



FORSCHUNGFRANKFURT

Das Wissenschaftsmagazin der Goethe-Universität

[32. Jahrgang] [2015] [6 Euro] [ISSN 0175-0992]

2. 2015

ASTROPHYSIK

Das Licht –
Nachrichtendienst der Sterne

MIKROSKOPIE

Die Macht der dunklen Seite

EIN KLEINER WURM

Liebling der Optogenetiker

DAS LICHT UND DIE INNERE UHR

Zur Synchronisation der
Innen- und Außenzeit

»FINSTERES MITTELALTER«

Von der Wirkkraft eines
rhetorischen Bildes

IM SCHATTEN DES VERLANGENS

Der Film als Kunst des Lichts

LICHT!

Sonntagsbrunch

auf dem Campus Westend der Goethe-Universität Frankfurt

von 11.00 bis 15.00 Uhr




Schauen Sie vorbei -
wir freuen uns auf Ihren Besuch!

Restaurant/Café-Bistro Sturm und Drang
an der Goethe-Universität Frankfurt
Tageskarte | Konditorei | Catering | Familien- und Firmenfeiern
Theodor-W.-Adorno-Platz 5 | 60323 Frankfurt
Tel. 069 798 34551 | Mail info@cafe-sturm-und-drang.de



AUS DER REDAKTION

Liebe Leserinnen, liebe Leser,



»Spacy« – wie in einem Science-Fiction-Roman – fanden wir die Laserschutz-Brillen im Physik-Institut. Aber dass mit Laserstrahlen nicht zu spaßen ist, haben wir bei dem Fototermin im Laserlabor von Prof. Reinhardt Dörner auch verstanden. Dort steht ein Laser, der für sehr kurze Zeit eine Intensität von 1016 Watt pro Quadratzentimeter erreicht. Das entspricht der Sonneneinstrahlung, die auf ganz Europa fällt, fokussiert auf einen Stecknadelkopf. Wer hier arbeitet, trägt vorsichtshalber keine Uhr oder andere Accessoires, die den Laserstrahl ablenken könnten, sollten sie versehentlich in den Strahlengang geraten. Vorsichtsmaßnahmen gelten auch im Labor von Prof. Alexander Heckel. Hier schützen Brillen die Augen vor dem intensiven UV-Licht, mit dem lichtaktivierbare Proteine angeregt werden.

Vollkommen ungefährlich war unser Besuch im Institut für Didaktik der Physik, wo Prof. Roger Erb für uns das »Experimentum crucis« von Isaac Newton nachbaute: Weißes Licht durchquert ein Prisma und entfaltet ein farbiges Spektrum. Mit dem Prisma vor dem Auge wiederholten wir auch den Versuch, aus dem einst Johann Wolfgang Goethe schloss, Newtons Theorie sei falsch. Unser Fotograf Uwe Dettmar hat die farbigen Erscheinungen, die wir am Fensterrahmen beobachteten, für uns eingefangen. Ihm gelang es auch, die auf Fotos oft nicht wiedergegebenen Gelbtöne im Prismen-Spektrum sichtbar zu machen.

Großen Spaß hatten wir bei Prof. Ernst Stelzer, der sich zu einem Fototermin mit Darth Vader am Mikroskop bereit erklärte. Dazu inspirierte uns die Figur des Herrschers über den Todesstern aus »Star Wars« in Stelzers Büro. Denn die Kernidee der Lichtscheiben-

Fluoreszenzmikroskopie (LSFM), so der Physiker, »liegt in der Macht der dunklen Seite«. Will heißen: Bei seiner Methode besteht die Kunst darin, mit möglichst wenig Licht auszukommen, um die empfindlichen biologischen Proben nicht zu schädigen. Dank dieser schonenden Beleuchtung kann Stelzer Embryonen beim Wachsen zusehen.

Licht, so entdeckten wir bei der Recherche zu dieser Ausgabe, ist ein »heimlicher Forschungsschwerpunkt« der Goethe-Universität. Unsere Forscher entwickeln auf international beachtetem Niveau lichtbasierte Methoden, wobei ein wichtiger Schwerpunkt in den Lebenswissenschaften liegt. Angereichert haben wir diese Ausgabe mit Wissenswertem zur Wirkung des Lichts auf den Biorhythmus und die Psyche. Unsere Autoren erkunden die mythologische und philosophische Bedeutung des Lichts, sie sehen das gar nicht so finstere Mittelalter in neuem Licht und beleuchten die kunstvollen Effekte des Lichts in Malerei, Theater und Film.

Wir wünschen Ihnen viel Freude bei der Lektüre,

Ihre

Dr. Anne Hardy und Ulrike Jaspers

Referentinnen für Wissenschaftskommunikation

INHALT



5

ROTE RIESEN IM LABOR

Wie alt ist unser Universum und wie entwickelt es sich? Die Arbeitsgruppe um René Reifarth untersucht dies mit besonderen kosmischen Uhren: Im Labor simuliert sie die Entstehung des langlebigen radioaktiven Rubidium-87 in Roten Riesen.



17

DIE MACHT DER DUNKLEN SEITE

Mit weniger Licht auszukommen, ist die Stärke der Lichtscheiben-Fluoreszenzmikroskopie. Dank schonender Beleuchtung kann sie auch empfindliche biologische Proben wie Embryonen in 3-D abbilden und sogar beim Wachsen beobachten.



46

LIEBLING DER OPTOGENETIKER

Wie eine Marionette an Lichtfäden lässt sich der optogenetisch veränderte Fadenwurm *C. elegans* steuern. Die Gruppe von Alexander Gottschalk erforscht an dem durchsichtigen Wurm jetzt auch genetisch bedingte Herz-Rhythmus-Störungen.

ASTROPHYSIK UND ATMOSPHÄRE

- 5** Das Licht – Nachrichtendienst der Sterne
Katrin Göbel und René Reifarth

- 10** Photonen spalten FCKW – aber nur langsam
Andreas Engel

MIKROSKOPIE

- 17** Die Macht der dunklen Seite
Isabell Smyrek, Katharina Hötte, Frederic Strobl, Alexander Schmitz und Ernst H. K. Stelzer
- 21** Pointillismus mit einzelnen Molekülen
Mike Heilemann
- 24** Wenn Licht Moleküle in Stücke reißt
Martin Pitzer, Reinhard Dörner und Markus Schöffler

LEUCHTENDE DISPLAYS

- 30** Organische Leuchtdioden: Die Tapete als Heimkino?
Matthias Wagner und Valentin Hertz

LICHT IN DER ZELLE

- 35** Steuern mit Licht aus dem Chemiebaukasten
Anja Störiko
- 38** Licht kontrolliert zelluläre Prozesse
Anja Störiko
- 42** Licht steuert Nervenzellen mit höchster Präzision
Ernst Bamberg
- 46** Ein kleiner Wurm ist Liebling der Optogenetiker
Alexander Gottschalk
- 50** Photosynthese verstehen, Photovoltaik verbessern
Markus Braun und Josef Wachtveitl

- 57** Zwischen Überfluss und Mangel: Photosynthese bei Kieselalgen
Claudia Büchel
- 61** CLiC – das interdisziplinäre Graduiertenkolleg zur Lichtkontrolle
Anja Störiko

LICHT UND INNERE UHR

- 63** Licht und das molekulare Uhrwerk
Horst-Werner Korf
- 67** Das Licht und die Psyche
Christine Reif-Leonhard und Andreas Reif

LICHT UND DUNKEL IM ZEITENLAUF

- 71** Platons Licht der Erkenntnis – Vom Sonnen- zum Höhlengleichnis
Friedemann Buddensiek

63

DAS LICHT UND DIE INNERE UHR

Der Tag-Nacht-Wechsel ist der wichtigste Umweltreiz für die Taktung unserer sehr komplexen Inneren Uhr. Zu wenig Licht am Tag und zu viel Licht in der Nacht kann sie aus dem Takt bringen und zu Schlafstörungen und Depressionen führen.

74

»FINSTERES MITTELALTER«

Dass das Mittelalter »finster« gewesen sei, kann als handelsüblicher Topos gelten. Doch professionelle Mediävisten wagen, ein anderes Mittelalterbild zu zeichnen, und werfen ein Licht darauf, wie es zu diesem falschen Verständnis kam.

101

FILM ALS KUNST DES LICHTS

Seit die Bilder laufen lernten, beeinflusst der gezielte Einsatz von Beleuchtungstechnik ihre Wirkung auf das Publikum. Das Licht unterstreicht die Hierarchie der Rollen und sorgt zugleich für die Grundstimmung des Films.

74 Das falsche Verständnis vom »Finsteren Mittelalter«
Johannes Fried und Janus Gudian

78 Indigene Kulturen Lateinamerikas: Im Schein der Sonne und des Mondes
Iris Gareis

83 Frankfurts Weg zu »Millionen Lichtern«
Jörg Lesczenski

BELEUCHTUNG IN KUNST, FILM UND THEATER

88 »Unter freiem Himmel« – Impressionismus und Tageslicht
Felix Krämer

93 Olafur Eliasson – »Light Lab« im Portikus
Fabian Schöneich

94 »Vortreffliche Belichtung!« Das Oberlicht im Kunstmuseum
Stefanie Heraeus

97 Architekturvisionen: Vom Kristallinen zum Licht
Carsten Ruhl

101 Der Film als Kunst des Lichts: Im Schatten das Verlangen
Vinzenz Hediger

105 »Die Strahlen der Sonne vertreiben die Nacht« – Theater der Vormoderne
Bernd Zegowitz

109 Vom übersehenen Theaterlicht
Mayte Zimmermann

GEISTESBLITZE

114 Heureka! Ein Geistesblitz beim Forschen

116 100 Prozent Inspiration
Bernd Frye

BÜCHER

117 Großes Wörterbuch für die Kant-Lektüre
Rolf Wiggershaus

119 Die Magie des Alltäglichen
Marthe Lisson

120 Zum Nachdenken und Mitmachen im Geist der Aufklärung
Rolf Wiggershaus

122 Die Physik des Lichts
Marthe Lisson

123 Vom Übermaß an Licht
Rolf Wiggershaus

SCHLUSSLICHT

124 Goethes Farbenlehre reloaded
Anne Hardy

128 Impressum/Abbildungsnachweis



ASTROPHYSIK

UND ATMOSPHERE

Das Licht – Nachrichtendienst der Sterne

von Kathrin Göbel und René Reifarth

Das Sternenlicht verrät viel über die Entstehung der Elemente, das Alter und die zukünftige Entwicklung des Universums. Aber Astrophysiker richten ihren Blick nicht nur in den Nachthimmel. Frankfurter Physiker simulieren Rote Riesen im Labor und stellen damit etablierte Theorien auf den Prüfstand.

Die Sonne ist unser nächster Stern und bildet das Zentrum unseres Planetensystems. Im Innern der Sonne verschmelzen jede Sekunde mehr als 500 Milliarden Kilogramm des leichtesten Elements Wasserstoff zum nächstschwereren Element Helium. Dieser Fusionsprozess setzt Energie in Form von Licht frei, das ins All abgestrahlt wird. Auf der Erde erreicht uns pro Quadratmeter eine Leistung von etwa 1,4 Kilowatt.

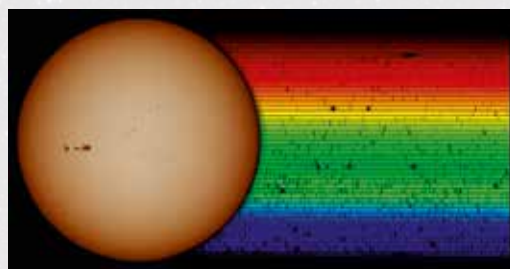
Wenn wir das Licht der Sonne zerlegen, erhalten wir einen wunderschönen Regenbogen. Bei genauer Analyse des Spektrums von Rot bis Blau zeigt sich, dass es Lücken aufweist, die sogenannten Fraunhofer-Linien (Abb. 2). Die Erklärung dafür fanden im 19. Jahrhundert der Chemiker Robert Bunsen und der Physiker Gustav Kirchhoff, als sie die Wechselwirkung von Licht und Gasen untersuchten. Dabei stellten sie fest, dass jedes Gas, beziehungsweise jedes Element, Licht charakteristischer Wellenlängen absorbiert, so dass im Spektrum Lücken entstehen. Aus den Lücken im Sonnenspektrum kann man daher im Umkehrschluss die chemische Zusammensetzung der Sonnenoberfläche bestimmen. Dies führte zur Entdeckung des bis dahin auf der Erde unbekanntes »Sonnenelements« Helium. Heute wissen wir, dass alle Sterne zu etwa 75 Prozent aus Wasserstoff und 25 Prozent aus Helium bestehen.

Inventur im Sonnensystem

Die Elementhäufigkeiten im Sonnensystem können wir anhand von Position und Stärke der Linien (Lücken) des Sonnenspektrums bestimmen. Unverfälschte Informationen vom Beginn des Sonnensystems liefern uns außerdem Meteoriten. Die Sonne und die Planeten sind aus einer Staubwolke entstanden. Gleichzeitig formten sich auch kleinere Materiebrocken. In

ihnen ist die ursprüngliche Zusammensetzung der Elemente konserviert. Einige dieser Brocken durchdringen die Atmosphäre und erreichen den Erdboden. Dann sprechen wir von Meteoriten. Diese Gesteine können wir im Labor untersuchen und die Elementhäufigkeiten bestimmen.

Die häufigsten Elemente im Sonnensystem sind Wasserstoff und Helium. Bis zum schwersten stabilen Element Bismut fallen die Häufigkeiten um viele Größenordnungen ab. Ebenso fällt auf, dass die stark gebundenen Elemente der Eisengruppe (um die Massenzahl 56 herum) um Größenordnungen häufiger als die umliegenden Elemente sind (Abb. 3).

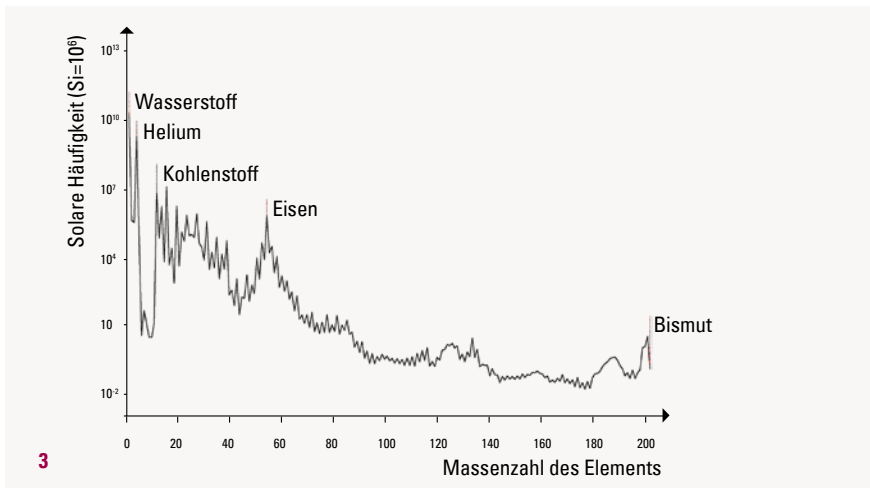


Die Sterne am Nachthimmel

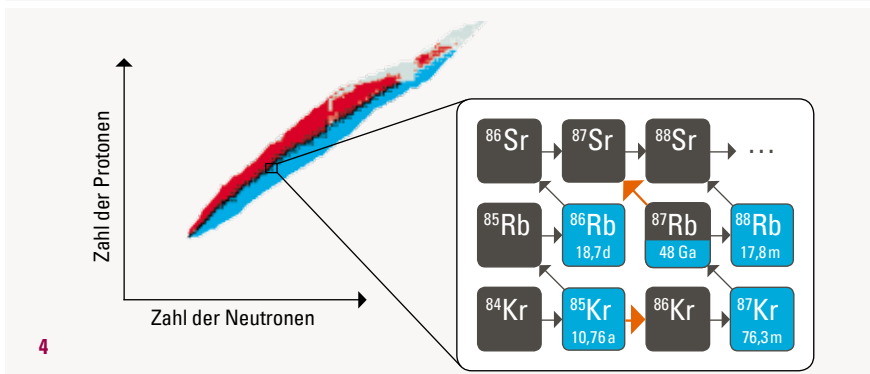
Ein genauer Blick an den Nachthimmel offenbart, dass die Sterne nicht alle gleich sind. Mit bloßem Auge können wir Sterne unterschiedlicher Farben erkennen: von Rot bis Gelb, über Weiß bis hin zu Blau (Abb. 1). Die Farbe verrät uns eine Eigenschaft des Sterns, die Oberflächentemperatur. Ein kühler Stern sendet vorwiegend rotes Licht aus, ein sehr heißer Stern hingegen eher blaues Licht. Informationen über die Größe eines Sterns erhalten wir aus der Temperatur und der Leuchtkraft (abgestrahlte Energie pro Zeit): Ein blauer (heißer) Stern mit kleiner Leuchtkraft muss sehr klein sein, ein roter (kühler) Stern mit großer Leuchtkraft sehr groß.

1 Beeindruckende Sternentstehungsregionen aus Rot leuchtendem Wasserstoffgas im Sternbild Fuhrmann am Nordhimmel. Unter den Sternen unterschiedlicher Farbe sind auch einige Rote Riesen.

2 Unsere Augen nehmen das Licht wahr, das von der Sonnenoberfläche (Photosphäre) ausgesendet wird. Eine detaillierte Analyse des Lichts zeigt ein Frequenzspektrum von Rot bis Blau. Elemente in der Sternatmosphäre absorbieren Licht bestimmter Frequenzen, so dass Lücken in Form schwarzer Linien im Spektrum entstehen. Die Linien erlauben es, die Elemente in der Photosphäre eindeutig zu identifizieren.



3



4

3 Die solare Häufigkeit der Elemente. Wasserstoff und Helium sind die häufigsten Elemente im Sonnensystem. Bis zum schwersten stabilen Element Bismut fallen die Häufigkeiten um etwa zehn Größenordnungen ab. Auf ein Bismutatome kommen etwa zehn Milliarden Wasserstoffatome. Die stark gebundenen Elemente der Eisengruppe sind um Größenordnungen häufiger als die umliegenden Elemente.

4 Schematische Darstellung einer Nuklidkarte. Alle existierenden Kerne sind nach ihrer Protonen- und Neutronenzahl aufgetragen. Stabile Kerne sind in schwarz dargestellt, instabile Kerne in Rot, Blau und Grau. Rechts: Ausschnitt aus der Nuklidkarte rund um Krypton (Kr), Rubidium (Rb) und Strontium (Sr). Der Kern ^{84}Kr (Krypton-84) kann ein Neutron einfangen. Dabei entsteht der instabile Kern ^{85}Kr , der anschließend entweder ein Neutron einfängt oder zu ^{85}Rb zerfällt. Der Reaktionspfad verzweigt sich hier (Verzweigungspunkt). Abhängig von der Wahrscheinlichkeit, dass ^{85}Kr ein Neutron einfängt, werden verschiedene Reaktionspfade beschritten. In der Folge wird entweder ^{87}Rb oder ^{87}Sr häufiger erzeugt.

Wir Kinder des Kosmos

Die Elemente leichter als Kohlenstoff (Wasserstoff, Helium, Lithium, Beryllium und Bor) wurden schon unmittelbar nach dem Urknall vor etwa 13,8 Milliarden Jahren gebildet. Die Elemente von Kohlenstoff bis Eisen werden im zunehmend heißer werdenden Innern von Sternen durch die Verschmelzung von leichteren Elementen erzeugt. Diese Fusionsprozesse bilden die fundamentale Energiequelle der Sterne und bestimmen ihre Entwicklung. Dabei werden mehrere aufeinanderfolgende Brennphasen durchlaufen: Im Wasserstoffbrennen wird Helium erzeugt, das in der nächsten Phase, dem Heliumbrennen, zu Kohlenstoff fusioniert. Leichte Sterne wie die Sonne können keine weitere Brennphase zünden. Dass in unserem Sonnensystem trotzdem schwerere Elemente vorhanden sind, liegt daran, dass diese schon in der Staubwolke waren, aus der es vor etwa 4,5 Milliarden Jahren entstanden ist.

Elemente, die schwerer sind als Kohlenstoff, entstehen in Sternen, die mehr als achtmal schwerer sind als die Sonne. Auf das Neonbrennen folgt das Sauerstoffbrennen und schließlich das Siliziumbrennen. Dabei entsteht das am stärksten gebundene Element Eisen.

Um die schweren Elemente bis hin zu Bismut zu erzeugen, muss Energie aufgewendet werden. Das Licht der Sterne zeigt uns, in welcher Sternentwicklungsphase schwere Elemente

erzeugt werden. Nehmen wir zum Beispiel das Element Technetium. Es zerfällt nach einigen Millionen Jahren. Im Sonnensystem, und damit auch auf der Erde, kommt Technetium nicht vor, weil das bei der Entstehung der Erde vorhandene Material in den vergangenen vier Milliarden Jahren seit der Entstehung unseres Planeten zerfallen ist. Mitte des 20. Jahrhunderts aber entdeckte der Physiker Paul Willard Merrill den Fingerabdruck von Technetium in den Spektren von Roten Riesen. Da Rote Riesen schon einige Milliarden Jahre alte Sterne sind, müssen sie das Element Technetium also frisch erzeugen.

Etwa die Hälfte der Elemente, die schwerer als Eisen sind, wird im sogenannten s-Prozess erzeugt. Dieser Prozess startet bei Eisen und produziert sukzessive die schwereren Kerne. Um den Ablauf des Prozesses zu verstehen, muss man sich die Elemente genau anschauen: Eisen beispielsweise besteht aus 26 Protonen. Hinzu kommen unterschiedliche Anzahlen von Neutronen. Diese verschiedenen Varianten eines Kerns nennt man Isotope. Das häufigste Eisenisotop Eisen-56 besitzt 30 Neutronen. Aber auch Eisenkerne mit 28, 31 und 32 Neutronen sind stabil. Alle anderen Kombinationen von 26 Protonen und X Neutronen sind nicht stabil, was bedeutet, dass diese Kerne nach einer bestimmten Zeit zerfallen. Genauso verhält es sich auch für die anderen Elemente. Die meisten Elemente haben mehr als eine stabile Zusammensetzung im Kern.

In einem Roten Riesen sind freie Neutronen vorhanden. Diese können zum Beispiel auf einen Kryptonkern treffen und eingefangen werden (Abb. 4). So entsteht der nächstschwere Kryptonkern. Jeder Kern fängt etwa einmal alle zehn Jahre ein Neutron ein. Nach einem oder mehreren Neutroneneinfängen wird schließlich ein instabiler Kern erzeugt, der zum nächstschweren Element, in diesem Fall Rubidium, zerfällt. Der Rubidiumkern kann wiederum Neutronen einfangen. Auf diese Weise werden sukzessive schwerere Elemente bis hin zu Bismut erzeugt.

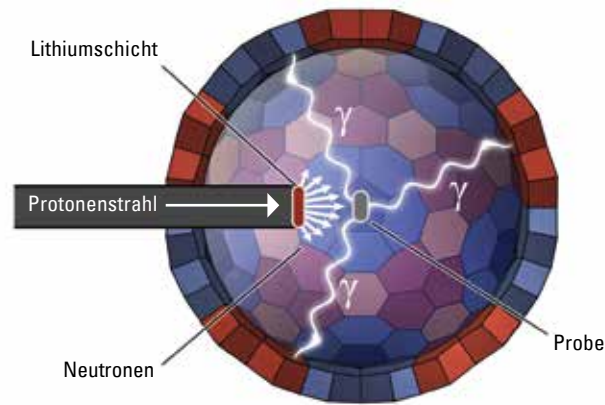
Sterne im Labor

Im Innern von Sternen herrschen unvorstellbar hohe Temperaturen von bis zu einigen Milliarden Grad Celsius. Die freien Neutronen haben bei diesen Temperaturen eine große Geschwindigkeit. Trotzdem ist es leicht, diese schnellen Neutronen in Teilchenbeschleunigern zu erzeugen und in irdischen Laboren zu untersuchen. Erst die genaue Kenntnis der Wahrscheinlichkeit und Häufigkeit einer Reaktion als Funktion der Temperatur und der Dichte im Stern erlaubt quantitative Rück-

schlüsse auf die Vorgänge im Inneren der Sterne.

Ein Forschungsschwerpunkt unserer Arbeitsgruppe für Experimentelle Astrophysik ist die Untersuchung von Neutroneneinfangreaktionen im s-Prozess. Instabile (radioaktive) Isotope sind dabei von besonderem Interesse. Wenn sie im Stern durch Neutroneneinfang produziert werden, können sie anschließend entweder erneut ein Neutron einfangen oder zerfallen. Der Reaktionspfad verzweigt sich an dieser Stelle (Verzweigungspunkt). Abhängig vom Reaktionspfad werden bestimmte Kerne mehr oder weniger häufig produziert: Eine größere Zahl an freien Neutronen führt zum Beispiel zu einer vermehrten Produktion der Neutroneneinfangsprodukte.

Untersuchungen an radioaktiven Kernen erfordern jedoch viel größere experimentelle Anstrengungen als Experimente mit stabilen Kernen. Zum einen sind die Erzeugung des Probenmaterials und der Umgang damit wesentlich schwieriger. Zum anderen stört die von den radioaktiven Kernen ausgesandte Strahlung die Messung, weil sie die Signale der Reaktionsprodukte im Detektor überlagert. Deshalb kann nur eine geringe Menge an Probenmaterial ver-



5 Schematischer Aufbau zur Messung von Neutroneneinfangreaktionen im Projekt NAUTILUS: Mithilfe eines Beschleunigers werden Protonen beschleunigt. Sie durchqueren eine Lithiumschicht, wobei Neutronen entstehen. Die Kerne in der Probe, die Neutronen einfangen, gehen in einen angeregten Zustand über. Sie geben die Energie anschließend durch Aussendung von Licht (γ) wieder ab. Dieses Licht wird mit dem Detektor gemessen. Das erlaubt Rückschlüsse auf die erzeugten Kerne und die Anzahl der Reaktionen.

wendet werden. Im Experiment kann dies nur durch entsprechend höhere Neutronenflüsse ausgeglichen werden. An der im Bau befindlichen Frankfurter Neutronenquelle FRANZ entstehen derzeit weltweit einmalige Experimentiermöglichkeiten. Dies betrifft insbesondere die Anzahl der verfügbaren Neutronen mit astrophysikalisch relevanten Energien.

Im Rahmen des vom Europäischen Forschungsrat geförderten Projekts NAUTILUS (Nuclear Astrophysics Constraining Stellar Nucleosynthesis) wird die Probe deutlich näher an der Neutronenquelle platziert als üblich. Bei kürzerem Abstand erreichen wesentlich mehr der in alle Raumrichtungen fliegenden Neutronen die Probe. Somit kann bei gleicher Neutronenquellstärke mit noch kleineren Probenmengen experimentiert werden.

Das neue Verfahren soll am Beispiel des radioaktiven Krypton-85 demonstriert werden. Der Kern Krypton-85 ist ein Verzweigungspunkt im s-Prozess (Abb. 4) und von höchstem astrophysikalischem Interesse. Da das Edelgas Krypton praktisch nur als Gas in Experimenten eingesetzt werden kann, ist die Herstellung

6 Seit dem Urknall dehnt sich das Universum aus. Die theoretischen Modelle der Kosmologie sagen verschiedene Szenarien für die Entwicklung des Universums voraus: Wird es unter der Kraftwirkung der Massen wieder zusammenfallen? Dehnt es sich mit konstanter Geschwindigkeit immer weiter aus? Oder dehnt es sich gar mit immer größerer Geschwindigkeit aus? Die Mitglieder der Arbeitsgruppe Experimentelle Astrophysik sind auf der Suche nach der Antwort: Mit kosmologischen »Uhren« bestimmen sie, wann die ersten schweren Elemente in Sternen erzeugt wurden (Nukleosynthese). Daraus bestimmen sie das Alter des Universums und damit dessen Vergangenheit und Zukunft.

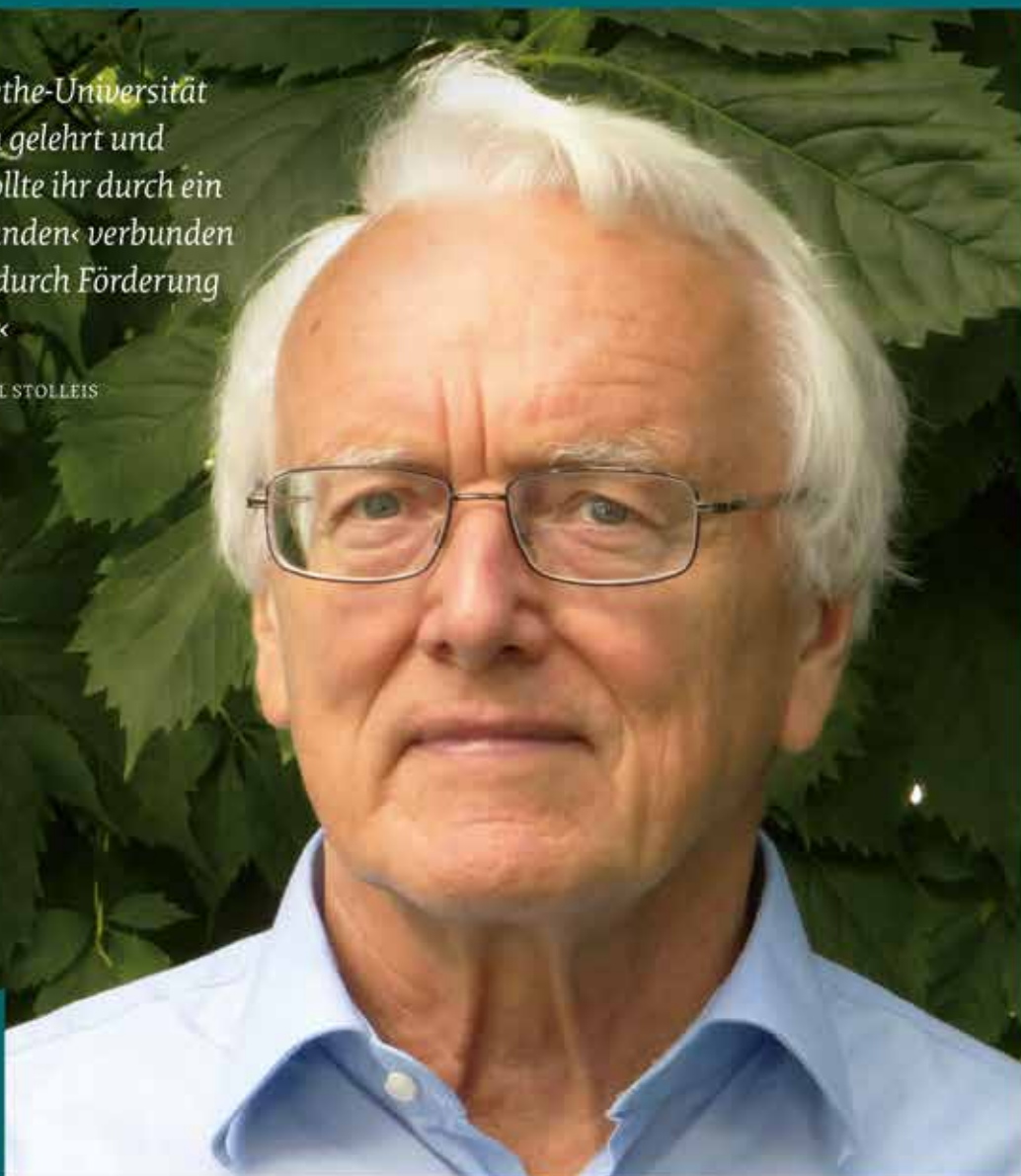
AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Aus dem Licht der Sterne können wir auf ihre Eigenschaften und Vorgänge in ihrem Innern schließen.
- Sterne verschmelzen die meiste Zeit ihres Lebens das leichteste Element Wasserstoff zum nächstschweren Element Helium. In den Spätphasen der Sternentwicklung werden Elemente schwerer als Eisen erzeugt.
- Astrophysiker simulieren die Elemententstehung in Sternen am PC. Die Ergebnisse von Labormessungen gehen in die Simulationen ein. Ziel ist es, die Häufigkeiten der Elemente im Sonnensystem zu reproduzieren.
- Kernphysikalische Messungen ermöglichen die Altersbestimmung des Universums und verraten, wie die Zukunft des Universums aussieht.



»Wer viele Jahre an der Goethe-Universität unter besten Bedingungen gelehrt und geforscht hat, kann und sollte ihr durch ein Engagement bei den ›Freunden‹ verbunden bleiben. Es ist ein Dank – durch Förderung der nächsten Generation.«

PROF. EM. DR. DR. H.C. MULT. MICHAEL STOLLEIS
MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR
EUROPÄISCHE RECHTSGESCHICHTE



FREUNDE
DER UNIVERSITÄT

Machen Sie mit. Werden Sie ein Freund!

Werden Sie Mitglied bei den Freunden und unterstützen Sie mit uns Forschung und Lehre an der Goethe-Universität.

NAME, VORNAME

STRASSE, PLZ, ORT, STAAT

Beitrittserklärung

Ich möchte Mitglied werden und die Vereinigung von Freunden und Förderern der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e. V. unterstützen

- als Freund: Jahresbeitrag ab 70 Euro
 als Förderer: Jahresbeitrag ab 200 Euro
 als Donator: Jahresbeitrag ab 500 Euro
 als Firmenmitglied: Jahresbeitrag ab 500 Euro

Einzugsermächtigung

Bitte buchen Sie den Jahresbeitrag von meinem Konto ab.

KONTOINHABER

IBAN

BANKINSTITUT

DATUM, UNTERSCHRIFT

Die Vereinigung von Freunden und Förderern der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e. V. ist als gemeinnütziger Verein anerkannt. Spenden und Mitgliedsbeiträge sind steuerlich in vollem Umfang absetzbar. Mit meiner Unterschrift stimme ich der Speicherung meiner Angaben in einer nur zu Vereinszwecken geführten computergestützten Datei zu.

großer Proben eine technologische Herausforderung.

Woher und wohin?

Wie alt ist unser Universum und wie entwickelt es sich? Unser heutiges Verständnis beruht auf astronomischen Beobachtungen von Sternexplosionen eines bestimmten Typs, Supernovae vom Typ Ia. Diese Explosionen scheinen alle nach dem gleichen Mechanismus abzulaufen, denn das dabei ausgesendete Licht ist identisch. Deshalb bezeichnen wir sie als Standardkerzen. Analysieren wir das Licht und bestimmen die Entfernung dieser Sterne, können wir auf den Zeitpunkt der Explosion zurückschließen und auch auf die Größe des Universums zu diesem Zeitpunkt. Die Physiker Saul Perlmutter, Brian Schmidt und Adam Riess analysierten viele dieser Standardkerzen und kamen zu dem Schluss, dass sich das Universum immer schneller ausdehnt. Dafür erhielten sie 2011 den Physik-Nobelpreis.

Aber können wir uns wirklich auf diese Standardkerzen verlassen? Das Projekt NAUTILUS wird dies überprüfen, indem es das Alter des Universums unabhängig von Standardkerzen bestimmt. Es verwendet dazu radioaktive

Kerne mit einer Halbwertszeit, die in etwa dem Alter des Universums entspricht, als eine Art Uhr. Wenn solche Kerne im frühen Universum in einem Stern erzeugt worden sind, können wir einen Teil dieser Kerne heute noch messen und zurückrechnen, wie viel Zeit seit dem Beginn der Nukleosynthese vergangen ist. Wir wissen, dass die Nukleosynthese 500 Millionen Jahre nach dem Urknall begann, als die ersten Sterne entstanden. Bestimmt man also den Beginn der Nukleosynthese, kann man daraus auf das Alter des Universums schließen.

Mit seiner Halbwertszeit von 48 Milliarden Jahren ist der Kern Rubidium-87 ein vielversprechender Kandidat für eine solche kosmische Uhr. Der von uns untersuchte Kern Krypton-85 liegt unmittelbar auf dem Reaktionspfad zu Rubidium-87 und bestimmt dessen Häufigkeit. Ist die Rate von Neutroneneinfängen an Krypton-85 sehr hoch, wird viel Rubidium-87 produziert. Ist die Rate hingegen klein, wird wenig Rubidium-87 produziert (Abb. 4). Das Projekt NAUTILUS wird diese Rate und damit das Alter des Universums bestimmen. Werden wir die Ergebnisse der Standardkerzen bestätigen oder erwartet uns eine Überraschung? ●



Die Autoren

Dr. Kathrin Göbel, Jahrgang 1985, hat ihr Bachelor- und Masterstudium in Physik an der Goethe-Universität absolviert. Dabei hat sie sich auf die Themen Kernphysik und Astrophysik spezialisiert, die während der Promotion in der Experimentellen Astrophysik verschmolzen. Seit Mai 2015 ist sie wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Arbeitsgruppe und Scientific Coordinator bei HIC for FAIR. Seit 2009 engagiert sich Kathrin Göbel im Physikalischen Verein. Sie organisiert die beliebten »frankfurter science slams«.

goebel@physik.uni-frankfurt.de

Prof. Dr. René Reifarth, Jahrgang 1973, verbrachte nach seiner Promotion an der Eberhard Karls Universität Tübingen zunächst fünf Jahre am Los Alamos National Laboratory in den USA. Als Leiter einer Helmholtz-Nachwuchsgruppe kehrte er 2007 nach Deutschland zurück und forschte an der Goethe-Universität sowie an der Gesellschaft für Schwerionenforschung in Darmstadt. Seit 2010 ist er Professor am Institut für Angewandte Physik und derzeit Dekan des Fachbereichs Physik sowie Wissenschaftlicher Direktor von HIC for FAIR. 2014 erhielt er für das Projekt NAUTILUS den mit zwei Millionen Euro dotierten »Consolidator Grant« des Europäischen Forschungsrates.

reifarth@physik.uni-frankfurt.de



Photonen spalten FCKW – aber nur langsam

Über die Photochemie
der Atmosphäre
und die Lebenszeiten von Spurengasen

von Andreas Engel

Die Freisetzung von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) in die Atmosphäre ist seit Inkrafttreten des Montreal-Protokolls zum Schutz der Ozonschicht im Jahr 1987 reguliert. Aber die ozonzerstörenden Gase sind äußerst langlebig. Sie können erst in der Stratosphäre, also in Höhen oberhalb von etwa zehn Kilometern, durch kurzwelliges, energiereiches Sonnenlicht gespalten werden. Messungen der FCKW und ihrer Ersatzstoffe am Institut für Atmosphäre und Umwelt erlauben es, die Lebenszeiten dieser Substanzen zu bestimmen und damit auch ihr Potenzial, die Ozonschicht zu schädigen und zur Klimaerwärmung beizutragen. Sie stellen einen wichtigen Beitrag zur Klimaforschung dar.

Wechselwirkungen des Sonnenlichts mit den Gasen der Erdatmosphäre spielen eine große Rolle für das Leben auf der Erde. Den größten Beitrag dazu leistet die kurzwellige UV-Strahlung mit Wellenlängen von weniger als 400 Nanometern. So wird molekularer Sauerstoff (O_2) nur von energiereichen Lichtteilchen (Photonen) mit Wellenlängen von kleiner als 240 Nanometern gespalten. Diese Aufspaltung, auch Photolyse genannt, trägt zur Entstehung der schützenden Ozonschicht in der Stratosphäre bei. Nachdem das Sauerstoffmolekül gespalten ist, verbindet sich jedes der beiden Sauerstoffatome mit einem O_2 -Molekül zum Ozon (O_3). Ihre maximale Konzentration weist die hierdurch entstehende Ozonschicht in Höhen zwischen etwa 20 und 30 Kilometern auf. Die Ozonschicht absorbiert schon Strahlung mit Wellenlängen kleiner als 290 Nanometer sehr effektiv. Dadurch schützt sie die Troposphäre, in der wir leben, vor der kurzwelligeren UV-B-Strahlung der Sonne. Wenn die Strahlung wegen eines Lochs oder einer Ausdünnung der Ozonschicht vermehrt in die Troposphäre gelangt, kann dies zu gesundheitlichen Problemen bei Menschen, aber auch zur Schädigung von Pflanzen und Tieren führen.

Das OH-Radikal: Waschmittel der Atmosphäre

Die Energie der Photonen, die durch den Filter der Ozonschicht in die erdnahe Troposphäre gelangt, reicht nicht aus, um die meisten Moleküle in der Troposphäre photolytisch zu spalten. Zwei wichtige Ausnahmen hiervon sind das Ozonmolekül, welches auch in der Troposphäre vorkommt und dort photolytisch gespalten werden kann, und das Stickstoffdioxid (NO_2). Damit kommt diesen beiden Molekülen eine Schlüsselrolle in der Chemie der Troposphäre zu.

Die photolytische Spaltung von Ozon und die nachfolgende Reaktion der gebildeten angeregten Sauerstoffatome ($O(^1D)$) mit Wasser ist die Hauptquelle für das OH-Radikal (Graedel, 1994). Dieses sehr reaktionsfreudige Radikal reagiert mit einer Vielzahl von Substanzen, die aus natürlichen und anthropogenen Quellen in die Atmosphäre gelangen. Hierdurch können Substanzen wie Kohlenwasserstoffe und Kohlenmonoxid (CO), die nicht direkt photolytisch spaltbar sind, in der Troposphäre abgebaut werden. Bei diesen Reaktionen wird das OH-Radikal zurückgebildet [siehe Kasten »Ozonchemie der Troposphäre«]. OH-Radikale fungieren also lediglich als Katalysator und können in Form einer Kettenreaktion weiterreagieren, bis die Kette über Senkenreaktionen für das OH-Radikal unterbrochen wird. Über Reaktionsmechanismen, die sehr ähnlich denen für das CO-Molekül sind, werden die meisten Substanzen, die in die Atmosphäre emittiert werden,

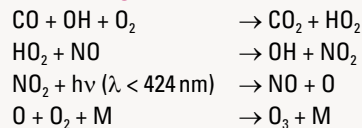
OZONCHEMIE DER TROPOSPHÄRE

Die wesentlichen Reaktionen für den Abbau vieler Substanzen, die in die Atmosphäre emittiert werden, sind sehr ähnlich den hier für das CO-Molekül als Mustersubstanz gezeigten. In den Reaktionsgleichungen wird das Licht als Lichtquant (Photon) einer bestimmten Wellenlänge λ beschrieben. Es ist üblich, die Energie der Photonen als $h\nu$ zu schreiben, wobei h für das Planck'sche Wirkungsquantum und ν für die Frequenz steht. M steht hier für einen beliebigen Stoßpartner, der bei der Reaktion nicht chemisch verändert wird.

Bildung von OH-Radikalen



Ozonbildung beim Abbau CO



oxidiert. Hierbei entstehen entweder stabile Endprodukte wie CO_2 oder wasserlösliche Substanzen, die dann aus der Atmosphäre ausgewaschen werden können. Die Energie für die Oxidation wird in jedem Fall über das Lichtquant von der Sonne geliefert.

Die Reaktion mit dem OH-Radikal ist der wichtigste Abbauprozess für viele klimaschädigende Gase, insbesondere das Methan, aber auch für viele teilhalogenierte Kohlenwasserstoffe. Änderungen in der Photochemie der Troposphäre und damit in der mittleren Konzentration des OH-Radikals beeinflussen also die Lebenszeit von Methan und anderen Treibhausgasen und haben damit auch eine Auswirkung auf den Treibhauseffekt. Man kann das OH-Radikal als eine Art Waschmittel der Atmosphäre bezeichnen, weil es am

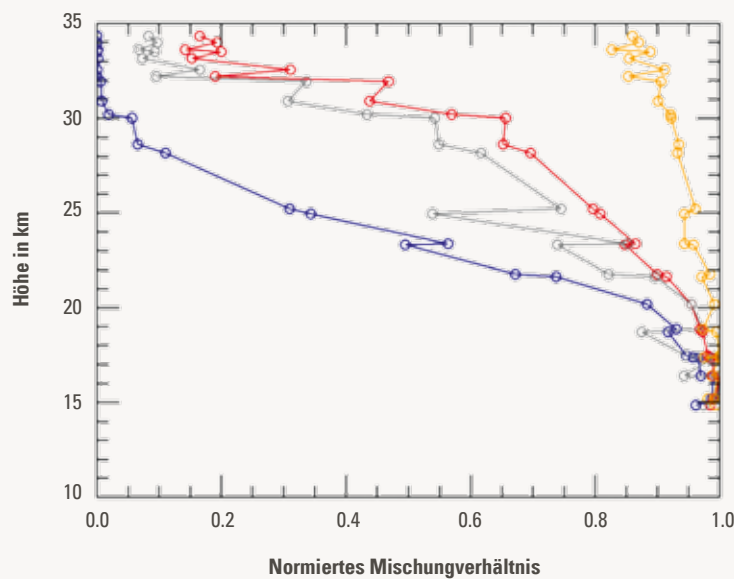
1 Start eines wasserstoffgefüllten Stratosphärenballons mit dem Luftprobensammler der Universität Frankfurt in Gap, Frankreich, im Sommer 1997. Der Ballon mit einem Volumen von 100.000 Kubikmetern kann mehrere 100 Kilogramm schwere Messgeräte auf Höhen von über 30 Kilometer tragen. In der dünnen oberen Atmosphäre erreicht der Ballon seine volle Ausdehnung mit fast 60 Metern Durchmesser.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Photochemische Prozesse in der Atmosphäre schützen unsere Planeten vor energiereicher Strahlung und führen zum Abbau vieler Treibhausgase.
- FCKW sind äußerst langlebig, weil sie erst oberhalb der Ozonschicht, in der Stratosphäre, von energiereichem Sonnenlicht gespalten werden.
- Die photochemischen Lebenszeiten können aus Messungen mit Ballons und hochfliegenden Forschungsflugzeugen in der Stratosphäre bestimmt werden.

2 Wie schnell werden verschiedene Spurengase in der Stratosphäre photolysiert? Vertikalprofile verschiedener langlebiger FCKW aus Messungen des Instituts für Atmosphäre und Umwelt in der tropischen Stratosphäre können hierüber Auskunft geben. Die Proben wurden mit ballongetragenen Luftprobensammlern während Messkampagnen 2005 und 2008 von Teresina in Brasilien gesammelt und in Frankfurt mithilfe von Gaschromatografie und gekoppelter Massenspektrometrie vermessen. Die Mischungsverhältnisse sind auf den Troposphärenwert normiert, um nur die relative Abnahme zu zeigen. Das FCKW CFCl_3 (F11; in blau) ist mit einer Lebenszeit von 52 Jahren das kurzlebigste Gas; F113 ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$, in grau) hat eine Lebenszeit von 93 Jahren; F12 (CF_2Cl_2 , in rot) eine Lebenszeit von 102 Jahren. Das FCKW F115 ($\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}$, gelb) ist mit 540 Jahren atmosphärischer Lebenszeit das langlebigste der hier dargestellten Spurengase und nimmt daher mit der Höhe am langsamsten ab.

Vertikalprofile verschiedener langlebiger FCKW



ersten, geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der meisten Abbaureaktionsketten beteiligt ist. Andererseits entsteht bei diesem Abbau in Gegenwart von Stickoxiden auch neues Ozon. In der Troposphäre ist es als Zellgift schädlich für Mensch und Umwelt.

den Photonen benötigt, die typischerweise unterhalb von 230 Nanometern liegen. Bei der Photolyse werden dann Chloratome freigesetzt, die das Ozon angreifen können.

Berechnungen zeigen, dass zum Beispiel FCKW tatsächlich erst in der Stratosphäre photolysiert werden, wobei die Abbaugeschwindigkeiten verschiedener FCKW sich signifikant unterscheiden. FCKW, die langsamer photolytisch gespalten werden, verbleiben dabei länger in der Atmosphäre und haben eine längere Lebenszeit. Die photochemischen Lebenszeiten können aus Messungen der verschiedenen Substanzen in der Stratosphäre bestimmt werden (Laube et al., 2013). Solche Messungen werden am Institut für Atmosphäre und Umwelt der Goethe-Universität durchgeführt [siehe Kasten »Spurengasmessungen in der Stratosphäre«, Seite 13]. Die Lebenszeit ist ein essenzieller Parameter, um die Umweltrelevanz der verschiedenen FCKW zu beurteilen, insbesondere wie schnell sie wieder aus der Atmosphäre entfernt werden. Substanzen, die leichter photolysiert werden, haben eine kürzere Lebenszeit und nehmen dadurch mit der Höhe schneller ab als langlebigere (Abb. 1).

Im Rahmen von SPARC (Stratosphere-Troposphere Processes and their Role in Climate), einem der vier Kernprojekte des World Climate Research Programme (WCRP), haben wir die Lebenszeiten der wichtigsten Nicht- CO_2 -Treibhausgase und ozonzerstörender Gase neu evaluiert (Engel A. and Atlas E.L. et al., 2013) und neue Referenzwerte für atmosphärische Lebenszeiten bestimmt (Ko et al., 2013). Diese Referenzwerte werden für die Berechnung von

Photolytischer Abbau in der Stratosphäre und atmosphärische Lebenszeit

Was passiert nun, wenn Substanzen in die Atmosphäre emittiert werden, die weder wasserlöslich sind noch mit dem OH-Radikal reagieren oder anderweitig in der Troposphäre abgebaut werden können? Solche Substanzen sind sehr langlebig und können in die darüberliegende Stratosphäre aufsteigen, in der sich die schützende Ozonschicht befindet. Dort sind die für einen direkten photolytischen Abbau vieler Substanzen nötigen höheren Photonenenergien, sprich kurzwelligere Photonen, vorhanden. Für die FCKW beispielsweise, die ursächlich für den anthropogenen Ozonabbau in der Stratosphäre verantwortlich sind, wer-



Der Autor

Prof. Dr. Andreas Engel, Jahrgang 1965, studierte Chemie an der RWTH Aachen und promovierte 1993 mit einer Arbeit am Forschungszentrum Jülich an der RWTH Aachen. 1995 wechselte er an die Goethe-Universität, wo er 2007 habilitierte und seit 2010 Außerplanmäßiger Professor ist. Seine Forschung basiert größtenteils auf der Messung von atmosphärischen Spurengasen. Er untersucht chemische und dynamische Prozesse in der Stratosphäre und im Tropospaunenbereich sowie in den letzten Jahren auch in der Troposphäre.

an.engel@iau.uni-frankfurt.de

[www.uni-frankfurt.de/43267299/AG-](http://www.uni-frankfurt.de/43267299/AG-Experimentelle-Atmosphärenforschung)

[Experimentelle-Atmosphärenforschung](http://www.uni-frankfurt.de/43267299/AG-Experimentelle-Atmosphärenforschung)



SPURENGASMESSUNGEN IN DER STRATOSPHERE

Spurengasmessungen in der Stratosphäre werden am Institut für Atmosphäre und Umwelt (IAU) der Goethe-Universität mithilfe von Gaschromatographie, gekoppelt mit Massenspektrometrie, durchgeführt. Diese Messungen erlauben es, den photochemischen Abbau von wichtigen Treibhausgasen und ozonzerstörenden Substanzen zu quantifizieren.

Aus Höhen bis 35 Kilometer können Proben mit einem ballongetragenen Luftprobensammler gesammelt und im Labor vermessen werden. Dazu werden am Institut für Atmosphäre und Umwelt Messtechniken entwickelt, die es erlauben, eine Vielzahl von ozonschädigenden und klimarelevanten Spurengasen in den Luftproben zu messen. Hierbei kommt es auf die Nachweisgrenzen (für einige Substanzen bis zu 1 Teilchen auf 10^{14} Teilchen Luft) und auf

hohe Genauigkeiten (bis zu 0,2 Prozent für einige Substanzen) an.

Bis 15 Kilometer Höhe können die Messgeräte direkt mit Forschungsflugzeugen wie dem neuen deutschen Forschungsflugzeug HALO (High Altitude Long Range Aircraft) in die untere Stratosphäre gebracht werden. Hierzu wurde in der Arbeitsgruppe ein vollautomatisiertes Gaschromatografie-/Massenspektrometrie-System entwickelt, welches für den Betrieb auf dem Flugzeug besonders auf schnelle Messungen optimiert wurde.

Ballons und hochfliegende Flugzeuge ermöglichen die Messung von Spurengasen in der Stratosphäre, dem Bereich, in dem der photochemische Abbau vieler halogenerter Substanzen durch kurzwellige Solarstrahlung stattfindet.

Treibhausgaspotenzialen und Ozonzerstörungspotenzialen verwendet. Sie stellen wichtige Kenngrößen verschiedener Substanzen im Rahmen internationaler Regulierungen von Treibhausgasen und ozonzerstörenden Substanzen dar (IPCC, 2013; WMO, 2014).

Bevor das Ozonloch in der Stratosphäre erstmals beobachtet wurde, wusste man wenig über die Abbauprozesse und Lebenszeiten atmosphärischer Spurengase. Insbesondere sind die lange Lebenszeit der FCKW und der Abbau in der Stratosphäre erst spät als globales Problem erkannt worden. Durch die For-

schung der letzten Jahrzehnte ist es gelungen, die Abbauprozesse und Mechanismen besser zu quantifizieren. Dieses bessere Verständnis hat letztendlich einen klaren Zusammenhang zwischen der Emission von FCKW in die Atmosphäre und Ozonverlusten in der Stratosphäre gezeigt, was zu der heute sehr strengen Regulierung der FCKW im Rahmen des Montreal-Protokolls geführt hat. Um quantitativ überprüfen zu können, ob das Montreal Protokoll eingehalten wird, ist die nun verbesserte Kenntnis der atmosphärischen Lebenszeiten essenziell. ●

Literatur

1 Engel A. and Atlas E.L., et al., Inferred Lifetimes from Observed Trace-Gas Distributions, in SPARC Report N°6 (2013) Lifetimes of Stratospheric Ozone-Depleting Substances, Their Replacements, and Related Species, edited by M. K. W. Ko, P. A. Newman, S. Reimann, and S. E. Strahan, 2013.

2 Graedel, T. E., Chemie der Atmosphäre: Bedeutung für Klima und Umwelt, Spektrum Lehrbuch, edited by: Crutzen, P. J., and Brühl, C., Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1994.

3 IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., 2013.

4 Ko, M. K. W., Newman, P., Reimann, S., Strahan, S. E., Atlas, E. L., Burkholder, J. B., Chipperfield, M., Engel, A., Liang, Q., Mellouki, W., Plumb, R. A., Stolarski, R. S., and Volk, C. M., Recommended Values for Steady-State Atmospheric Lifetimes and their Uncertainties, in SPARC Report N°6 (2013) Lifetimes of Stratospheric Ozone-Depleting Substances, Their Replacements, and Related Species, edited by M. K. W. Ko, P. A. Newman, S. Reimann, and S. E. Strahan, 2013.

5 Laube, J. C., Keil, A., Bönnisch, H., Engel, A., Röckmann, T., Volk, C. M., and Sturges, W. T., Observation-based assessment of stratospheric fractional release, lifetimes, and ozone depletion potentials of ten important source gases, Atmos. Chem. Phys., 13, 2779-2791, 10.5194/acp-13-2779-2013, 2013.

6 WMO: World Meteorological Organization (WMO), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2014, World Meteorological Organization, Global Ozone Research and Monitoring Project-Report No. 55, 416 pp., Geneva, Switzerland, 2014., 2014.





»Everything about these pictures was a surprise. It was literally hitting me like lightning, showing me that moments of significance cannot be planned or foreseen. They can only be received.«

Rolf Maeder, Blitze im Grand Canyon
www.rolfmaederphotography.com



Carl Zeiss
444036-9000

MIKROSKOPIE

Die Macht der dunklen Seite

Die Chancen der Lichtscheiben-Fluoreszenzmikroskopie in der modernen Zell- und Entwicklungsbiologie

von Isabell Smyrek, Katharina Hötte, Frederic Strobl, Alexander Schmitz und Ernst H. K. Stelzer

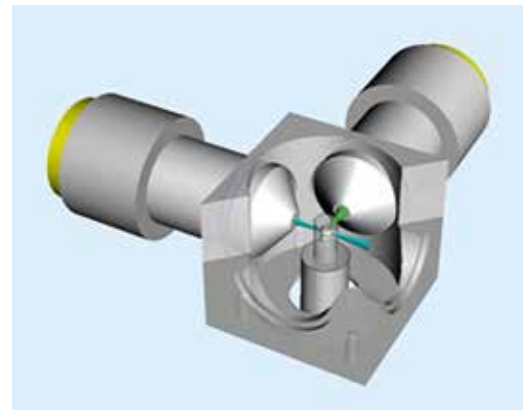
»Mehr Licht!« – so lauteten, glaubt man seinem Arzt Carl Vogel, die letzten Worte des größten deutschen Dichters und Denkers Johann Wolfgang Goethe. Aus der Sicht der Fluoreszenzmikroskopie ist das kein guter Grundsatz. Die Kernidee der Lichtscheiben-Fluoreszenzmikroskopie (LSFM) liegt in der Macht der dunklen Seite. Anders gesagt: Sie folgt dem Prinzip, dass weniger manchmal viel mehr sein kann. Die schonende Beleuchtung empfindlicher Proben bei der LSFM birgt großes Potenzial für die moderne Zell- und Entwicklungsbiologie.

Die Fluoreszenzmikroskopie beruht auf dem Prinzip, leuchtfähige Moleküle (Fluorophore) in einer Probe anzuregen und sie anhand des Lichts, das sie spontan aussenden, mit hoher Genauigkeit zu orten. Das Licht für die Anregung hat dabei eine andere Wellenlänge als das Fluoreszenzlicht. In einem konventionellen oder konfokalen Epifluoreszenzmikroskop durchdringt das Anregungslicht die gesamte Probe und regt (aufgrund der Energieerhaltung) in jeder Ebene die gleiche Anzahl von Fluorophoren an. Um einen dreidimensionalen Datensatz aufzuzeichnen, sammelt man das Fluoreszenzlicht verschiedener Schichten ein, indem man mit dem Fokus von der Oberfläche der Probe in die Tiefe wandert. Das bedeutet, dass bei jeder Aufnahme nicht nur die Fluorophore in der fokussierten Ebene angeregt werden, sondern alle Fluorophore in der Probe. Benötigt man zum Beispiel 100 Aufnahmen, um einen dreidimensionalen Datensatz aufzuzeichnen, dann wurden die Fluorophore in der Mitte (also in der fünfzigsten Ebene), bereits 49-mal angeregt, bis sie im Fokus liegen.

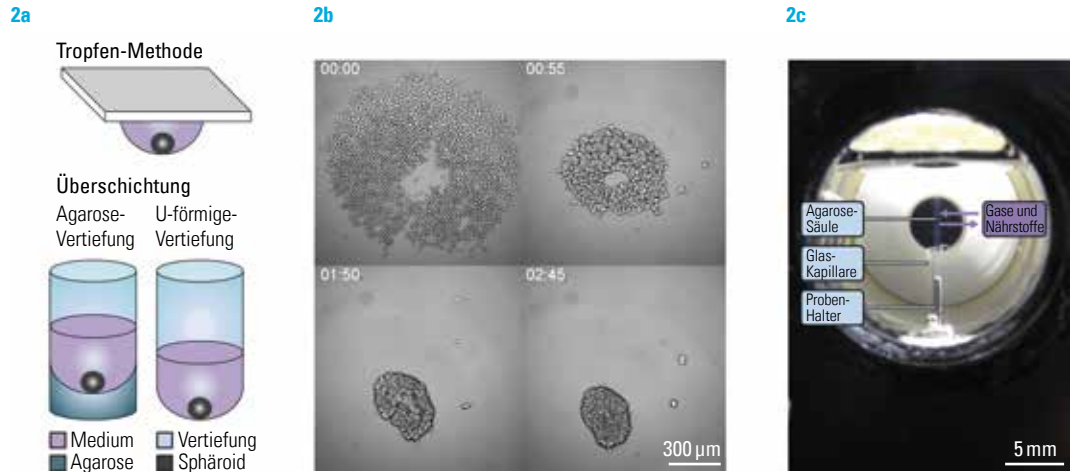
Seit einigen Jahren heißt die Alternative: Statt eine Probe am Stück zu beleuchten und zu beobachten, werden Anregungen und Aufnahmen »scheibenweise« durchgeführt. Ein Lichtscheibenfluoreszenzmikroskop (LSFM) besteht in erster Linie aus einer Beobachtungseinheit, die der eines Epifluoreszenzmikroskops sehr stark ähnelt. Das Fluoreszenzlicht wird mit einem Mikroskopobjektiv, einem Fluoreszenzfilter, einer Tubuslinse und schließlich einer Kamera aufgenommen. Es fehlt der dichroitische

Spiegel, der das Anregungslicht herausfiltert, da dieses nicht über das gleiche Mikroskopobjektiv eingekoppelt wird und damit auch nicht von oben (gr. *epi*) in die Probe fällt. Das Besondere an einem LSFM ist, dass das Anregungslicht über einen zweiten, unabhängigen Lichtpfad geführt wird und von der Seite in die Probe einstrahlt. Eine Zylinderlinse formt aus dem Lichtstrahl eine Scheibe beziehungsweise ein Blatt, das sich eng um die Fokalebene der Beobachtungsoptik schmiegt (Abb. 1). Das hat zur Folge, dass nur die Fluorophore angeregt werden, die sich in der Fokalebene befinden. Fluorophore, die, von dem Mikroskopobjektiv der Beobachtungsoptik aus gesehen, vor oder hinter dieser Ebene liegen, empfangen kein Licht und werden nicht angeregt. Sie können deshalb weder ausbleichen noch zum Bild beitragen.

Der größte Vorteil der LSFM ist, dass ausschließlich der Probenanteil beleuchtet wird, der sich in der Fokalebene des Detektionssystems befindet. Der hieraus resultierende »Gewinn« für die Probe lässt sich in Zahlen fassen. Er ergibt sich aus dem Verhältnis von Proben- und Lichtscheibendicke und liegt zwischen etwa zehn für Hefe und mehreren Hundert für Fruchtfliegen- und Zebrafischembryonen. Da konfokale Fluoreszenzmikroskope zudem eine Lochblende



1 Schematische Darstellung der LSFM. Eine biologische Probe befindet sich innerhalb eines Zylinders. Sie wird seitlich mit einer Lichtscheibe (cyan) bestrahlt. Das Fluoreszenzlicht (grün) wird in einem Winkel von 90° erfasst.



Formierung und Präparation von Sphäroiden

2a Schematische Darstellung der Tropfen-Methode und der Überschichtung, die zur Formierung von Sphäroiden aus einzelnen Zellen eingesetzt werden.

2b Formierung eines Sphäroiden aus 2.000 Einzelzellen über etwa drei Stunden.

2c LSFM-Probenkammer in der Frontalansicht auf das Detektionsobjektiv mit einem Sphäroiden, der in eine Agarosesäule eingebettet ist.

benötigen und ihre Detektoren nicht so effizient sind wie moderne Kameras, ist ein zusätzlicher Faktor der Belastung mit Lichtenergie von fünf bis fünfzehn zu berücksichtigen.

Als noch recht junge Methode erweist sich LSFM vor allem in der Langzeitbeobachtung von dreidimensionalen (3D) lebenden Proben als besonders vorteilhaft. So finden sich immer mehr Publikationen in verschiedenen Bereichen der Zell- und Entwicklungsbiologie, in denen die besonderen Vorteile von LSFM genutzt werden.

Sphäroide als Tumormodell

In der 3D-Zellbiologie werden häufig Sphäroide (Aggregate miteinander interagierender Zellen) als Modell verwendet. Sie werden aus mehreren Zellen geformt, die in einer nicht-adhäsiven Umgebung Zell-Zell-Kontakte ausbilden. Im Prinzip können die meisten Zelltypen (zum Beispiel Primärzellen, Tumorzelllinien und »herkömmliche« Zelllinien) Sphäroide bilden.

In der Praxis gibt es unterschiedliche Methoden, sie zu erzeugen. Bei der Tropfen-Methode werden vereinzelte Zellen in einem Tropfen Medium auf eine nicht haftende Fläche pipettiert, die dann kopfüber im Zellinkubator platziert wird. Die Zellen kommen, dank der Schwerkraft, am unteren Teil des Tropfens zusammen und bilden ein Aggregat. Eine andere Methode besteht darin, die Zellsuspension in Agarosebeschichtete oder nicht haftende, U-förmige Vertiefungen von Mikrotiterplatten zu pipettieren (Abb. 2a). Darin formen die vereinzelten Zellen im Verlauf von mehreren Stunden bis Tagen kompakte Sphäroide (Abb. 2b).

Sphäroide werden als Tumormodell verwendet und finden in der Wirkstoffsuche immer mehr Anklang, da sie den physiologischen Zustand eher repräsentieren als ein zweidimensionaler »Zellrasen«, der auf einer harten Plastikoberfläche gewachsen ist. Für die Tumorforschung ist eine detaillierte Beobachtung von Sphäroiden unerlässlich. Lichtscheibenmikroskopie ist dabei eine gute Wahl, da Endpunktaufnahmen, die einen Blick ins Innere der Sphäroide gestatten, mit sehr guter Qualität und hoher Eindringtiefe angefertigt werden können. Lebende Sphäroide lassen sich mit LSFM auch über längere Zeiträume hinweg beobachten, da Effekte wie Schädigung durch Licht (Phototoxizität) und Bleichen auf ein Minimum reduziert sind.

Wie bekomme ich den Sphäroid in ein LSFM? Hier bieten sich je nach Fragestellung verschiedene Arten der Präparation an. Die klassische Methode ist die Präparation der Probe in einer Agarosesäule, die dann in die LSFM-Probenkammer gesetzt wird (Abb. 2c). Hierfür wird der Sphäroid zunächst in lauwarme flüssige Agarose, einen Gelbildner, überführt und dann in eine Glaskapillare aufgezogen. Nachdem die Agarose ausgehärtet ist, wird sie so zurechtgeschnitten, dass sie auf den Probenhalter im Mikroskop gesteckt werden kann. Ein dünner Stift an der Oberseite des Probenhalters wird in die Kapillare geführt und drückt den Teil der Agarosesäule, in dem sich der Sphäroid befindet, am anderen Ende heraus. Die polymerisierte Agarose fungiert als engmaschiges Netz, das für Stabilität sorgt und den Sphäroid während der Aufnahme in seiner Position hält. Zusätzlich erlaubt die Agarose den Austausch von Gasen und Nährstoffen mit dem in der Probenkammer befindlichem Medium.

Der Sphäroid kann also bei Langzeit-Lebend-aufnahmen optimal versorgt werden. Kurzum, durch die reduzierte Phototoxizität, das verminderte Bleichen der Fluorophore sowie die hohe Aufnahmegeschwindigkeit bietet LSFM eine gute Möglichkeit, Sphäroide über einen längeren

FUNDAMENTALE GRENZEN DER FLUORESCENZ-MIKROSKOPIE

- 1 Fluorophore bleichen und werden während eines Experimentes verbraucht.
- 2 Viele metabolisch relevante endogene Moleküle absorbieren das gleiche Anregungslicht und werden ebenfalls abgebaut.
- 3 Die Anzahl der Fluorophore ist begrenzt und kann nicht beliebig erhöht werden.
- 4 Aus 1 und 3 folgt, dass die Anzahl der für die Bildgebung verfügbaren Photonen begrenzt ist.
- 5 Eine physiologisch akzeptable Belastung lässt sich über die Solarkonstante (circa 1,4 kW/m²) abschätzen und sollte in einem Mikroskop unter 1 nW/µm² beziehungsweise unter 100 mW/cm² liegen.

Zeitraum zu untersuchen. Abbildung 3a zeigt Bilder eines aus T47D-Brustkrebszellen geformten Sphäroids.

Wachsende Embryonen in 3-D beobachten

Ein zweites großes Anwendungsfeld von LSM ist die Entwicklungsbiologie. Während des letzten Jahrzehnts haben sich mehrere Techniken für das Beobachten von Embryonen etabliert und neue Modellorganismen durchgesetzt. Einer der wichtigsten Faktoren bei der Untersuchung von Entwicklungsprozessen ist, die dreidimensionale Integrität der Probe zu bewahren und deren Wachstum nicht zu behindern. Ähnlich wie bei Sphäroiden können Embryonen in Agarosesäulen eingebettet werden, was für einige Organismen (etwa bei der Fruchtfliege, *Drosophila melanogaster*) problemlos funktioniert. Bei *Tribolium castaneum*, dem Rotbraunen Reismehlkäfer, hat sich eine andere Technik als Erfolg versprechend erwiesen: Der Embryo wird kopfüber auf die Spitze einer Agarose-Halbkugel »geklebt«. Der Einsatz von Teflonröhrchen erlaubt es, Zebrafisch-Embryonen in sehr niedrig konzentrierter Agarose einzubetten und dadurch den Einfluss auf das Größenwachstum zu minimieren. Auch Mäuseembryonen wurden schon mit LSM beobachtet. Hierfür wurde ein Acrylstab mit kleinen »Taschen« verwendet, in die die Embryonen platziert wurden. Alle genannten Techniken für die Aufnahme im LSM haben eines gemeinsam: Statt die Probe, wie in der konventionellen Mikroskopie, an das Mikroskop anzupassen, werden bei LSM die Präparation und das Mikroskop an die Probe angepasst.

Wie bekommt man einen Embryo nun zum »Leuchten«? Letztlich haben sich drei grundlegende Standards etabliert, die bei den meisten Modellorganismen der Entwicklungsbiologie geläufig und mit LSM kompatibel sind: (1) Die Injektion oder Applikation von fluoreszierenden Farbstoffen, (2) die Injektion oder Applikation von Boten-RNA (mRNA), die für Fluoreszenzproteine kodiert, und (3) die Herstellung von transgenen Organismen, die Fluoreszenzproteine exprimieren. Die ersten beiden Methoden lassen sich verhältnismäßig schnell umsetzen, erfordern aber Manipulationen der Probe. Expressionsort und Zeitfenster lassen sich nur bedingt beeinflussen. Bei der letztgenannten Methode müssen im Vorfeld mehr Zeit und Arbeit investiert werden. Dafür kann die Probe ohne weitere Vorbereitung in das Mikroskop gesetzt werden. Expressionsort und Zeitfenster lassen sich unabhängig festlegen.

Gerade der Aspekt der hohen zeitlichen Auflösung kombiniert mit geringer Phototoxizität und Bleichen machen LSM zu einer idealen Methode für Langzeit-Lebendbeobachtungen in

der Entwicklungsbiologie. Bei der Arbeit mit lebenden, sich über mehrere Stunden, Tage oder sogar Wochen entwickelnden Proben ist es äußerst wichtig, dass der Einfluss der Beobachtungsmethode auf die Probe minimiert wird.

Deshalb ist es auch wichtig, stringente Qualitätsstandards für die Arbeit festzulegen. Bei der Beobachtung von Insektenembryonen wird der Embryo nach der Aufnahme unter physiologischen Bedingungen weiter inkubiert und anschließend überprüft, ob er schlüpft, sich zum gesunden Tier entwickelt und Nachkommen zeugen kann. Nur so wird sichergestellt, dass durch den Energieeintrag während der Aufnahme keine Schäden am untersuchten Objekt hervorgerufen wurden und dass die Aufnahme die Wildtyp-Entwicklung abbildet. Eine Beispielaufnahme von drei Zeitpunkten während der Gastrulation des Rotbraunen Reismehlkäfers *Tribolium castaneum* ist in Abbildung 3b gezeigt. Die Gastrulation ist eine der wichtigsten Phasen der Embryonalentwicklung, bei der sich die drei Keimblätter bilden. Jedes Keimblatt hat im weiteren Verlauf der Embryogenese eine andere Funktion: Aus dem äußeren entsteht beispielsweise das Nervensystem, aus dem mittleren die glatte Muskulatur und aus dem inneren das Verdauungssystem.

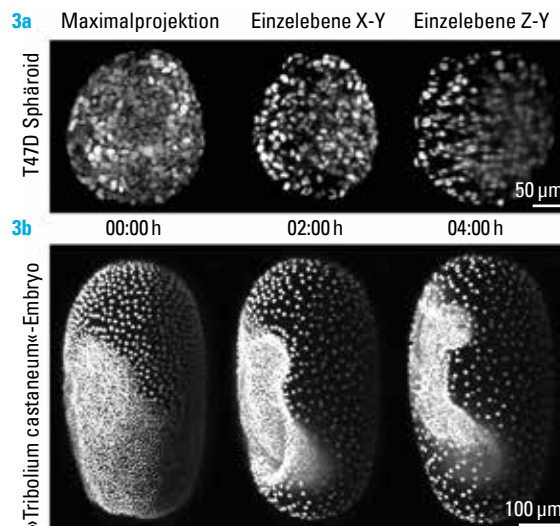
Suche nach der Stecknadel im Datenhaufen

Eine große Herausforderung in der Anwendung der LSM in der Zell- und Entwicklungsbiologie besteht darin, die multidimensionalen Daten zu visualisieren und zu verarbeiten. Üblicherweise liegt der Umfang einer Aufnahme für ein Experiment schnell im Bereich von mehreren 100 Gigabyte bis zu einigen Terabyte. Für die Beobachtung der Embryogenese von *Tribolium castaneum* über einen Zeitraum von fünf Tagen wird bereits circa 1 Terabyte an Bildern generiert. Der Experimentator muss daher einiges beachten: (1) Aufgrund der Menge lassen sich die Daten nur begrenzt über längere Zeiträume abspeichern. (2) Komplexität und Umfang der Daten machen aus der Analyse eines untersuchten Prozesses das sprichwörtliche Suchen nach der »Stecknadel im Heuhaufen«. (3) Die Leistung vieler Rechensysteme reicht häufig nicht aus, um eine Verarbeitung in einem vernünftigen zeitlichen Rahmen zu ermöglichen. (4) Es bedarf einer Folge von spezialisierten Pro-

LSFM-Aufnahmen eines Sphäroids und eines Rotbraunen Reismehlkäfer Embryos (»Tribolium-castaneum«)

3a Der Sphäroid wurde aus 300 Brustkrebszellen geformt, in denen die Zellkerne mit einem fluoreszierenden Farbstoff markiert sind. Er wird als Projektion des Bildstapels und in zwei Einzelebenen entlang unterschiedlicher Achsen dargestellt.

3b Lebendaufnahme der Gastrulation eines transgenen »Tribolium castaneum«-Embryos. Gezeigt werden Projektionen an drei Zeitpunkten. Man sieht, wie sich die Keimblätter entwickeln. Der Käfer hat die Aufnahmedauer von 50 Stunden ohne sichtbare Schäden überlebt und Nachkommen erzeugt. Insgesamt wurden mehr als 200 Stapel zu jeweils 170 Bildern und entlang jeweils vier Raumrichtungen aufgenommen. Das entspricht mehr als 140.000 Bildern beziehungsweise 400 GByte.



