


NATURPHÄNOMENE



Ein Irrlicht lockt einen Wanderer tief in den Wald – aus dem er mutmaßlich nie zurückkehren wird. Auf seinem Gemälde von 1862 personifiziert der Schweizer Symbolist Arnold Böcklin das Irrlicht als weibliches Geistwesen.

Bild: Arnold Böcklin, Das Irrlicht, 1862 (Ausschnitt), © Museum Georg Schäfer, Schweinfurt

Von Irrlichtern und Mikroblitzen

Irrlichter, die sagenumwobenen Lichtkugeln über Mooren, beflügeln die Fantasie von Künstlern, Literaten – und Forschenden. Ein Team aus Stanford glaubt, nun eine Erklärung für Irrlichter gefunden zu haben und ein neues Gebiet der Chemie gleich mit.

Seit Jahrhunderten geben spukhafte Leuchterscheinungen in Mooren den Menschen Rätsel auf. In manchen Erzählungen sind Irrlichter die verlorenen Seelen ungetauft verstorbener Kinder oder im Moor ertrunkener Wanderer, in anderen das Werk böser Naturgeister. Wer ihnen folgt, wird ins Verderben gelockt.

Auch in Goethes Faust weist ein Irrlicht, eine trügerische und spukhafte Erscheinung also, Faust und Mephisto in der Walpurgisnacht den Weg zum Hexensabbat auf dem Blocksberg – hinein in eine Gegenwelt voller Lasterhaftigkeit und Verwirrung.

AUF DEN PUNKT

Ein Forschungsteam aus Stanford erklärt die bläulichen Leuchterscheinungen über Mooren, genannt Irrlichter, durch Mikroblitze.

Diese elektrischen Entladungen stammen den Forschenden zufolge von gekrümmten Grenzflächen an Methanblasen im Moorwasser. Die Blitze oxidieren Methan, was zu blauem Leuchten führt.

Dass sich die Ladungen trennen, liegt daran, dass kleine Wassertröpfchen die großen Tropfen verlassen und dabei mehr OH^- - als H_3O^+ -Ionen mitnehmen – das zeigen Hochgeschwindigkeitskameras und Massenspektrometrie.

Außerdem: Solche Mikroblitze bilden Moleküle wie Aminosäuren und könnten die Entstehung des Lebens auf der Erde vorangetrieben haben.

Gibt es sie wirklich?

So selten und mysteriös sind diese Leuchterscheinungen, dass Naturwissenschaftler:innen lange Zeit zweifelten, ob sie überhaupt ein natürliches Phänomen darstellen – oder nicht doch der Fantasie entsprungen sind.

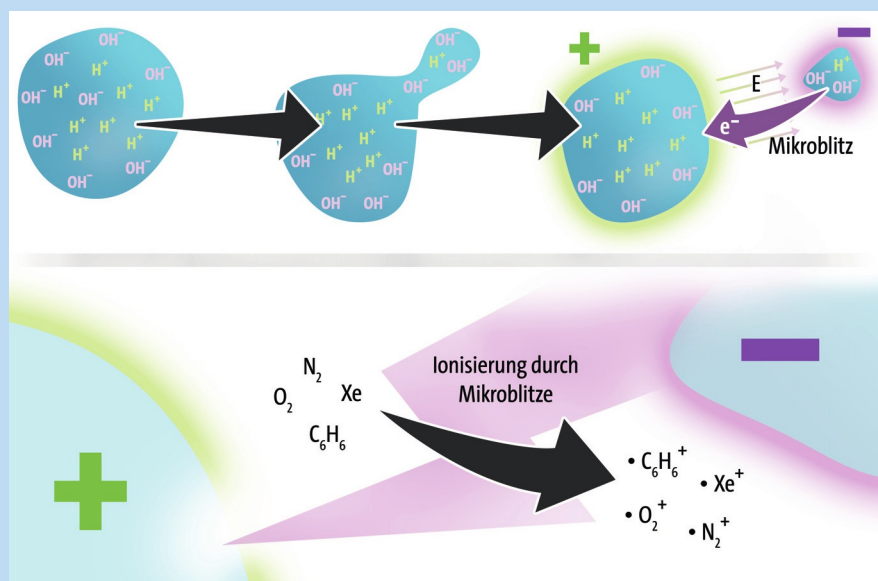
Dann aber machte ein Mann mit ihnen Bekanntschaft, dessen Zuverlässigkeit über jeden Zweifel erhaben war: der Astronom Friedrich Wilhelm Bessel. In den frühen Morgenstunden des 2. Dezember 1807 beobachtete er während einer Bootsfahrt auf dem kleinen Fluss Wörpe, der sich nahe Bremen durch ein Moor schlängelt, „zahlreiche Flämmchen, welche über einem an vielen Stellen mit stehendem Wasser bedeckten Grunde entstanden, und, nachdem sie einige Zeit geleuchtet hatten, wieder verschwanden“.

