	1	6
1966	159	127	10	7	3	3	1	1	3	1	—	3
1967	150	114	12	4	2	5	3	3	1	1	—	5
1968	101	76	9	5	1	3	1	1	1	1	—	3
1969	52	43	3	3	—	—	—	1	—	—	1	1
1970	108	75	8	7	6	3	1	1	1	2	2	2
1971	165	126	15	9	1	1	4	2	1	—	1	5
1963 bis 1971	1026	784	79	49	20	24	14	10	7	5	6	28

Für das Zustandekommen von *Aufwärtsblitzen* ist eine hohe Feldstärke über den Meßtürmen erforderlich. Nach den Erfahrungen der Hochspannungstechnik muß ihr Mittelwert über mehrere Meter mindestens einige 100 kV/m betragen. Durch Messen des Verschiebungsstroms an den Turmspitzen konnten Herkunft oder Entstehung dieses starken Feldes geklärt werden. Es zeigt sich, daß vor einem Aufwärtsblitz mehr oder weniger plötzlich ein Verschiebungsstrom an der Turmspitze einsetzt und die Feldstärke über den Türmen in hundertstel oder zehntel Sekunden auf den für die Bildung von Aufwärtsblitzen nötigen Wert ansteigt (Fig. 6). Der Strom in diesem Aufwärts-Leader beträgt wenige hundert A während zehntel Sekunden. Oft folgen diesem ersten Aufwärts-Teilblitz mehrere Folgeblitze, die sich kaum von den Folgeblitzen der Abwärtsblitze unterscheiden. Sie haben einen Stromimpuls mit sehr steiler Front und Anstiegszeiten von 0,5—1  $\mu$ s.

Der Aufwärtsblitz ist nach den Ergebnissen der Blitzforschung auf dem San Salvatore als *Sekundärblitz* zu bezeichnen. Er setzt einen *Primärblitz* in der Gewitterwolke voraus, der das Feld am Erdboden soweit erhöht, daß es zum Auslösen eines Aufwärtsblitzes reicht. Dabei können zwei Fälle vorkommen:

1. Der Aufwärtsblitz wächst bis zum Primärblitz hinauf. In diesem Fall wird ein schon bestehender primärer Blitzkanal über den Aufwärtsblitz mit der Erde verbunden. Es entsteht ein Stoßstrom, der sich dem kleinen Strom des ersten Aufwärts-Teilblitzes überlagert oder der erst einsetzt, wenn der Strom dieses ersten Aufwärts-Teilblitzes am Erdboden bereits abgeklungen ist. In diesem Fall entstehen Folgeblitze, die vom Primärblitz gespeist werden und den Hauptkanal des Aufwärtsblitzes als Leiter benutzen.

2. Der Aufwärtsblitz wächst nicht bis zum Primärblitz. In diesem häufigeren Fall bleibt es bei einem einfachen „Gleichstrom“ <100 A ohne Stoßstrom-Komponente. Diese Art Aufwärtsblitz erlaubt die Messung der elektrischen Ladung eines verzweigten Blitzkanal-Systems mit guter Genauigkeit. Es handelt sich hier gemäß den Begriffen der Hochspannungstechnik um eine Büschelentladung.

Wird der Aufwärtsblitz zusammen mit dem zu seiner Entstehung nötigen primären Wolkenblitz als Gesamtblitz aufgefaßt, so könnte man sagen, daß der Aufwärtsblitz, genau wie der Abwärtsblitz, seinen Anfang, wenigstens zeitlich, innerhalb der Gewitterwolke hat. Es ist aber nicht nötig, daß die Bahnen der beiden Blitze zusammenhängen.

Die Daten des Blitzstromes können nur mit Hilfe der Statistik beschrieben werden. 50% aller negativen und positiven Blitzströme erreichen ca. 30 kA oder mehr, 1% der negativen Blitzströme ca. 180 kA, 1% aller positiven Blitzströme gemäß statistischer Extrapolation ca. 800 kA (größter Meßwert 270 kA). Für die statistische Darstellung aller Blitzstrom-Charakteristiken wird auf die bereits genannte Literatur verwiesen [20].