Beispiele für LSFM-Datenverarbeitung

4a Dreidimensionales Rendering eines T47D-Sphäroids mit Mathematica und eines »Tribolium castaneum«-Embryos mit Amira.

4b Dreidimensionale Segmentierung eines T47D-Sphäroids bestehend aus etwa 5000 Zellen.



Die Autoren

Prof. Dr. Ernst H. K. Stelzer (2. von links), geboren 1959, studierte Physik und arbeitete von 1979 bis 1983 am Max-Planck-Institut für Biophysik. Seine Doktorarbeit schloss er 1987 am EMBL in Heidelberg ab. Insgesamt arbeitete er 28 Jahre als Wissenschaftler am EMBL in den Bereichen Physikalische Optik, Biophysik, Zellbiologie und Entwicklungsbiologie. Er entwickelte neue Ansätze zur modernen Mikroskopie, die in biologischen Projekten zur Anwendung kommen. Seit 2011 nimmt er einen Ruf auf eine W3-Professur an der Goethe-Universität wahr.

ernst.stelzer@physikalischebiologie.de

www.physikalischebiologie.de

www.bmls.de/Physical_Biology/aboutus.html

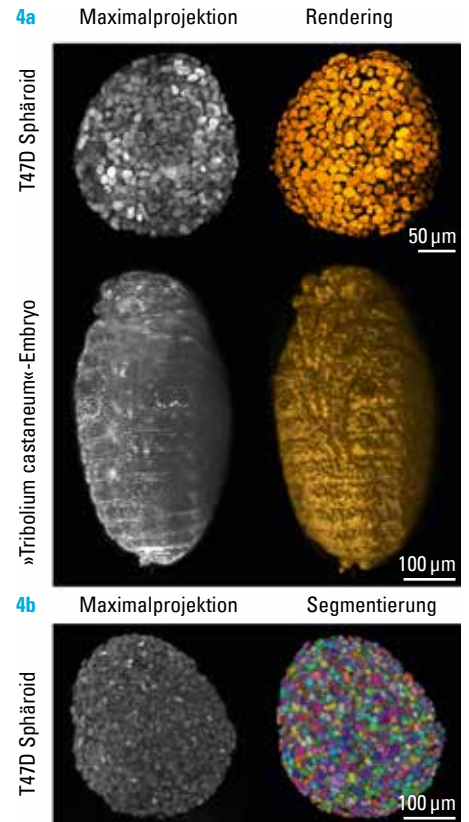
Katharina Hötte (links) und **Isabell Smyrek** sind Zellbiologie-Doktorandinnen und arbeiten daran, die Methodik der dreidimensionalen Zellkultur zur Verfeinerung und alternativen Modellsysteme zu Tierversuchen zu etablieren. **Frederic Strobl** (Mitte) ist Doktorand für Entwicklungsbiologie und vergleicht die Embryonalentwicklung mehrerer Insektenpezies, indem er genetische Werkzeuge mit moderner Mikroskopie verbindet. **Alexander Schmitz** ist Bioinformatik-Doktorand und beschäftigt sich mit der quantitativen Auswertung von Mikroskopiedaten, indem er Algorithmen für die Erkennung und Analyse subzellulärer Strukturen entwickelt.

grammen für die Extraktion der relevanten Information. Aus diesen Gründen gestaltet sich die qualitative und quantitative Auswertung der Daten als komplex und zeitaufwendig. Schnelle, automatisierte Verarbeitungsabläufe und Programme sind also gerade für LSFM essenziell.

Glücklicherweise schreitet die Entwicklung leistungsfähiger Systeme für die Datenverarbeitung stetig voran. Schnelle, mehrkernige Prozessoren, große Arbeits- und Festplattenspeicher, schnelle Flashspeicher und die Möglichkeit, auf massiv parallel arbeitenden Grafikkarten zu rechnen, gehören heute zum Standard vieler Arbeitsgruppen und ermöglichen es, viele Terabyte große Datensätze zu verarbeiten. Computer-Cluster sind zudem häufig arbeitsgruppenübergreifend vorhanden und deutlich leichter zu nutzen als noch vor einigen Jahren.

Für die Visualisierung existiert eine Gruppe von kommerziellen, hoch spezialisierten Programmen, die es erlauben, Terabyte große 3-D-Datensätze als Funktion der Zeit darzustellen. Damit ist es möglich, einen fundierten Einblick in die Daten zu bekommen, aber auch, sie Nichtexperten leichter zugänglich zu machen. Abbildung 4a zeigt beispielhaft gerenderte Bilder eines Sphäroids und eines *Tribolium castaneum*-Embryos.

Mittlerweile existiert eine Vielzahl frei zugänglicher Programme für die Bildverarbeitung. Hierzu zählen die frei verfügbaren Programme Fiji, Icy, Cell Profiler oder Ilastik. Sie bieten Basisfunktionen, aber auch spezialisierte Erweiterungen für einige der gängigsten Verarbeitungsschritte an. Sofern die Bildverarbeitung in eine Analysefolge eingebettet werden soll, bedarf es jedoch meist umfangreicherer Programme. Hier bieten kommerzielle Plattformen wie Mathematica oder Matlab neben zahlreichen Möglichkeiten für



die Bildverarbeitung auch Funktionen für die weiterführende statistische Auswertung und Analyse. Die Qualität der Aufnahmen mit LSFM ermöglicht eine umfangreiche quantitative Datenanalyse: Die automatische Erkennung von Objekten in Bildern (Segmentierung) kann auf zellulärer und subzellulärer Ebene durchgeführt werden. Anschließend können Merkmale von Zellen und Organellen extrahiert werden. Dank der hohen zeitlichen Auflösung können Zellen und Strukturen über längere Zeiträume verfolgt und zelluläre Stammbäume rekonstruiert werden. Abbildung 4b zeigt beispielhaft die Segmentierung aller Zellkerne eines Sphäroids.

Allerdings erfordern die vielen unterschiedlichen Anwendungen eine stetige Neu- und Weiterentwicklung von Algorithmen und Programmen für die Bildverarbeitung. Aus den Bedürfnissen der Verarbeitung der aufgenommenen Bilddaten entstehen völlig neue Arbeitsfelder, in denen sich Fachleute aus den Bereichen Informatik, Bioinformatik, Mathematik und Physik auf die Verarbeitung und Auswertung biologischer Bilddaten spezialisieren.

Die angeführten Aspekte zeigen das hohe Potenzial und die Wichtigkeit von LSFM im Bereich der Zell- und Entwicklungsbiologie. Allerdings ist LSFM noch ein sehr junges Feld, und wir haben grade erst begonnen, ihr Potenzial auszuschöpfen. Wir dürfen uns also sicherlich in den nächsten Jahren auf sehr spannende Entwicklungen freuen. ●

Pointillismus mit einzelnen Molekülen

Fluoreszenzmikroskopie jenseits der Beugungsgrenze

von Mike Heilemann

Der Auflösung mikroskopischer Verfahren ist durch die Beugungsgrenze eine natürliche Schranke gesetzt. Strukturen, die näher als die halbe Wellenlänge des verwendeten Lichts zusammenliegen, können nicht aufgelöst werden. Doch Forscher haben einen Weg gefunden, diese Grenze zu umgehen. Die entstehenden Bilder ähneln dem Pointillismus in der Malerei.

Proteine, die zentralen Bausteine der Zelle, haben Abmessungen von nur wenigen Nanometern. Ihre räumliche Anordnung, meist in definiert zusammengesetzten Proteinkomplexen, ist entscheidend mit deren Funktion verbunden. Mit klassischen lichtmikroskopischen Verfahren lassen sich solche Strukturen nur begrenzt beobachten, denn die Auflösung eines konventionellen Lichtmikroskops ist fundamental auf etwa die Hälfte der Beobachtungswellenlänge begrenzt, im sichtbaren Bereich des Spektrums also auf mehrere Hundert Nanometer.

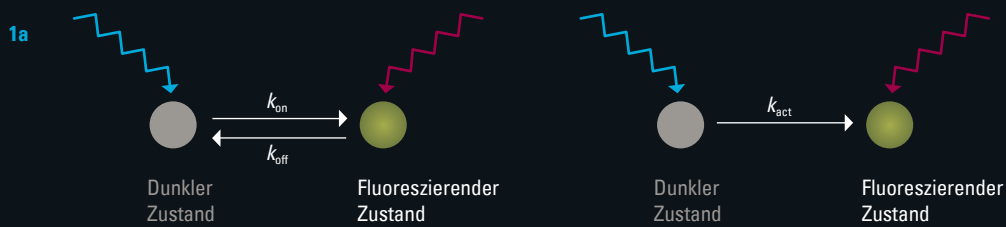
In den vergangenen zwei Jahrzehnten sind neue Verfahren der Lichtmikroskopie entwickelt worden, welche die Beugungsgrenze umgehen und eine Auflösung kleinster zellulärer Strukturen ermöglichen. Diese basieren auf der Detektion fluoreszierender Farbstoffe, die zunächst an Zielmoleküle – beispielsweise ein spezifisches Protein – gekoppelt werden. Ein sehr populäres Verfahren setzt dabei auf die Detektion einzelner Fluoreszenzfarbstoffe, um die Auflösungsgrenze zu umgehen –, diese ist nämlich nur

dann eine Einschränkung, wenn ein Bild »in einem Zug« aufgenommen wird. Wird jedoch das Fluoreszenzsignal jedes Moleküls einzeln und nacheinander ausgelesen, so kann die Position eines fluoreszenzmarkierten Proteins sehr genau bestimmt werden. Nachdem auf diese Weise die Position aller Proteine einzeln bestimmt wurde, kann aus der Gesamtheit dieser Koordinaten ein hochaufgelöstes Bild rekonstruiert werden.

Eine Revolution in der zellbiologischen Forschung

Die Fluoreszenzmikroskopie ist aus vielen Bereichen der alltäglichen Forschung nicht mehr wegzudenken. Insbesondere die zellbiologische Forschung wurde durch diese Methode in den vergangenen Jahrzehnten revolutioniert: Sie kann zelluläre Strukturen mit hohem Kontrast sichtbar machen, und zentrale biologische Prozesse lassen sich in lebenden Zellen verfolgen. Zusammen mit der Entwicklung immer sensitiverer Detektoren ist heute die Visualisierung einzelner

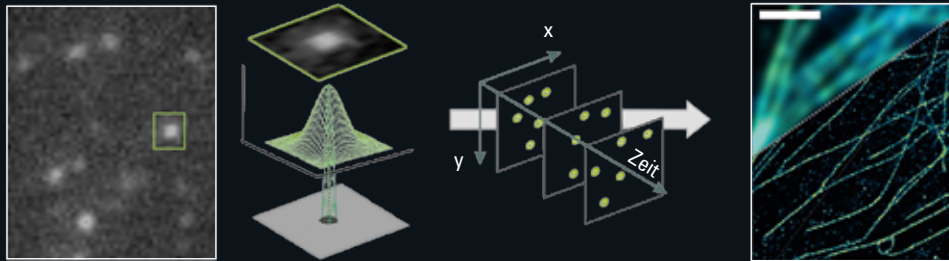




Prinzip der hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie durch Detektion einzelner Fluoreszenzfarbstoffe

1a Photoschaltbare Fluoreszenzfarbstoffe können durch Bestrahlung mit Licht definierter Wellenlänge ein- und ausgeschaltet werden.

1b



1b Auf diese Weise kann das Fluoreszenzsignal einer dicht markierten Probe zeitlich aufgetrennt werden und können mit geeigneten Detektoren die Signale einzelner Farbstoffe sichtbar gemacht werden. Mit diesem Verfahren können zelluläre Strukturen, wie beispielsweise Mikrotubulinfilamente, mit einer Auflösung von etwa 20 nm dargestellt werden.

Fluoreszenzfarbstoffe möglich: Hierdurch wurde das Forschungsgebiet der Einzelmolekülmikroskopie und -spektroskopie begründet.

Wie jedes Licht-basierte Mikroskopieverfahren unterliegt auch die Fluoreszenzmikroskopie der »Beugungsgrenze«, einer fundamentalen physikalischen Einschränkung, welche erstmals von Ernst Abbe 1873 formuliert wurde: Objekte, die einen Abstand von weniger als der halben Wellenlänge des emittierten Fluoreszenzlichtes haben (das heißt in etwa 200 bis 300 Nanometer), können optisch nicht mehr aufgelöst werden. Das hat zur Folge, dass gerade die wichtigen funktionellen Bausteine einer Zelle wie Protein-komplexe mit Lichtmikroskopie nicht mehr aufgelöst werden können und lange Zeit nur für die Elektronenmikroskopie zugänglich waren.

Neue Verfahren der Fluoreszenzmikroskopie können diese Auflösungsgrenze umgehen. Dabei lassen sich zwei grundlegende Ansätze unterscheiden: die stochastischen und die deterministischen Verfahren. Bei den stochastischen Verfahren werden Fluoreszenzfarbstoffe einzeln und nacheinander detektiert, deren Position genau bestimmt und aus allen Positionsdaten ein hochaufgelöstes Bild rekonstruiert. Beispiele sind die Methoden der

(»direct) stochastic optical reconstruction microscopy« ((d)STORM) und die (»fluorescence) photoactivated localization microscopy« ((F)PALM). Bei den deterministischen Verfahren werden geeignete Lichtmuster erzeugt, welche zu einer räumlichen Begrenzung der Fluoreszenzmikroskopie führen. In diese Gruppe gehören die »stimulated-emission depletion« (STED) und die (»saturated) structural illumination microscopy« ((S)SIM). Für die Entwicklung von mikroskopischen Verfahren zur hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie wurden W. E. Moerner (Stanford), Eric Betzig (Janelia Farm) und Stefan Hell (Göttingen) 2014 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.

Die Beugungsgrenze clever umgehen

Stochastische Verfahren zur hochauflösenden Fluoreszenzmikroskopie basieren auf der sequenziellen Detektion des Fluoreszenzlichts einzelner Farbstoffmoleküle. Anders als bei der auflösungsbegrenzten konventionellen Mikroskopie, bei der das Licht aller Fluoreszenzfarbstoffe zur gleichen Zeit ausgelesen wird, kann auf diese Weise die Auflösungsgrenze clever umgangen werden: das Fluoreszenzlicht eines einzelnen Farbstoffmoleküls hinterlässt nämlich ein genau definiertes geometrisches »Muster« auf einer hochempfindlichen CCD-Kamera. Es kann mathematisch sehr genau angenähert und somit die Position des Farbstoffmoleküls auf wenige Nanometer genau bestimmt werden. Werden nun alle Farbstoffmoleküle nacheinander auf diese Art und Weise detektiert und deren Position bestimmt, kann man aus der Gesamtheit der Positionen ein hochaufgelöstes Bild rekonstruieren (Abb. 1).

Damit dieses Verfahren grundsätzlich funktioniert, braucht man Fluoreszenzfarbstoffe mit besonderen Eigenschaften: Diese müssen auf eine



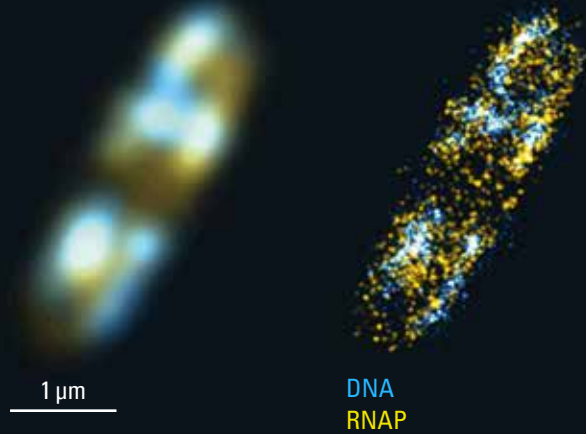
Der Autor

Prof. Dr. Mike Heilemann, Jahrgang 1976, studierte Chemie an den Universitäten Konstanz, Montpellier und Heidelberg. Das Forschungsgebiet seiner Arbeitsgruppe ist die Entwicklung von sensitiven Mikroskopieverfahren und deren Anwendung zur Untersuchung biomolekularer Strukturen und Prozesse.

heilemann@chemie.uni-frankfurt.de

www.smb.uni-frankfurt.de

In einem nächsten Schritt wird die räumliche Position der Fluoreszenzfarbstoffe mathematisch auf wenige Nanometer genau bestimmt. Durch die Aufnahme und Auswertung von großen Bilderserien (typischerweise 5.000 bis 20.000 Einzelbilder) wird die Position von sehr vielen Farbstoffen bestimmt und aus deren Koordinaten ein künstliches Bild rekonstruiert. Mit diesem Verfahren können zelluläre Strukturen mit einer Auflösung von circa 20 nm dargestellt werden. (Maßstabsbalken 1 µm)



2 Auflösungsbegrenzte (links) und hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie (rechts) des Proteins RNA Polymerase (RNAP; gelb) sowie der DNA (blau) in einem E.-coli-Bakterium. Während in der konventionellen Fluoreszenzmikroskopie nur Umrisse der zellulären Strukturen im Bakterium sichtbar werden, liefert die hochauflösende Mikroskopie einen viel genaueren Blick auf die räumliche Organisation des Proteins zur DNA.

geeignete Art, beispielsweise mit Licht, von einem »dunklen« in einen fluoreszierenden Zustand gebracht werden. Solche Farbstoffe nennt man photoaktivierbare oder photoschaltbare Fluoreszenzfarbstoffe. Ohne diese besonderen Fluoreszenzfarbstoffe würden die stochastischen Verfahren scheitern: In dicht gepackten Proteinkomplexen wären zu viele Fluoreszenzfarbstoffe konzentriert, so dass diese nicht einzeln detektiert werden könnten. Durch die Manipulation mit Licht gelingt es nun, jeden Farbstoff einzeln »anzuschalten« und nacheinander das Fluoreszenzsignal auszulesen. Dicht gepackte Proteinkomplexe, aber auch andere biologische Strukturen wie beispielsweise das Chromatin, können so sichtbar gemacht und untersucht werden (Abb. 2).

Ordnung in der zellulären Maschinerie von »E. coli«
Besonders interessant ist die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie, um den strukturellen Aufbau und die Zusammensetzung von kleinen

biologischen Systemen zu untersuchen, etwa von Proteinkomplexen in kleinen biologischen Organismen wie Bakterien. Hier haben lichtmikroskopische Verfahren in der Vergangenheit nur sehr begrenzt zur Beobachtung zellulärer Prozesse beitragen können. Unsere Arbeitsgruppe hat beispielsweise das gramnegative Darm-Bakterium *Escherichia coli* untersucht. Es hat eine Länge von etwa 3 bis 5 Mikrometer und einen Durchmesser von etwa 1 Mikrometer. In diesem kleinen Raum sind sämtliche zellulären Prozesse untergebracht, etwa die Regulation des Zellwachstums, die Zellteilung, aber auch die Reaktion auf die Umweltbedingungen. Anders als bei den viel größeren Säugerzellen sind in *E. coli* keine Kompartimente bekannt, jedoch ist auch in diesem Organismus von einer gewissen Ordnung auszugehen. Durch hochauflösende Mikroskopie konnten wir molekulare Maschinen in *E. coli* visualisieren und deren Organisation untersuchen. Hierzu zählen Proteinkomplexe, welche die Transkription orchestrieren, das heißt aus der genetischen Information der DNA die für die Proteinsynthese notwendige RNA herstellen. Die außerordentlich dichte Packung dieser Proteinkomplexe konnte visualisiert und quantifiziert werden, ebenso die räumliche Anordnung der Proteinkomplexe relativ zu einer weiteren wichtigen zellulären Struktur, dem bakteriellen Chromosom, das die DNA enthält (Abb. 2).


Seit ihrer Einführung vor etwa zehn Jahren hat die hochauflösende Fluoreszenzmikroskopie eine bemerkenswerte Verbreitung in Forschungslaboren erfahren. An der Goethe-Universität werden diese Verfahren eingesetzt, um die Organisation und Funktion von Proteinen in Zellmembranen zu verstehen, die Stöchiometrie von Membrankomplexen zu bestimmen und die Ultrastruktur in Bakterien zu untersuchen. ●

Literatur

- 1 Fürstenberg, A. and M. Heilemann, Single-molecule localization microscopy-near-molecular spatial resolution in light microscopy with photo-switchable fluorophores. *Phys Chem Chem Phys*, 2013, 15(36): p. 14919–30.
- 2 Endesfelder, U., et al., Multiscale spatial organization of RNA polymerase in *Escherichia coli*. *Biophys J*, 2013. 105(1): p. 172–81.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Fluoreszierende Moleküle, gezielt zum Leuchten angeregt und durch mathematische Rekonstruktion exakt geortet, machen Details unterhalb der Beugungsgrenze des Lichts sichtbar.
- Proteinstrukturen, Funktionsbereiche innerhalb von Zellen oder eindringende Erreger können mit Fluoreszenzmikroskopie untersucht werden. Diese Methode hat die zellbiologische Forschung in den vergangenen Jahren revolutioniert.



1 Auf seinem Weg durch ein Labyrinth von Spiegeln und optischen Elementen wird ein Lichtblitz geformt, der ideal an die Aufgabe angepasst ist.

Wenn Licht Moleküle in Stücke reißt

Mit dem Explosionsmikroskop die Händigkeit
von Molekülen bestimmen

*von Martin Pitzer,
Reinhard Dörner und
Markus Schöffler*

Ein Laserblitz von unvorstellbarer Intensität pulverisiert im Labor ein Molekül. Wachsam zeichnen die Instrumente die Flugbahn und Geschwindigkeit jedes Bruchstücks auf. Physiker gewinnen daraus hochpräzise Informationen über die Molekülstruktur. Auch links- und rechtshändige Formen lassen sich unterscheiden.

Welche Kräfte das Licht entwickeln kann, weiß jeder, der schon einmal beobachtet hat, wie ein Laserstrahl zentimeterdicke Metallplatten schneidet. Weiter steigern lässt sich die Spitzenleistung eines Lasers, wenn die Energie nicht mehr kontinuierlich, sondern in Pulsen abgegeben wird. In den letzten Jahrzehnten ist es gelungen, Laserpulse immer weiter zu verkürzen und damit die Spitzenintensität immer weiter zu erhöhen. Bei geeigneter Fokussierung kann selbst mit kommerziell erhältlichen Systemen für eine sehr kurze Zeit eine Intensität von 10^{16} Watt pro Quadratcentimeter erreicht werden. Dies entspricht der Sonneneinstrahlung, die auf ganz Europa fällt, fokussiert auf einen Stecknadelkopf.

Da sich Licht als elektromagnetische Welle beschreiben lässt, sind mit dieser Intensität unvorstellbar starke elektrische Felder verbunden, die enorme Kräfte auf geladene Teilchen wie beispielsweise Elektronen ausüben. Wenn ein Molekül in einen solchen Laserfokus gerät, sind die Kräfte auf die negativ geladenen Elektronen so groß, dass sie aus dem Molekül regelrecht herausgerissen werden. In der Folge explodiert das Molekül, bevor weitere Umordnungsprozesse stattfinden können.

Von der Explosion zur Strukturbestimmung

Warum führt man eine solche, in der Natur nicht vorkommende Situation herbei? Weil man nach der Molekül-explosion – Coulomb Explosion Imaging

genannt – aus den Fragmenten etwas über die Struktur des Moleküls lernen kann: Gelingt es, die Flugrichtung und -geschwindigkeit der einzelnen Fragmente zu messen, lassen sich Rückschlüsse auf die ursprüngliche Anordnung im Molekül ziehen. Die Explosion fungiert gewissermaßen als Mikroskop, das die unvorstellbar kleine molekulare Welt in unseren Makrokosmos projiziert und somit messbar macht.

Die »Reaktionsmikroskope«, mit denen diese Messungen für Molekülfragmente möglich sind, wurden am Institut für Kernphysik der Goethe-Universität entwickelt und sind unter dem Namen COLTRIMS (Cold Target Recoil Ion Momentum Spectroscopy) mittlerweile in Laboren weltweit im Einsatz [1]. Im Gegensatz zu bekannteren Abbildungsmethoden mit atomarer Auflösung wie Rastertunnel- oder Rasterelektronenmikroskopen lassen sich hier individuelle Moleküle untersuchen, die in einem Molekülstrahl auftreten und nicht auf eine Träger-substanz aufgebracht werden müssen. Nachdem viele Jahre nur sehr einfache Moleküle wie Stickstoff (N_2) oder Wasser (H_2O) untersucht werden konnten, ist die Technik mittlerweile auch auf komplexere Moleküle ausgedehnt worden.

Rechts- und linkshändige Moleküle unterscheiden

Eine interessante Anwendung, die kürzlich von unserer Arbeitsgruppe demonstriert wurde,

besteht darin, chirale Moleküle zu unterscheiden und ihre mikroskopische Konfiguration zu bestimmen. In der Chemie wird ein Molekül als chiral bezeichnet, wenn es in zwei Formen vorkommt, deren geometrische Strukturen sich wie Bild und Spiegelbild verhalten. Der Prototyp für diese Art von Symmetrie sind unsere Hände – daher der Begriff »chiral«, der aus dem griechischen Wort für Hand abgeleitet ist.

Wenn zwei chirale Moleküle miteinander wechselwirken, spielt ihre jeweilige Händigkeit eine entscheidende Rolle – was sofort einleuchtet, wenn man sich als Analogie den Handschlag zweier Menschen zur Begrüßung vorstellt: Seinem Gesprächspartner spontan die linke Hand zu reichen, wird aller Voraussicht nach eine andere Reaktion hervorrufen, als die gewohnte rechte anzubieten.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Sieben der zehn häufigsten Medikamente enthalten chirale Wirkstoffe – Moleküle, die in rechts- und linkshändiger Form auftreten können. Ihre Wirkung im Körper hängt entscheidend von der Händigkeit ab.
- Mit der Methode des Coulomb Explosion Imaging lässt sich die Händigkeit einzelner Moleküle bestimmen. Diese Methode ist hochpräzise, wurde aber bisher nur für einfache Strukturen erprobt.



2 Martin Pitzer öffnet den Deckel zur Höhle des »Fliegenden Drachen«. So heißt der Laser, der die Lichtblitze erzeugt.

Die Mehrzahl der biologisch relevanten Moleküle ist händig, beispielsweise viele Zucker und fast alle natürlich vorkommenden Aminosäuren. Auch unser Körper ist aus vielen chiralen Bausteinen aufgebaut. Somit reagieren Bild und Spiegelbild eines Moleküls unterschiedlich mit unserem Organismus – dies macht sich bei Geruchsstoffen, aber auch bei vielen Medikamenten bemerkbar. Sieben der zehn häufigsten Medikamente enthalten chirale Wirkstoffe; im Sinne der Arzneimittelsicherheit ist es deshalb wünschenswert, diese Wirkstoffe ausschließlich in der richtigen Händigkeit zu verabreichen. Die Unterscheidung der rechts- und linkshändigen Variante eines Moleküls ist daher von großem Interesse in der Pharmazie und in der Biochemie.

Methoden, um die beiden Händigkeiten durch Wechselwirkung mit polarisierter Strahlung oder durch eine Abfolge chemischer Reaktionen zu unterscheiden, gibt es zuhauf. Allerdings messen diese Techniken nur makroskopische Effekte, die von einer Vielzahl von Molekülen herrühren; die Bestimmung der mikroskopischen Anordnung der Atome im Molekül selbst (Absolutkonfiguration) ist meist nur indirekt möglich – entweder mithilfe aufwendiger Rechnungen oder durch chemische Reaktionen mit Stoffen bekannter Händigkeit. Zudem kann die Reinheit der Probe nur aus der Stärke des gemessenen Effekts bestimmt werden, für den wiederum eine Kalibrierung bei bekannter Konzentration notwendig ist.

Einzelne chirale Moleküle im Fokus

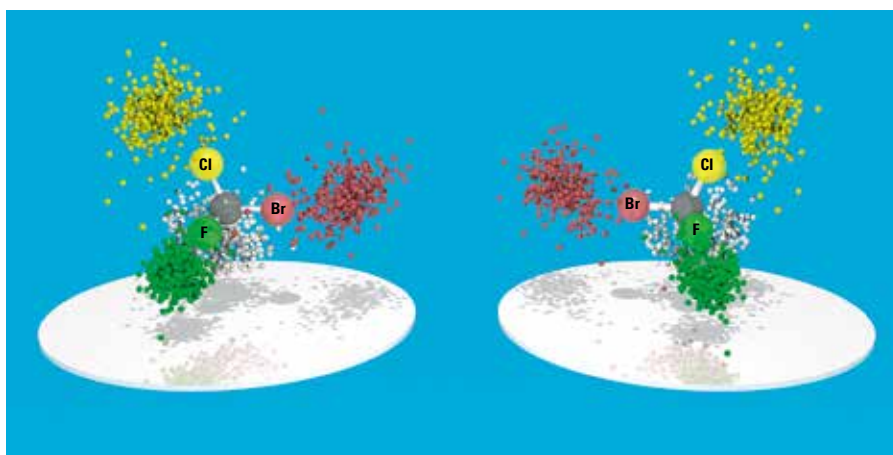
Für diese Probleme bietet das »Explosionsmikroskop« eine elegante Lösung. Wir konnten mit unserer Arbeit [2] zeigen, dass das einfachste chirale Molekül CHBrClF (Abb. 3) mithilfe der oben beschriebenen Laserpulse in seine fünf atomaren Bestandteile zerlegt werden kann. Diese fliegen in einer Explosion auseinander; die Impulse können mithilfe des COLTRIMS-Reaktionsmikroskops gemessen werden.

Da die Atome näherungsweise in Richtung der Bindungsachsen auseinanderfliegen, lässt sich aus diesen Impulsen für jedes Molekül eindeutig bestimmen, ob es sich um die rechts- oder linkshändige Variante handelt. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, die Konfiguration exakt zu bestimmen. Auch zur Analyse

der Reinheit ist diese Methode geeignet: Da die Händigkeit für einzelne Moleküle gemessen wird, muss nur die Anzahl der rechts- und linkshändigen Moleküle verglichen werden, um eine zuverlässige Aussage über den jeweiligen Anteil zu erhalten.

Entscheidend im Hinblick auf eine zukünftige Anwendung als Analyse-methode ist die Frage, inwieweit sich die Explosion und die Messung der Fragmente auf komplexere Moleküle ausdehnen lassen. Hierzu haben wir bereits erste Experimente an größeren Molekülen durchgeführt, die eine Bestimmung der Absolutkonfiguration aussichtsreich erscheinen lassen.

Die mit diesen Arbeiten gewonnenen Erkenntnisse sind nicht nur für zukünftige Anwendungen, sondern auch für die Grundlagenforschung von Relevanz: Die Analyse der Fragmentationsprozesse ermöglicht ein besseres Verständnis der Unterschiede zwischen rechts- und linkshändigen Molekülen auf quantenphysikalischer Ebene. Die Untersuchung



3 Strukturmodell (große Kugeln) und Messdaten (kleine Kugeln) des chiralen Moleküls CHBrClF. Man erkennt, dass die Messdaten die Händigkeit sehr gut widerspiegeln und eine eindeutige Trennung der beiden Strukturen ermöglichen.

einzelner chiraler Moleküle könnte somit zu einem Werkzeug werden, um fundamentale Symmetrieeigenschaften der physikalischen Gesetze zu untersuchen, die die Welt der Moleküle und damit viele lebenswichtige Prozesse beschreiben. ●

Literatur

- 1 R. Dörner et al., Forschung Frankfurt, Ausgabe 3/1997, S. 63.
- 2 M. Pitzer et al., Science, Ausgabe 341, S. 1096 (2013).



Die Autoren

Dr. Markus Schöffler, Jahrgang 1978, studierte Physik an der Goethe-Universität. Mit einem Feodor-Lynen-Stipendium der Humboldt-Stiftung ging er zuerst an die Advanced Light Source in Berkeley und für ein weiteres Postdoktorat an die Technische Universität Wien. Ende 2011 kehrte er zurück nach Frankfurt und widmet sich seither vor allem der Erforschung chiraler Systeme mithilfe von Reaktionsmikroskopen. Seine Arbeiten wurden 2014 mit dem Adolf-Messer-Stiftungspreis ausgezeichnet.

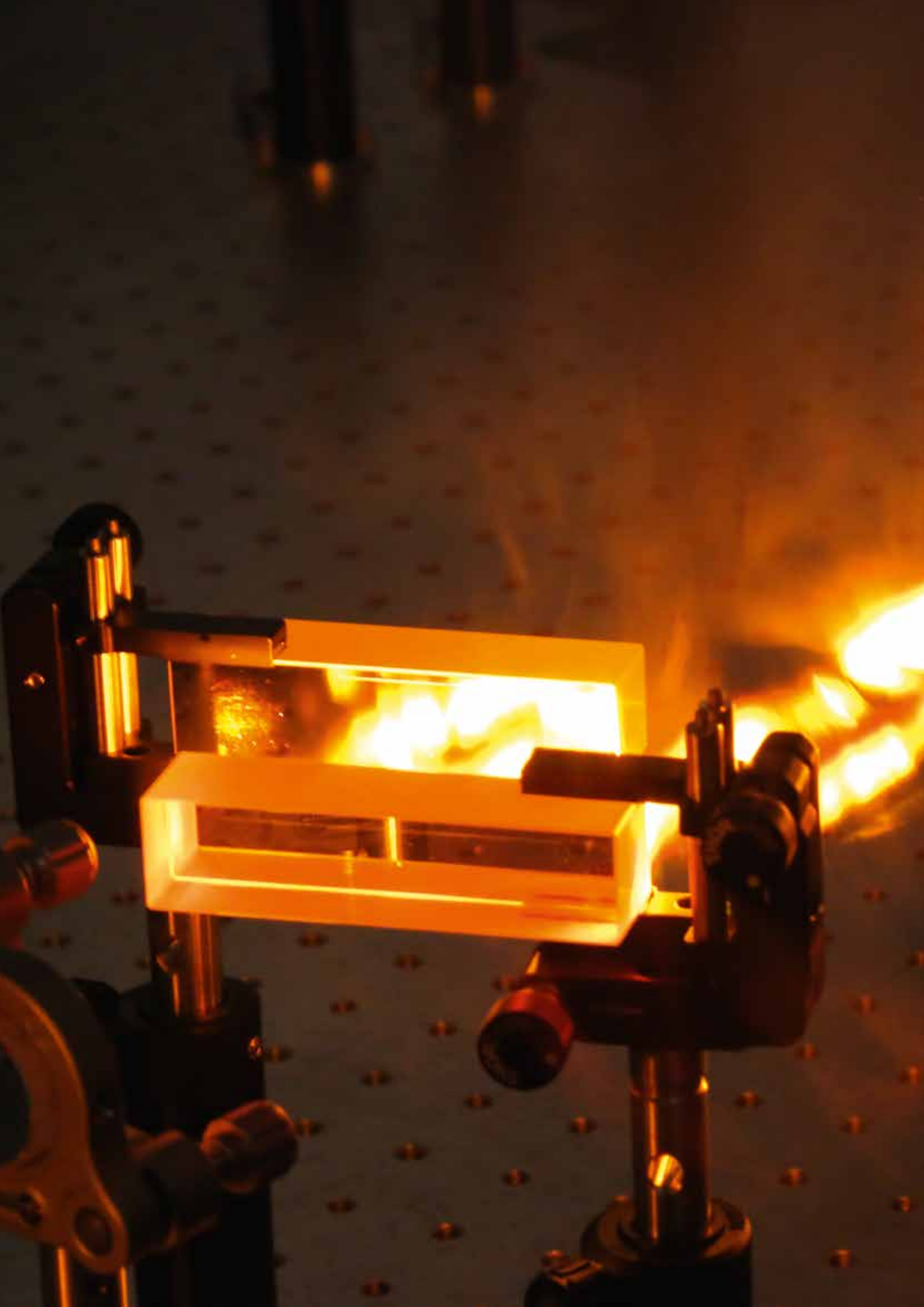
schoeffler@atom.uni-frankfurt.de

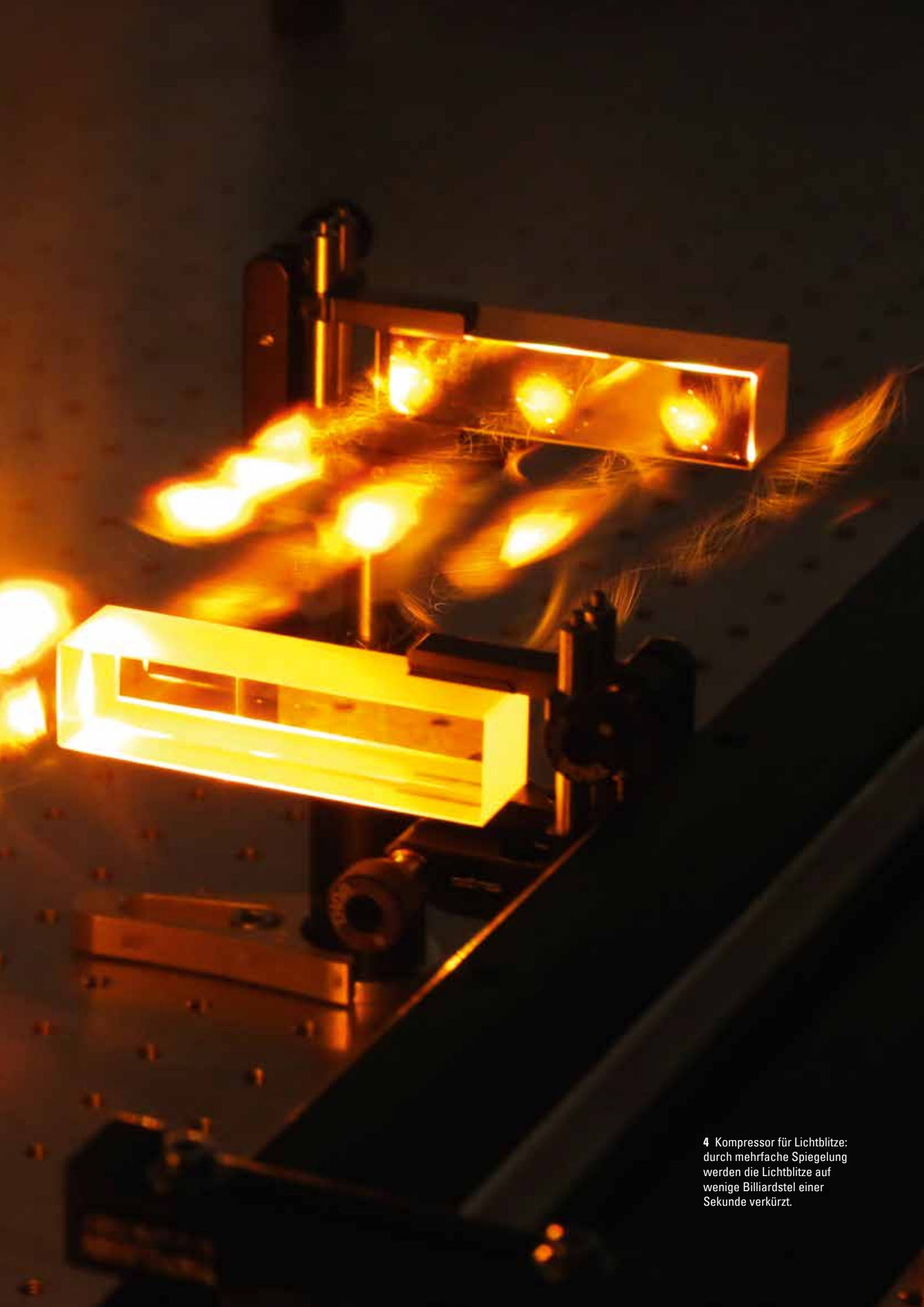
Prof. Dr. Reinhard Dörner, Jahrgang 1961, studierte Physik an der Goethe-Universität, wo er sich nach der Promotion (1991) habilitierte (1998). Forschungsaufenthalte führten ihn an das Lawrence Berkeley National Laboratory in den USA. 2002 wurde er auf eine Professur für Experimentalphysik an der Goethe-Universität berufen. Seine Arbeit wurde als eines der renommierten Kosselck-Projekte der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert. 2015 erhielt er den Robert-Wichard-Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft für interdisziplinäre Beiträge zur Physik. Sein Interesse gilt auch der Verbindung von Physik und Philosophie.

doerner@atom.uni-frankfurt.de

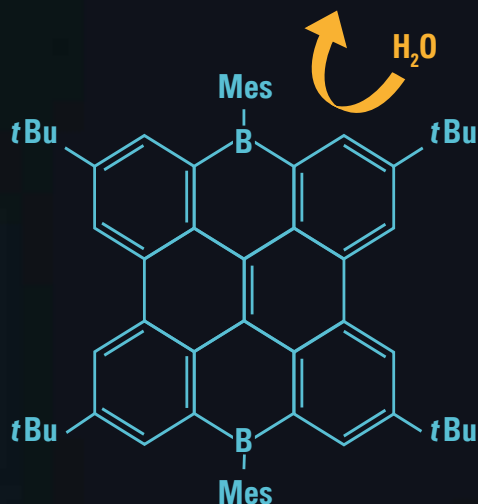
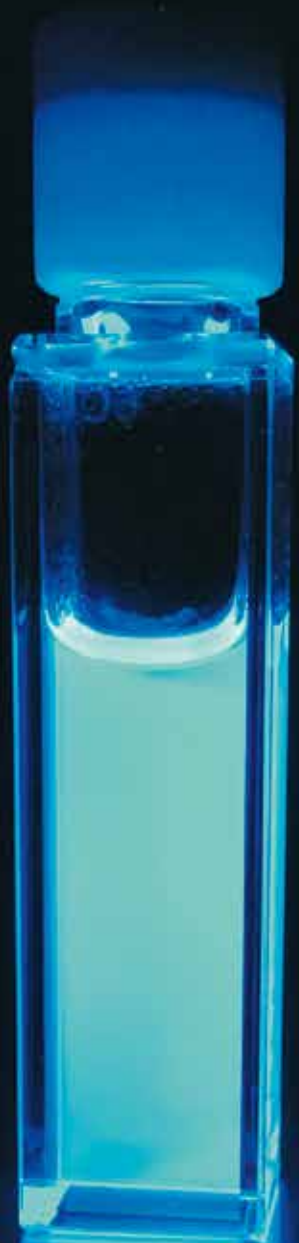
Dr. Martin Pitzer, Jahrgang 1984, studierte Physik am Karlsruher Institut für Technologie und an der Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne. Seine Dissertation zum Thema »Koinzidenzmessungen an chiralen Molekülen« fertigte er an der Goethe-Universität in der Gruppe von Reinhard Dörner an. In Zukunft wird er seine Forschung im Rahmen einer eigenständigen Nachwuchsstelle an der Universität Kassel weiterführen.

pitzer@atom.uni-frankfurt.de





4 Kompressor für Lichtblitze: durch mehrfache Spiegelung werden die Lichtblitze auf wenige Billiardstel einer Sekunde verkürzt.



Organische Leuchtdioden: Die Tapete als Heimkino?

Borhaltige Nanographene leuchten in allen Farben

von Matthias Wagner und Valentin Hertz

1 Borhaltige Nanographene (Mitte) könnten die organischen Leuchtstoffe der Zukunft sein. Sie decken das gesamte Farbspektrum ab, insbesondere leuchten sie in der für Displays wichtigen Farbe Blau.

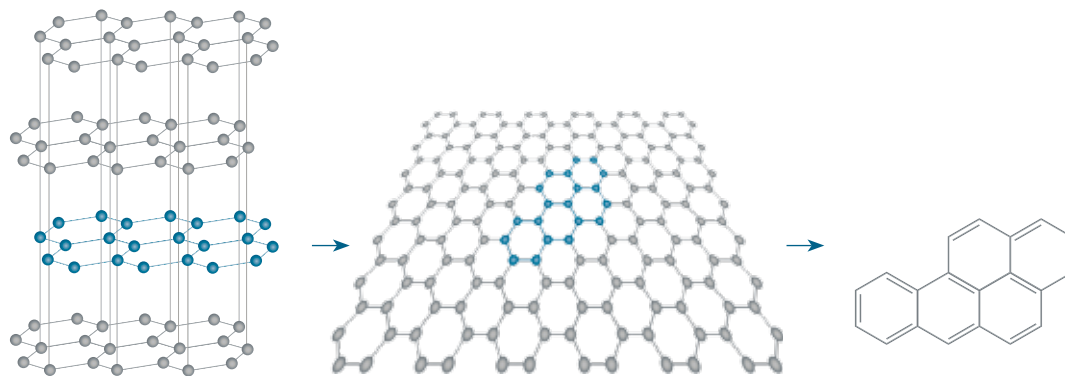
Die Glühbirne hat ausgedient. Auch Energiesparlampen sind nur eine Übergangslösung. Große Hoffnungen richten sich auf organische Leuchtdioden, zumal man daraus auch großflächige und biegsame Displays und Flachbildschirme herstellen kann. Für eines der größten Probleme, das Ausbleichen der blauen Leuchtstoffe, findet man immer bessere Lösungen. Anwendungen, die heute noch wie Science-Fiction klingen, rücken damit in erreichbare Nähe.

Beleuchtungs- und Displaytechnologien befinden sich gegenwärtig in raschem Wandel. Da Glühlampen nur rund 5 Prozent des verbrauchten Stroms in Licht transformieren, hat die Europäische Union 2009 beschlossen, sie schrittweise vom Markt zu nehmen. Als Ersatz dienen gegenwärtig Kompakt-

Als LED-Halbleiter können anorganische oder organische Materialien dienen. Anorganische LEDs enthalten einen Kristall, der unter anderem aus Kombinationen der Elemente Gallium, Indium, Stickstoff und Phosphor besteht, aber auch Seltene Erden spielen eine Rolle. Die Lebensdauer der Bauteile ist

quellen und Displays herzustellen, die darüber hinaus ein beispiellos geringes Gewicht besitzen.

Zudem strahlt in einem OLED-Bildschirm jedes Pixel unmittelbar in der momentan gewünschten Farbe. Im Gegensatz dazu benötigen gängige LCD-Flachbildschirme eine kontinuier-



2 Graphit, eine Modifikation des Kohlenstoffs, besteht aus Schichten bienenwabeförmig angeordneter Kohlenstoffatome (links). Als Graphen bezeichnet man eine einzelne dieser Schichten, die eine makroskopische Ausdehnung besitzt (Mitte). Ausschnitte aus Graphenschichten (rechts) existieren in vielfältigen Formen und werden »Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe« genannt.

leuchtstofflampen (»Energiesparlampen«), die etwa 25 Prozent der eingespeisten Energie zur Lichterzeugung nutzen. Allerdings hat diese Effizienzsteigerung ihren Preis: Energiesparlampen entfalten nach dem Einschalten nicht sofort ihre volle Leuchtkraft, sie sind meist nicht dimmbar und enthalten Quecksilber. Das giftige Schwermetall bereitet nicht nur hinsichtlich der Entsorgung, sondern auch bei einem Bruch des Glaskörpers Probleme. Daher gelten Energiesparlampen lediglich als Übergangslösung, während sich elektrische Leuchtdioden (LEDs) voraussichtlich in vielen Markt Bereichen nachhaltig durchsetzen werden.

LEDs bestehen aus einem Halbleitermaterial, das leuchtet, wenn man eine elektrische Spannung anlegt. Die Ausbeute an Licht ist noch höher als bei Kompaktleuchtstofflampen, und die Farbe des Lichts kann durch Variation der Halbleiter-Bandlücke von blau über grün nach rot eingestellt werden. Somit sind die Voraussetzungen geschaffen, um sowohl LED-basierte Weißlichtquellen als auch Farbdisplays herzustellen. Noch vor wenigen Jahren galten die vergleichsweise hohen Produktionskosten als schwerwiegendes Hindernis für eine breite Anwendung. Seitdem hat sich die Technologie jedoch derart stürmisch entwickelt, dass LED-Lichtmasten bereits zur Straßenbeleuchtung eingesetzt werden.

generell hoch. Nachteilig ist jedoch, dass anorganische LEDs in der Regel nur als kleinflächige Lichtquellen einsetzbar sind – zu sehen beispielsweise an modernen Automobilen, deren ausgedehnte Tagfahrlichter sich aus reihenförmig angeordneten Leuchtpunkten zusammensetzen. Diese erhebliche Einschränkung entfällt, wenn man von anorganischen zu organischen LEDs (OLEDs) übergeht, die sich als Flächenlichtquellen gestalten lassen.

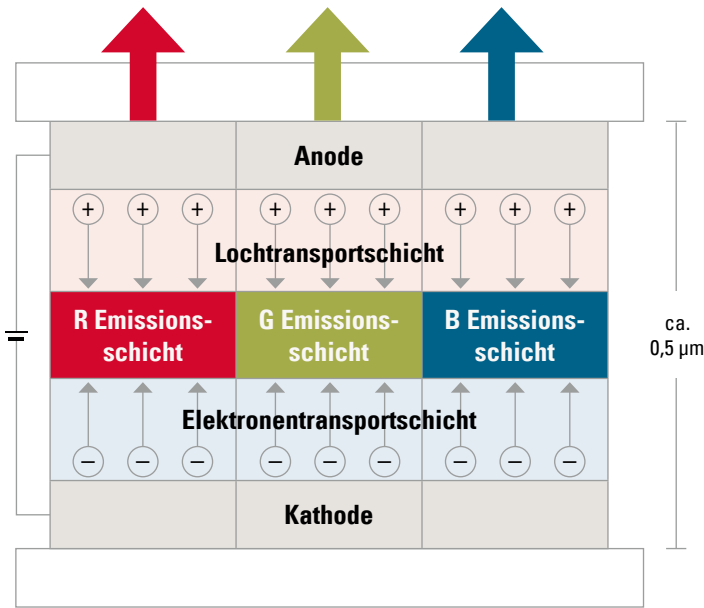
OLED-Folien aus dem Tintenstrahldrucker

Im Unterschied zu anorganischen LEDs wird das Licht nicht mehr in einem einzelnen Halbleiterkristall erzeugt, sondern in einer hauchdünnen Schicht aus organischen Molekülen oder Polymeren. Grundsätzlich kann dieser Film eine beliebige Ausdehnung haben und in vielfältigen Strukturen und Mustern gefertigt werden. Die Methoden zur Herstellung homogener Filme haben sich in den letzten Jahren kontinuierlich verbessert und vereinfacht. Heute ist es sogar möglich, mithilfe eines speziellen Tintenstrahldruckers OLEDs für Fernsehgeräte mit bis zu 100 Zentimetern Bildschirmdiagonale zu produzieren. Als Trägermaterial eignen sich nicht nur starres (leitfähig beschichtetes) Glas, sondern auch elektrisch leitfähige Kunststofffolien. Somit wird es erstmals möglich, hochgradig biegsame Licht-

liche Hintergrundbeleuchtung, aus deren weißem Licht durch davor angeordnete Flüssigkristallzellen und Farbfilter der Eindruck eines selbstleuchtenden Bildes erzeugt wird. Konstruktionsbedingt ist die Energieeffizienz eines LCD-Flachbildschirms ähnlich gering wie die einer Glühlampe. OLED-Displays verbrauchen demgegenüber nicht nur weniger Strom, sondern ermöglichen auch ein tieferes Schwarz, höhere

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Anorganische LEDs sind energieeffiziente Weißlichtquellen. Sie sind farbrein, langzeitbeständig und können mittlerweile auch kostengünstig hergestellt werden. Allerdings sind sie nur als Punktlichtquellen verwendbar.
- Organische LEDs (OLEDs) eignen sich für großflächige Displays und Flachbildschirme. Allerdings blich der blaue Leuchtstoff bisher schneller aus als der grüne und rote.
- Mit Bor dotierte Nanographene zeichnen sich durch eine hohe Leuchtkraft aus. Durch Variation der Molekülstrukturen lässt sich das gesamte Farbspektrum erzeugen. Sperrige Seitenketten machen die Verbindungen gegenüber Luft und Wasser beständig.



OLEDs sind aus mehreren dünnen Halbleiterschichten aufgebaut, die zwischen zwei Elektroden eingebettet sind. Die Anode ist immer aus durchsichtigem Material gefertigt; ist auch die Kathode durchsichtig, erhält man ein transparentes Display. Beim Anlegen einer Spannung (3 bis 4 Volt) werden von der Kathode Elektronen und von der Anode Elektronenlöcher in die Struktur injiziert. Unter dem Einfluss des elektrischen Feldes wandern die beiden unterschiedlichen Ladungsträger aufeinander zu. In der mittleren Schicht, welche die Emittermoleküle enthält, rekombinieren Elektronen und Löcher. Die dabei frei werdende Energie wird in Form von Licht abgestrahlt.

Farbkontraste und stellen das Bild selbst aus ungünstigen Blickwinkeln scharf dar.

Schon heute werden OLED-Displays in Smartphones, Digitalkameras und einigen Fernsehern des Luxussegments eingesetzt. Um OLEDs auch in anderen Anwendungsgebieten, insbesondere der Raumbelichtung, zum Durchbruch zu

den einzelnen Moleküle in der Lage sein, zahllose Male reversibel Elektronen aufzunehmen und wieder abzugeben. Außerdem sollten sie über die Betriebszeit nicht ausbleichen, woraus sich eine große Herausforderung für die künftige OLED-Entwicklung ergibt: Alle Farben, die ein Bildschirm hervorbringen kann, werden durch Mischung der

Borhaltige Nanographene: die blauen Leuchtstoffe von morgen?

Eine neue Generation blauer Emitter zählt zu den chemisch sehr beständigen »Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen« (PAKs). PAKs leiten sich von Graphit ab, der den elektrischen Strom ähnlich einem Metall zu leiten vermag. Auch seine zweidimensionale Form, die Graphenschicht, besitzt äußerst attraktive optische und elektronische Eigenschaften. In Graphen sind zahllose Benzolringe zu einer bienenwabenförmigen Struktur zusammengefügt. Bei PAKs, auch Nanographene genannt, handelt es sich um Ausschnitte aus dieser Struktur (Abb. 2). Um die optischen und elektronischen Eigenschaften eines PAKs maßzuschneidern, hat man sich zunächst darauf konzentriert, seine Ränder chemisch zu manipulieren. In den letzten Jahren versteht man es jedoch zunehmend, auch die innere Struktur zu verändern, indem man Fremdatome in das Kohlenstoffgerüst einbettet. Hier kommt, neben Stickstoff und Schwefel, dem Bor eine herausragende Bedeutung zu.

Im Periodensystem der Elemente steht Bor eine Position links von Kohlenstoff, weshalb es ein Elektron weniger in seiner Valenzschale besitzt (Abb. 3). Borhaltige PAKs nehmen dementsprechend leicht und reversibel Elektronen auf, um dieses Defizit auszugleichen. Diese Eigenschaft ist essen-

I																	VIII
1 H																	2 He
3 Li	4 Be	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne									17 Cl	18 Ar
11 Na	12 Mg	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar									35 Br	36 Kr
19 K	20 Ca	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr										

3 Kohlenstoff (C) und Silizium (Si) sind Grundstoffe der Halbleitertechnik und werden in die 4. Hauptgruppe des Periodensystems eingeordnet. Die Elemente links und rechts der 4. Hauptgruppe, wie das Bor (B), lassen sich nutzen, um die elektronischen Eigenschaften von Halbleitermaterialien zu modifizieren.

verhelfen, müssen ihre Konstruktion weiter vereinfacht, ihre Effizienz nochmals gesteigert und der Preis gesenkt werden. Ein Schlüsselfaktor besteht in der gezielten Optimierung der Leuchtstoffmoleküle. Zu den Anforderungen, die geeignete Substanzen erfüllen müssen, gehören neben hoher Farbreinheit auch die Langzeitbeständigkeit unter Betriebsbedingungen. Da in einer OLED durch Anlegen elektrischer Spannung ein Stromfluss induziert wird, müssen

drei Grundfarben blau, grün und rot erzeugt. Die bislang verwendeten blau leuchtenden organischen Verbindungen bauen sich mit der Zeit deutlich schneller ab als die Moleküle, die grünes oder rotes Licht erzeugen, wodurch die Farbabstimmung des Displays außer Balance gerät. Um die Leuchtstoffmoleküle auf die jeweiligen Anforderungen perfekt abzustimmen, ist das umfangreiche Instrumentarium der organischen Synthesechemie gefragt.



4a



4b

4 OLEDs eröffnen viele Möglichkeiten, die mit herkömmlichen Displays nicht realisierbar sind: Sie lassen sich transparent (a) oder biegsam (b) gestalten, können ganze Wände abdecken (c) und besitzen gleichzeitig ein geringes Gewicht.

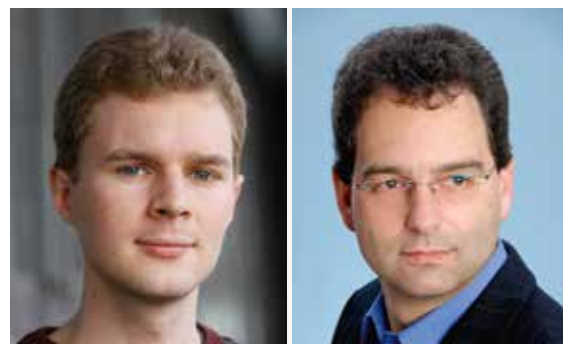


4c

ziell, um den erforderlichen Elektronentransport innerhalb der Emitterschicht zu gewährleisten. Die Integration von Boratomen in das Kohlenstoffgerüst wirkt sich auch auf die optischen Eigenschaften der Nanographene positiv aus, da auf diese Weise deren Leuchtkraft wesentlich gesteigert und die Lichtwellenlänge in den gewünschten Farbbereich verschoben werden kann. Abbildung 1 zeigt eine Beispielverbindung, die zu den besonders gefragten blauen Emittern gehört. Durch Variation der Molekülstruktur lässt sich auch das voll-

ständige Farbspektrum abdecken. Zu Beginn konnte man das volle Potenzial borhaltiger PAKs nur eingeschränkt nutzen, da die meisten Vertreter empfindlich gegenüber Luft und Feuchtigkeit sind. Dieses Problem tritt bei dem in Abbildung 1 dargestellten Farbstoff nicht auf, da die Boratome durch sperrige Seitengruppen wie in einem Käfig vor dem Angriff von Sauerstoff oder Wasser geschützt sind. Somit erfüllen bor-dotierte Nanographene die entscheidenden Kriterien für ein vielversprechendes OLED-Material.

Welches Entwicklungspotenzial besteht für die Zukunft? Transparente OLEDs wären in Windschutzscheiben von Autos integrierbar, wo sie vor Staus oder Gefahren warnen und den Weg weisen könnten. Für künftige Generationen von Smartphones und Tabletcomputern wird an flexiblen Foliendisplays geforscht, die sich platzsparend einrollen lassen, wenn die Geräte nicht im Gebrauch sind (Abb. 4). Denkbar sind auch leuchtende Tapeten, deren Farbtonung an die Stimmung des Bewohners angepasst werden kann und die auch als Heimkino nutzbar sind. OLEDs können in naher Zukunft neue Möglichkeiten eröffnen, die heute noch nach Science-Fiction klingen. Die chemische Forschung wird dazu ihren Beitrag leisten. ●



Die Autoren

Valentin Hertz, Jahrgang 1989, studierte Chemie an der Goethe-Universität Frankfurt. Zurzeit fertigt er seine Dissertation zum Thema »Synthese und Eigenschaften π -konjugierter Arylborane« an. Sowohl in diesem Zusammenhang als auch darüber hinaus interessiert er sich für neue Entwicklungen in Wissenschaft und Technik.

valentin.hertz@chemie.uni-frankfurt.de

Prof. Dr. Matthias Wagner, Jahrgang 1965, studierte Chemie an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Nach einem Postdoktorat an der Oxford University habilitierte er sich an der Technischen Universität München. Seit 2000 ist er Professor für metallorganische Chemie an der Goethe-Universität. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die Entwicklung optoelektronischer Materialien und die Homogene Katalyse. Beiden Themengebieten gemeinsam ist die Suche nach neuen energie- und ressourcenschonenden Technologien.

matthias.wagner@chemie.uni-frankfurt.de

www.uni-frankfurt.de/58708118



LICHT
IN
DER
ZELLE

Steuerung mit Licht aus dem Chemiebaukasten

Maßgeschneiderte Moleküle erhellen Funktionen von Proteinen

von Anja Störko

Um das komplizierte Geschehen in der Zelle entschlüsseln zu können, blockieren Forscher oft bestimmte Proteine oder Gene. Eine moderne und elegante Methode besteht darin, Lichtaktivierbare Moleküle als »Schalter« zu verwenden. Die Gruppe von Alexander Heckel entwickelt maßgeschneiderte Moleküle für Biologen, Biochemiker oder Mediziner.

Licht ist in der Arbeitsgruppe Heckel in aller Munde: Laserstrahlen, Wellenlängen, Infrarotlicht, photolabile Gruppen – mit diesen Begriffen jonglieren die AG-Mitarbeiter ebenso gekonnt wie mit klassischem chemischem Arbeitsgerät wie Kolben und Spatel, aber auch modernen Apparaturen. »Als Chemiker alleine kommt man nicht so weit«, betont Arbeitsgruppenleiter Prof. Alexander Heckel. Ihm sind daher die vielen Kooperationen wichtig, vor allem mit Kollegen, die die chemischen Forschungsprodukte seiner Mitarbeiter anschließend in die Anwendung bringen.

»Wir konstruieren Moleküle, um biologische Vorgänge mit Licht an- oder auszuschalten«, beschreibt Heckel sein Forschungsgebiet. Seine Arbeitsgruppe synthetisiert und optimiert Substanzen, die lichtempfindlich sind und gleichzeitig in biologische Vorgänge eingreifen. Ein Beispiel sind Moleküle, die direkt die Basenpaarung von DNA und RNA beeinflussen. In der Leiterstruktur der DNA manipulieren die Wissenschaftler beispielsweise gezielt eine Sprosse, so dass die DNA unbrauchbar wird. Das dort eingebaute Molekül ist aber lichtempfindlich-photolabil, wie die Fachleute sagen. Mit Licht einer bestimmten Wellenlänge löst sich die Bindung zwischen Molekül und Erbsubstanz: Die Leitersprosse ist wieder frei und die DNA funktionsfähig. Licht kann also die biologische Funktion

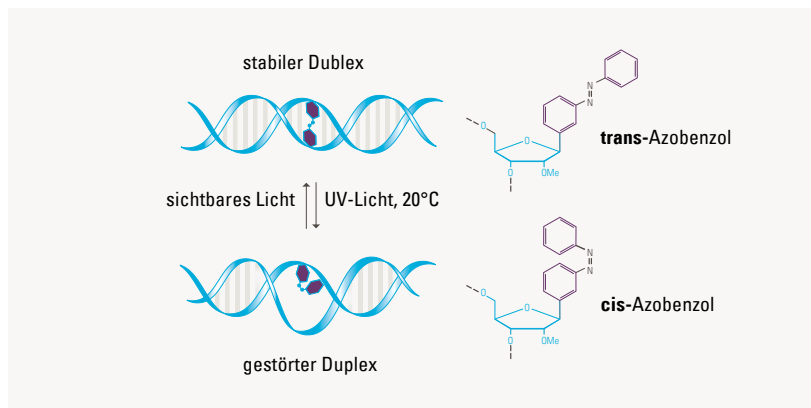
zu einem gewünschten Zeitpunkt wiederherstellen. Damit lässt sich detailgenau untersuchen, welche Rolle ein bestimmter Genbereich für die Funktion eines Organismus besitzt.

Die Arbeitsgruppe Heckel hat mittlerweile eine Vielzahl solcher lichtempfindlichen Substanzen entwickelt. Da die Moleküle auf unterschiedliche Wellenlängen reagieren, können sie auch nacheinander oder parallel verschiedene Funktionen an- und abschalten. Moleküle, die durch Licht abgespalten werden, haben den Vorteil, dass sie die biologische Funktion anschließend nicht stören. Allerdings hat diese Methode auch einen Nachteil: Das System lässt sich nur einmal schalten; der Prozess ist nicht reversibel.

Daher gibt es auch Substanzen, die mehrfach an- und abschaltbar sind. Sie lassen sich beispielsweise in DNA so einbauen, dass sie deren Funktion blockieren. Licht löst die Blockade, aber das Molekül bleibt vor Ort und kann reversibel an- und ausgeschaltet werden. Diese echten Schalter sind einerseits raffinierter,

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Lichtaktivierbare Moleküle werden als Schalter so designt, dass sie die Funktion bestimmter Proteine oder Gene blockieren. Belichtung der Moleküle hebt die Blockade auf.
- Es gibt zwei Gruppen von Schaltern: Die einen lassen sich nur ein einziges Mal schalten, die anderen mehrmals. Allerdings können Letztere den untersuchten biologischen Prozess beeinträchtigen.
- Mit Schaltern für miRNAs ist es gelungen, das Wachstum von Blutgefäßen zu fördern. Damit könnte sich die Wundheilung beschleunigen lassen.



1 Azobenzol-C-Nucleoside haben flache Molekülteile (lila), die in den Stapel der »Leitersprossen« einer DNA oder RNA passen. Durch UV-Licht kann dieser flache Molekülteil in sich gedreht werden und stört dann die Ausbildung der DNA- oder RNA-Struktur. Diese Störung kann durch Bestrahlung mit sichtbarem Licht wieder behoben werden. Durch den Einfluss auf die Struktur von DNA oder RNA mit Licht kann deren Aktivität gesteuert werden.

bergen aber andererseits das Risiko, dass der Schaltmechanismus im »Aus-Zustand« doch den biologischen Prozess beeinträchtigt.

Guter Ruf in der biologischen Lichtregulation

Erfolgreich angewendet haben Heckel und seine Mitarbeiter das Prinzip des »Lichtschalters« beispielsweise bei der RNA-Interferenz: Kurze Ribonukleinsäure(RNA)-Stücke können Gen-Funktionen stilllegen, indem sie an die Boten-RNA (mRNA) binden und diese dadurch inaktivieren. Die Entdeckung dieses natürlichen Mechanismus wurde 2006 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Heckels Arbeitsgruppe baut auf diese Ergebnisse auf und koppelte Licht-steuerbare Schutzgruppen an diese kurzen RNAs, sodass sie mit Licht gezielt angeschaltet werden können: Bei Belichtung zerfällt die Schutzgruppe, die interferierende RNA wird aktiv und führt sehr gezielt zu einem Abbau der dazugehörigen mRNA. Das dort codierte Protein wird nicht produziert – und damit lässt sich für den Forscher sehr genau verfolgen, welche Gene

welche Proteine und damit welche Funktionen steuern.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit der Frankfurter Arbeitsgruppen stellt sich wie ein Kreislauf dar: Heckels Chemiker synthetisieren Moleküle – für die vorab Computerspezialisten Vorschläge gemacht haben. Von diesen Molekülen messen Physiker die Eigenschaften bei der Bestrahlung mit Licht und machen Verbesserungsvorschläge, die die Chemiker wiederum umsetzen. Besteht eine Verbindung die Anforderungstests, prüfen Biologen, Biochemiker oder Mediziner das Molekül in der Anwendung.



Die Autorin

Dr. Anja Störiko, Jahrgang 1965, studierte und promovierte in Mikrobiologie an den Universitäten Würzburg und Tübingen. Sie arbeitet als freie Journalistin für Publikumszeitschriften, ist Redakteurin der Fachzeitschrift »BIOspektrum« und hat einige Bücher zu Gesundheitsthemen verfasst.

stoeriko@t-online.de

Auch sie geben wieder Rückmeldung, welche Eigenschaften verbessert werden müssen. Dafür machen die Computerspezialisten Vorschläge, die die Chemiker in die Tat umzusetzen versuchen. So entstehen optimierte Substanzen, mit denen sich die Frankfurter einen guten Ruf in der biologischen Lichtregulation erworben haben. Viele Veröffentlichungen in renommierten Journalen beruhen auf diesen Kooperationen.

Einblicke in die Blutgefäßbildung

Stolz ist Heckel beispielsweise auf eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Frankfurter Leibniz-Preisträgerin Stefanie Dimmeler für eine therapeutische Steuerung der Blutgefäßbildung durch Licht. Verändern sich Blutgefäße im Laufe einer Krankheit, kommt es häufig zu einer schlechten Durchblutung (Ischämie). Es ist bekannt, dass bestimmte kleine Ribonukleinsäuren (mikro-RNAs oder miRNAs) die Bildung von Blutgefäßen fördern oder hemmen können. Allerdings wirken miRNAs oft auf sehr viele verschiedene Gewebe, sind also nicht sehr spezifisch. Daher ist es wünschenswert, die Wirkung dieser kleinen RNAs zeitlich und örtlich steuern zu können. Hierfür bietet sich Licht als Steuersignal an. Die Forscher konzentrierten sich auf miRNAs, die die Gefäßbildung hemmen. Synthetische Anti-miRNAs kleben sich wie ein passender Klettverschluss auf diese »störenden« miRNAs und legen damit ihre Funktion lahm. Heckel und seine Mitarbeiter stellten dazu verschiedene lichtaktivierbare Schutzgruppen her, die sie an die passende Nukleinsäuresequenz koppelten. Unter den verschiedenen getesteten Konstrukten erwies sich eins als sehr wirksam: Licht spaltete die Schutzgruppe ab und aktivierte so die Bindung der Anti-miRNA an die passende miRNA. Damit war diese inaktiv und konnte die Bildung der Blutgefäße nicht mehr stören, wie Untersuchungen an menschlichen Nabelschnur-Blutgefäßen zeigten. Die dafür notwendige Bestrahlung mit UV-Licht schädigte die Zellen nicht. Im behandelten Gewebe aber bildeten sich wie erhofft vermehrt Blutgefäße. Da die Strahlung etwa ein Zentimeter tief in Gewebe eindringen kann, ist eine Behandlung von Oberflächengewebe wie der Haut denkbar, etwa zur beschleunigten Wundheilung. Aber auch während Operationen könnte mit einem Katheter gezielt Gewebe beeinflusst werden.

Die »Alltagsarbeit« in Heckels Gruppe, die Synthese neuer Schutzgruppen, ist allerdings gar nicht so einfach. Teilweise fehlen die geeigneten Vorhersageinstrumente. »Wenn Chemiker eine bestimmte Eigenschaft wünschen, fischen sie ein wenig im Trüben«, formuliert Heckels Kollege Christian Grünewald. »Man kann ungefähr abschätzen, welche Änderung was auslösen

könnte – aber oft versteht man gar nicht genau, warum etwas funktioniert oder auch nicht.« Versuch und Irrtum eben. Je komplexer diese Strukturen werden, desto schwerer ist die Vorhersage: wenn das Molekül also beispielsweise an einer bestimmten Stelle binden und von verschiedenen Wellenlängen (in)aktiviert werden soll, aber gleichzeitig den biologischen Prozess nicht stören darf.

Ziel: Licht-steuerbare Nano-Maschinen

Ein langfristiges Ziel sind mit Licht steuerbare Nano-Maschinen: »Der Aufbau von DNA ist ja im Detail bekannt, so dass man damit sehr genau konstruieren kann, was man will – wie aus einem Lego-Baukasten«, so Heckel. »Diese gezielten Konstruktionen mit Licht zu steuern, wäre ideal.« Kaum etwas ist so winzig und gleichzeitig so gezielt synthetisierbar und steuerbar wie DNA. Biosensoren oder Hightech-Maschinen im Nano-Maßstab auf DNA-Basis sind heute vorstellbar. So gelang es der Arbeitsgruppe beispielsweise, winzige DNA-Ringe zu konstruieren, die sich gezielt mit Licht zu Gruppen oder Stapeln sortieren lassen. Die Verbindung von Technik und Naturwissenschaften ist seit der Kindheit Heckels Leidenschaft: »Ich hatte als Kind schon ein Mikroskop, einen Elektronik- und einen Chemiebaukasten, natürlich



2 Prof. Alexander Heckel, Jahrgang 1972, studierte Chemie. Er promovierte an der ETH Zürich und war Postdoktorand am California Institute of Technology. Von 2003 bis 2007 war er Liebig- und dann Emmy-Noether-Nachwuchsgruppenleiter an der Universität Bonn. 2007 kam er als Investigator des Exzellenzclusters Makromolekulare Komplexe an die Goethe-Universität. Er ist Professor für Chemische Biologie und Medizinalchemie am Institut für Organische Chemie und Chemische Biologie.

einen Computer und optische Instrumente. Jetzt ist das alles irgendwie noch ähnlich, aber die Baukästen sind ein bisschen größer und teurer geworden.« Und von der Idee über das mühsame Überzeugen von Geldgebern und Kollegen dauert es immer einige Jahre, bis der Forscher wirklich etwas ausprobieren kann. »Wenn es dann funktioniert, dann macht es wirklich Clic!«, so Heckel in Anspielung auf das Motto seines Graduiertenkollegs (siehe: »CLiC – das interdisziplinäre Graduiertenkolleg zur Lichtkontrolle«, Seite 61). »Dann surft man wirklich auf der Welle – auch wenn sie natürlich oft bricht, weil irgendwas dann doch nicht funktioniert.« ●

3 Blick in ein typisches Synthese-Labor der AG Heckel, in dem neue Photoschalt-Elemente entwickelt werden.





Zelluläre Prozesse durch Licht kontrollieren

Laser aktivieren das kleinstmögliche Schlüssel-Schloss-System

Von Anja Störiko

»Stellen Sie sich vor, wir könnten einzelne Zellen mit einer Art Fernbedienung von außen steuern«, träumt Ralph Wieneke, Juniorgruppenleiter in der Zellulären Biochemie. Licht als Steuerungsquelle habe entscheidende Vorteile, schildert Institutsleiter Robert Tampé: »Es schadet Zellen nicht und kann schnell und sehr genau reguliert werden.« Von ihrem Ziel ist die Arbeitsgruppe gar nicht so weit entfernt.

Ein großen Erfolgsschritt hatten die Wissenschaftler bereits vor drei Jahren sichtbar mit Licht gebannt: Sie »malten« das Goethe-Logo der Universität Frankfurt auf eine proteinbeschichtete Glasplatte – winzige 20 Mikrometer klein, ein Fünftel der Dicke eines Blatts Papier, nur sichtbar mit einem speziellen Mikroskop.



