

Interdisziplinäre Gestaltung

Einladung in das neue Feld einer Geistes- und Materialwissenschaft

Carbon Flatland

Vor genau 10 Jahren hat ein Goldrausch in ein ebenso neues wie altes Reich des Zweidimensionalen begonnen. Nach Jahrtausenden des Trainings, die räumliche Welt durch symbolische Operationen von Bild, Schrift und Zahl auf 2D-Oberflächen zu bringen, geschah 2004 etwas, das bis dahin für unmöglich gehalten worden war: Die bloße Fläche tauchte endlich selbst im Reich der Dinge auf, als eine materiale zweidimensionale Ebene mit der minimalen Dicke einer Carbonatomschicht – ein geradezu euklidischer Traum, ein hauchdünnes, durchsichtiges und flexibles Gitter aus Hexagonen und dennoch hundertmal fester als Stahl. Materiale Geometrie und verkörperte Quantendynamik: Graphen ist ein Ereignis, das in der Physik eine Revolution auslöste, als Blatt schlechthin, in dem Physik und Kultur in eigentümlicher Weise zusammenfallen (Abb. 1). Denn, so schreibt einer seiner beiden Entdecker Andre Geim, »what is probably more unexpected is the news that every time someone scribes a line with a pencil, the resulting mark includes bits of the hottest new material in physics and nanotechnology: graphene«. ¹ Es ist die dünne »[m]other of all graphitic forms«, da mit nur wenigen Faltungen daraus so irrwitzige Dinge wie *nanotubes* und *buckyballs* entstehen (Abb. 2). All dies resultiert also aus einem einfachen Verfahren, »nothing more sophisticated than drawing by a piece of

1 Geim/Kim 2008, 90.

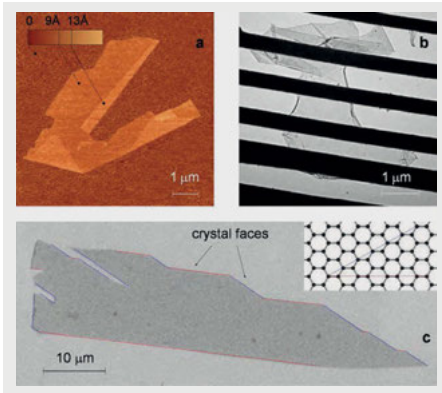


Abb. 1: »One-atom-thick single crystals: the thinnest material you will ever see.«

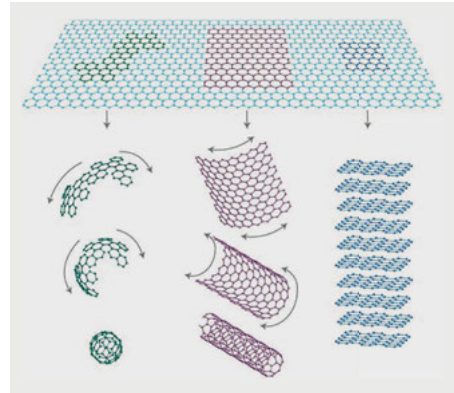


Abb. 2: »Mother of all graphitic forms. Graphene is a 2D building material for carbon materials of all other dimensionalities. It can be wrapped up into 0D buckyballs, rolled into 1D nanotubes or stacked into 3D graphite.«

graphite or its repeated peeling with adhesive tape until the thinnest flakes are found«.² Bei dieser überraschend simplen Technik jedoch lag eine besondere Schwierigkeit darin, die produzierte minimale Schicht tatsächlich sichtbar zu machen und aufzufinden wie eine Nadel in einem Heuhaufen von Tausenden dickeren Grafitflocken: Denn weder in Rastersonden- noch in Raster-elektronenmikroskopen ist sie zu sehen, nur in einem optischen Mikroskop, wenn man sie auf einen Siliziumwafer als Grundplatte legt, oder neuerdings auch über die Raman-Spektroskopie. Verborgten in der Bleistiftschrift also ruhte diese Revolution, eine Art Physik des Schreibens, die damit auch ein Ereignis im Feld der Geisteswissenschaften und des Grafikdesigns darstellt. Grafit, das man bei seiner Entdeckung im 16. Jahrhundert in England noch für das Bleimineral *Plumbago* hielt, wurde zur Grundlage des modernen Bleistifts (Abb. 3). Erst gegen Ende des 18. Jahrhunderts wies man nach, dass es sich dabei um reinen Kohlenstoff handelt, weshalb der Mineraloge Abraham Gottlob Werner das Material »Graphit« nannte, abgeleitet vom griechischen *graphein*, schreiben.³ Wenn der Naturwissenschaftler und Experimentator der Royal Society of London Robert Hooke solche Punkte und Linien bereits in seiner *Micrographia* von 1665 untersucht (Abb. 4), beginnt die Geschichte der Schrift unter dem Mikroskop beim Punkt, der als »great splash of London dirt«⁴ erscheint, und sie ist nun beim Graphen angekommen. Dieser Zoom in andere Dimensionen des Schreibens war für den Physiker Richard Feynman 1959 der Grund, im Rahmen des Vortrags *There is Plenty of Room at the Bottom*⁵ am California Institute of Technology in ein neues Feld der Physik einzuladen. Die Herausforderung, die er

2 Geim/Novoselev 2007, 3.

3 Siehe Petroski 2003.

4 Hooke 1665, 3.

5 Feynman 1960.

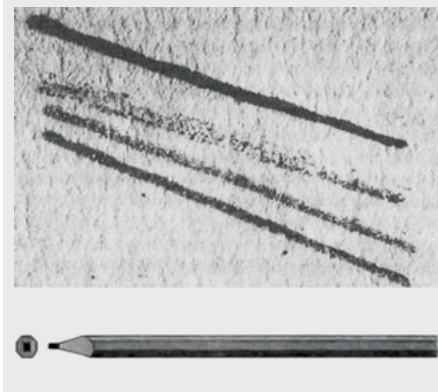


Abb. 3: Ein früher Bleistift und die Striche, die er auf dem Papier hinterlässt.