#### Folgerungen aus der Blitzforschung bezüglich des Kugelblitzes

In der Berichtsperiode 1963—1971 sind auf dem Monte San Salvatore während der Nachtgewitter mehr als 1000 Blitzphotos aufgenommen worden. Die Verschlüsse der Kameras wurden während der Dunkelheit dauernd offen gelassen, selbst während des Filmvorschubes, um keine Erscheinung zu verpassen. Die Blitzphotos zeigen oft die merkwürdigsten Blitzbahnen, scheinbare Schleifen, einzelne hellere Punkte

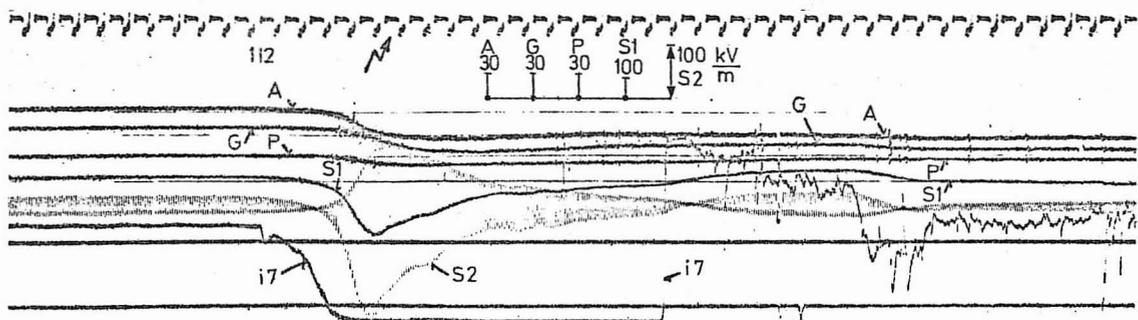


Fig. 6. Feldverlauf, der zum Aufwärtsblitz am Turm 1 führt. Übrige Angaben wie zu Fig. 5

usw. Neben den Blitzbahnen kommen die *Straßen* infolge der Beleuchtung durch die Autoscheinwerfer als helle Linien sehr klar zum Vorschein. In mond hellen, klaren Nächten erscheint die *Mondbahn* bei mehrstündiger Exposition im Photo als leuchtende, schwach gekrümmte Linie. Ist der Himmel nicht ganz klar, sondern von horizontalen, ruhenden Wolkenstreifen besetzt, so entsteht eine unterbrochene Lichtspur, wie sie z.B. in [23] als Kugelblitzaufnahme veröffentlicht wurde, ebenso wie auf S. 105 des prachtvollen Buches „The Elements Rage“ von F. W. Lane [24].

Blitzeinschläge in den See zeigen beim Einschlagspunkt erhöhte Helligkeit und könnten so gemäß Definition als „Kugelblitz“ bezeichnet werden. *Auf allen Photoaufnahmen ist jedoch weder dem Photographen (Herr H. Binz) noch dem Autor irgendeine Erscheinung aufgefallen, die sich nicht mit bekannten Naturgesetzen erklären ließe.* Dies gilt für die Berichtsperiode 1963 bis 1971 wie auch für die früheren Beobachtungsperioden seit 1950. Photographisch lieferte somit die Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore keinerlei Hinweise auf die Existenz von „Kugelblitzen“.

Für die physiologische Wirkung von Blitzen auf Menschen dürften dagegen die Feldstärkespitzen von ca. 100 kV/m in Blitznähe im Freien von Bedeutung sein. Im Flachland schwächere, auf Berggraten kräftige „Fangentladungen“ sind an exponierten Personen zu erwarten, was zu ausgeprägten physiologischen Reaktionen führen dürfte, die mit dem „Kugelblitz“ zusammenhängen.

#### Erfahrungen des Autors

Der Autor möchte einige persönliche Erfahrungen mit „Kugelblitzen“ anführen, die er z.T. beruflich als Blitzforschungsleiter einer schweizerischen Forschungskommission für Hochspannungsfragen im Laufe vieler Jahre sammeln konnte.