Über seine zufällige Beobachtung schrieb er einen Aufsatz und veröffentlichte ihn in den *Annalen der Physik*. Die Farbe der Flämmchen sei bläulich gewesen, schrieb er, ihre Lichtstärke sehr gering, ihre Zahl erreichte mehrere Hundert. „Oft blieben die Flämmchen in unveränderter Stellung; oft nahmen sie eine Bewegung in horizontaler Richtung an.“ Einer der Männer auf dem Boot, erinnerte sich Bessel, habe ihre Bewegungen mit „scharfen ziehenden Wasservögeln“ verglichen.

Seither stand fest: Irrlichter gibt es tatsächlich. Doch wie sie entstehen, blieb weiterhin ein Rätsel. Die Vermutung liegt nahe, dass die Flämmchen beim Verbrennen von in Mooren verbreiteten Faulgasen wie Methan entstehen. Doch die Aktivierungsbarriere solcher Verbrennungsreaktionen ist hoch. Welche natürlichen Prozesse setzen genug Energie frei, um sie zu überwinden?

Mehr als 200 Jahre nach Bessels Beobachtung glaubt nun ein Forschungsteam um den Physikochemiker Richard Zare von der Stanford University, das Rätsel gelöst zu haben.

Der Chemiker und Historiker Jan Krüßmann arbeitet als freier Wissenschaftsjournalist in München.



Da sich Hydroxidionen an der Phasengrenze anreichern, trennt sich die Ladung, wenn ein kleines Wassertropfchen von einem größeren abgerissen wird. Das erzeugt zwischen beiden ein starkes elektrisches Feld. Die Energie spontaner Entladungen, genannt Mikroblitze, reicht, um umgebende Gasmoleküle zu ionisieren.

Die Chemie der Wassertropfen

Die US-Forschenden setzen bei Beobachtungen an, die ebenfalls aus dem 19. Jahrhundert stammen: Wie der deutsche Physiker Philipp Lenard um 1890 herausfand, tragen kleine Wassertropfchen eine negative Ladung, wenn sie von größeren Tröpfchen abreißen – beispielsweise in einem Wasserfall. Denn das umgebende Gas ist hydrophob, und Hydroxidionen haben dazu eine höhere Affinität als Oxoniumionen. Daher reichern sich die OH^- -Ionen an der Phasengrenzfläche an. Reißt nun ein kleines Stück der äußersten Wasserschicht ab, nimmt es vor allem Hydroxidionen mit, und die Ladung zwischen den Tröpfchen trennt sich.

Wie Zare und sein Team mit Hochgeschwindigkeitskameras und massenspektrometrischen Untersuchungen feststellten, hat das Folgen für die Gasmoleküle, die die geladenen Tröpfchen umgeben: Zwischen den gegensätzlich geladenen Tropfen herrschen elektrische Felder, in denen es zu Entladungen kommen kann. Zare und sein Team nennen sie *microlightning* – Mikroblitze.

Diese haben genug Energie, um umgebende Gase zu ionisieren, etwa Stickstoff, Sauerstoff, Benzol oder sogar Xenon (Abbildung links). Gase mit höherer Ionisierungsenergie, etwa Krypton oder Pentafluorethan, reagieren jedoch nicht. Die Energie der Mikroblitze lässt sich damit eingrenzen: Sie liegt zwischen 12,13 eV, der Ionisierungsenergie von Xenon, und 12,5 eV, der von Pentafluorethan, das die Blitze nicht ionisieren.