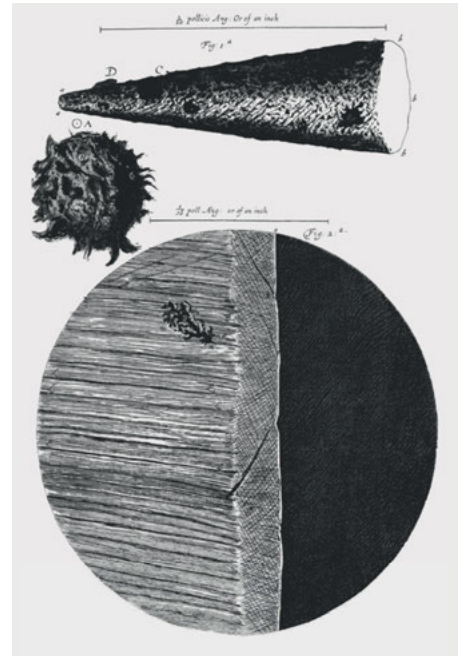


Abb. 4: Abbildung von Nadelspitze, Punkt und Papier aus Robert Hooke's *Micrographia*.

damals sah, lag ebenfalls in einer eigentümlichen Verschmelzung von Kulturtechniken und Festkörperphysik. Denn einführend stellte er die schlichte Frage: »Why cannot we write the entire 24 volumes of the Encyclopedia Britannica on the head of a pin?«⁶ Sein Blick in den Zoom einer materialen Miniaturisierung lotete die Grenzen der Verkleinerung des Schreibens und Zeichnens von elektronischen digitalen Schaltungen aus. Zugleich wurde Physik zu Hardware-Design, indem Atome als Bausteine von Symboloperationen fungierten. Dies brachte Geisteswissenschaftler wie Friedrich Kittler dazu, die Makroebene des Schreibens zu verlassen und statt Literaturwissenschaft eine Geschichte und Theorie der Soft- und Hardware zu betreiben – mit dem Ziel, dem Schreiben vom Typewriter des 19. Jahrhunderts in die Regionen zu folgen, wo es seine radikalsten Innovationen bewirken sollte.⁷

Die neue Hardware-Physik führte Richard Feynman aber auch unmittelbar in die Biologie, die damals in den Bannkreis der Informationstheorie geriet:⁸ Denn die Molekularbiologie zeigte Feynman, dass es hierbei nicht nur um Schreiben, Verarbeiten und Speichern von Informationen geht; vielmehr tun biologische Moleküle etwas damit. Sie agieren; sie repräsentieren einen Code nicht nur, sondern führen ihre Codierungen als kleine Maschinen auch aus, und dies nicht

6 Ebd., 22.

7 Siehe Kittler 1986 sowie ders. 1993.

8 Vgl. dazu Yockey/Platzman/Quastler 1958.

mehr virtuell, sondern als materiale analoge Codes. Entscheidend für Feynman war nun, dass technische Elemente, biologische Moleküle und physikalische Materie im Nanobereich nach denselben Prinzipien funktionieren, die für die Gestaltung bereitstehen, und dafür gibt es eben, wie er sagt, »plenty of room at the bottom«.⁹

In den Labors ist diese Science Fiction mittlerweile Wirklichkeit der Forschung geworden: Biologische Materialien werde als Hardware analysiert; materiale Strukturanalysen und Gestaltungen ebnet die Grenzen von Physik, Chemie, Mechanik und Biologie ein; es findet ein regelrechter Design-Turn¹⁰ in diesen Wissenschaften statt. Artefakte, Maschinen und natürliche Objekte werden ununterscheidbar, und nicht zuletzt unternehmen die Geisteswissenschaften neue Akteur-, Struktur- und Bildforschungen. So kann man das Graphen neben den Maschinen, die in biologischen Materialien gesehen werden und die Materialforschung prägen, als weiteres Indiz dafür nehmen, dass ein völlig neuer Blick auf die materielle Welt entsteht: Was vormals als passive, opake Materialität galt, wird nun zum Motor, Sensor und Code einer dynamischen Strukturenwelt. Es ist, als seien die digitalen Algorithmisierungen im Bereich der Materie selbst angekommen. Nun geht es darum, das Analoge unserer materialen Welt als operatives System neu zu entdecken.