Blitz und Kurzschluß-Lichtbogen bewirken „Kugelblitz“ (Fig. 7)

Ein Blitzschlag bei Winkeln/St. Gallen in das Geschirr eines Pferdes, das von einem Bauern am Leitseil auf einer flachen Wiese geführt wurde. Das Pferd zog einen Jauchewagen, auf dessen Sitz die 6jährige Tochter des Bauern saß. Die Messingschnalle des Geschirrs wies starke Brandspuren auf. Der Bauer fiel infolge des Blitzschlages um und konnte sich erst

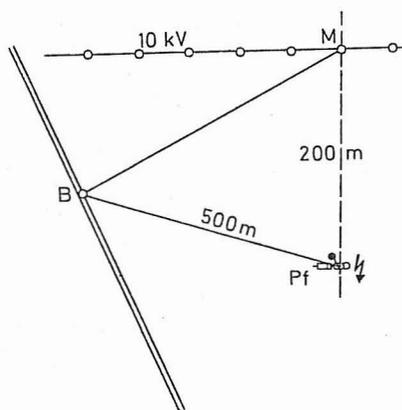


Fig. 7. Lageplan zum Blitzeinschlag in Winkeln/St. Gallen. B Beobachter, Pf vom Blitz getroffenes Pferd, M Mast einer 10-kV-Leitung mit Kurzschluß-Lichtbogen

mit fremder Hilfe erheben, nachdem die unverletzte Tochter vom Sitz des Wagens gesprungen war und die Mutter geholt hatte. Der Bauer wurde zur Beobachtung ins Kantonsspital verbracht und nach 3 Tagen als geheilt entlassen. Er war offenbar durch die Schrittspannung neben dem Einschlagpunkt vorübergehend gelähmt worden. Das Pferd war tot.

Bei der polizeilichen Untersuchung des Unfalles behauptete nun ein Nachbar, er habe aus ca. 500 m Entfernung den Unfall beobachtet und dabei gesehen, wie der „Kugelblitz“ ca. 200 m über die Wiese bis zu einem Mast gerollt sei. Der Beobachter war seiner Beobachtung absolut sicher und erklärte sich bereit, seine Aussagen zu beschwören. Die Untersuchung ergab, daß zum Zeitpunkt des Blitzschlages in das Pferd auch ein Kurzschluß-Lichtbogen am Mast der 10-kV-Leitung entstanden war. Dies ließ sich mit den Aufzeichnungen des wenige km entfernten Kraftwerkes belegen. Der Kurzschluß-Lichtbogen wurde in wenigen Sekunden automatisch abgeschaltet.

Der objektive Tatbestand ist offenbar der, daß derselbe Blitz, der das Pferd traf, auch den Kurzschluß-Lichtbogen einleitete, sei es durch eine Verzweigung oder einen zweiten Teilblitz mit geänderter Bahn, oder durch Induktion, was bei 10-kV-Leitungen noch möglich ist.

Subjektiv konnte der beobachtende Bauer seine Angaben durchaus mit Recht beschwören. Denn es ist möglich oder sogar wahrscheinlich, daß sich durch eine unbewußte, ungefähr horizontale Bewegung der Augen eine leuchtende Gerade auf seiner Netzhaut abzeichnete, die er als rollenden Kugelblitz zwischen den beiden Punkten (Mast und Pferd) deutete.

#### Straßenbeleuchtung als Kugelblitz

In dem Buch von F. W. Lane [24] findet sich auf S. 105 ein Bild aus London, das vor einer nächtlichen Häuserreihe einen starken Lichtpunkt zeigt, der eine lichtschwache Schleife enthält. Dasselbe Bild erschien farbig im Geographical Magazine [25]. Durch Korrespondenz mit dem Photographen, Herrn Roy C. Jennings in Leeds, und die Aufnahme von Vergleichsphotos bei Tageslicht konnte bewiesen werden, daß der „Kugelblitz“ eine Straßenlampe war, die entgegen anfänglichen Angaben eingeschaltet war.

Dem Autor gelang an einem späten Abend vor einigen Jahren aus einem Gasthofenster in Lugano-Breganzona ein Blitzphoto mit zwei gleichzeitigen Blitzeinschlägen in die beiden Meßtürme auf dem Monte San Salvatore, auf dem am vordern Rande eine Lichtspur sichtbar ist, die in Analogie zu vielen Veröffentlichungen als „Kugelblitz“ zu bezeichnen wäre. Es ist die Wackelspur einer nahen Straßenlampe, die dadurch entstand, daß die Kamera minutenlang von Hand auf dem Fenstersims gehalten wurde. Trotz der Wackelspur sind die Konturen des Berges scharf, weil sie nur vom Blitz genügend beleuchtet wurden. Die in vielen Kugelblitzberichten anzutreffende Behauptung, es könne sich nicht um Wackelaufnahmen handeln, weil die Konturen der Umgebung des Blitzes scharf sind, ist also absolut falsch.