Energien dieser Größenordnung könnten ausreichen, die Aktivierungsbarriere bei der Verbrennung

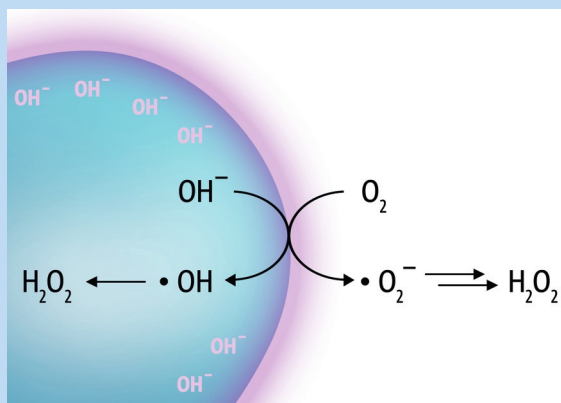
von Methan zu überwinden. Damit nicht genug: Auch ohne physische Ladungstrennung und Mikroblitze finden an Wassertropfchen Redoxprozesse statt. Nötig sind nur gekrümmte Phasengrenzen zwischen Wasser und Luft: Da sich Hydroxidionen an der Grenzfläche anreichern, entsteht dort ein starkes elektrisches Feld, wodurch die Hydroxidionen Elektronen auf die umgebenden Gasmoleküle übertragen. Wie Zare und sein Team herausfanden, bilden sich an der Phasengrenze von Wassertropfen spontan geringe Mengen Wasserstoffperoxid (Abbildung Mitte).

Die Reaktion läuft umso schneller, je stärker gekrümmt die Oberfläche ist. Bei Wasser in einem Becherglas ist die Oberfläche kaum gekrümmt – es entsteht praktisch kein Wasserstoffperoxid. „Unsere Untersuchungen zeigen deutlich, dass die Krümmung der Grenzfläche die Stärke des elektrischen Feldes kontrolliert und damit der entscheidende Faktor für die Reaktivität ist“, sagte Zare im Gespräch mit den *Nachrichten aus der Chemie*.

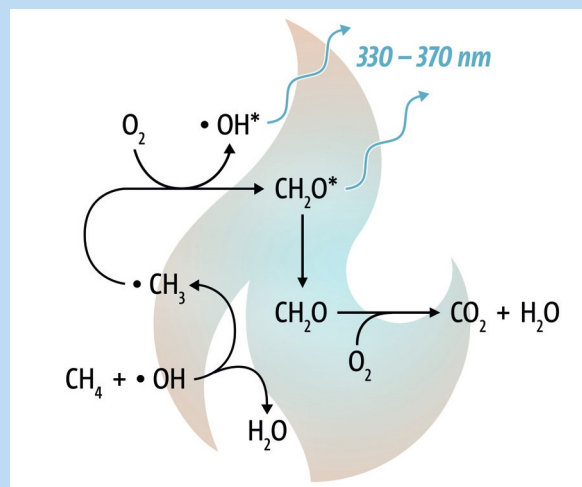
Weit über Irrlichter hinaus

Zurück zu den Irrlichtern: Wassertropfchen sind wohl nicht der Grund für die Flammen, wohl aber Blasen von Methan und anderen Gasen, die im Moorwasser aufsteigen. Auch hier gibt es stark gekrümmte Wasser-Gas-Grenzflächen, auch hier führen mechanische Scherkräfte zum Zerreißen von Bläschen. Verglichen mit den Wassertropfchen ist die Situation hier umgekehrt.

In einer kurzen Forschungsnotiz in *Science Advances* schreiben Zare und seine Kolleg:innen des



Die Redoxchemie von Wassertropfen: An der Phasengrenze herrschen starke elektrische Felder – umso stärker, je ausgeprägter die Krümmung ist. Durch Elektronentransfer können etwa Hydroxylradikale und Hyperoxidionen entstehen, die durch Dimerisierung beziehungsweise Disproportionierung Wasserstoffperoxid bilden.