Die Arbeitsgruppe nutzte dazu das in fast allen Zellen verbreitete Molekül Glutathion, eine Verbindung aus den Aminosäuren Glutamat, Cystein und Glycin. Es spielt im Körper eine wesentliche Rolle bei der Regulierung des Elektronengleichgewichts (Redoxpotenzial). So fängt es beispielsweise aggressive Sauerstoffmoleküle ab und verhindert damit eine frühzeitige Zellalterung. Zusammen mit dem Enzym Glutathion-S-Transferase hilft es zudem bei der Entgiftung der Zelle, indem es Fremdstoffe bindet und anschließend ausscheidet. An das Glutathion synthetisierten die Wissenschaftler eine chemische Schutzgruppe aus Nitrophenylpropyl (NPP), das sich mit Licht wieder abspalten lässt. Solange diese Schutzgruppe gebunden ist, blockiert sie die Funktion von Glutathion. Nach Belichtung ist Glutathion wieder voll aktiv. Dieses Konstrukt wurde nun auf einer Glasplatte flächig verteilt. Anschließend belichteten die Wissenschaftler diese über eine Maske mit dem Goethe-Logo: Wie erwünscht, spaltete das Licht die NPP-Schutzgruppe ab und aktivierte so die Bindung an das Transferase-Enzym. Sichtbar wird das mit einer »präparierten« Glutathion-

S-Transferase, an die ein Protein gebunden ist, das bei Lichtanregung grün fluoresziert. Wird die Glasplatte mit diesem Fluorophor-Enzym behandelt, kann es nur dort binden, wo zuvor die Schutzgruppe abgespalten wurde. Das Fluoreszenzbild entspricht dann der zuvor verwendeten Maske, also hier dem Goethe-Kopf.

Wie finden Proteine zueinander?

Dies sind aber letztlich spielerische Vorarbeiten für das eigentliche Ziel, bestimmte Prozesse in der Zelle zeitlich und räumlich präzise zu steuern. »Wir zeigen mit diesen Versuchen, dass wir Protein- beziehungsweise Zellfunktionen raum- und zeitaufgelöst – also in 4-D – kontrollieren und untersuchen können«, so Wieneke.

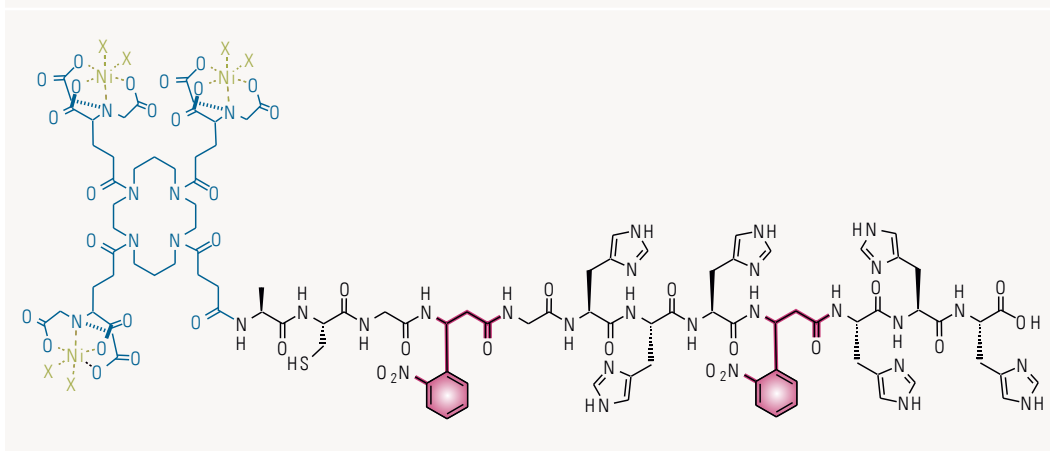
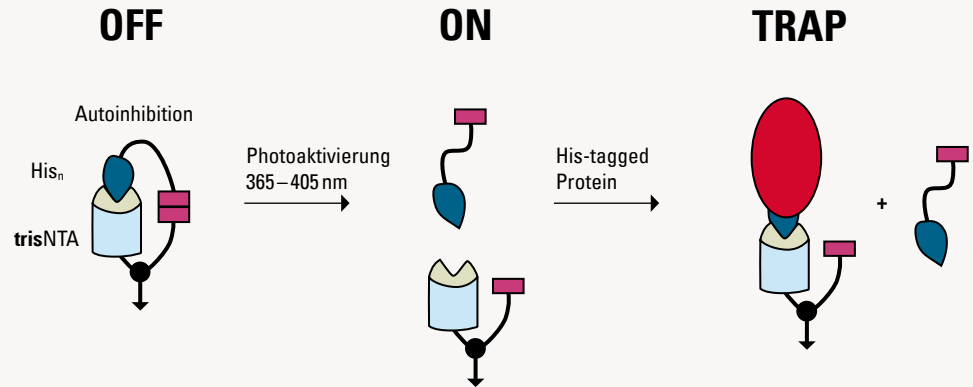
Diesem Ziel kamen die Forscher mit einem weiteren Projekt näher, das es erlaubt, in der Zelle die Zusammenlagerung von Proteinen räumlich und zeitlich zu verfolgen: Dazu entwickelten die Chemiker eine photoaktivierbare (PA) Verbindung namens PA-trisNTA (Nitrilo-Essigsäure). »Tris« steht für drei Gruppen, die an ein zyklisches Molekülgerüst geknüpft sind und ganz gezielt an ausgewählte Proteine binden können. An der vierten Molekül-»Ecke« ist eine photoaktivierbare Kette von Aminosäuren gebunden, die das trisNTA hemmt. Dieser zusätzliche Arm beinhaltet zwei lichtspaltbare Aminosäuren und sorgt dafür, dass PA-trisNTA inaktiv ist. Belichtung führt nun dazu, dass die lichtempfindlichen Aminosäuren abgespalten werden. Dadurch wird das trisNTA freigesetzt und kann sich an speziell markierte Proteine anlagern. Verwendet werden dazu Proteine, die ebenfalls mit einer kurzen Aminosäure-Kette (aus Histidinen, daher »His-Tag«) versehen sind – eine häufig verwendete Markierung, mit deren Hilfe Proteine aufgereinigt werden können. An diese Histidin-Kette bindet das »befreite« trisNTA höchst

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Um die Funktion und Wechselwirkung bestimmter Proteine in der Zelle zu verstehen, werden sie zunächst mit lichtaktivierbaren Schutzgruppen gezielt blockiert. Spaltet Licht die Schutzgruppe ab, werden die Proteine aktiv.
- Eingebettet in Hydrogele lassen sich zelluläre Vorgänge in 3-D räumlich und zeitlich hochaufgelöst verfolgen.
- Ziel ist es, komplexere Vorgänge in Zellen oder kleinen Organismen zu studieren.

1 Im »Off«-Zustand ist die Verbindung PA-trisNTA an eine photoaktivierbare Kette gebunden und damit chemisch inaktiv. Durch Belichtung wird die Kette abgespalten (»On«-Zustand). Das freigesetzte trisNTA kann sich dann an Proteine, die mit einer kurzen Aminosäure-Kette aus Histidinen (»His-Tag«) markiert sind, höchst selektiv, sehr schnell und mit hoher Affinität binden. Unten ist die chemische Struktur des PA-trisNTAs gezeigt.

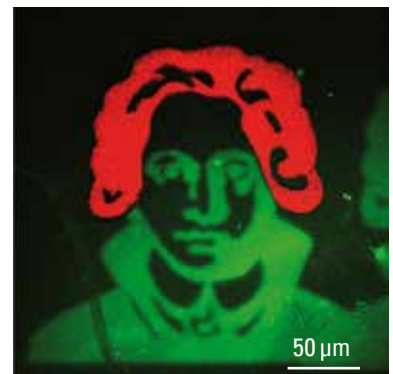
Prinzipien der Photoaktivierung zur Kontrolle zellulärer Prozesse



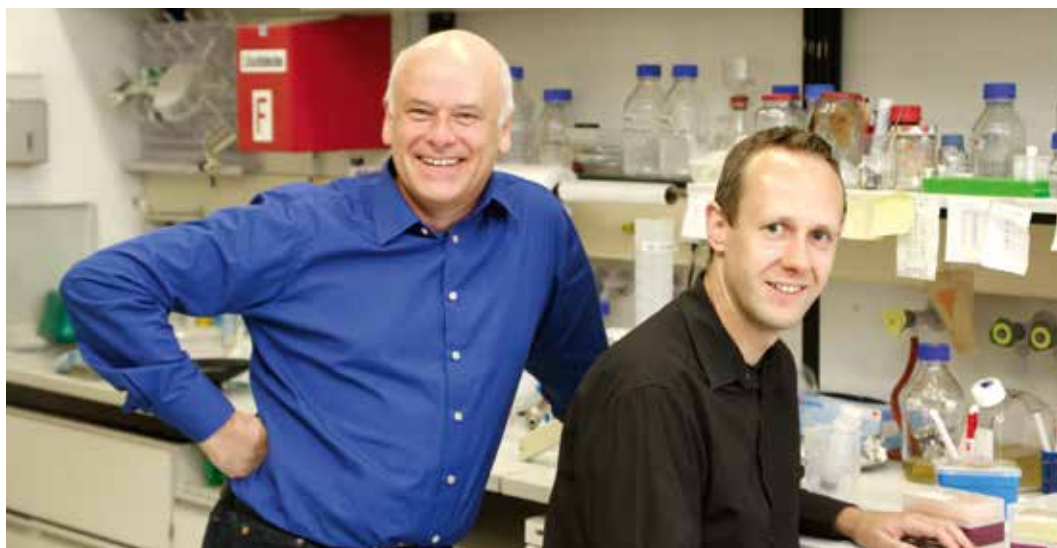
selektiv, sehr schnell und mit hoher Affinität (Abb. 1). »Mit diesem System haben wir das kleinstmögliche Schlüssel-Schloss-System, das es derzeit gibt«, so Wieneke.

Um diesen Effekt in drei Dimensionen untersuchen zu können, fixierten die Forscher das PA-trisNTA in einem durchsichtigen Hydrogel – »das ist ein ähnliches Material, das in Einweg-Windeln Wasser bindet und für die Saugkraft sorgt«, so Tampé. Mithilfe moderner Mikroskope können die Wissenschaftler nun zeitlich und räumlich genau verfolgen, wie sich in den belichteten Bereichen die His-markierten Proteine zusammenlagern. Punkt für Punkt und Zeile für Zeile werden die geschriebenen Proteinstrukturen mithilfe eines hochauflösenden konfokalen Rasterlasermikroskops »abgelesen«.

Komplexer wird das Ganze noch, wenn lichtempfindliche Substanzen verwendet werden, die auf unterschiedliche Wellenlängen reagieren. So können verschiedene Proteinreaktionen ausgelöst und als mehrfarbiges Muster sowohl räumlich als auch zeitlich sichtbar gemacht werden.



Der »Fernbedienung« von Zellreaktionen kommen die Wissenschaftler also schon näher. Mit diesem Prinzip wird es in Zukunft möglich, einzelne in Hydrogele eingebettete Zellen, aber auch transparente Organismen wie Fadenwürmer zu untersuchen. »Wir kennen heute die einzelnen Komponenten der Zellen, aber nicht, wie sie in Raum und Zeit miteinander reagieren und an ihr Ziel kommen«, ergänzt Tampé. »Mit diesem lichtgesteuerten System können wir einzelne Proteine in Raum und Zeit verfolgen, manipulieren, kontrollieren, steuern ...«



Blitzschnelle Aktivierung in winzigen Volumina

Mithilfe eines weiteren Tricks gelang es den Forschern, die dreidimensionale Auflösung weiter zu verbessern. Hierzu verwendeten sie wieder das oben erwähnte Glutathion, das mit einer Schutzgruppe versehen wurde, die das Molekül blockiert, aber durch Licht abgespalten werden kann [siehe Anja Störiko: »Steuerung mit Licht aus dem Chemiebaukasten«, Seite 35]. Dies wird mit einem Zwei-Photonen-Laser äußerst präzise aktiviert: Statt üblicherweise nur ein Photon regen hier gleichzeitig zwei Photonen das Molekül an. Dadurch erhöhen sich die Präzision und vor allem die räumliche Auflösung beträchtlich. Diese Photoaktivierung ist dreimal schneller als mit nur einem Photon. Außerdem geschieht dies in winzigen Volumina: In einem Femtoliter – einem milliardstel Liter! – ist es noch möglich, den Laserstrahl so genau auszurichten, dass er auf einem Punkt konzentriert ist und Streulicht vermieden werden kann. Zudem kann der Laserstrahl vergleichsweise tief in Gewebe eindringen, so dass es auch möglich sein sollte, tierische und menschliche Organe zu untersuchen. Darauf weisen erfolgreiche Ergebnisse in Hydrogelen hin, die präzise dreidimensionale Abbilder lieferten.

Signalweiterleitung auf molekularer Ebene verstehen

In aktuellen Arbeiten versuchen die Wissenschaftler, diese methodischen Ansätze für gezielte Forschungsanwendungen einzusetzen. So verfolgen sie derzeit die Zusammenlagerung von Proteinen, die immer als Paar aktiv sind und wirken. Diese »Dimere« aus zwei gleichen oder auch verschiedenen Untereinheiten müssen sich in der Zelle finden und paaren. Diesen Vorgang verfolgt die Arbeitsgruppe, indem sie die Untereinheiten durch die lichtaktivierbaren Werkzeuge in räumliche Nähe bringt. So lässt sich beispielsweise beobachten, wie sich ein

solches Dimer in der Zellmembran findet, in der es anschließend als Rezeptor wirksam ist.

Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit dem Rezeptor für den Epidermalen Wachstumsfaktor, der in Tumoren gehäuft auftritt. Mit Licht wollen die Forscher den Rezeptor gezielt anregen und kontrollieren. »Wenn man solche Protein-Protein-Wechselwirkungen auslösen und verfolgen kann, ist das ein erster Schritt, um die »Mechanik« der Signalweiterleitung zu verstehen«, so Tampé. »Es wäre faszinierend, die Rezeptordynamik zu verstehen, also wie viele Rezeptoren benötigt werden, um Signale weiterzugeben, damit eine zelluläre Antwort ausgelöst wird«, ergänzt Wieneke. Den wesentlichen Fortschritt ihrer Forschung sehen beide darin, dass nun zelluläre Signale in Raum und Zeit exakt kontrolliert und beobachtbar werden. Verschiedene Wellenlängen des Lichts erlauben dabei eine parallele, unabhängige Steuerung unterschiedlicher Ereignisse.

Der nächste Schritt ist nun, einzelne Zellen oder gar kleine Organismen in Hydrogele einzubetten und im lebenden Organismus zu verfolgen, wo sich Proteine zusammenlagern und in Wechselwirkung treten. »Passiert das an einem bestimmten Zellende? Wie viele Signale sind nötig, um eine Antwort auszulösen? Wie groß sind die Proteinkomplexe bei der Signalweiterleitung?«, fallen Tampé gleich etliche Fragestellungen ein. Dank erfolgreicher interdisziplinärer Zusammenarbeit, hochaufgelöster moderner Mikroskopiemethoden, des Einfallsreichtums der Mitarbeiter und der faszinierenden Eigenschaften von Licht werden diese spannenden Denkmodelle sicher in den nächsten Jahren Realität. ●

Prof. Dr. Robert Tampé (links), Jahrgang 1961, promovierte 1989 in Biochemie an der TU Darmstadt. Nach einem Forschungsaufenthalt an der Stanford University, USA, wurde er Nachwuchsgruppenleiter am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried und zugleich Gruppenleiter am Institut für Biophysik der TU München (Habilitation 1996). 1998 erhielt er eine C4-Profsur für Physiologische Chemie/Zelluläre Biochemie am Klinikum der Universität Marburg. Seit 2001 leitet er das Institut für Biochemie an der Goethe-Universität. Er ist Sprecher des SFB 807 Transport und Kommunikation über biologische Membranen. Neben seiner Mitgliedschaft im Direktorium des Exzellenzclusters Makromoleküle Komplexe erhielt er eine Honorar-Professur an der University of California San Francisco (UCSF) und der Kyoto University (Japan).

Dr. Ralph Wieneke, Jahrgang 1978, promovierte 2009 in organischer Chemie an der Philipps Universität Marburg über künstliche Biopolymere in der Biomineralisierung. Nach einem kurzen Gastaufenthalt an der Georg-August Universität Göttingen war er zunächst Postdoc am Institut für Biochemie an der Goethe-Universität. Seit 2013 ist er dort Juniorengruppenleiter mit eigenen geförderten DFG-Projekten. Seine Forschungsinteressen gelten der (opto-) chemischen Biologie mit Fokus auf die Entwicklung und Anwendung von lichtgesteuerten Werkzeugen für die gezielte Proteinmodifizierung. Spezielles Interesse gilt dabei der »Mechanik der Signaltransduktion« (Receptor clustering).

Die Autorin

Dr. Anja Störiko
(weitere Informationen auf Seite 36)



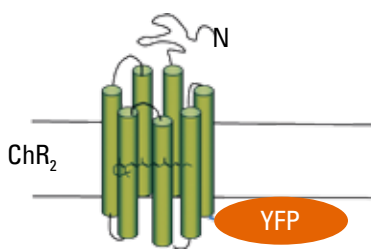
Licht steuert Nervenzellen mit höchster Präzision

Die Optogenetik revolutioniert die Neurowissenschaften

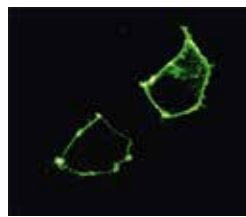
von Ernst Bamberg

Mit der Optogenetik hat sich in der Neurowissenschaft eine Revolution vollzogen. Die Optogenetik erlaubt, Nervenzellen einfach mit Licht und mit bis dato nicht gekannter Genauigkeit zeitlich und räumlich elektrodenfrei an- und abzuschalten. Dies wird durch das Einbringen genetisch codierter Lichtschalter, sogenannter mikrobieller Rhodopsine, in den Nervenzellen erreicht. Die Methode, die in Frankfurt und in Regensburg ihren Ursprung genommen hat, wird heute in der Neurobiologie weltweit eingesetzt. Neben der Grundlagenforschung eröffnen sich dank der Optogenetik auch neue biomedizinische Perspektiven zur Genterapie neurodegenerativer Krankheiten.

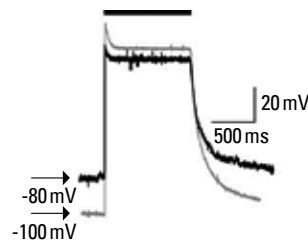
Bereits 2002 und 2003 veröffentlichten wir (Georg Nagel, Peter Hegemann und der Autor) zwei Arbeiten, in denen die Funktion von Algenrhodopsinen als lichtgesteuerte Kationenkanäle beschrieben wird. Einzellige Teichalgen vom Typ *Chlamydomonas reinhardtii* besitzen einen Augenfleck, mit dem die Einzeller »sehen« und lichtabhängig optimale Lebensbedingungen durch fototaktische Schwimmbewegungen erreichen. Die lichtempfindlichen Proteine im Augenfleck sind Rhodopsine, die von uns als lichtgesteuerte Kationenkanäle beschrieben wurden und als Channelrhodopsin 1 und 2 (ChR1,2) benannt wurden. [1, 2]



1a



1b



1c

Unser Nervensystem kann als komplexer elektrischer Schaltkreis dargestellt werden. Die elektrischen Eigenschaften der Neuronen werden über die Ionenpermeabilität der die Zelle umgebenden Membran geregelt. Als Ladungsträger dienen positiv geladene Natriumionen, Kaliumionen und Kalziumionen, deren Transport über die Membran durch Proteine (Ionenpumpen, Ionenkanäle) zum Teil spannungsabhängig bewerkstelligt wird. Jede Zelle ist in der Lage, mit bis zu 10.000 Verknüpfungen, den Synapsen, mit anderen Zellen zu kommunizieren, was die Komplexität eines neuronalen Netzes verdeutlicht. Insgesamt sind im menschlichen Gehirn bei bis zu 100 Milliarden Neuronen bis zu 10^{80} Verknüpfungen möglich, eine Zahl, die etwa die Anzahl aller Atome des Universums darstellt, also »unendliche Möglichkeiten«.

Im Ruhezustand der Zellen wird stets ein negatives Membranpotenzial (Hyperpolarisation) aufrechterhalten. Aktivierende Signale bewirken, dass positive Natriumionen in die Zelle einströmen, wodurch das Membranpotenzial angehoben und die elektrische Erregung ausgelöst werden, das heißt, die Neuronen beginnen zu feuern. Im zeitlichen Verlauf von wenigen Millisekunden wird durch Ausströmen von Kaliumionen die Zelle repolarisiert und damit in den Ruhezustand übergeführt. Das Feuern der Nervenzellen, die sogenannten Aktionspotenziale, sind wesentlicher Bestandteil der Signalübertragung zwischen Nervenzellen. Herkömm-

liche Methoden, mit denen man diese Prozesse untersucht, beruhen auf der direkten Stimulation durch Mikroelektroden. Ihre zeitliche, aber vor allem räumliche Auflösung ist jedoch eingeschränkt im Vergleich zu einer möglichen direkten elektrodenfreien Lichtstimulierung.

Lichtschalter für die Nervenzelle

Mit der Entdeckung, dass insbesondere ChR2 als lichtgesteuerter Kationenkanal Zellen durch seinen nach dem Zellinneren gerichteten Kationentransport depolarisiert, wurde klar, dass wir hier ein hochinteressantes molekulares Werkzeug gefunden hatten, um elektrisch erregbare Zellen wie Nervenzellen mit Licht zu aktivieren.

1a Channelrhodopsin 2

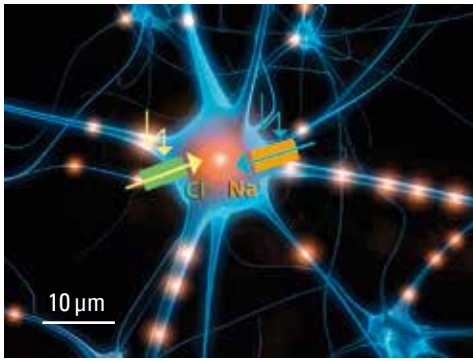
1b mit »Yellow fluorescent protein« zur Markierung des Kanals in der Zellmembran von HEK(Human Embryonic Kidney)-Zellen

1c Depolarisierung einer HEK-Zelle nach Belichtung, die Lichtphase ist durch den schwarzen Balken gekennzeichnet. Rhodopsine kommen in der Natur in verschiedenen Lebensbereichen vor: in Bakterien, in Pflanzen und in den Augen aller Tierarten mit unterschiedlichem molekularem Mechanismus, das heißt, als reine Sensoren für Signalketten (Auge, Bakterien), als Ionenpumpen (Bakterien) und überraschenderweise als Ionenkanäle (Algen).

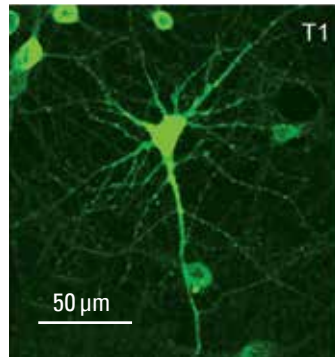
Das heißt, mit den genetisch kodierten Lichtschaltern sollte es möglich sein, elektrodenfrei mit extrem hoher Ortsauflösung ohne jede mechanische Störung in neuronale Netze aktivierend einzugreifen, womit sich ganz neue

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

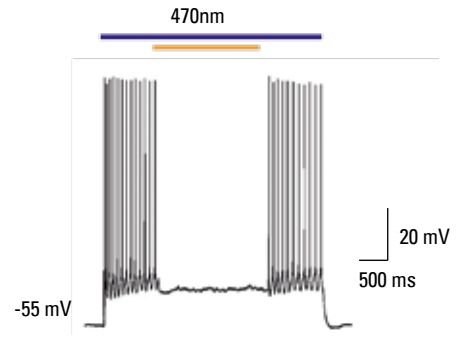
- In der Optogenetik ersetzen mit Licht steuerbare Ionenkanäle die zuvor in der Neurobiologie verwendeten Elektroden. Die Messungen weisen zeitlich und räumlich eine bis dato unerreichbare Präzision auf.
- Die Grundlagen der Optogenetik legten 2002 Forscher aus Frankfurt und Regensburg mit der Entdeckung des Ionenkanals Channelrhodopsin, wobei sie das Potenzial für die Neurowissenschaften sofort erkannten, wie in dem von ihnen veröffentlichten Patent dargestellt ist.
- Optogenetische Lichtschalter werden weltweit in mehr als 1000 neurobiologisch orientierten Laboratorien eingesetzt. Erste Erfolge mit biomedizinischem Hintergrund zeigten sich bei der Behandlung blinder Mäuse, die das Sehvermögen wiedererlangten.



2a



2b



2c

2a Schematische Darstellung der Wirkung von Channelrhodopsin2 (ChR2) und Halorhodopsin auf Nervenzellen. Aktivierung mit blauem Licht veranlasst ChR2, den Kanal zu öffnen. Dadurch können positiv geladene Natriumionen einströmen und das Neuron auf »an« schalten. Aktivierung mit gelbem Licht bringt Halorhodopsin dazu, negativ geladene Chloridionen in die Zelle zu pumpen. Die Zelle wird dadurch auf »aus« geschaltet.

2b Bild einer mit ChR2 und NphR transfizierten Nervenzelle.

2c Aktivierung des Feuerns mit blauem Licht (ChR2) und Inaktivierung mit gelbem Licht (NphR) [6].

Möglichkeiten zur Erforschung neurobiologischer Fragestellungen ergeben sollten.

Vorausschauend wurde 2002 von uns ein Patent angemeldet, wo bereits im Detail, wie später noch ausgeführt wird, die möglichen Anwendungen in der neurobiologischen Grundlagenforschung bis hin zur Biomedizin beschrieben werden. In Zusammenarbeit mit Karl Deisseroth und Ed Boyden, Stanford, wurde das von uns entwickelte ChR2-Konstrukt funktionell in kultivierten Mausneuronen exprimiert und diese dann durch Belichten zum Feuern gebracht. [3] Zeitgleich im selben Jahr 2005 wurde in Zusammenarbeit mit Alexander Gottschalk von der Goethe-Universität an dem Fadenwurm *C. elegans* die Lichtsteuerbarkeit an dem transgenen Tier gezeigt und damit überhaupt zum ersten Mal am lebenden Tier. [4]

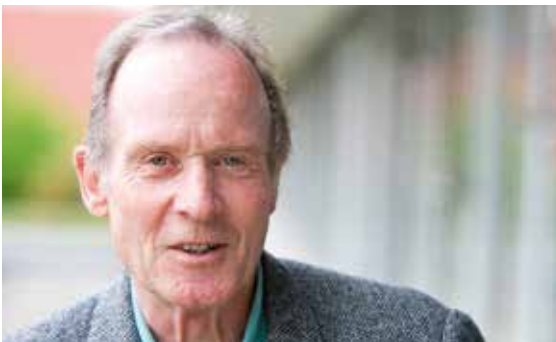
Wie aber können Nervenzellen mit Licht stillgelegt werden oder, anders ausgedrückt, hyperpolarisiert werden? Bereits 1995 hatten wir gezeigt, dass eine bakterielle lichtgetriebene Protonenpumpe, das Bakteriorhodopsin, elektrophysiologisch in der Membran von Eiern des südafrikanischen Krallenfrosches via genetischer Manipulation charakterisiert werden kann. Basierend auf diesen Arbeiten gelang es zusammen mit der Stanfordgruppe und mit Alexander Gottschalk, eine dem Bakteriorhodopsin verwandte lichtgetriebene Chloridpumpe in Neuronen und in *C. elegans* zu exprimieren. [5] Durch den einwärts gerichteten Chloridpumpstrom werden die Zellen hyperpolarisiert und damit stillgelegt. Aufgrund der unterschiedli-

chen Absorptionseigenschaften – ChR2 absorbiert blaues Licht (470 nm) und NphR gelbes Licht (570 nm) – können Neuronen, wenn beide Lichtschalter in einer Zelle exprimiert werden, mit blauem Licht »angeschaltet« und mit gelbem Licht »abgeschaltet« werden. Damit waren die Grundlagen geschaffen, auf denen das heute so benannte Arbeitsgebiet der Optogenetik beruht. Inzwischen werden diese Lichtschalter weltweit in mehr als 1.000 neurobiologisch orientierten Laboratorien eingesetzt. Als Zeichen, welche Bedeutung die Optogenetik inzwischen erreicht hat, sei erwähnt, dass die Methode eine zentrale Rolle bei der »US National Institutes of Health BRAIN Initiative« zur Kartierung des menschlichen Gehirns spielt.

Das Gehirn kartieren und Sehvermögen steigern

Durch die Weiterentwicklung der Molekularbiologie ist es heute möglich, mit Viren als Gefährten, zellspezifisch die Lichtschalter in Neuronen einzubringen. Mithilfe dieser Technik und mit transgenen Mäusen sind Experimente möglich geworden, wie man sie vor einigen Jahren nicht für möglich gehalten hätte. Daraus ergibt sich inzwischen eine große Menge an Publikationen, so dass hier exemplarisch nur einige Beispiele aufgeführt werden können. So lassen sich funktionelle Schaltkreise im Gehirn kartieren. In diesen Experimenten können mit Licht mit hoher Ortsauflösung elektrodenfrei verschiedene Schaltkreise im Gehirn angesteuert und die daraus resultierende Verhaltensänderung untersucht werden. Zum Beispiel können Forscher inzwischen mit Glasfasern bestimmte Bereiche des Mäusehirns belichten, wobei durch Reizung motorischer Zentren Bewegungsaktivität ausgelöst wird. Selbst Gedächtnisleistungen der Tiere können ortsspezifisch verstärkt oder gar gelöscht werden.

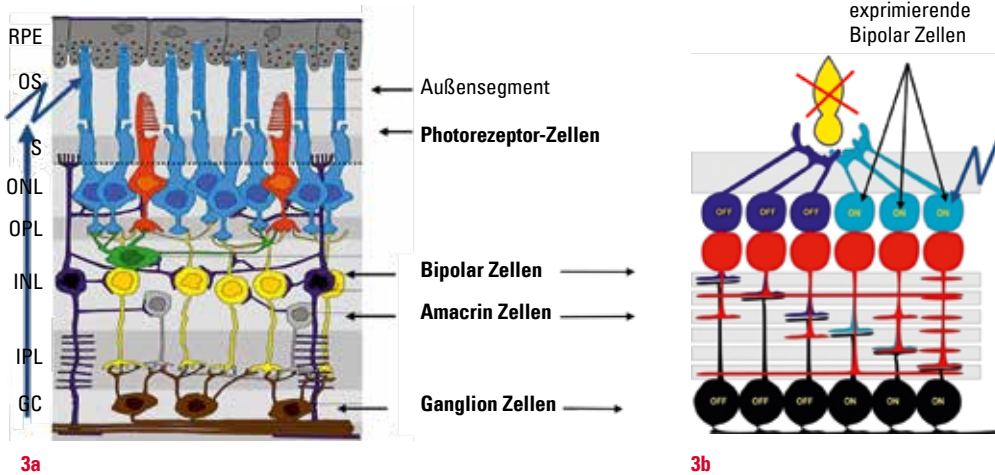
Die Erfolge im Tiermodell dienen zum weiteren Verständnis der Funktion der neuronalen Netze im Gehirn, sind aber auch die Grundlage für eventuelle biomedizinische Anwendungen. In Experimenten wurde gezeigt, dass blinde Mäuse, in deren Augen keine funktionsfähigen



Der Autor

Prof. Dr. Ernst Bamberg, Jahrgang 1940, ist Direktor des Frankfurter Max-Planck-Instituts für Biophysik und leitet dort die Abteilung für Biophysikalische Chemie. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören mikrobielle Rhodopsine, lichtgesteuerte Ionenkanäle und lichtgetriebene Ionenpumpen, die in der Optogenetik zur Steuerung elektrisch aktivierbarer Zellen dienen.

ernst.bamberg@biophys.mpg.de



3a, b Schematische Darstellung der Retina mit a und b ohne Photorezeptorzellen. Die Lichtaktivierung wird in a durch die natürlichen Photorezeptorzellen bewirkt, während in b die mit ChR2 transduzierten Bipolarzellen diese Aufgabe übernehmen. [7]

Literatur

- 1 Nagel G, Ollig D, Fuhrmann M, Kateriya S, Musti AM, Bamberg E, Hegemann P, Channelrhodopsin-1: a light-gated proton channel in green algae, *Science*, 2002, 296 2395–8.
- 2 Nagel G, Szellas T, Huhn W, Kateriya S, Adeishvili N, Berthold P, Ollig D, Hegemann P, Bamberg E, Channelrhodopsin-2, a directly light-gated cation-selective membrane channel, *Proc. Natl. Acad. Sci., USA* 100, 13940–13945 (2003).
- 3 Boyden ES, Zhang F, Bamberg E, Nagel G, Deisseroth K, Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity, *Nat Neurosci.*, 2005, 8 1263–8.
- 4 Nagel G, Brauner M, Liewald JF, Adeishvili N, Bamberg E, Gottschalk A., Light activation of channelrhodopsin-2 in excitable cells of *Caenorhabditis elegans* triggers rapid behavioral responses, *Curr Biol.* (2005), 15, 2279–84.
- 5 Zhang F, Wang LP, Brauner M, Liewald JF, Kay K, Watzke N, Wood PG, Bamberg E, Nagel G, Gottschalk A, Deisseroth K., Multimodal fast optical interrogation of neural circuitry, *Nature*. 2007, 446, 633–9.

- 6 Kleinlogel S, Terpitz U, Legrum B, Gökbuget D, Boyden ES, Bamann C, Wood PG, Bamberg E., A gene-fusion strategy for stoichiometric and co-localized expression of light-gated membrane proteins, *Nat Methods*. 2011 8 1083–8.

- 7 Lagali, P. S., D. Balya, G. B. Awatramani, T. Münch, D. S. Kim, V. Busskamp, C. L. Cepko, B. Roska, Light-activated channels targeted to ON bipolar cells restore visual function in retinal degeneration., *Nat. Neurosci.* 11, 667–75 (2008).

- 8 Hernandez VH, Gehrt A, Reuter K, Jing Z, Jeschke M, Mendoza Schulz A, Hoch G, Bartels M, Vogt G, Garnham CW, Yawo H, Fukazawa Y, Augustine GJ, Bamberg E, Kügler S, Salditt T, de Hoz L, Strenzke N, Moser T., Optogenetic stimulation of the auditory pathway, *J Clin Invest.* 2014, 124, 1114–29.



4a, b, c zeigt die Bewegung einer mit ChR2 in den Bipolarzellen der Retina einer transduzierten Maus im Dunkeln und nach Belichtung a und die Kontrollen in b und c, b die unbehandelte blinde Maus, c ein normal sehendes Tier. Es ist klar zu erkennen, dass die behandelte Maus sich bezüglich der Lichtumgebung etwa gleich verhält wie das gesunde Tier. [7]

Lichtsinnzellen mehr vorhanden sind, bereits ihre Lichtempfindlichkeit zurückerlangt haben, indem in den Lichtsinneszellen nachgeschalteten Zellen Channelrhodopsin-2 eingebracht wurde (Abb. 4a-c). [7] Auf lange Sicht könnte in Analogie ein gentherapeutischer Ansatz Menschen helfen, die unter Erblindung leiden, ausgelöst durch Makuladegeneration oder andere Sehstörungen. Sie könnten das Sehvermögen, wenn auch begrenzt, wiedererlangen. Das wäre eine vielversprechende Alternative zur Behandlung mit photosensitiven Implantaten, sogenannten Sehchips. Analoge Studien an der Maus zum »optischen Hören«, das heißt einem optogenetischen Ersatz für die Elektrodenstimulation im Innenohr, werden zurzeit mit einigem Erfolg durchgeführt. [8] Weitere Ansätze bestehen allerdings auf lange Sicht darin, die heute bei der Parkinson-Krankheit erfolgreich eingesetzte, elektrodenbasierte Tiefenhirnstimulation durch die Optogenetik auf-

grund der hohen Zellspezifität zu verbessern, ein Unterfangen, das aufgrund der Komplexität eines gentherapeutischen Ansatzes im menschlichen Gehirn nach Ansicht des Autors, wenn überhaupt, erst in mehr als zehn Jahren zum Tragen kommen kann. Ähnliche Ansätze werden zur Behandlung von Epilepsie und anderer neurodegenerativer Krankheiten diskutiert.

Die Optogenetik eröffnet der neurowissenschaftlichen Grundlagenforschung vielfältige Möglichkeiten. Sie wird weltweit bereits in vielen Labors genutzt und hat zu einer Reihe von neuen Erkenntnissen geführt. Auch wenn auf dem Weg zu biomedizinischen Anwendungen noch zahlreiche Hürden und Risiken zu bewältigen sind, verspricht die Methode aufgrund der Zellspezifität, gepaart mit der hohen Ortsauflösung, neuartige Ansätze für neurologische Behandlungsstrategien zu liefern, wie sie mit der herkömmlichen Elektrodenstimulation nicht möglich sind. ●



Ein kleiner Wurm – Liebling der Optogenetiker

»*Caenorhabditis elegans*« als Modell
für synaptische Reizleitung und Arrhythmie

von Alexander Gottschalk

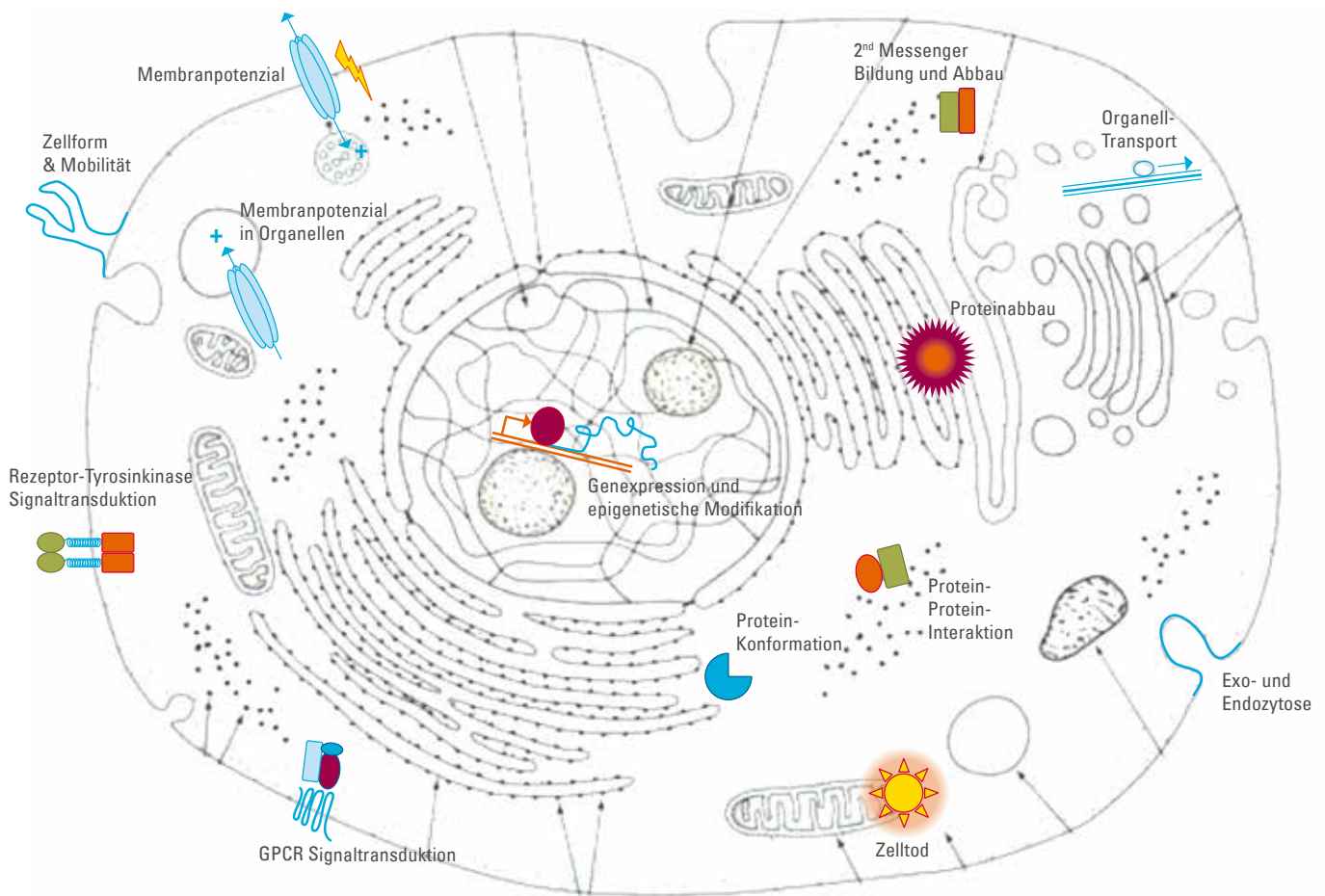
Der unscheinbare Fadenwurm »*C. elegans*« ist einer der ersten und bis heute wichtigsten Modellorganismen der Optogenetik. Zwei Frankfurter Arbeitsgruppen gelang es vor zehn Jahren erstmals, das Tier genetisch mit lichtaktivierbaren Ionenkanälen auszustatten und seine Bewegungen mit Licht zu steuern. Inzwischen studieren Forscher an dem durchsichtigen Wurm auch Prozesse, die für die medizinische Forschung bedeutsam sind – etwa die Entstehung und Behandlung genetisch bedingter Herz-Rhythmus-Störungen.

Seit der grundlegenden Entdeckung des lichtaktivierbaren Ionenkanals Channelrhodopsin in Frankfurt im Jahr 2002 hat sich die Optogenetik explosiv entwickelt und die neuro- und zellbiologische Forschungslandschaft weltweit revolutioniert [siehe Ernst Bamberg: » Licht steuert Nervenzellen mit höchster Präzision«, Seite 42]. Die Optogenetik verwendet natürliche oder maßgeschneiderte lichtempfindliche Proteine, um die Aktivität von (Nerven-)Zellen oder Vorgänge innerhalb der Zelle zu verändern. Dabei geht es nicht mehr nur darum, Nervenzellen anzuregen oder zu hemmen. Inzwischen ist auch die viel weiter reichende Modulierung von biologischen Vorgängen oder die Steuerung von biochemischen

Reaktionen möglich. Man kann die Form des Zytoskeletts und der Zellen selbst verändern, den intrazellulären Transport und Protein-Protein-Interaktionen beeinflussen, Strukturen von Proteinen verändern, die Expression und den Abbau von Proteinen steuern und sogar den Zelltod herbeiführen (*Abb. 1*). Auch therapeutische Anwendungen der Optogenetik zur Wiederherstellung von Seh- oder Hörvermögen rücken in den Bereich des Möglichen.

Derzeit gehören die breiteren Anwendungen optogenetischer Methoden noch in den Bereich der Grundlagenforschung. Um optogenetisch wirksame Proteine verwenden zu können, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein: Der gewählte Modellorganismus sollte genetisch veränderbar

Anwendungsmöglichkeiten der Optogenetik in der Zelle



sein, und zwar möglichst in einer zellspezifischen Weise. Zweitens muss man die Zellen, deren Aktivität man verändern möchte, beleuchten können. Beides ist in besonderer Weise im Fadenwurm *Caenorhabditis elegans* gegeben. Er ist ein beliebter Modellorganismus in der Neuro- und Zellbiologie, denn er hat einen einfachen Körperbau, lässt sich im Labor gut halten, hat eine kurze Generationszeit von nur 2,5 Tagen und besitzt ein wohldefiniertes, sehr kleines Nervensystem von genau 302 Neuronen. Vor allem aber ist das Tier transparent und somit optimal beleuchtbar.

Meine Arbeitsgruppe befasst sich seit 2004 mit der Optogenetik. 2005 erzeugten wir (mit Georg Nagel und Ernst Bamberg) das erste Tier, das Channelrhodopsin transgen exprimiert, und konnten durch Licht koordiniertes Tierverhalten auslösen (Nagel et al. 2005). 2007 folgte dann die erste Anwendung von Halorhodopsin, mit dem Nervenzellaktivität in einem Tier unterdrückt wurde (Zhang et al. 2007). Seitdem haben wir mannigfaltige Varianten dieser Licht-Aktivatoren und -Inhibitoren in *C. elegans* implementiert, ebenso verschiedene Klassen lichtaktivierter Enzyme, welche wichtige zelluläre Botenstoffe erzeugen oder abbauen können (Weissenberger et al. 2011; Husson et al. 2012a; AzimiHashemi et al.

2014; Gao et al. 2015). Auch konnten wir den optogenetischen Aktivator Channelrhodopsin mit einem opt(ogenet)ischen Sensor für neuronale Aktivität kombinieren, so dass rein optische Veränderungen und Messungen von neuronaler und/oder Muskel-Aktivität möglich wurden (Akerboom et al. 2013; Wabnig et al. 2015).

Die Funktion einzelner Nervenzellen entschlüsseln

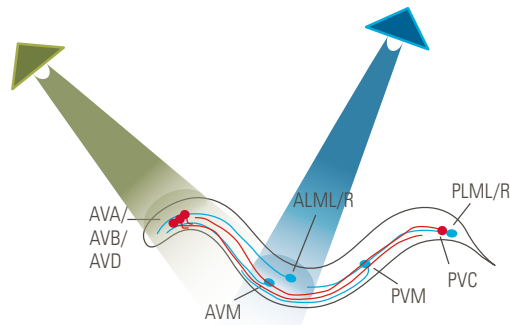
In *C. elegans* erfüllt jede der 302 Nervenzellen eine genetisch festgelegte Funktion und diese ist bei allen Individuen gleich. Um die Funktion der einzelnen Nervenzellen verstehen zu können, bringen wir optogenetische Aktivatoren und Inhibitoren gezielt in diese ein. So können wir sie aktivieren oder hemmen und mögliche Auswirkungen auf das Tierverhalten beobachten und quantifizieren. Es ist auch möglich, einzelne Nervenzel-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

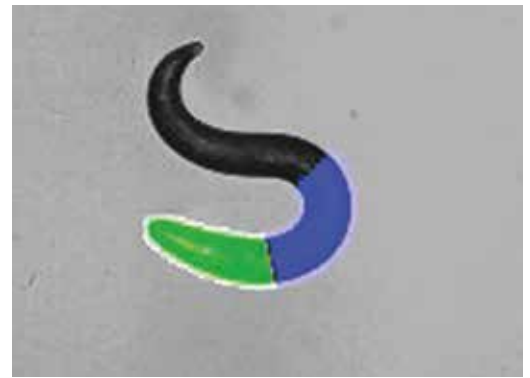
- »C. elegans« hat ein einfaches Nervensystem mit nur 302 Neuronen. Mithilfe lichtaktivierbarer Proteine konnte die Gruppe von Alexander Gottschalk aufklären, wie einzelne Nervenzellen die Bewegung des Tiers steuern.
- Auch die Ausschüttung von Neurotransmittern am synaptischen Spalt lässt sich optogenetisch steuern und untersuchen. Insbesondere wie Proteine den Nervenzellen helfen, sich nach starker Stimulation zu erholen.
- Das Fressorgan von »C. elegans« ist ein gutes Modell für die Untersuchung des Herzens von Säugetieren. An ihm lassen sich Wirkstoffe für genetisch bedingte Herz-Rhythmus-Störungen testen.

Optogenetisches Experiment zur Kontrolle des Wurmverhaltens

2a Nervenzellen von »C. elegans« (Berührungssensoren: blau; Bewegungsneurone: rot) enthalten verschiedene optogenetische Proteine, zur Anregung (blaues Licht) oder zur Inhibition (grünes Licht).



2a



2b

2b Einzelbild aus einem Video, welches ein Tier zeigt, in dem die beiden Zellsorten gerade optogenetisch manipuliert werden. Lichtmuster entsprechender Farbe werden auf den Wurm projiziert.

Chemische Synapsen unter dem Elektronenmikroskop, vor und nach optogenetischer Stimulation

3a Ein Querschnitt durch eine unstimulierte Synapse, in der »gedockte« synaptische Vesikel (Dreiecke) und das Zentrum der »aktiven Zone« (weißer Pfeil) zu sehen sind. Die Synapse ist von einer Membran umgeben.

3b Eine vergleichbare Synapse, nach 30-sekündiger Photostimulation. Gedockte Vesikel sind verschwunden, stattdessen finden sich große, leere Vesikel (schwarzer Pfeil), welche die Zelle durch Einschnürung gebildet hat.

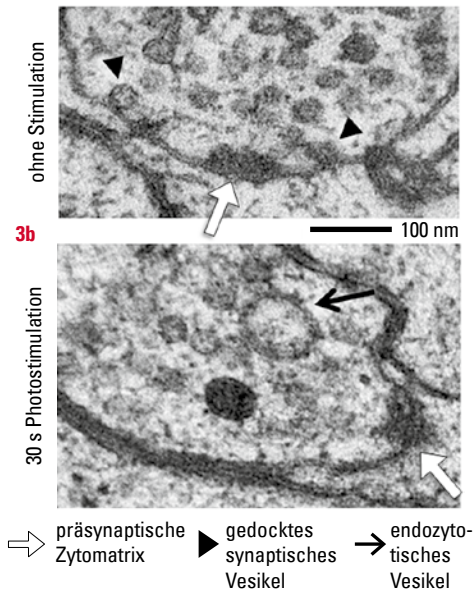
len spezifisch zu beleuchten und andere auszusparen, so dass nur das gewünschte Neuron mit Licht aktiviert wird (Stirman et al. 2011). So haben wir Nervenzellen gefunden, die auf mechanische Reize reagieren – etwa wenn das Tier auf ein Hindernis stößt – und eine Fluchtreaktion auslösen (Husson et al. 2012). Andere Nervenzellen kontrollieren die Tierbewegung, etwa die koordinierte, schlängelnde Fortbewegung auf einem festen Untergrund. Aber wir fanden auch Neuronen, die der Wurm braucht, um zu stoppen oder eine Rückwärtsbewegung einzuleiten. Zudem haben wir Nervenzellen untersucht, die Bewegungen eher auf einer übergeordneten Ebene regulieren, also ein Verhalten, das man als Navigation bezeichnen könnte, beispielsweise, um gezielt eine Futterquelle zu finden (und nicht rein zufällig).

Schnappschüsse von der Synapse

Die Weiterleitung der Reize zwischen zwei Nervenzellen erfolgt an Synapsen, und zwar zumeist über die Transmission chemischer Signalstoffe, sogenannte Neurotransmitter. Diese werden, in kleine Organellen (Vesikel) verpackt, von elektrisch angeregten Neuronen aus den Vesikeln abgegeben. Von der signalempfangenden Nervenzelle werden sie über Rezeptoren wahrgenommen, was häufig dazu führt, dass Ionen in die Zelle einströmen. Dadurch verändert sich das Membranpotenzial, wodurch sich wieder ein elektrischer Reiz ausbreitet.

Uns hat nun interessiert, was passiert, wenn Nervenzellen sehr stark oder dauerhaft gereizt werden. Das kann Bestandteil ihrer normalen Funktion sein, aber auch in pathologischen Situationen ausgelöst werden, etwa bei einem epileptischen Anfall (Liewald et al. 2008). Es kommt dann zu einer sehr starken und anhaltenden Ausschüttung von Neurotransmittern. Da nur eine begrenzte Anzahl von Neurotransmitter-Vesikeln vorhanden ist, müssen diese neu hergestellt beziehungsweise recycelt werden. Die Zelle muss dann Teile der Membran sowie Proteine, die das Neurotransmitter-Vesikel bilden, wieder in das

3a Synaptische Strukturen



↪ präsynaptische Zytomatrix ▲ gedocktes synaptisches Vesikel → endozytotisches Vesikel

Zell-Innere aufnehmen. Es ist uns, zusammen mit der Gruppe von Stefan Eimer (ENI, Göttingen, zurzeit Universität Freiburg) gelungen, diesen als Endozytose bezeichneten Vorgang, der sich im Nanometer- und im Millisekundenbereich abspielt, zu beobachten. Dazu stimulierten wir optogenetisch eine starke Neurotransmission und fixierten die Synapsen dann sehr schnell durch Hochdruckgefrieren. Nach weiteren Arbeitsschritten kann man dann die Nanometer-Strukturen an der Synapse im Elektronenmikroskop sichtbar machen (Kittlmann et al. 2013).

Auf diese Weise erhielten wir eine Momentaufnahme der Vorgänge an der Synapse. Wir konnten in zeitlicher Abfolge beobachten, wie synaptische Vesikel entstehen und (durch Fusion) an der Zellmembran wieder verschwinden, und wie sich endozytotische Einstülpungen der Zellmembran bilden und wieder verschwinden. So war es möglich, die Bedeutung einzelner Proteine für diese Vorgänge in genetischen Mutanten zu analysieren und zu verstehen, wie Nervenzellen auf eine extreme Stimulation reagieren, dabei aber trotzdem funktional

Literatur der Gottschalk-Gruppe

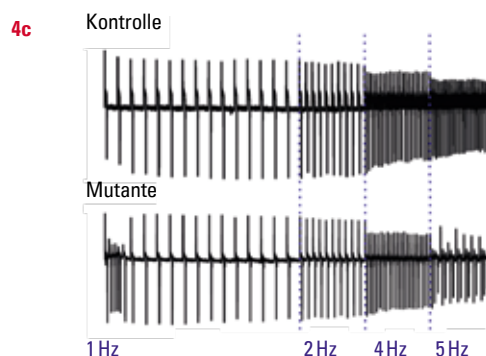
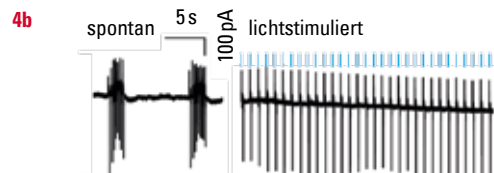
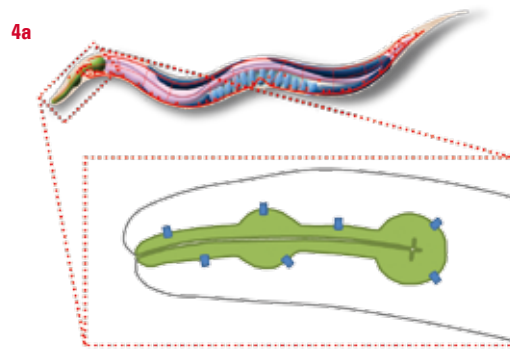
- 1 AzimiHashemi et al. (2014), Synthetic retinal analogues modify the spectral and kinetic characteristics of microbial rhodopsin optogenetic tools Nat Commun 5: 5810.
- 2 Gao, S. et al. (2015), Optogenetic manipulation of cGMP in cells and animals by the tightly light-regulated guanylyl-cyclase opsin CyclOp, Nat Commun 6: 8046.
- 3 Husson, S. J. et al. (2012), Optogenetic Analysis of a Nociceptor Neuron and Network Reveals Ion Channels Acting Downstream of Primary Sensors, Curr Biol 22: 743-752.
- 4 Kittlmann, M. et al. (2013), In vivo synaptic recovery following optogenetic hyperstimulation, PNAS U S A 110: E3007-3016.

bleiben, beziehungsweise sich nach einem epileptischen Anfall erholen können.

Das Fressorgan als Modell für (Herz-)Muskelarrhythmien

Optogenetische Methoden eignen sich auch dazu, Muskelzellen zu stimulieren. Wir haben dies ausgenutzt, um ein Modell für bestimmte Formen genetischer Herzarrhythmien zu erzeugen. Beim Timothy-Syndrom sind die Aktionspotenziale des Herzens verlängert und somit auch die Herzschlagdauer, was bei hoher Beanspruchung wie körperlicher Belastung zu Herzarrhythmien führt und im schlimmsten Fall mit einem Herzstillstand endet. Ursache dafür sind Mutationen, die zur Überaktivität eines bestimmten Ionenkanals führen. Es handelt sich um den spannungsabhängigen Ca^{2+} -Kanal vom L-Typ (Cav1.2), der die Länge des kardialen Aktionspotenzials regelt.

Als Modell verwendeten wir das Fressorgan des Fadenwurms, den Pharynx. Es besteht aus einer rhythmisch aktiven Muskelgruppe, die ähnlich wie das Herz von Säugetieren funktioniert. Wir konnten den Pharynx von *C. elegans* mithilfe von Channelrhodopsin in eine regelmäßig »schlagende« Pumpe verwandeln und Mutationen im analogen Ca^{2+} -Kanal von *C. elegans* (EGL-19) einbringen. Tatsächlich erzeugen Mutationen, die dem Timothy-Syndrom entsprechen, im Pharynx von *C. elegans* eine verlängerte Kontraktionsdauer, und bei erhöhten



Der Pharynx von »C. elegans«, eine rhythmische Muskelpumpe, dient als Modell für Herzarrhythmien

4a »C. elegans« (schematisch), mit dem Pharynx im Kopf des Tieres, einer Muskelpumpe, die zum Fressen von Bakterien dient.

4b Elektrische Aufzeichnung spontaner Pumpaktivität, im Vergleich zu lichtstimulierter (über Kanalrhodopsin; blaue Fässchen in A) Pumpaktivität (blaue Striche markieren die Lichtpulse).

4c Die Kontrolle zeigt die Reaktion des gesunden Wurms. Unten ein »kranker« Wurm mit defektem Kalzium-Kanal, der bei hohen Frequenzen unregelmäßig pumpt.



Der Autor

Prof. Dr. Alexander Gottschalk, 46, kam Ende 2003 als Juniorprofessor für Biochemie nach Frankfurt. 2010 wurde er als Heisenbergprofessor für Molekulare Zellbiologie und Neurobiochemie berufen. Seit 2015 hat er eine ordentliche Professur inne. Er lehrt im Studiengang Biochemie die Fächer Neurobiologie und Zellbiologie. Seine Arbeit wird durch den Exzellenzcluster Makromolekulare Komplexe (CEF-MC) gefördert. Die Arbeitsgruppe ist im Buchmann Institut für Molekulare Lebenswissenschaften (BMLS) lokalisiert.

a.gottschalk@em.uni-frankfurt.de

Schlagfrequenzen kam es zu arrhythmischem Verhalten. Der in *egl-19* mutierte Pharynx pumpt dann zum Beispiel nur mit 2 Hertz, obwohl eine Pumprate von 4 Hertz vorgegeben wird, was der Wildtyp problemlos leisten kann, und teils war ein chaotisches Hin- und Herspringen zwischen ganz unterschiedlichen Pumpraten zu beobachten.

Besonders interessant ist hierbei, dass wir auch potenzielle Pharmaka in diesem Modell testen können: Eine Substanz, die Präparaten zur Behandlung des Timothy-Syndroms ähnelt, indem sie die Funktion des Cav1.2-Kanals herabreguliert, konnte auch im mutierten Pharynx von *C. elegans* eine Verbesserung der Arrhythmien bewirken. Somit könnten in *C. elegans* neue Substanzen identifiziert werden, die maßgeschneidert auf die Effekte bestimmter Mutationen in Cav1.2 wirken, womöglich sogar in patientenspezifischer Weise (Schueler et al. 2015).

Die Optogenetik hat ein enormes Potenzial für zahlreiche Anwendungen in der Grundlagenforschung, insbesondere in kleinen Modellorganismen wie dem Fadenwurm. Inzwischen lassen sich aber auch Anwendungen in der medizinischen Forschung und, bei aller Vorsicht, vielleicht sogar in der Therapie erkennen. ●

5 Liewald, J. F. et al. (2008), Optogenetic analysis of synaptic function, *Nat Methods* 5: 895-902.

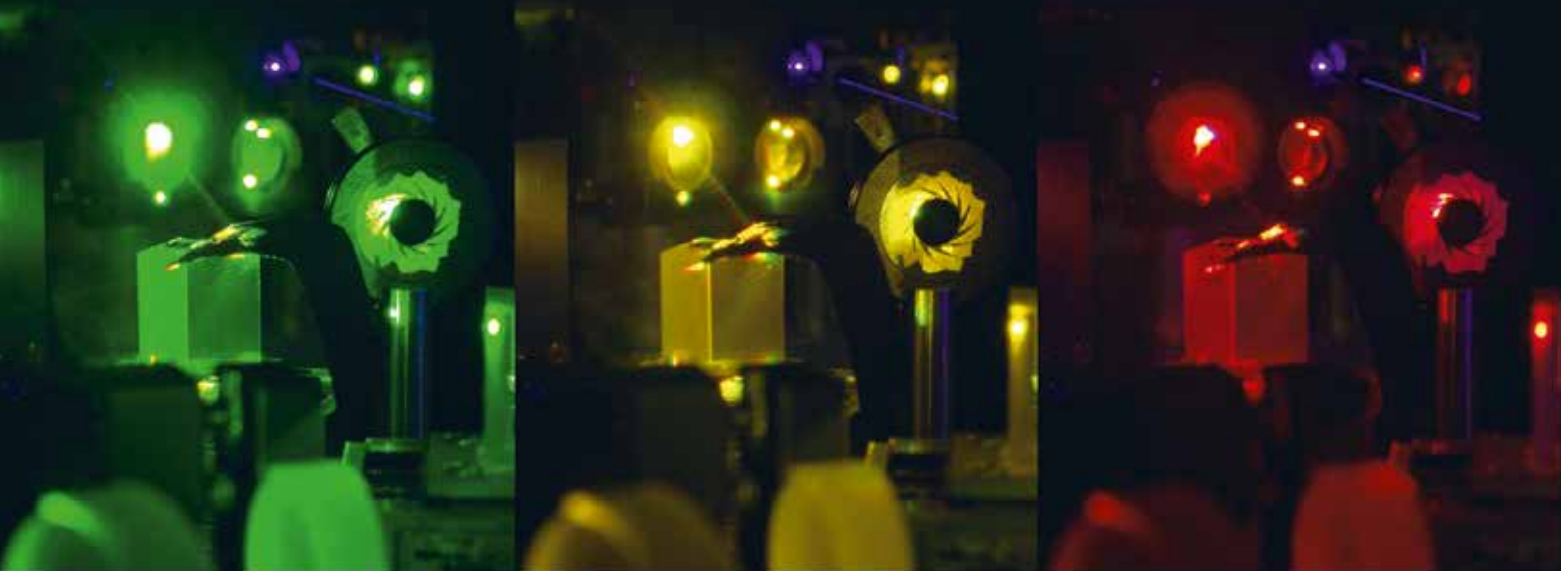
6 Nagel, G. et al. (2005), Light activation of channelrhodopsin-2 in excitable cells of *Caenorhabditis elegans* triggers rapid behavioral responses, *Curr Biol* 15: 2279-2284.

7 Schueler, C. et al. (2015), Arrhythmogenic effects of mutated L-type Ca^{2+} -channels on an optogenetically paced muscular pump in *Caenorhabditis elegans*, *Sci Rep* 5:14427.

8 Stirman, J. N. et al. (2011), Real-time multimodal optical control of neurons and muscles in freely behaving *Caenorhabditis elegans*, *Nat Methods* 8: 153-158.

9 Wabnig, S. et al. (2015), High-Throughput All-Optical Analysis of Synaptic Transmission and Synaptic Vesicle Recycling in *Caenorhabditis elegans*, *PLoS One* 10: e0135584.

10 Zhang, F. et al. (2007), Multimodal fast optical interrogation of neural circuitry, *Nature* 446: 633-639.



Photosynthese verstehen, Photovoltaik verbessern

Anreg-Abtast-Spektroskopie klärt ultraschnelle Umwandlung von Sonnenlicht auf

von Josef Wachtveitl und Markus Braun

Pflanzen, aber auch einige Bakterien und Archäen verfügen über hocheffiziente Mechanismen, Licht in Energie umzuwandeln. Photovoltaik-Zellen reichen an die Perfektion dieser natürlichen Systeme noch lange nicht heran. Deshalb versuchen Forscher, mit ultraschnellen spektroskopischen Methoden der Natur in die Karten zu schauen und von ihr zu lernen.

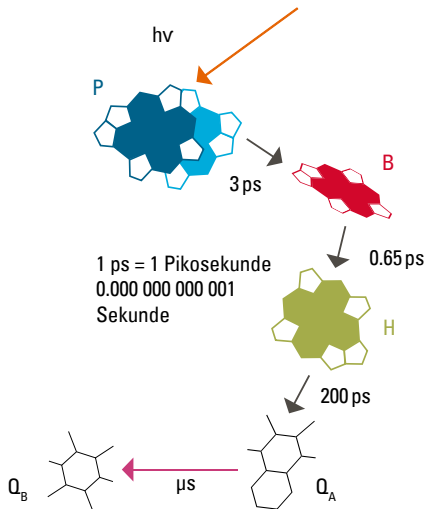
1 Farblich abstimmbares fs-Lasersystem.

Die Energieversorgung für die immer weiter wachsende Weltbevölkerung zu sichern, ist eine zentrale Herausforderung unserer modernen Gesellschaft. Einen wichtigen Beitrag dazu leistet die optimierte Nutzung der Energie, beispielsweise durch effiziente, leichte Speichermedien für Elektroautos, Mobiltelefone oder Laptops. Ebenso wichtig ist der verlustarme und umweltfreundliche Transport zum Verbraucher. Das Hauptaugenmerk liegt aber nach wie vor auf dem Energiesparen, auf effizienteren Prozessen bei der Erzeugung elektrischer Energie in

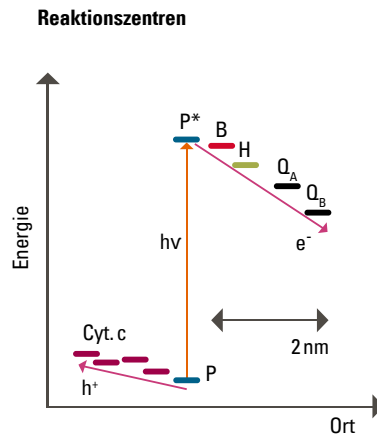
zentralen Großkraftwerken (Gas, Kohle, Kernenergie, Windparks, Wasserkraft) oder lokalen Quellen (Erdwärme, Biogas, Solarthermie, Photovoltaik). Dabei basieren alle regenerativen Energiequellen (mit Ausnahme der Gezeitenkraftwerke und Windparks) letztendlich auf der Energie der Sonne.

Das verlockendste Konzept ist zweifellos die direkte Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie, was in der Photovoltaik inzwischen auch auf großen Flächen in Deutschland realisiert wird. Der typische Wirkungsgrad einer kommerziellen Solarzelle auf Siliziumbasis beträgt circa 20 Prozent und liegt damit weit unter dem Wirkungsgrad biologischer Systeme. Die Evolution hat über viele Millionen Jahre das Konzept der Photosynthese optimiert und an verschiedene Organismen und deren spezifische Lebensbedingungen angepasst. Dabei hat sie zwei grundlegende Konzepte der natürlichen Photosynthese hervorgebracht: die (Bacterio-)chlorophyllbasierten Systeme und die Retinalbasierten Systeme. Die chlorophyllbasierten Systeme zeichnen sich durch eine herausragende

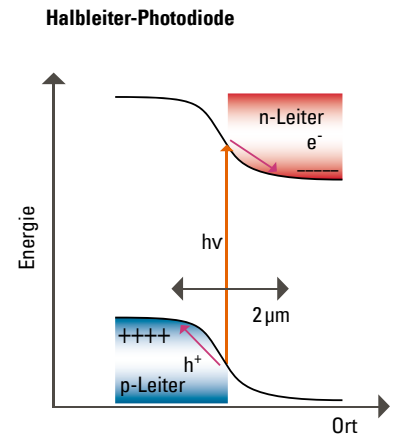
Ladungstransport bei der Photosynthese und in der Solarzelle



2a



2b



2c

Quantenausbeute von nahezu 100 Prozent aus. Die Quantenausbeute der Retinal-basierten Systeme ist mit etwa 60 Prozent etwas geringer, dafür sind sie aber mit ihrem Bauprinzip universell einsetzbar. Diese beiden Hauptgruppen stellen wir im Folgenden kurz vor. Insbesondere erklären wir, durch welche Konzepte die hohen Wirkungsgrade von der Natur realisiert wurden.

Licht trennt Ladungen

Alle künstlichen Photovoltaik- oder biologischen Photosynthese-Systeme basieren auf dem grundlegenden Konzept, Licht in elektrische Energie umzuwandeln: Ein absorbiertes Photon transportiert einen Ladungsträger (Elektron oder Proton) und trägt damit zum Aufbau eines elektrochemischen Potentials über die Zellmembran bei. In der künstlichen Photovoltaik kann die entstehende Spannung direkt benutzt werden, um beispielsweise ein elektrisches Gerät zu betreiben, während sie bei biologischen Organismen zur Synthese energiereicher biochemischer Verbindungen genutzt wird. Die Echtzeitbeobachtung dieser ultraschnellen, lichtinduzierten Ladungstrennung und das daraus resultierende molekulare Verständnis der Photoreaktionen in natürlichen Systemen ist ein zentrales Forschungsthema unserer Arbeitsgruppe.

Dass man diese großen biochemischen Systeme heute versteht, ist maßgeblich der genauen Aufklärung ihrer Struktur zu verdanken. Die wichtigsten experimentellen Methoden sind die Röntgenkristallografie, die Kernspinresonanz und die Elektronenmikroskopie. Diese Methoden sind an der Goethe-Universität und den Frankfurter Max-Planck-Instituten in hervorragender Weise vertreten, nicht zuletzt durch Prof. Hartmut Michel, der für die Röntgen-Struktur-

aufklärung des photosynthetischen Reaktionszentrums von Purpurbakterien zusammen mit Johann Deisenhofer und Robert Huber 1988 den Nobelpreis für Chemie erhielt.

Antennen ernten Licht mit Farbstoffen

Organismen, die chlorophyllbasierte Photosynthese betreiben, findet man fast überall auf der Erde: Sie reichen von Bakterien über Algen bis hin zu höheren Pflanzen. Aus der Vielfalt dieser Systeme stellen wir beispielhaft das bakterielle Reaktionszentrum vor, in dem die eigentliche Umwandlung der Lichtenergie in elektrische Energie stattfindet. Das Reaktionszentrum ist meist umgeben von ausgedehnten Antennenkomplexen, die lichtempfindliche Farbstoffe (Chromophore) enthalten. In diesem Fall sind dies Bacteriochlorophyll (Blattgrün) und die gelb bis rötlich gefärbten Carotinoide. Aufgabe der Antennen ist es, Licht möglichst effektiv zu absorbieren und die elektronische Anregungsenergie schnell zum Reaktionszentrum weiterzuleiten, bevor sie in Form von Fluoreszenz oder als Wärme verloren geht. Tatsächlich geschehen die Energietransferschritte ultraschnell, und zwar in wenigen Pikosekunden ($1 \text{ ps} = 10^{-12}$ Sekunden).

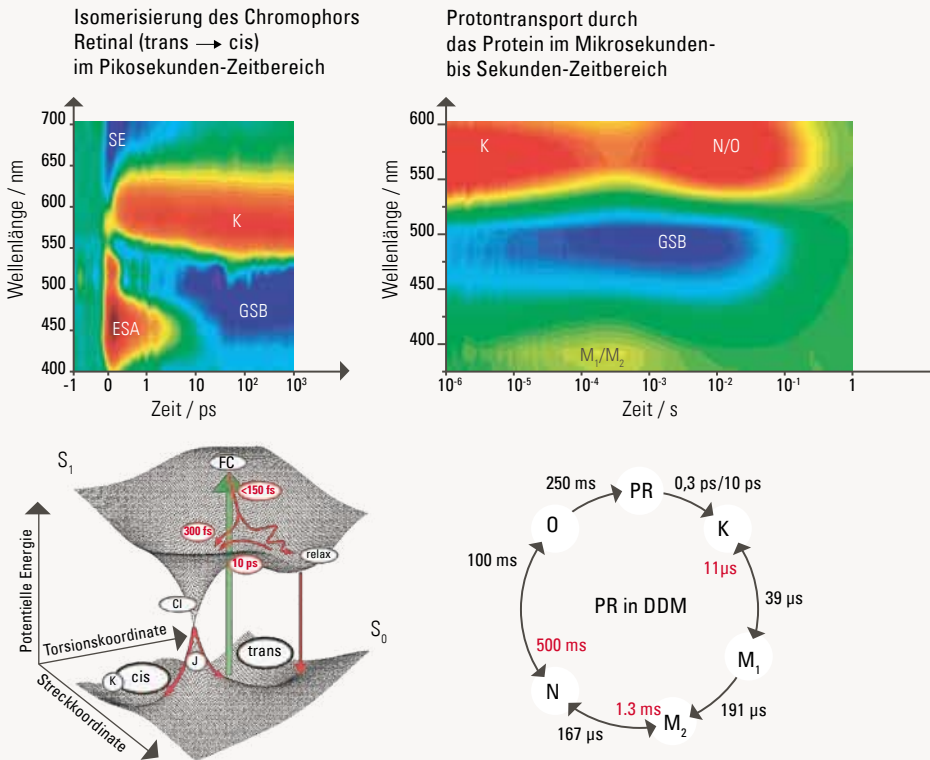
Die eigentliche Ladungstrennung geschieht in der Zellmembran in einem mehrstufigen Prozess (Abb. 2): Zunächst wird die Anregungsenergie vom »special pair«, einem Dimer aus zwei Bacteriochlorophyllmolekülen (P), genutzt, um ein Elektron über mehrere Zwischenstufen auf ein Chinon Q_B zu übertragen. Nach erneuter Belichtung und dem Übertrag eines weiteren Elektrons wird das Chinon protoniert ($Q_B + 2e^- + 2H^+ \rightarrow Q_B H_2$) und verlässt als Hydrochinon das Reaktionszentrum. Ein weiteres Transmembranprotein (in Pflanzen: Cytochrom- b_6/f -Komplex, in Bakterien: Cytochrom- bc_1 -Komplex)

2a Darstellung der räumlichen Anordnung der Chromophore und der Elektrontransferreaktionen im bakteriellen Reaktionszentrum. Nach optischer Anregung des Bacteriochlorophyll-Dimers P (special pair) wird ein Elektron zum Bacteriochlorophyll B, Bacteriopheophytin H, Menachinon QA und schließlich Ubichinon QB transferiert. Nach der Aufnahme von zwei Elektronen und zwei Protonen verlässt dieses als Hydrochinon das Reaktionszentrum.

2b Energetische Absenkung und räumlicher Transport des Elektrons über circa zwei Nanometer im Reaktionszentrum. Die Ladung des positiv geladenen Dimers P wird über das Cytochrom c wieder ausgeglichen, so dass ein Kreisprozess ablaufen kann.

2c Energetische Absenkung und räumlicher Transport des Elektrons über circa zwei Mikrometer in der pn-Sperrschicht einer Photodiode (Solarzelle).

ZEITAUFGELÖSTE VERÄNDERUNG DER ABSORPTION VON PROTEORHODOPSIN



Die Signale sind über zwölf Größenordnungen in der Zeit aufgenommen. Farbcode: rot = Absorptionzunahme, blau = Absorptionsabnahme, grün = keine Absorptionsänderung.