#### Wackelaufnahmen als Kugelblitz

Während des Krieges erregte ein Blitz am Strand von Ascona bei Locarno/Schweiz die Aufmerksamkeit der an Kugelblitzen immer interessierten illustrierten

Zeitschriften. Er wurde von ihnen als „Spiral-Kugelblitz“ und „Schlauchblitz“ bezeichnet. Bilder dieses Blitzes sind in [26] veröffentlicht worden. Es handelt sich um einen Folgeblitz, der vor dem Strand von Ascona zum Langensee niederging. Er wurde von einem Amateur fotografiert, der den Auslöser des Apparates erst drückte, als er den Blitz sah. Die Exposition war auf  $\frac{1}{50}$  s eingestellt. Das Bild zeigt einen abnormal breiten Lichtstreifen, der bei näherem Hinsehen aus aneinander gereihten Ellipsenbogen besteht, die bei oberflächlichen Betrachtern den Eindruck einer Wendeltreppe („Spirale“) erwecken können. Daher der Name „Spiral-Kugelblitz“.

Durch mehr oder weniger hartes Kopieren konnte gezeigt werden, daß auch die Objekte am Strand, insbesondere Bäume und eine Leitungsstange, Schattenränder mit gleichen Ellipsenbögen aufwiesen. Damit war bewiesen, daß es sich um eine verwackelte Aufnahme handelte.

#### Feuerwerk als Kugelblitz

J. C. Jensen hat einige Photos nächtlicher Lichterscheinungen veröffentlicht, die er für Kugelblitze hält, von denen er jedoch selber sagt, daß sie einem gigantischen pyrotechnischen Feuerwerk („Gigantic pyrotechnic display“) gleichen [10]. Schon S. Singer schreibt, daß angeblich Studenten während eines Gewitters „römische Kerzen“ angezündet hätten, um das große Interesse von Prof. Jensen an Kugelblitzen zu befriedigen. Die Herkunft dieses Gerüchts sei ungewiß [9]. Der Autor kann bestätigen, daß die Information von einem bekannten schwedischen Blitzforscher stammt, der sich zur Aufklärung des Falles nach Lincoln/Nebraska begab und von den Assistenten diese Auskunft erhielt. Der Vergleich der Photos mit Feuerwerksphotos aus Lugano und Umgebung hat auch amerikanische Blitzforscher am San Salvatore nach anfänglichem Unglauben davon überzeugt, daß es sich bei den Photos von Jensen zweifellos um einen Feuerwerk-Kugelblitz handelt.

#### Kurzschluß-Lichtbogen als Kugelblitz

E. Kuhn, Ludwigshafen, veröffentlichte in [27] ein Photo, das einen feurigen Lichtfleck mit stark sprühenden Ausläufern zeigt, der von Beratern des jungen Photographen als Kugelblitz gedeutet wurde. Dieser Fall wurde von Prof. H. F. Schwenkhagen, dem ehemaligen Präsidenten des deutschen Ausschusses für Blitzableiterbau (ABB) und Verfasser eines Lehrbuches über „Allgemeine Wechselstromlehre“, 1951/59 gemäß schriftlicher Mitteilung an den Autor auf Grund einer Besichtigung an Ort und Stelle damit erklärt, daß sich am Ort der Lichterscheinung der Mast einer Niederspannungsleitung befand, an dem während eines Nachtgewitters ein Kurzschluß-Lichtbogen entstand. Dieser wurde als Kugelblitz gedeutet, die wegfliegenden Schmelzperlen des Elektrodenmetalls als Funken zwischen Raumladungen [28].