Diese Situation in ihrer ganzen Radikalität und Komplexität zu erkennen und daraus Konsequenzen zu ziehen, ist für uns die konkrete gegenwärtige Herausforderung. Und darauf zielt die Einladung zu einer Forschung, die wir uns an diesem Cluster als interdisziplinäre Gestaltung vornehmen: eine grundlegende Kooperation von Wissenschaft und Gestaltung, die man als Geistes- und Materialwissenschaft bezeichnen kann. Nach einem Blick auf die institutionellen Bedingungen öffentlicher Forschungsstrukturen für dieses neue Gebiet werde ich im Folgenden ein konkretes Arbeitsfeld des Clusters vorstellen, das die großen Anforderungen an eine integrative interdisziplinäre Arbeit erkennen lässt.

Wissenschaft und Gestaltung

Unser universitäres System ist für das neue Feld einer Geistes- und Materialwissenschaft nicht unbedingt vorbereitet: Die Ausdifferenzierung von Technischen Universitäten, Kunsthochschulen und Gesamtuniversitäten, in denen die Geistes- von den Naturwissenschaften getrennt sind, hat eine neuere Geschichte. Sie beginnt um 1800 mit der Gründung der École Polytechnique in Paris: Die *Géométrie descriptive* (1798) von Gaspard Monge bildete die operative Gestaltungstechnik für alle Disziplinen, die an der École unterrichtet wurden.¹¹ Parallel zu diesem Modell der Ingenieurausbildung erfolgte die humboldtsche Reorganisation der Universität – man könnte sogar sagen: als Reaktion gegen diese neue Macht technischen Wissens. Statt darstellender Geometrie bildete hier die Philosophie die Basis, an die Stelle eines Gaspar Monge trat daher

⁹ Feynman 1959.

¹⁰ Siehe Schäffner 2010.

¹¹ Siehe Monge 1798.

Johann Gottlieb Fichte mit seiner Wissenschaftslehre, die alle Wissenschaften aus der Selbsttätigkeit des Subjekts ableitet.¹² Alexander von Humboldt ging es aber auch darum, die sich neu formierenden Naturwissenschaften wie Physik oder Chemie in den Raum der Universität einzubinden. Deshalb wurden in der Folge gerade solche Forscher an die Berliner Universität berufen, die ihre eigenen Labore mitbrachten.

Vor diesem Hintergrund zeichnet sich die Herausbildung von vier sehr verschiedenen Wissenskulturen ab: die beiden Felder der Geistes- und Naturwissenschaften, die Ingenieurwissenschaften und die Gestaltungsdisziplinen an den Kunsthochschulen. Dieses Modell bestimmt noch immer unsere Gegenwart und erschwert ein integratives Verhältnis von Wissenschaft und Gestaltung.

Unser Interdisziplinäres Labor *Bild Wissen Gestaltung* knüpft deshalb nicht zufällig an die Arbeiten von Hermann von Helmholtz an, der gerade in entscheidenden Phasen der Trennung von Geistes- und Naturwissenschaften deren engen Zusammenhang hervorhob. So 1877 in seiner Antrittsrede als Präsident der Berliner Universität:

»In der That, so sehr auch die Objecte, die Methoden, die nächsten Ziele naturwissenschaftlicher Untersuchungen von denen der Geisteswissenschaften äusserlich unterschieden sein mögen, und so fremdartig ihre Ergebnisse, so fernliegend das Interesse daran oft denjenigen Männern erscheinen mag, die gewöhnt sind, sich nur mit den unmittelbaren Aeusserungen und Erzeugnissen des Geisteslebens zu beschäftigen: so besteht doch [...] in Wahrheit die engste Verwandtschaft im innersten Wesen der wissenschaftlichen Methode, wie in den letzten Zielen beider Klassen von Wissenschaften.«¹³

Vor genau 50 Jahren schrieben Tomás Maldonado und Gui Bonsiepe mit *Wissenschaft und Gestaltung* an der Ulmer Hochschule für Gestaltung ein ebenso historisches wie uneingeholtes Programm für die Einbeziehung der wichtigsten neuen Wissenschaften: Topologie, Strukturfor- schung (sie nennen die Ingenieure und Architekten Richard Buckminster Fuller, Pier Luigi Nervi, Eduardo Torroja, Félix Candela und Konrad Wachsmann), Informationstheorie, Kybernetik und Ergonomie sind die Bereiche, die Maldonado und Bonsiepe für eine wissenschaftliche, technische und methodologische Erneuerung der Entwurfspraxis heranziehen.¹⁴ Zwar hatten die Lehrmodelle und resultierenden Entwürfe – etwa für Braun und Lufthansa, aber auch Otl Aichers Gestaltung der Olympischen Spiele in München 1972 – weltweit großen Erfolg; doch im Rahmen heftiger politischer Diskussionen erfuhr die konkrete Integration von Wissenschaft

12 Siehe Fichte 1994/95.

13 Helmholtz 1877, 5f. Das Hermann von Helmholtz-Zentrum für Kulturtechnik der Humboldt-Universität, das als Zentralinstitut den Charakter einer neuartigen integrativen Fakultät hat, schließt an diese Berliner Geschichte an und überführt sie in eine neue Phase, in der nun aber natürlich auch Frauen eine wichtige Rolle spielen.