Das Bild links oben zeigt die Messung der zeitaufgelösten Absorption mit der Anreg-Abtast-Spektroskopie. Im Zeitbereich von

Pikosekunden bis Nanosekunden sind vier Signale sichtbar. Unmittelbar mit der optischen Anregung des Proteorhodopsins (PR) bleicht der Grundzustand aus (GSB, ground state bleach). Dadurch entsteht ein negatives Signal. Die stimulierte Emission (SE, negatives Signal) und die induzierte Absorption des angeregten Zustands (ESA, excited state

absorption, positives Signal) sind mit dem optisch angeregten Zustand PR* von Proteorhodopsin verknüpft. Die zeitliche Abnahme dieser Signale mit den Zeitkonstanten 0,3 ps und 10 ps zeigt die Lebensdauer von PR* an. Die Produktabsorption K (positives Signal) steigt mit den Zeitkonstanten 0,3 ps und 10 ps an, wird also direkt aus PR* gebildet.

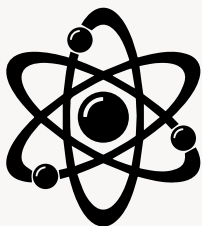
Links unten ist das Energieniveauschema gezeigt, das die optische Anregung und den biexponentiellen Zerfall des angeregten Zustands von Proteorhodopsin verdeutlicht. Beim Übergang in den Grundzustand durch die sogenannte konische Durchschneidung (CI, conical intersection) trennt sich die Population auf, die entweder in den cis-Zustand (K) reagiert oder in den trans-Zustand zurückkehrt. Da nur der cis-Zustand (60 Prozent der angeregten Moleküle) den Photozyklus durchläuft, liegt die Effizienz bei 0,6 gepumpten Protonen pro einfallendem Photon.

Die Messung der zeitaufgelösten Absorption mit der Blitzlicht-Photolyse ist rechts oben zu sehen: Man erkennt neben dem bereits auf der Kurzzeitskala sichtbaren GSB-Signal Absorptionsänderungen, die typisch für die Zwischenprodukte K, M₁, M₂, N und O sind. Aus diesen Daten lassen sich die Bildungs- und Zerfallszeiten der Zwischenprodukte entnehmen. Diese Zwischenprodukte entsprechen den Stufen des Protonentransports durch das Protein.

Der komplette Photozyklus von Proteorhodopsin ist unten rechts dargestellt. Die Doppelpfeile symbolisieren Reaktionen, bei denen auch die Rückreaktion berücksichtigt werden muss.

ZEITSKALEN DYNAMISCHER PROZESSE

Elektronenbewegung



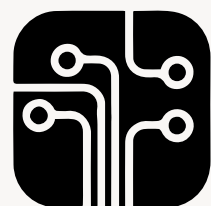
10⁻¹⁵ s
(femto, f)

Molekülschwingung



10⁻¹² s
(piko, p)

Schnelle Digitalelektronik



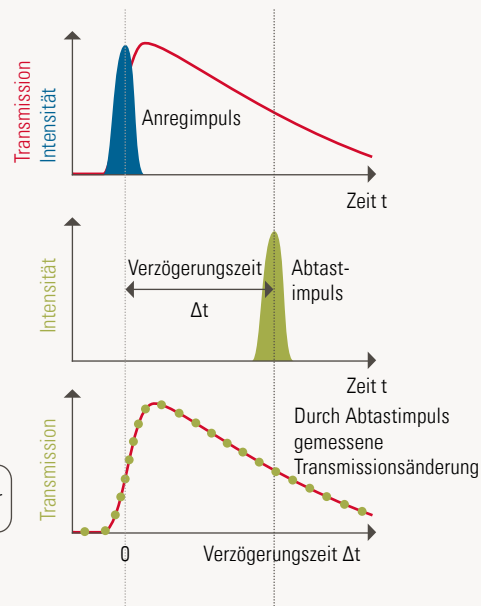
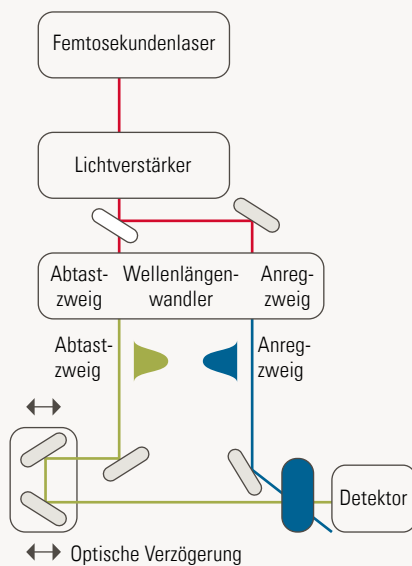
10⁻⁹ s
(nano, n)

ANREG-ABTAST-SPEKTROSKOPIE

Mit der Anreg-Abtast-Spektroskopie lässt sich der zeitliche Verlauf einer schnellen Reaktion verfolgen, die mit Licht ausgelöst werden kann (zum Beispiel die Photosynthese). Die Reaktion könnte dabei durchaus mehrstufig über (kurzlebige) Zwischenprodukte verlaufen, die schnell weiterreagieren, etwa $A \rightarrow A^* \rightarrow B \rightarrow C$. In diesem Beispiel wird das Edukt A über Lichtabsorption in den angeregten Zustand A^* gebracht, dann wird mit der Halbwertszeit τ_1 das Zwischenprodukt B gebildet, dieses reagiert mit der Halbwertszeit τ_2 weiter zum finalen Produkt C. Alle diese Produkte A, A^* , B und C haben im Allgemeinen unterschiedliche Absorptionsspektren. Liegt die Zeit für einen der Reaktionsschritte im Bereich von Nanosekunden ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ Sekunden) oder kürzer, kann man den Reaktionsverlauf mit schnellen elektronischen Detektionsmethoden nicht mehr ohne Weiteres messen. Hier wird die Anreg-Abtast-Spektroskopie angewendet.

Das Anreg-Abtast-Spektrometer stellt dem Experimentator zwei ultrakurze Laserpulse (typischerweise mit einer Pulslänge von $t_{\text{puls}} < 100 \text{ fs}$) zur Verfügung, welche in ihrer Farbe unabhängig veränderbar sind und deren zeitlicher Abstand Δt zwischen 0 fs und 1 ns frei wählbar ist. Beide Pulse werden auf die zu untersuchende Probe (mit Edukt A) eingestrahlt.

Der erste Laserpuls ist typischerweise sehr energiereich und so gewählt, dass er vom Edukt A absorbiert wird und eine große Menge des angeregten Produkts A^* entsteht.



Eine gewisse Zeit Δt später wird der zweite Laserpuls (typischerweise spektral breit und viel schwächer als der erste Puls) auf die Probe eingestrahlt und das transmittierte Licht mit einem Spektrometer aufgezeichnet. Dadurch wird das Absorptionsspektrum der Probe zum Zeitpunkt Δt nach Reaktionsbeginn aufgenommen.

Dieses Experiment wird nun mit einer frischen, identischen Probe wiederholt, aber mit einer anderen zeitlichen Verzögerung Δt . Setzt man alle diese Experimente zusammen, hat man den zeitlichen Verlauf der Reaktion nachgewiesen.

Durch diese Herangehensweise ist die zeitliche Auflösung der Daten nicht durch die Geschwindigkeit der verwendeten Messelektronik begrenzt, sondern sie wird von der Kürze der verwendeten Laserpulse bestimmt. Derselbe Trick wird bei der Beobachtung eines Objekts mit einem Stroboskop oder einer Kamera mit Blitzlicht verwendet: Der jeweilige Detektor (beim Stroboskop das Auge, bei der Kamera der Film beziehungsweise CCD-Chip) ist relativ träge, aber durch die Beleuchtung der Szenerie mit einem kurzen intensiven Lichtblitz wird das Objekt nur in diesem Moment aufgezeichnet.

Explosion



10^{-6} s
(mikro, μ)

Schnelle
Kameraverschlüsse



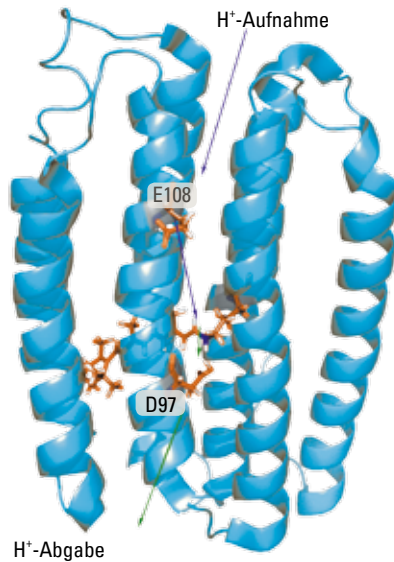
10^{-3} s
(milli, m)

Uhren



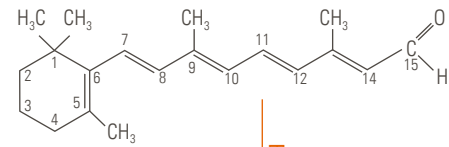
10^0 s

3a Struktur der lichtgetriebenen Protonenpumpe Protorhodopsin, die von sieben Helices stabilisiert wird. Der Transfer der Protonen von der intrazellulären Seite (oben) zur extrazellulären Seite (unten) ist durch Pfeile markiert. Der Chromophor Retinal sitzt zentral im Protein. Es ist die lange, in der Mitte von einer Helix verdeckte Struktur. Zur Verdeutlichung ist das Retinal rechts noch einmal dargestellt.



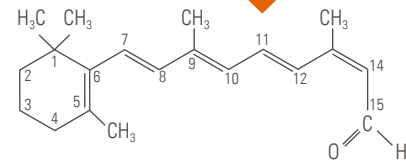
3a

all- trans Retinal



Belichtung

13- cis Retinal



3b

3b Auslöser des Protonentransfers ist die lichtgetriebene Isomerisierung des Retinals von der gestreckten all-trans-Form in die gewinkelte 13-cis-Form.

baut mit diesem Hydrochinon den Protonengradienten über die Membran auf. Der Elektronenfluss ist dabei zyklisch, das heißt, die Elektronen werden über redoxaktive Proteine wieder auf das Reaktionszentrum zurückübertragen.

Die Einzelschritte, das heißt die Zwischenprodukte und deren Bildungs- und Zerfallsraten, sind in den letzten 30 Jahren durch verschiedene experimentelle Methoden aufgeklärt worden. Bei den hier relevanten ultraschnellen Reaktionen nimmt die Methode der Anreg-Abtast-Spektroskopie mit ultrakurzen Lichtimpulsen im Zeitbereich weniger Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15}$ Sekunden) eine zentrale Stellung unter den experimentellen Methoden ein [siehe Kasten »Anreg-Abtast-Spektroskopie«, Seite 53].

Schnelligkeit vermeidet Verluste

Um zu verstehen, warum die Ladungstrennung bei der Photosynthese mit hoher Effizienz und nahezu verlustfrei abläuft, nimmt man die Marcus-Theorie zu Hilfe. Sie erklärt die ultraschnellen Elektrontransferprozesse damit, dass eine vollständige Ladungstrennung nur ablaufen kann, wenn jegliche Rückraten vermieden werden. Im Reaktionszentrum wird dies durch einen sehr schnellen Ladungstransfer erreicht: Er geschieht über zwei Zwischenstufen

(zum Bacteriochlorophyll in 3 ps und weiter zum Bacteriopheophytin in 0,65 ps). Gleichzeitig wird dabei die elektronische Energie abgesenkt. Dadurch wird das Elektron sofort räumlich vom »special pair« P getrennt, so dass es nicht »zurückkehren« (rekombinieren) kann. Weitere Elektrontransfer-Schritte können dann vergleichsweise langsam ablaufen; zum ersten Chinon Q_A innerhalb von 200 ps und zum terminalen Akzeptor Q_B innerhalb von Mikrosekunden ($1 \mu\text{s} = 10^{-6}$ Sekunden).

Die Natur hat im Laufe der Evolution diesen grundlegenden Mechanismus viele Male abgewandelt und optimiert. So existieren leicht veränderte Versionen dieses Photosystems für viele Organismen. Sie sind durch Variation der Struktur an die Umgebungsparameter des jeweiligen Organismus angepasst. Einerseits finden wir das Photosystem in Schwefelbakterien, die in Meerestiefen zwischen 80 und 120 Metern leben und durchschnittlich nur 0,001 Prozent der Sonneneinstrahlung erhalten. Andererseits haben viele Organismen auch Schutzmechanismen entwickelt, um bei zu hoher Sonneneinstrahlung nicht durch Oxidation geschädigt zu werden [siehe Claudia Büchel, »Photosynthese zwischen Überfluss und Mangel«, Seite 57]. Auch hier ist die Kurzzeitspektroskopie die Schlüsseltechnologie zur Aufklärung der molekularen Abläufe: Im »Xanthophyll-Zyklus« wird ein Carotinoid im Antennensystem so modifiziert, dass es vom Lichtsammelpigment in eine »Energiesenke« verwandelt wird. Das neue Carotinoid kann Energie vom photoangeregten Zustand des Chlorophylls aufnehmen. Bei diesem Energietransfer wird die überschüssige Energie wegen der extrem kurzen Lebensdauer des angeregten Zustands im Carotinoid effizient in

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die natürlichen Systeme zur Photosynthese basieren einerseits auf dem Blattgrün Chlorophyll und Carotinoiden, andererseits auf Rhodopsinen, die mit dem menschlichen Sehpigment verwandt sind.
- Photoreaktionen laufen in mehreren, teilweise sehr schnellen Zwischenschritten ab. Sie können mit der Anreg-Abtast-Spektroskopie aufgeklärt werden, die ähnlich wie ein Stroboskop funktioniert.
- Eine technische Alternative zur Photovoltaik auf Siliziumbasis ist die Grätzelzelle, die, ähnlich der Photosynthese, Farbstoffmoleküle verwendet.

Wärme umgewandelt. Das schädliche Chlorophyll-Triplet ($^3\text{Chl}^*$) kann daher trotz hoher Lichtintensität nicht gebildet werden. So wird verhindert, dass hochreaktive Sauerstoffspezies entstehen, die zur Schädigung wichtiger Zellbestandteile wie Fettsäuren, Membrane, Proteine oder DNA führen.

Alternativen zur siliziumbasierten Solarzelle

Die kommerzielle Nutzung der Ladungstrennung nach Lichtabsorption wird derzeit durch die klassischen kristallinen Halbleitersolarzellen oder Dünnschichtsolarzellen dominiert. Parallel dazu werden vielversprechende neue Konzepte zur künstlichen Photosynthese erforscht, die auf der Kombination von nanokristallinen Materialien mit Farbstoffmolekülen basieren. Hier ist das vielleicht bekannteste Beispiel die Grätzelzelle. Diese photochemische Photovoltaikzelle besteht aus einem gesinterten, porösen Film aus Titandioxid (TiO_2), an dem Farbstoffmoleküle (oft Rutheniumfarbstoffe) angelagert sind, und einem Elektrolyt. Nach Lichtabsorption wird ein Elektron vom angeregten Chromophor zur TiO_2 -Schicht transferiert, sodass sich ein elektrisches Potenzial zwischen den beiden Elektroden aufbaut. Der Elektrolyt gleicht die Ladung des ionisierten Chromophors wieder aus, womit der Stromkreis geschlossen ist. Die Grätzelzelle orientiert sich an der Photosynthese. Aber obwohl der primäre Elektrontransfer sogar noch schneller ist als in der Natur, gilt es, den Wirkungsgrad und die Langzeitstabilität noch zu verbessern.

Basierend auf diesem Konzept können nun die Materialien variiert werden. Insbesondere ist es möglich, die Chromophore durch Halbleiternanopartikel zu ersetzen, welche sehr stabil gegen Photodegradation sind. In unserer Gruppe werden aktuell Quantenpunkte auf ihre Eignung für diesen Einsatz getestet. Ein weiteres spannendes Projekt ist die Verwendung von Photoschaltern an der Oberfläche von TiO_2 -Kolloiden für den lichtkontrollierbaren Ladungstransfer.

Warum ist die Effizienz der künstlichen Systeme deutlich geringer? Bei Silizium-Photozellen ist die ungewollte Rekombination der Ladungsträger, zum Beispiel an Störstellen des Halbleitermaterials, eine der Hauptursachen für Verluste. Das kann man zwar durch die hohe Reinheit des Halbleitermaterials vermeiden, aber dadurch erhöhen sich die Herstellungskosten. Die Ladungsträger (Elektronen und Löcher) müssen außerdem über eine Distanz von einigen Mikrometern getrennt werden, während es in natürlichen Systemen nur wenige Nanometer sind (Abb. 2). Zudem verläuft die Energieabsenkung der Ladungsträger in künstlichen Systemen kontinuierlich. Im Vergleich dazu geschieht die Ladungsträgertrennung der chlorophyllbasierten Photosynthese über vier diskrete Zwi-

schenschichten ultraschnell und mit optimierter Energieabsenkung. Dies verhindert den Verlust durch Rekombination fast vollständig.

Rhodopsine: Licht verändert die Struktur

Neben der chlorophyllbasierten Photosynthese, die auf Elektrontransfer als primärer Photoreaktion beruht, hat die Natur noch ein weiteres, völlig unabhängiges Konzept entwickelt: Bei mikrobiellen Rhodopsinen (die gewisse strukturelle Ähnlichkeiten mit unserem Sehpigment Rhodopsin aufweisen) führt Belichtung zu einer Isomerisierung des Chromophors Retinal. Das heißt, es liegt dann in einer unterschiedlichen räumlichen Anordnung vor. Anschließend werden Protonen über die Membran transferiert.



Die Autoren

Privatdozent Dr. Markus Braun, 45, studierte Physik an der Universität Bayreuth und promovierte an der Universität Stuttgart. Nach einem Postdoktorat am Georgia Institute of Technology habilitierte er sich an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2009 ist er als Akademischer Oberrat am Institut für Physikalische und Theoretische Chemie tätig. Er interessiert sich für Entwicklung von Kurzzeiterquellen und für Anwendungen in der Spektroskopie von Molekülen und Festkörpern.

braun@theochem.uni-frankfurt.de

Prof. Dr. Josef Wachtveitl, Jahrgang 1960, studierte Physik an der Universität Regensburg und promovierte am Max-Planck-Institut für Biochemie in Martinsried. Er habilitierte sich an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seit 2000 ist er Professor für Physikalische Chemie an der Goethe-Universität. Seine Arbeitsschwerpunkte sind die zeitaufgelöste biomolekulare Spektroskopie, die Struktur und Funktion von Photorezeptoren, die Konformationsdynamik von Biopolymeren sowie natürliche und künstliche photosynthetische beziehungsweise photoschaltbare Systeme.

wveitl@theochem.uni-frankfurt.de

www.theochem.uni-frankfurt.de/femtochem

Bacteriorhodopsin wurde als das erste biologische System dieser Art vor über 40 Jahren im Archaeobakterium *Halobacterium salinarum* entdeckt.

Der transmembrane Protontransfer erfolgt vom Zellinneren nach außen und führt zu einem elektrochemischen Gradienten über die Membran. Interessant ist, dass die Konformationsänderungen des Chromophors in einem Zyklus ablaufen: Nach Absorption von Licht wird Retinal durch Photoisomerisierung von seiner gestreckten all-trans- in seine gewinkelte 13-cis-Konfiguration überführt. Dadurch wird eine Reihe von Reaktionsschritten im Protein ausgelöst, deren Dauer von 500 fs bis in den Bereich von Millisekunden reicht. Auch diese Prozesse wurden durch zeitaufgelöste optische Spektroskopie im Detail aufgeklärt.

In der letzten Dekade hat sich das Spektrum der bekannten Rhodopsine rasant erweitert. Mittlerweile kennt man Vertreter dieser Proteinfamilie mit unterschiedlichen Funktionen in allen drei Domänen des Lebens. Proteobakterien sind beispielsweise Organismen, die ihre Energie aus Licht beziehen und eine wichtige Rolle in marinen Ökosystemen spielen. Ihre Photorezeptoren, die Proteorhodopsine, fungieren ähnlich wie Bacteriorhodopsin als lichtgetriebene Protonenpumpen (Abb. 3). Durch die Kombination verschiedener biophysikalischer Methoden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 807

konnte in Frankfurt die Funktionsweise von Proteorhodopsin im Detail aufgeklärt werden [siehe »Zeitaufgelöste Veränderung der Absorption von Proteorhodopsin«, Seite 52].

Die mikrobiellen Rhodopsine sind auch aus einem weiteren Grund ein faszinierendes Studienobjekt: Ausgehend von einer sehr gut konservierten Grundstruktur (7-TM-Helix-Motiv) kann die Funktion des Proteins durch minimale Variationen dramatisch geändert werden: Aus einer Pumpe wird ein Sensor oder ein Ionenkanal. Der prominenteste Vertreter der letzten Klasse ist sicherlich das Channelrhodopsin 2 (ChR2), ein lichtgetriebener Kationenkanal. Seine Fähigkeit, bei Belichtung die Membran jeder ChR2 exprimierenden Zelle zu depolarisieren, hat dieses Algenrhodopsin zum Hauptwerkzeug der Optogenetik gemacht [siehe Ernst Bamberg: »Licht steuert Nervenzellen mit höchster Präzision«, Seite 42]. Dort wird es beispielsweise eingesetzt, um Aktionspotenziale in neuronalen Zellen durch die Einstrahlung von Licht auszulösen [siehe Alexander Gottschalk: »Ein kleiner Wurm ist Liebling der Optogenetiker«, Seite 46]. Interessanterweise ist der genaue Mechanismus der Kopplung zwischen dem Lichtrezepterteil und dem Ionenkanalteil in ChR2 noch nicht vollständig verstanden und wird daher im Zentrum unserer zukünftigen Forschungsinteressen stehen. ●

– Anzeige –

Frankfurt am Main Meeting Point



Sie forschen – wir vermitteln

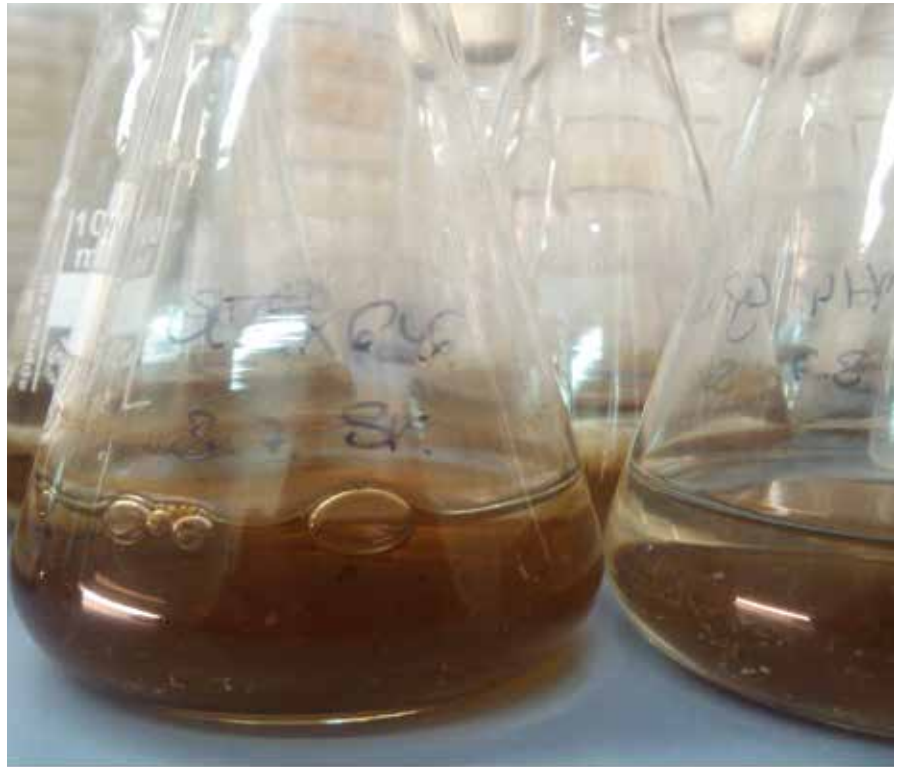
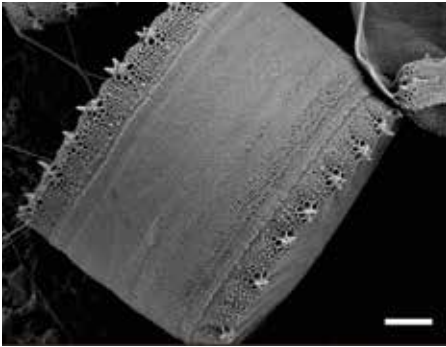
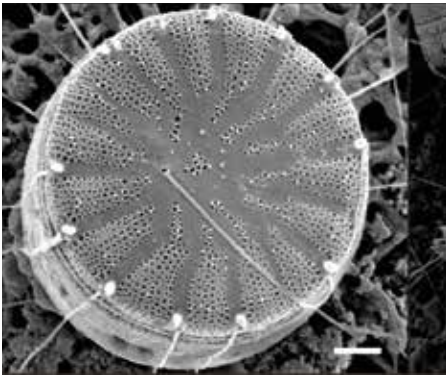
- ... Hotelzimmer
- ... Veranstaltungsräume
- ... Rahmenprogramme
- ... und wir unterstützen Sie bei Ihrer Kongressbewerbung

Frankfurt Convention Bureau

Tourismus+Congress GmbH Frankfurt am Main
Kaiserstraße 56, 60329 Frankfurt am Main
Tel. 069/21 23 87 03, Fax 069/21 23 07 76
congress@infofrankfurt.de



www.frankfurt-convention-bureau.de



Photosynthese zwischen Überfluss und Mangel

Wie Kieselalgen sich Lichtintensitäten anpassen

von Claudia Büchel

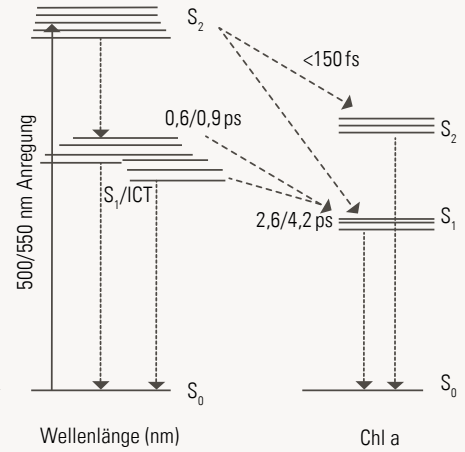
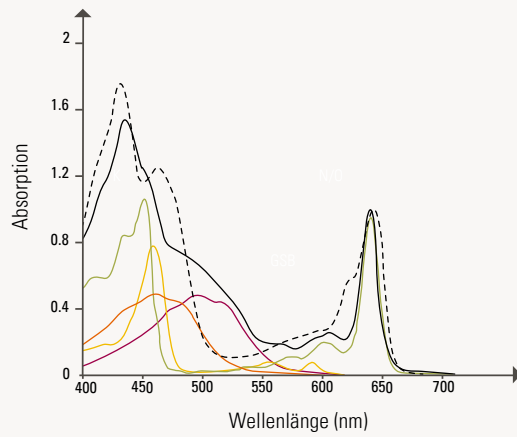
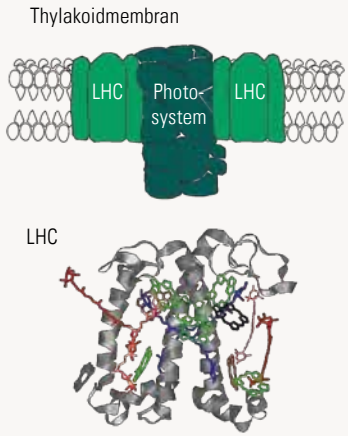
Kieselalgen können auf hocheffiziente Weise Energie aus dem Sonnenlicht gewinnen. So überleben sie selbst lange Dunkelphasen im Meer. Doch wie schützen sie sich vor zu viel Strahlung, wenn Wind und Strömung sie in seichtes Wasser oder an die Oberfläche treiben? Dahinter steckt ein cleverer Regulations-Mechanismus.

Kieselalgen (Diatomeen) nutzen – wie alle photosynthetischen Organismen – Licht zur Energiegewinnung. Im Anzuchttraum erscheinen die im Wasser lebenden Einzeller als unattraktive braune Brühe, doch unter dem

Mikroskop sind sie durch ihre ornamentalen Silikatschalen durchaus reizvoll (Abb. 1). Wissenschaftlich sind sie hochinteressant: Diatomeen sind zellkernhaltige Organismen (Eukaryoten) und besitzen dementsprechend Chloroplasten für die Photosynthese. In Pflanzen stammen Chloroplasten direkt von Cyanobakterien ab. Man geht davon aus, dass die photosynthetischen Bakterien vor langer Zeit in die Zelle aufgenommen und nicht verdaut, sondern in ihren Stoffwechsel integriert wurden. Seitdem dienen sie als Chloroplasten.

Bei Diatomeen war der aufgenommene Symbiont kein Bakterium, sondern schon ein Eukaryot, der Chloroplasten besaß. Von diesem ist allerdings außer seinem Chloroplasten nicht mehr

1 Diatomeen in Kultur (links) und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, die die Silikatschalen einer Diatomeen, (hier »cyclotella meneghiniana«) zeigen (rechts). Die Skalierungsmarker entsprechen 1 Mikrometer.



2a Die Lichtsammel-Komplexe (LHC) sind in der Thylakoidmembran um die Photosysteme angeordnet (oben). Hier ist eines der beiden Photosysteme exemplarisch gezeigt. Dank der räumlichen Nähe wird die Lichtenergie optimal auf die Photosysteme übertragen. Die untere Abbildung zeigt ein molekulares Modell der Lichtantennenkomplexe der Diatomeen (angelehnt an die LHC höherer Pflanzen, Liu et al., 2004), in dem das Protein (grau), die Carotinoide (hier blau und rot) und die Chlorophyllen dargestellt sind.

2b Absorptionsspektren der Lichtsammel-Komplexe von Diatomeen (schwarze Linie) und des gebundenen Chl a (grün) und Chl c (gelb) sowie von zwei verschiedenen gebundenen Fucoxanthin-Molekülen (orange und braun). Zum Vergleich ist das Absorptionsspektrum der Lichtantennen (LHC) von Pflanzen (gestrichelte Linie) eingezeichnet. Durch die Bindung von Fucoxanthin an die Lichtsammelkomplexe absorbieren Diatomeen wesentlich besser im Bereich des grünen Lichtes (von 520–560 Nanometern). Dafür besitzen höhere Pflanzen kein Pigment.

2c Schematische Darstellung der Energieebenen (S₀, S₁, S₂) der Pigmente Fucoxanthin und Chl a. Nach Anregung mit Licht gelangen die Elektronen zunächst in das S₂-Niveau von Fucoxanthin (durchgezogener Pfeil). Von dort aus wird ein großer Teil der Energie innerhalb kürzester Zeit auf die S₂- und S₁-Niveaus von Chl a übertragen (gestrichelte Pfeile) (nach Gildenhoff et al., 2010). Der Energietransfer steht in Konkurrenz zu anderen Relaxationsprozessen wie Fluoreszenz- und Wärmeabgabe (gepunktete Pfeile).

viel übrig. Aufgrund ihrer unterschiedlichen Evolution sind Diatomeen mit Pflanzen nicht viel enger verwandt als mit Tieren oder Pilzen. Ökologisch sind sie hochrelevant: Von den weltweit jährlich ungefähr 100 Milliarden Tonnen Kohlendioxid, die durch photosynthetische Organismen gebunden werden, fixieren sie circa 25 Prozent (Field et al., 1998). Dabei liegt ihre Größe mit 10 bis 50 Mikrometern im Bereich eines menschlichen Haars. Die kleineren Vertreter sind gerade mal so groß wie pflanzliche Chloroplasten.

Diatomeen haben andere Pigmente als Pflanzen
 Wie schaffen Diatomeen diese Leistung? Erstens natürlich durch die schiere Masse ihres Vorkommens. Diatomeen besiedeln mit einer hohen Artenzahl (nach Schätzungen um die 10.000) sehr verschiedene Lebensräume – vom Meer bis zum Süßwasser, vom freien Wasser bis zu festem Untergrund. Zweitens ist die Art ihrer Energiegewinnung durch die Photosynthese bestimmt, die sie unter anderem durch schnelle Regulationsmechanismen extrem effizient gestalten. Die basalen Reaktionen der Photosynthese ähneln dabei denen der Pflanzen: Die Lichtenergie wird von Pigmenten absorbiert, die an sogenannte Lichtsammelproteine (Light har-

vesting complexes, LHC) gebunden sind, und wird von dort an die beiden Photosysteme weitergeleitet (Abb. 2). In Photosystem I und II wird die Lichtenergie in chemische Energie umgewandelt, die wiederum zum Aufbau von Zellbestandteilen dient.

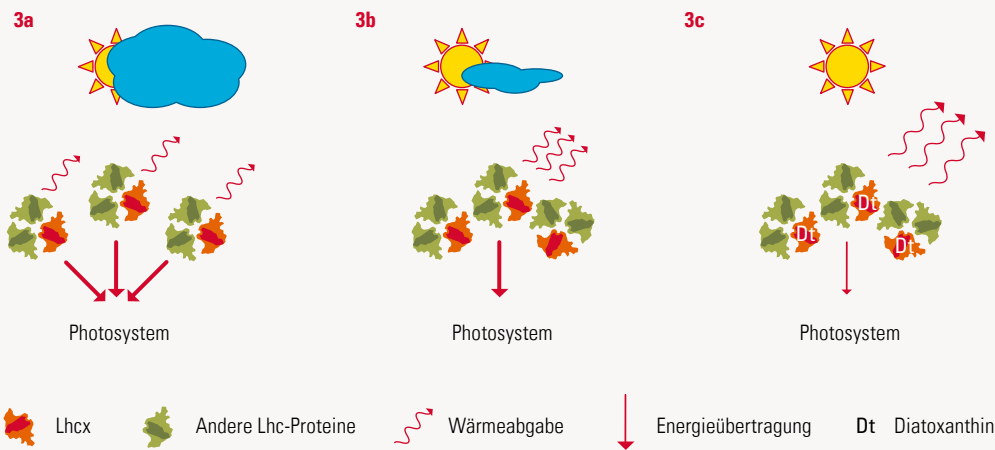
Die bräunliche Erscheinung der Diatomeen hängt mit den LHC und deren Pigmentierung zusammen: Während Pflanzen hier Chlorophyll a und b aufweisen, binden Diatomeen Chlorophyll a und c. Letzteres absorbiert mehr blaugrünes Licht (Abb. 2). Der größte Unterschied liegt aber darin, dass Diatomeen mehr orange Farbstoffe besitzen, sogenannte Carotinoide. Sie erweitern das Spektrum des absorbierbaren Lichtbereichs, den Diatomeen zur Energiegewinnung nutzen können. Hier ist es vor allem Fucoxanthin, welches über die Hälfte des Carotinoidgehaltes von Diatomeen ausmacht und als Antioxidans vor allem in Asien als Nahrungsergänzung verwendet wird.

Diatomeen können sich nicht zum Licht bewegen

Diatomeen können sich nicht, wie manche anderen Algen, zum Licht hin bewegen oder sich ihm entziehen. Sie sind auf Strömungen angewiesen,

Literatur

- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P, Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components, *Science* 281(5374), 237–240 (1998).
- Gundermann, Kathi, Büchel, Claudia, Structure and functional heterogeneity of fucoxanthin-chlorophyll proteins in diatoms, in: *The structural basis of biological energy generation, Advances in photosynthesis and respiration including bioenergy and related processes*, Vol. 39, Hohmann-Marriott MF (ed.), Springer, Dordrecht/Heidelberg/New York/London, 21–37 (2014).
- Gundermann K, Büchel C, Factors determining the fluorescence yield of fucoxanthin-chlorophyll complexes (FCP) involved in non-photochemical quenching in diatoms, *Biochim. Biophys. Acta* 1817(7), 1044–1052 (2012).
- Juhas, Matthias, von Zadow, Andreas, Spexard, Meike, Schmidt, Matthias, Kottke, Tilman, Büchel, Claudia, A novel cryptochrome in the diatom *Phaeodactylum tricorutum* influences the regulation of light-harvesting protein levels, *FEBS J.* 281(9), 2299–2311 (2014).
- Gildenhoff N, Amarie S, Gundermann K, Beer A, Büchel C, Wachtveitl J, Oligomerization and pigmentation dependent excitation energy transfer in fucoxanthin-chlorophyll proteins, *Biochim. Biophys. Acta* 1797(5), 543–549 (2010).
- Liu Z, Yan H, Wang K, Kuang T, Zhang J, Gui L, An X, Chang W, Crystal structure of spinach major light-harvesting complex at 2.72 Å resolution, *Nature* 428(6980), 287–292 (2004).



3 Vereinfachtes Modell der Lichtsammlung (a) und des Lichtschutzes (b und c) in Diatomeen. Die Lichtsammelkomplexe enthalten ein Protein, Lhcx, welches für den Lichtschutz essenziell ist (rot). Unter schwacher Lichteinstrahlung (a) ist die Energieweiterleitung innerhalb der LHC und auf die Photosysteme (gerade Pfeile) sehr effizient. Trifft zu viel Licht auf die Algen, lagern sich die LHC zusammen (b), was die Energieübertragung auf die Photosysteme reduziert, indem die Wärmeabgabe (geschwungene Pfeile) erhöht wird. Zudem wird Diatoxanthin synthetisiert und eingelagert (c), was die Effekte verstärkt und zudem ein »Gedächtnis« für spätere Lichtstresssituationen darstellt.

können absinken oder vom Wind verdriftet werden. Dadurch haben gerade marine Diatomeen mit sehr unterschiedlichen Lichtbedingungen zu leben: Einerseits können Dunkelphasen sehr

lange dauern und andererseits sind sie nach einem Transport an die Wasseroberfläche durch hohe Lichtintensitäten gefährdet. Diatomeen brauchen also einerseits eine extrem hohe Lichtabsorptionsfähigkeit, wenn sie sich in größeren Tiefen aufhalten, und andererseits einen extrem guten Lichtschutz, um sich vor plötzlichem Überangebot an Lichtenergie zu schützen. Diese beiden Fähigkeiten erlauben ihre hohe Effizienz. Wie ist nun die schnelle Regulationsfähigkeit der Photosynthese in Diatomeen strukturell begründet? Wie erreichen sie, dass immer die passende Lichtenergiemenge von den LHCs auf die Photosysteme übertragen wird?

Bei der Erforschung der Lichtsammelproteine der Diatomeen haben wir herausgefunden, dass Diatomeen sehr effektive Lichtfänger (LHC) besitzen. Wie bei den LHC der Pflanzen handelt es sich um Membranproteine, in die Pigmente eingelagert sind. Ungefähr 30 Gene kodieren für sehr ähnliche Proteine. Pro LHC sind dabei sechs Fucoxanthin-Moleküle gebunden, die allerdings durch ihre verschiedene Proteinumgebung Licht unterschiedlicher Wellenlänge absorbieren: Die Differenzen zwischen den absorbierten Wellenlängen betragen bis zu 35 Nanometer und erweitern so das Absorp-

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Kieselalgen (Diatomeen) sind für ungefähr 25 Prozent der jährlichen Kohlenstoffbindung auf diesem Planeten verantwortlich.
- Die Photosynthese der Kieselalgen ist hocheffizient. Dies verdanken sie unter anderem der Fähigkeit, auf stark wechselnde Lichtbedingungen schnell zu reagieren und so Lichtstress zu vermeiden.
- Vor kurzfristigem Lichtstress schützen sich Diatomeen durch Umschalten: Ihre »Lichtantennen« (LHC-Komplexe) leiten die aufgenommene Energie nicht mehr weiter, sondern strahlen überschüssige Energie als Wärme ab.

tionsspektrum im Bereich des grünen Lichtes extrem. In diesem Wellenlängenbereich absorbieren kaum andere Organismen. So schaffen sich Diatomeen ein Alleinstellungsmerkmal, das heißt, sie stehen in ihrer Lichtabsorption nicht in Konkurrenz zu anderen Algen (*Abb. 2*). Zudem wird die Energie innerhalb der LHC besonders schnell von Fucoxanthin auf Chlorophyll a übertragen, sodass sie zu 80 bis 90 Prozent nutzbar ist [siehe auch Markus Braun und Josef Wachtveitl: »Photosynthese verstehen, Photovoltaik verbessern«, Seite 50]. Das ist extrem effektiv. Gleiches gilt für die Weiterleitung der Energie von den LHC auf die Photosysteme. Die Wege der Energieweitergabe und die Grundlagen der effektiven Lichtverwendung hat unsere Gruppe, zusammen mit anderen, im Laufe der letzten Jahre aufgeklärt. Dabei gelangen zum ersten Mal Einblicke in das Zusammenspiel der Pigmente dieser Organismen (Gundermann und Büchel, 2014).

Schutz vor Lichtstress

Um herauszufinden, wie Diatomeen sich vor zu viel Licht schützen, benötigt man Methoden, die es erlauben, die Wirkung eines der vielen



Die Autorin

Prof. Dr. Claudia Büchel, Jahrgang 1962, studierte Biologie in Mainz. Nach der Promotion in Mainz folgte eine Postdoc-Tätigkeit am Biological Research Center in Szeged (Ungarn) und vier Jahre als Research Associate am Imperial College London (UK), bevor sie mit einem Heisenbergstipendium der Deutschen Forschungsgemeinschaft an das Max-Planck-Institut für Biophysik in Frankfurt wechselte. 2004 nahm sie einen Ruf auf die Professur für Pflanzliche Zellphysiologie am Fachbereich Biowissenschaft der Goethe-Universität an. Ihr Forschungsgebiet sind die strukturellen Grundlagen der Regulation der Lichtreaktionen der Photosynthese.

c.buechel@bio.uni-frankfurt.de

www.bio.uni-frankfurt.de/45734234/Pflanzliche-Zellphysiologie

Proteine separat zu studieren. Da Diatomeen (begrenzt) genetisch manipulierbar sind, kann man die Expression eines Proteins teilweise unterdrücken. Den dadurch hergestellten Mutanten steht dann ein Protein nicht mehr im vollen Umfang zur Verfügung und sie können bestimmte Reaktionen, zum Beispiel die Lichtschutzreaktionen, nicht mehr ausführen. Auf diesem Weg konnten wir bestimmte LHC-Proteine (Lhcx) identifizieren, später dann die Lichtsammel-Komplexe isolieren und biochemisch, spektroskopisch und bezüglich ihrer Interaktion untersuchen.

Es zeigte sich, dass LHC-Komplexe bei zu viel Lichteinfall in Sekunden von der Lichtsammelung auf den Lichtschutz umschalten: Die Energie wird nun nicht mehr auf die Photosysteme übertragen, sondern in Wärme umgewandelt. Dies wird einerseits durch geringfügige Änderungen innerhalb der LHC-Proteine, andererseits durch eine Zusammenlagerung verschiedener LHC bewirkt. Beide Änderungen werden ausgelöst durch die Ansäuerung auf einer Seite der Membran, welche die Photosynthese bewirkt. Daraufhin nähern sich Pigmentmoleküle einander so weit an, dass sie verstärkt Wärme abgeben können (*Abb. 3*). Dieser schnelle Schalter hängt von der Anwesenheit der Lhcx-Proteine und eines zusätzlichen Carotinoids (Diatoxanthin) ab (Gundermann und Büchel, 2012). Damit können sich Diatomeen je nach vorheriger »Erfahrung« mit den Lichtbedingungen optimal vorbereiten, indem sie die Carotinoidsynthese und die Expression von Lhcx umstellen.

Zusätzlich nutzen Diatomeen Licht nicht nur zur Photosynthese, sondern auch zur Steuerung der Genexpression. So sind auch die LHC-Gene durch ein Netzwerk verschiedener Photorezeptoren reguliert. Für eines dieser Proteine, ein nur in Diatomeen vorkommendes Cryptochrom, konnten wir eine Beteiligung an der Regulation der LHC-Expression nachweisen (Juhas et al., 2014). Die Interaktion von Genregulation und kurzfristigen Anpassungen trägt maßgeblich zur effizienten Photosynthese der Diatomeen bei.

Wofür kann man dieses Wissen nutzen? Diatomeen produzieren zum Beispiel in hohem Maße mehrfach ungesättigte Fettsäuren, die für unsere Nahrung essenziell sind. Durch molekularbiologische Methoden kann man diese Produktion steigern und die Anpassungsfähigkeit der Diatomeen nutzen, um die Anzuchtbedingungen für die biotechnologische Nutzung zu optimieren. ●

CLIC – DAS INTERDISZIPLINÄRE GRADUIERTENKOLLEG ZUR LICHTKONTROLLE

Carsten Neumann steht vor einem großen Tisch, vollgestopft mit esslöffelgroßen Spiegeln und bunten Gläsern – für den Laien ein wildes Durcheinander. »Die meisten hier verbauten Spiegel und Diamanten haben eine Funktion«, erklärt der Doktorand. Mithilfe eines weißen Papierstreifens verfolgt er den Lichtstrahl, der je nach Brechung und Art der Spiegel, Gläser und Linsen seine Farbe und Intensität wechselt und zeitweise für den Betrachter völlig verschwindet. Am Ende des Labyrinths landen zwei Strahlen äußerst gezielt auf einer winzigen Probe. »Morgens müssen wir die Spiegel immer erstmal neu einstellen«, so der Physiker. Schon geringe Temperaturänderungen über Nacht reichen in dem klimatisierten Raum, um die präzise eingestellten Geräte so zu verändern, dass die Lichtstrahlen abgelenkt werden.

Wenige Türen weiter arbeitet Dean Klötzner, ebenfalls Doktorand. Der Chemiker synthetisiert DNA mit künstlich modifizierten Substanzen. Diese Substanzen sind lichtempfindlich und erlauben daher eine »Kontrolle« der DNA-Funktion (siehe Anja Störiko: »Steuerung mit Licht aus dem Chemiebaukasten«, S. 35). Die DNA-Syntheseapparatur wird gezielt aus winzigen Töpfchen mit den DNA-Bausteinen G, A, T, C (Guanosin, Adenosin, Thymin und Cytidin) »gefüttert« – und mit der photolabilen Substanz aus Klötzners Labor. Seine Aufgabe ist es, diese Substanzen herzustellen und auf Daten wie Fluoreszenz und Ausbeute zu untersuchen und weiter zu verbessern.

Biochemikerin Heidi Zetzsche schließlich untersucht in ihrer Doktorarbeit, wie das Enzym RNA-Helicase seine Zielstruktur, die Ribonukleinsäure (RNA), entfaltet und abbaut. Dazu verwendet sie künstlich hergestellte RNA und den Energieträger ATP (Adenosintriphosphat), der an lichtempfindliche Substanzen gekoppelt ist. »Damit kann ich hoffentlich sehen, wie die RNA-Stränge bei der Entfaltung durch das Enzym ihre Konformation ändern« – also ihre Gestalt –, so Zetzsche.

Alle drei Doktoranden sind Teil des Graduiertenkollegs »Complex Scenarios of Light-Control«, kurz CLiC. Graduiertenkollegs an Hochschulen sind Teil der DFG-Strategie zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. 21 Doktoranden in 12 Arbeitsgruppen starteten in Frankfurt 2014 gleichzeitig, um gemeinsam lichtkontrollierte Forschungsprojekte auf den Weg zu bringen. Physiker, Chemiker und Biologen aus verschiedenen Län-

dern und Universitäten wurden ausgewählt, um im gemeinsamen Projekt mitzuarbeiten. 13 Doktorandenstellen stammen aus dem DFG-Fördertopf für das Graduiertenkolleg, 8 weitere Stellen mussten die Arbeitsgruppen aus Drittmitteln selbst bereitstellen.

Die Doktoranden begannen im November 2014 mit einem gemeinsamen dreiwöchigen Kurs. Dort lernten sie das Projekt in seiner ganzen Breite kennen, aber auch sich selbst

und mehr Verständnis für die Probleme der anderen bekommen«, schildert Grünewald die enge Zusammenarbeit über die Arbeitsgruppen und Fachbereiche hinweg. »Die umfassende Betreuung und die regelmäßigen Verpflichtungen erhöhen den Ansporn«, lobt Doktorandin Zetzsche. Sie schätzt das umfangreiche Rahmenprogramm: »Zum Beispiel, wie man Paper schreibt und Illustrationen macht – und viele andere Soft Skills, die wir im Programm mitbe-



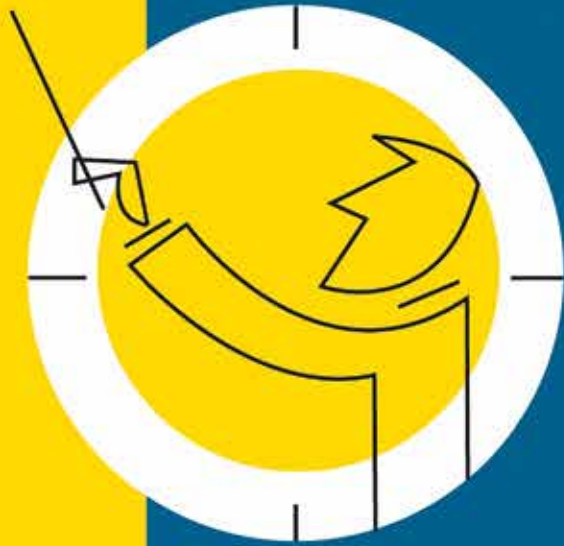
Die Biochemikerin Heidi Zetzsche ist Doktorandin bei Prof. Harald Schwalbe.

untereinander. »Es ist wichtig, dass sich die jungen Leute gut kennen, miteinander agieren«, betont der Koordinator des Graduiertenkollegs, Christian Grünewald. Aber auch Zeit-, Projekt- und Selbstmanagement und viele andere Themen rund um das wissenschaftliche Arbeiten sind Teil des Einführungskurses. Regelmäßiger Austausch über die Grundlagen, die Bedürfnisse und den Stand der Arbeiten gehört ganz wesentlich zum Prinzip der Graduiertenschule. Alle drei Wochen treffen sich die Doktoranden, und nach der Startphase findet alle sechs Monate ein Betreuungsgespräch zwischen Doktoranden und Betreuerteam statt. Das Betreuungsteam besteht aus dem Doktorvater und zwei weiteren Gruppenleitern beziehungsweise Professoren. Zum Programm gehören auch Einladungen an Gastwissenschaftler, die sich neben ihren Vorträgen mehrere Tage an den Gesprächen und Diskussionen beteiligen. Jedes Jahr findet eine einwöchige Sommerschule statt, in der neben den Fortschrittsberichten der Doktoranden auch Karriereplanung, Verhandlungs- und Bewerbungstraining geplant sind.

»Es ist optimal, dass die Doktoranden sich häufig austauschen, Nöte und Sorgen teilen

kommen«. Graduiertenkollege Neumann sieht es als Vorteil, »dass Leute da sind, die sich gegenseitig zuarbeiten«. Er hält die Treffen und Besprechungen für wichtig – »auch wenn die festen Zeiten manchmal nicht in den eigenen Zeitplan passen«. Auch Doktorand Klötzner lobt die intensive Kommunikation und enge thematische Verflechtung. »Man macht sich auch gegenseitig ein wenig Druck, fragt, wie es mit den Proben vorangeht.« Zudem hält er die zeitliche Begrenzung der Promotion auf drei Jahre im Graduiertenprogramm für sinnvoll – »auch wenn das vielleicht nicht ganz genau hinhaut«.

Idealerweise feiern 21 Doktoranden Ende 2017 gemeinsam ihre Promotion – und viele gemeinsame Erlebnisse und Veröffentlichungen. Bis dahin hofft Koordinator Grünewald bereits die zweite Kohorte Doktoranden eingearbeitet zu haben. Wenn das Projekt über 2017 hinaus positiv von der DFG evaluiert und dann weitere fünf Jahre gefördert wird, können während des Förderzeitraums drei Doktoranden-Generationen die Goethe-Universität mit dem Dokortitel verlassen – und mehr Licht in das Dunkel der Naturwissenschaften bringen. **Anja Störiko**



LICHT UND
INNERE UHR

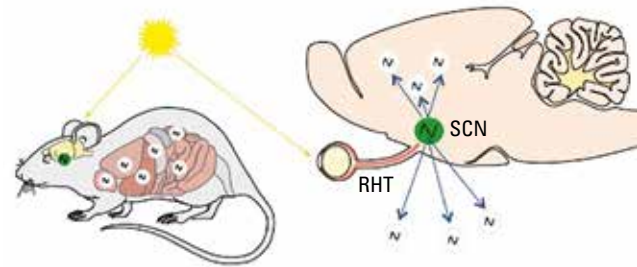


Das Licht und die Innere Uhr

Wie das molekulare Uhrwerk es schafft, Innen- und Außenzeit zu synchronisieren

von Horst-Werner Korf

Leben braucht Licht und den täglichen Wechsel von Licht und Dunkel. Das gilt auch für den Menschen. Licht dient unserer Orientierung – nicht nur im Raum, sondern auch in der Zeit. Der Tag-Nacht-Wechsel ist der wichtigste Umweltreiz für die Taktung unserer Inneren Uhr. Zu wenig Licht am Tag und zu viel Licht in der Nacht kann sie aus dem Takt bringen und zu Schlafstörungen und Depressionen führen.



1

Die Innere Uhr – das circadiane System

Fast alle Funktionen unseres Körpers unterliegen im Verlauf eines 24-Stunden-Tags rhythmischen Schwankungen. Besonders augenfällig ist der Wechsel zwischen Wachen und Schlafen, aber auch Blutdruck, Herzfrequenz und Temperatur verändern sich im Tagesgang. Enzyme für die Verwertung unserer Nahrung werden zur rechten Zeit aktiv; Zellen in gesunden Geweben teilen sich rhythmisch. Das Auf und Ab dieser Prozesse wird von der Inneren Uhr, dem circadianen System, gesteuert. Genau genommen besteht das circadiane System aus einem Orchester mit verschiedenen Uhren. Die Hauptuhr, gewissermaßen der Dirigent des Orchesters, liegt im Gehirn, in den bilateral (paarig) angeordneten suprachiasmatischen Kernen, kurz SCN (Abb. 1). Sie geben den Takt vor für die diversen Nebenuhren, die in allen Organen des Körpers vorkommen. Hierzu nutzen die SCN verschiedene Signale und Signalwege: das vegetative Nervensystem mit Sympathicus und Parasympathicus, aber auch Cortisol, das Hormon der Wachheit und Aktivität, sowie Melatonin, das Hormon der Dunkelheit, das unter dem Dirigat der SCN Nacht für Nacht im Pinealorgan, auch Zirbeldüse oder Epiphyse genannt, gebildet wird und in einer Rückkopplungsschleife auf die SCN zurückwirkt. Durch diese Koordination wird gewährleistet, dass die unterschiedlichen und teils sogar gegensätzlichen Organfunktionen zur rechten Zeit an- oder abgeschaltet werden. Der Rhythmus der Inneren Uhr wirkt sich also auf die gesamte Organisation des Organismus aus, vom Verhalten über Organfunktionen bis hin zur Biochemie der Zellen und ihrer Moleküle.

Die Nervenbahn zur Uhr

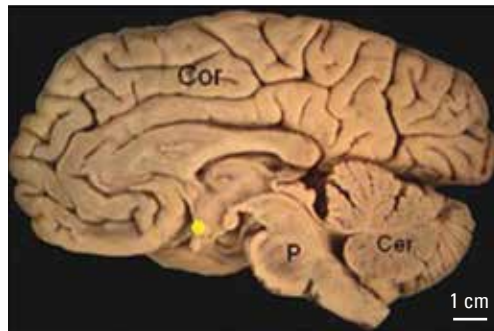
Die SCN bestehen aus einem Netzwerk von jeweils circa 10.000 Nervenzellen (Abb. 2). Dieses neuronale Netzwerk erzeugt endogen und damit ohne jegliche Einflüsse aus der Umwelt einen Rhythmus mit einer Periodenlänge von

1 Hierarchie des circadianen Systems am Beispiel der Maus. Der Dirigent liegt in der Hauptuhr, den suprachiasmatischen Kernen (SCN) (grün) im Gehirn. Sie erzeugen einen endogenen circadianen Rhythmus, der durch Lichtreize an den Tag-Nacht-Rhythmus angepasst wird. Die Lichtreize werden in der Netzhaut wahrgenommen und über den retinohypothalamischen Trakt (RHT) an die SCN übertragen. Die SCN vermitteln ihre Informationen über vielfältige Mechanismen an die Nebenuhren, die in allen Organen des Körpers vorkommen.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

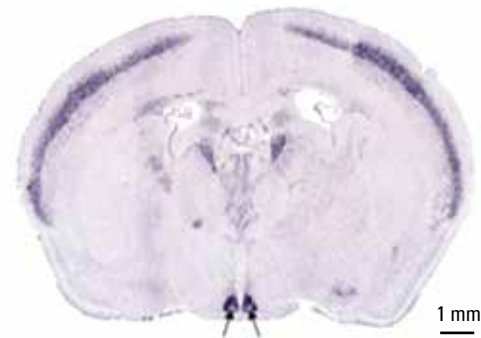
- Ohne die Innere Uhr käme der Mensch aus dem Rhythmus. Denn das hierarchisch aufgebaute circadiane System beeinflusst das Verhalten, die Funktion der Organe, aber auch die Biochemie der Zellen und ihrer Moleküle. Der Dirigent des circadianen Systems liegt im Gehirn, in den suprachiasmatischen Kernen (SCN).
- Die Grundlage für den Rhythmus der Körperfunktionen bildet ein molekulares Uhrwerk, das die Innenzeit vorgibt.
- Für die Synchronisation der Innen- und Außenzeit spielt die Wahrnehmung des Tageslichts durch das Auge eine entscheidende Rolle. Die Taktung des circadianen Systems erfolgt in erster Linie durch neu entdeckte Photorezeptoren, die in der Tiefe der Netzhaut liegen. Sie übertragen ihre Informationen über den retinohypothalamischen Trakt, eine Untereinheit des Sehnervs, an die SCN. Ihr Sehfärbstoff, das Melanopsin, reagiert besonders empfindlich auf blaues Licht.

2 Lage der SCN in einem Mediosagittalschnitt (gelb) durch das menschliche Gehirn (a) und in einem Frontalschnitt (Pfeile) durch das Gehirn eines Nagetieres (b). (Cor = Großhirnrinde, P = Brücke, CER = Kleinhirn, OC = Sehnervenkreuzung)

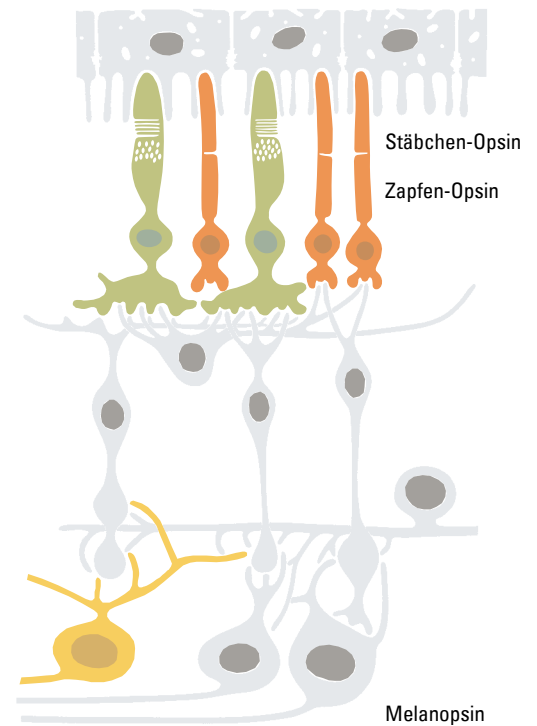


2a

3 Lage der melanopsinhaltenen intrinsisch photosensitiven Ganglienzellen (gelb) in der Netzhaut der Säugetiere. Zapfen (grün) und Stäbchen (rot). Melanopsin wurde erstmals von Mark D. Rollag (Bethesda, Maryland, USA) und seiner Arbeitsgruppe aus den direkt lichtempfindlichen Pigmentzellen der Schwanzflosse von Kaulquappen isoliert. Diese reagieren auf Lichtreize mit einer Kontraktion ihrer Pigmentgranula. Nach seiner Proteinstruktur gehört das Melanopsin zur Klasse der Photopigmente der Wirbellosen. Nach Klonierung wurde Melanopsin bald in allen Wirbeltieren entdeckt. Bei den Säugetieren und Menschen kommt es ausschließlich in der Netzhaut, in den intrinsisch photosensitiven Ganglienzellen, vor. Bei Vögeln und Amphibien kommt es auch in extraretinalen Photorezeptoren vor.



2b



3

ungefähr einer Tageslänge (24 Stunden), dieser Rhythmus wird deshalb »circadianer« Rhythmus genannt. Die biologische Hauptuhr in den SCN muss also täglich neu gestellt werden, unsere »Innenzeit« muss mit der »Außenzeit« synchronisiert werden. Dieses geschieht durch das Tageslicht, das von unseren Augen wahrgenommen und über eine spezielle Untereinheit des Sehnervs, den retinohypothalamischen Trakt (Abb. 1) an die SCN übertragen wird.

Die Photorezeptoren für die Uhr

Um die Jahrtausendwende wurde entdeckt, dass die Lichtreize, die unsere biologische Uhr stellen, nicht nur von den klassischen Photorezeptoren, den Stäbchen und Zapfen, wahrgenommen werden, sondern in erster Linie von Nervenzellen, die in der Ganglienzellschicht der Netzhaut liegen und die ein eigentümliches Photopigment, das Melanopsin enthalten (Abb. 3). Sie werden als »intrinsisch photosensitive Ganglienzellen« bezeichnet und machen nur circa 1 bis 2 Prozent der Ganglienzellen der Netzhaut aus. Sie dienen nicht der Muster- oder Bilderkennung, sondern der Wahrnehmung der Umgebungshelligkeit. Am stärksten werden sie durch Licht im blauen Bereich des sichtbaren Spektrums angeregt. Ihre maximale Empfind-

lichkeit liegt bei einer Wellenlänge von 480 nm (Nanometer), die intrinsisch photosensitiven Ganglienzellen sind nicht so lichtempfindlich wie die Stäbchen und Zapfen der Netzhaut, sie benötigen längere Belichtungszeiten. Die intrinsisch photosensitiven Ganglienzellen bilden mit ihren Fortsätzen (Axonen) den retinohypothalamischen Trakt, nutzen als Überträgerstoffe Glutamat und das Neuropeptid PACAP und takten so die Hauptuhr in den SCN. Darüber hinaus steuern sie auch die Anpassung der Pupillenweite an die Leuchtdichte der Umgebung (Pupillenreflex). Die Netzhaut unseres Auges enthält also nicht nur Photorezeptoren für die Orientierung im Raum, die klassischen Stäbchen und Zapfen, sondern auch »circadiane« Photorezeptoren für die Orientierung in der Zeit.

Moleküle für den Takt der Uhr

Vor mehr als 30 Jahren fanden Wissenschaftler erste Hinweise auf die Existenz eines molekularen Uhrwerks, das die Grundlage für Rhythmogenese und Synchronisation bildet. Seither konnten wesentliche Komponenten dieses molekularen Uhrwerks identifiziert werden. Im Zentrum des molekularen Uhrwerks steht ein Ensemble von Uhrengenen, die in sogenannten transkriptional-translationalen Rückkopplungs-

Das molekulare Uhrwerk

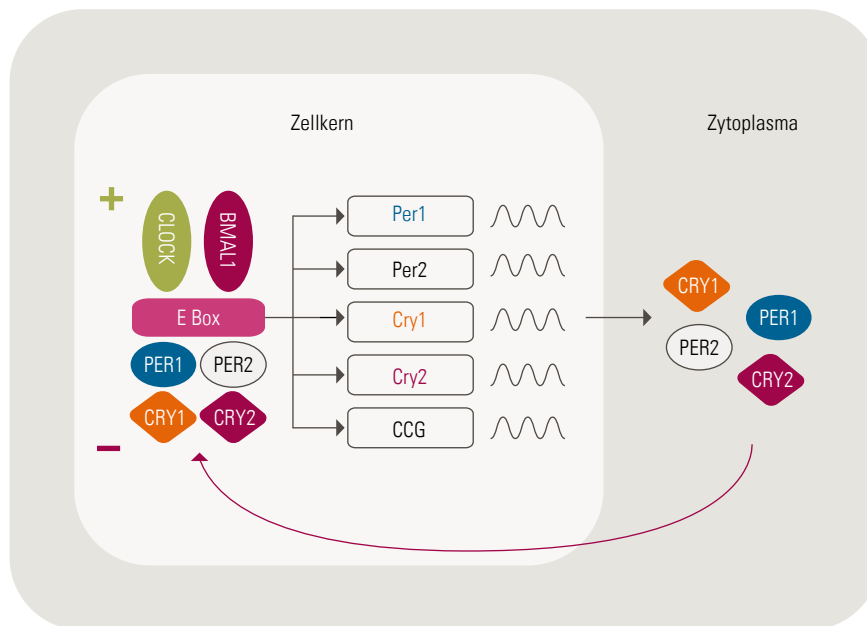
Uhrengene

bHLH-PAS
Bmal1
Clock

Period
mPer1
mPer2

Cryptochrome
mCry1
mCry2

CCG
Uhren-kontrollierte
Gene



4

4 Das molekulare Uhrwerk. Die Uhrengene Clock und Bmal kodieren Aktivatoren, welche an eine sogenannte E-Box im Promoter binden und die Transkription der Uhrengene, Period und Cryptochrom aktivieren. Die Boten-RNA wird vom Zellkern in den Zellleib transportiert und an den Ribosomen in Eiweiße übersetzt. Diese Eiweiße lagern sich als Homo- oder Heterodimere zusammen, werden in den Zellkern verlagert und schalten dort ihre eigenen Gene ab. Die Eiweiße PER und CRY werden nach einer Zeit im Zellkern abgebaut, und ein neuer Zyklus kann beginnen. Exportiert werden die Signale des molekularen Uhrwerks über Uhren-kontrollierte Gene, die ebenfalls eine E-Box im Promoter besitzen.

schleifen interagieren. Ihre Proteinprodukte sind hemmende oder aktivierende Transkriptionsfaktoren, die Gene an- oder abschalten können (Abb. 4). Die »Kern«-Schleife bilden Clock, Bmal, Period-1-3 und Cryptochrom-1-2. Die Uhrengene Clock und Bmal kodieren Aktivatoren, welche an eine sogenannte E-Box im Promoter binden und die Transkription der Uhrengene, Period und Cryptochrom aktivieren. Die Boten-RNA wird vom Zellkern in den Zellleib transportiert und an den Ribosomen in Eiweiße übersetzt. Diese Eiweiße lagern sich als Homo- oder Heterodimere zusammen, werden in den Zellkern verlagert und schalten dort ihre eigenen Gene ab. Die Eiweiße PER und CRY werden nach einer Zeit im Zellkern abgebaut, und ein neuer Zyklus kann beginnen. Exportiert werden die Signale des molekularen Uhrwerks über Uhren-kontrollierte Gene, die ebenfalls eine E-Box im Promoter besitzen. Inzwischen wurden mehrere 100 Uhren-kontrollierte Gene identifiziert. Die meisten von ihnen kodieren für wichtige Schalter in Stoffwechselwegen (sogenannte Schlüsselenzyme).

Lichtreize, die den Takt der Inneren Uhr in den SCN verschieben, führen zur Freisetzung von Glutamat und PACAP aus den Nervenendigungen des retinohypothalamischen Traktes,



Der Autor

Prof. Dr. Horst-Werner Korf, 63, ist seit 1990 Professor für Anatomie und Neurobiologie, seit 1995 Geschäftsführender Direktor der Dr. Senckenbergischen Anatomie und seit 2010 Direktor des Dr. Senckenbergischen Chronomedizinischen Instituts. Dieses Institut wurde durch die Dr. Senckenbergische Stiftung am Fachbereich Medizin eingerichtet und hat zum Ziel, Erkenntnisse der Grundlagenforschung zum circadianen System für die Medizin und die Gesellschaft nutzbar zu machen. 2003 wurde Korf in die Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina gewählt.

korf@em.uni-frankfurt.de

Literatur

- 1 Foster RG, Kreitzman L (2004), Rhythm of Life. The biological clocks that control the daily lives of every living thing, Profile Books, London.
- 2 Foster RG, Wulff K (2005), The rhythm of rest and excess, Nat. Rev. Neurosci. 6: 407–414.
- 3 Korf HW, von Gall C (2013), Circadian physiology, in: Neuroscience in the 21 century (D.W. Pfaff, ed.), Springer, pp. 1813–1845.
- 4 Rönneberg T (2010), Wie wir ticken: Die Bedeutung der Inneren Uhr für unser Leben, DuMont, Köln.

diese Signalstoffe bewirken eine Aktivierung des Transkriptionsfaktors CREB durch Phosphorylierung. Phosphoryliertes CREB bindet an ein CRE im Promoter des Period-Gens und aktiviert dessen Transkription.

Licht in Natur und Gesellschaft

Jeden Morgen geht die Sonne auf und erzeugt Tageslicht. Es besteht aus einem breiten kontinuierlichen Strahlungsspektrum, dessen Wellenlängen im sichtbaren Bereich zwischen 380 nm (violett) und 780 nm (rot) liegen. Die Helligkeit des Tageslichts liegt bei Beleuchtungsstärken zwischen 1 und über 10.0000 lx (Lux) (lm/m² = Lumen pro Quadratmeter), sie nimmt von der Dämmerung bis zum Mittag stark zu und nimmt anschließend wieder ab. Bei Vollmond und klarer Nacht beträgt die Beleuchtungsstärke auf der Erde circa 0,2 lx. Der natürliche Tag-Nacht-Wechsel taktet unser circadianes System und unseren Schlaf-Wach-Rhythmus. Tageslicht fördert die Aufmerksamkeit, steigert die Konzentration und reduziert die Schläfrigkeit. Licht aktiviert Hirnzentren, die Kognition und Gedächtnisbildung fördern. Besonders effektiv ist blaues Licht, da die melanopsinhaltenen Photorezeptoren besonders empfindlich für diese Lichtfarbe sind. Deshalb können Men-

schen, die spät am Abend noch vor Smartphone, Tablet oder Laptop sitzen, häufig schlechter schlafen. Die Effekte des Lichts hängen aber nicht nur von seiner Farbe (das heißt von seiner spektralen Zusammensetzung) ab, der Zeitpunkt und die Dauer der Lichteinwirkung spielen ebenfalls eine große Rolle. So bewirken Lichtreize am Abend eine Phasenverzögerung des Rhythmus und Lichtreize am Morgen einen Phasenvorsprung. Um die melanopsinhaltenen Photorezeptoren zu erregen, muss Licht länger einwirken, die Stäbchen und Zapfen werden bereits durch kurze Lichtreize erregt.

Mit der Entwicklung künstlicher Beleuchtungssysteme und mit den drastischen Veränderungen der Arbeitszeiten durch Einführung der Schichtarbeit hat sich der Mensch immer weiter von dem in der Natur vorgegebenen Tag-Nacht-Rhythmus entkoppelt. Diese »Entkopplung« schafft uns nicht nur Freiräume, sie führt häufig zur Fehltaktung oder gar zur Unterbrechung des circadianen Systems (Chronodisruption), die unter anderem mit Schlafstörungen, Schlafdefizit, Konzentrationsstörungen, depressiver Verstimmung, Gewichtszunahme, Veränderungen des Immunsystems sowie einem vermehrten Konsum von Genussmitteln (Nikotin, Alkohol) einhergehen kann.

Die Erkenntnisse über die engen Beziehungen zwischen Licht, Innerer Uhr und Wohlbefinden haben hohe Relevanz für viele Bereiche der Gesellschaft wie Medizin, Arbeitswelt, Bildung und Architektur. Es gilt: Je dichter an der Natur, umso besser. Am Tage sollte das »richtige« Licht Eingang finden in unsere Wohnungen (damit wir uns wohlfühlen), in unsere Schulen (damit wir besser lernen), in unsere Arbeitsplätze (damit wir konzentrierter arbeiten), in unsere Pflegeheime (damit unsere Altvorderen ihren Rhythmus wiederfinden), und in der Nacht sollte Dunkelheit herrschen – ohne Blaulicht des Bildschirms vom Computer oder Fernseher (damit wir gut und entspannt schlafen). ●

– Anzeige –

Unser Ziel:

Sie werden Pate und sie lernt lesen.



Ulrich Wickert:
„Mädchen brauchen
Ihre Hilfe!“



Plan
gibt Kindern eine Chance

Nähere Infos: www.plan-deutschland.de



Licht und Psyche

Über die komplexen Zusammenhänge zwischen Licht und seelischen Erkrankungen

von Christine Reif-Leonhard und Andreas Reif

Licht- und Schattenseiten der Beleuchtung – so möchte man kalauern, wenn es um die verschiedenen Auswirkungen von Licht auf das Seelenleben des Menschen geht. Intuitiv möchte man meinen, viel Licht ist gut für die Seele und zu wenig schlecht. Ganz so einfach ist es dann aber doch nicht.

Führt zu wenig Lichteinstrahlung dazu, dass man sich deprimiert fühlt? Jedem fällt da sofort die mittlerweile zu zweifelhaftem medialem Ruhm gelangte »Winterdepression« ein. Und sind nicht auch die Skandinavier anfälliger für Depressionen? Es wäre doch kein Wunder, wo es doch dort ein halbes Jahr lang fast nachtdunkel sein kann? Die Richtung stimmt, doch die Zusammenhänge sind komplexer. Sowohl Stimmungserkrankungen als auch das Aufmerksamkeits-Defizit-/Hyperaktivitäts-Syndrom (ADHS) sind unter anderem durch veränderte Lichteinstrahlung bedingt.

ADHS und Stimmungserkrankungen

Bei der Entstehung von ADHS scheint Licht in zweifacher Weise beteiligt zu sein. Der erste, sehr verblüffende Befund wurde vor zwei Jahren veröffentlicht (Arns et al., Biol Psychiat 2013).

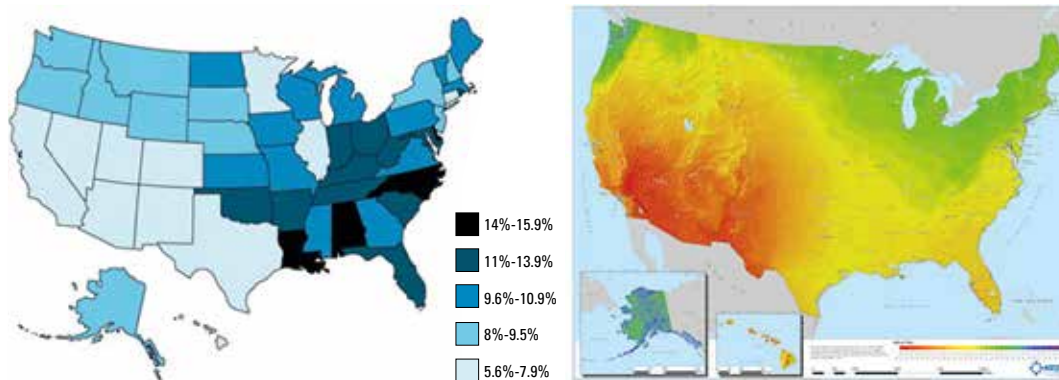
Es konnte in drei Datensätzen mit mehreren Tausend Patienten aus zehn Ländern gezeigt werden, dass eine höhere Intensität der Sonnenlichteinstrahlung (Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag) vor der Entstehung von ADHS schützt. Während als Grund auch unterschiedliche diagnostische Gepflogenheiten in den verschiedenen Ländern ins Feld geführt werden könnten, ist das innerhalb der USA eher unwahrscheinlich – aber auch dort zeigt sich dieses Muster (*Abb. 1*). Der genaue Mechanismus, über den höhere Sonnenlichteinstrahlung vor ADHS schützt, ist noch unklar.