Der Autor selbst sah vor einigen Jahren von Klosters/GB aus am späten Nachmittag zufällig einen Blitzeinschlag in der Nähe der Bergstation der Gotschna-Seilbahn, der einen Kurzschluß-Lichtbogen auf einem Mast der 10-kV-Leitung bei der Bergstation zur Folge hatte. Der rasche Lichtblitz und die zurückbleibende, länger dauernde Flamme auf dem Mast erweckten un-

willkürlich den Eindruck, als sei die Flamme nicht nur aus dem Blitz entstanden, sondern direkt aus ihm herausgefallen.

Ein besonderer Fall eines zum Kugelblitz beförderten Lichtbogens liegt vor, wenn ein Blitz in eine Hochspannungsleitung mit Holzmasten einschlägt und damit einen Kurzschluß-Lichtbogen zündet. Nach den Gesetzen der Elektro-Dynamik wandert dieser Lichtbogen mit einer vom Strom abhängigen Geschwindigkeit längs der Leitung. Dem Autor sind mehrere Fälle bekanntgeworden, wo solche wandernden Kurzschluß-Lichtbögen als längs der Leitung rollende Kugelblitze gedeutet wurden.

#### Schmelzperlen an den Ansatzstellen des Blitzes als Wirkung von Kugelblitzen

Von Anschmelzungen an Flugzeugen, insbesondere an den Kanten der Propeller, wird mehrfach berichtet. Der Autor hat selber drei Blitzeinschläge in ein Flugzeug, allerdings nicht mit Propeller-, sondern mit Düsenantrieb, über der Adria erlebt. Der in der Gegend der Flügelspitze ansetzende Blitz hatte das Aussehen eines üblichen gelb-rötlichen Lichtbogens mit einigen 100 oder einigen 1000 A. Für den Hochspannungs- oder Lichtbogen-Ingenieur wirkt es lächerlich, wenn versucht wird, Anschmelzungen an Flugzeugen einem speziellen Kugelblitz zuzuschreiben, handelt es sich doch dabei ohne Zweifel um die wohlbekannteren Schmelzwirkungen langdauernder Blitzströme. Auch die Splitterwirkungen des Blitzeinschlages in die isolierten Radarnasen gehören zu den für Fachleute wohlbekannteren Wirkungen natürlicher und künstlicher Stoßströme.

#### Folgerungen zum Problem des Kugelblitzes

Es ist zunächst klarzustellen, daß in diesem Bericht gemäß der Definition nur jene „Kugelblitze“ betrachtet werden, die mit Blitzen zusammenhängen. Es bleiben also hier alle jene Beobachtungen von Lichterscheinungen in der freien Atmosphäre außer Betracht, bei denen Blitze keine Rolle spielten und die deshalb den „fliegenden Untertassen“ (unidentified flying objects, „Ufos“) entsprechen dürften.

Von den hier betrachteten Kugelblitzen sind zuerst die *photographischen Beobachtungen* zu erwähnen. Dem Autor ist in der Literatur ein einziges Photo unerklärlich geblieben, das aus einem ovalen Lichtfleck mit Flammenrand auf gleichmäßig schwarzem Hintergrund besteht [29]. Auf Grund einer einzigen Photographie eine Kugelblitz-Theorie aufzustellen, scheint dem Autor nicht gerechtfertigt; dies um so mehr, als über die Entstehung dieser Photographie nichts Näheres bekannt ist.

Die *visuellen Beobachtungen* bilden dagegen das eigentliche Kugelblitz-Problem. Das Studium der Literatur über Kugelblitze, die Resultate der vieljährigen Blitzforschung auf dem Monte San Salvatore, die persönlichen Erfahrungen bei der Untersuchung von Blitzschäden aller Art, die im Hochspannungslabor gewonnenen Erkenntnisse mit künstlichen Blitzentladungen und die Mißerfolge aller bisherigen noch so raffinierten Theorien des Kugelblitzes haben den Autor zu der Überzeugung gebracht, daß die vielen Beobachtungen von „Kugelblitzen“ in erster Linie auf das Zusammen-

wirken von Blitzen und ihren Folgewirkungen mit dem subjektiven Empfinden des Beobachters zurückzuführen sind. Dazu die drei folgenden Feststellungen:

Die Sinne des Menschen erlauben es nicht, *sehr rasch* ablaufende Vorgänge (Blitz oder Blitzwirkung) in der nahen Umgebung *objektiv* zu beobachten. Nicht nur die mechanische Trägheit der Bewegung zu einer Lichterscheinung hin, sondern auch die für die Adaption der Augen nötige Zeit verhindern die objektive Erfassung schnell ablaufender Vorgänge. Als Beispiel mag erwähnt werden, daß es nicht möglich ist, die Entfernung einer kurzdauernden Entladung abzuschätzen, denn die Entfernungsmessung der menschlichen Sinne beruht auf einer Winkeleinstellung beider Augen gegeneinander; dies benötigt Zeit.