14 Siehe Maldonado/Bonsiepe 1964.

und Gestaltung mit der Schließung der Ulmer Hochschule durch die Landesregierung 1968 ein abruptes Ende.¹⁵

Obwohl die skizzierten Programme von Feynman (1959) sowie Maldonado und Bonsiepe (1964) in keinem direkten Zusammenhang stehen, bilden sie Bestandteile einer transversalen Untersuchung von Strukturen, die Festkörperphysik, Hardware-Design, Biologie, Architektur und Produktgestaltung ebenso vereint wie die Felder des klassischen Strukturalismus. Doch eine derartig naheliegende transversale Strukturforschung betrieb man in den 1960er-Jahren selbst in Paris, dem damaligen Zentrum des Strukturalismus, nicht. Dies geschah tatsächlich eher in Ulm oder am Massachusetts Institute of Technology (MIT) durch den Gestalter György Kepes, der 1965 den Band *Structures in Art and in Science* herausgab, in dem sich neben Fuller und Nervi auch Metallurgen wie Cyril Stanley Smith und Physiker wie Lancelot White finden.¹⁶ An solche Konstellationen schließt die interdisziplinäre Struktur unseres Clusters an.

Unfoldome

Vor diesem Hintergrund wird deutlich, in welcher neuer Situation wir uns 50 Jahre später befinden und inwiefern die Physik des Graphens neben der Biomaterialforschung einem *New Materialism* in der Philosophie¹⁷ oder einer Geschichte des analogen Codes¹⁸ ein Feld konvergenter Fragestellungen eröffnet: In diesem Sinne diente das am Cluster durch den Physiker Jürgen Rabe untersuchte Graphen als Einstieg in ein neues Feld der Forschung, in dem Natur- und Geisteswissenschaften ebenso wie Gestaltungsdisziplinen in einer integrierten Forschungsform vereint sind. Es handelt sich hierbei um ein Forschungsgebiet, bei dem es um die Idee einer aktiven Materie geht, die zugleich Codecharakter hat. Diese dynamischen materialen Strukturen dienen uns dazu, die Geschichte der Digitalisierung und der Genese von Algorithmen und Datenstrukturen auf die Materie selbst zu übertragen, die nun nicht mehr als passiver, opaker Träger erscheint, sondern selbst zum Akteur, zu einer neuen Art Maschine werden kann:¹⁹ Dabei stehen Prozesse der Faltung, der 1D-, 2D- und 3D-Codierung von räumlichen Strukturen im Zentrum, die in unterschiedlichen Maßstäben untersucht werden.²⁰ Während beim Graphen die Physik in Regionen des Grafikdesigns eindringt, stoßen umgekehrt die symbolischen Operationen des Druckens in Dimensionen der Physik vor und werden nach Ludger Hovestadt

15 Vgl. dazu allgemein Rinker 2003.

16 Siehe Kepes 1965.

17 Siehe De Landa 1997.

18 Siehe Schäffner 2016.

19 Für diese Übertragung der digitalen Algorithmisierung in die Agentivierung von Materialien selbst war die Mitarbeit des Informatikers und Mathematikers Bernd Mahr ein Glücksfall. Kaum einer kannte so wie er die Genese der digitalen Algorithmen, die nun anstehen, in ganz neuer Weise im Material selbst nochmals erfunden zu werden. Nach seinem Tod bleiben uns seine unersetzlichen Anregungen und seine Schriften. Siehe etwa Mahr u. a. 2001.

20 Vgl. Demaine/O'Rourke 2007.

zu »printed physics«:²¹ Der 3D-Druck, der sich aus der *flatness* des Papiers erhebt, überkreuzt sich damit eigentümlich mit dem »carbon flatland«,²² das die Physiker aus der 3D-Welt isolieren.

Was sich einerseits in dem extrem leicht faltbaren Graphen als dynamische Mechanik abspielt, kann auch auf Makroebene an organischen Blattstrukturen untersucht werden. Diese Biomaterialforschung – am Cluster betrieben durch Peter Fratzl, John Dunlop, Richard Weinkamer²³ und Lorenzo Guiducci – versteht dabei Pflanzenblätter als Hardware, die in 2D-*patterns* die 3D-Entfaltung oder -Auffaltung ihrer Blattfläche codiert (Abb. 5). Modellierungen dieser Prozesse führen einerseits in die Morphologie unserer Biologen Gerhard Scholtz und Thomas Stach, deren Wissen über die Strukturen von Pflanzen und Lebewesen dabei in Fragestellungen der Mechanik und analogen Codierung übertragen wird. Denn der Blick dieser Materialingenieure erkennt in den Strukturen der organischen Materialien aktive Mechanismen, die als technische Lösungen adaptiv, energieeffizient und überaus flexibel sind.



Abb. 5: »Genetic basis of the emergence of negative curvature in leaves«.

Diese Kehrtwende von einer Implementierung technischer Intelligenz als dem klassischen Paradigma des Ingenieurwesens zum Aufsuchen technischer Lösungen in der Natur – als neuem Soft Engineering – stellt andererseits eine radikale Herausforderung dar. Vergleicht man sie mit dem Entwerfen im Produktdesign oder in der Architektur, dann wird deutlich, wie sehr sich das Vorgehen von Gestaltenden verändert, wenn Strukturen nicht mehr durch Entwurfsstrategien im Material realisiert werden, sondern diese umgekehrt aus diesem selbst, aus einem »architected material«,²⁴ entwickelt werden: Elemente der Architektur sind nun aktive Strukturen des Materials selbst, dessen *patterns* neue Formen des Bauens bedingen.