Daneben gibt es aber auch noch einen ganz anderen, heutzutage sehr aktuellen Zusammenhang zwischen ADHS und Licht: Smartphones, Tablets und LCD-Bildschirme emittieren blaues Licht, das auf die circadiane Uhr einwirkt. Der übermäßige – heutzutage aber schon fast normale – Gebrauch dieser Geräte zu später Stunde bringt die Innere Uhr durcheinander. Das hat besonders bei ADHS-Patienten nachteilige Folgen, da bei ihnen von Natur aus schon eine Störung dieses Mechanismus vorliegt. Deshalb gilt: Bei ADHS haben iPhone & Co. nachts Pause!

Bei der großen Gruppe der Stimmungserkrankungen sticht im Zusammenhang mit Licht die jahreszeitlich bedingte (»saisonale«) Depression (englisch: *seasonal affective disorder*, SAD) heraus. Deren typisches Merkmal ist das Auf-

1 Vergleich zwischen der Krankheitshäufigkeitsrate (Prävalenz) von Aufmerksamkeits-Defizit-/Hyperaktivitäts-Syndrom (ADHD) und Sonneneinstrahlung (SI) in den USA.

Auf der linken Seite ist die Prävalenzrate von ADHD in Prozent in verschiedenen US-Staaten dargestellt, auf der rechten Seite die Sonneneinstrahlung über die gesamten USA, gemessen in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag. Es gibt eine Überschneidung der Staaten mit der höchsten täglichen Sonneneinstrahlung mit den Staaten mit den niedrigsten Prävalenzraten für ADHD.



treten im Herbst oder Winter, mit spontaner Remission im Frühjahr. Häufig finden sich atypische Symptome wie vermehrtes Verlangen nach Kohlenhydraten oder Tagesmüdigkeit; die depressive Verstimmung ist dagegen oft nur mittelgradig ausgeprägt. Bei diesem saisonalen Muster liegt es nahe, die geänderten Lichtbedingungen als Ursachen anzusehen, wobei es natürlich noch andere Mechanismen geben könnte – wie Temperatur und Nahrungsangebot. Dennoch gilt die längere Dunkelphase als der wahrscheinlichste Kandidat für die umgangssprachlich als »Winterdepression« bezeichnete Stimmungserkrankung. Es zeigt sich auch ein deutlicher Nord-Süd-Gradient hinsichtlich der Anfälligkeit gegenüber der SAD: So liegt die Rate dieser Erkrankung in Alaska bei fast 10 Prozent der Bevölkerung, in Florida dagegen bei 1,5 Prozent.

Literatur

1 Arns M. et al. (2013), Geographic Variation in the Prevalence of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: The Sunny Perspective, *Biol Psychiatry* 74:585–590.

2 Bauer M. et al. (2012), Impact of sunlight on the age of onset of bipolar disorder, *Bipolar Disord.* 14(6):654–663.

3 Bauer M. et al. (2014), Relationship between sunlight and the age of onset of bipolar disorder: an international multisite study, *J Affect Disord.* 167:104–111.

4 Bauer M. et al. (2015), Influence of light exposure during early life on the age of onset of bipolar disorder, *J Psychiatr Res.* May; 64:1–8.

5 Güzel Özdemir et al. (2015), Comparison of venlafaxine alone versus venlafaxine plus bright light therapy combination for severe major depressive disorder, *May*; 76(5):e645–54.

Ein nicht geringer Anteil der SAD entfällt nach neueren Studien interessanterweise auf eine saisonal verlaufende bipolar affektive Störung (früher »manisch-depressive Erkrankung«) mit einer depressiven Auslenkung im Herbst/Winter und einer hypomanen Phase (leicht gehobene Grundstimmung) im Frühjahr. Aber auch darüber hinaus hat Licht eine wichtige Rolle in der Entstehung der bipolaren Erkrankung. In einer weltweiten Serie von Untersuchungen, an der ein Team der Frankfurter Universitätsklinik für Psychiatrie ebenfalls beteiligt war, konnte gezeigt werden, dass das Ersterkrankungsalter der bipolaren Störung in den Regionen am niedrigsten war, in denen es den größten monatlichen Zuwachs der Sonneneinstrahlung gibt (zum Beispiel Mexiko oder Norwegen); (Bauer et al., 2012 und 2014). Auch eine geringere tägliche Sonnenscheinzeit am Geburtsort führt zu einer früheren Ersterkrankung (Bauer et al., 2015) (Abb. 2). Die Lichteinstrahlung scheint also schon recht früh im Leben das Erkrankungsrisiko zu beeinflussen, vor allem bei den Patienten, die ein genetisches Risiko für diese Erkrankung aufweisen.

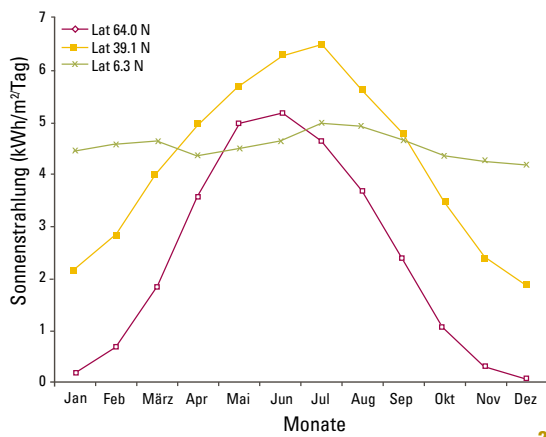
Bei der »normalen«, nichtsaisonalen unipolaren Depression scheint Licht dagegen keine so große Rolle zu spielen, auch gibt es keine Hinweise auf ein aussagekräftiges geografisches Muster. Die Mär des depressiven Skandinaviens ist eben genau das: eine Mär. Vielmehr scheinen genetische Hintergrundeffekte eine Rolle zu spielen; so ist die Suizidrate (als Anhaltspunkt für depressive Erkrankungen) in Finnland beinahe doppelt so hoch wie im nicht minder kalten und im Winter dunklen Island. Eine im Durchschnitt geringere Suizidrate in Regionen in der Nähe des Äquators lässt sich jedoch nicht leugnen.

Molekulare Mechanismen

Wie im Artikel »Das Licht und die Innere Uhr« von Prof. Horst-Werner Korf (Seite 63) ausgeführt,

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Eine höhere Intensität des Sonnenlichts am Geburtsort verringert das Risiko, an einer bipolaren Störung oder ADHS zu erkranken.
- Bei Patienten mit ADHS und bipolar affektiven Erkrankungen besteht eine genetische Disposition zu einer leicht veränderten molekularen Uhr. Wird diese dann noch zusätzlich durch veränderte Beleuchtungsmuster, zu wenig Licht oder Licht zur falschen Zeit desynchronisiert (beispielsweise durch das blaue Licht von Tablets oder Smartphones), trägt dies zum Erkrankungsrisiko bei.
- Lichttherapie ist eine ungefährliche und nebenwirkungsarme effektive Behandlungsmethode bei saisonalen Depressionen, vermutlich ist sie auch unterstützend wirksam bei nicht-saisonalen Depressionen und ADHS.



2

wirkt Licht vor allem auf die Synchronisation der »molekularen Uhr«, die auf einem komplexen Zusammenspiel der Expression unterschiedlicher Gene beziehungsweise Proteine (CLOCK, BMAL, PER, CRY, ARNTL und so weiter) beruht. Interessanterweise konnte in mehreren Studien gezeigt werden, dass diese molekulare Uhr bei ADHS wie auch bei der bipolaren Erkrankung gestört ist – sowohl funktionell als auch auf genetischer Ebene: Es wurden zum Beispiel genetische Varianten der genannten Moleküle beschrieben, die häufiger bei Patienten als bei Kontroll-Personen gefunden werden konnten. Dies könnte nun den Mechanismus erklären, wie Licht und die genannten Erkrankungen zusammenhängen: Bei den Patienten besteht eine genetische Disposition zu einer leicht veränderten molekularen Uhr. Wird diese dann noch zusätzlich durch veränderte Beleuchtungsmuster – zu wenig Licht, Licht zur falschen Zeit oder aber durch andere chronobiologische Variablen, zum Beispiel Wechselschichtarbeit oder Zeitverschiebung – desynchronisiert, führt dies über noch unbekannte weitere Mechanismen zur Erkrankung. Nur bei gegebener Veranlagung kann Licht also krank machen. Es kann aber auch heilen, wie der nächste Absatz zeigt.

Licht als Therapie

»Therapeutisches Licht« (*Bright Light Therapy*, BLT) wird üblicherweise durch eine helle Lichtquelle (10.000 Lux) appliziert, und zwar für circa 30 Minuten bei offenen Augen im Abstand von 50 bis 60 Zentimeter zur Lichtquelle. Dieses Licht ist bei der saisonalen Depression eine gängige, hilfreiche und auch von den Kassen übernommene Behandlungsmethode. Aber auch bei der nichtsaisonalen Depression kann BLT hilfreich sein. Die Studienlage ist allerdings noch recht dünn, so dass in der (sich aktuell in Revision befindlichen) Nationalen Versorgungsleitlinie noch keine Empfehlung hierfür ausgesprochen wird. Die alleinige Verwendung von BLT ist vermutlich wenig effektiv, allerdings scheint dieses therapeutische Licht den Effekt antidepressiver Medikation zu unterstützen: Die Bes-

serung verläuft rascher und profunder (zum Beispiel Güzel Özdemir et al., J Clin Psychiatry 2015). Da die publizierten Studien bislang positiv sind und BLT so gut wie keine Nebenwirkungen hat, wird diese Therapieform auch routinemäßig in der Frankfurter Universitätsklinik eingesetzt.

Auch bei ADHS gibt es eine – wenngleich kleine – Studie zur Lichttherapie bei Erwachsenen. Hier wurde die Lichttherapie ebenfalls morgens durchgeführt, und es zeigt sich, dass dadurch die ADHS-Kernsymptome gebessert werden. Es wird spekuliert, ob die Verbesserung auch dem Zusammenhang zwischen Sonnenlicht-Intensität und ADHS-Prävalenz zugrunde liegt – sozusagen mehr Sonnenlicht als natürliche BLT. Die Grundidee ist, dass die Anlage zur Erkrankung im gleichen Prozentsatz wie unter lichtärmeren Verhältnissen zwar da ist, die Symptome aber durch die natürliche Lichttherapie nicht zum Ausbruch kommen beziehungsweise gehemmt werden. Hier besteht jedoch noch großer Forschungsbedarf, weshalb im nächsten Jahr ein internationales Forschungskonsortium unter Leitung unserer Klinik den therapeutischen Effekt von Licht bei ADHS genauer untersuchen wird.

Fazit

Die Rolle von Licht bei psychiatrischen Erkrankungen ist also vielschichtig. Über seine Rolle als Synchronisator der Inneren Uhr interagiert es mit einem komplexen molekularen Mechanismus, der – möglicherweise schon genetisch bedingt – bei Stimmungserkrankungen und ADHS gestört ist. Kontrollierte Lichtapplikation trägt dann aber auch wieder zu einer Synchronisation der Inneren Uhr bei, was man sich therapeutisch zunutze machen kann. Weitere Studien sind aber dringend nötig, um Licht in das Dunkel der Pathogenese psychischer Erkrankungen zu bringen – im wahrsten Sinne des Wortes! ●

2 Darstellung der über das Jahr gemessener durchschnittlichen monatlichen Sonneneinstrahlung in Kilowattstunden pro Quadratmeter und Tag in nördlichen (am Beispiel Trondheim/Norwegen, Breitengrad 64.0° N), gemäßigten (am Beispiel Kansas City/Missouri, Breitengrad 39.1° N) und äquatornahen Breiten.



Die Autoren

Prof. Dr. Andreas Reif, 44, ist seit August 2014 Ärztlicher Direktor der Klinik für Psychiatrie, Psychotherapie und Psychosomatik des Universitätsklinikums der Goethe-Universität. Seine klinisch-wissenschaftlichen Schwerpunkte sind affektive Störungen und hierbei insbesondere die bipolare affektive Störung sowie ADHS. Zur besseren Erforschung und Behandlung dieser Erkrankungen über die gesamte Lebensspanne gründete er kürzlich zusammen mit Prof. Dr. Christine Freitag, Direktorin der hiesigen Kinder- und Jugendpsychiatrie, sowie fünf weiteren Kollegen das Deutsche Zentrum für Entwicklungspsychiatrie (D-ZEP).

andreas.reif@kgu.de

Dr. Christine Reif-Leonhard, 45, ist Fachärztin für Psychiatrie und Psychotherapie sowie Neurologie und arbeitet als Oberärztin in der Klinik für Psychiatrie der Universitätsklinik Frankfurt. Sie leitet die Ambulanz der Klinik. Zu ihren klinischen Schwerpunkten gehören affektive Störungen sowie die Gerontopsychiatrie, hier insbesondere die Depression im Alter.

christine.reif-leonhard@kgu.de

LICHT UND DUNKEL
IM ZEITENLAUF



Platons Licht der Erkenntnis

Die Idee des Guten – Vom Sonnen- zum Höhlengleichnis

von Friedemann Buddensiek

Dass nur das sonnenhafte Auge die Sonne erblicken kann, diese These geht wie so vieles letztlich auf Platon zurück. Der griechische Philosoph interessiert sich für Licht nicht in physikalischer, sondern in wahrnehmungstheoretischer Hinsicht. Und diese Hinsicht interessiert ihn wiederum, weil nach seiner Auffassung der Fall des Sehens zur Illustration des rationalen Erfassens von etwas dienen kann.

Von besonderem Interesse sind hier zwei der berühmten Gleichnisse im Dialog *Staat*: das Sonnengleichnis und das Höhlengleichnis, zwischen die als drittes das Liniengleichnis platziert ist (*Staat* 507a–518b). Durch diese Gleichnisse möchte Sokrates – Platons Hauptfigur im *Staat* – etwas über die Idee des Guten klarmachen, die sich – wie er meint – nicht für sich genommen beschreiben lässt. Die Gründe dafür sind unklar und sind in der Forschung auch heftig umstritten. Misslich ist die fehlende Beschreibbarkeit der Idee des Guten allemal, sollte doch gerade diese Idee der oberste und wichtigste Gegenstand des Wissens des Philosophen sein: Ohne diesen Gegenstand erfasst zu haben, ist er kein Philosoph und – wie Sokrates meint – kein geeigneter Herrscher; ohne geeigneten Herrscher aber gibt es nicht den bestmöglich organisierten *Staat*, dessen Modell im *Staat* gerade präsentiert wird.

Die Idee des Guten als Quelle der Erkenntnis

An Stelle einer Beschreibung der Idee des Guten gibt Sokrates zunächst eine Beschreibung ihrer Wirkung. Doch auch diese Wirkung lässt sich – der Schwierigkeit der Sache wegen – nicht direkt darstellen. Um sie greifbar zu machen, bedient sich Sokrates eines Vergleichs – er spricht hier von einem »Zins« und »Sprössling« des Guten (507a; 508b). In diesem Vergleich wird der Fall des rationalen Erfassens mit dem Fall des Sehens verglichen. Sehen setzt voraus, dass es etwas potenziell Sichtbares gibt, nämlich die Farben, einen zum Sehen Befähigten und als Drittes noch das Licht – mit der Sonne als oberster Quelle –, das dazu da ist, das potenziell Sichtbare zum tatsächlich Sichtbaren zu machen und dem Sehfähigen das Sehen tatsächlich zu ermöglichen. Wenn nun das Sehfähige auf Sichtbares gerichtet ist, ist das Licht das Band

zwischen beidem: Sehen und Gesehenwerden findet statt. Ohne Licht scheint den Augen die Sehfähigkeit zu fehlen, den eigentlich sichtbaren Dingen die Sichtbarkeit (508c).

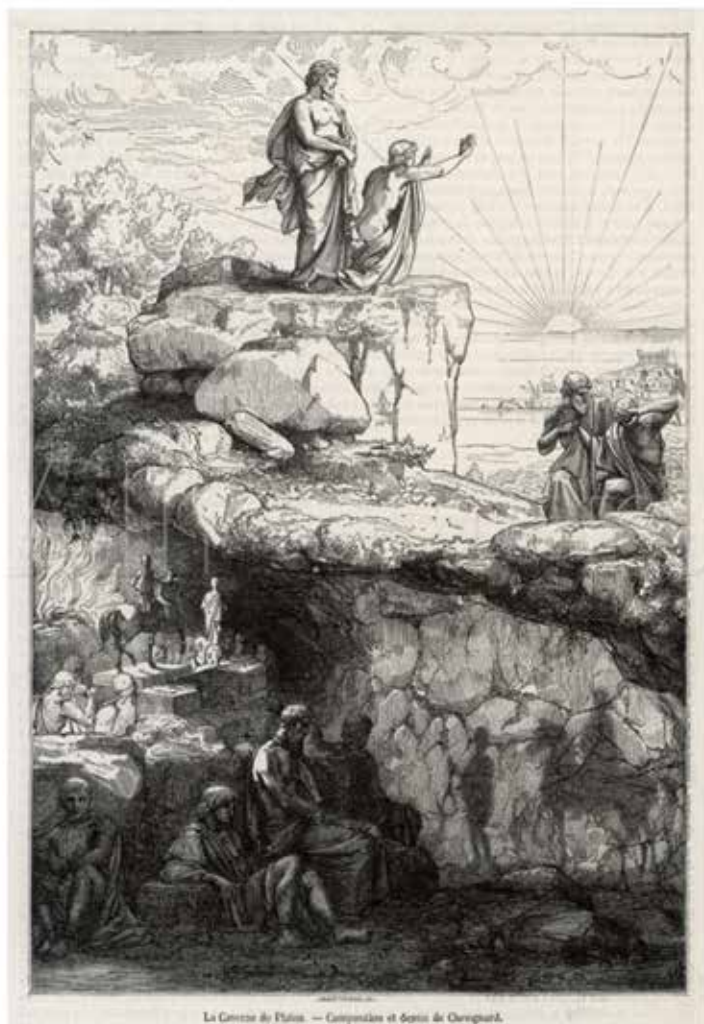
Der Bereich des Sehens wird nun als Illustration entsprechender Verhältnisse im Bereich des rationalen Erfassens gebraucht. Auch für den Bereich des rationalen Erfassens gibt es jemanden, der zu erfassen fähig ist, etwas, das rational erfasst werden kann, und etwas, das beides im Fall des aktiven rationalen Erfassens verbindet und aus einer höheren Quelle stammt. Diese höhere Quelle ist, so Platons Sokrates, die Idee des Guten. Wie sich im Bereich des Sehens die Sonne zu dem, das zum Sehen fähig ist, und zum Gesehenen verhält, so verhält sich im Bereich des rationalen Erfassens das Gute zu dem, das zum Erfassen fähig ist, und zum Erfassten. Dem Licht, das Sehen erst möglich macht, soll dabei aufseiten des rationalen Erfassens die mit dem Guten verbundene Wahrheit entsprechen, die rationales Erfassen erst möglich macht. Nur wenn wir Erkennbares unter der Perspektive des Guten betrachten, offenbart es sich als das, was es ist.

Es ist nicht klar, wie weit Sokrates oder Platon selbst der suggestiven Kraft des Bildes erlegen sind. Über Wahrheit würden wir heute anders sprechen: Während Sokrates zufolge Dinge an Wahrheit teilhaben können und manche

1 Platon-Marmorherme: Die römische Kopie, datiert in die Zeit Trajans (98 bis 117 n. Chr.), repräsentiert den Haupttypus des Platon-Bildes und geht auf eine Bildnisstatue aus dem 4. Jahrhundert v. Chr. zurück. Sie trägt am Fuß die falsche, später ergänzte Inschrift »Zenon«. (Vatikanische Museen, Museo Pio-Clementino, Sala delle Muse)

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Platons Interesse für Licht und Sehen beruht auf der Vergleichbarkeit von Sehen und rationalem Erfassen, die im Sonnen-, Lini- und Höhlengleichnis angenommen wird.
- Das Sonnengleichnis illustriert die Funktion der Idee des Guten, deren Erfassen für alles übrige Denken notwendig ist, durch den Vergleich mit der Rolle der Sonne für das Sehen.
- Das Liniengleichnis zeigt uns, dass wir Schlüsse von sichtbaren Gegenständen auf rational erfassbare Gegenstände ziehen können.
- In allen drei Gleichnissen geht es um das Erfassen der Idee des Guten. Das Höhlengleichnis verdeutlicht, dass wir uns dafür über die Bedingungen des Sehens und des rationalen Erfassens klar werden müssen – und damit auch über mögliche Täuschungen.



La Caverne de Platon. — Comparaison et dessin de Chevignard.

2 »La Caverne de Platon« von Edmond Lechevallier-Chevignard (1825–1902) zeigt uns die Gefesselten in der Höhle, außerdem einen von ihnen, der unter Führung eines Lehrers an die Oberwelt gelangt, dort zunächst noch geblendet ist, dann aber die Sonne begrüßt.

Dinge mehr, andere weniger an ihr teilhaben (s. *Staat* etwa 511e), würden wir heute Wahrheit eher als Eigenschaft von Aussagen über Dinge verstehen. Folgen könnten wir Sokrates' Ausführungen zumindest insoweit, als auch wir davon sprechen können, dass rationales Erfassen vorliegt, wenn wir das, was es gibt, als das, was es ist, erfassen – so wie sichtbare Dinge dann, wenn sie beleuchtet werden, in gewisser Hinsicht als die, die sie sind, sichtbar werden. Wahrheit im Sinn des *Staats* kommt insofern ins Spiel, als Dinge, die unter der Perspektive des Guten betrachtet werden, etwas offenbaren, das ist. So erfassen wir etwa, was ein Auge ist, wenn wir erfassen, was Augen zu guten Augen macht, und unter welchen Bedingungen ein Auge den Standard des Auge-Seins für einen bestimmten Organismus erfüllt beziehungsweise nicht erfüllt.

Das Sonnen- und Liniengleichnis: Vom Sichtbaren zum rational Erfassbaren

Eine kurze Bemerkung dazu, wie sich Platon allgemein zu Sonne und Licht äußert. Im Sonnengleichnis hängt das Licht von etwas ab, nämlich der Sonne, die ihrerseits vom Sonnengott Helios abhängt. In Platons früher *Apologie* hatte sich Sokrates gegen die Unterstellung wehren müssen, er halte die Sonne und den Mond nicht für Götter, sondern für einen Stein beziehungsweise für ein Stück Erde (26d), eine Diskussion, die

noch im Spätwerk *Gesetze* wieder erwähnt wird (886d). Andererseits wird die Sonne auch selbst als Gott bezeichnet (*Staat* 508a, *Gesetze* 821b), und im *Symposion* heißt es von Sokrates, dass er, nach dem Ende des Gastmahls, frühmorgens dem Brauch gemäß zur gerade aufgegangenen Sonne betete (220d) – womit Sonne und Sonnengott offenbar wieder gleichgesetzt werden.

Als weitere Ausführung zum Sonnengleichnis führt Sokrates sodann das Linien- und das Höhlengleichnis ein. Das Sonnengleichnis hatte die Funktion der Idee des Guten illustriert. Nun geht es darum, wie wir uns dieser Idee nähern können – das ist jedenfalls das, was für den zu erziehenden künftigen Philosophen von Belang ist. In der Illustration durch die Linie werden verschiedene Bereiche von Gegenständen auf einer Linie aufgetragen. Im Bereich des Sichtbaren zum einen der Bereich der natürlichen Abbilder – nämlich Schatten und Spiegelungen von sichtbaren Gegenständen –, zum anderen der Bereich der sichtbaren Originale jener Abbilder. Im Bereich des rational Erfassbaren wird einerseits der Bereich mathematischer Gegenstände aufgetragen, zum anderen der Bereich ihrer Urbilder, das heißt vermutlich der Ideen. Diese vier Bereiche unterscheiden sich nach Klarheit, und das heißt wieder: danach, inwieweit die Gegenstände, die in die jeweiligen Bereiche fallen, offenbaren, was ist. Das Liniengleichnis illustriert dabei primär die Abhängigkeitsverhältnisse zwischen den verschiedenen Gegenstandsbereichen. Diese Abhängigkeitsverhältnisse erlauben uns, Schlüsse von Gegenständen des einen Bereichs – dem des Sichtbaren – auf Gegenstände des anderen Bereichs – den des rational Erfassbaren – zu ziehen. So können wir etwa von Merkmalen gezeichneter Dreiecke auf die Merkmale der eigentlichen, mathematischen Dreiecke schließen oder – im Unterricht – schließen lassen und sie so erfassen beziehungsweise erfassbar machen (s. 510d–511a). Ebenso sollen wir wohl innerhalb des Bereichs des rational Erfassbaren von Merkmalen der Gegenstände des einen Bereichs – der Mathematik – auf Merkmale der Gegenstände eines anderen Bereichs – der Ideen und letztlich der Idee des Guten – schließen können, und zwar, indem wir uns klarmachen, auf welchen inhaltlichen Voraussetzungen unsere Annahmen über die mathematischen Gegenstände beruhen (zu dieser Deutung des Liniengleichnisses s. Th. Ebert, *Meinung und Wissen in der Philosophie Platons*. Berlin u.a., 1974, S. 173–193).

Das Höhlengleichnis und die Täuschung des Schattens

Mit dem Erwerb der Kenntnis der Idee des Guten beschäftigt sich schließlich das Höhlengleichnis – fraglos das berühmteste Gleichnis der

Geschichte der westlichen Philosophie. Das Gleichnis handelt, wie es zu Beginn heißt, von unserer Natur in Bezug auf Bildung (*paideia*) und Nicht-Bildung. Es erzählt von Menschen, die in einer Höhle von Kindheit an gefesselt und in ihrer Blickrichtung strikt fixiert sind. Sie sehen bewegte Schatten an der gegenüberliegenden Wand und halten diese Schatten für das, was wirklich und selbstständig ist, weil sie nichts von der Verursachung der Schatten wissen. Einer der Gefesselten wird befreit und gezwungen, unter Schmerzen aufzustehen, sich umzuwenden und die Gegenstände anzusehen, deren Schatten er zuvor gesehen hatte – und die ihrerseits skulpturale Abbilder von Gegenständen sind. Er wird ferner gezwungen, in das Feuer zu sehen, das die Lichtquelle für die Schatten ist. Analoges wiederholt sich, wenn er dann aus der Höhle herausgeführt wird und dort in der Außenwelt, immer zunächst mit schmerzenden Augen, die natürlichen Abbilder, nämlich Schatten und Spiegelungen, und die Gegenstände, von denen jene die Abbilder sind, sowie schließlich die Sonne selbst sieht.

Wie im Fall des Sonnengleichnisses ist auch im Höhlengleichnis das Licht Voraussetzung für Wahrnehmung. Im Unterschied zum Sonnengleichnis ist das Licht für den Gefesselten nun aber zugleich Voraussetzung, wenn auch nicht Grund, für eine Täuschung. Dabei mag auch der in der Höhle fehlende Wechsel von Tag und Nacht und damit das Fehlen eines Hinweises auf die Lichtquelle für die Gefesselten ein zusätzlicher Anlass sein, die Schatten nicht als solche zu erkennen. Grund für die Täuschung – die »Nicht-Bildung« –, in der die Schatten für etwas Selbstständiges gehalten werden, ist das Fehlen der Reflexion auf die Bedingungen der Wahrnehmung. Es ist dieser Aspekt, unter dem das Gleichnis nun auch unsere Natur in Bezug auf Bildung und Nicht-Bildung im Bereich rationalen Erfassens illustriert. Auch hier geht es darum, dass wir auf die Voraussetzungen dessen, was wir zu wissen glauben, reflektieren – beziehungsweise dies eben nicht tun – und uns die Abhängigkeitsverhältnisse klarmachen, die zwischen den Gegenständen unseres Erfassens bestehen, und das auch unter Schmerzen, wie sie mit der Aufgabe von Denkgewohnheiten verbunden sind.

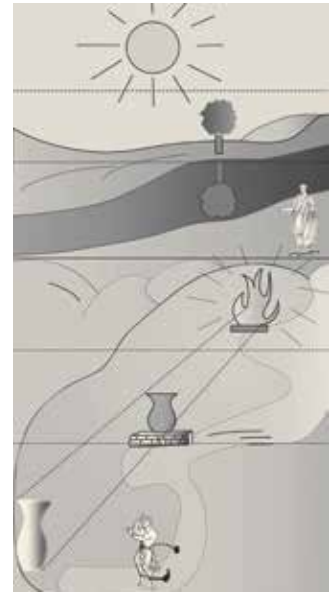
Der zentrale Punkt des Gleichnisses ist damit nicht schon die Befreiung von den Fesseln, sondern vielmehr die Umwendung, das heißt der Erwerb und die Anwendung jener Fähigkeit, die uns erlaubt, den Ursprung des zuvor Erfassten als dessen Ursprung zu begreifen und ebenso Wirkungen dieses Ursprungs als solche zu erfassen. Nur so ist es möglich, das jeweils Gesehene beziehungsweise rational Erfasste richtig einzuordnen und überhaupt die Bereitschaft zu entwickeln, nach seinen Ursprüngen zu forschen.

Wenn wir nicht auf die Voraussetzungen des rationalen Erfassens reflektieren, laufen wir Gefahr, uns auf etwas zu beziehen, das nicht im eigentlichen Sinne oder für sich genommen, selbstständig ist. Fortschritte in der Erkenntnis jener Bereiche, die wir – Sokrates zufolge – für die gute und gerechte Herrschaft erfassen müssen, sind dann nicht mehr möglich.

Von zentraler Bedeutung: Die Reflexion über die Bedingungen des Sehens und rationalen Erfassens

Der Zusammenhang, die Parallelisierbarkeit und die Funktion der Gleichnisse sind heftig umstritten. Geht es, wie die Tradition meint, in allen Gleichnissen um die Unterscheidung zweier Welten und der Zugänge zu ihnen? Dieser Auffassung zufolge könne die sichtbare, veränderliche Welt nur durch ebenso veränderliche Meinungen erfasst werden, zum anderen könnten die unveränderlichen Dinge – wie etwa mathematische Gegenstände oder extramentale Ideen – nur rational durch Wissen erfasst werden. Hiervon zu wissen, ist nun in der Tat wichtig, wenn man wie Platons Sokrates die Standards auch des Handelns und Regierens für unveränderlich hält, nämlich für Ideen, die der Herrscher erfassen muss und statt derer er nicht auf veränderliche Meinungen als Grundlage seines Handelns zurückgreifen darf.

Allein, für *paideia* und für das Erfassen des Guten, worum es im gesamten Kontext der Gleichnisse geht (s. 502e–505b, 518b–519d, 521c), ist jener andere Punkt wichtiger: nämlich die Reflexion auf die Bedingungen des Sehens und des rationalen Erfassens und auf die davon abhängenden Bedingungen des Erkenntnisfortschritts. Nur der, dem diese Bedingungen bekannt werden, wird ein Philosoph und ein geeigneter Herrscher werden können. Licht, dessen wahrnehmungstheoretische Funktion Platon interessiert, spielt dabei auf der Ebene des Gleichnisses eine zentrale Rolle für unseren Zugang zur Welt, ermöglicht aber zugleich auch Täuschung, wenn wir uns über die Bedingungen des Sehens wie dann auch des rationalen Erfassens nicht bewusst sind – ein Zustand, den Platons Sokrates in dem ihm eigenen Elitismus wohl den meisten von uns zuschreiben würde. ●



3 Eine verbreitete, doch ungenaue Darstellung zum Höhlengleichnis. Denn bei Platon sieht der Gefesselte, strikt fixiert und mit seinem Blick zur Höhlenwand ausgerichtet, dort seinen eigenen Schatten ebenso wie auch bewegte Schatten von Gegenständen, die der Mauer entlang getragen werden.



Der Autor

Prof. Dr. Friedemann Buddensiek, Jahrgang 1967, ist seit 2007 Professor für Philosophie der Antike an der Goethe-Universität. Zu seinen Spezialgebieten gehört die Philosophie der Klassischen und der Hellenistischen Antike.

buddensiek@em.uni-frankfurt.de



»Finsteres Mittelalter«

Über die ungebrochene Wirkkraft eines rhetorischen Bildes

von Johannes Fried und Janus Gudian

Dass das Mittelalter »dunkel«, gar »finster«
gewesen sei, kann als handelsüblicher Topos gelten.
Der stillschweigende Verweis etwa auf Autoritäten
der Geistesgeschichte wie Luther, Voltaire oder
Heine erübrigt jeglichen Beleg. Doch professionelle
Mediävisten wagen, ein anderes Mittelalterbild zu
zeichnen und werfen gleichzeitig ein Licht darauf, wie
es zu diesem falschen Verständnis kam.

Beinamen sind beliebt, nicht immer zutreffend, doch seit Langem in Mode und einmal etabliert, nicht mehr hinwegzudenken. Karl »der Gute«, Karl »der Kahle«, Karl »der Dicke«, Karl »der Einfältige«, Heinrich »der Vogler«, Wilhelm »das Kind«, Margarete »Maultasch« – wir sind es gewohnt, historischen Persönlichkeiten klingende Beinamen zu verpassen. Diese dienen der Unterscheidung und der Charakterisierung, vor allem aber werfen sie Licht auf unser eigenes Verständnis der so Gekennzeichneten und helfen, uns im Wirrwarr der französischen, deutschen, englischen und anderen Potentaten gleichen Namens zu orientieren. Hinzu kommt, dass die von solch lautmalerschen Namen wie »der Fromme« und »der Schöne«, »der Faule« und »die Wahnsinnige«, »Bloody Mary« und »Jungfrau von Orléans« ausstrahlende Faszination, die ihnen innewohnende Aneignungssuggestion, derart verlockend sind, dass man auf sie – lieb und teuer, wie sie geworden sind – nicht mehr verzichten kann.

Die Dunkelheit einer ganzen Epoche

Trifft Gleiches etwa auch auf ganze Epochen zu? Das »finstere Mittelalter« ist dafür wohl das bekannteste, einprägsamste und zugleich ein höchst diskriminierendes Beispiel. Wie oft etwa wird aktuelle Bestialität als »Rückfall ins finstere Mittelalter« gebrandmarkt? So schrieb etwa Herbert Rosendorfer in seiner »Deutsche[n] Geschichte. Ein Versuch«, dass mit Blick auf Personen wie Konrad von Marburg (einen Kreuzzugsprediger, Inquisitor und »Manager« der Heiligen Elisabeth von Thüringen) die Apostrophierung des Mittelalters als »finster« nicht unberechtigt sei. Vergleichbare Urteile sind uns seit der Renaissance geläufig, als die Humanisten eine Rückkehr zur Antike, eine Wiederbelebung der angeblich mit dem Mittelalter untergegangenen antiken Werte propagierten. Vom »dunklen Mittelalter« oder in anderer abwertender Art und Weise sprachen von dieser Epoche Martin Luther und Caesar Baronius, Voltaire, David Hume und Herder oder Schiller, auch Heine. Dabei springt mit der adjektivischen Bestimmung vom »dunklen« oder »finsternen« Mittelalter eine negative Bedeutung in die Augen, eine geradezu schuldhaftige Rückständigkeit, und wird mit ihr das gesamte mittlere Zeitalter negativ aufgeladen.

Dass das Mittelalter »dunkel«, gar »finster« gewesen sei, kann als handelsüblicher Topos gelten. Der stillschweigende Verweis etwa auf eine der genannten Autoritäten der Geistesgeschichte erübrigt jeglichen weiteren Beleg. Professionelle Mediävisten, die ein anderes Mittelalterbild zu zeichnen wagen, sehen sich sogleich in die Defensive gezwungen. Es scheint, als ob der

Sprachgewalt dieser Formel gerade populärwissenschaftliche Publikationen nichts entgegenzusetzen haben, geschweige denn sie zu korrigieren wünschten. Als ob sie, durch das Wort gebannt, das Mittelalter allein in den düsteren Farben des Vorurteils wahrnehmen und darstellen können.

War das mittelalterliche Denken »geknechtet«?

Doch warum galt und gilt das Mittelalter als »finster«? Weil es kein elektrisches Licht gab? Stimmt. Aber brannten die Bienenwachskerzen der Humanisten so sehr viel heller? Oder weil aufgrund der Quellenlage wenig darüber bekannt ist, insbesondere über das 10. Jahrhundert? Stimmt. Aber wussten die Humanisten über die Antike so sehr viel besser Bescheid? Oder weil – wie Rosendorfer schreibt – das Denken »geknechtet« war? »Die Weltvorstellung der abendländischen Kulturen war über tausend Jahre lang ein geschlossenes System, in dem nur in den von der Kirche [...] erlaubten Bahnen gedacht werden durfte«, so in Band 6 seiner Deutschen Geschichte. Der gemeinsame Nenner all solcher Sichtweisen, das Mittelalter als »finster« zu bezeichnen, ist seine (postulierte) Andersartigkeit gegenüber der jeweils eigenen Zeit: Die Renaissance propagierte die Rückkehr zur »guten alten Zeit« und lehnte das Mittelalter als Aberration der Antike ab – einer Antike wohl gemerkt mit Sklavenjagd und Götzenkult, mit blutigen Tier- und Menschenopfern.

Das Denken geknechtet? Gewiss, von »political correctness« kontrolliert. Aber geknechtet? Die große, in Teilen noch heute gültige »Magna Charta« von 1215 ein Produkt geknechteten Denkens? Die averroistischen Denker im späteren 13. Jahrhundert geknechtet? »Ich setze, es gibt keinen Gott. Beweise das Gegenteil!« »Man soll nicht beten und beichten nur zum Schein.« Sätze des 13. Jahrhunderts. »Die Religion behindert den Fortschritt des Denkens.« Geschlossenes System und geknechtetes Denken oder bedrängte Theologie? Die Sätze wurden verdammt und überdauerten dennoch in ihrer ganzen Schärfe die Jahrhunderte. Sie animierten die Leser und Theologen bis ins 16. Jahrhundert und darüber hinaus stets aufs Neue zu kritischem Denken über Glaubenspostulate. Luther freilich, der Verächter des Mittelalters, missbilligte sie.

Renaissance-Gelehrte als Retter der Antike?

Weder die Renaissance-Gelehrten noch der moderne Literat haben bedacht, dass ihre glänzende Antike von den »Finsterlingen« des Mittelalters gerettet worden war; ja, dass diese Antike, soweit sie solche Humanisten wie Cicero, Livius, Vergil oder Ovid, einen Tacitus oder Quintilian betrifft, eben die Antike des Mittelalters ist. Denn nur, was den früh- und



2

hochmittelalterlichen Gelehrten des Tradierens wert erschien, stand den Renaissance-Autoren noch zur Verfügung. Seit der Ehe des Gotenkönigs, Athaulf mit der römischen Kaisertochter Galla Placidia im Jahre 414 ertönte durch tausend Jahre hindurch unter den sich der römischen Zivilisation öffnenden Barbaren der Ruf nach »Erneuerung«, *renovatio*. Allein die Werke Platons, vom Dialog »Timaios« abgesehen, erreichten erst in der Renaissance den lateinischen Westen, die spätmittelalterliche Welt.

Und sie haben gesucht und aufgespürt, ruhelos, ständig unterwegs, jene Gelehrten der düsteren, spärlich beleuchteten Zellen, der engen Kammern des Mittelalters, sind unter endlosen Strapazen der Kunde von Handschriften gefolgt, haben in wochenlang anhaltender Mühe unter hohen Kosten die Texte abge-

1 Ein Kletterer, der das irdische Dunkel verlässt. I-Initiale in einem »Perikopenbuch«, das im frühen 11. Jahrhundert auf der Reichenau entstand.

2 Die Figur des »Fürst der Welt« in St. Sebald, Nürnberg, um 1330 enthüllt die Doppelbödigkeit des Lebens: Von vorne präsentiert er sich als Verführer, die Linke zum Meineid erhoben, seine Rückseite jedoch ist von Schlangen und Kröten zerfressen und verrotten. So führt er den Gläubigen die dunklen Seiten der Welt und ihrer Reize vor Augen, mahnt sie dazu, genau hinzuschauen und die Folgen des eigenen Verhaltens zu bedenken.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Die Renaissance und die Aufklärung formten das Bild vom »finsternen Mittelalter« und ächteten damit die vorangegangene Epoche weit über ihre eigene hinaus.
- Die Indizien für den Ideenreichtum und das Neue im Mittelalter konterkarieren das schlechte Image: die »Magna Charta«, die Auseinandersetzung mit der Theologie, die Entdeckung der arabischen Gelehrten – um nur wenig zu nennen.
- Das Mittelalter dient bis heute als Gegenentwurf zum eigenen Selbstverständnis, um dieses zu erarbeiten.

3 Die Diskussion zwischen einem Philosophen, der eine Behauptung aufstellt (»est, est«), und einer widersprechenden weiblichen Allegorie (»non est«). Beide werden von ihrer Anhängerschaft (»fautores«) unterstützt: Die des ersteren verurteilt die Gegenmeinung (»maledicit«), die der Gegenpartei billigt sie (»benedicit«).

schrieben, Pergamentblatt um Pergamentblatt, Federkiel um Federkiel, haben das Abgeschriebene ausgelegt, seine Sprache, seine Gedanken, seine Botschaften nachgeahmt, es lehrend und preisend propagiert und ein grenzenloses Interesse, ein unstillbares Verlangen nach seiner aneignenden »Wiedergeburt« geweckt, waren der Neugier und dem Wissenwollen verfallen, das sich an den antiken Autoren maß und sie zu übertreffen suchte, offen für alles Neue aus Byzanz, dem Morgenland und der Kultur der Araber. Ja, einer dieser Mönche machte sich, noch vor dem Jahr 1000, daran, des Aristoteles Kategorienlehre ins barbarische, jeglicher Philosophie, jeglicher systematischen Methodik, jeglicher Spezialterminologie fremde Deutsch zu übertragen. Ein Sprachschöpferum sondergleichen, der Anfang der Sprache Immanuel Kants. Dieser Philosoph freilich attestierte jener Epoche mit solchem Bemühen geistige Unmündigkeit.

Goethe und sein Lob für die Schöpfungskraft der »mittleren Zeit«

Wie anders, wie viel humaner Goethe: Er hegte viel zu hohe Achtung vor dem schöpferischen Ingenium jener »mittleren Zeit«, als dass er sie hätte verachten können. Im Gegenteil: Straßburgs und Freiburgs Münster und ihre Baumeister bewunderte er ebenso wie den Kölner Dom. »Die Neigung der sämtlichen Jugend zu dem Mittelalter halte ich ... für einen Übergang zu höhern Kunstregionen; doch verspreche ich

mir viel Gutes davon«; den »Narrenwust« seiner eigenen Gegenwart hingegen ertrug er nur, indem er sie historisch, als gleichsam schon abgelebt betrachtete. (Hamburger Ausgabe, Briefe 3, S.137 f.)

Doch Konrad von Marburg? Die Freiwilligkeit der Buße mit ihren Peitschenhieben, der sich die Heilige Elisabeth unterwarf, die Anfänge blutiger und von Autodafés erhellter Inquisition? Sind sie nicht finster? Indes, ist es nicht mehr als kühn, solche Einwände in der Zeit von NSA und Drohnengebrauch, von Hackern und anderen Spionen, von Gehirnwäsche, KZ und Gulag, von Guantanamo als besondere Kennzeichen einer fremden Welt zu stilisieren? Die schlimmsten Auswüchse der Inquisition erfolgten übrigens im Zeitalter der Renaissance und des Humanismus, in der so verklärten Frühen Neuzeit, verklärt bald auch durch Jakobinertum und Guillotine. Wir wollen nicht rechten und Grausamkeiten gegeneinander aufrechnen, vielmehr die Unsinnigkeit jener Wendung vom »finsternen Mittelalter« bei heutigen Rednern und Literaten zu bedenken geben.

Die Legitimationsstrategie von Kant & Co

Die Reformatoren lehnten sich gegen die Ausrichtung an und nach »Rom« auf und wollten Licht in die von Katholizismus und Papst verdunkelte Welt bringen; die Aufklärung prognostizierte die Entwicklung vom Unmündigen zum Mündigen. Zwar wurde das Mittelalter bis



dato schon als dunkel verstanden, doch verschärfte gerade der Klassizismus diese Abwertung noch einmal wesentlich: Denn so wie die Antike von Johann Joachim Winckelmann geweißt wurde, so wurde umgekehrt das Mittelalter nun »schwarz« – und Begriffe wie »schwarzsehen«, »Schwarzmalerei« sowie das Kinderspiel »Wer hat Angst vorm Schwarzen Mann?« zeigen deutlich den Konnex auf, in den das Mittelalter durch diese Zuordnung auf der Farbenskala gerückt wurde. Die metaphorische Kontrastierung von Schwarz und Weiß verabsolutierte den Antagonismus der so gezeichneten Epochen und je intensiver die Polarisierung, desto größer die Effekte. Je dunkler, finsterner, schwärzer – so die rhetorische Suggestion – das Eine, Abgelehnte, desto notwendiger der Handlungsbedarf und desto heller, lichter, hehrer, schöner das Andere, das Neue, die Zeit oder das Ziel desjenigen, der vom Mittelalter als »finster« spricht und sich damit von ihm absetzen will. Eine Legitimationsstrategie also der Herren Kant & Co. Auch heutigen Tags reicht die Vorstellung vom Unterschied zum »finsternen Mittelalter« von der Hygiene und Krankheiten über die Religion als das alles beherrschende Korsett, der technologischen Rückständigkeit bis hin zum barbarischen Menschenbild.

Das Mittelalter als Gegenentwurf des eigenen Selbstverständnisses

Bei all diesen Mittelalterbildern ist eine bemerkenswerte Konstante zu beobachten: Denn so oft die Zeit von circa 500 bis 1500 der jeweils eigenen Zeit als (Vexier-)Spiegel vorgehalten wurde, so oft diente sie als Erkenntnisfolie, als Kontrapunkt, wie man selbst sein oder eben nicht sein wollte. Das Mittelalter wird zum Gegenentwurf des eigenen Selbstverständnisses, als Zerrbild des eigenen Selbstbilds wahrgenommen, also selbstreferenziell, wobei der negativen Fremdbestimmung die eigene positive Selbstwahrnehmung entspricht. Nicht das Maß der mittelalterlichen Seele, sondern das Maß der eigenen, in den Zeiten wechselnden Wertvorstellungen haben das Mittelalter stets in ein (manchmal positives wie in der Romantik oder im Historismus, meist jedoch negatives) antagonistisches Verhältnis zur eigenen Zeit gesetzt. Indem das Mittelalter jedoch durch die Negation der jeweils eigenen Ideale definiert wird, wird das Bewusstsein von der Differenz gegenüber dem Mittelalter integraler Bestandteil des jeweils eigenen Denkens. Und eben dies ist das Alleinstellungsmerkmal des Mittelalters schlechthin – denn keine andere Epoche wurde in dieser Quantität wie Qualität herangezogen, um die jeweils eigene Gegenwart greifen und verstehen zu können, um die



4 Uli Hoeneß am Pranger: In einem Artikel von Michael Wolffsohn, der 2013 in »Der Welt« mit diesem Foto erschien, heißt es: »Der Präsident des FC Bayern, Uli Hoeneß. Der Steuerhinterziehungs-Fall verführt das Volk, ins finstere Mittelalter zurückzukehren: zum Pranger, der öffentlichen Zur-Schau-Stellung des nicht rechtmäßig Gerichteten.«

eigene Identität zu konstruieren. Dabei ist die dem Mittelalter zugeordnete Farbe Grundvoraussetzung, um es als Projektionsfläche beziehungsweise Kontrastfolie nutzen zu können, denn nur so kann es ein »Blue-« beziehungsweise »Dark-Screen« sein. ●

Literatur

Johannes Fried,
Das Mittelalter. Geschichte
und Kultur, München 2012.



Die Autoren

Prof. Dr. Dr. h.c. Johannes Fried, 73, ist emeritierter Professor für Mittelalterliche Geschichte an der Goethe-Universität. Seine Forschungsschwerpunkte sind das Früh- und Hochmittelalter sowie die Geschichte von Bildung und Wissen im Mittelalter. Vor zwei Jahren erschien seine viel beachtete Biografie zu Karl dem Großen. Der Mediävist ist Mitglied von zwei nationalen und zwei internationalen wissenschaftlichen Akademien. 2006 wurde er von der Deutschen Akademie für Sprache mit dem Sigmund-Freud-Preis für Wissenschaftliche Prosa ausgezeichnet, im Mai 2015 mit der Carl Friedrich Gauß-Medaille der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft.

fried@em.uni-frankfurt.de

Janus Gudian, M.A., 41, ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Historischen Seminar der Goethe-Universität. Seine Interessenschwerpunkte sind Historiographie-Geschichte, Wissenschaftsgeschichte der Moderne sowie politische Theologie. Derzeit ist er Bearbeiter der unter anderem von Johannes Fried herausgegebenen Edition der Briefe Ernst H. Kantorowicz'. In der Biographienreihe der Goethe-Universität hat er den Band über Kantorowicz verfasst.

gudian@em.uni-frankfurt.de

Im Schein der Sonne und des Mondes

Licht in indigenen Kulturen Lateinamerikas

von Iris Gareis

Mond und Sonne spielen als Hauptgestirne in der Mythologie vieler Völker Lateinamerikas eine bedeutende Rolle. Häufig sind sie maßgeblich an der Schöpfung beteiligt und werden mit der Fruchtbarkeit der Pflanzen sowie dem Wohlergehen der Menschen in Verbindung gebracht. Zahlreiche Mythen berichten von den Taten der beiden Gestirne, die manchmal als Geschwister oder auch als Liebespaar gelten.

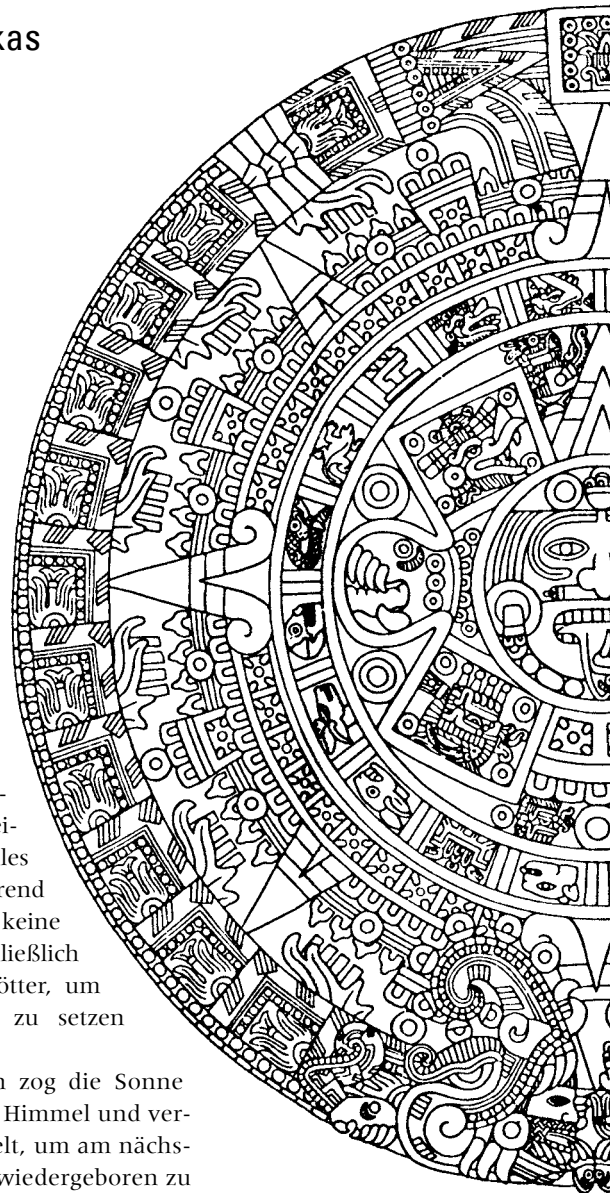
Die Sonne mit ihrem wärmend hellen Licht nimmt in den meisten indigenen Kulturen Lateinamerikas einen wichtigeren Platz ein als der Mond. Es gibt jedoch wenige Ausnahmen: So sahen die präkolumbischen Chimú (circa 1000 n. Chr. bis circa 1470) im wüstenhaften Klima der Nordküste Perus das Nachtgestirn als stärker und bedeutender an als die Sonne, da der Mond auch tagsüber sichtbar sein kann, die Sonne nachts aber nicht leuchtet. Trotz der großen Bedeutung in der Mythologie vieler indigener Kulturen Lateinamerikas ist die kultische Verehrung der Sonne oder des Mondes, vor allem in eigens dafür errichteten Bauten, nur für die präkolumbische Zeit belegt.

Sonne und Mond bei den Azteken

Als die Spanier 1519 an der Küste der Halbinsel Yucatán ankamen, beherrschten die Azteken – Mex'ica, wie sie sich selbst nannten – weite Teile des heutigen Staates Mexiko. Im Glauben der Azteken gingen ihrem Weltzeitalter, der »fünften Sonne«, bereits vier andere Zeitalter voraus. Sie endeten jeweils in großen Katastrophen, da die göttlichen Brüder *Quetzalcoatl* (»Gefiederte Schlange«) und *Tezcatlipoca* (»Rauchender Spiegel«) jeweils die Schöpfung des anderen zerstörten. Zur Schaffung der fünften Sonne taten sich die beiden Brüder endlich zusammen: Unterstützt von weiteren Gottheiten schufen sie die Erde neu und hoben das Himmelsgewölbe an. Aus dem

Kreis der Gottheiten opferten sich zwei Götter im Feuer, um als Sonne und Mond an den Himmel emporzusteigen. Da die Gestirne jedoch reglos am Firmament verharren, konnte die Erde nicht gedeihen: Immerwährendes gleißendes Sonnenlicht ließe alles auf der Erde verdorren, während der fahle Mondschein allein keine Pflanzen hervorbrächte. Schließlich opferten sich die übrigen Götter, um die Gestirne in Bewegung zu setzen (Abb. 1).

Im Glauben der Azteken zog die Sonne tagsüber ihre Bahn über den Himmel und verweilte nachts in der Unterwelt, um am nächsten Morgen als Tagesgestirn wiedergeboren zu werden. Himmel und Unterwelt dachten sich die Azteken als in dreizehn Schichten unterteilt. Der Mond residierte in der untersten Himmelschicht, in der auch *Tlalocan* (Ort des Regengottes *Tlaloc*) angesiedelt war, ein immergrünes Jenseits für Menschen, die in Verbindung mit Wasser den Tod gefunden hatten. *Tonatiuh*, der Sonnengott, trat als Krieger auf. Sein Kult erforderte die Opferung von Kriegsgefangenen und menschlichen Herzen, um die Welt weiterhin in Bewegung zu halten. Die Sonne verkörperte das männliche Prinzip und das Kriegertum, wohingegen der



Mond mit den weiblichen Gottheiten verbunden war.

In der dritten Himmelschicht regierte der Sonnengott über ein paradiesisch vorgestelltes Jenseits. Es beherbergte alle im Kampf oder auf dem Opferstein getöteten Krieger, Kinder, die Opfer eines Krieges geworden waren und auf Reisen gestorbene Händler sowie Frauen, die bei der Geburt ihres ersten Kindes den Tod fanden. Auch Musiker gingen in den Himmel der Sonne ein, sorgten mit ihren Instrumenten für Unterhaltung. Die Krieger begleiteten im östlichen Teil des Himmels die Sonne auf ihrem Weg zum Zenit. Dort übernahmen die bei der Geburt des ersten Kindes verstorbenen Frauen die Begleitung der Sonne bis zu deren Vergehen im Westen. Als Sonnenbegleiter fungierten die Krieger aber nur vier Jahre lang, dann verwandelten sie sich in Vögel und Schmetterlinge, die den Nektar der Blumen tranken.

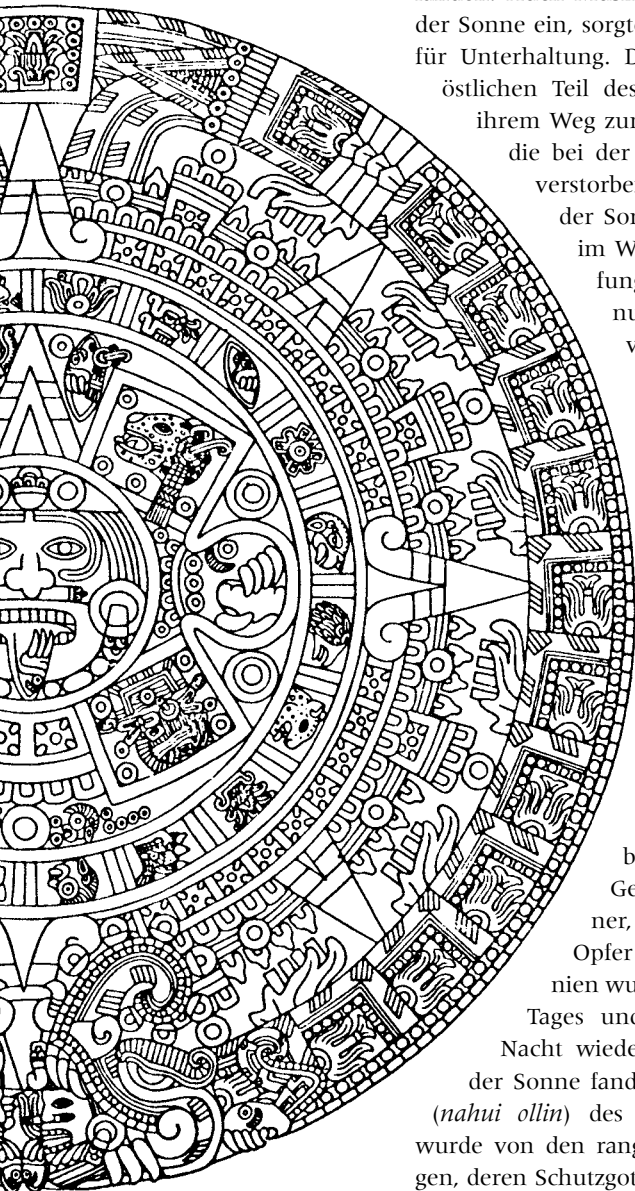
Mehreren Mythen zufolge wurden die Menschen hauptsächlich dazu geschaffen, der Sonne zu essen und zu trinken zu geben, weshalb diese Gottheit besonders viele Opfergaben an Blut und Herzen erhielt. Jeden Tag wurde die Sonne mit Musik und Opfergaben begrüßt. Priester rezitierten Gebete und töteten Rebhühner, die sie der Gottheit zum Opfer darboten. Diese Zeremonien wurden vier Mal während des Tages und fünf Mal während der Nacht wiederholt. Das wichtigste Fest der Sonne fand am Tag »Vier Bewegung« (*nahui ollin*) des Ritualkalenders statt und wurde von den ranghöchsten Kriegen begangen, deren Schutzgottheit sie war. Zur Vorbereitung musste das gesamte Volk strenge Fastenregeln befolgen. Zugleich wurde unter den Gefangenen der hervorragendste Krieger ausgesucht, um geopfert zu werden und so dem Sonnengott die Botschaft der Krieger zu überbringen. Auf der erhöhten Plattform des Tempels rissen die Priester dem auserwählten Gefangenen das Herz aus der Brust und opferten es dem Sonnengott. Junge Krieger zapften sich zu Ehren der Sonne mit Schilfrohren selbst Blut ab und brachten es der Gottheit dar (Abb. 2).

Weitere Feste für den Sonnengott veranstalteten die Azteken anlässlich der Sonnwenden

und Tag-und-Nacht-Gleichen. In der kriegerischen Kultur der Azteken konnte *Tonatiuh* zwar naturgemäß große Bedeutung beanspruchen, dennoch nahm der Sonnengott im aztekischen Pantheon keineswegs die höchste Stellung ein. Diese fiel den Schöpfergottheiten *Tezcatlipoca* und *Quetzalcoatl*, dem Regengott *Tlaloc* und der aztekischen Stammesgottheit *Huitzilopochtli* (»Kolibri der linken Seite«) zu.

Sonnenkult als Staatsreligion – Die Inka: Söhne der Sonne

Im südamerikanischen Inkareich erfuhren Sonne und Mond in eigenen Tempelbauten kultische Verehrung. Im Pantheon der Inka kam dem männlichen Sonnengott die höchste Position zu, während die weibliche Mondgottheit als Frau der Sonne galt und eine untergeordnete Rolle spielte. Die Inka hatten in nur etwa 100 Jahren fast die gesamte Westflanke Südamerikas unter ihre Kontrolle gebracht und bis zur Ankunft der spanischen Eroberer im Jahr 1532 das größte präkolumbische Reich in Amerika errichtet. Nach der militärischen Unterwerfung neuer Gebiete konsolidierten sie ihre Herrschaft mit einem Maßnahmenkatalog, zu dem auch die Einführung des Sonnenkultes als Staatsreligion zählte. In den hinzugewonnenen Regionen erbauten sie Verwaltungszentren, jeweils ausgestattet mit einem Sonnentempel. Die zentrale politische Rolle der Sonnengottheit *Inti* wird noch dadurch unterstrichen, dass der Inka-Herrscher als Sohn des Sonnengottes *Intip churin*



1 Ollintonatiuh ist eine aztekische Repräsentation der fünften Sonne: Mit dem Sonnengott in der Mitte und Symbolen der vier vorangegangenen Zeitalter im nächsten Kreis.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit ihrem wärmenden Licht nimmt die Sonne in den meisten indigenen Kulturen Südamerikas einen wichtigen Platz als der Mond ein.
- Bei den Azteken verkörperte die Sonne das männliche Prinzip und das Kriegertum, dagegen war der Mond mit den weiblichen Gottheiten verbunden.
- Die Inka machten den Sonnenkult zur Staatsreligion ihres riesigen Reiches, heiligster Ort war der Sonnentempel in Cusco.
- Die spanischen Conquistadoren brachten zwar die christliche Religion nach Lateinamerika, doch vielerorts verehrte die indigene Bevölkerung weiter ihre lokalen Götter. Nicht selten kam es zu Verschmelzungen religiöser Vorstellungen, so wurde Jesus mit der Sonne in Verbindung gebracht.

2 Herzopfer aus dem Florentiner Codex aus der zweiten Hälfte des 16. Jahrhunderts. Der spanische Missionar Bernardino de Sahagún und seine indigenen Mitarbeiter verfassten dieses bedeutendste zeitgenössische Werk über das Leben und die Kultur der Azteken, zunächst in der Sprache der Azteken, Nahuatl, und übersetzten den Text dann ins Spanische.

3 Der Inka bringt der Sonne im Monat Juni ein Trankopfer dar. Dies ist eine Darstellung aus der Sicht des andinen Autors Felipe Guaman Poma de Ayala zu Beginn des 17. Jahrhunderts.

galt, während seine Schwester und königliche Gemahlin als Tochter des weiblichen Mondes betrachtet wurde (Abb. 2).

Durch seine göttliche Abkunft legitimiert, fungierte der Inka-Herrscher bei besonders wichtigen Feierlichkeiten im Reich als oberster Priester der Sonne. Er wurde dabei vom Oberhaupt der hierarchisch gegliederten Inka-Priesterschaft unterstützt, der zugleich oberster Priester des Sonnenheiligtums in Cusco war. Meist übte dieses Amt ein naher Verwandter des Herrschers aus. Beide residierten in der Hauptstadt Cusco, dem Zentrum des Reiches, deren Name übersetzt »Nabel oder Mittelpunkt des Universums« bedeutet. Hier liefen die vier Reichsteile zusammen, die dem Inkareich in der Staatssprache Quechua den Namen *Tawantinsuyu* (»Raum der vier zusammengehörigen Teile«) gaben. Cusco gliederte sich in Ober- und Unterstadt, in *Hanan Cusco* und *Hurin Cusco*. Während der Obere Stadtteil der politischen Macht vorbehalten war, galt Hurin Cusco als religiöser Mittelpunkt des Reiches, dessen Herzstück der Sonnentempel *Coricancha* (»Goldener Platz«) darstellte. Die Inka stellten sich vor, dass aus dem Sonnentempel in Cusco imaginäre Linien, die *Ceques*, in die vier Reichsteile ausstrahlten. An den 41 *Ceques* des Reiches reihten sich wie Perlen an einer Schnur alle Heiligtümer und Kultstätten auf. Da im Sonnentempel die Gesamtheit aller *Ceques* zusammenlief, galt er als mit besonderer sakraler Kraft aufgeladen und repräsentierte damit den heiligsten Ort des Inkareiches.

Den Namen »Goldener Platz« trug der Sonnentempel in Cusco wegen großer, an den Außenmauern angebrachter Goldplatten, die im Licht der Sonne weithin glänzten. Zum Gebäudekomplex gehörte auch ein Garten, der die ersten Spanier, die in die Inkahauptstadt gelangten, in größtes Entzücken versetzte. Dort waren lebensgroße Nachbildungen von Hirten mit ihren Llamas, Bäumen mit Vögeln, Mais und anderen Pflanzen aus purem Gold aufgestellt. Auch das Götterbild im Innern des Heiligtums war aus Gold gefertigt, dessen warmer Glanz für die Inka Sonnenstrahlen repräsentierte. Bei der Statue des Sonnengottes, die als *Punchao* (»Tag«) bezeichnet wurde, soll es sich nach Augenzeugenberichten um eine menschliche Figur gehandelt haben, an deren Rücken ein großer Strahlenkranz den Sonnenschein symbolisierte. In der Brust des Götterbildes war ein Platz ausgespart, in dem ein goldener Schrein die Asche



2

der Herzen vormaliger Inkaherrscher bewahrte. Auch diese Symbolik unterstrich die zentrale Bedeutung des Sonnengottes und seines Haupttempels für das Inkareich.

Zu beiden Seiten der Sonnenstatue befanden sich Mumien der früheren Inkaherrscher und Bildnisse aller Gottheiten der von den Inka eroberten Andenvölker. Sie waren dem Mumienbündel desjenigen Herrschers zugeordnet, der die betreffenden ethnischen Gruppen unterworfen und dem Reich eingegliedert hatte. Die *Coricancha* kann also auch als eine Art Pantheon des Inkareiches betrachtet werden.

Neben der männlichen Priesterschaft verfügte der Sonnengott über eine große Anzahl von »Sonnenjungfrauen«, wie sie von den spanischen Eroberern genannt wurden. In Quechua hießen sie *Accla* oder im Plural *Acclakuna*, also »Auserwählte«. Sie galten als Gattinnen des Inka und des Sonnengottes und beschäftig-

Literatur

1 Benson, Elizabeth, 1987, »Inti«, in: Eliade, Mircea (Hrsg.), *Encyclopedia of Religion*, vol. VII, New York, p. 268.

2 Gareis, Iris, 1987, *Religiöse Spezialisten des zentralen Andengebietes zur Zeit der Inka und während der spanischen Kolonialherrschaft* (Münchner Beiträge zur Amerikanistik 19), Hohenerschäftlarn.

3 Gareis, Iris, 2008, »From the House of Gods to the House of God. The Reorganization and Reinterpretation of Religious Spaces in Colonial Peru«, in: Rau, Susanne/Schwerhoff, Gerd (Hrsg.), *Topographien des Sakralen: Religion und Raumordnung in der Vormoderne*. München/Hamburg, pp. 240-253.

4 Taube, Karl, 1993, *Aztec and Maya Myths*. London.



3

4 Indigener Adliger
in Festtracht bei der
Fronleichnamprozession
in der ehemaligen
Inka-Hauptstadt Cusco.
Sein Festgewand ziert
neben kolonialspanischen
Attributen auch eine goldene
Sonnenscheibe als
Brustschmuck. Dieses
koloniale Gemälde stammt aus
der Cusco-Schule um 1675.

ten sich damit, unaufhörlich Maisbier und Maisbrot sowie feinste Textilien herzustellen, die als Opfergaben oder für kultische Zwecke benötigt wurden. Unter Aufsicht der *Mamakuna*, älterer Frauen, lebten sie abgeschieden in eigens für sie errichteten Häusern, die den jeweiligen Sonnenheiligtümern des Reiches angegliedert waren. Mit der Produktion von Opfergaben und Prestigegütern trugen die »Sonnenjungfrauen« ebenso wie der Sonnenkult als Staatsreligion dazu bei, die Inkaherrschaft in dem riesigen Reich zu stabilisieren.

Sonnensymbolik im spanischen Kolonialreich

Sowohl im Einzugsgebiet des Aztekenreiches in Mexiko als auch im Vizekönigtum Peru, das sich in etwa mit dem Inkareich deckte, wirkte der ehemalige Sonnenkult auch noch in der Kolonialzeit nach. Zwar wurden die Tempel der Staatsreligion im Andengebiet offenbar schon bald nach der Conquista durch die Spanier verlassen und die Bevölkerung führte nur die Kulte für ihre angestammten lokalen Götter weiter, jedoch scheinen sich neue Vorstellungen, die eine Synthese zwischen den präkolumbischen religiösen Ideen und dem Christentum darstellen, herausgebildet zu haben: So wird bisweilen Jesus Christus mit der Sonne in Verbindung gebracht. 1687 stellte der Bischof von Cusco bei einer Visite seines Bistums fest, dass in den Kirchen mehrerer Ortschaften die Figur des Jesuskindes mit inkaischen Herrschaftsinsignien und einer Sonnenscheibe auf der Brust geschmückt war. Bei kolonialen Feierlichkeiten trugen indigene Adlige ebenfalls goldene Sonnenpektorale als Teil der Festtracht (Abb. 4).

Für Mexiko belegen koloniale und heutige Autoren die gleiche Identifikation der Figur Jesu Christi mit der Sonne beziehungsweise dem präkolumbischen Sonnengott. Zu dieser Überlagerung dürften nicht zuletzt die Sonnensymbolik in katholischen Monstranzen und bildlichen Darstellungen in Kirchen beigetragen haben. ●



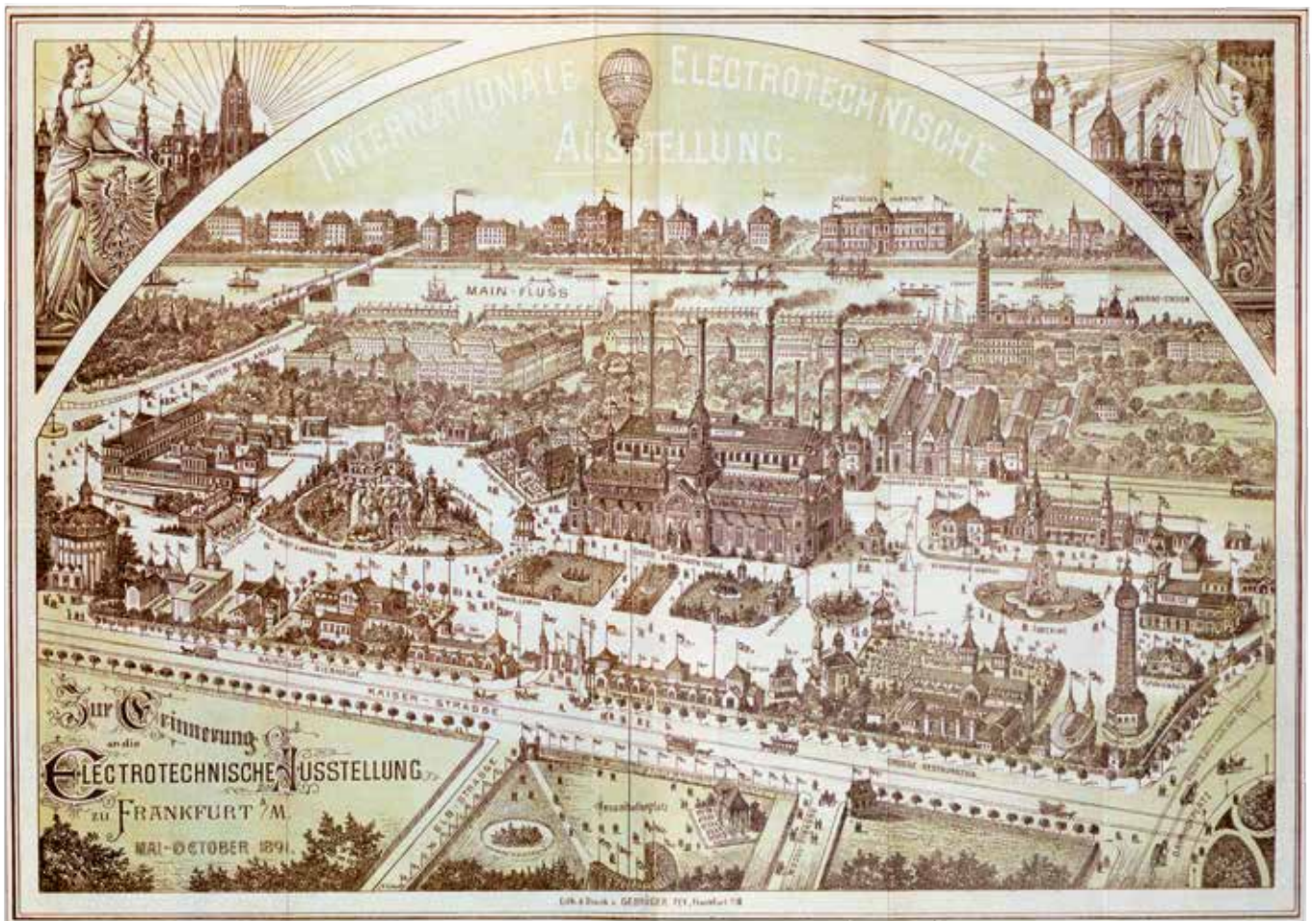
4



Die Autorin

Prof. Dr. Iris Gareis forscht und lehrt seit 1997 am Institut für Ethnologie der Goethe-Universität Frankfurt. Neben allgemeinen Forschungen zu Geschichte und Kultur der Iberischen Halbinsel und Lateinamerikas widmet sie sich besonders Studien zu indigenen und afroamerikanischen Religionen.

i.gareis@em.uni-frankfurt.de



Ein Labor der Moderne – Frankfurts Weg zu »Millionen Lichtern«

Urbanisierung, Elektrizität und gesellschaftlicher Wandel

von Jörg Lesczenski

Als sich am 16. Mai 1891 die Drehkreuze zur Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung vor dem Frankfurter Bahnhof öffneten, gab es unter den Besuchern kaum noch Zweifel: Elektrizität und künstliche Helligkeit werden die westliche Zivilisation und ihre urbanen Lebenswelten geradezu revolutionär verändern. Das sollte sich bewahrheiten!