Es liegt im Wesen insbesondere des westlichen Menschen, sich von allen Vorgängen ein für ihn verständliches Bild zu machen. Wie Schwerhörige automatisch die nicht verstandenen Konsonanten oder Vokale unbewußt ergänzen, so daß verständliche Worte und Sätze entstehen, so ergänzt jeder Mensch auch optische Beobachtungslücken automatisch und unbewußt, bis er zu einem ihm verständlichen Bild oder Vorgang gelangt. Man lese dazu die Erklärungsversuche in [9].

Eine dritte Erscheinung, die bei der Erfassung rasch veränderlicher optischer Impulse, z.B. von Blitzen, eine Rolle spielt, liegt im Verhalten der Netzhaut des Auges (Retina). Bereits Humphreys hat auf die Täuschungseffekte hingewiesen, die durch eine plötzliche Blendung der Netzhaut durch einen Lichtblitz entstehen [7]. Die Effekte sind verschieden, je nachdem ob die Augen direkt auf den Lichtpunkt oder daneben gerichtet sind. Jedermann kann sich selbst von den merkwürdigen Nachwirkungen künstlicher Lichtblitze, z.B. von Photolichtblitzen, überzeugen. Die Blendungseffekte sind durchaus nicht so einfach, wie man sich dies ohne Experiment vorstellen würde. Vermutlich sind auch den Physiologen diese plötzlichen Blendungseffekte nicht bekannt.

Der Autor hält dafür, daß das Kugelblitz-Problem nur in Verbindung mit der *Erforschung des subjektiven Verhaltens der Retina* bei intensiven kurzen Lichtblitzen aus verschiedenen Richtungen gelöst werden kann. Es ist dabei zu bedenken, daß die Strahlung des Blitzes außerordentlich stark ist, sind doch im Blitzkanal während weniger  $\mu$ s Temperaturen von 20000 bis 30000°K gemessen worden [30]. Der Autor möchte wissenschaftliche Untersuchungen durch physiologische Institute im Interesse der Kugelblitz-Forschung empfehlen.

*Der weitaus größte Teil aller visuellen Kugelblitzbeobachtungen (schätzungsweise 95%) dürfte eine einfache Erklärung finden. Sofern überhaupt noch ein Rest unerklärlicher Beobachtungen bleibt, würde dieser das eigentliche Kugelblitzproblem bilden. Zur kritischen Erfassung dieser Restbeobachtungen wäre es ratsam, zunächst alle historischen, nicht mehr kontrollierbaren Beschreibungen auszuscheiden und dann bei der Auswertung der noch kontrollierbaren Beobachtungen in erster Linie versierte Ingenieure mit Blitzerfahrung und Praxis im Hochspannungs- und Lichtbogenlabor zu Rate zu ziehen. Ohne die Untersuchung aller wich-*

tigen Beobachtungen *an Ort und Stelle* wird es dabei nicht abgehen, wobei die Hauptschwierigkeit der Abklärung im Zeit- und Geldbedarf liegen dürfte. Bis dahin entbehrt jede Kugelblitztheorie einer wissenschaftlich soliden Grundlage.

Nach dem Einreichen des Berichts wurde der Verfasser von der Redaktion der „Naturwissenschaften“ auf die in „Nature“ 1971/72 erschienenen Artikel aufmerksam gemacht [31–34]. Der Verfasser stellt mit Befriedigung eine weitgehende Übereinstimmung mit der Auffassung von E. Argyle [31] fest.