21 Bühlmann/Hovestadt 2013.

22 Geim/MacDonald 2007.

23 Siehe Fratzl/Dunlop/Weinkamer 2013.

24 Bréchet/Embury 2013.

Ein Blick auf den Prozess des Faltens kann das verdeutlichen: Faltungen sind 1D- oder 2D-Operationen, die 3D-Strukturen hervorbringen. Seit den Arbeiten des Bauhaus-Professors Josef Albers oder Richard Buckminster Fullers²⁵ sind diese Faltungen als elementare Gestaltungsprozesse von Produktdesign und Architektur untersucht worden. Insbesondere Fuller leitet aus seiner synergetischen Geometrie der Faltung innovative dynamische Strukturen ab. Man könnte dieses gesamte Feld mit dem Biochemiker Vladimir Uversky als *unfoldome*,²⁶ als System von Faltungen bezeichnen. Die neuere Proteinforschung zeigt, dass entgegen früherer Auffassungen sehr viele Proteine keine stabile Struktur besitzen: »Structural flexibility and plasticity from the lack of a definite-ordered 3D structure are believed to represent a major functional advantage for these proteins.«²⁷ Faltung bildet den operativen Kern von Strukturen. Proteinfaltung,²⁸ das faltbare Gewebe des Graphens, die dynamischen Strukturen von organischen Materialien – all diese Elemente in nano-, meso- und makroskalischen Bereichen werden gegenwärtig nicht zufällig mit Origami-Geometrie betrieben: In diesem sehr jungen Bereich der Mathematik geht es um Konstruktionen, die nicht mit Lineal und Zirkel, sondern durch das Falten von Papier erzeugt werden. Dieses Verfahren stammt aus der alten Tradition des Papierfaltens in Japan und Ägypten und erlebt unter dem Namen Origami vor allem seit der Mitte des 20. Jahrhunderts eine regelrechte Revolution, wobei die Verfahrensschritte praktisch formalisiert und auch mathematisiert werden. Bei der aktuellen Axiomatisierung wird deutlich, dass es sich dabei um eine sehr innovative Geometrie handelt, in der etwa die klassischen griechischen sogenannten Delischen Probleme der Würfelverdoppelung und der Dreiteilung des Winkels leicht zu lösen sind. Diese neue Origami-Mathematik knüpft dabei an Mathematisierungen des Papierfaltens an, die im späten 19. Jahrhundert von dem Deutschen Hermann Wiener als *Theorie der Umwendungen* (1890) und dem Inder Sundara Row als *Geometric Exercises in Paper Folding* (1893) entwickelt wurden (Abb. 6).²⁹

Gegenwärtig gibt es DNA-Origami (Abb. 7),³⁰ Pflanzen-Origami, das nicht mehr gefaltet werden muss, weil seine Blätter oder Samenkapseln sich selbst falten,³¹ Elastomer-Origami im Bereich der Soft Robotics,³² 3D-gedruckte Origami-Strukturen³³ und nicht zuletzt Graphen-Origami, um nur einige Formen zu nennen.

25 Siehe Fuller 1975/79.

26 Uversky 2010.

27 Ebd.

28 Siehe Dill et al. 2008.

29 Wiener 1890; Row 1893. Diese operative Geometrie um 1900 untersuche ich am Cluster zusammen mit dem Mathematiker Michael Friedman. Vgl. dazu Friedman 2016. Karin Krauthausen und Joseph Vogl bearbeiten philosophische Perspektiven der Strukturen- und Faltungsgeschichte. Diese Überlegungen versuchen wir mit aktuellen Fragen der Mechanik von Faltungen in Blattstrukturen und Graphenoxidschichten zu verbinden, an denen Lorenzo Guiducci mit Peter Fratzl und John Dunlop sowie Mohammad Fardin Gholami mit Jürgen Rabe arbeiten.

30 Siehe Smith 2006: DNA-Origami als Coverstory der *Nature*.

31 Siehe Fratzl et al. 2013.

32 Siehe Martinez et al. 2012.

33 Siehe Ahn et al. 2010.

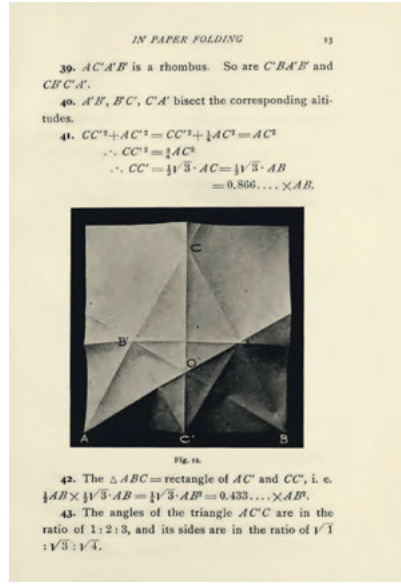
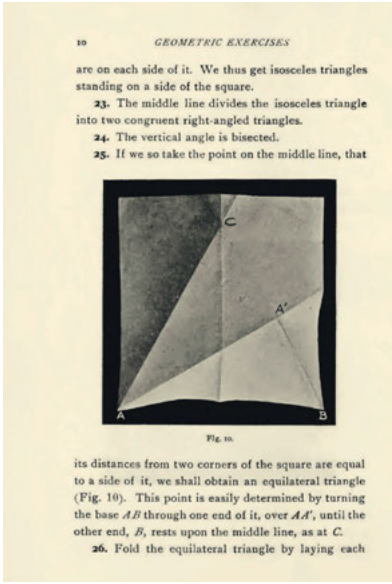


Abb. 6: Seiten aus Sundara Rows *Geometric Exercises in Paper Folding*.