Die Vorboten einer Zeitwende waren in den Metropolen Europas bereits vor der Frankfurter Ausstellung nicht mehr zu übersehen. Seit Beginn des 19. Jahrhunderts sehnte sich die städtische Bevölkerung überall moderne Beleuchtungssysteme regelrecht herbei. Der technische Fortschritt ließ nicht lange auf sich warten und hüllte die Städte, im wahrsten Sinne des Wortes, in ein neues Licht. In Paris erhellte zum Beispiel seit 1844 elektrisches Bogenlicht den Place de la Concorde. Straßenbeleuchtungen – zunächst mit Öl, Gas und im Deutschen Reich erstmals 1882 in Nürnberg elektrisch betrieben – ließen Nachtschwärmer schon längst sicher durch die Nacht flanieren und Ordnungshüter die Stadt nach Einbruch der Dunkelheit besser überwachen. Die Elektrifizierung erhöhte die Mobilität des Stadtmens-

schen; seit 1883 konnte er auch den Weg nach Offenbach mit einer elektrisch betriebenen Straßenbahn zurücklegen. Das neue Zeitalter des Stroms begann nicht nur Stadtbilder zu verwandeln, sondern beeinflusste darüber hinaus die individuellen Hoffnungen und Erwartungen der Großstädter. Nicht wenige Zeitgenossen begriffen Elektrizität als ein Synonym für Leben und Energie, »als eine Art Vitamin« (Wolfgang Schivelbusch), bestens dazu geeignet, ein modernes, sauberes und gesundes Leben zu führen. Unter Medizinern, die seit dem späten 18. Jahrhundert die Chancen von Elektrizität und Magnetismus begeistert diskutierten, galten Elektrotherapien (wie der Elektroschock) in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts als der sprichwörtlich »letzte Schrei«.

Die Internationale Elektrotechnische Ausstellung: Zur Kraft der Elektrizität und zum Zauber der Beleuchtungstechniken

Zwischen dem 16. Mai und 19. Oktober 1891 demonstrierte die Internationale Elektrotechnische Ausstellung erstmals in Deutschland in einer Gesamtschau die Kraft der Elektrizität und den Zauber neuer Beleuchtungstechniken. Von Leopold Sonnemann, Redakteur bei der liberalen Frankfurter Zeitung, angestoßen und von Oskar von Miller, neben Emil Rathenau Direktor der Deutschen Edison-Gesellschaft, technisch und organisatorisch umgesetzt, zeigte die Ausstellung zum einen den rasanten technischen Fortschritt und den Status quo der Elektrotechnik auf. Zum anderen sollte die Leistungsschau helfen, ein bereits länger diskutiertes energiepolitisches Problem endlich zu lösen. Eine von den Stadtverordneten eingesetzte Expertenkommission stritt bislang ohne Ergebnis darüber, ob das projektierte zentrale Elektrizitätswerk in Frankfurt Gleich-, Wechsel- oder Drehstrom liefern sollte.

Die Ausstellung zog rund 1,2 Mio. Besucher in ihren Bann, die vor allem in den Abendstunden mysteriösen Lichtspielen erlegen waren. Zum Blickfang und Zuschauermagnet wurde die 128 Meter lange Maschinenhalle, die in ihrer Inszenierung besonders beeindruckte, wie die Rheinisch-Westfälische Zeitung in ihrer Ausgabe vom 11. Juni 1891 befand: »Am Samstagabend fand wieder eine Beleuchtung der Kuppel der großen Maschinenhalle statt, der sich eine erstmalige Beleuchtung des Wasserfalls anschloss. Bot schon die mit 1.500 Glühlampen beleuchtete Kuppel [...] einen über alle Maßen überraschend schönen Anblick, so war dies noch vielmehr von dem Wasserfall zu sagen, der das eine Mal als pures Gold, das anderes Mal als helles Silber, das dritte und vierte Mal als ein roter, grüner oder bläulicher Strom über den

Felsen sich stürzte [...]. Das herrliche Schauspiel, über das bei den Tausenden von Besuchern nur ein Wort der Anerkennung herrschte, wird von jetzt an allabendlich stattfinden und zweifellos abends einen Hauptanziehungspunkt für die Besucher des Platzes bilden.«

Allerdings sorgten weniger betörende Lichtspiele, sondern ein spektakuläres, großes Experiment dafür, dass die Frankfurter Ausstellung ein neues Kapitel in der Geschichte der Elektrizität aufschlug. Am 25. August 1891 bewies Oskar von Miller gemeinsam mit dem französischen Elektroingenieur Marcel Deprez und Michael von Dolivo-Dobrowolsky, einem begabten russischen Ingenieur bei der Deutschen Edison-Gesellschaft, dass sich Drehstrom über eine größere räumliche Distanz transportieren ließ. In Lauffen am Neckar erzeugte der Drehstrom-Generator eines Wasserwerks elektrische Energie, die über 15.000-Volt-Leitungen – befestigt auf rund 3.200 Masten – erstmals am Abend des 24. August 1891 ins 175 Kilometer entfernte Frankfurt geliefert wurde. Einen Tag später staunten Laien und Fachpublikum zur Mittagsstunde nicht schlecht. Der Strom hatte auf seinem Weg durch Württemberg, Baden, Hessen und Preußen kaum an Kraft eingebüßt und erleuchtete am Haupteingang des Ausstellungsgeländes 1.000 Glühlampen. Mit dem Drehstrom aus dem fernen Wasserwerk wurde seit dem 13. September obendrein auch der viel beachtete Wasserfall betrieben.

Ein gesellschaftliches Projekt: Partizipation aller Schichten an der Elektrizität

Für die Ausstellungsmacher, namentlich für den Liberalen Leopold Sonnemann, waren Elektrizität und moderne Beleuchtungssysteme aber weit mehr als eine technische Angelegenheit. Mindestens genauso sehr lag Sonnemann die politische und soziale Dimension der Ausstellung am Herzen, die für Frieden, Solidarität und Demokratie stehen sollte. Sie sei – wie es am



2



3

1 Die Internationale Elektrotechnische Ausstellung verwandelte im Frühjahr und Sommer 1891 die Frankfurter Innenstadt in ein Experimentierfeld der Moderne.

2 Die Lichtgöttin »Lucina« erleuchtet Frankfurt. Licht und Elektrizität gehörten seit dem späten 19. Jahrhundert immer häufiger zum Wesen urbaner Lebenswelten.

3 Die 128 Meter lange Maschinenhalle. Architektonisches Herzstück und Zuschauermagnet 1891 bei der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung in Frankfurt.

4 Wasser und Licht.
Inszenierung am Main
während der Illuminationen
im Dezember 1927.

5 Licht trifft Video.
Die Installation des Berliner
Projektions-Künstlers Philipp
Geist »Timedrift« auf dem alten
Uni-Campus in Bockenheim
während der Luminale 2012.

16. Mai 1891 in der Frankfurter Zeitung hieß – ein »mächtiges Beispiel von der Einheitlichkeit des Menschengesistes, der alle politischen und sozialen Schranken durchbricht«. Sonnemann verstand die Schau als ein bürgerliches, demokratisch-liberales Projekt und wünschte sich letztlich eine gesellschaftlich breite, über Klassen und Schichten hinausreichende Partizipation an der Ressource Elektrizität, um soziale Ungleichheiten zu korrigieren, die der Aufstieg des Industriekapitalismus hervorgebracht hatte.

Das von Sonnemann intendierte Ziel der Ausstellung – gewissermaßen Elektrizität und Strom für alle – blieb kein frommer Wunsch. Mit der Entscheidung der Stadtverordneten am 12. Oktober 1893, ein Kraftwerk zu bauen, das nunmehr »Einphasen-Wechselstrom mit Hoch- und Niederspannung 2850/123 Volt« erzeugen sollte, um Straßen zu beleuchten und Haushalte zu versorgen, endete eine über siebenjährige kommunalpolitische Hängepartie. Kurz vor der Jahrtausendwende, 1899, wurden zum ersten Mal die Hauptverkehrs- und Geschäftsstraßen in der Stadt mit elektrischem Licht beleuchtet. Der Weg zu »Millionen Lichtern« in Frankfurt war freier denn je.

Ästhetisierung der Warenwelt: Spektakuläre Illumination

Die Elektrifizierung, die Lichter der Großstadt, hell erleuchtete städtische Räume galten seit der Jahrhundertwende weltweit als unverwechselbare Kennzeichen einer modernen Metropole, die überdies Arbeit, Alltag, Freizeit und auch das Gemütsleben des Stadtmenschen tiefgreifend beeinflussten. Elektrizität und künstliches Licht veränderten die Arbeitsrhythmen und ließen Schichtarbeit rund um die Uhr zu. Die professionelle Beleuchtung, das Spiel mit Lichteffekten gehörte zu den Inszenierungen der modernen Konsumwelt, die sich bis in die 1920er Jahre hinein beschleunigt entfaltete. Ein Architekt wie Alfred Messel, der das Kaufhaus Wertheim in Berlin entwarf, lud unter anderem mit großen Glasfassaden in das Warenparadies ein, die bei Zeitgenossen sakrale Gefühle weckten. Die zeitgenössische Betrachtung des evangelischen Theologen Paul Göhre zum Warenhaus aus dem Jahr 1907 geben die Wir-



4

kungen der großzügigen Fenstergestaltung exemplarisch wieder: »Wenn Du des Abends so von weitem stehst, und die Fenstermassen von zerstreutem und zugleich verhaltenem Lichte blinken – du glaubst warten zu müssen, bis der erste Orgelton aus diesen hohen Hallen dir entgegen-singt.« (Paul Göhre, Das Warenhaus, in: Martin Buber (Hrsg.): Die Gesellschaft. Sammlung sozial-psychologischer Monographien, Frankfurt am Main 1907, S. 10). Eine besondere Atmosphäre ging im Warenhaus Wertheim auch von zwei Lichthöfen aus, die ein behagliches Wohlgefühl vermittelten und die Kauflust stimulierten.

Zur Ästhetisierung der Warenwelt gehörte nun auch die Lichtreklame. Die »Zentrale der deutschen Schaufenster-Lichtwerbung« mit Sitz in Berlin rief alle Ladeninhaber in den Innenstädten dazu auf, am 4. Dezember 1927 ihre Geschäftslokale möglichst spektakulär zu illuminieren. Die Aktion wurde gerade auch in Frankfurt ein voller Erfolg. Nach Meinung eines US-amerikanischen Journalisten lieferte die Stadt ein Schauspiel ab, das sich mühelos mit Lichtfesten in großen europäischen Metropolen vergleichen ließ. Auch das Freizeitverhalten der Großstädter stand zunehmend unter dem Eindruck von Lichtinszenierungen. Große Kinopaläste der 1920er Jahre trugen nicht umsonst häufiger den Namen »Lichtburg«. Lichtschleusen nahmen den Besucher von der Straße auf und führten ihn in den Kinosaal, wo Kulissenlandschaften warteten und indirekte Beleuchtungen für eine magische Atmosphäre sorgten.

Das Zeitalter der Elektrizität, die neue urbane Kultur mit ihren vielfältigen neuen Möglichkeiten und Erfahrungsräumen, nahm keineswegs jeder Großstadtbewohner als Segen wahr. Die grelle, hektische Stadt mit ihrem lauten Getöse stellte traditionelle Werte und Lebensformen infrage und brachte das Seelenleben der Individuen bisweilen gehörig in Unordnung. Nach 1900, so der pointierte Befund Peter Borscheids, »wankten die meisten Städte an jedem Abend in einer Art Betäubung, einem geistigen Dämmerzustand, mit fliegendem Puls in ihre Wohnungen zurück, wie den gesamten Tag über

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Elektrizität erhöhte die Mobilität der Stadtmenschen: In hell erleuchteten Städten machte nächtliches Flanieren mehr Spaß, aber auch die mit Strom betriebenen Straßenbahnen erweiterten den Bewegungsradius.
- An Frankfurts Ausstellung 1891 knüpfte sich die berechtigte Hoffnung, über Klassen und Schichten hinweg alle Bürger an der Ressource Elektrizität teilhaben zu lassen, auch um soziale Ungleichheiten zu korrigieren.
- Das künstliche Licht mit bisher ungeahnten Effekten ermöglichte ab den 1920er Jahren die Inszenierung der Konsumwelt in den europäischen Großstädten.
- Der erleuchtete urbane Raum hat auch seine Schattenseiten, sie zeigten sich während der Bombenangriffe im Zweiten Weltkrieg, aber auch bei der aktuellen Diskussion über Lichtverschmutzung.



5

vieles auf sie eingewirkt hat: ein Blitzgewitter aus zuckenden optischen Eindrücken, grellen Farben, vorbeihastenden Gestalten, Gesichtern und vorbeifliegenden Objekten, ein Stakkato aus lauten und leisen Tönen, wechselnden Gerüchen, ein Hagelgewitter aus Reizen aller Art, ein Big Bang, der niemanden in Ruhe lässt« (Peter Borscheid, *Das Tempo-Virus. Eine Kulturgeschichte der Beschleunigung*, Darmstadt 2004, S. 170).

Die Ambivalenz der beleuchteten Stadt

Licht verstört, signalisiert Gefahr für das eigene Leben. Die emotionale Unruhe, die Lichtquellen bisweilen auslösen, erfasste und bedrückte während des Zweiten Weltkriegs europaweit gleich mehrere Generationen. An der Front verhießen das Trommelfeuer und die Lichtblitze der Geschütze schlimmstenfalls Vernichtung und den bevorstehenden Tod. Die Zivilbevölkerung erlebte nun ihrerseits fast täglich, dass die hell beleuchtete Stadt ihren Charakter als sicheren Ort verlor und vielmehr die eigene Existenz bedrohte. »Verdunkelung« hieß nun das Gebot der Stunde, um den Fliegerangriffen keine willkommene Zielscheibe zu bieten.

In den Jahren des Wiederaufbaus stellten sich die Architekten westdeutscher Großstädte zumeist in die Tradition der 1920er Jahre. Der elektrifizierte urbane Raum, eine auf die Bedürfnisse der automobilen Gesellschaft zugeschnittene Stadt, Glasbauten und Lichtinstallationen, die mit Neonröhren die bunte Welt der Konsumgüter verlockend darboten, repräsentierten modernes städtischen Leben und gesellschaftlichen Fortschritt. Die breite Debatte über die Grenzen des Wachstums und die viel beschworene »Unwirt-

lichkeit der Städte« in den 1970er und 1980er Jahren setzte sich auch kritisch mit der grellen, banalen Lichtflut auseinander, die allein kommerziellen Zwecken diene. Das großstädtische Lichtmeer und seine Folgen riefen nun auch Umweltaktivisten auf den Plan, die das Bewusstsein für die wachsende »Lichtverschmutzung« schärfen. Das von Straßenbeleuchtungen, Industrieanlagen, Flutlichtanlagen und so weiter produzierte Licht wird zu einem beträchtlichen Teil über Reflexionen in die Umwelt abgegeben und hellt die Nacht auf. Der so verunreinigte Nachthimmel stört den Organismus von Menschen, Tieren und Pflanzen zum Teil erheblich. Seitdem setzen Stadt- und Raumplaner eher auf Qualität statt Quantität, eher auf Konzepte, die darauf abzielen, die städtische Grundbeleuchtung herabzusetzen und qualitative Beleuchtungssysteme zu arrangieren.

Der Idee, mit innovativen Lichtspielen die Beleuchtungsqualität zu erhöhen und den Umgang mit Energie effizienter zu gestalten, fühlt sich auch die »Luminale« verpflichtet. Das Festival der Lichtkultur wurde von der Frankfurter Messe initiiert und findet seit 2002 alle zwei Jahre während der internationalen Fachmesse »Light + Building« in der Mainmetropole und ihren Nachbarstädten statt. Wie in den Wochen der Internationalen Elektrotechnischen Ausstellung von 1891 verwandeln zahlreiche Veranstaltungen, so Luminale-Kurator Helmut M. Bien, Frankfurt in ein »Ideenlabor, in dem neue Lösungen getestet werden«. Lichtparcours, Licht-Klang-Installationen, beleuchtete Brücken, Industriehallen und Parks tauchen öffentliche Räume in ein neues Licht. In der gemeinsamen Suche von Studierenden, Architekten, Stadtplanern und professionellen Lichtkünstlern nach neuen Lichtkonzepten sowie in der breiten gesellschaftlichen Zustimmung, die das Lichtfest von Zigtausenden Besucherinnen und Besuchern erfährt, spiegelt sich das Bewusstsein einer demokratischen Zivilgesellschaft wider, die um ihre Verantwortung für die Zukunft weiß – das hätte gewiss auch einem Leopold Sonnemann gefallen. ●

Literatur

- 1 Beate Binder, *Elektrifizierung als Vision. Zur Symbolgeschichte einer Technik im Alltag*, Tübingen 1999.
- 2 Wolfgang Kaschuba, *Die Überwindung der Distanz. Zeit und Raum in der europäischen Moderne*, Frankfurt am Main 2004.
- 3 Wolfgang Schivelbusch, *Licht, Schein und Wahn. Auftritte der elektrischen Beleuchtung im 20. Jahrhundert*, Berlin 1992.
- 4 Jürgen Steen (Hrsg.), »Eine neue Zeit ...!« *Die Internationale Elektrotechnische Ausstellung 1891*, Frankfurt am Main 1991.
- 5 Hanno Trurnit, *Und man sieht nur die im Lichte. Die Geschichte von Gas und Strom, Wärme und Wasser in Frankfurt und der Region*, Frankfurt am Main 2004.



Der Autor

Dr. Jörg Lesczenski, 49, studierte Geschichte, Politik und Soziologie an der Ruhr-Universität Bochum und wurde nach seiner Promotion wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschafts- und Sozialgeschichte der Goethe-Universität. Die Schwerpunkte seiner Forschung liegen in der Bürgertums- und Unternehmensgeschichte seit dem 19. Jahrhundert. Seit Oktober 2014 geht er in einem Forschungsprojekt der Deutschen Forschungsgemeinschaft »Personalentscheidungen und Karriereverläufen in Großunternehmen 1860 bis 1970« nach. In diesem Jahr ist in der Biographienreihe der Goethe-Universität »Gründer, Gönner und Gelehrte« sein Buch »Heinrich Roessler, Naturwissenschaftler, Unternehmer, Demokrat« erschienen.

lesczenski@em.uni-frankfurt.de

BELEUCHTUNG IN KUNST, FILM UND THEATER





1 Antoine Chintreuil:
»Der Regenschauer«, 1868,
Städel Museum, Frankfurt.

chintreuil

»Unter freiem Himmel«

Impressionismus und Tageslicht

von Felix Krämer

»Mehr Licht!«, um die »Seele« der Natur zu erfassen – das verband die Impressionisten mit der vorangegangenen Künstlergeneration um Camille Corot. Claude Monet und seine Kollegen suchten die Wälder und Parks auf, um Licht, Atmosphäre und Farbigkeit in ihrer Malerei festzuhalten. Dabei reagierten sie eher intuitiv auf die in jener Zeit intensiv erforschten optischen Gesetzmäßigkeiten.

Impressionismus und Tageslicht – kaum eine andere Kombination hat in den letzten Jahrzehnten Kuratoren und Publikum gleichermaßen fasziniert. Lang ist die Liste erfolgreicher Ausstellungen, die schon im Titel diese Verknüpfung hervorhoben. In Deutschland wurde 2001 im Saarlandmuseum die »Entdeckung des Lichts« gefeiert, im Kölner Wallraf-Richartz-Museum untersuchte man 2008 die Frage »Impressionismus. Wie das Licht auf die Leinwand kam«, und 2012 wurde in Remagen/Rolandseck im Arp Museum »Lichtgestöber. Der Winter im Impressionismus« gezeigt. Alle diese Ausstellungen trugen zur Popularität des Impressionismus bei und verbreiteten die Idee, dass mit Claude Monet (1840–1926), Auguste Renoir (1841–1919), Alfred Sisley (1839–1899), Camille Pissarro (1831–1903) und Berthe Morissot (1841–1845) die Freilichtmalerei das gedämpfte Studioliicht von den Leinwänden vertrieb.

Als hätte man einen Gaze-Vorhang weggezogen, ergoss sich nun gleißend helles Tageslicht über die Bilder. Dabei waren die Impressionisten keineswegs die Ersten, die der Vorstellung »Mehr Licht!« in ihren Landschaftsgemälden Gestalt verliehen, als sie ihre Ateliers verließen, um direkt in der Natur unter freiem Himmel – »en plein air« – zu malen. Allerdings behauptete Monet später sogar, er habe niemals ein Atelier besessen. Nur die Natur mit ihren stetig wechselnden Lichtverhältnissen habe ihm als Vorlage gedient.

Die Schule von Barbizon – Naturstudium jenseits der Akademie-Prinzipien

Die Impressionisten folgten mit ihrer Pleinair-Malerei einer in den Jahren um 1800 geborenen Generation von Künstlern, der sogenannten Schule von Barbizon. Diese Gruppe von Malern traf sich ab 1830 zum Naturstudium im Wald von Fontainebleau – südwestlich von Paris. In bewusster Abgrenzung zu den an den Akademien gelehrteten Prinzipien versuchten sie, ihre in der Land-

schaft gemachten Beobachtungen in Ölskizzen unmittelbar vor Ort festzuhalten. In ihren Gemälden stand jedoch nicht die detailreiche, wirklichkeitsgetreue Abbildung der Landschaft im Vordergrund, sie wollten vielmehr eine Stimmung erzeugen, die es dem Betrachter ermöglicht, gleichsam die »Seele« der Natur zu erfassen. Obwohl die Maler von Barbizon ihre Gemälde im Atelier fertigstellten, nahm in ihren Werken die Auflösung der Grenze zwischen Skizze und vollendeter Malerei ihren Anfang. Während viele – meist eher konservative – Kritiker die Bilder als roh und unfertig bemängelten, lobten andere ihre atmosphärische Dichte und die Unmittelbarkeit der Darstellungen. Gerade dieser Aspekt entsprach dem Geschmack des Bürgertums, das zunehmend den Kunstmarkt dominierte. Während das Publikum die Natur immer stärker als Freizeitort eroberte, wollte man eine Erinnerung an dieses Erlebnis mit nach Hause nehmen.

Zu den Künstlern, die von den Impressionisten aufgrund ihres souveränen Umgangs mit Lichtstimmungen bewundert wurden, gehörte auch der heute fast vergessene Antoine Chintreuil (1814–1873). Seine besondere Begabung zeigt sich beispielhaft in dem Gemälde *Der Regenschauer* aus der Sammlung des Städel Museums, welches er 1868 erfolgreich im Salon de Paris ausgestellt hatte. Das Bild schildert eine ländliche Szene, die sich vor dem Betrachter wie eine Bühne ausbreitet. Dabei spielen die Figuren im Vordergrund nur eine untergeordnete Rolle; im Zentrum steht der Himmel, auf dem sich das Licht unterschiedlich abzeichnet. Dunkle Regenschauer haben sich vor die Sonne geschoben, doch die Felder in der Ferne sind in ein goldenes Licht getaucht. Betrachtet man *Der Regenschauer* bei wechselndem Tageslicht, entsteht der optische Eindruck, Wolken und Sonnenstrahlen würden sich in der Tiefe des Raums bewegen. Das Gemälde vermittelt eine atmosphärische Dichte, deren Faszination an Panorama-Auf-



nahmen im Kino erinnert. Dieser Effekt scheinbar wechselnder Lichtverhältnisse stellt einen Gesichtspunkt dar, der auch für das Erleben impressionistischer Gemälde zentral ist, den die statische Beleuchtung in modernen Museumsgebäuden jedoch in Vergessenheit geraten ließ.

Pleinair-Malerei und die flimmernden Lichtreflexe

Die Impressionisten, die zu Camille Corot (1796–1875), dem bis ins 20. Jahrhundert wohl bekanntesten Landschaftsmaler dieser Generation, und seinen Kollegen in einem losen Schüler-Lehrer-Verhältnis standen, verfolgten den von ihnen eingeschlagenen Weg konsequent. Doch anders als die Barbizon-Künstler malten die Impressionisten ihre Gemälde komplett in der Natur, direkt vor dem Motiv. Im Gegensatz zur weitgehend statischen Atelierbeleuchtung ermöglichte die Pleinair-Malerei das Studium vielfältigster Stimmungen. Monet und seine Kollegen suchten die Wälder und Parks in und um Paris ganz gezielt auf, um die optischen Phänomene von Licht, Atmosphäre und Farbigkeit unmittelbar in ihrer Malerei festzuhalten. Bereits der mit lockerem Pinselstrich gesetzte Farbauftrag suggerierte, dass

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Mit den Malern von Barbizon, die ab 1830 intensive Naturstudien im Wald von Fontainebleau betrieben, ihre Gemälde aber noch im Atelier vollendeten, begannen sich die Grenzen zwischen Skizze und vollendeter Malerei aufzulösen.
- Pleinair-Malerei: Monet und seine Künstlerkollegen brachten ihre »Impression« des Lichts gleich in der Natur mit lockerem Pinselstrich auf die Leinwand. Ihre nebeneinander gesetzten Farbtupfer fügten sich zu unendlich vielen flimmernden Lichtreflexen zusammen.
- Erst die Neo-Impressionisten um Paul Signac und George Seurat studierten die neuen Erkenntnisse der optischen Gesetzmäßigkeit intensiv und nutzen sie gezielt für ihre Malerei.

2 Claude Monet:
»Die Straße von Chailly durch den Wald von Fontainebleau«, 1865, Ordrupgaard, Kopenhagen.



3 Claude Monet,
»Das Mittagessen:
dekorative Tafel«, ca. 1873,
Musée d'Orsay, Paris.

3

die Maler auch daran interessiert waren, ihre »Impression« möglichst rasch und direkt auf die Leinwand zu bannen. Dabei verzichteten sie darauf, durch Hell-Dunkel-Modellierung Form und räumliche Tiefe zu erzeugen und Konturen mithilfe von Linien zu umreißen. Unvermischt nebeneinander gesetzte Farbtupfer erzeugten die Vorstellung einer lebendigen Darstellung, die sich aus unendlich vielen flimmernden Lichtreflexen zusammenfügt. Dabei diente das (Tages-)Licht nicht mehr nur als Stimmungsträger, sondern rückte immer stärker in den Fokus der Aufmerksamkeit – auch bei Kritikern.

4 Claude Monet,
»La Grenouillère«, 1869,
The Metropolitan Museum
of Art, New York.



4

Es ist schon häufig festgestellt worden, dass die Farb- und Lichtwahrnehmung der Impressionisten optischen Gesetzmäßigkeiten folgte, die in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts besonders intensiv erforscht wurden. Während aber die Neo-Impressionisten um Paul Signac (1863–1935) und George Seurat (1859–1891) die Ergebnisse der Naturwissenschaften studierten und gezielt in ihrer Kunst umzusetzen versuchten, reagierten Monet und seine Kollegen vermutlich eher intuitiv; ihre Malerei basierte vor allem auf der genauen Beobachtung der Natur. Hierzu zählt die Wahrnehmung farbiger Schatten, die in ihren Gemälden immer wieder zentrale Bildbereiche einnehmen.

Welche wichtige Bedeutung das Tageslicht für die Malerei der Impressionisten hatte, zeigt sich bereits in zeitgenössischen Besprechungen. Jules Laforgue betonte 1883: »Der Impressionist ist ein modernistischer Maler, der mit einer außergewöhnlichen Sensibilität des Auges ausgestattet ist, die über Jahrhunderte in den Museen angehäuften Gemälden ebenso vergisst wie die schulmäßige optische Erziehung (Zeichnung und Perspektive, Kolorit), dem es, dadurch, dass er die Lichtphänomene unter freiem Himmel schlicht und ursprünglich – das heißt außerhalb eines im 45-Grad-Winkel beleuchteten Ateliers – erlebt und sieht (seien es nun Straße, Land oder Innenräume), gelungen ist, seinem Auge die Natürlichkeit zurückzugeben, auf natürliche Weise zu sehen und so naïv zu malen, wie er sieht.«



5

Claude Monet: »Die Straße von Chailly durch den Wald von Fontainebleau«

Der Hauptdarsteller ist das Licht. In leuchtenden Farben gibt Claude Monet die Straße nach Chailly durch den Wald von Fontainebleau wieder. Die dunklen Bäume kontrastieren mit dem hellen Himmel und dem von der Sonne beschienenen Gras im Bildvordergrund. Deutlich erkennbar sind die mit einem breiten Pinsel aufgetragenen Malspuren, die in ihrer Bewegtheit die Vorstellung einer rasch erfassten Skizze erzeugen. Doch Monet hatte die Straße bereits ein Jahr zuvor gemalt. Damals bildeten Holzfäller mit ihrem Fuhrwerk den Blickfang und auch der kontrolliert erscheinende Pinselauftrag entsprach noch eher den akademischen Konventionen. Nun bleibt das Bild menschenleer und Monet konzentriert sich auf das Lichtspiel und den Tiefensog der Schneise zwischen den Bäumen. Beide Arbeiten sind keine Darstellungen unberührter Natur, sondern deuten an, dass der Wald von Fontainebleau für Spaziergänger, Touristen und den landwirtschaftlichen Verkehr erschlossen war.

Claude Monet: »La Grenouillère«

Im September 1869 verbrachten Monet und Auguste Renoir mehrere Wochen an einem beliebten Ausflugsziel an der Seine nahe Paris. Bei den dort entstandenen Gemälden konzentrierte sich Monet weniger auf das Treiben der Gäste, die mit wenigen Strichen angedeutet sind, als auf die mit breiten Pinselstrichen

gesetzten Reflexionen auf der Wasseroberfläche in der vorderen Bildhälfte. Diese scheinen sich von der Darstellung des Wassers zu lösen. Es entsteht der Eindruck, das Licht würde von der bewegten Wasserfläche gespiegelt und wäre ebenfalls in Bewegung. Nie zuvor war Monets Pinselduktus freier, zeigte sich seine Intention, malerisch über die Nachahmung des Objekts hinauszugehen, so klar, wobei die Stimmung und das Licht im Zentrum seiner Aufmerksamkeit sind. Dies ist einer der Gründe, aus dem Kunsthistoriker das Gemälde oft als Schlüsselwerk für die Entstehung des Impressionismus bezeichnen.

Claude Monet: »Das Mittagessen: dekorative Tafel«

Nachdem Monet in der ersten Impressionisten-Ausstellung das monumentale *Mittagessen* – heute in der Sammlung des Städel Museums – gezeigt hatte, präsentierte er in der Folgeausstellung 1876 erneut ein großformatiges Gemälde zu diesem Thema: Wieder sind Monets Sohn Jean, seine Ehefrau und eine Freundin abgebildet – nun allerdings im Garten ihres Hauses in Argenteuil. Während die Bewohner im Frankfurter Bild den Innenraum dominieren, fügen sich die Menschen im Exterieur so nahtlos in ihre Umgebung, dass man sie leicht übersehen könnte; der Mensch steht nicht mehr im Mittelpunkt der Darstellung. Die von Schwarz- und Brauntönen bestimmte Farbigkeit des Interieurs wird durch das Flirren der »rein« auf die Leinwand aufgetragenen Farben abgelöst. Wie im Bildtitel *Panneau décoratif (Dekorative Tafel)* bereits angedeutet, ist das Gegenständliche hier der Stimmung untergeordnet. Licht und Farbigekeit stehen nun im Zentrum von Monets Interesse, der in diesem Bild selbstbewusst die wichtigsten Aspekte des Impressionismus veranschaulicht. Es ist sicherlich kein Zufall, dass das Interieur von einem Exterieur abgelöst wurde, in dessen Bildzentrum sich der vom Sonnenlicht beschienene Sandboden befindet, dominiert von nicht mehr und nicht weniger als der mit roten und blauen Pinselstrichen dargestellten Schlagschatten der Pflanzen. ●

5 Claude Monet, »Das Mittagessen«, 1868/1869, Städel Museum, Frankfurt.

Literatur

- 1 Monet und die Geburt des Impressionismus, Ausstellungskatalog Städel Museum, Frankfurt am Main, München 2015.
- 2 Impressionismus. Wie das Licht auf die Leinwand kam, Ausstellungskatalog Wallraf-Richartz- Museum Köln, Mailand 2008.



Der Autor

Dr. Felix Krämer, 44, ist seit 2008 Sammlungsleiter Kunst der Moderne am Städel Museum, Frankfurt. Der Kunsthistoriker, der in Hamburg studiert hat, war im Frühjahr 2015 als Kurator für die Ausstellung »Monet und die Geburt des Impressionismus« verantwortlich. Seit 2013 engagiert er sich bei verschiedenen Veranstaltungen an der Goethe-Universität, so im Rahmen der Graduiertenschule GRADE und im Masterstudiengang Curatorial Studies.

kraemer@staedelmuseum.de



1 Durch das verglaste Dach des Portikus strahlt die Lichtinstallation »Light Lab (1-12)« und spiegelt sich im Main.

OLAFUR ELIASSON – »LIGHT LAB« IM PORTIKUS

Mit Einbruch der Dämmerung leuchtet Nacht für Nacht ein überdimensionaler Lichtbogen durch die nördliche Seite des verglasten Giebeldachs der Ausstellungshalle Portikus und erinnert als Ganzes mit seiner Lichtreflexion im Main an eine untergehende Sonne. Zur Eröffnung des neuen Portikus* auf der Maininsel wurde die von Olafur Eliasson entwickelte Lichtinstallation »Light Lab (1-12)« enthüllt, sozusagen die erste Arbeit am neuen Haus. In den ersten zwei Jahren veränderte sich die Arbeit zwölfmal – immer in verschiedenen Farbspektren. Heute ist die Installation in einem dunklen Gelbton gehalten; diese »Sonne« »(Light Lab, Test 1)« konnte dauerhaft an den Portikus gebunden werden und ist zu einem künstlerischen Wahrzeichen Frankfurts auf der kleinen Maininsel geworden.

Eliasson, als Sohn isländischer Eltern in Dänemark geboren, lebt und arbeitet heute in Kopenhagen und Berlin. Zu seiner künstlerischen Praxis gehört es, in seinem Berliner Studio mit bis zu 80 Künstlern, Wissenschaftlern, Ingenieuren und Recherche-Assistenten parallel an verschiedenen Projekten zu arbeiten. Besondere Aufmerksamkeit erlangte Eliasson durch seine 2003 in der Turbine Hall der Tate Modern in London realisierte Ausstellung: »The Weather Project«. Eine großformatige Installation aus Spiegeln, Folie und gleißendem Licht simulierte eine Sonne mit einem an der Decke installierten Himmel im Inneren des riesigen Ausstellungsraumes. Elektrizität und Licht sowie die Verbindung beider Elemente, ihr Nutzen und die Frage nach ihrer Verfügbarkeit beschäftigten Eliasson nicht erst seitdem. Schon seit seiner Jugend und der Zeit auf Island ist der Künstler vom Licht und dessen Möglichkeiten fasziniert. Die Nordlichter über der Insel während tiefer Dunkelheit gehören zu einem Naturphänomen, das er immer wieder als Ansatz und Inspiration ausweist. Licht nutzt er als Mittel zum Zweck seiner Untersuchung von menschlicher Wahrnehmung, Raum und Körper sowie der Flüchtigkeit von Licht.

Seit ein paar Jahren beschäftigt sich Eliasson mit der Verfügbarkeit von Licht und Elektrizität in Ländern der »Dritten Welt«. Mit seinem Projekt »Little Sun«, einer kleinen solarbetriebenen Taschenlampe in Form einer Sonne, engagiert sich Eliasson in Regionen, in denen es nur eine sporadische elektrische Versorgung gibt, und verweist

auf die Möglichkeiten von Solarenergie, die Bedeutung des Lichts für Leben und die weltweiten Energieprobleme. Der Erlös aus dem Verkauf der Lampen wird darin investiert, Lampen in »Dritte-Welt«-Länder zu senden und Licht verfügbar zu machen.

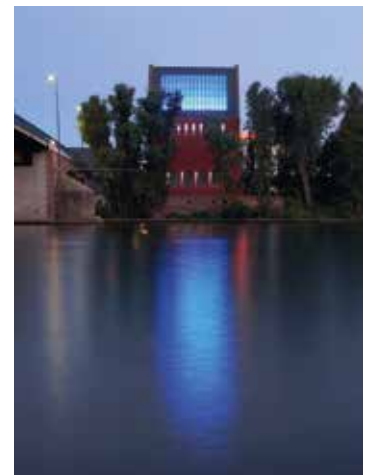
Auch »Light Lab«, seine Installation für den Portikus, die heute zur Sammlung des Frankfurter MMK (Museum für Moderne Kunst) zählt, verweist auf die Fragen, die Eliasson stellt. Die Arbeit strahlt nach außen und lädt Betrachter ein, zu verweilen beziehungsweise in den Portikus zu kommen. Mit einer sehr simplen Geste und einem Phänomen, dem wir täglich ausgesetzt sind, erinnert uns Eliasson daran, innezuhalten und nicht nur über die Kunst nachzudenken, sondern auch über jene Dinge, die für viele andere nicht selbstverständlich sind. In diesem Sinne schließt die Arbeit an die Praxis des Ausstellungsraums an: Junge sowie etablierte zeitgenössische Künstlerinnen und Künstler stellen hier ihre Werke aus, publizieren und diskutieren und werfen dabei Fragen auf, die sich nicht nur mit Kunst, sondern auch mit sozialen, politischen und gesellschaftlichen Themen beschäftigen.

Der Autor

Fabian Schöneich, 30, leitet seit Oktober 2014 als Kurator des Portikus die Ausstellungshalle der Städelschule.

fabian.schoeneich@portikus.de

*Der Name Portikus geht zurück auf den erhaltenen Vorbau der im Zweiten Weltkrieg zerstörten Frankfurter Stadtbibliothek. Um einen schlichten Galerieraum erweitert, diente der Portikus seit 1987 als Ausstellungshalle für zeitgenössische Kunst. Wegen der Rekonstruktion der Bibliothek 2003 zog die international renommierte Institution, die zur Städelschule (Hochschule für Bildende Künste) gehört, 2006 nach einer Zwischenstation im Leinwandhaus in den neuen Portikus, ein vom Frankfurter Architekten Christoph Mäckler entworfenes Gebäude auf der Maininsel an der Alten Brücke.



Alle Fotos: Wolfgang Günzel, Frankfurt



1

» Vortreffliche Belichtung! «

Die Erfindung des Oberlichts und der Weg
zum modernen Kunstmuseum

von *Stefanie Heraeus*

Der Umgang mit Licht ist beim Kuratieren von Ausstellungen und Sammlungspräsentationen von zentraler Bedeutung. Welchen Status erhalten die Exponate, welche Position nehmen sie innerhalb des Raums ein? Werden nur einzelne Objekte im Halbdunkel punktuell angestrahlt und geradezu auratisch inszeniert, oder wird der Raum gleichmäßig ausgeleuchtet? Die Debatte um diese Fragen erhielt durch den Bau der Kasseler Gemäldegalerie 1750 entscheidende Impulse.

Genau zu jener Zeit, als das Licht als Metapher eine zentrale Rolle im Aufklärungsdiskurs spielte, wurde die optimale Belichtung von Gemäldegalerien eingehend diskutiert. Um die Mitte des 18. Jahrhunderts, als man begann, das Kuratieren als eine eigene, dem Kunstschaffen ebenbürtige Tätigkeit zu reklamieren, haben mehrere Fürsten ihren Malereibestand von den übrigen Sammlungsstücken der Kunst- und Wunderkammern getrennt und die Gemälde in eigens hergerichteten Galerie-trakten der Schlösser oder in selbstständigen Galeriebauten separat präsentiert. Die bedeutendsten deutschen Galeriegründungen oder Neukonzeptionen entstanden um 1750 in Dresden, Kassel und Potsdam. Während man sich in Dresden und Potsdam weitgehend an der Tradition orientierte, ging der Bauherr in Kassel neue Wege. Er ließ eine für die Zeit erstaunliche, zukunftsweisende Art der Belichtung und Bildpräsentation erproben. Wesentliche Impulse gaben dabei Kunstsammler und architektonische Vorbilder aus Paris.

Baustopp der Kasseler Gemäldegalerie im Jahr 1750: Ein museumsgeschichtliches Ereignis

Landgraf Wilhelm VIII. von Hessen-Kassel verfügte über eine außergewöhnliche Expertise, die weit über den generellen ständischen Habitus des Kunstsammelns hinausging. Mit der Planung seiner neuen Gemäldegalerie hatte er zunächst den kurbayerischen Hofarchitekten François de Cuvilliés betraut. Dieser entwarf einen konventionellen Bau: eine Fensterfront auf der einen Längsseite, eine Bilderwand auf der anderen. 1749 begannen die Bauarbeiten. Doch im folgenden Jahr – das Kranzgesims des Galeriebaus war gerade fertiggestellt – ließ Wilhelm die bereits weit fortgeschrittenen Bauarbeiten plötzlich stoppen. Auslöser für die abrupte Aktion war der Besuch des Pariser Kunstsammlers Marc-René Marquis de Voyer d'Argenson im Juli 1750 in Kassel. Dieser begutachtete den begonnenen Galeriebau und schlug vor, den französischen Architekten Jacques Hardouin-Mansart Comte de Sagonne, einen Enkel des berühmten königlichen Hofarchitekten, zu konsultieren. Die bislang unveröffentlichte Korrespondenz zwischen Wilhelm und dem Marquis de Voyer d'Argenson im Staatsarchiv Marburg dokumentiert, wie stark sich der Franzose für die Neukonzeption der Kasseler Gemäldegalerie engagierte. Einem der elf Briefe lag der heute nicht mehr erhaltene Plan des Pariser Architekten bei. Er schlug in dem Plan vor, einen in die Höhe herausragenden Salon auf die Galerie zu setzen, ähnlich wie die »Galerie à la Lanterne« des Pariser Palais Royal. Das Palais Royal wurde seinerzeit immer wieder wegen seiner architektonisch

innovativen Präsentation, aber auch wegen des auserlesenen Gemäldebestandes als Referenz herangezogen.

Palais Royal in Paris: Das französische Modell für Oberlicht

Da in Kassel niemand das Pariser Vorbild und dessen Konstruktion kannte, nahm der Kasseler Hofarchitekt Charles du Ry im September 1750 Kontakt mit seinem Sohn Simon Louis auf, der als Stipendiat des Landgrafen an der Pariser Bauakademie studierte. Die lavierte Tuschezeichnung, die dieser daraufhin nach Hause schickte, ist die einzig überlieferte Innenansicht des Palais Royal (Abb. 2). Sie zeigt im Querschnitt die »Aeneas-Galerie« und den daran angrenzenden Ecksalon mit dem aufgesetzten Obergeschoss zur Belichtung, der »Galerie à la Lanterne«. Der Ecksaal erhielt – wie auf der Zeichnung zu erkennen – sein Licht von oben durch die senkrechten Fenster im darüberliegenden Geschoss. Herzog Philippe II. von Orléans hatte diesen mit seinem Architekten Gilles Marie Oppenord um 1720 einrichten lassen.

Abkehr von konventionellen Galeriebauten: Maximaler Lichteinfall von oben

Der Landgraf von Hessen-Kassel hat zwar die Pariser Pläne nicht realisiert, wohl aber die Idee des Oberlichtes aufgegriffen. Offensichtlich ist, dass er sich – ausgelöst durch die Diskussionen mit dem Marquis de Voyer d'Argenson – nach alternativen architektonischen Lösungen für die Lichtführung umgesehen hat. Es ging darum, einen rundum für die Hängung nutzbaren Bildersaal mit von oben einfallendem Licht einzurichten. So ließ er eine Belichtung durch hoch liegende senkrechte Fenster realisieren, die in einem oben aufgesetzten Geschoss unmittelbar unter der Decke angebracht waren. Von diesem Galeriesaal, der nur 50 Jahre existiert hat, ist keine andere Ansicht erhalten als die Federzeichnung des Malers Benjamin Zix aus dem Jahr 1807, auf der die Franzosen unter Napoleon die Galerie konfiszierten (Abb. 1): Über den hohen Bilderwänden liegen die Fenster als ein durchgehendes Lichtband in einem aufgesetzten Geschoss. Dies sicherte einen maximalen Lichteinfall von oben und leuchtete je nach Tageszeit eine der beiden Längswände aus.

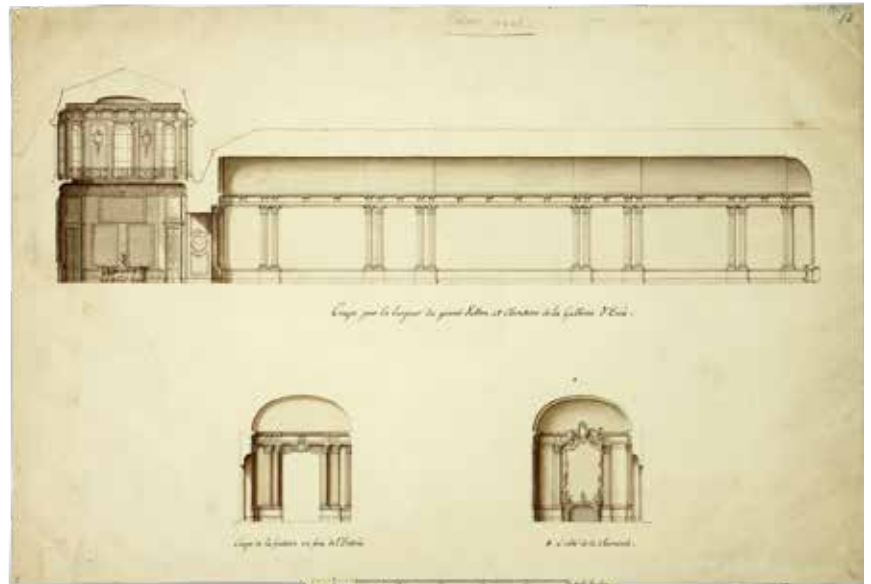
Begeisterung bei den Zeitgenossen: Vortreffliche Belichtung

Die ungewöhnliche Belichtung der Kasseler Gemäldegalerie wurde von Zeitgenossen immer wieder hervorgehoben. In der offiziellen Beschreibung der Residenzstadt des Kasseler Hofrats und Bibliothekars, Friedrich Christoph Schmincke, von 1767 wird die Belichtung als »neueste Erfindung« gefeiert. Reisebeschrei-

bungen heben hervor, dass die Gemäldegalerie »durch ein sanftes gemäßigtes Licht von oben durch Mezzaninen erleuchtet wird«, oder: »Wie wohltuend war dem Auge das hoch von Oben, auf glänzendes Parquet herabfließende Licht«. Zu Beginn des 19. Jahrhunderts soll Carl Friedrich von Rumohr, der neben Winckelmann als Begründer der wissenschaftlichen Kunstgeschichte gilt, erklärt haben, nie eine »vortrefflichere Belichtung« gesehen zu haben.

1 Benjamin Zix, Ausleerung der Kasseler Galerie durch Dominique-Vivant Denon, 1807, Paris, Bibliothèque Nationale de France.

2 Simon Louis du Ry, Aeneas-Galerie und Ecksalon im Palais Royal, 1751.

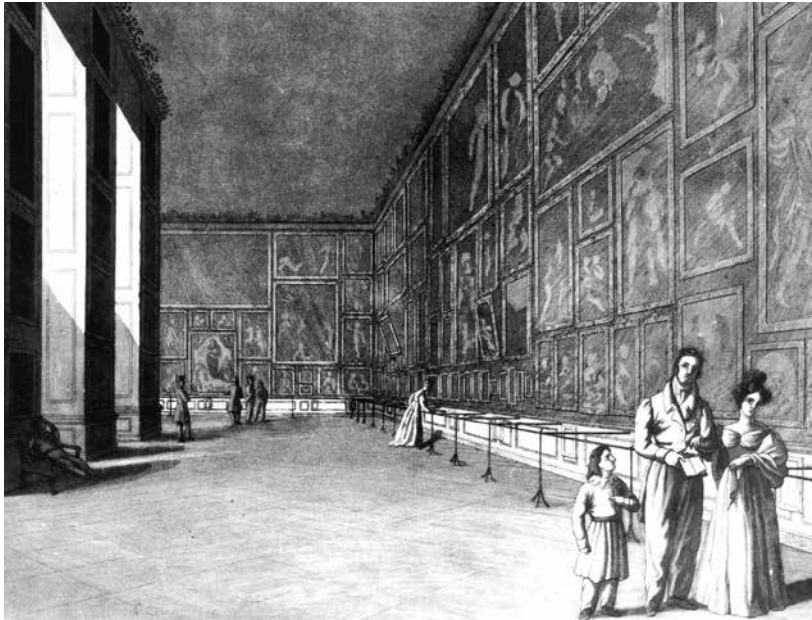


2

Die Kasseler Beleuchtung lasse die Kunstwerke »nach ihrem Licht und Schatten« erscheinen. Allerdings kritisierte er, dass es durch den schmalen Galerieraum zu störenden Lichtkreuzungen käme. Äußerungen dieser Art zeigen,

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Beim Kuratieren von Ausstellungen ist der Umgang mit dem Licht von zentraler Bedeutung.
- In der Mitte des 18. Jahrhunderts erhielt das Arrangieren der Gemälde den gleichen Status wie der Prozess des Malens selbst. Kunstsammler und Architekten diskutierten Alternativen zum seitlich einfallenden Galerielicht.
- Mit der Entscheidung für Oberlicht erhielten die Galerien zwei gegenüberliegende Bilderwände, was den Status der Gemälde veränderte: Fortan waren sie nicht mehr Teil des fürstlichen Dekors, sondern Kunstwerke in einem inszenierten visuellen Diskurs.



3 Innenansicht der Dresdener Gemäldegalerie am Judenhof, 1830, Dresden, Staatliche Kunstsammlungen, Kupferstichkabinett.

3

Literatur

1 Stefanie Heraeus, Top Lighting from Paris in 1750. The Picture Gallery in Kassel and Its Significance for the Emergence of the Modern Museum of Art, in: Andrea Meyer, Bénédicte Savoy (Hrsg.), *The Museum is open, Towards a Transnational History of Museums 1750–1940*, Berlin/Boston 2014, S. 61–76.

2 Carole Paul (Hrsg.), *The First Modern Museums of Art. The Birth of an Institution in 18th and Early 19th Century Europe*, Los Angeles 2012.

3 Christopher Rowell, Display of Art, I. Lighting, in: *The Dictionary of Art*, London 1996, Bd. 9, S. 11 f. u. 32.

4 Georges Teyssot, *The Simple Day and the Light of the Sun. Lights and Shadows in the Museum*, übersetzt von Jessica Levine, in: *Assemblage*, 12 (1990), S. 58–83.

dass die Problematik der Belichtung in den Debatten zur Präsentation von Gemälden im 18. Jahrhundert eine zentrale Rolle spielte.

Der neue Status der Gemälde: Kunstwerke im visuellen Diskurs

Die neue Belichtung von oben hatte fundamentale Konsequenzen. Die Hängung der Gemälde auf beiden Längsseiten hat die ursprüngliche Funktion der Galerie grundlegend verändert. Bislang war die Galerie ein festlich-repräsentativer Wandelgang mit Ausblicken in die Landschaft auf der einen Seite und mit Gemälden auf der anderen. In der neuen Form der Galerie waren die Gemälde nicht mehr Teil des fürstlichen Dekors, jetzt ging es um ihre bestmögliche Präsentation als Kunstwerke: An allen vier Wänden der Kasseler Galerie konnten Gemälde gehängt werden, was sich massiv auf deren Gesamteindruck auswirkte. Anders als in der wenige Jahre zuvor, 1746, eingerichteten Dresdener Gemäldegalerie (Abb. 3), die durch Seitenlicht beleuchtet wurde, erzeugte die Kasseler Galerie den Eindruck, ringsum von einer geordneten Bilderwelt umgeben zu sein. Die Besucher bemerkten also nicht erst beim Weitergehen, dass sich das Anordnungsprinzip der Gemälde auf mehrere Wände erstreckte. Durch die Oberlichtsituation standen zwei Längswände mit drei bis vier Reihen symmetrisch angeordneter Gemälde einander gegenüber. Dieses für barocke Bildergalerien typische ausgeklügelte System, die zentral herausgestellten Stücke und Pendants mit einer mehrfach aufgefächerten Achsensymmetrie anzuordnen, erstreckte sich über beide Wände. Die Betrachter konnten diese den Raum umspannende Inszenierung der Gemälde unmittelbar als einen visuellen Diskurs erleben und wurden nicht durch Blicke nach draußen abgelenkt.

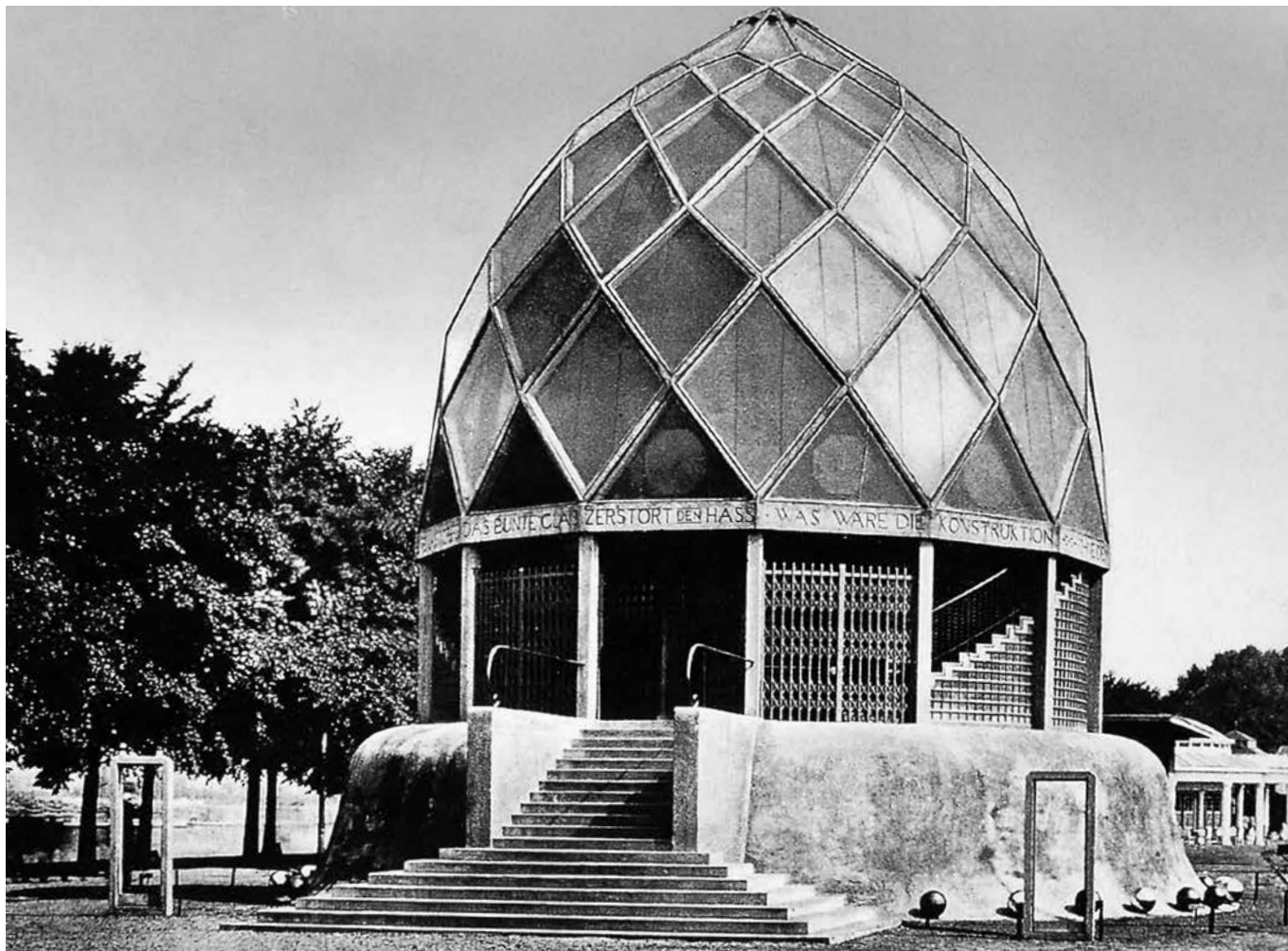
Der Kasseler Baustopp im Jahr 1750, die Abkehr vom damals üblichen Galerietypus mit seitlichem Lichteinfall und schließlich die unkonventionelle Entscheidung für Oberlicht sind ein besonders spektakuläres Beispiel für Entwicklungen eines neuen Galerietypus. Er sollte die Museumsarchitektur des 19. Jahrhunderts bestimmen und maßgeblich zur Ausbildung des modernen Kunstmuseums beitragen. ●



Die Autorin

Dr. Stefanie Heraeus, 48, arbeitet seit November 2009 an der Goethe-Universität. Sie leitet den von ihr initiierten Kooperationsmasterstudiengang »Curatorial Studies – Theorie – Geschichte – Kritik«, der zusammen mit der Staatlichen Hochschule für Bildende Künste – Städelschule und den großen Frankfurter Museen durchgeführt wird. Diese Verbindung von Universität, Kunsthochschule und Museen ist international singulär. Zuvor war die Kunsthistorikerin Direktorin des Bielefelder Kunstvereins und Mitarbeiterin der Neuen Galerie der Museumslandschaft Hessen Kassel.

heraeus@kunst.uni-frankfurt.de



1

Vom Kristallinen zum Licht

Architekturvisionen zwischen Expressionismus und Neuem Bauen

von Carsten Ruhl

Mit der Möglichkeit, Glas als Baustoff zu verwenden, beginnt die Ära der modernen Architektur. Bruno Taut gilt als einer der wichtigsten Protagonisten dieser expressionistischen Phase. Mit seinen funkelnden Kristallarchitekturen in den Alpen schuf er zumindest auf dem Papier Visionen von besonderer Strahlkraft. Im Geheimbund »Gläserne Kette« sahen er und seine Mitstreiter sich als Propheten und »übermenschliche Wächter« aller Künste. Die quasi religiös inspirierte Glasarchitektur wurde schon wenige Jahre später im Staatlichen Bauhaus Weimar durch Gropius' ästhetische Rationalität abgelöst.

Als der Dichter und Schriftsteller Paul Scheerbart 1914 von einer leuchtenden Glasarchitektur schreibt, ist dies keineswegs nur als utopische Schwärmerei eines von den Zeitgenossen oft belächelten Sonderlings zu betrachten. Es bedurfte seit der Industriellen Revolution keiner besonderen Fantasie, um den Siegeszug transluzenter Fassaden voraussehen zu

können. Bemerkenswert ist hingegen das poetische Pathos, mit dem Scheerbart seine Beschreibungen einer längst begonnenen Entwicklung gleichsam zu einem religiösen Erweckungserlebnis werden lässt. Euphorisch zelebriert er die »Herrlichkeit« eines kommenden Paradieses, das die Erde in »Brillanten- und Emailleschmuck« kleiden soll.

1 Bruno Taut, Glaspavillon auf der Werkbund-Ausstellung in Köln, 1914.

2 Bruno Taut,
Alpine Architektur,
Hagen 1919.

Bruno Tauts Höhenflüge: Triumph menschlicher Schöpferkraft über die Natur

Gewidmet war Scheerbarts *Glasarchitektur* dem modernen Architekten Bruno Taut. Dieser ließ sich nur allzu gern von derartigen Visionen inspirieren. »Das Licht will durch das ganze All und ist lebendig im Kristall« oder »Das Glas bringt uns die neue Zeit, Backsteinkultur tut uns nur leid« lauten die Zitate des Dichters, die Bruno Taut an seinem 1914 für die Deutsche Werkbundausstel- lung in Köln erbauten Pavillon anbringen ließ (Abb. 1). Eigentlich als Reklame für die Produk-tpalette des Deutschen Luxfer-Prismen-Syndikats gedacht, geriet der temporäre Ausstellungsbau zu einem Manifest, das weit mehr als nur Kritik an der Monumentalität konventioneller Repräsen- tationsbauten im Sinn hatte. Er war an der Schwelle zum Ersten Weltkrieg als Vorschein auf eine kommende Architektur gedacht, die – wenn auch nur auf dem Papier – ihrerseits bald schon monumentale Züge annehmen sollte.

Noch während des Krieges vollendete Taut unter dem Titel *Alpine Architektur* eine aus dreißig Tuschezeichnungen bestehende Bildfolge. Darin entführt er den Betrachter in eine Bergwelt aus funkelnden Kristallarchitekturen (Abb. 2). Unter dem Eindruck von Nietzsches *Zarathustra* symbolisiert sie eine Abkehr von der unvoll- kommenen Gegenwart bei gleichzeitiger Hinwendung zur schöpferischen Natur. Dies geschieht allerdings keineswegs im Sinne einer neuen Bescheidenheit. Steigt der Mensch doch zum titanischen Übermenschen auf, dessen

Werk der göttlichen Schöp- fung erst die Krone aufsetzt. Dies in einem ganz sprichwört- lichen Sinne, wie die mit erha- benen Felsformationen ver- wachsenen Gipfelbauten Tauts zeigen. Kristallen gleich, brin- gen sie die unvollkommene Natur erst zum Funkeln und bezeugen so den Triumph menschlicher Schöpferkraft über die dynamisch-erhabene Natur.

Die »Stadtkrone« – wie ein glitzernder Diamant über allem

Mit seiner 1919 veröffentli- chten *Stadtkrone* verließ Taut die luftigen Höhen der alpinen Bergwelt, um sich einer weit- aus bodenständigeren Utopie zuwenden zu können. Erneut stand die Vision einer Archi- tektur aus Glas und Licht im Zentrum der Überlegungen. Angeregt durch die Garten- stadt-Bewegung des späten



2

19. Jahrhunderts entwirft Taut darin gleich eine ganze Idealstadt. Sie erhebt sich über einem kreisförmigen Grundriss mit einem Durchmes- ser von sieben Kilometern. In seiner Mitte befindet sich ein alles überragender Gebäu- dekomplex, der eher an absolutistische Schlossar- chitektur, denn an visionäre Utopien denken lässt (Abb. 2). Das massive Fundament der zent- ral platzierten Stadtkrone wird von vier achsen- symmetrisch angeordneten Kulturbauten gebil- det. Sie fassen ihrerseits ein alles überragendes Kristallhaus ein, das der Sonne ähnlich in rot- gelblichem Glas erstrahlen sollte.

Bevor Taut allerdings seinen eigenen Ent- wurf näher erläutert, führt er eine ganze Reihe »alter Stadtbekrönungen« als historische Refe- renzen an, darunter etwa die *Akropolis* in Athen oder die *Piazza del Duomo* in Pisa. Sie dienen dazu, die überzeitliche Notwendigkeit der von Taut entworfenen Stadtkrone als schöpferische Gemeinschaftsleistung einer zukünftigen Gesell- schaft aufzuzeigen, die – so die Hoffnung – einst gestärkt aus den chaotischen Verhältnissen der Nachkriegszeit hervorgegangen sein wird. Das Monumentale wird zu einem Wert an sich, das über jede Instrumentalisierung durch Einzelne erhaben scheint. Es ist als Verkörperung einer nicht weiter benennbaren, kollektiven Idee gedacht, die »wie ein glitzernder Diamant über allem« thront und hierin letztlich »mehr als gewöhnliche Materie« sein will, so fasst es Taut in seiner *Stadtkrone* zusammen.

Das religiöse Pathos derartiger Beschreibun- gen speist sich allerdings nicht aus dem Chris- tentum. Vielmehr beschwört es einen »Sozialis- mus im unpolitischen, überpolitischen Sinne, fern von jeder Herrschaftsform«. Die Bedeutung, die dem Architekten in diesem Zusammenhang beigemessen wird, könnte kaum größer sein. Er

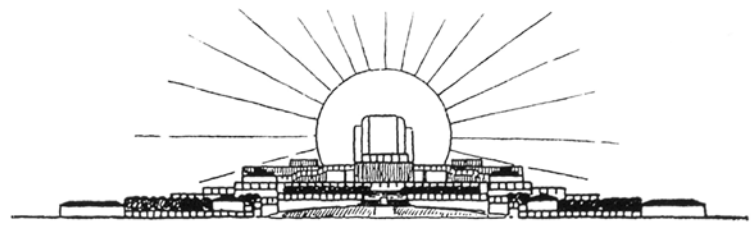
AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- »Das Glas bringt uns die neue Zeit«, so der Dichter Paul Scheerbart, als Bruno Taut 1914 auf der Deutschen Werkbundausstel- lung in Köln seinen Glas-Pavillon präsentierte.
- Tauts Stadtkrone ist ein Beispiel für die Gleichsetzung von Entwurf und religiöser Emphase, wie sie dem Geheim- bund »Gläserne Kette« vorschwebte.
- Walter Gropius wandte sich von Tauts visionären Weltentwürfen ab und sah die Zukunft der Architektur in der Anpassung an die Produktionsprozesse der Industrie.
- Mit Kunstlicht an Fassaden konnten sich die Baumeister in den Zwanziger Jahren nur schwer anfreunden. Ernst May wandte sich besonders gegen die ausschweifende Verwendung illuminiertes Reklame.

gilt als Erleuchteter, der den neuen Glauben in ein neues Gesamtkunstwerk aus Stein, Glas und Eisen überführen soll. Tauts Stadtkrone, vom Nimbus der Sonne hinterfangen, ist daher nicht weniger als ein Heilsversprechen. Sie soll die finstere Apokalypse, wie sie Scheerbart in Tauts *Stadtkrone* beschreibt, abwenden: »Und die Paläste werden hell.«

Der Architekt als »übermenschlicher Wächter« – zwischen Entwurf und religiöser Emphase

Von derartigen Visionen einer alles überstrahlenden Glasarchitektur inspiriert, verfasste der spätere Gründer des Staatlichen Bauhauses in Weimar, der Architekt Walter Gropius, einen Text über die Ziele einer noch zu gründenden Bauloge. Der Architekt nimmt darin die Rolle des Propheten und »übermenschlichen Wächters« aller Künste ein, der weit vor allen anderen das Kommende am Horizont aufziehen sieht. Dies vor Augen, ruft Bruno Taut etwa zeitgleich einen Geheimbund ins Leben, der als *Gläserne Kette* bereits im Namen die innige Verschworenheit der Beteiligten sowie das Programm einer gläsernen Architektur zum Ausdruck bringt. Der darin vertretenen Gleichsetzung von Entwurf und religiöser Emphase entspricht die Form der Auseinandersetzung. In der Spontaneität des Briefwechsels und der Flüchtigkeit illustrierender Skizzen sollte die empfundene Wahrhaftigkeit des Kristallinen seinen angemessenen Ausdruck finden. »Seien wir mit Bewusstsein imaginäre Architekten!«, heißt es entsprechend in Tauts Aufruf vom November 1919. Tauts fulminantem Auftakt zum freien Spiel der Imagination unter dem Pseudonym *Glas* folgten weitere Architekten und Künstler wie Hans Scharoun, Wenzel August Hablik, Hermann Finsterlin, die Gebrüder Luckhardt, Otto Gröne, Hans Hansen, Paul Gosch und Alfred Brust,



3

die sich ihrerseits unter geheimnisvollen Pseudonymen wie Prometh, Zacken oder Angkor mit Entwürfen größenwahnsinniger Kultbauten an der Diskussion beteiligten. Die aus heutiger Perspektive naive Vorstellung des Monuments als Inkorporation des kollektiven Weltgeistes manifestierte sich allerdings nirgends deutlicher als in Wassili Luckhardts 1919 entworfenem Denkmal der Arbeit (*Abb. 4*). Darin wird der Mensch nun tatsächlich zum Baustoff eines gigantischen, sternförmigen Turmes, in dem das Bauen zu einer religiösen Kulthandlung wird.

Mit der Gründung des Staatlichen Bauhauses in Weimar sah man den Zeitpunkt gekommen, das bis dahin nur erträumte Ideal allmählich in die Realität zu überführen. Die Vorstellung eines monumentalen, durch die schillernde Lichtgestalt des Architekten geschaffenen kristallinen Kollektivkörpers prägte zunächst auch hier die programmatische Ausrichtung der neuen Schule. Das Flugblatt von 1919 proklamiert den Bau dementsprechend als »Endziel aller bildnerischen Tätigkeit«, den Künstler als prometheischen Handwerker, den die »Gnade des Himmels« in »seltenen Lichtmomenten« zu Höherem ermächtigt. Illustriert wird dies durch Lyonel Feiningers berühmten Holzstich. Er zeigt eine aus Licht gebaute Kathedrale, die zum Vorbild für das Kommende wird.

3 Bruno Taut,
Die Stadtkrone,
Jena 1919.



4

4 Wassili Luckhardt,
Denkmal der Arbeit
»An die Freude«, 1919.



5

5 Walter Gropius, Bauhausgebäude in Dessau, 1926

6 Fritz Lang, Broadway bei Nacht, 1924.



6

Walter Gropius und seine Hinwendung zur ästhetischen Rationalität

Der Blick auf die weitere Entwicklung des Bauhauses zeigt allerdings, dass das poetische Verständnis strahlender Glaskörper und die hiermit verbundene Lichtmetaphorik schon einige wenige Jahre später nicht mehr als ausreichendes Fundament für eine zeitgemäße Architektur betrachtet wurde. Streng genommen hatte sich Gropius schon während seiner Zeit als Mitglied der *Gläsernen Kette* äußerst zurückhaltend an den visionären Spekulationen seiner Mitstreiter beteiligt. Betrachtet man darüber hinaus Gropius' frühe Industriearchitektur, so scheint die darin ablesbare Haltung gegenüber dem neuen Baustoff Glas in völligem Gegensatz zu seiner poetischen Bedeutungsaufladung bei Taut zu stehen. Tauts Pavillon von 1914 zelebriert die Idee des opulent inszenierten, gläsernen Gesamtkunstwerks, Gropius' benachbarte Musterfabrik die Entmaterialisierung der Wand zur Vorhangfassade (*curtain wall*) (Abb. 5).

Die Zukunft der Architektur wird jetzt in einer Anpassung an die Produktionsprozesse der Industrie gesehen. Der neue Baustoff Glas ist ebenso wenig wie Stahl und Beton hiervon ausgenommen. Er unterliegt jetzt einer ästhetischen Rationalität, die sich im Gegensatz zu Tauts visionären Weltentwürfen im Einklang mit den funktionalen und technischen Realitäten der eigenen Zeit wähnt.

Ablehnung des Kunstlichts: Angst vor Untergang der modernen Architektur im »Raketeneuer« der neuen »Flammenschriften«

Jenem Sinn für die neuen technischen Errungenschaften widerspricht allerdings, dass sich Gropius und andere prominente Architekten des Neuen Bauens wie Ludwig Mies van der Rohe mit den Vorzügen des Kunstlichts für die neue Glasarchitektur schwertaten. Zwar konnte niemand ignorieren, wie sich die Städte mit der Erfindung der elektrischen Beleuchtung seit den 1880er Jahren zunehmend veränderten. Allerdings betrachteten zahlreiche moderne Architekten die neue Transparenz und Transluzenz der Fassaden beharrlich als eine Sache des natürlichen Lichts. Die Verwirklichung einer autonomen Baukunst als Spiel der Formen unter dem Licht, wie sie etwa Le Corbusier in seinem Manifest einer zukünftigen Architektur *Vers une Architecture* (1923) zelebrierte, schien die Metamorphose vom Taggesicht zum Nachtgesicht der Architektur gleichsam auszuschließen. So schwiegte sich auch Gropius konsequent über die gestalterischen Möglichkeiten des Kunstlichts im Zusammenspiel mit Glas aus. Hugo Häring, prominenter Vertreter einer organischen Bauauffassung, sah die moderne Architektur gar im »Raketeneuer« der neuen »Flammenschriften« untergehen.

Und Ernst May, Architekt des *Neuen Frankfurt*, bemängelte noch 1928 in einem kurzen Text mit dem Titel *Städtebau und Lichtreklame* die Verunstaltung der Fassaden durch die ausschweifende Verwendung illuminierten Reklameschriftzüge. Allein in der Ordnung der »Lichtmassen« unter der strengen Hand des Architekten sieht May noch eine Möglichkeit, die moderne Stadt von der gestalterischen Willkür des neuen »Baumaterials« zu befreien. Der Siegeszug einer neuen Lichtarchitektur, wie sie der Naturwissenschaftler Joachim Teichmüller erstmals Mitte der Zwanziger Jahre unter dem Eindruck der illuminierten Metropolen (Abb. 6) definierte, ließ sich durch derartige Ressentiments allerdings nicht mehr aufhalten. Schon längst wetteiferten die modernen Metropolen um den Titel der »electrically most important city«. ●



Der Autor

Prof. Dr. Carsten Ruhl, 47, lehrt nach Professuren an der Ruhr-Universität Bochum und der Bauhaus-Universität Weimar seit 2013 Architekturgeschichte am Kunstgeschichtlichen Institut und ist derzeit dessen geschäftsführender Direktor. An der Frage des Lichts in der Architektur interessiert ihn dessen Bedeutung als Medium des Entwerfens und Wahrnehmens von Bauwerken.

ruhl@kunst.uni-frankfurt.de



Im Schatten das Verlangen

Der Film als Kunst des Lichts

von Vinzenz Hediger

»Lichtspielhaus« –
so nannten sich die Kinopaläste
in früheren Zeiten gern.
Eine große Rolle spielt das Licht
schon bei der Produktion der Filme:
Der gezielte Einsatz von Licht
beim Dreh beeinflusst subtil die
Wahrnehmung des Publikums.
Das wussten schon die Pioniere
des Kinos zu Beginn des 20. Jahrhun-
derts geschickt zu nutzen.
Die Grundtechnik hat sich bis
heute kaum geändert.



Der Blick«, so schreibt der Schweizer Lite-
raturwissenschaftler und Psychiater Jean
Starobinski, »gibt sich nur schwer mit
den bloßen Erscheinungen zufrieden. Es liegt
in seiner Natur, mehr zu verlangen.« Im
menschlichen Blick liege eine Unruhe, eine
Sorge um die Dinge. Die Kunst macht sich das
seit jeher zunutze: Die geometrische Ordnung
des Raumes, die etwa in der Malerei der
Renaissance als Zentralperspektive auftritt,
beruhigt den Blick, weil sie ihm suggeriert,
dass er über den Raum verfügt. Zugleich gehö-
ren zu jedem Bildnis auch Elemente, die neue

Unruhe erzeugen: Die Schattenbereiche, die
darauf verweisen, dass sich die Welt der Dinge
im Sichtbaren nicht erschöpft. Der Übergang
vom Licht zum Schatten ist die Schwelle, an
der das Verlangen erwacht.