1. Argo, F.: *Annuaire, Bureau des Longitudes* (1838); *Oeuvres de François Arago*, Vol. 4, S. 37. Paris: Claye 1854; *Sämtliche Werke*, Vol. 4, S. 45. Leipzig: Weibel 1854
2. Planté, G.: *Compt. rend.* 85, 619 (1877); 87 325 (1878); 99 273 (1884); *Ciel et Terre* 5, 365 (1884)
3. Sauter, F.: *Über Kugelblitze*. I. Teil: Theorie der Kugelblitze (1890); II. Teil: Beispiele von Kugelblitzen (1892); *Meteor. Z.* 12, 241 (1895)
4. Gockel, A.: *Das Gewitter*. Köln: Bachem 1895; *Meteor. Z.* 26, 458 (1909); *Das Gewitter*. Berlin: Dummler 1925
5. Jans, C. de: *Ciel et Terre* 31, 499 (1910); 32, 155, 255, 301 (1911); 33, 18, 143 (1912)
6. Brand, W.: *Der Kugelblitz*. Hamburg: Henri Grand 1923
7. Humphreys, W. J.: *Proc. Am. Phil. Soc.* 76 (1936)
8. Leonov, R. A.: *The Enigma of Ball Lightning*. Moskau 1965, Übersetzung U.S. Dept. of Commerce, Springfield, Virginia
9. Singer, S.: *The Nature of Ball Lightning*. New York-London: Plenum Press 1971
10. Jensen, J. C.: *Physics* 4, 372 (1933); *Sci. Monthly* 37 190, (1933); *Nature* 133, 95 (1934)
11. Uman, M. A.: *J. Atmosph. Terrest. Phys.* 30, 1245 (1968)
12. Crossley, A. W.: *Nature* 114, 10 (1924)
13. Goodlet, B. L., Morris, W.: *J. Inst. El. Eng.* 81, 1 (1937); *Daily Mail* 1931, 11
14. Kapitsa, P. L.: *Phys. Blätter* 14, 11 (1958); *Ball Lightning*, S. 11. Cons. Bureau New York 1961; *Sov. Phys.-Usp.* 5, 777 (1963); *Sov. Phys.-Techn. Phys.* 13, 1475 (1969)
15. Nauer, H.: *Dissertation München* 1953; *Z. Angew. Physik* 5, 441 (1953); *Umschau Wiss. Techn.* 56, 75 (1956)
16. Israel, H.: *Bericht und Stellungnahme zu den Ergebnissen des ABB-Preisausschreibens*, 1. 1. 1959 ... 31. 12. 1960, ABB-Dok. 11798, München
17. Berger, K.: *Bull. SEV* 46, No. 5, 9 (1955).
18. Berger, K., Vogelsanger, E.: *ibid.* 56, No. 1 (1965)
19. Berger, K., Vogelsanger, E.: *ibid.* 57, No. 13 (1966).
20. Berger, K.: *ibid.* 63, 1403 (1972).
21. Berger, K.: *ibid.* 64, 113 (1973)
22. Sartor, J. D.: *Naturwissenschaften* 60, 19 (1973).
23. Matthias, B. T., Buchsbaum, S. J.: *Nature* 194, 327 (1962)
24. Lane, F. W.: *The Elements Rage*. Newton Abbot: David & Charles 1966
25. Atkinson, B. W.: *Geographical Magazine*, Dez. 1968, S. 204
26. Rüst, E., Berger, K.: *Bull. SEV* 36, No. 25 (1945)
27. Kuhn, E.: *Naturwissenschaften* 38, 518 (1951)
28. Hill, R. D.: *J. Geophys. Res.* 68, 1365 (1963)
29. Norinder, H.: *Problems of Atmospheric and Space Electricity*, p. 455. Amsterdam: Elsevier 1965
30. Orville, R. E., Uman, M. A., Sletten, A. M.: *J. Appl. Phys.* 38, 895 (1967); Uman, M. A.: *Lightning*, S. 173. New York: Mac Graw Hill 1969
31. Argyle, E.: *Nature* 230, 179 (1971); Ashby, D. E. T. F., Whitehead, C.: *ibid.* 230, 180 (1971)
32. Jennison, R. C.: *ibid.* 230, 576 (1971)
33. Charman, W. N.: *ibid.* 230, 576 (1971); Davies, P. C. W.: *ibid.* 230, 576 (1971)
34. Davies, D. W., Standler, R. B.: *ibid.* 240, 144 (1972)

Eingegangen am 21. März 1973