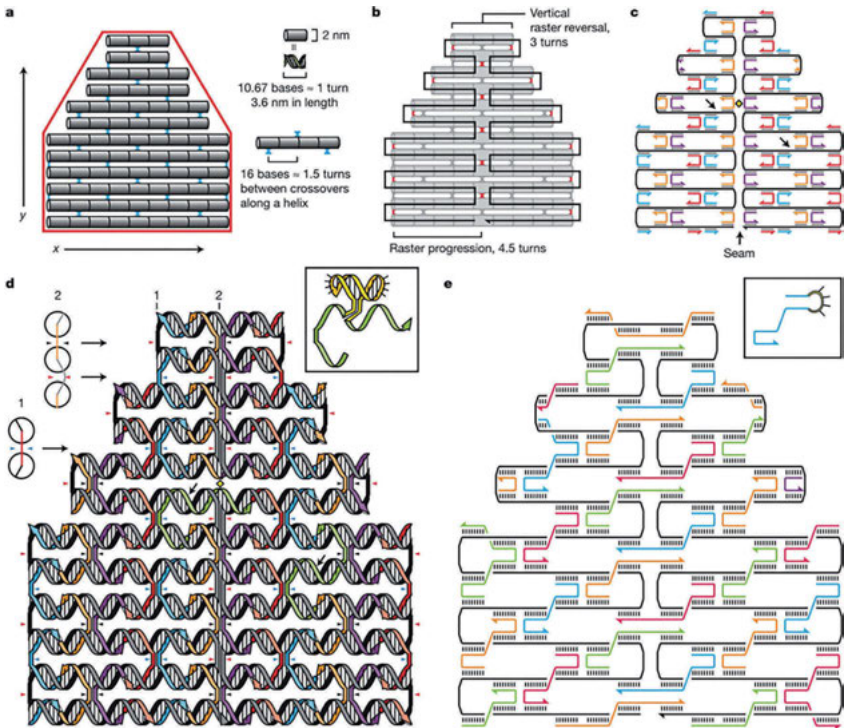


Abb. 7: »Design of DNA origami«.



Abb. 9: Experimentalzone des Exzellenzclusters im vierten Stock der Sophienstraße.

Mein Gang durch die Faltungen des *unfoldome* versammelt somit eine lange Reihe von Disziplinen, die ein enges Gefüge bilden und im Exzellenzcluster *Bild Wissen Gestaltung* das gemeinsame Feld einer Geistes- und Materialwissenschaft ergeben. Hier ist meine Arbeit als Kultur- und Medienwissenschaftler an einer Geschichte und Theorie von Strukturen und analogen Codes mit den Labors der Materialforschung und der Gestaltung kurzgeschlossen sowie mit der Informatik und der Mathematik verbunden. Dazu braucht es aber auch ein interdisziplinäres Experimentallabor, das die Zusammen- und Auffaltung der unterschiedlichen Wissenskulturen als Gestaltungsprozess ermöglicht, als physischer Laborraum, der flexibel und intelligent reagieren kann, als Kommunikations- und Interaktionsraum, der eine integrative Funktion erhält (Abb. 9). Als historisch analysierender Geisteswissenschaftler geht es mir nicht zuletzt darum, die lange Reihe der Akteure von Euklid über Leibniz, Monge bis Fuller, Maldonado und Feynman gleichsam als Zeitgenossen in unsere Gegenwart zu falten – sie zusammenzubringen mit dem Biomaterialwissenschaftler Peter Fratzl, dem Physiker Jürgen Rabe, dem Mathematiker Jochen Brüning, dem Fuller-Experten Joachim Krause, der Designerin Carola Zwick,³⁸ dem Architekten Finn Geipel oder dem Literaturwissenschaftler Joseph Vogl, mit denen ich die Faltungen als neuen Code der Materie untersuche. Mit solchen topologischen Faltungen einer klassischen Zeitachse

38 Vgl. Zwick et al. 2012.

kann und muss man die längst überkommene Linearität der Geschichte durchbrechen.³⁹ Dazu genügt es, die Dinge nebeneinanderzulegen und Konsequenzen daraus zu ziehen: Dies sehe ich als meine neue Aufgabe in der Geistes- und Materialwissenschaft, die wir aufbauen. Man kann es mit dem argentinischen Schriftsteller Jorge Luis Borges einen »jardin de los senderos que se bifurcan«,⁴⁰ nennen, einen Garten, dessen Pfade sich verzweigen. Denn Tomás Maldonado grüßt uns heute aus Buenos Aires, wo er mit uns ein gemeinsames interdisziplinäres Labor, das *Centro Internacional de Diseño del Conocimiento »Tomás Maldonado«* aufbaut – als wäre er selbst eine Faltung aus der Vergangenheit der Ulmer Hochschule für Gestaltung in unsere Gegenwart. Diese gefaltete oder synthetische Geschichte ist mein Beitrag zur interdisziplinären Gestaltung: Durch sie kann historisches Wissen zu einem notwendigen Bestandteil der Gestaltung der Zukunft werden.