Keine Kunst hat diese Sorge des Blicks,
seine »Natur, mehr zu verlangen«, jedoch
mehr herausgefordert und für ihre Wirkungen
genutzt als der Film. Ein Spiel von Licht und
Schatten, projiziert auf eine zweidimensionale
Fläche, an deren Rändern die Welt nicht
abbricht, sondern ins Unendliche weitergeht:
Die Eigenheit des künstlerischen Mediums

1a + b Unvergesslich:
Die Szene zwischen Ilsa Lund
(Ingrid Bergman) und Sam
(Dooley Wilson) in »Casa-
blanca« ist nach dem Schuss-
Gegenschuss-Prinzip gedreht.
Sie zeigt alle drei Lichtquellen
in ihrer Wirkung: »Fill light«
und »back light« sorgen für
Grundhelligkeit und Aura, das
»key light« setzt in Bergmans
Augen einen hellen Glanz,
beim afroamerikanischen
Pianisten ist es weit weniger
intensiv, was die Hierarchie
der Rollen unterstreicht.

Film, so könnte man sagen, liegt darin, dass es Übergänge vom Licht zum Schatten in einer Abfolge der Zeit dramatisiert.

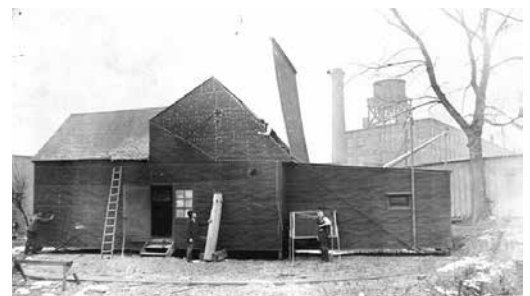
Als fotografisches Medium ist der Film der physischen Realität zugewandt, ob das durch die Linse einfallende Licht nun in einer Silberemulsion seine Spur hinterlässt oder zu einem Bild führt, das digital, also als Abfolge von Einsen und Nullen gespeichert wird. Gleichwohl bedient er sich keineswegs nur der ohnehin schon vorhandenen Lichtquellen und Lichtverhältnisse, die die Wirklichkeit vor der Kamera sichtbar machen.

Nicht natürlich, aber realistisch

In der Filmproduktion ist das Licht ein technischer Parameter wie die Kameraführung, die Ausstattung oder der Ton; und eine filmische Einstellung richtig auszuleuchten, verlangt, wie alle Aspekte der Produktion, einen großen Aufwand an Technik, Personal und Zeit. Wie das bei einem Stilmittel, das auf technischen Verfahren basiert und bestimmten Konventionen folgt, ebenfalls nicht erstaunen kann, weicht das filmische Licht vom außerfilmischen, »natürlichen« Licht in wesentlichen Punkten ab. Filmisches Licht wirkt realistisch, ohne natürlich zu sein, ja verdankt seine realistische Wirkung gerade der Tatsache, dass es nicht natürlich ist.

Am einfachsten lässt sich dies zeigen, wenn man die am weitesten verbreitete Form des Films als Beispiel nimmt, den Spielfilm amerikanischer Produktion, auch bekannt als »Hollywood«-Film. Amerikanische Filme werden seit den 1910er Jahren in arbeitsteiligen Prozessen hergestellt, in denen hoch qualifizierte Spezialisten Teilaufgaben übernehmen – vom Drehbuchschreiben über die Ausstattung und eben das Licht bis hin zur Schauspielerführung (dar-

auf beschränkt sich die Aufgabe des Regisseurs im klassischen Hollywood-Kino) und zum Schnitt. Die Organisation dieser Produktionsabläufe orientierte sich anfangs am Modell der Fließbandproduktion in der Automobilindustrie. Während die Techniker und Künstler inzwischen aber durchweg als Freiberufler arbeiten und die Filme projektweise geplant und realisiert werden und nicht mehr am »Fließband«, sind viele der Standards, die in den ersten Jahrzehnten der Filmproduktion entwickelt wurden, auch heute noch aktuell. Der Grund dafür ist, dass sie eine gleichbleibende Qualität der Ergebnisse versprechen und die Produktionskosten kalkulierbar machen. Die Lichtführung ist dafür ein prägnantes Beispiel.



2

Während die Gebrüder Lumière ihre Filme noch im Freien und ohne Verwendung von Kunstlicht realisierten, drehte der amerikanische Filmpionier William Dickson seine Filme seit den 1890er Jahren in einem mit schwarzem Tuch ausgeschlagenen Spezialbau, der sogenannten »Black Maria«. Dicksons »Black Maria« auf dem Gelände von Thomas Edison gilt als weltweit erstes Filmstudio. Dach und Wandelemente der »Black Maria« konnten bewegt werden, um den Lichteinfall zu regulieren, aber man verließ sich noch ausschließlich auf natürliche Lichtquellen. Im ersten Jahrzehnt des Kinos wurden dann Filme meistens in Hallen mit Dachlicht gedreht, wobei das von oben einfallende Licht von den frühen 1910er Jahren an sukzessive um künstliche Lichtquellen ergänzt wurde, die neben oder hinter der Kamera positioniert waren.

Alles dreht sich ums Gesicht

Die Standard-Konfiguration bei der Ausleuchtung einer Filmaufnahme, die sich in den 1910er und 1920er Jahren herausbildet, besteht in der Regel aus drei Lichtquellen, dem sogenannten »three point lighting«. Der Bezugspunkt der Ausleuchtung ist das menschliche Antlitz, das Gesicht der Schauspieler. Die Ästhetik des Hollywood-Kinos, wie der meisten Formen des Kinos überhaupt, ist, wenn man es so ausdrücken will, faziozentrisch, also gesichtszentriert, und seit der Einführung des Tonfilms überdies vokozentrisch, also auf die Verknüpfung von Gesicht und Stimme ausgerichtet. Protagonisten treiben

3

2 Sie gilt als weltweit erstes Filmstudio: Dicksons »Black Maria« auf dem Gelände von Thomas Edison zeichnete sich dadurch aus, dass Dach und Wandelemente beweglich waren. So konnte der natürliche Lichteinfall reguliert werden.

3 Ein Paradebeispiel für das sogenannte »high key lighting«: Eine hohe Grundhelligkeit und ein geringer Schattenwurf unterstreichen die heitere Stimmung im Klassiker »Der Zauberer von Oz« in Vicente Minellis berühmter Verfilmung aus dem Jahr 1939 mit Judy Garland in der Hauptrolle. Garlands Gesicht wird lediglich von sanften Schatten geformt, harte Konturen wurden vermieden.



die Handlung voran, und der Dialog ist die privilegierte dramaturgische Form, mit der sie dies tun. Die Handlung ist mit anderen Worten daran geknüpft, mit wem die Protagonisten in einen Dialog treten. Und unser Verständnis der Handlung hängt folglich zunächst einmal davon ab, dass wir sehen, wer wen anschaut, mit wem spricht, und was die Personen sagen. Diesem Imperativ der Wahrnehm- und Lesbarkeit von Gesicht und Stimme folgen nicht nur die Kameraeinstellungen und der Ton, sondern auch das Licht. Die drei Quellen des »three point lighting« sind entsprechend darauf ausgerichtet, das Gesicht sicht- und wahrnehmbar und für die Dauer des Dialogs möglichst attraktiv und interessant zu machen.

Die erste Lichtquelle ist das sogenannte »fill light«, eine Hauptlichtquelle, die meistens aus einer Batterie von Scheinwerfern über dem Set besteht, ergänzt um einen weiteren Scheinwerfer, der die Schauspieler von vorne anstrahlt und eine Grundhelligkeit herstellt. Die zweite Quelle ist das »back light«, das hinter den Schauspielern positioniert wird und sie von hinten anstrahlt. Dadurch entsteht ein Lichtkranz, der den Kopf vom Hintergrund absetzt und zugleich das Gesicht des Schauspielers wie eine Aura, ja ein Heiligenschein, umgibt. Bei Großaufnahmen insbesondere von weiblichen Stars wird das »back light« intensiviert, damit die Aura besonders hell leuchtet. Stars unterscheiden sich von Nebendarstellern in der Regel gerade durch die Intensität des »back lighting«; Stars haben eine Aura, Nebendarsteller bestenfalls einen Schimmer auf dem Haupthaar.

Die dritte Lichtquelle ist schließlich das »key light«, dessen hauptsächliche Funktion darin besteht, einen Lichtglanz in den Pupillen der Schauspieler zu platzieren. Auch hier wird wieder zwischen Stars und Nebendarstellern unterschieden. Die Einstellung von Ingrid Bergman aus »Casablanca« zeigt alle drei Lichtquellen in ihrer Wirkung: Das »fill light« sorgt für die Grundhelligkeit, das »back light« für die Aura und das »key light« für das Glänzen der Augen. Die Einstellung stammt aus einem Dialog mit Sam, dem afroamerikanischen Pianisten. Die Szene ist, wie alle Dialog-Szenen im Hollywood-Kino, nach dem Schuss-Gegenschuss-Prinzip aufgebaut, das heißt, die Kameraperspektive wechselt zwischen den beiden Partnern des Dialogs hin und her. Der Umschnitt auf Sam zeigt, dass das »fill light« und das »back light« auch bei ihm eingesetzt werden, das »key light« aber bei Weitem nicht dieselbe Intensität hat wie bei Bergman. Anfügen könnte man hier noch, dass die Ausleuchtung von Schauspielern mit dunkler Hautfarbe ohnehin eine besondere Herausforderung darstellte, weil das Filmmaterial von den Herstellern für die Darstellung von heller

Haut optimiert war und die Gesichter von afroamerikanischen Darstellern bei gleichbleibender Ausleuchtung oft in ein undifferenziertes Dunkel abzukippen drohten. Mit dem Wechsel zu digitalen Filmkameras stellt sich das Problem nicht mehr in derselben Weise, weil diese über eine ungleich größere Lichtempfindlichkeit verfügen als analoge Kameras. Das Fehlen des »key lights« in der Einstellung von Sam in »Casa-



4 Gut beleuchtet, Löwe: Von Beginn an wird beim Film alles und jedes ins rechte Licht gerückt – so auch diese stolze Raubkatze bei einer Aufnahme in den MGM-Studios. Das Scheinwerferlicht scheint sie nicht zu stören.

blanca« hat mit der Hautfarbe des Schauspielers allerdings nichts zu tun. Vielmehr dient diese Auslassung eben der Hierarchisierung der Rollen im fiktionalen Universum des Films.

Licht als Stimmungserzeuger

Das »three point lighting«-System wird durchgängig eingesetzt, aber darüber hinaus gibt es zwei dominante Stile der Lichtführung, die unterschiedliche Grundstimmungen erzeugen und entsprechend in unterschiedlichen Genres und Filmtypen Verwendung finden: das sogenannte

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

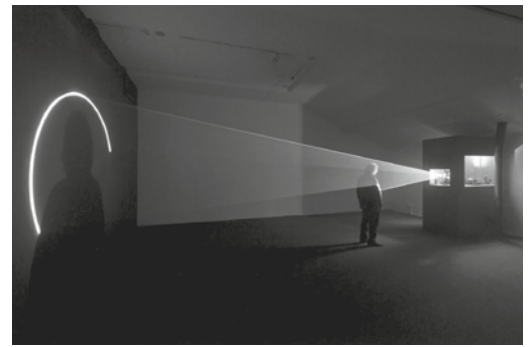
- Der menschliche Blick gibt sich nur schwer mit dem Sichtbaren zufrieden. Dies macht sich die Kunst zunutze, indem sie mit Licht und Schatten spielt.
- Im Film gehört das Licht seit den Anfängen zum wesentlichen Stilmittel, es beeinflusst die Wahrnehmung des Publikums, ohne dass es diesem bewusst wird. Seit den 1920er Jahren wird im Film künstliches Licht eingesetzt, das jedoch realistisch wirkt.
- Die sogenannte Drei-Punkt-Technik setzt Gesichter in Szene und sorgt für eine Hierarchisierung der schauspielerischen Rollen. Darüber hinaus ist die Beleuchtung entscheidend für die Grundstimmung eines Films.
- Seit den 1960er Jahren verselbstständigt sich das Licht als Gegenstand des Films – etwa in Filmen von Jean-Luc Godard oder in Installationen moderner Experimentalfilmer.

5 Lichtspiel pur: Alexander McCall's Installation »Light describing a cone« rückt das Licht selbst ins Zentrum seiner Filmkunst. Er zeigt einen Lichtpunkt, der einen Kreis beschreibt, woraus im Raum ein greifbarer, sich aber immer wieder aufs Neue aufbauender Lichtkegel entsteht.

»high key lighting« und das »low key lighting«. »High key« bezeichnet einen Beleuchtungsstil, der sich durch eine hohe Grundhelligkeit und einen geringen Schattenwurf auszeichnet. Dieser Stil kommt in Genres und Filmen mit einer heiteren Grundstimmung zum Einsatz: in Komödien, Romanzen und Musicals etwa. Die sechs Einstellungen aus Vicente Minellis berühmter Verfilmung des Kinderbuchklassikers »Der Zauberer von Oz« aus dem Jahr 1939 mit Judy Garland in der Hauptrolle ist dafür ein Beispiel. Die Einstellungen zeigen einen Bildraum mit einer hohen Grundhelligkeit, und während »back light« und »key light« wie gewohnt zum Einsatz kommen, sorgt die hohe Lichtintensität dafür, dass die Schatten, die das Gesicht der Protagonistin modellieren, sanft bleiben und keine harten Konturen bekommen. »Low key lighting« hingegen kommt vorzugsweise in Filmen mit düsterer Grundstimmung zum Einsatz: im Kriminal- und Gangsterfilm, im Kriegsfilm oder eben in einem Abenteuerfilm wie »Casablanca«. In einem solchen Film, der von starken emotionalen Kontrasten und Konfrontationen lebt, unterstützt die Ausleuchtung jeder einzelnen Szene den Fortgang der Handlung. Es sind nicht Vorgaben der außerfilmischen Wirklichkeit, denen das Licht entspricht, sondern die kompositorischen Erfordernisse des fiktionalen Universums des Films. Gerade diese genaue

Entsprechung ist es, die das Licht »realistisch« erscheinen lässt, auch wenn es alles andere als natürlich ist.

Wie in der Regel auch die Filmmusik, ist eine stilisierte Ausleuchtung für das Gelingen des Films unverzichtbar, bleibt für das Publikum aber in der Regel unauffällig. Diese Regeln – die stilisierte Ausleuchtung von »realistischen« Szenen mit »three point lighting« und die Unterscheidung zwischen »high key« und »low key« – sind im Übrigen auch im gegenwärtigen Hollywood-Kino weiterhin gültig. »Collateral« (2004), in dem Tom Cruise einen Auftragskiller im nächtlichen Einsatz in Los Angeles spielt, ist der erste gänzlich mit einer digitalen Kamera ge-



5

drehte Hollywood-Film. Regisseur Michael Mann nutzt die Lichtempfindlichkeit der Kamera konsequent und entwickelt eine »low key«-Ästhetik, die scheinbar ohne Kunstlicht auskommt. Schaut man aber genauer hin, dann stellt man fest, dass auch dieser Film konsequent nach dem »three point«-System ausgeleuchtet ist.

Jenseits des Mainstream-Films übernimmt das Licht aber auch noch andere Funktionen und wird mitunter selbst zum Thema und Gegenstand des Films. In einer berühmten Szene in Jean-Luc Godards »Die Verachtung« von 1963 sehen wir Brigitte Bardot und Michel Piccoli auf einem Bett liegen; Bardot ist nackt. Die Szene fügte Godard dem Film bei, weil der Star nach Ansicht seiner Produzenten in der ersten Schnittfassung nicht oft genug nackt zu sehen war. Das Paar spielt ein Spiel: Bardot fragt Piccoli, welche Körperteile er an ihr liebt, und er antwortet jeweils auf ihre Fragen. Die Ausleuchtung ist monochrom, wechselt aber laufend: Von Rot zu Blau zu Gelb und wieder zu Rot. Es sind die drei Grundfarben, die Godard, als würde er ein Mondrian-Gemälde verfilmen, in all seinen Farbfilmen der 1960er Jahre immer wieder einsetzt, ganz unabhängig davon, worum es in dem Film geht. Bei Godard werden Licht und Farbe, wie in der modernen Malerei nach dem Impressionismus, zu selbstständigen Parametern und zum Gegenstand der Darstellung selbst.

Und mitunter gehen die Filmkünstler auch noch einen Schritt weiter. »Light describing a cone« ist der Titel einer Installation des amerikanischen Experimentalfilmers und Künstlers Alexander McCall, die mittlerweile zu den Klassikern der noch jungen Gattung der Installationskunst zählt. Die Arbeit besteht aus einem 16-mm-Filmprojektor, der in einem abgedunkelten Raum, in dem mit Trockeneis ein künstlicher Nebel geschaffen wird, einen geschlauften Filmstreifen abspielt. Der Filmstreifen zeigt einen Lichtpunkt, der einen Kreis beschreibt, woraus im Raum ein greifbarer, sich aber immer wieder aufs Neue aufbauender Lichtkegel entsteht. Noch prägnanter kann man mit den Mitteln des Films nicht zum Ausdruck bringen, dass der Film eine Kunst des Lichts ist – ein Lichtspiel eben. ●



Der Autor

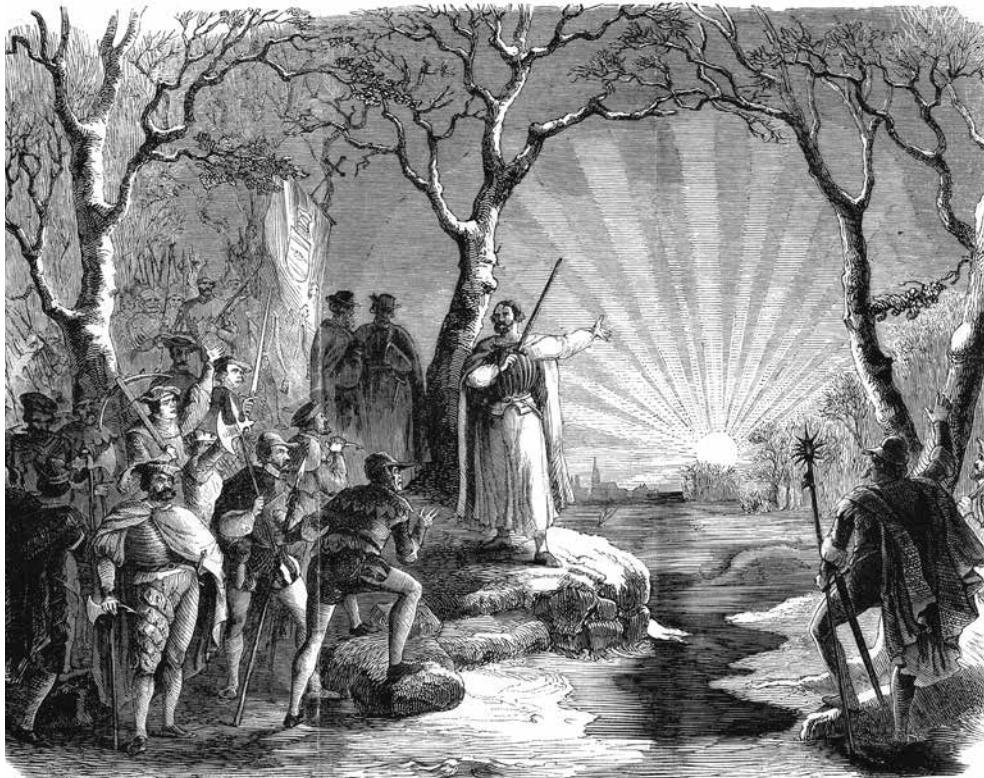
Prof. Dr. Vinzenz Hediger, 46, hat seit 2011 die Professur für Filmwissenschaft an der Goethe-Universität inne. Er hat in Zürich Philosophie, Amerikanistik und Filmwissenschaft studiert und neben seinem Studium als Filmkritiker und Medienjournalist gearbeitet. Nach Promotion und Postdoc an der Universität Zürich wurde er auf den Krupp-Stiftungslehrstuhl für Theorie und Geschichte bilddokumentarischer Formen an die Ruhr-Universität Bochum berufen. Von dort wechselte er 2011 nach Frankfurt. Zuletzt erschienen: »Essays zur Filmphilosophie« (München: Fink, gemeinsam mit Lorenz Engell, Oliver Fahle und Christiane Voss).

hediger@fm.uni-frankfurt.de

»Die Strahlen der Sonne vertreiben die Nacht«

Licht und Schatten im (Musik-)Theater der Vormoderne

von Bernd Zegowitz



Bis zur Mitte des 18. Jahrhunderts waren Akteure und Zuschauer in einem geschlossenen Theaterraum gleich stark beleuchtet, wenn auch nur mit Kerzen und Öllampen. Erst danach geriet die Bühne – nicht ohne Protest der Besucher – ins Zentrum der Beleuchtung. Auf der Opernbühne führte der Einsatz der Kohlenbogenlampe, auch »Prophetensonne« genannt, im 19. Jahrhundert zu einem radikalen Umbruch: Endlich konnten Übergänge vom Dunkel zum Licht musikalisch und szenisch realisiert werden.

Das Licht im Theater leuchtete ursprünglich für alle: Etwa für das brave Liesli in Franz von Holbeins Schauspiel *Das Alpenröslein*, *das Patent* und *der Shawl* aus dem Jahr 1822: »Mit Lieslis Erscheinen fängt von der Seite des Sonnenaufgangs der Horizont an, sich langsam zu röthen, welches mittels rother Lichtblenden so langsam und abgemessen geschehen muß, daß sich allmählich die ganze Bühne roth beleuchtet, und wenn Liesli am Grabe ihrer Mutter Haupt und Hände emporhebt, gleichsam

ein plötzlich durch die Bäume dringender Strahl sie und den Grafen mit Sonnenröthe erhellt.« Aber auch für die Wiedertäufer, die sich in Giacomo Meyerbeers *Le Prophète* zum Sturm auf die Stadt Münster rüsten: »Der Nebel, der Teich und Wald bedeckte, löst sich auf. Die Sonne erstrahlt und lässt in der Ferne, hinter dem gefrorenen Teich, die Stadt und die Festungswälle von Münster erkennen [...]. Das Kriegsvolk stößt Freudenschreie aus und schwenkt die Fahnen.« Doch leuchtete das

1 Der Stich aus dem Jahr 1850 zeigt den berühmten Sonnenaufgang aus dem dritten Akt von Giacomo Meyerbeers »Le Prophète« und die besondere Lichtwirkung der Kohlenbogenlampe.

2 Der Bühnenbildaufriss des Darmstädter Hoftheaters zeigt die ins Sonnenlicht getauchten Gipfel der Schweizer Berge beim Rütli-Schwur aus Gioacchino Rossinis »Guillaume Tell«.

3 Ein zentraler Mittelkronleuchter löste im Laufe des 18. Jahrhunderts regelmäßig im Saal angeordnete Kronleuchter sowie Lichtquellen an Wänden und Rangbrüstungen des Saales und innerhalb der Logen ab.

Literatur

1 Baumann, Carl-Friedrich, Licht im Theater. Von der Argand-Lampe bis zum Glühlampen-Scheinwerfer, Stuttgart 1988.

2 Döhring, Sieghart/Henze-Döhring, Sabine, Giacomo Meyerbeer, Der Meister der Grand Opéra, München 2014.

3 Fischer-Lichte, Erika, Es werde Licht! Die Entstehung des Raumes aus dem Licht – Licht als Mittel der theatralen Inszenierung, online: http://www.fu-berlin.de/presse/publikationen/fundiert/archiv/2003_01/03_01_fischer_lichte/index.html (22.8.2015).

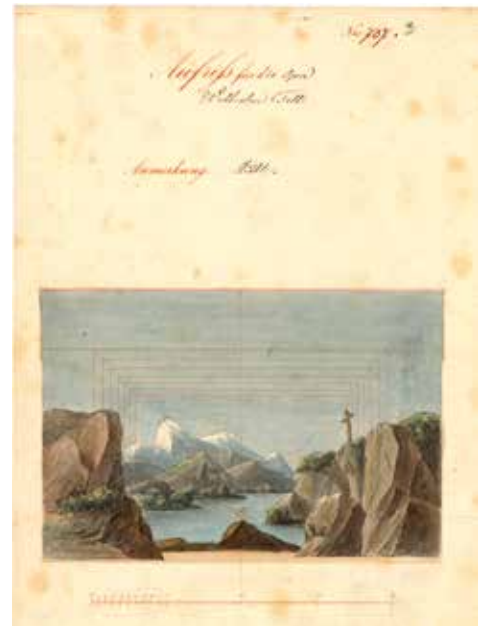
4 Gerhard, Anselm, Die Verstärkung der Oper, Paris und das Musiktheater des 19. Jahrhunderts, Stuttgart/Weimar 1992.

Licht nicht nur für die Ausführenden, sondern auch für die Zuschauer. Bis ins 19. Jahrhundert hinein war nämlich der Zuschauerraum auch während einer Aufführung illuminiert.

Noch im 17. Jahrhundert waren Bühne und Zuschauerraum mit Kerzen und Öllampen ungefähr gleich stark beleuchtet. Regelmäßig im Saal angeordnete Kronleuchter verteilten das Licht so, dass dessen Hauptmasse auf die Bühne fiel. Daneben befanden sich an den Wänden und Rangbrüstungen des Saales und innerhalb der Logen einzelne Lichtquellen, die ausschließlich zur Erhellung und Ausschmückung des Zuschauerraumes dienten. Im Laufe des 18. Jahrhunderts konzentrierte sich die Zuschauerbeleuchtung dann auf einen zentralen Mittelkronleuchter, der sowohl für die Bühne als auch für die Zuschauer als weniger störend empfunden wurde, da zu viele Lichtquellen oftmals sowohl den freien Blick auf dieselbe be- als auch eine eigene »Lichtregie« verhinderten.

»Das Dunkel der Logen zieht gewisse Liebhaber der schönen Künste stärker an als zu viel Helle.« (Johann Friedrich Schütze)

Der Zuschauerraum war Repräsentationsraum, der bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts die gesellschaftliche Ordnung abbildete und auch danach ein geselliger Raum blieb, in dem gemeinsam geweint wurde – die Rührung konnte ja von jedem Zuschauer wahrgenommen werden –, in dem aber auch gegessen, getrunken und gesprochen wurde. Vorstöße zur teilweisen Verdunklung des Zuschauerraumes wurden vehement bekämpft, etwa in Johann Friedrich Schützes *Satirisch-aesthetischem Hand- und Taschenwörterbuch für Schauspieler und Theaterfreunde* aus dem Jahr 1800: »Das Dunkel der Logen zieht gewisse Liebhaber der schönen Künste stärker an als zu viel Helle. Ein gewisses Clair-obscur für einige Sitzreihen bringt oft der Kasse mehr ein, als eine unverständige Ver-



2

schwendung von Lichtern und Lampen. Gewisse Zuschauer sehen und empfinden besser bei halbem Lichte, so wie gedämpfte Musik oft stärker reizt und wirkt als ungedämpfte.« Die Kehrseite der aufwendigen Beleuchtung waren allerdings die Kosten, und so mussten in Frankfurt am Main die Abonnenten für die Beleuchtung ihrer Logen selbst aufkommen.

Nachdem in den 1840er Jahren in England erste Experimente mit Gasbeleuchtung im Zuschauerraum gemacht wurden, war es Richard Wagner, der 1876 bei den ersten Bayreuther Festspielen mit einer kompletten Verdunklung arbeitete. In seinem Aufsatz *Ein Einblick in das heutige deutsche Opernwesen* aus dem Jahr 1872 hatte er als Manko der Opernhäuser festgehalten: »Von nirgends her bietet sich ein Blick auf die Bühne, in welchem man nicht einen großen Teil des Publikums mit einschließen müsste.« Das zielte nicht nur auf die Architektur des Zuschauerraumes, sondern auch auf die Beleuchtung: »Die hellerleuchtete Rampe der Vorderbühne ragt mitten in die Proszeniumsloge herein; unmöglich ist es, dort die Sängerin zu beachten, ohne zugleich das Lognon des sie begaffenden Opernfreundes mit in Ansicht nehmen zu müssen.« Wagner reagierte, baute sich sein eigenes Opernhaus ganz nach seinen Vorstellungen, und bis heute ist die Verdunklung auch das einzig sichtbare Zeichen dafür, dass die Aufführung im Festspielhaus beginnt, da der Orchestergraben nicht einsehbar ist und damit auch der Auftritt des Dirigenten vom Zuschauer nicht mitverfolgt werden kann.

Eine Folge der Verdunklung war übrigens, dass die Zuschauer das Libretto einer Oper nicht mehr mitlesen konnten. Im 17. und 18. Jahrhundert wurde der Text – in der jeweils gespielten Fassung – am Abend im Theater verkauft,



3

womit die Möglichkeit gegeben war, diesen während der Vorstellung Wort für Wort zu verfolgen. Daneben enthielten die gebundenen Libretti ein Personenverzeichnis, kurze Inhaltsangaben und Hinweise zur Inszenierung. Sie erfüllten damit auch die Funktion moderner Programmhefte. Aber die Aufmerksamkeit der Opernbesucher im 19. Jahrhundert galt mehr und mehr der visuellen Seite der Aufführung.

»Man hört den stärksten Akkord, Donner, Blitz, Sturm. Sogleich verwandelt sich das ganze Theater in eine Sonne.«

(Regieanweisung in Mozarts »Zauberflöte«)

Kerzen und Öllampen dienten auch als Beleuchtung der Bühnen des 17. und 18. Jahrhunderts, Lichteffekte wurden mithilfe von Metallscheiben, mit Wasser gefüllten Glaskugeln, Spiegeln oder der *Laterna magica* erzeugt. Und das sind auch die Mittel, auf die Emanuel Schikaneder und Wolfgang Amadeus Mozart bei der letzten Szene der *Zauberflöte* zurückgreifen konnten: »Man hört den stärksten Akkord, Donner, Blitz, Sturm. Sogleich verwandelt sich das ganze Theater in eine Sonne.« Und dann verkündet Sarastro: »Die Strahlen der Sonne vertreiben die Nacht, / Zernichten der Heuchler erschlichene Macht!« Licht und Sonne sind hier Symbolsphären der Aufklärung, die ja eine Bewegung vom Dunkel ins Licht ist. Aber auch das Licht der Vernunft konnte nur



4

so hell scheinen, wie es die Mittel zu seiner Erzeugung zuließen. Und die änderten sich erst im Laufe des 19. Jahrhunderts.

Im Jahr 1822 wurde an der Pariser Opéra, die von 1821 bis 1873 in der Salle Le Peletier spielte, die Gasbeleuchtung für die Bühne eingeführt. Das Gaslicht ermöglichte zum ersten Mal in der Geschichte des Theaters der Natur vergleichbare Schattierungen. Und da die französische *grand opéra* dieser Zeit historische Oper mit groß angelegten Chorszenen und modernem Ballett, hochwertigen Kostümen, aufwendiger Szenografie und avancierter Lichttechnik war, versuchte man, technische Neuerungen sogleich für die Bühne zu adaptieren. Angestrebt wurde eine synästhetische Verknüpfung der Einzelkünste unter dem Primat des Optischen.

Eine deutliche technische Verbesserung stellte ungefähr ein Jahrzehnt nach der Einführung der Gasbeleuchtung im Theater das Kalklicht dar, das der englische Militär-Ingenieur Thomas Drummond erfand. Es handelte sich dabei um eine Lampe, in der eine sehr hohe Glühtemperatur entstehen und die deshalb für besondere Lichteffekte benutzt werden konnte, so wurden etwa einzelne Personen besonders angeleuchtet, Sonne und Mond direkt oder in ihrer Lichtwirkung angedeutet. Praktische Anwendung fand das Kalklicht zuallererst in Michael William Balfes Oper *Joan of Arc* im Jahr 1837, hielt sich aber aufgrund der hohen Kosten, der schwierigen Handhabung und der Gefährlichkeit im Umgang nur einige Jahrzehnte.

»Der Effekt des Sonnenaufgangs ist etwas vom Neuesten und Schönsten, das man im Theater zu sehen bekam.« (Adolphe Adam)

13 Jahre nach dem Kalklicht wurde die Kohlenbogenlampe entwickelt, deren Betrieb ungefährlicher und deren Wirkung stärker war. Und auch diese setzte sich vor allem in der Oper durch, ini-

4 Karl Friedrich Schinkels Entwurf für das Schlussbild der »Zauberflöte« zeigt den Bühnenrahmen im Dunkel, während das Innere des Bühnenraums hell erleuchtet ist. Das Haupt der Osiris-Statue in der Mitte ist zusätzlich von einem weißen Lichtkreis umgeben.

AUF DEN PUNKT GEBRACHT

- Ein Mittelkronleuchter, der zu Beginn des 18. Jahrhunderts Bühne wie Zuschauerraum gleichermaßen erhellte, galt schon als enormer Fortschritt gegenüber vielen verschiedenen Lichtquellen.
- Bis in die zweite Hälfte des 18. Jahrhunderts galt der Zuschauerraum als Repräsentationsbühne, die die gesellschaftliche Ordnung in Szene setzte. Er war ein geselliger Raum, in dem auch während der Aufführungen gegessen, getrunken und gesprochen wurde.
- Das Gaslicht schafft erstmals an der Pariser Opéra die Möglichkeit, der Natur vergleichbare Schattierungen zu imitieren.
- Doch den wahren Durchbruch brachte im 19. Jahrhundert erst das elektrische Licht mit der Kohlenbogenlampe. Damit ging die »Prophetensonne« auf – nicht nur in Meyerbeers Oper »Le Prophète«.

tiert durch Giacomo Meyerbeers 1849 in Paris uraufgeführten *Le Prophète*. Im Unterschied zur Gasbeleuchtung ergab dieses elektrische Licht eine weit höhere Intensität und erlaubte eine gleichmäßige, durch kein Flackern gestörte Lichtverteilung. Ihr Vorteil bestand auch darin, dass zusätzlich zur Bühnenerhellung besondere Lichtwirkungen wie etwa Sonnenaufgänge erzielt werden konnten. Meyerbeers komponierender Kollege Adolphe Adam schreibt in einer Kritik der Uraufführung für den *Le Constitutionnel*: »L'effet du lever du soleil est une des choses les plus neuves et les plus belles que l'on ait vues au théâtre: grâce à la lumière électrique, nous avons vu un vrai soleil, qu'on ne pouvait regarder fixement sans être ébloui, et dont la lumière se projetait jusqu'au fond des loges plus reculées de la scène.« (»Der Effekt des Sonnenaufgangs ist etwas vom Neuesten und Schönsten, das man im Theater zu sehen bekam: Dank dem elektrischen Licht haben wir eine wahre Sonne gesehen, die man nicht starr anschauen konnte, ohne geblendet zu werden, und deren Licht bis in den hintersten Teil der Logen, die am weitesten von der Bühne entfernt waren, geworfen wurde.«)

Die Prophetensonne, wie die Lampe wegen ihrer Verwendung in Meyerbeers Oper genannt wurde, verbreitete sich schnell in ganz Europa. Selbst mittlere Hoftheater wie das Darmstädter bestellten beim französischen Mechaniker Jules Duboscq eine eigene Ausfertigung, die Ein-

druck machte: »Der Sonnenaufgang im Nebel, aus welchem allmählig das verhüllt gewesene Münster zum Vorschein kam, wobei sich über der Bühne eine bis dahin noch nicht gekannte Helle verbreitete, war von unbeschreiblicher Wirkung.« Führt allerdings auch zu Missverständnissen, wie zu ergänzen wäre.

»... die leere Szene bleibt noch eine Zeitlang offen und zeigt das Schauspiel der aufgehenden Sonne über den Eisgebirgen.«

(Regieanweisung in Schillers »Wilhelm Tell«)

Sonnenaufgänge sind aufgrund ihres transitorischen Charakters in Verbindung mit dem zeitlichen Übergang vom Dunkel zum Licht beliebte Symbole des radikal

Neuen, auch von Revolutionen etwa. So ist die aufgehende Sonne den Revolutionären, also den Schweizer Waldstättlern, in Gioacchino Rossinis *Guillaume Tell* Zeichen zum Aufbruch und Hinweis auf den Sieg, der auch musikalisch umgesetzt wird. Der Schlusschor des zweiten Aktes stellt einen grandiosen Ausbruch dar, der den Aufstand gegen die verhassten Habsburger verherrlicht. In Schillers *Wilhelm Tell* ist das vorgebildet, und zwar ebenfalls in der letzten Szene des zweiten Aktes: »Indem sie [die Landleute] zu drei verschiedenen Seiten abgehen, fällt das Orchester mit einem prachtvollen Schwung ein, die leere Szene bleibt noch eine Zeitlang offen und zeigt das Schauspiel der aufgehenden Sonne über den Eisgebirgen.«

Meyerbeer hingegen verzichtet auf eine Verbindung von Szene und Musik, sein Sonnenaufgang bleibt ganz bewusst beschränkt auf die Bühne, um die Handlungen der Wiedertäufer nicht auch noch symbolisch zu überhöhen. Das »gleißende Licht über der Silhouette Münsters erweist sich als trügerisch, leuchtet es doch den Wiedertäufern zu ihrem letzten Sieg und zugleich zur Stätte ihres Untergangs«. (Sabine Henze-Döhring/Sieghart Döhring)

»Die Sonne zerteilt die Nebel, die Eisspitzen glühen in ihrem roten Scheine.«

(Richard Wagner, Prosaentwurf zu »Die hohe Braut oder Bianca und Giuseppe«)

Die prächtigste aller Opernsonnen hätte Richard Wagner scheinen lassen, wenn, ja wenn er seine unverloren gebliebene Oper *Die hohe Braut oder Bianca und Giuseppe*, die im Jahr 1793 unmittelbar vor der Einnahme Nizzas durch die französische Revolutionsarmee spielt, geschrieben hätte. Im Prosaentwurf aus den 1830er-Jahren liest man: »Der Morgen ist allmählich angebrochen. Die Sonne zerteilt die Nebel, die Eisspitzen glühen in ihrem roten Scheine. Es zeigt sich im Hintergrunde eine freie Aussicht durch die Gebirgszacken [...]. – Alle fallen auf die Knie, und begrüßen in einem Morgengebet die junge Sonne, die ihnen die Freiheit bringen soll. – Man hört aus der Tiefe den Morgengruß der französischen Feldmusik, an die sich die Freiheitslieder der französischen Armee anschließen und heraufschallen. – Dadurch entflammt rüsten sich die Verschworenen zum Aufbruch. Die Musik aus der Tiefe bildet mit dem feurigen Gesang der Verschworenen auf der Bühne das Ensemble.« Zusätzlich zum Sonnenaufgang in den Seealpen, zum Morgengebet der Revolutionäre und zur Militärmusik hätte er sich für sein großes Revolutionstableau auch noch der appellativen Kraft der Marseillaise versichert. Gasflammen und Kerzen allein reichten ihm nicht aus, um das Licht der Revolution hell genug scheinen zu lassen. ●

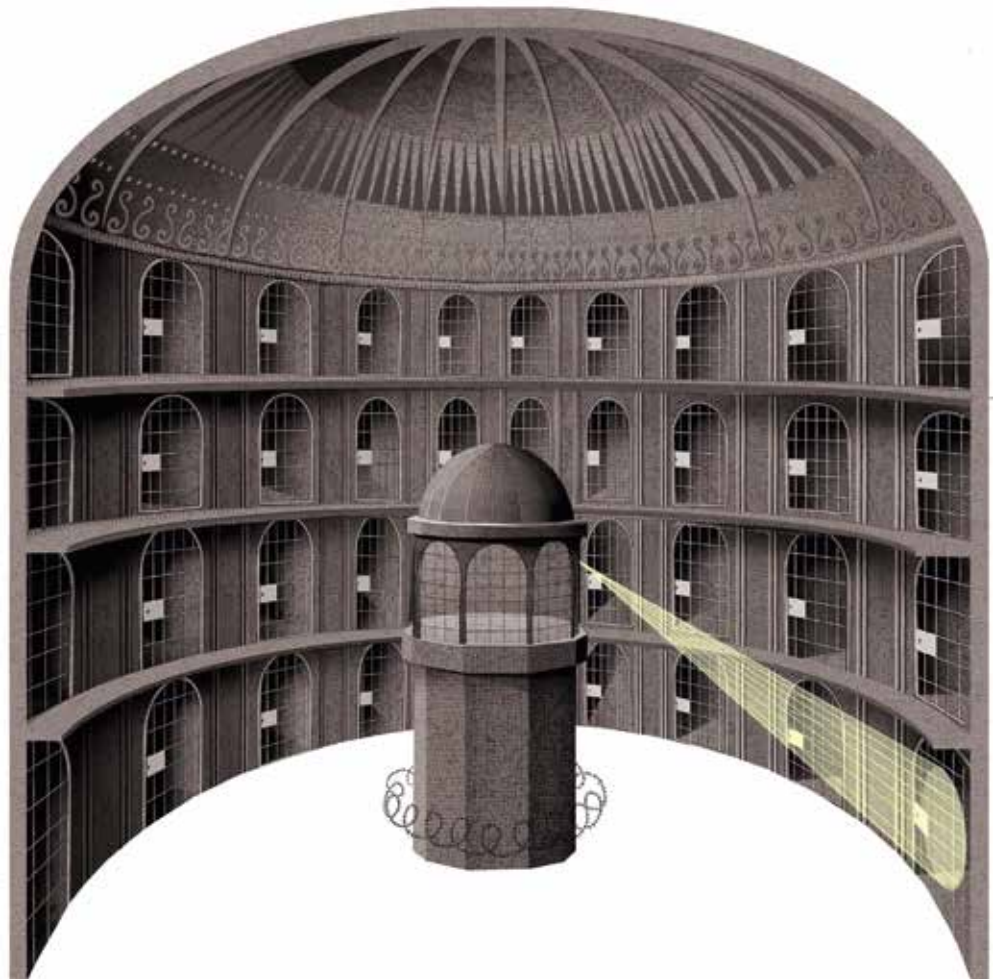


Der Autor

Prof. Dr. Bernd Zegowitz, 48, ist außerplanmäßiger Professor am Institut für Deutsche Literatur und ihre Didaktik der Goethe-Universität. Zu seinen Forschungsschwerpunkten gehören die Ästhetik des Musiktheaters und die Theatergeschichte des 18. und 19. Jahrhunderts. Gemeinsam mit dem Altgermanisten Michael Waltenberger arbeitet er gerade an einem Handbuch zur Mittelalterrezeption im Musiktheater. Er schreibt Opernkritiken für diverse Tageszeitungen, schätzt die Oper Frankfurt und dort ganz besonders Christof Nels Inszenierung der »Frau ohne Schatten« von Richard Strauss.

zegowitz@lingua.uni-frankfurt.de

1 Modell eines panoptischen Gefängnisbaus, auf dem der Blick des Wärters in Form eines Scheinwerferkegels dargestellt ist.



Ist es das Licht, das gefangen hält?

Vom übersehenen Theaterlicht

von Mayte Zimmermann

Das Licht gilt uns als »das« Signum von Humanität, Aufklärung, Erkenntnis und Fortschritt, aber im Theater »übersehen« wir das Licht meist oder reduzieren seinen Einsatz auf eine technische Dienstleistung, die mit »hoher Kunst« scheinbar nichts zu tun hat. Woher kommt das? Und welche Gründe sprechen dafür, dem Licht im Theater mehr Aufmerksamkeit zu schenken, als es viele Zuschauer, Theaterwissenschaftler und Theaterschaffende derzeit tun? Antworten lassen sich unter anderem bei Michel Foucault, Friedrich Schiller und Adolphe Appia finden.

Um die Frage nach der Rolle des Lichts stellen zu können, müssen wir sie als Teil der Genese jenes bis heute dominanten Theaterverständnisses begreifen, das sich im 18. Jahrhundert entwickelt: das bürgerliche Theatermodell als Zenit der neuzeitlichen Innenraumtheater. Studien des französischen Philosophen Michel Foucault zum 18. Jahrhundert, seinen Umbrüchen und seinen Erfindungen sind inzwischen fast kanonisch: In dieser Zeit seien Institutionen wie Klinik und Gefängnis geboren, an denen sich modellhaft eine neu entstehende Gesellschafts-

form und das mit ihr verbundene Verständnis des Subjekts analysieren lassen.

Lichtinszenatorischer Zugriff im Panopticon: Von der Hierarchie des Sehens und Gesehenwerdens

Foucault hat nicht über das zeitgleich entstehende Theater geschrieben, aber vor allem seine Überlegungen zum Gefängnis können uns als Folie dienen, um uns dieser Institution, ihrem Funktionieren und ihren Wirkungen anzunähern und die Frage nach der Rolle des Lichts zu stellen. Schauplatz für Foucault ist das berühmte Gefängnismodell des britischen Philosophen und Begründers des klassischen Utilitarismus Jeremy Bentham – das Panopticon (aus dem Griechischen übersetzt »alles zum Sehen gehörend«): Um einen uneinsehbaren Überwachungsturm arrangiert Bentham ringförmig nebeneinanderliegende Einzelzellen, die komplett und jederzeit einsehbar sind. Die Architektur führt also zu einer hierarchischen Scheidung von Sehens und Gesehenwerden, und sie vermittelt jedem inhaftierten Subjekt das Bewusstsein einer beständig möglichen, niemals aber prüfbar und damit fiktiven Überwachung. Diese inkorporierte Überwachung, die auch Strafen zur Folge haben kann, stellt – so Foucault – die Geburt des bürgerlichen Subjekts dar. Seine zentrale These zum 18. Jahrhundert lässt sich knapp vereinfacht so zusammenfassen: All diese neu entstehenden Institutionen und Diskursfelder sind keine repressiven Systeme, die Ungewolltes tatsächlich im Dunkeln verschwinden lassen, sondern produktive Machtssysteme: Sie produzieren genau jenes »Anormale«, an dessen Überwachung, Kartierung, Regulierung und Bestrafung sich jene »Normalität« bildet, die sich bis in die kleinsten Bereiche der Gesellschaft verbreitet und in jedes Subjekt einschreibt, ja, dieses Subjekt überhaupt erst bildet.

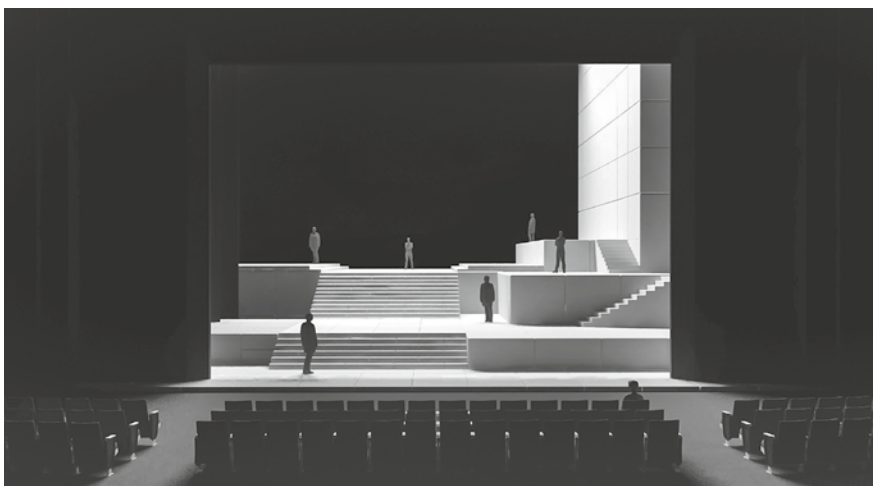
Was später ebenso für das architektonische Studium der neuzeitlichen Theatergebäude

zutrifft, zeigt sich hier umso deutlicher: Das Panopticon und all diese Überlegungen Foucaults erschließen sich erst, wenn man den Blick auf den architektonischen Plan um die Frage des Lichts erweitert. Der französische Psychoanalytiker Jacques Alain-Miller schreibt: »Der geschlossene Raum [...] badet im Licht. Niemand und nichts kann sich in ihm verbergen, außer der Blick selbst, der unsichtbare Allerblickende. [...] Im undurchsichtigen und kreisförmigen Gebäude ist es das Licht, das gefangen hält.« (Miller: Benthams panoptische Maschinerie, S. 8)

Was macht das Licht? Auf welche Weise kommt es im Panopticon zum Einsatz? Welcher Funktion dient es? Während der Wächter im Panopticon die Gefangenen im durch die Außenfenster gleichmäßig hereinströmenden Gegenlicht gut sieht, kann er im Dunkel seines Standorts nicht ausgemacht werden. Diese Lichtinszenierung im Panopticon generiert jene von Foucault als »Falle« beschriebene »Sichtbarkeit« (Foucault: Überwachen und Strafen, S. 257), indem sie die Macht (des selbst unsichtbaren Blickes) »automatisiert« (ebd. S. 259), den Raum der Zellen »homogenisiert« (Miller, S. 6) – und zugleich die Insassen »individualisiert« (Foucault, S. 257): Das Licht ermöglicht, Einzelwesen als Silhouetten scharf von Anderem abzugrenzen; es bündelt, formt, gestaltet. Zugleich »verspricht« es Ein-Sicht in diese Entitäten, die es hervorgebracht hat: »Jede Bewegung der Gefangenen und jeder ihrer Gesichtsmuskeln« (Miran Bozovic: Benthams Panopticon, S. 76) wird durch das Licht sichtbar und leistet einem Blick Vorschub, der glaubt, »mehr zu sehen als tatsächlich sichtbar ist« (Bozovic, S. 73).

Es ist dieser Blick, der mit dem Licht als Signum der Aufklärung in eins fällt (Abb. 1). Was nimmt dieser Blick als ein Mehr des Sichtbaren in den Fokus seines »Scheinwerferkegels«?

2 Computernachbildung von Appias Licht-Körper-Raum-Experimenten in Hellerau. Man bedachte die Dreidimensionalität des Bühnenraumes, in dem das Licht völlig anders »spielen« kann als auf den bis dahin gängigen Bühnenprospekten.



Michel Foucaults Antwort: »Die Seele«. (Foucault, S. 42) »Die Seele« als vermeintliches Innen wird auf einer Oberfläche projiziert; das Licht räumt diese Bühne ein.

Schiller und die siegreiche Tiefenwirkung des Lichts: Von barbarischer Nacht zur Vernunft des Tages

Und nun der vielleicht kühne Sprung ins bürgerliche Theater und zu Friedrich Schillers Vorstellungen davon, wie eine »gut stehende Schaubühne« wirken, also was sie »machen« soll: »[N]icht genug, dass uns die Bühne mit Schicksalen der Menschheit bekannt macht, sie lehrt uns auch gerechter gegen den Unglücklichen sein und nachsichtsvoller über ihn *richten*. Denn nur, wenn wir *die Tiefe* seiner Bedrängnisse *ausmessen*, dürfen wir das Urteil über ihn aussprechen. [...] Der Nebel der Barbarei, des finsternen Aberglaubens verschwindet, die Nacht weicht dem *siegenden Licht*« (Friedrich Schiller: Wie kann eine gute stehende Schaubühne, S. 726). Schillers Formulierungen sind bemerkenswert, denn obwohl die Wirkung des Theaters hier mit einem ganz plakativen Übergang von barbarischer Nacht zu Vernunft, Menschlichkeit und Gerechtigkeit (Tag) beschrieben wird, schreibt er dem Licht doch eine fast kriegerische Kraft zu.

Um diese »siegreiche Tiefenwirkung« des Lichts im Theater zu begreifen, gilt es für einen Moment, noch ein paar weitere Jahrhunderte in der Zeit zurückzuspringen: Der vielleicht bedeutsamste Paradigmenwechsel des bürgerlichen Theaters zeitigt sich mit Beginn der Renaissance und der Erfindung des Innenraumtheaters. Bis dahin findet alles, was sich »Theater« nennt, unter freiem Himmel und ergo im Einfluss von Wind, Wetter und natürlichen Lichtverhältnissen statt. Die Erfindung des Innenraumtheaters ist ein beispielloser Siegeszug des Menschen über den Raum der Darstellung. Als Formel neuzeitlichen Theaters könnte gelten, was der Schweizer Theaterkünstler Adolphe Appia so formuliert: »Unsere Bühne ist ein unbestimmter und dunkler Raum. Wir müssen hier zuerst einmal etwas sehen, das ist klar.« (Appia: Darsteller, Raum, Licht, Malerei, S. 438) Ab der Renaissance ist »Theater« ein schwarzer, dunkler Kasten, in dem man nichts sehen kann, bevor Entscheidungen über seine Beleuchtung getroffen wurden.

Künstliches Licht wird zur Grundvoraussetzung jeder Form des Theatralen und zeichnet zugleich – fast strukturäquivalent zum Panopticon – vor, was überhaupt auf diesen Bühnen zu sehen gegeben wird: Das Dispositiv der Zentralperspektive entwickelt sich fast 200 Jahre vor den sprachtechnisch und körperlich-bildlichen Disziplinierungen der Schauspieler, die ein (neues) (Vor-)Bild vom Menschen vorstellen

(sollen). Erst ab dem 18. Jahrhundert taucht in den Bildräumen, die nach den Prinzipien von Lichteinfall, Ausschnitt und Projektionsfeld frontal vor den Zuschauenden organisiert sind, das auf, was das Panoptikum von Anfang an in Szene setzt: Schauspieler als Träger einer »Seele«, die in ihrer Tiefe »vermessen« werden soll.

»In einer paradoxen Entwicklung, die den modernen Schauspieler im Zuge einer Domestizierung seiner Gesten als »natürliche Gestalt« erfindet, wird nun der schauspielerischen Darstellung aufgelastet, was der optischen Architektur als solcher fehlt: der Blick, der Gesichtspunkt, die Seele, das Subjekt, sein Begehren.« (Ulrike Haß: Drama des Sehens, S. 382) Wie im Panoptikum auch wird das Gesicht zum zentralen Scharnier zwischen einem von außen angezogenen und eindringenden Blick wie zur Bühne einer vermeintlichen Innerlichkeit. Das Gesicht (nicht als Objekt, sondern als Prinzip) ist jene Bühne, die das Licht vorgezeichnet hat: der Mensch als flächiges Körperbild, der ansprechbar (Dialog) und in Gänze verstehbar ist.

Keplers Theorie der Lichtbrechung und das neuzeitliche Theater

Die Theaterwissenschaftlerin Ulrike Haß hat ausführlich neuzeitliche Theaterarchitektur(en) studiert. Sie schlägt den Begriff der »Bühnenform« (Haß: Drama des Sehens, S. 17) vor, um deutlich zu machen, das theaterarchitektonische Modelle signifikanter Ausdruck einer bestimmten Weltansicht und der sie erschließenden Wahrnehmung darstellen. Die eröffnende Kraft, welche der durch den Menschen kontrollierten und inszenierten künstlichen Beleuchtung im Zusammenhang dieser Blackboxen zukommt, kündigt von einem gewichtigen Wandel in der Art, wie der Mensch sich in seinem Verhältnis zur Welt inszeniert.

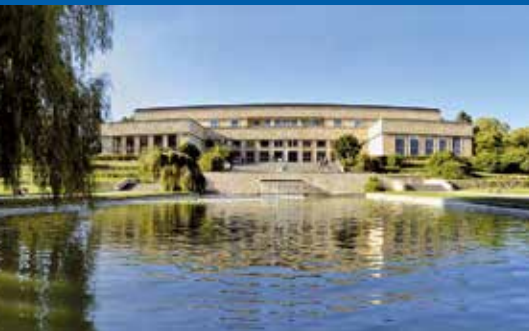
Was viele unserer heutzutage immer noch genutzten Theaterbauten über dieses Verhältnis aussagen (noch vor jeder Inszenierung auf der Bühne), lässt sich mit der Theorie der Lichtbrechung erklären, die der Naturwissenschaftler Johannes Kepler bereits zu Beginn des 17. Jahrhunderts entwickelte: Ein Angeschautes wird nicht länger auf dem Weg eines den Raum durchmessenden Seh-Kontaktes wahrgenommen, sondern durch ein optisches Bild (*pictura*) im Auge. Hier findet sich die Notwendigkeit der Frontalität von Zuschauer- und Bühnenraum aller neuzeitlichen Theater, die die Welt als gespiegeltes Bild in Szene setzten und in das alles, was zur Darstellung kommt, sich einfügen muss.

Die »siegreiche« Kraft des Lichts liegt genau darin, diese Inszenierung als neutrale Wiedergabe von Wirklichkeit zu verschleiern. »Entlang der vertikalen Linie, die durch den Augpunkt

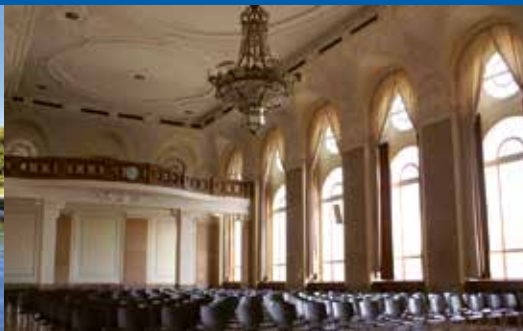
Literatur

- 1 Adolphe Appia, »Darsteller, Raum, Licht, Malerei«, in: Christopher Balme/Klaus Lazarowicz (Hrsg.), Texte zur Theorie des Theaters, Stuttgart, Reclam Verlag 1991, S. 437–442.
- 2 Richard Beacham, Adolphe Appia. Künstler und Visionär des modernen Theaters, Berlin, Alexander Verlag 2006.
- 3 Miran Bozovic, »Benthams Panopticon und die Ontologie der Fiktionen«, in: Jacques-Alain Miller (Hrsg.), Utilitarismus, Wien, Turia und Kant 1996, S. 52–86.
- 4 Michel Foucault, Überwachen und Strafen, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag 1976. Hier insbesondere das Kapitel »Das Panoptimum« (S. 251–294).
- 5 Ulrike Haß, »Netzhaubild und Bühnenform«, in: Marina Leeker (Hrsg.), Maschinen, Medien, Performances: Theater an der Schnittstelle zu digitalen Welten, Berlin, Alexander Verlag 2001, S. 526–541.
- 6 Ulrike Haß, Das Drama des Sehens. Auge, Blick und Bühnenform, München, Wilhelm Fink Verlag 2005.
- 7 Günther Heeg, Das Phantasma der natürlichen Gestalt. Frankfurt am Main: Stroemfeld Verlag 2000.
- 8 Jacques-Alain Miller, »Jeremy Benthams panoptische Maschinerie«, in: Ders. (Hrsg.), Utilitarismus, Wien, Turia und Kant 1996, S. 7–51.
- 9 Friedrich Schiller, »Wie kann eine gut stehende Schaubühne eigentlich wirken?«, in: Ders., Werke, hrsg. v. Herbert G. Göpfert, Frankfurt am Main und Wien, Carl Hanser Verlag 1966, Band I, S. 719–729

Raum...



Campus Westend
beeindruckend



Campus Bockenheimer
traditionell



Campus Riedberg
modern

... für Ihre Veranstaltung

**Sie suchen Veranstaltungsräume,
die Ihnen etwas anderes als
Hotels, Kongress-Center und
Tagungszentren bieten?**

Dann sind Sie bei uns richtig! Die Johann Wolfgang Goethe-Universität bietet Ihnen für jede Art von Veranstaltung die passenden Räumlichkeiten.

An den drei Frankfurter Standorten Westend, Bockenheimer und Riedberg stehen Ihnen Konferenz- und Seminarräume, Festsäle, die Eisenhower-Rotunde, Hörsäle und die historische Aula mit moderner technischer Einrichtung zu Verfügung. Überzeugen Sie sich selbst von den vielen Möglichkeiten!

Fordern Sie gleich unser Informationsmaterial an oder besuchen Sie uns auf unserer Website unter www.campuslocation-frankfurt.de. Wir freuen uns auf Ihre Anfrage und stehen für weitere Auskünfte gerne zur Verfügung!

Räume – so individuell wie Ihre Veranstaltung.

verläuft, werden die visuellen Phänomene zum Beispiel als sichtbar, konturiert, flach definiert – im Gegensatz zu unsichtbar, amorph, plastisch. Von daher handelt es sich nicht um die Widergabe objektiver äußerlicher Wirklichkeit oder um Nachbildungen ›wirklicher Dinge‹.« (Haß: Netzhautbild, S. 531) Solange wir dem Licht keine Aufmerksamkeit als eigenes Ausdrucksmittel schenken, begreifen wir jene aneignende und vor allem gestaltende Geste nicht, die ihm im Theater seit der Neuzeit eignet: Wir verfallen dann seiner Macht, indem der Ausleuchtungsprozess als Grundlage von Urteil und Verurteilung wird, und verkennen zugleich seine schöpferische Kraft.

Adolphe Appia und sein Spiel mit dem Licht

Der Theatermacher Adolphe Appia soll hier für viele der Künstlerinnen und Künstler stehen, die Anfang des 20. Jahrhunderts die Bedeutung erkannt haben, die dem Licht in der Gestaltung des Menschen als Bild beziehungsweise Gesicht zukommt. Appia spricht in diesem Zusammenhang von einem »Mißbrauch« (Richard Beacham: Adolphe Appia, S. 98) des Lichts im modernen Theater, der so lange besteht, wie das Licht nicht als kreativer Mitspieler begriffen wird. Appia setzte sich nicht nur kritisch mit dem Theater seiner Zeit auseinander, er hat zugleich das Schauspielhaus Hellerau in Dresden zu einer Art experimentellem Labor gemacht, in dem er die Ausdruckskraft des Lichts für das Theater auf ganz neue Weise zu denken und zu inszenieren versuchte. »Es ist einleuchtend, daß unter diesen Umständen die unbedingte Bethätigung des Lichts, welche einen wesentlichen Bestandteil seines Wesens ausmachen, nicht auf eine Linie gestellt werden können mit der knechtischen und einseitigen Nachahmung einer einzigen Daseinsmodalität der Form.« (Beacham, S. 101)

Um dem oben skizzierten Problem einer Vereinheitlichung und Festschreibung, insbesondere der Körper auf der Bühne, zu entgehen, »muss« – so Appia – das Licht »genau wie der Darsteller aktiv werden« (Appia, S. 439), und zwar in Relationalität zu den Hindernissen wie Körpern und Bühnenelementen, an denen es sich – und zwar auf schier unendliche und immer wieder neue Arten und Weisen – brechen kann; es kann gestalten und muss überhaupt nicht festschreiben. Appia spricht in diesem Zusammenhang von »gestaltendem Licht«: das heißt ein Licht, das Beweglichkeit, Prozessualität, Plastizität in den Raum schreibt, selbst also als szenografisches Element ernst genommen und eingesetzt wird. »Die starre Nachahmung der uns bekannten Formen und Gestalten gibt ja nicht den einzigen Daseinsmodus dieser Formen wieder; wir können uns letztere mit Leich-

tigkeit in den verschiedenartigen Verbindungen vorstellen, sie uns in Bewegung denken, ja sogar als vor unseren Augen Größe und Beschaffenheit verändernd. Also können wir mit diesen Formen frei im Raume walten.« (Beacham, S. 101) (Abb. 2)

Dieser Artikel hat den Versuch unternommen, eine Erklärung dafür zu suchen, warum dem Licht im Theater oft und immer noch so wenig Aufmerksamkeit zuteilwird; er hat versucht, auf die Problematik(en) dieses übersehenen Lichts zu verweisen. Vielleicht wecken die nur angedeuteten Überlegungen Lust darauf, beim nächsten Theaterbesuch darauf zu achten, ob das Licht schlicht als Sekundant oder aktiver Mitspieler inszeniert wurde, ob es uns schlicht einlullen soll oder eine eigene Sprache spricht. In beiden Fällen gilt nämlich: Was wir im Erbe der Renaissance heute ›Theater‹ nennen, ist zuallererst eine Inszenierung des Sehens und – konstitutiv damit verbunden – ein Spiel mit dem Licht. ●



Die Autorin

Dr. Mayte Zimmermann, 33, studierte Angewandte Theaterwissenschaft in Gießen, promovierte in Hamburg und Frankfurt mit einer Arbeit über ethische Fragen einer Darstellbarkeit des Anderen bei Prof. Dr. Nikolaus Müller-Schöll und ist derzeit als Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Zentrum für zeitgenössisches Theater und Performance der Universität Koblenz tätig. Die langjährige Tätigkeit als Inspizientin am Schauspiel Frankfurt, die Erfahrungen eigener szenischer Arbeiten und der intensive Austausch mit dem Performancekollektiv »Swoosh Lieu« mündeten im Sommer 2013 in dem Szenischen Projekt »Welche Rolle spielt das Licht?« mit der Lichtkünstlerin Rosa Wernecke an der Goethe-Universität. Seit dieser Zeit arbeitet Zimmermann an einem Forschungsprojekt zum Thema Licht und Denken unter dem Arbeitstitel »Vom Erdenklichten«.

mayzimmermann@uni-koblenz.de

Heureka! Wie hat Sie in Ihrer Forschung ein Geistesblitz getroffen?

»Gleißend erhob sich die Morgensonne über dem Mittelmeer. Nur wir wenigen Jogger waren an der Felsenküste Nordzyperns unterwegs. Gewiss keine Atmosphäre für Denkarbeit. Vielmehr purzelten meine Gedanken durcheinander und dennoch, plötzlich war sie da: die Gliederung meines nächsten Buches, vom mediterranen Licht erhellt. Schweißtriefend lief ich ins Hotel, um sie festzuhalten.«

Hartmut Leppin
Professor für Alte Geschichte

»Ein Geistesblitz? – Dazu fallen mir die aufregendsten Zeiten meiner bisherigen Karriere ein, kurz nachdem ich mein Labor an der Goethe-Universität etabliert hatte. Wir verfolgten die Hypothese, dass das Protein Ubiquitin nicht nur anderen Proteinen den ›Todeskuss‹ gibt, sondern in viele weitere zelluläre Signalwege involviert ist. Mit einem simplen, aber robusten Test prüften wir unsere Vermutung – und ich werde nie den Moment vergessen, als ich die ersten Ergebnisse sah. Blitzartig wusste ich, dass ich eine bahnbrechende Entdeckung vor mir habe.«

Ivan Dikic
Professor für Biochemie

»Zunächst gefiel mir die Idee, dass wir – ähnlich den Worten eines Satzes – auch gegenüber Objekten in Szenen genaue Erwartungen haben, ›welche‹ Objekte ›wo‹ zu finden sind. Der Geistesblitz schlug aber erst beim Betrachten der Hirnpotenziale ein, die ich zuvor bei Probanden aufgezeichnet hatte, denen unter anderem Fotos von ›ungrammatischen‹ Feuerhydranten in Küchen oder schwebenden Bierflaschen präsentiert worden waren. Diese zeigten nämlich, dass Gehirne Objekte wie Wörter im Kontext verarbeiten. Wann und wie wir diese ›Szenengrammatik‹ lernen, bedarf derweil weiterer ›Geistesblitze‹.«

Melissa Lê-Hoa Võ
Professorin für Kognitive Psychologie



»Geistesblitz –

Während meiner Promotion zerbrach ich mir den Kopf über die Anwesenheit ganz exotischer, keltischer Münzen im römischen Legionslager Nijmegen (NL). Bis ich eines Nachmittags auf einer Landkarte die Herkunft dieser Münzen einzeichnete und dabei eine gerade Linie zwischen Nijmegen über Maas, Saône, und Rhone zum Mittelmeer herauskam. Die Marschroute römischer Legionäre! Ein Beweis für die sehr frühe Datierung dieses Lagers! Mit einem Jubelschrei bin ich auf den Flur gerannt, um die ganze Abteilung an diesem Heureka-Moment teilhaben zu lassen.«

Fleur Kemmers

Professorin für Münze und Geld in der griechisch-römischen Antike

»Ein Geistesblitz bei einem

guten Glas Wein oder beim Wandern in den Alpen?

Leider nein. Die besten Ideen kommen mir – viel profaner – beim Lesen wissenschaftlicher Literatur, und zwar am Schreibtisch. Gute Ideen sind das Produkt von Anstrengung und disziplinierter Konzentration, von Organisieren verstreuten Materials, vom Zusammenbauen vieler unterschiedlicher Deutungsmuster, Interpretationen, Materialien. Auch Gegenwartskunst, neue Musik oder Theaterinszenierungen sind für die geschichtswissenschaftliche Produktion fundamental wichtige Referenzpunkte. Als außerakademische Diskurse, die sich an meinen Gegenständen zu schaffen machen, erlauben sie den Außenblick auf das eigene professionelle Arbeiten und lassen das Korsett der disziplinären Denkanäle erkennen. Aber die Ideen, mit denen ich aus diesem Korsett meiner Disziplin herauskomme, muss ich wieder am Schreibtisch vor dem Rechner erarbeiten, ganz profan.«

Bernhard Jussen

Professor für Mittelalterliche Geschichte

»Ohne behaupten zu wollen,

dass meine bescheidenen Erkenntnisse auf funkelnden Geistesblitzen beruhen, glaube ich sagen zu können, dass sie sich immer dort einstellten, wo es galt, den Schein von Widersprüchen zu durchschauen. Als ich meine Dissertation schrieb, behaupteten die einen, Menschen seien stets als Gemeinschaftswesen zu verstehen, während die anderen ihre Rechte als Individuen betonten. Aber da bestand gar kein Gegensatz, denn beides ist richtig; man darf nur nicht die Frage, was uns als Person ausmacht, mit der Frage verwechseln, welche Rechte wir haben, innerhalb und gegenüber Gemeinschaften. Und als ich meine Habilitation schrieb, dachten einige, die Toleranz sei eine obrigkeitstaatliche Haltung der Abwertung der bloß »Geduldeten«, während andere sie als Anerkennung unter Gleichen und zugleich Verschiedenen betrachteten. Aber sie kann beides sein; hier sind nur verschiedene Konzeptionen der Toleranz im Spiel, die auf ein und denselben Begriff zurückgehen. Fortschritt in der Philosophie heißt: Erleuchtung durch Differenzierungsgewinn.«

Rainer Forst

Professor für politische Philosophie und Sprecher des Exzellenzclusters

»Die Herausbildung normativer Ordnungen«

100 Prozent Inspiration

Manfred Geier analysiert die Rolle der Geistesblitze in der Philosophie-Geschichte

von Bernd Frye



Manfred Geier

Geistesblitze – Eine andere Geschichte der Philosophie

Reinbek bei Hamburg
2013, Rowohlt Verlag,
ISBN 978-3-498-02523-6,
284 Seiten, 19,95 Euro.

Der Rezensent

Bernd Frye, 51, ist freier Autor und arbeitet regelmäßig auch für »Forschung Frankfurt«; im Hauptberuf ist er Pressereferent am Exzellenzcluster »Die Herausbildung normativer Ordnungen«.

bernd.frye@em.uni-frankfurt.de

»Eines Tages geschah es Kant,
dass er keine Worte fand.
Stundenlang hielt er den Mund
und er schwieg nicht ohne Grund.«

In solch einer Situation, beschrieben vom Dichter Robert Gernhardt, kann wahrscheinlich nur noch ein Geistesblitz helfen. Doch was hat es mit diesen Inspirationen auf sich, durch die große Denker ihre Blockaden überwinden? Gernhardt nähert sich dem Thema humoristisch. Manfred Geier wählt in seinem Sachbuch »Geistesblitze« einen wissenschaftlichen Weg, der ebenfalls erhellend ist. Er will, wie es im Untertitel heißt, eine »andere Geschichte der Philosophie« erzählen. Seine Pointe besteht in dem Nachweis, dass es »oft ganz konkrete einzelne Augenblicke« sind, in denen Philosophen auf neue Ideen kommen, die dann zu wegweisenden Werken ausgearbeitet werden.

Geyer beleuchtet die Entstehung wichtiger philosophischer Gedanken in sieben Fallstudien. Kant ist (natürlich) mit dabei, aber auch der vorsokratische Philosoph Parmenides von Elea. Hinzu kommen René Descartes, Jean-Jacques Rousseau und Johann Georg Hamann, der mit Kant befreundet war, diesem aber Lebensferne und Leidenschaftslosigkeit vorwarf. Das 19. und 20. Jahrhundert werden durch Friedrich Nietzsche und Karl Popper vertreten. Stichwortgeber sind unter anderem Wittgenstein und Hegel. »Ich bin in einem Wirrwarr. Ich kenne mich nicht aus.« Dieser Satz Wittgensteins bezeichnet für Geyer die philosophische Problemsituation, die dringend nach einer Lösung verlangt. Das singuläre Erkenntnismoment, in dem sich die Spannungen plötzlich entladen, beschreibt der Autor mit einem Hegel-Zitat als Blitz »des Gedankens, der in sich selbst einschlägt und von da aus sich seine Welt erschafft«.

Es ist ein ungewöhnlich heißer Oktobertag des Jahres 1749, als Jean-Jacques Rousseau auf einmal fühlt, »wie mein Geist von tausend Lichtern geblendet wird«. Atemlos und mit Herzklopfen lässt er sich »am Fuß des Baumes am Weg hinsinken«, wie er mehr als zehn Jahre später rückblickend an einen Freund schreibt. »Ach, Monsieur, wenn ich je nur ein Viertel von all dem, was ich unter diesem Baum sah und empfand, niederschreiben könnte, wie deutlich hätte ich dann alle Widersprüche des gesellschaftlichen Systems aufgewiesen.« Zumindest einiges hat Rousseau von seiner, wie er es nannte, »plötzli-

chen Eingebung« dann doch aufgeschrieben und entfaltet – vor allem, »dass der Mensch von Natur aus gut ist und dass die Menschen allein durch ihre Institutionen böse werden«. Dieses Leitmotiv findet sich dann besonders in seinem Traktat »Émile oder Über die Erziehung«.

Manfred Geyer betont, dass die Geistesblitze »nicht nur das irritierende Grundproblem des jeweiligen Denkers« lösen, sondern auch seinem »Lebensweg eine neue Perspektive« öffnen. So war es beispielsweise bei Kant nach seiner Lektüre des »Émile«, der im Herbst 1762 in deutscher Übersetzung erschien. »Es ist zwar kein unmittelbarer Geistesblitz, der ihn augenblicklich erleuchtet. Doch es hat den Anschein eines klaren Lichts, das ihn ab jetzt die Welt, seine Arbeit und sein Leben anders sehen lässt«, so Geyer. Die Lektüre scheint für Kant eine »Phase andauernder Inspiration gewesen zu sein«, mit einem Ergebnis, dass das abendländische Denken und namentlich die Aufklärung ganz maßgeblich beeinflusste: »Durch Rousseau angeleitet, holt er die Philosophie vom Himmel auf die Erde, konzentriert sich auf die Stellung des Menschen in der Welt und fragt danach, was man tun soll, um ein guter Mensch in moralischer Hinsicht zu sein.«

Auch bei Karl Popper, mit dem das Buch endet, gab es kein singuläres Erweckungserlebnis. Dafür blitzte es – im buchstäblichen und übertragenen Sinn – bei Parmenides, Descartes und Nietzsche umso mehr. Der philosophiegeschichtlich eher unbedeutende Johann Georg Hamann, der ebenfalls nicht in einem einzigen Moment vom Donner gerührt wurde, ist vor allem deshalb interessant, weil er mit seiner Kritik an Kant in eine Linie gestellt werden kann mit den Romantikern, die – so Geyer – »seine Impulse aufnahmen und gegen die Aufklärung richteten«. Vor allem solche erhellenden Bezüge und Verbindungen sind es, die dieses kenntnisreiche Buch lesenswert machen.