Mögliche Reaktionspfade einer nichtthermischen Oxidation von Methan, genannt kalte Flamme. Das schwach blaue Leuchten von angeregten Zwischenprodukten, die Licht emittieren. Die US-Forschenden um Zare nehmen an, dass Mikroblitze die kalten Flammen entzünden.

halb, es sei plausibel anzunehmen, dass „ähnliche elektrische Entladungen auch zwischen Methanblasen in Wasser auftreten könnten“. Mikroblitze, so ihre Theorie, stellen genügend Energie und reaktive Spezies bereit, um unter gewöhnlichen Umweltbedingungen Methan zu oxidieren.

Und tatsächlich: Beim Einleiten kleiner Luftbläschen in Wasser zeigten sich Mikroblitze. Wählte man statt Luft ein Methan-Luft-Gemisch, erwärmte sich das Wasser, und ein Teil des Methans wandelte sich zu Kohlendioxid um.

Dabei emittierte die Reaktion Licht, besonders zwischen 330 und 370 nm, typisch für sogenannte kalte Flammen, in denen Kohlenwasserstoffe oft unvollständig verbrennen und dabei wenig Wärme freisetzen. Kalte Flammen verursachen auch das Klopfen alter Ottomotoren: Beim Erhitzen des Kraftstoff-Luft-Gemischs entstehen ohne Hilfe der Zündkerze kalte Flammen, die hörbare Druckunterschiede verursachen.

Das schon von Bessel im Jahr 1807 beobachtete blaue Leuchten auf den Mooren stammt Zare zufolge von angeregten Zuständen der Zwischenprodukte, insbesondere von Formaldehyd und Hydroxylradikalen (Abbildung rechts).

Für Irrlichter scheint es also eine weitaus profanere Erklärung als verlorene Seelen oder dämonische Geister zu geben. „Ich glaube, hier eröffnet sich ein völlig neues Feld der Chemie, das grundlegend verändern könnte, was möglich ist“, sagt Richard Zare. Die Entschlüsselung der Mechanismen, die Irrlichtern zugrundeliegen, sei nur der Anfang. Mikroblitze könnten sich, so glaubt er, als ein Schlüssel für die Beant-

wortung einer weitaus größeren Frage erweisen – der nach der Entstehung des Lebens auf der Erde.

Blitze erwecken Gase zum Leben

Beim Miller-Urey-Experiment aus dem Jahr 1953 wurde die Atmosphäre nachgestellt, bevor Leben auf der Erde herrschte: Ein Gemisch aus Wasser, Methan, Ammoniak und Wasserstoff wurde elektrischen Entladungen ausgesetzt. Heraus kamen neben Teer vor allem organische Säuren und Aminosäuren. Seitdem wird vermutet, dass Gewitterblitze wichtig waren, um aus elementarem Stickstoff und einfachen Kohlenwasserstoffen C-N-Bindungen aufzubauen.

Zare meint, die nötigen elektrischen Entladungen könnten aber auch von Mikroblitzen zwischen Wassertropfen herrühren. Seine Gruppe sprühte kleine Wassertröpfchen in eine Atmosphäre aus Stickstoff, Methan, Kohlendioxid und Ammoniak. Anschließend wiesen sie andere Moleküle nach – darunter die Aminosäure Glycin und die RNA-Base Uracil. ■

Zu Irrlichtern:

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2025, doi: [10.1073/pnas.2521255122](https://doi.org/10.1073/pnas.2521255122)

Zu Mikroblitzen:

J. Phys. Chem. A 2024, doi: [10.1021/acs.jpca.4c02981](https://doi.org/10.1021/acs.jpca.4c02981)

Science 2025, doi: [10.1126/sciadv.adt8979](https://doi.org/10.1126/sciadv.adt8979)

Reaktionen an gekrümmten Phasengrenzen:

Proc. Natl. Acad. Sci. USA 2025, doi: [10.1073/pnas.2519491122](https://doi.org/10.1073/pnas.2519491122)

J. Am. Chem. Soc. 2025, doi: [10.1021/jacs.5c11575](https://doi.org/10.1021/jacs.5c11575)