39 Siehe Serres 2008.

40 Borges 1948.

Literatur

- Ahn, Bok Yeop et al. (2010): *Printed Origami Structures*. In: *Advanced Materials*, vol. 22, no. 20, pp. 2251–2254.
- Borges, Jorge Luis (1948): *El jardín de los senderos que se bifurcan*. In: ders.: *Ficciones*. Buenos Aires: Sur 1941.
- Bréchet, Yves/Embury, J. David (2013): *Architected Materials*. In: *Scripta Materialia*, vol. 68, no. 1, pp. 1–3.
- Bühlmann, Vera/Hovestadt, Ludger (Hg.) (2013): *Printed Physics – Matalithikum I* (Applied Virtuality, 1). Wien: Springer.
- Deleuze, Gilles (1988): *Die Falte. Leibniz und der Barock*. Frankfurt: Suhrkamp 1995.
- Demaine, Erik D./O'Rourke, Joseph (2007): *Geometric Folding Algorithms. Linkages, Origami, Polyhedra*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dill, Ken A. et al. (2008): *The Protein Folding Problem*. In: *Annual Review of Biophysics*, vol. 37, pp. 289–316. Online: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2443096/> (last access: 1 June 2015).
- Felton, S. et al. (2014): *Applied Origami: A Method for Building Self-Folding Machines*. In: *Science*, vol. 345, no. 6197, pp. 664–666.
- Feynman, Richard (1960): *There is Plenty of Room at the Bottom. An Invitation to Enter a New Field of Physics*. In: *Engineering and Science*, vol. 23, no. 5, pp. 22–36. Online: <http://calteches.library.caltech.edu/1976/1/1960Bottom.pdf> (last access: 1 June 2015).
- Fichte, Johann Gottlieb (1794/95): *Grundlage der gesamten Wissenschaftslehre*. Jena.
- Fratzl, Peter et al. (2011): *Origami-Like Unfolding of Hydro-Actuated Ice-Plant Seed Capsules*. In: *Nature Communications*, vol. 2, p. 337. Online: <http://www.nature.com/ncomms/journal/v2/n6/full/ncomms1336.html> (last access: 1 June 2015).
- Fratzl, Peter/Dunlop, John W.C./Weinkamer, Richard (2013): *Materials Design Inspired by Nature. Function Through Inner Architecture*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Friedman, Michael (2016): *Two Beginnings of Geometry and Folding: Hermann Wiener and Sunara Row*. In: *Journal of the British Society for the History of Mathematics*.
- Fuller, Richard Buckminster (1975/79): *Synergetics. Explorations in the Geometry of Thinking*. 2 vol. London: Macmillan. Online: <https://fullerfuture.files.wordpress.com/2013/01/buckminsterfuller-synergetics.pdf> (last access: 5 August 2015).
- Geim, Andre K./MacDonald, Allan H. (2007): *Graphene: Exploring Carbon Flatland*. In: *Physics Today*, vol. 60, no. 8, pp. 35–41.
- Geim, Andre K./Novoselev, Konstantin S. (2007): *The Rise of Graphene*. In: *Nature Materials*, vol. 6, pp. 183–191. Online: <http://arxiv.org/ftp/cond-mat/papers/0702/0702595.pdf> (last access: 26 May 2015).
- Geim, Andre K./Kim, Philip (2008): *Carbon Wonderland*. In: *Scientific American*, vol. 298, no. 4, pp. 90–97. Online: http://pico.phys.columbia.edu/pdf_papers/SciAm_4_2008_PK.pdf (last access: 26 May 2015).
- Helmholtz, Hermann von (1877): *Über die akademische Freiheit der deutschen Universitäten: Rede beim Antritt des Rectorats an der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin am 15. October 1877*. Berlin: Hirschwald 1878. Online unter: http://edoc.hu-berlin.de/ebind/hdok/ho6_helmholtz/XML/index.xml?part=section&division=divo&chapter=2 (zuletzt aufgerufen: 1. Juni 2015).
- Hooke, Robert (1665): *Micrographia, or Some Physical Descriptions of Minute Bodies made by Magnifying Glasses with Observations and Inquiries Thereupon*. London: Royal Society. Online: <https://archive.org/details/mobot31753000817897> (last access: 2 June 2015).
- Kepes, György (Hg.) (1965): *Structures in Art and in Science*. New York: G. Braziller.
- Kittler, Friedrich (1986): *Grammophon, Film, Typewriter*. Berlin: Brinkmann & Bose.
- Kittler, Friedrich (1993): *Draculas Vermächtnis. Technische Schriften*. Leipzig: Reclam.
- Krause, Joachim/Lichtenstein, Claude (Hg.) (1999): *Your Private Sky: Richard Buckminster Fuller. The Art of Design Science*. Zürich: Lars Müller Publishers.
- Krause, Joachim/Lichtenstein, Claude (eds.) (2001): *Your Private Sky: Richard Buckminster Fuller. Discourse*. Zürich: Lars Müller Publishers.

Landa, Manuel De (1997): *A Thousand Years of Nonlinear History*. New York: Zone Books.