Inspirationen schließlich und die Überwindung dunkler Gedanken sind auch für die alltägliche Lebensführung unerlässlich. Von Kant weiß man, dass er ein geselliger Mensch war. Robert Gernhardts Gedicht mit dem Titel »Kleine Erlebnisse großer Männer: Kant« endet so:

»Erst als man ihn zum Essen rief,
wurd' er wieder kreativ,
und er sprach die schönen Worte:
Gibt es hinterher auch Torte?«

BÜCHER

Großes Wörterbuch für die Kant-Lektüre

Ein Gespräch mit Marcus Willaschek, dem federführenden Herausgeber des neuen Kant-Lexikons

von Rolf Wiggershaus

Kant ist ein großartiger Schriftsteller«, meinte der Frankfurter Philosophie-Professor Marcus Willaschek am Ende des Gesprächs, das ich anlässlich des Erscheinens des neuen Kant-Lexikons mit ihm führte. »Kant wird ja immer gescholten für seine abstrakte Sprache, lange, komplizierte Sätze. Aber ich finde, selbst in der ›Kritik der reinen Vernunft‹, die streckenweise nicht leicht zu lesen ist, gibt es immer wieder diese schlagenden Formulierungen, die eine Sache knapp auf den Punkt bringen – beispielsweise ›Gedanken ohne Inhalt sind leer, Anschauungen ohne Begriffe sind blind.«

Auf meine Frage, ob es für ihn Lieblingsstellen bei Kant gebe, kam die Antwort prompt: mehrere. Eine sei gleich der erste Satz der Vorrede zur ersten Auflage der »Kritik der reinen Vernunft« aus dem Jahr 1781: »Die menschliche Vernunft hat das besondere Schicksal in einer Gattung ihrer Erkenntnisse: daß sie durch Fragen belästigt wird, die sie nicht abweisen kann; denn sie sind ihr durch die Natur der Vernunft selbst aufgegeben, die sie aber auch nicht beantworten kann; denn sie übersteigen alles Vermögen der menschlichen Vernunft.«

Eine besonders schöne Stelle sei das, die ein zentrales Motiv von Kants Denken und das ganze Projekt der Kritik der reinen Vernunft in einem Satz zusammenfasse. Dergleichen ist – man merkt es schnell – nicht das Bekenntnis

eines orthodoxen Kantianers oder eines besessenen Kant-Exegeten, sondern Ausdruck der Bewunderung für Kant als Philosophierenden. Diese Bewunderung war schon vor der Arbeit am Lexikon da, und sie wuchs mit der jahrelangen Arbeit daran, die im Sommer 2000 begann und im Herbst 2015 ihren Abschluss mit einem 2900-seitigen Gemeinschaftswerk fand.

Das neue Kant-Lexikon steht in einer langen Tradition, die bereits zur Zeit Kants, des »kritischen« Kant, begann. Als Kant nach mehr als einem Jahrzehnt des Schweigens als Publizist 1781 *Die Kritik der reinen Vernunft* veröffentlichte, war er sich klar darüber, dass er den Lesern viel zumutete. Für den Umgang mit den Schwierigkeiten, die der oben zitierte erste Satz der Vorrede benannte, empfahl er eine »veränderte Methode der Denkungsart« – eine Veränderung, die er für ebenso einschneidend hielt wie Kopernikus' Ersetzung des geozentrischen Systems durch das heliozentrische. Die neue Denkungsart bedeutete eine Wendung zum Subjekt, doch nicht zum empirischen Subjekt, sondern zur Quelle der Objektivität im Subjekt, und das in einem doppelten Sinn. Es tritt dadurch einerseits als Quelle der Naturgesetze auf, die unsere Erfahrung der Natur strukturieren, andererseits als Quelle der Sittengesetze, die uns zu Mitgliedern einer moralisch-sittlichen Welt machen. Mit der neuen Denkungsart waren auch neue Begriffe und neue Bedeutungen überlieferter Begriffe verbunden. Zum Beispiel waren im traditionellen philosophischen Sprachgebrauch die Begriffe »transzendent« und »transzendental« weitgehend synonym. Bei Kant wurde »transzendental« zum Begriff für eine gewissermaßen verinnerlichte und eingeschränkte Transzendenz. So kam es zu Missverständnissen und Unverständnis. Doch sogleich begann auch eine Geschichte der Kommentare, Compendien und Wörterbücher, die das rechte Verständnis erleichtern wollten.

Das wichtigste und erfolgreichste Kant-Lexikon des 20. Jahrhunderts war Rudolf Eislers »Nachschlagewerk zu Kants sämtlichen Schriften,



Marcus Willaschek/
Jürgen Stolzenberg/
Georg Mohr/Stefano
Bacin (Herausgeber)

Kant-Lexikon

Berlin 2015,
3 Bände, 2800 Seiten,
Ladenpreis der gebundenen Ausgabe 349 Euro,
Subskriptionspreis bis 31. Dezember 2015
249 Euro,
ISBN 978-3-11-017259-1.

Briefen und handschriftlichem Nachlass«. Mit der Idee eines neuen Lexikons wurde es ernst während eines Kant-Kongresses im Jahre 2000. Auf Initiative des Verlags de Gruyter nahmen im Sommer drei Philosophie-Professoren und Kant-Experten die Arbeit auf: Georg Mohr, Jürgen Stolzenberg und Marcus Willaschek. Das neue Lexikon sollte Kants philosophische Terminologie auf der Grundlage der aktuellen Text-Editionen und unter Berücksichtigung aktueller Kant-Forschung umfassend erschließen.

Aus den zunächst angesetzt fünf Jahren wurden – ungeachtet der späteren Hinzunahme eines vierten Herausgebers: Stefano Bacin – fünfzehn. »Wir haben«, so Willaschek, »allein schon zwei Jahre gebraucht, um das Konzept des Lexikons auszuarbeiten und um die Stichworte festzulegen und diese Stichworte in Paketen zu bündeln. Wir haben uns nämlich überlegt: Einzelne Artikel an Autoren zu vergeben hätte bei einer so großen Zahl von Artikeln die Sache unüberschaubar gemacht. Wir haben immer Pakete von durchschnittlich zehn Artikeln gepackt – einen großen, zwei, drei mittelgroße und der Rest waren kleinere, damit wir auf denen nicht sitzen blieben. Erst dann haben wir Autoren gesucht.« Tatsächlich stammten am Ende die knapp 2.400 Artikel von mehr als 220 Autoren aus mehr als 20 Ländern.

Nach einer Lösung verlangte auch die Festlegung der Stichworte. Erst während der Ausarbeitung der Liste wurde den Herausgebern klar, dass viele der Kant zugeschriebenen Begriffe so bei Kant gar nicht vorkamen. »Wir haben uns dann entschieden«, so Willaschek, »dass wir nur Stichworte aufnehmen, die eine direkte Basis in Kants eigenen Texten haben. Die Idee war: Wir machen ein Kant-Wörterbuch, das Kants eigene Terminologie möglichst umfassend berücksichtigt.« Als Grundlage dafür dienten die Bände 1 bis 9 (Werke) sowie 21 und 22 (Opus postumum) der Akademie-Ausgabe von Kants Gesammelten Werken unter Heranziehung weiterer Texte bei den Erläuterungen. Unter Wahrung des Prinzips einer engen Anbindung des Lexikons an Kants Texte wurden die 2.095 Artikel zu Kantischen Termini ergänzt durch 225 Artikel zu Personen und 75 zu den einzelnen Schriften Kants.

Doch brauchen wir das alles? Ist Kants Denken, einst neu und umwälzend, nicht längst zu etwas Bekanntem und Vertrautem geworden? »Die Terminologie«, so Willaschek, »ist zwar nicht mehr neu, aber sie ist komplex und eigenständig, und Kant verwendet sie auf eine sehr spezifische Weise.« Man könnte geradezu sagen, dass das Lexikon durch die enge Anbindung an Kants Begriffe und die Verweise auf wichtige Kant-Stellen und thematisch eng verwandte Lexikon-Artikel einer Scheinvertrautheit vor-

beugt. Das Lexikon will in erster Linie ein reines Hilfsmittel beim Umgang mit Kants Texten sein. Kants Philosophie soll weder kanonisiert noch beurteilt, sondern erläutert werden bei gleichzeitiger Wahrung des Sinns für ihre Komplexität und Eigenständigkeit.

Daher auch das auffallend weite Feld der aufgenommenen Kantischen Termini. Es reicht von »a priori/a posteriori« und »Abendmahl« über »Kamel« und »Kausalität« oder »Tiere, grausame Behandlung der« und »transzendental« bis zu »Zärtlichkeit« und »Zyniker/Zynismus«. Bei Kant taucht das Kamel tatsächlich in den geschichtsphilosophischen Schriften der 1780er Jahre auf und hat philosophische Relevanz. »Kamele als die Schiffe der Wüste«, so Willaschek, »erlauben Handel und Kommunikation über unbewohnbare Teile der Erde hinweg und ermöglichen so die Ausbreitung der Menschen über die ganze Erde – was für Kant zeigt, wie die Natur bestimmte historische Prozesse begünstigt.«

Auf meine Frage, ob und wie sich durch die 15-jährige Arbeit am Kant-Lexikon sein Verhältnis zu Kant verändert habe, erhielt ich eine emphatische Antwort. Durch diese Arbeit und die Lektüre der vielen Artikel habe er viele Bereiche von Kants Philosophie erst richtig kennengelernt. In der Tat dürften wohl außer bei Aristoteles bei keinem Philosophen so wie bei Kant natur- und humanwissenschaftliche Kompetenz zusammenkommen. Doch bemerkenswerter als die Breite dessen, was Kant im Blick hatte, ist für Willaschek etwas anderes. »Wenn man jetzt die vielen Artikel nebeneinander sieht, ist man erschlagen davon, zu was allem Kant sich mit welcher Genauigkeit und welchem Ernst der Auseinandersetzung geäußert hat. Die Breite ist das eine. Aber bei Kant kommt noch etwas hinzu: Tiefe. Mit einer atemberaubenden Konsequenz hat er die Dinge zu Ende gedacht. Wenn er einmal ein Problem gesehen hat, hat er nicht aufgehört, bis er sozusagen bei den absoluten Grundlagen angekommen ist und daraus eine Lösung für das betreffende Problem entwickeln konnte.«

Besser könnte man nicht gleichzeitig für Kant und für das neue Kant-Lexikon werben als mit dieser Erfahrung des Herausgebers. Wie speziell auch sein mag, weswegen jemand im neuen Kant-Lexikon nachschlägt, er wird stets durch überraschende Nachbarschaften darauf gestoßen werden, dass Breite und Tiefe zusammengehören, wenn es ums Philosophieren geht und nicht bloß um philosophisches Wissen. ●

Der Rezensent

Dr. Rolf Wiggershaus, 70, ist Philosoph und Publizist. Er studierte Philosophie, Soziologie und Germanistik in Tübingen und Frankfurt. Neben der »Frankfurter Schule« und der »Kritischen Theorie« gehört zu den Schwerpunkten seiner Tätigkeit stets das Verhältnis von Natur und Gesellschaft.

wiggersh.r@t-online.de

Die Magie des Alltäglichen

Wolfgang Schivelbuschs »Lichtblicke«
eröffnet eine überraschende Sicht auf
eine der alltäglichsten Handlungen

von Marthe Lisson

Zu einer unserer alltäglichsten Handlungen zählt das An- und Ausmachen des Lichts. Schalter drücken, umlegen oder drehen: Das Licht geht an oder aus. Kaum jemand macht sich wahrscheinlich Gedanken darüber, was in diesem Moment technisch vor sich geht oder welche Licht-geschichtlichen Entwicklungen hinter uns liegen, seien sie technischer, gesellschaftlich-sozialer, politischer oder ästhetischer Natur. Ja, die Geschichte des Lichts ist komplex. In der Schule lernen wir Geschichte rund um Politik, um Kriege und Revolutionen, nichts aber über die Geschichte des elektrischen Lichts. Schade eigentlich, denn es gibt so viele spannende Verknüpfungen.

So entstand Mitte des 17. Jahrhunderts in Frankreich die erste öffentliche Beleuchtung – eine weitere Maßnahme des absolutistischen Staates, nun auch die Straßen unter seine Kontrolle zu bringen. Selbst die Aufhängung der Laternen war ein Politikum – sie wurden an einem quer über die Straße gespannten Seil aufgehängt. Genau in der Mitte, wie eine kleine Sonne, »Révérance au Roi du Soleil!« Die Straßenlaternen repräsentierten, was heute Überwachungskameras an öffentlichen Orten darstellen: die Omnipräsenz der Staatsgewalt. Wo Licht ist, gibt es keine Geheimnisse. Vor diesem Hintergrund ist es nicht verwunderlich, dass die Pariser Straßenlaternen von Anfang an Ziel von Angriffen waren. Wer die Staatsgewalt »auslöschen« wollte, machte dies symbolisch, aber sehr konkret: Er schoss die Laternen aus. Entsprechend hart wurden solche Taten bestraft: mit einer Versetzung auf die Galeeren.

Dies ist nur ein kleiner Ausschnitt aus der Geschichte der künstlichen Beleuchtung und auch nur eine kleine Episode aus Wolfgang Schivelbuschs Buch *Lichtblicke. Zur Geschichte der künstlichen Helligkeit im 19. Jahrhundert*. Das Sachbuch liest sich wie ein Roman, denn selten (wenn überhaupt jemals zuvor) wurde die Magie des künstlichen Lichts so spannend und allumfassend dargestellt. Der Kulturhistoriker Schivelbusch, der in den 1960er Jahren an der Goethe-Universität Literaturwissenschaft, Soziologie und Philosophie studiert hat, ist für seine eigenwilligen Themen bekannt und legte

bereits die Geschichte der Eisenbahnreise und der Genussmittel vor. In *Lichtblicke* erklärt er nun nicht nur die technische und ökonomische Entwicklung der Beleuchtung von der Kerze über die Öl- und Gaslampe zur elektrischen Glühlampe, sondern setzt diese auch in ihre gesellschaftspolitischen Kontexte. Mit zahlreichen Zitaten vermittelt er uns ein Bild der sich ändernden Lichtwahrnehmung sowie der psychologischen und sozialen Begleiterscheinungen, die mit diesem technischen Fortschritt verbunden sind.

Er beschreibt das Aufkommen des nächtlichen Vergnügens und das Flanieren über die Boulevards mit Blick in die erhellten Schaufenster, das erst durch die Elektrizität möglich war. Ein anderes Beispiel für gesellschaftlichen Wandel ist der Einzug der Glühlampe in die Privatwohnung: Hatte man sich ursprünglich nach Feierabend um das Kamin- oder Herdfeuer, die Kerze oder Petroleumlampe versammelt, um zu reden, zu lesen, Handarbeiten zu fertigen oder einfach nur zu sinnieren, war das mit der Glühbirne passé. Offenbar konnte die elektrische Birne das Bedürfnis nach Nähe und Wärme, das von der offenen Flamme ausging, nicht bedienen. Und erst das Grammophon, dann das Radio und viel später der Fernseher ersetzten das Herdfeuer, um das man sich in der Familie versammelte.

Auch bei der allmählichen Trennung der privaten und der öffentlichen Sphäre im 19. Jahrhundert spielte das Licht eine gewichtige Rolle. Um den Blick von außen in die Wohnung zu verhindern, wurden beispielsweise zunehmend Gardinen aufgehängt. Der Anschluss des einzelnen Haushaltes an das zentrale elektrische Versorgungssystem wurde zudem als Angriff auf den zuvor autarken Haushalt gesehen, die langen Finger der Industrialisierung wollte man nicht im eigenen Haus haben. Vermeiden ließ sich das jedoch kaum und so fing man an, die Glühbirnen zu verhüllen. Auch deswegen, um das gedämpfte Licht einer Kerze zu imitieren. Der Lampenschirm war erfunden.

Die Lektüre von Schivelbuschs essayistischem Band regt uns zum Innehalten, zum Genießen und Hinterfragen unserer alltäglichsten Handlungen an, die dadurch regelrecht mit einem Zauber belegt werden. Vielleicht aber auch mit profaner Erleichterung: Sei es, dass wir die Kerzen nicht mehr »putzen« müssen (also regelmäßig den Docht kürzen, damit sie besser brennen) oder die Gaslampen unsere Inneneinrichtung nicht mit Ruß überziehen. ●



Wolfgang Schivelbusch

**Lichtblicke. Zur
Geschichte der künstlichen
Helligkeit im
19. Jahrhundert**

1983, Carl Hanser Verlag,
2004 S. Fischer Verlag,
ISBN 978-3-596-16180-5
256 Seiten, 12,90 Euro.

Die Rezensentin

Marthe Lisson, 28,
hat Musikwissenschaft,
Anglistik und Kunst-
geschichte an der Goethe-
Universität studiert und
arbeitet dort in der
Abteilung Marketing und
Kommunikation. Sie
arbeitet zudem als freie
Autorin unter anderem für
die SCHIRN Kunsthalle.

marthelisson@gmx.de

Zum Nachdenken und Mitmachen im Geist der Aufklärung

Geiers Buch lebt von dramatischen
Geschichten von Menschen und Büchern

von Rolf Wiggershaus



Manfred Geier

Aufklärung. Das Europäische Projekt

Reinbek bei Hamburg
2012, Rowohlt Verlag,
ISBN 978-3-49-802518-2,
24,95 Euro, Taschenbuch-
ausgabe 2013,
ISBN 978-3-499-62746-0,
415 Seiten, 12,99 Euro.

An Büchern über die Aufklärung und die so benannte Epoche der europäischen Geschichte besteht kein Mangel. Unter ihnen sticht das zuerst 2012 erschienene Buch des Literaturwissenschaftlers und Publizisten Manfred Geier durch die Absicht hervor, »durch dramatische Geschichten von Menschen und Büchern« einzuladen »zum Nachdenken und Mitmachen im Geist der Aufklärung«. Sieben ausgewählte Lebens- und Werkgeschichten sollen den Begriff »Aufklärung« mit Inhalt füllen und besser, als ein bloßer Rückgriff in die Philosophie-Geschichte das könnte, für »die Werte der Aufklärung« werben.

Lockes Essay – »Ein Kerzenlicht in der Dunkelheit«

Es ist plausibel, mit John Locke zu beginnen. »Ein Kerzenlicht in der Dunkelheit« lautet die Überschrift des ihm gewidmeten Kapitels. Sie ist durch die Metaphorik in Lockes Hauptwerk, dem 1689 erschienenen *Essay Concerning Human Understanding*, angeregt. 1666 war Locke 34-jährig Privatsekretär und Berater, Hausarzt und Erzieher bei dem englischen Politiker Anthony Ashley Cooper geworden. Der hatte zunächst Oliver Cromwell gedient, darauf Karl II. und wurde 1672 First Earl of Shaftesbury. Doch dann übernahm er die Führung der Parlamentsopposition, wurde verhaftet und des Hochverrats angeklagt. 1683 starb er im holländischen Exil. Das war der konflikt- und krisenreiche Kontext, in dem Lockes epochenmachende Schriften über religiöse Toleranz, politische Regierungsgewalt und menschliche Verstandestätigkeit entstanden. Sie erschienen 1689 – ein Jahr, nachdem er selber im Gefolge Wilhelms III. von Oranien und der Glorreichen Revolution aus fünfeinhalbjährigem holländischen Exil zurückgekehrt war.

Mit dem *Essay Concerning Human Understanding* begründete Locke die Erkenntnistheorie als Ausgangspunkt neuzeitlichen Philosophierens. Gespräche im Freundeskreis über Moral und Religion, so schilderte er die Vorge-

schichte, seien an einen toten Punkt gelangt. Das habe ihn auf die Idee gebracht, vor der Beschäftigung mit Fragen, in deren Untersuchung sich der Mensch besonders gern vertiefe, zu prüfen, wozu der menschliche Verstand tauglich sei und wozu nicht. Wir gebrauchten unseren Verstand dann richtig, wenn wir alle Objekte in der Weise und in dem Maße betrachteten, wie es unseren Fähigkeiten entspreche, und nicht Gewissheit forderten, wo nur Wahrscheinlichkeit zu erlangen sei, die ausreiche, um unsere Angelegenheiten zu besorgen. »Die Leuchte, die in uns entzündet ist, strahlt für unsere Zwecke hell genug.« Der sei »ein träger und eigensinniger Diener«, der nicht bereit sei, seine Arbeit »bei Kerzenlicht« zu verrichten, und sich damit rechtfertige, dass er für seine Tätigkeit »hellen Sonnenschein« brauche. Erleuchtung ohne Untersuchung gebe es nur für Schwärmer, die meinten, ihnen scheine das helle Licht der Sonne, während sie in Wirklichkeit Dunkel umgebe. Lockes Vergleich des menschlichen Verstandes mit dem Kerzenlicht zeugt, anders als Geiers Überschrift nahelegt, nicht vom Verlangen nach mehr Helligkeit, sondern von einer Selbstbescheidung und Selbstvertrauen verbindenden Selbsteinschätzung. Man kann in diesem frühen Aufklärer einen aufgeklärten Aufklärer sehen.

Die Überschrift des nächsten Kapitels greift die Lichtmetapher wieder auf. »Die Wahrheit kann jedes Licht vertragen« ist dem von Locke erzogenen Third Earl of Shaftesbury gewidmet. Er sah Sittlichkeit unabhängig von der Religion in einem zur Natur des Menschen gehörenden *moral sense* begründet. Seine kritische Überprüfung von Glaubensfragen mit den Mitteln des Witzes und der Ironie zielte auf die Unterscheidung zwischen wahrem Ernst und starrem Fanatismus. Doch das hatte bestimmte Bedingungen zur Voraussetzung. Nur in einer »Kultur der geselligen Freundschaft und geistigen Freiheit«, so resümiert Geier Shaftesburys Philosophie, »können Witz und Humor zu jenem erhellenden Licht werden, in dem man alle Dinge ansehen sollte, um sie von verschiedenen Seiten aus erkennen zu können.«

Kampf des guten Lichts gegen lichtscheue Schlechtigkeit

In den weiteren Kapiteln geht es um die französischen Enzyklopädisten, um Moses Mendelssohn, Immanuel Kant, Olympe de Gouges und Wilhelm von Humboldt. Dabei wird die Licht-Metaphorik nicht für eine differenzierte Sicht unterschiedlicher aufklärerischer Positionen genutzt, sondern steht nur noch konventionell für den Kampf des guten Lichts gegen lichtscheue Schlechtigkeit. Das passt ohne Weiteres zum Beispiel Voltaire. Der kam aus dreijährigem

englischen Exil zurück – begeistert von den Ideen Bacons, Lockes und Newtons und englischem Liberalismus. Seine 1734 erschienenen *Lettres philosophiques* über die englische Nation wurden als Angriff auf die in Frankreich herrschende Religion, Staatsordnung und philosophische Tradition verstanden, verurteilt und öffentlich zerfetzt und verbrannt. Gegen den Autor wurde ein Haftbefehl erlassen. Noch dem Projekt der *Encyclopédie*, das auf der Überzeugung gründete, dass alle menschlichen Erkenntnisse auf sinnlichen Erfahrungen basierten und Gott, Offenbarung und Theologie nicht die entscheidende Rolle spielten, ging es Jahrzehnte später ähnlich. Nach dem Erscheinen von sieben Bänden wurde 1759 die Fortführung mit der Begründung verboten, die Vorteile für Künste und Wissenschaften könnten »den irreparablen Schaden für Glauben und Wissenschaften niemals aufwiegen«.

Die überzeugendsten Beispiele für Geiers Verfahren sind wegen des dramatischen Zusammenhangs von Leben und Werk die Kapitel über Moses Mendelssohn und Olympe de Gouges. Mendelssohn, der große Initiator der jüdischen Aufklärung, der sich für die Trennung von Staat und Religion einsetzte und die Vernunftreligiosität der Aufklärung verteidigte, sah sich von den Bekehrungsversuchen des Schweizer Theologen Johann Kaspar Lavater und des Philosophen und Schriftstellers Friedrich Heinrich Jacobi bedrängt. Sie verlangten von dem, der auf der erhellenden Kraft der Vernunft auch in religiösen Dingen beharrte, das Christentum zu widerlegen, andernfalls ohne Beharren auf Vernunftgründen Christ zu werden.

Die Grenzen der Aufklärung erfuhr auf noch drastischere Weise Olympe de Gouges, die uneheliche Tochter eines Adligen. Dank ihres gesellschaftlichen Erfolgs als schöne und intelligente *Femme galante* gelang es ihr, nachdem sie zur Schriftstellerin geworden war, dass die Pariser *Comédie Française* ein Stück von ihr annahm. Es handelte von zwei entlaufenen Sklaven. Ein Schwarzer wird unschuldig schuldig, indem er einen Weißen tötet, der seine Geliebte entführen will. Am Ende können die beiden Entflohenen als freie Menschen ein Paar werden. Jahrelang kämpfte die Autorin vergeblich um die Aufführung des Stücks, das eine Provokation für ein Theaterpublikum bedeutete, das seinen Reichtum zu einem wesentlichen Teil Kolonien und Sklaven verdankte. Nach der Revolution kam es endlich zur Aufführung, doch bezahlte Krawallmacher und eine frauenfeindliche Presse erreichten, dass es gleich wieder abgesetzt wurde. Olympe de Gouges' Kampf für die Rechte der Frauen und für einen Volksentscheid über die künftige Regierungsform endete im November 1793 mit ihrer Hinrichtung

durch die Guillotine. Sie wurde ein Opfer von Robespierres Terrorherrschaft.

Und was ist mit dem Dunkel selbstzerstörerischer Prozesse?

Geier erwähnt Olympe de Gouges' Befürchtung, die Revolution beginne ihre eigenen Kinder zu fressen. Doch sein Bild der Aufklärung bleibt davon unberührt. Von einer »Dialektik der Aufklärung«, von entgleisenden, gar selbstzerstörerischen Prozessen mag er nichts wissen. Das macht sein Buch eindimensional, unterkomplex. Dabei drängt die Entwicklung künstlicher Lichtquellen und künstlicher Beleuchtung seit Lockes Kerzen-Vergleich sich geradezu auf für eine erhellende Fortsetzung der Lichtmetaphorik. Sind die Lichtverhältnisse für Menschen verfügbar und technisch optimierbar geworden, wird der biblische Traum vom himmlischen Jerusalem, in dem es keine Nacht mehr geben werde und Lampe wie Sonne überflüssig würden, weil der Herr über allen leuchte, zum irdischen Alptraum. Die Romantik reagierte damals mit Hymnen an die Nacht (Novalis). Heute wird in großem Stil über den »Verlust der Nacht« geforscht. Die Untersuchung der Ursachen und Wirkungen zunehmender Nachtbeleuchtung zielt auf die Entwicklung »intelligenter Beleuchtungskonzepte und nachhaltiger Techniken«. Um dergleichen kritisch zu diskutieren, ist mehr nötig als ein Werben für die Werte der Aufklärung, nämlich die Verbreitung des Bewusstseins für die »Dialektik der Aufklärung«, das bei Selbstdenkenden immer schon zur Aufklärung gehörte. ●

Der Rezensent

Dr. Rolf Wiggershaus
(siehe Seite 118)

Die Physik des Lichts

Ralf Bönt erzählt die Geschichte
des Physikers Michael Faraday

von Marthe Lisson

Die Bücher von Wolfgang Schivelbusch und Ralf Bönt ergänzen sich wunderbar. Während Schivelbusch in *Lichtblicke* primär die gesellschaftliche Geschichte des Lichts beleuchtet, erzählt Bönt vom Ringen um den Fortschritt und der Sehnsucht nach neuen Erkenntnissen über das Licht.

Ralf Bönt erzählt in seinem Roman *Die Entdeckung des Lichts* die Geschichte des englischen Naturforschers und Experimentalphysikers Michael Faraday, dessen Namen wahrscheinlich viele nur in Verbindung mit Blitzschlägen kennen beziehungsweise dem Schutz vor diesen. Autos, Flugzeuge oder Häuser aus Stahlbeton sind Faraday'sche Käfige, »eine metallene Umhüllung zur Abschirmung eines begrenzten Raumes gegen äußere elektrische Felder« – so der Duden.

Der Roman erzählt nicht einfach nur die Lebensgeschichte Faradays, sondern präsentiert diese als ermutigende englische Version des amerikanischen Traums im 19. Jahrhundert: Faraday (1791–1867) kam aus kleinen Verhältnissen und stieg in die wissenschaftliche Society auf. Er war ein ungemein wissensdurstiger Mensch, der sich mit Leidenschaft der Naturwissenschaft verschrieben hatte, dem Fragen keine Ruhe ließen, bis er eine Lösung gefunden hatte, und dem das Schicksal doch auch sehr zugetan war. Als Sohn eines Schmieds besuchte er eine einfache Tagesschule und fand dann eine Anstellung als Laufbursche bei dem Buchbinder George Ribeau. Er trug dessen Tageszeitungen aus und begann, sie regelmäßig zu lesen. Bei Ribeau ging er dann in die Lehre als Buchbinder. Und wieder las er aufmerksam die Bücher, die zum Binden gebracht wurden: Jane Marcets *Conversations on Chemistry*, Beiträge für die *Encyclopedia Britannica* oder Isaac Watts' Buch *The Improvement of the Mind* von 1741. Watts spricht besonders die Leser an, die ihr Wissen und ihre geistigen Fähigkeiten eigenständig erweitern wollen. Er empfiehlt ihnen, sich Notizen von Artikeln zu machen, Mitschriften von Vorträgen anzufertigen oder den Gedankenaustausch mit Gleichgesinnten zu suchen.

Gesagt. Getan. 1809 begann Faraday mit Notizen über Artikel zu Themen aus Wissenschaft und Kunst. Er schrieb in seinem Leben

ungeheuer viel –, und so ist es nicht verwunderlich, dass sein schriftlicher Nachlass einer der umfangreichsten ist, den ein Naturwissenschaftler hinterlassen hat: Labor-Tagebücher zu seinen weit über 30.000 Experimenten, seine Tagebücher, Notizen, Manuskripte, Briefe und Bücher.

Sein Ausbilder Ribeau legte ihm nahe, Vorträge des Goldschmieds John Tatum zu besuchen. Tatum war der Gründer der *City Philosophical Society*, die es sich zur Aufgabe gemacht hatte, Handwerkern und Lehrlingen Zugänge zur Wissenschaft zu eröffnen. Die Vorträge steigerten erneut Faradays Selbstbewusstsein und Motivation, sich ausschließlich der Naturwissenschaft zu widmen. Er wurde Assistent des Chemikers Humphry Davy an der *Royal Institution*, bis er später selbst einen Assistenten beschäftigte und seine 1825 gegründeten öffentlichen Weihnachtsvorträge an *Royal Institution* die Säle füllten.

Ralf Bönts Roman ist kein Wissenschaftlerroman im Stil von *Die Vermessung der Welt*. Während es Daniel Kehlmann nicht so sehr um Fakten geht und sein Roman viel mehr eine Charakterstudie ist, die von der Gegenüberstellung des quirligen Alexander Humboldt und des murrenden Carl Friedrich Gauß lebt, zeichnet sich Bönts Roman durch historische Genauigkeit und detaillierte Beschreibungen der Experimente aus. Kein Wunder! Der Autor ist selbst Physiker. Die Beschreibungen der Experimente werden dem Leser mundgerecht serviert und doch fehlt dem sonst naturwissenschaftlich Unbedarften hier und da eine eindeutige Formulierung à la »die Erkenntnis des nach ihm benannten Faraday'schen Käfigs war gewonnen«. Auch an anderer Stelle erfordert die Lektüre einiges Hintergrundwissen. Kommentare zur Geschichte, sei es zur Französischen Revolution, zu Admiral Nelson oder Alexander von Humboldt werden beiläufig eingestreut. Man könnte sie fast überlesen. Wenn auch vom Autor bewusst so gewählt, sind es doch auch diese Details zum zeitgeschichtlichen Rahmen, die das Bild einer Geschichte abrunden.

Ähnlich beiläufig wirken die Kapitel im hinteren Teil des Buches, die nicht Faraday, sondern Albert Einstein gewidmet sind. Die Erzählung springt ins München des späten 19. Jahrhunderts: Familie Einstein, Albert noch ein Kind, sein Vater und Onkel wollen Schwabing als erste deutsche Stadt zum Leuchten bringen – mit elektrischen Straßenlaternen. Doch diese Kapitel wirken, als gehörten sie einem anderen Roman. Sicher, auch Einstein war vom Licht fasziniert, doch seine Lebensgeschichte ist so spannend und umfangreich, um sie nur in ein paar Kapiteln anzudeuten. ●



Ralf Bönt

Die Entdeckung des Lichts

2009, DuMont Buchverlag,
ISBN 978-3-8321-9517-5,
352 Seiten, 19,95 Euro.

Die Rezensentin

Marthe Lisson
(siehe Seite 119)

Vom Übermaß an Licht

Der Japaner Tanizaki über unterschiedliche
Wahrnehmungen in Ost und West

von Rolf Wiggershaus

Lob des Schattens ist der erzählerisch angelegte Essay eines der produktivsten und erfolgreichsten japanischen Romanciers des 20. Jahrhunderts. Er erschien 1933 in der Zeitschrift *Keizai-ōrai* (*Wirtschaftsbeziehungen*). Der deutschsprachigen Ausgabe hinzugefügte Untertitel *Entwurf einer japanischen Ästhetik* könnte leicht falsche Erwartungen wecken. Es geht nicht um ein ästhetisches System, sondern um etwas Profaneres und Fundamentaleres.

Japan wurde Mitte des 19. Jahrhunderts gezwungen, sich für die militärisch und technisch überlegene westliche Zivilisation zu öffnen. Ohne solche Einmischung von außen wäre es in Japan vielleicht zu einer eigenständigen Entwicklung zivilisatorischer Errungenschaften gekommen, die gerade auch bei Dingen des täglichen Lebens wie Beleuchtung, Heizung und Klosetts »wirklich mit unseren Bedürfnissen übereinstimmen«. Einer solchen Fantasie geht Tanizaki (1886–1965) nicht weiter nach. Worum es ihm geht, ist: Bedürfnisse und Genüsse, Sensibilitäten und Wertschätzungen bewusst zu machen und zu würdigen, die in der bisherigen japanischen, chinesischen oder überhaupt ostasiatischen Tradition Entfaltungsmöglichkeiten und Ausdrucksformen fanden, und die aufzugeben und zu ignorieren die Welt ärmer machen würde.

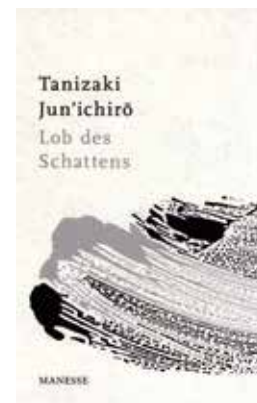
Weißes Papier ist eines der Beispiele, an denen Tanizaki seine Beobachtungen, Erfahrungen und Reflexionen darlegt. Westliches Papier, so erlebte er es, wirft die Lichtstrahlen zurück, japanisches oder chinesisches Papier dagegen saugt sie auf. Es fühlt sich zudem geschmeidig an und lässt sich geräuschlos falten. Verallgemeinernd spricht er vom Unterschied zwischen einem »seichten, hellen Glanz« und einem »vertieften, umwölkten Schimmern«. Und dies noch weiter pointierend gelangt er zu der Gegenüberstellung zweier Haltungen: einerseits »Abendländer«, die »den Schmutz radikal aufzudecken und zu entfernen trachten«, andererseits »Ostasiaten«, die »Dinge mit Spuren von Menschenhänden, Lampenruß, Wind und Regen lieben oder auch daran erinnernde Farbtonungen und Lichtwirkungen«.

Welche Beispiele Tanizaki auch immer für die unterschiedlichen Wahrnehmungsweisen, Wertschätzungen und Praktiken in Ost und West anführt, sein Lob des Schattens zielt nicht auf eine

Abwertung des Lichts, sondern gerade auf dessen bewusste und sensible Wahrnehmung und Nutzung. Das demonstriert er zum einen an nostalgisch wirkenden Eindrücken. Die Schönheit japanischer Lackarbeiten etwa, bemerkte er in einer Zeit sich wandelnder Interieurs von Restaurants, kommt erst dann richtig zur Geltung, wenn sie nicht von modernem elektrischem Licht beschienen werden, sondern von unbestimmtem Dämmerlicht. Goldene Schiebe- und Wandtüren in Tempeln und Häusern sind mehr als Prunk. Anders als Silber und andere Metalle bewahrt Gold sehr lange seine Leuchtkraft. In lichtarmen Räumen nimmt es aus der Ferne hereindringende Helligkeit auf und reflektiert sie. So ergibt sich eine Lichtkonzentration von besonderer Schönheit.

Ein Übermaß an Licht führt dagegen zu dessen Entwertung. In dieser Hinsicht wirken die Beobachtungen, Erfahrungen und Reflexionen Tanizakis besonders aktuell. Wir hätten, meinte er vor vielen Jahrzehnten, in erstaunlichem Maße den Sinn für die Absurdität mancher Entwicklungen verloren, zu denen die expansive Verfügung über künstliche Lichtquellen führe. Wenn es am hellen Tag draußen kühl, in Versammlungsräumen, Hotels, Restaurants aber heiß sei, liege das meist an überflüssiger Beleuchtung. Das Absurdeste sei, »unnötig viele Lichter anzuzünden und dann unter dem Vorwand, es sei heiß, den Ventilator einzuschalten«. Mit dem Ende der Glühlampe mögen weitaus mehr Wärme als Helligkeit erzeugende künstliche Lichtquellen als Treiber für künstliche Kühlung wegfallen. Die Expansion künstlichen Lichts dürfte es nur steigern. Man kann heute verallgemeinern, was Tanizaki seinerzeit hinsichtlich der Innenbeleuchtung diagnostizierte: »Wie auch immer, es geht bei der heutigen Innenbeleuchtung nicht mehr darum, das Lesen, das Schreiben oder das Nähen zu ermöglichen, sondern sie wird dazu vergeudet, die Schatten aus sämtlichen Ecken zu vertreiben – was von einer Geisteshaltung zeugt, die sich jedenfalls nicht mit den Schönheitsvorstellungen der japanischen Architektur verträgt.«

Tanizaki gilt in der japanischen Literaturgeschichte als »Traditionalist« und »Ästhetizist«. Dieser Ästhetizismus ist ein anderer als der westliche. Er zeugt von einer Hochschätzung des nicht völlig Perfekten, nicht unerbittlich Konsequenzen. In Mythen und Märchen bedeutet der Verlust des Schattens den Verlust der Seele. Tanizakis Essay macht bewusst, dass Licht nur in dem Maße Leben, Denken und Wohlgefühl fördert, wie es nicht auf Schattenlosigkeit zielt. Dass das im Titel *Lob des Schattens* unverkennbar mitschwingt, erklärt vielleicht, wieso dieser Essay, obwohl er seit seinem Erscheinen auf Deutsch 1987 im Manesse Verlag offenbar ohne angemessene Würdigung durch Rezensionen blieb, inzwischen weit über 100.000-mal gekauft wurde. ●



Tanizaki Jun'ichirō

**Lob des Schattens.
Entwurf einer
japanischen Ästhetik**

Aus dem Japanischen
übersetzt und
kommentiert von
Eduard Klopfenstein,
Zürich 2010,
Manesse Verlag,
ISBN 978-3-7175-4082-3,
96 Seiten, 14,95 Euro.

Der Rezensent

Dr. Rolf Wiggershaus
(siehe Seite 118)

Goethes Farbenlehre reloaded

Der Dichter als explorativer Experimentator

von Anne Hardy

Hofrat Büttner war ungehalten. Schon mehrfach hatte er Goethe schriftlich um die Rückgabe seiner Prismen gebeten. Der frisch aus Italien zurückgekehrte Geheimrat wollte in seiner neuen Wohnung am Frauenplan Newtons Versuche zur spektralen Zerlegung des Lichts wiederholen. Doch er war zu beschäftigt gewesen, um den dafür vorgesehenen langen schmalen Raum herzurichten: die Wände in Schwarz auszuschlagen und in den wohlverschlossenen Fensterladen ein Loch zu bohren, das nur einen feinen Lichtstrahl einließ.

Jetzt stand ein Bote vor der Tür, und Goethe wollte nur noch einen schnellen Blick durch die Prismen werfen, bevor er diese aushändigte. Er befand sich in einem völlig geweißten Zimmer. Aber, anders als erwartet, sah er beim Blick durch das Prisma keine Regenbogenfarben auf der Wand. 20 Jahre zuvor hatte er während seines Studiums in Leipzig Physikvorlesungen besucht und von Newtons *Experimentum Crucis* zur spektralen Zerlegung des weißen Lichts gehört. Gesehen hatte er es nicht, vermutlich, weil der Dozent es wegen des trüben Wetters auf einen anderen Tag verschoben hatte.

Nun blickte er enttäuscht auf die weiße Wand. Farben sah er lediglich an den Rändern der Fensterstäbe. Der benachbarte Physiker, den er später zurate zog, hätte ihm das Fehlschlagen seines Versuches leicht erklären können: Die farbige Aufspaltung des Lichts sieht man nur, wenn ein dünner Strahl durch eine Lochblende in einem ansonsten dunklen Raum auf das Prisma fällt. In einem hellen Raum tritt dieser Effekt zwar auch auf, aber man sieht ihn nicht, weil sich die Spektren vieler parallel einfallender Strahlen überlagern und wieder als weißes Licht wahrgenommen werden. Dass Goethe Farbaufspaltungen nur am Fensterkreuz sah, liegt daran, dass diese einen Teil der farbigen

Lichtbündel aus dem weißen Licht wegnehmen. Deshalb erscheint der Übergang von Helligkeit zu Schatten farbig.

Die Finsternis in Farben auflösen – Goethe entdeckt Komplementarität

»Es bedurfte keiner langen Überlegung, so erkannte ich, dass eine Grenze notwendig sei, um Farben hervorzubringen«, folgerte der Dichter richtig, zog aber den falschen Schluss, »daß die Newtonische Lehre falsch sei«. So berichtete er zehn Jahre später in der »Konfession des Verfassers«, die dem historischen Teil seiner dreibändigen Farbenlehre von 1810 vorangestellt ist. Unmöglich, die Prismen jetzt zurückzugeben. Goethe begann ausgiebig zu experimentieren. Bald ersetzte er die Newton'sche Versuchsanordnung durch eine weiße Scheibe auf schwarzem Grund.

Mit dieser Anordnung sah er ebenfalls das Spektrum der Lochblende, wenn er aus einer bestimmten Entfernung durch ein Prisma schaute. Auch dies lässt sich durch die Brechung in der Nähe von Grenzflächen erklären: Weiße Oberflächen reflektieren alle farbigen Lichtwellen, während schwarze sie vollständig absorbieren. So kann an der Grenze zwischen Schwarz und Weiß eine spektrale Auffächerung auftreten. Goethe ging aber noch einen Schritt weiter und kehrte die Farben um: Auch ein schwarzer Kreis auf weißem Grund erzeugte Farberscheinungen, woraus er schloss: »so müßte ja hier auch die Finsternis als in Farben aufgelöst angesehen werden«. Anders ausgedrückt: Es muss in optischen Experimenten prinzipiell möglich sein, Hell und Dunkel zu vertauschen.

Diese These ist zuerst 1970 von dem norwegischen Physiker Torger Holtsmark aufgegriffen worden (Holtsmark 1970). Sein theoretisches Konzept zur Invertierung von Newtons *Experi-*

mentum Crucis hat sein Mitarbeiter Pehr Sällström 2010 experimentell umgesetzt. Im Prinzip geht es darum, die spektrale Aufspaltung des Lichts an einem Spalt mit derjenigen an einem Steg zu vergleichen. Tatsächlich tritt dabei das Phänomen der »Farbe und ihrer Gegenfarbe« auf, das Goethe seinerzeit bereits beschrieben hatte.

Farbige Schatten und Nachbilder

Goethe war mit seiner Entdeckung hochzufrieden, »denn sie schien sich an manches bisher von mir Erfahrene und Geglaubte anzuschließen.« Die zueinander komplementären Farbstreifen erinnerten den Dichter an das Phänomen farbiger Schatten, das er 1777 auf einer Winterreise durch den Harz beobachtet hatte. Tagsüber hatte er vom Fenster seiner Kutsche aus violette Schatten auf dem gelblichen Schnee gesehen. Diese wandelten sich bei Sonnenuntergang, welcher »die mich umgebende Welt mit schönstem Purpur überzog«, in die Schattenfarbe Grün.

Das Phänomen farbiger Schatten ist verwandt mit demjenigen der Nachbilder farbiger Objekte. Sie leuchten in der Gegenfarbe, sobald das Auge sich abwendet und auf einer weißen Fläche ruht. »Um in der Kürze zu bemerken, welche Farben denn eigentlich durch diesen Gegensatz hervorgerufen werden, bediene man sich des illuminierten Farbenkreises unserer Tafeln«, empfiehlt der Dichter im didaktischen Teil seiner Farbenlehre. Der Kreis sei so eingerichtet, dass die zusammengehörenden Farben einander jeweils gegenüberliegen. »So fordert Gelb das Violette, Orange das Blaue, Purpur das Grüne, und umgekehrt. So fordern sich alle Abstufungen wechselweise, die einfachere Farbe fordert die zusammengesetztere, und umgekehrt.« Auch im »Faust« hat der Dichter das Phänomen später beschrieben: Als Feuerschweif, der dem verschwindenden Pudel zu folgen scheint. Goethe entdeckte und erforschte damit erstmals Effekte, die durch die Verarbeitung von Farbwahrnehmungen im Gehirn entstehen. Er ist deshalb auch als Wegbereiter der gestaltpsychologischen Schule bezeichnet worden. (Sarris 1999)

Doch zu dem Zeitpunkt, als der Dichter zu experimentieren begann, »stand alles dieses mir ohne Zusammenhang vor der Seele [...] Da ich in solchen Dingen gar keine Erfahrung hatte und mir kein Weg bekannt war, auf dem ich hätte sicher fortwandeln können; so ersuchte ich einen benachbarten Physiker, die Resultate dieser Vorrichtung zu prüfen.« Dieser versicherte ihm, »daß die Phänomene bekannt und aus der Newtonischen Theorie vollkommen erklärt seien«. Doch der Dichter ließ sich nicht beirren. Bereits ein Jahr später, 1791, publizierte er den ersten Teil seiner »Beiträge zur Optik«. 1792 folgte der zweite Teil.

Abseits der zeitgenössischen Optik

Die skeptische Reaktion der Fachwelt erklärte sich Goethe durch die »Beschränktheit der wissenschaftlichen Gilden«, die sich gegen Neuerungen wehrten. Dabei war ihm bewusst, dass zu seiner Zeit »die Optik zum größten Teil mathematisch« war. Durch die Opposition gegen Newton »regte ich die ganze Schule gegen mich auf und nun verwunderte man sich erst höflich, wie jemand, ohne höhere Einsicht in die Mathematik, wagen könne, Newton zu widersprechen«. So blieb ihm als Diskussionspartner lediglich der Freund Schiller. Bestätigung suchte er auch in den Schriften der Naturforscher des 17. und 18. Jahrhunderts, deren Ideen er im historischen Teil seiner Farbenlehre zusammenfasste – von Edme Mariotte bis Joseph Priestley und Benjamin Franklin. Nach Schillers Tod im Jahr 1805 fand der Dichter eine neue Zuhörerschaft in der »Mittwochsgesellschaft«, einem Kreis illustrierter Damen am Weimarer Hof, die er mit seinen Vorträgen unterhielt.

Von der Publikation seiner Farbenlehre im Jahr 1810 erwartete sich Goethe trotz der enttäuschenden Erfahrung mit seinen 20 Jahre zuvor publizierten »Beiträgen zur Optik« »mancherlei Revolutionen sowohl in der Naturlehre als in der Kunst«. Doch reagierten die meisten Zeitgenossen bestenfalls mit Achselzucken, wenn nicht mit Spott. Die Korrespondenz mit dem Naturforscher Georg Christoph Lichtenberg schief bald ein und Goethe merkte, dass die Fachwelt »stolz-mitleidig« auf ihn herabsah. Das ist nicht weiter verwunderlich, wenn man sich den damaligen Stand der Optik vor Augen führt.

Zwar stellten auch Physiker zu dieser Zeit den 1727 verstorbenen Newton infrage, aber aus einem anderen Grund: Hatte Newton Recht mit seiner Annahme, Licht bestehe aus Teilchen? Oder handelte es sich vielmehr um Wellen? Die Wellentheorie, die der Engländer Thomas Young zur Erklärung von Interferenzerscheinungen formuliert hatte, war zu Beginn des 19. Jahrhunderts von der Royal Society publiziert worden und zunächst unbeachtet geblieben – nicht zuletzt, weil ihr das mathematische Fundament fehlte. Der Franzose Augustin Jean Fresnel konnte dagegen 1815 alle von ihm erdachten Interferenz-Experimente durch eine mathematische Theorie erklären. Deren Vorhersagen ließen sich umgekehrt experimentell überprüfen. Fresnels Arbeit wurde in der Fachwelt ernst genommen, weil sie methodisch dem von der Theorie geleiteten Ansatz folgte, den bereits Newton gewählt hatte. Seine Arbeit löste unter den Fachkollegen eine heftige Kontroverse aus, welche der Wellenlehre des Lichts noch mehr Aufmerksamkeit verschaffte. (Roth 1997)

Eine weitere Bestätigung erfuhr die Wellentheorie – ebenfalls zu Goethes Zeiten – durch

1 Betrachtet man einen Fensterrahmen durch ein Prisma, sieht man – wie Goethe – Farbstreifen an der Grenze zwischen hell und dunkel.

2 Farbige Spiegelung auf der Linse, die das Licht bündelt, bevor es auf das Prisma fällt.

Literatur

- 1 Holtsmark, Torger (1970), Newton's Experimentum Crucis Reconsidered, Am. J. Phys. 38 (10) S. 1229–1235.
- 2 Krätz, Otto, Goethe und die Naturwissenschaften, München 1998.
- 3 Ribe, Neil; Steinle, Friedrich (2002), Exploratory Experimentation: Goethe, Land, and Color Theory, Phys. Today 55 (7), S. 43–49.
- 4 Karl Rittersbacher, Der Naturforscher Goethe in Selbstzeugnissen, Verlag Die Kommenden GmbH, Freiburg 1968.
- 5 Roth, Günter D., Thomas Young (1773–1829), Augustin Jean Fresnel (1788–1827) und Joseph von Fraunhofer (1787–1826), in: Karl von Meyenn, Die großen Physiker. Von Aristoteles bis Kelvin (Bd. 1), München 1997.
- 6 Sarris, Viktor: Goethes Farbenlehre aus heutiger wahrnehmungspsychologischer Sicht, in: Schmidt, Alfred; Grün, Klaus-Jürgen (Hrsg.), Durchgeistete Natur. Ihre Präsenz in Goethes Dichtung, Wissenschaft und Philosophie, Verlag Peter Lang, Frankfurt 1999, S. 8–90.
- 7 Schmidt, Alfred; Grün, Klaus-Jürgen (Hrsg.), Durchgeistete Natur. Ihre Präsenz in Goethes Dichtung, Wissenschaft und Philosophie, Verlag Peter Lang, Frankfurt 1999.
- 8 http://www.experimentum-lucis.de/Paper/experimentum_lucis_workshop.pdf (Stand: September 2015)
- 9 <http://www.deutsches-farbenzentrum.de/2010/03/200-jahre-goethes-farbenlehre-aus-sicht-der-modernen-optik/> (Stand: September 2015)



den Optiker Joseph Fraunhofer, der als technischer Erfinder im »Mathematisch-mechanischen Institut Reichenbach, Utzschneider und Liebherr« arbeitete. Er wollte die Abbildungsfehler in optischen Linsen reduzieren, die durch die unterschiedliche Brechung farbigen Lichts zustande kommen. Fraunhofer entdeckte 1817 die dunklen Linien des Sonnenspektrums. Er nutzte das Spektrum zur exakten Messung der Brechkraft seiner Linsen. Max Born, einer der Väter der Quantentheorie, bezeichnete Fraunhofers Entdeckung später als die »Geburtsstunde der Spektralanalyse«.

Farbenlehre im Dienst der Malerei

Das alles nahm Goethe nicht zur Kenntnis. Bis zu seinem Tod arbeitete er insgesamt 40 Jahre an seiner Farbenlehre. Sogar seine letzte Publikation widmete er im Alter von 83 Jahren dem Regenbogen. Und er schätzte seine Leistung weitaus höher ein als sein literarisches Werk: »Auf alles, was ich als Poet geleistet habe, bilde ich mir gar nichts ein. Daß ich aber in meinem Jahrhundert in der schwierigen Wissenschaft der Farbenlehre der einzige bin, der das Rechte weiß, darauf tue ich mir etwas zugute, und ich habe daher ein Bewußtsein der Superiorität über viele ...«

Goethe hat seine Leidenschaft für die Optik selbst durch sein Interesse für die Malerei erklärt. Von Kindheit an sei er in den Werkstätten der Maler ein und aus gegangen und habe sich selbst als Künstler versucht. »Ja ich fühlte

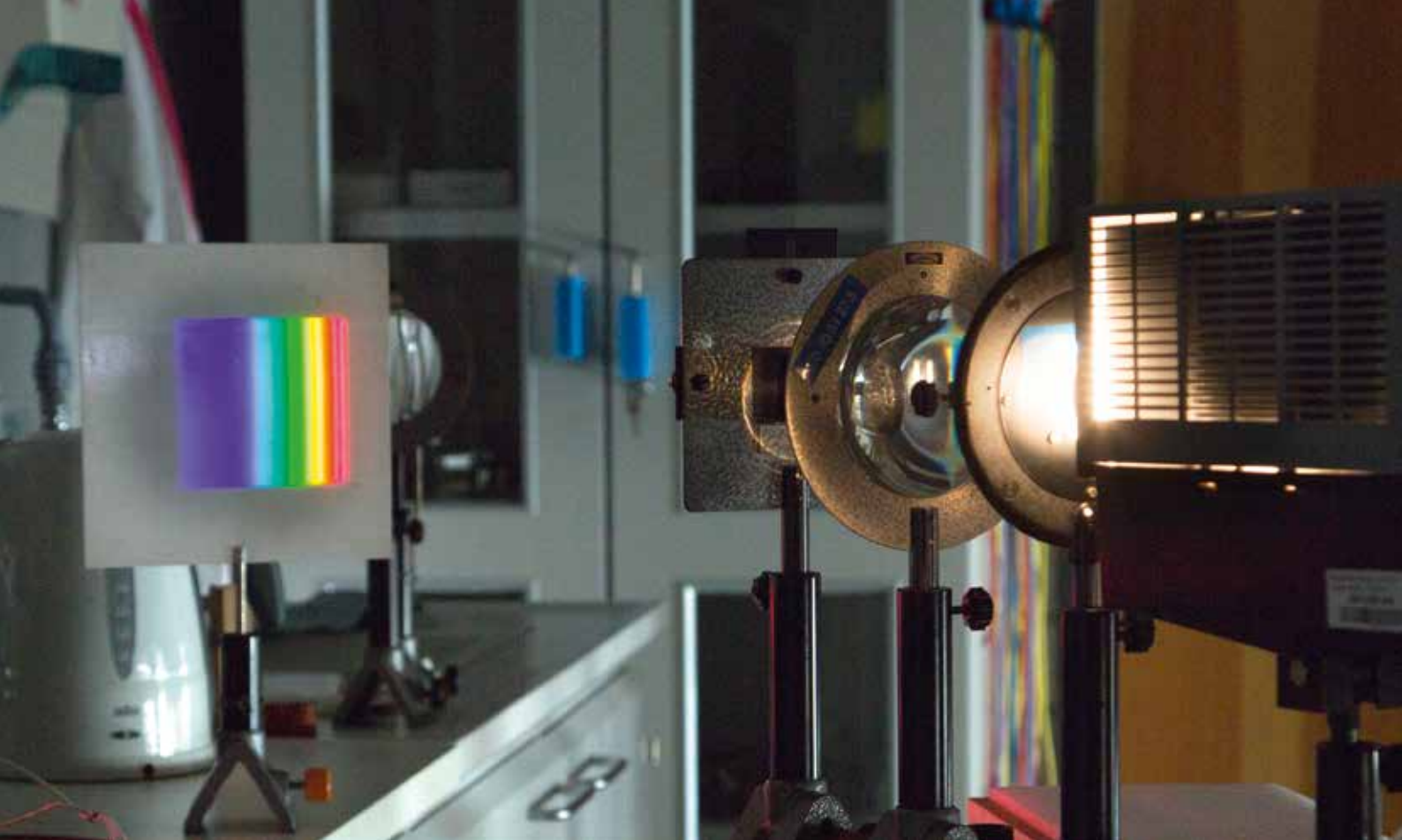
hiez, wozu ich eigentlich keine Anlage hatte, einen weit größeren Trieb als zu demjenigen was mir von Natur leicht und bequem war.« So verlegte er sich darauf, das Technische der Malerei zu studieren und insbesondere die Wirkung der Farben auf den Betrachter zu erforschen. Auf seiner Reise nach Italien brachte er »diesen mir so wichtigen Punkt überall wiederholt, lebhaft und dringend zur Sprache, dergestalt daß



Die Autorin

Dr. Anne Hardy, Jahrgang 1965, studierte Physik an der RWTH Aachen (Diplom 1991), arbeitete als freie Wissenschaftsjournalistin und promovierte 2003 in Wissenschaftsgeschichte an der Technischen Universität Darmstadt. Sie ist seit 2005 Redakteurin von Forschung Frankfurt.

hardy@pww.uni-frankfurt.de



ich dadurch selbst Wohlwollenden fast lästig und verdrießlich fiel.«

Auf seine Fragen konnten die Künstler ihm jedoch keine befriedigende Antwort geben. Goethe wollte nichts von »technischen Kunstgriffen« hören, sondern »Grundsätze« aufstellen. So gelangte er nach seiner Rückkehr aus Italien zu der Ansicht, »daß man den Farben, als physischen Erscheinungen, erst von der Seite der Natur beikommen müsse, wenn man in Absicht auf die Kunst etwas über sie gewinnen wolle«. Die Physik war also für ihn eine Hilfswissenschaft, mit der er die Wirkung der Kunst auf den Betrachter erklären wollte. Das konnte allein schon deshalb nicht funktionieren, weil die Trennung von Subjekt und Objekt beim Experiment ein Grundprinzip der physikalischen Methode ist. In Goethes Zugang zur Natur spielte der Betrachter aber immer eine zentrale Rolle. Sein Anliegen einer »ästhetischen« Deutung und Ordnung der Farben fand daher auch zuerst Eingang in die Malerei, etwa im Schaffen William Turners. (Krätz 1998)

Goethes Überheblichkeit gegenüber Newton und den Mathematikern und Physikern seiner Zeit hat dazu beigetragen, dass seine

Farbenlehre lange Zeit von Physikern kaum zur Kenntnis genommen wurde. Goethes Ablehnung galt dabei wohl eher der von der Theorie geleiteten Methode, die bis heute in den Naturwissenschaften dominiert. Forscher, die diesen Weg beschritten, charakterisierte Goethe als »genial, produktiv und gewaltsam, bringen eine Welt aus sich selbst hervor, ohne viel zu fragen, ob sie mit der wirklichen übereinkommen werde«. Sich selbst zählte er zu den aus seiner Sicht besseren Naturwissenschaftlern: »geistreich, scharfsinnig, behutsam, zeigen sich als gute Beobachter, sorgfältige Experimentatoren, vorsichtige Sammler von Erfahrungen«. Physikhistoriker haben darauf aufmerksam gemacht, dass Goethe einen »explorativen« experimentellen Ansatz begründete, der heute zunehmend wieder gewählt wird, um komplexe Systeme zu studieren. Denn bevor Hypothesen für ein komplexes System aufgestellt werden können, müssen sie durch eine Vielzahl unterschiedlicher Experimente erkundet werden (Ribe, Steinle). Insofern gebührt Goethe vielleicht doch ein Platz in der Ahnenreihe der Experimentalphysiker. ●

3 Newtons »Experimentum Crucis«, nachgestellt von Prof. Roger Erb im Institut für Didaktik der Physik. Blendet man durch ein schmales Prisma einen Teil des Spektrums aus, entstehen zueinander komplementäre Farben (kleine Bilder unten).

IMPRESSUM

FORSCHUNG FRANKFURT

Das Wissenschaftsmagazin der Goethe-Universität



IMPRESSUM

Herausgeber Die Präsidentin der Goethe-Universität Frankfurt am Main
Vi.S.d.P. Dr. Olaf Kaltenborn, Leiter der Abteilung Marketing und Kommunikation

Redaktion Ulrike Jaspers, Diplom-Journalistin, Referentin für Wissenschaftskommunikation (Geistes- und Sozialwissenschaften), Theodor-W. Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, Raum 4P.31, 60323 Frankfurt am Main, Telefon (069)798-13066, E-Mail: jaspers@pww.uni-frankfurt.de
Dr. phil. Anne Hardy, Diplom-Physikerin, Referentin für Wissenschaftskommunikation (Naturwissenschaften und Medizin), Theodor-W. Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, Raum 4P.31, 60323 Frankfurt am Main, Telefon (069)798-12498, E-Mail: hardy@pww.uni-frankfurt.de

Grafisches Konzept und Layout Nina Ludwig, Kommunikationsdesignerin, M.A., Theodor-W. Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, Raum 4P.32, 60323 Frankfurt am Main, Telefon (069)798-13819, E-Mail: ludwig@pww.uni-frankfurt.de

Satz Nina Ludwig, Medienwerkstatt/Dagmar Jung-Zulauf, Niddatal, Daniela Knebel, Frankfurt am Main

Litho Peter Kiefer Mediendesign, Frankfurt am Main

Vertrieb Helga Ott, Theodor-W. Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, Raum 4P.36A, 60323 Frankfurt am Main, Telefon (069)798-12472, Telefax (069) 798-763-12531, E-Mail: ott@pww.uni-frankfurt.de

Forschung Frankfurt im Internet www.forschung-frankfurt.uni-frankfurt.de

Anzeigenvermarktung Zeitungsanzeigengesellschaft RheinMainMedia mbH, Frankenallee 71–81, 60327 Frankfurt, www.rheinmainmedia.de, Ansprechpartner: Reinhold Dussmann, Telefon: (069) 7501 4183, E-Mail r.dussmann@rheinmainmedia.de

Druck Societätsdruck, Westdeutsche Verlags- und Druckerei GmbH, Kurhessenstraße 4–6, 64546 Mörfelden-Walldorf

Bezugsbedingungen »Forschung Frankfurt« kann gegen eine jährliche Gebühr von 12 Euro abonniert werden. Das Einzelheft kostet 6 Euro. Einzelverkauf beim Vertrieb: Helga Ott, Theodor-W. Adorno-Platz 1, Campus Westend, PA-Gebäude, Raum 4P.36A, 60323 Frankfurt am Main, Telefon (069) 798-12472, E-Mail: ott@pww.uni-frankfurt.de

Für Mitglieder der Vereinigung von Freunden und Förderern der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main e.V. sind die Abonnementgebühren für »Forschung Frankfurt« im Mitgliedsbeitrag enthalten.

Hinweis für Bezieher von »Forschung Frankfurt« (gem. Hess. Datenschutzgesetz): Für Vertrieb und Abonnementverwaltung von »Forschung Frankfurt« werden die erforderlichen Daten der Bezieher in einer automatisierten Datei gespeichert, die folgende Angaben enthält: Name, Vorname, Anschrift, Bezugszeitraum und – bei Teilnahme am Abbuchungsverfahren – die Bankverbindung. Die Daten werden nach Beendigung des Bezugs gelöscht.

Die Beiträge geben die Meinung der Autoren wieder. Der Nachdruck von Beiträgen ist nach Absprache möglich.

ABBILDUNGSNACHWEIS

Titel Uwe Dettmar, Frankfurt

Aus der Redaktion Foto von Dettmar

Inhalt Siehe Hinweise bei den jeweiligen Beiträgen

Astrophysik und Atmosphäre Seite 4: Foto von Mario Weigand, www.skytrip.de, Seite 5: Sonne: Mario Weigand, www.skytrip.de; Spektrum: N.A. Sharp, NOAO/AURA/NSF; Seite 6: Abbildungen von René Reifarth und Kathrin Goebel; Seite 7: beide Grafiken von Mario Weigand; Seite 9: Autorenfotos von Dettmar. Seite 10: Foto von Andreas Engel; Seite 12: Autorenfoto von Dettmar; Seite 13: Foto von A. Engel. Seite 14/15: Foto von Rolf Mäder, RolfMaederPhotography.com.

Mikroskopie Seite 16: Foto von Dettmar; Seite 17: aus Stelzer EHK (2015) LSMF for quantitative biology, Nature Methods 12:23-27; Seite 18: AG Stelzer; Seite 19: Abb. 3a von Smyrek, Schmitz, Hötte, Abb. 3b aus A: Smyrek, Stelzer EHK et al. (2015) Live imaging of Tribolium castaneum embryonic development using light-sheet-based fluorescence microscopy, Nature Protocols 10:1486-1507; Seite 20: Abb. 4a von Smyrek, Schmitz, Strobl, Abb. 4b von Pampaloni, Mattheyer, Schmitz, Fischer; Autorenfoto von Dettmar. Seiten 21/23: Aufnahmen von Christoph Spahn, AG SMB (Single-Molecule Biophysics); Seite 22 oben: AG SMB, Autorenfoto von Dr. Marina Dietz. Seiten 24 bis 29: Fotos von Dettmar, Grafik Seite 27 oben von Martin Pitzer.

Leuchtende Displays Seite 30: Abbildung von Valentin Hertz, Seite 31/32: Grafiken von Dagmar Jung-Zulauf, Seite 33: Fotos 4a,b von LG Display, Foto 4c von dpa picture alliance, Frankfurt, Autorenfotos: V. Hertz von Dettmar, M. Wagner: privat.

Licht in der Zelle Seite 34/37: Fotos von Dettmar; Seite 36: Grafik von Alex Heckel, Autorinnenfoto: privat. Seite 38: dpa picture alliance; Seite 39/40: Aufnahmen AK Tampé; Seite 40 oben: Grafik von Ralph Wieneke, Seite 41: Foto von Dettmar. Seite 42: Abbildung von Peter Kiefer, Frankfurt; Seite 43: AK Bamberg, Seite 44: Abb. 2a iStockphoto / Sebastian Kaulitzki (bearbeitet), Abb. 2b, c aus Publikationen des Autors, Autorenfoto: Axel Griesch, München; Seite 45: Abb. 3a von Peter Hartmann, Wikipedia commons, Abb. 3b aus Ref. 7, Abb. 4: Nachdruck mit Erlaubnis von Macmillan Publishers Ltd: Nature Neuroscience 11, 667–75 (2008). Seite 46-49: alle Abbildungen aus Publikationen des Autors, teilweise bearbeitet von Peter Kiefer, Frankfurt; Seite 49: Autorenfoto von Dettmar. Seite 50 Foto: AK Wachtveitl; Seite 51 bis 54: Abbildungen: AK Wachtveitl, teilweise bearbeitet von Kiefer; Seite 55: Autorenfoto von Dettmar. Seite 57: Fotos AK Büchel, Seite 58/59: Abbildungen: AK Büchel, bearbeitet von Kiefer; Seite 60: Autorinnenfoto von Dettmar; Seite 61: Foto von Dettmar.

Licht und Innere Uhr Seite 62: Illustration von Frank Maier, Stuttgart; Seite 63 bis 65: alle Abbildungen und Fotos vom Autor; Seite 67 und 69: Foto von Dettmar; Seite 68: Abbildungen überarbeitet von Kiefer, Original aus: Arns M. et al. (2013), Geographic Variation in the Prevalence of Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: The Sunny Perspective, Biol Psychiatry 74:585–590; Seite 69: Abbildung überarbeitet von Kiefer, Original aus: Bauer M. et al. (2012), Impact of sunlight on the age of onset of bipolar disorder, Bipolar Disord. 14(6):654-663.

Licht und Dunkel im Zeitalter Seite 70: Foto von »archiv für kunst und geschichte«, [akg-images](http://akg-images.com), Berlin; Seite 72: Bild aus »Le Magasin Pittoresque« 23 (1855), S. 217; Seite 72: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/97/Allegory_of_the_Cave_blank.png; Seite 72: Autorenfoto von Dettmar. Seite 74: Abbildung von Herzog August Bibliothek Wolfenbüttel, Cod. Guelph. 84.5 Aug. 2°, S.41 recto; Seite 75: Fotos von der Evangelisch-Lutherischen Kirchengemeinde Nürnberg-St. Sebald, www.sebalduskirche.de/index.php?id=107; Seite 76: Abbildungen aus der Stiftsbibliothek Kloster Neuburg, CCl. 311, f. 82v-83r; Seite 77: Foto oben von dpa picture alliance, Frankfurt; Autorenfotos von Dettmar. Seite 78/79: Abbildung aus Karl Taube, Aztec and Maya Myths, London, British Museum, 1993, S.43; Seite 80 oben: Abbildung aus Bernardino de Sahagún, Historia general de las cosas de Nueva España (Allgemeine Geschichte der Dinge von Neu-Spanien), 3 Bde., Entstehungszeit 1559-1577, Erstausgabe 1829-30; Seite 80 unten: aus Felipe Guamán Poma de Ayala [ca. 1615], Nueva Coronica y Buen Gobierno, f. 246 [248], Original bei The Royal Library Copenhagen; Seite 81: Abbildung aus Gisbert, Teresa. 1994. Iconografía y mitos indígenas en el arte. La Paz, Fundación BHN/Editorial Gisbert, zw. S. 152-153; Seite 81: Autorinfoto von Dettmar. Seite 82: Erinnerungsblatt an die Internationale Elektrotechnische Ausstellung, Farbige Lithografie und Druck von Gebr. Frey, Frankfurt am Main 1891, C 12181/42443, Historisches Museum; Seite 83 oben: Plakat, Lithografie und Druck von J.C. Metz nach einem Entwurf von Frank Kirchbach, 1891, C 7947, Historisches Museum; Seite 83 und 84: Foto vom Institut für Stadtgeschichte, Frankfurt; Seite 85: Fotos von Dettmar.

Beleuchtung in Kunst, Film und Theater Seite 86 bis 91: Abbildungen: Quellennachweis im jeweiligen Bildtext; Seite 91: Autorenfoto von Dettmar; Seite 92 und 93: alle Fotos von Wolfgang Günzel, Frankfurt; Seite 94 bis 96: Abbildungen: Quellennachweis im jeweiligen Bildtext; Seite 96: Autorinfoto von Dettmar. Seite 97: Foto aus: Bruno Taut, Glashauss, Werkbund-Ausstellung Cöln 1914, Berlin o.J. (1914); Seite 98: Zeichnung aus: Bruno Taut, Alpine Architektur, Hagen 1919, Blatt 10; Seite 99 oben: Zeichnung aus: Bruno Taut, Die Stadtkrone, Jena 1919; Seite 99 unten: Sammlung Wassili Luckhardt, Berlin; Foto links aus AK Bauhaus-Archiv/Busch-Reisinger-Museum, Berlin 1985; Seite 100: Foto rechts aus Erich Mendelsohn, Amerika, Bilderbuch eines Architekten, Berlin 1926; Seite 100: Autorenfoto von Dettmar; Seite 101: Bilder aus dem Film »Casablanca« (©1941 Warner Bros.); Seite 102: großes Bild unten aus dem Film »Der Zauberer von Oz« (©1939 MGM), kleines Bild: Filmstudio »Black Maria« (1890, unbekannter Autor, Quelle: Library of Congress: American Memory Collection); Seite 103: Bild mit MGM-Löwe Leo (© MGM). Seite 104: kleines Bild rechts oben: »Light Describing a Cone« (©2015 Tate Modern), Autorenfoto: von Luzau; Seite 105: Theaterwissenschaftliche Sammlung Universität zu Köln; Seite 106: Abbildung oben Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt; Seite 106: Abbildung unten von »archiv für kunst und geschichte«, [akg-images](http://akg-images.com); Seite 107: Abbildung von [akg-images](http://akg-images.com); Seite 108: Autorenfoto von Dettmar; Seite 109: <http://futureof-museums.blogspot.de/2015/05/futurist-friday-digital-panopticon.html>; Seite 110: Foto links: von Han Joowon (www.hjwsg.com), Foto rechts von Kerith Parashak (www.kerithparashak.com); Seite 113: Autorinfoto Zimmermann privat.

Schlusslicht Seiten 124 bis 127: Fotos von Dettmar



DAS NÄCHSTE MAL

Multireligiös –
Devotionalien-Sammlung am
Frankfurter Forschungszentrum
Globaler Islam.



GOTT UND DIE WELT – RELIGIONEN UND GESELLSCHAFT

Die postsäkularen Gesellschaften in Europa werden durch die Terroranschläge islamistischer Fundamentalisten ganz neu herausgefordert, sich mit der Frage zu beschäftigen: Wie halten wir es mit der Religion? Führt die zunehmende Vielfalt religiöser und kultureller Vorstellungen und Lebensweisen zwangsläufig zu Konflikten? Wie sind Gesellschaften zu anderen Zeiten mit solchen Dynamiken umgegangen? Können wir aus der Vergangenheit lernen? In »Forschung Frankfurt« 1/2016 suchen Theologen, Islamwissenschaftler, Religionswissenschaftler, Historiker, Juristen, Ethnologen, Philosophen und Pädagogen Antworten auf Fragen der Zeit.

Erscheinungstermin: Anfang Juli 2016

congressfrankfurt

Location. Service. Experience.

Spitzenlage

Egal, was Sie vorhaben.

Wir bieten Ihnen Raum für Wachstum und Erfolg – mit Kapazitäten, die sich kombinieren lassen und damit unschlagbar flexibel sind.

Das alles zentral, am perfekten Standort.

Willkommen in den Locations der Messe Frankfurt!

www.congressfrankfurt.de



messe frankfurt