Mahr, Bernd u. a. (2001): *Mathematisch-strukturelle Grundlagen der Informatik*. 2. Aufl. Berlin: Springer.

Maldonado, Tomas/Bonsiepe, Gui (1964): *Wissenschaft und Gestaltung*. In: ulm. Zeitschrift der Hochschule für Gestaltung, Jg. 10, Nr. 11, S. 10–29.

Martinez et al. (2012): *Elastomeric Origami: Programmable Paper-Elastomer Composites as Pneumatic Actuators*. In: *Advanced Functional Materials*, vol. 22, no. 7, pp. 1376–1384.

Monge, Gaspard (1798): *Géométrie descriptive*. Paris: Baudouin.

Müller, Martin (in production, 2016): *First Species Whose Parent is a Computer – Synthetic Biology as Technoscience, Colonizing Futures, and The Problem of the Digital*. In: Hagen, Kristin/Engelhard, Magret/Toepfer, Georg (ed.): *Ambivalences of Creating Life. Societal and Philosophical Dimensions of Synthetic Biology*. Berlin: Springer.

Petroski, Henry (1990): *The Pencil. A History of Design and Circumstance*. New York: Alfred A. Knopf.

Prusinkiewicz, Przemyslaw/Barbier de Reuille, Pierre (2010): *Constraints of Space in Plant Development*. In: *Journal of Experimental Botany*, vol. 61, no. 8, pp. 2117–2129.

Rinker, Dagmar u. a. (Hg.) (2003): *ulmer modelle – modelle nach ulm. Hochschule für Gestaltung Ulm 1953–1968*. Stuttgart: Hatje Cantz.

Rothmund, Paul W. K. (2006): *Folding DNA to create nanoscale shapes and patterns*. In: *Nature*, vol. 440, pp. 297–302. Online: http://www.nature.com/nature/journal/v440/n7082/fig_tab/nature04586_F1.html (last access: 6 July 2015).

Row, Sundara T. (1893): *Geometric Exercises in Paper Folding*. Ed. by Wooster W./Smith, David E. Chicago/London: The Open Curt Pub. Company 1917. Online: <https://archive.org/details/tsundararowsgeooorowrich> (last access: 17 June 2015).

Schäffner, Wolfgang (2010): »The Design Turn. Eine wissenschaftliche Revolution im Geiste der Gestaltung«. In: Mareis, Claudia (Hg.): *Entwerfen – Wissen – Produzieren. Designforschung im Anwendungskontext*. Bielefeld: transcript, S. 33–46.

Schäffner, Wolfgang (2016): *Punkt 1.0 Zur Geschichte des analogen Codes in der Frühen Neuzeit*. Berlin/Zürich: diaphanes.

Serres, Michel (1968): *Le système de Leibniz et ses modèles mathématiques*. tome I: Étoiles, tome II: Schémas – Point. Paris: Presses Universitaires de France.

Serres, Michel (1992): *Aufklärungen. Fünf Gespräche mit Bruno Latour*. Berlin: Merve 2008.

Smith, Lloyd M. (2006): *Nanostructures: The Manifold Faces of DNA*. In: *Nature*, vol. 440, no. 7082, pp. 283–284.

Uversky, Vladimir (2010): *The Mysterious Unfoldome: Structureless, Underappreciated, Yet Vital Part of Any Given Proteome*. In: *Journal of Biomedicine and Biotechnology*, vol. 2010. Online: <http://dx.doi.org/10.1155/2010/568068> (last access: 1 June 2015).

Watrous, James (1957): *The Craft of Old Master Drawings*. Madison: University of Wisconsin Press.

Wiener, Hermann (1890): *Zur Theorie der Umwendungen*. In: *Berichte über die Verhandlungen der Königlich Sächsischen Gesellschaft der Wissenschaften zu Leipzig. Mathematisch-Physische Classe*, Nr. 42, S. 71–87.

Yockey, Hubert P. / Platzman, Robert L. / Quastler, Henry (eds.) (1958): *Symposium on Information Theory in Biology*. New York/London/Paris: Pergamon Press.

Zwick, Carola et al. (eds.) (2012): *The Digital Turn. Design in the Era of Interactive Technologies*. Berlin: eLab. Weisensee Academy of Art.



schaeffner@culture.hu-berlin.de

Principal Investigator, Sprecher

Basisprojekte: **Gender & Gestaltung, Gesundheit & Gestaltung, Historische Strukturuntersuchungen, Strukturwissenschaft & 3D-Code, Architekturen des Wissen**

Disziplin: **Kulturwissenschaft**

Wolfgang Schäffner, Wissenschafts- und Medienhistoriker, ist seit 2009 Professor für Wissens- und Kulturgeschichte an der Humboldt-Universität zu Berlin, seit 2012 Sprecher des Exzellenzclusters *Bild Wissen Gestaltung* und seit 2013 Direktor des Hermann von Helmholtz-Zentrums für Kulturtechnik. Seit 2005 wirkt er als Profesor invitado permanente und Direktor des Walter Gropius Forschungsprogramms an der Universidad de Buenos Aires. Zudem ist er Mitglied des wissenschaftlichen Beirats des Masterprogramms Teoría del Diseño Comunicacional der Universidad de Buenos Aires und des Masterprogramms Ciencia, Cultura y Tecnología der Universidad Autónoma de Madrid.