

Wie entsteht Neues?

Innovationen in der Chemie

Henning Hopf

Institut für Organische Chemie

Universität Braunschweig

h.hopf@tu-bs.de

5. SEC-Jahrestreffen, Braunschweig,
6.-8. Mai 2014

Was wir über die Wissenschaft der Zukunft wissen wollen, sind der Inhalt und die Art zukünftiger wissenschaftlicher Ideen und Theorien. Unglücklicherweise kann man neue Ideen nicht vorhersagen, seien es die Ideen, die Menschen in 10 Minuten oder in 10 Jahren haben werden. Wenn wir das doch versuchen, stecken wir von Anfang in einem logischen Dilemma: Wenn man eine Idee vorhersagen will, muss man eine Idee haben. Und wenn wir eine Idee haben, kann sie nicht länger Gegenstand einer Vorhersage sein.

Peter Medawar, *Pluto's Republic*, Oxford University Press, 1982, p. 287

In Wirklichkeit gibt es nichts Konservativeres als die Wissenschaften. Die Wissenschaft verlegt Eisenbahngleise und für Wissenschaftler ist es wichtig, dass sich ihre Arbeit auf diesen Gleisen bewegt.

Ludwig Wittgenstein

Wie ist das Neue entstanden?

Fallbeispiele aus Chemie, Physik, Mathematik und
anderen Gebieten

Kann man das Entdecken systematisch betreiben?

Die heuristische Methode

*Welche Bedingungen behindern/fördern das Entstehen von
Neuem?*

Fazit

Man hat gesagt: die Benzoltheorie sei wie ein Meteor am Himmel erschienen, sie sei absolut neu und unvermittelt gekommen. Meine Herren! So denkt der menschliche Geist nicht. Etwas absolut Neues ist noch niemals gedacht worden, sicher nicht in der Chemie. Wer, wie ich, von Jugend auf die Geschichte der Entwicklung seiner Wissenschaft mit Liebhaberei studiert, und dann später, wie es dem Alter ziemt, sich in neue gründlichere Studien der Klassiker vertieft hat, der kann versichern, keine Wissenschaft hat sich so stetig entwickelt wie die Chemie.

Man hat von Genie gesprochen und die Benzoltheorie als genial bezeichnet. Ich habe mich oft gefragt: was ist eigentlich genial, was ist ein Genie?

Man sagt, das Genie erkenne die Wahrheit, ohne den Beweis zu kennen. Ich zweifle nicht daran, dass schon in den ältesten Zeiten in dieser Weise gedacht worden ist.

Man sagt auch, das Genie denke in Sprüngen. Meine Herren, der wachende Geist denkt nicht Sprüngen. Das ist ihm nicht gegeben.

Vielleicht ist es für Sie von Interesse, wenn ich durch höchst indiscrete Mitteilungen aus meinem geistigen Leben, Ihnen darlege, wie ich zu einzelnen meiner Gedanken gekommen bin. [Jetzt folgt Kekulé's 1. Traum – die Fahrt im Bus.] Der Ruf des Conducteurs: „Clapham Road“ erweckte mich aus meinen Träumereien, aber ich verbrachte einen Teil der Nacht, um wenigstens Skizzen jener Traumgebilde zu Papier zu bringen. So entstand die Structurtheorie.

Ähnlich ging es mit der Benzoltheorie Ich drehte den Stuhl nach dem Kamin und versank in einen Halbschlaf. Wieder gaukelten die Atome vor meinen Augen. Kleinere Gruppen hielten sich diesmal bescheiden im Hintergrund. Mein geistiges Auge, durch wiederholte Gesichte ähnlicher Art geschärft, unterschied jetzt größere Gebilde von mannigfacher Gestaltung. Lange Reihen, vielfach dichter zusammengefügt: Alles in Bewegung, schlangenartig sich windend und drehend. Und siehe, was war das? Eine der Schlangen erfasste den eigenen Schwanz und höhnisch wirbelte das Gebilde vor meinen Augen. Wie durch einen Blitzstrahl erwachte ich; auch diesmal verbrachte ich den Rest der Nacht, um die Consequenzen der Hypothese auszuarbeiten.

Lernen wir träumen, meine Herren, dann finden wir vielleicht die Wahrheit, aber hüten wir uns, unsere Träume zu veröffentlichen, ehe sie durch den wachenden Verstand geprüft worden sind.

F. A. Kekulé, *Ber. Dtsch. Chem. Ges.* 23, 1302 ff, 1890.

Unzählige Keime des geistigen Lebens erfüllen den Weltraum, aber nur in einzelnen, seltenen Geistern finden sie den Boden zu ihre Entwicklung; in ihnen wird die Idee, von der Niemand weiß, von wo sie stammt, in der schaffenden Tat lebendig

Justus von Liebig

Herbert C. Brown (1979), Hydroborierung, Synthesechemie

Warum entschied ich mich in einer anschließenden Doktorarbeit für ein so exotisches Arbeitsgebiet wie die Borhydride?

Zufällig schenkte mir meine damalige Freundin, Sarah Baylen, die bald darauf meine Frau wurde, zur Abschlussprüfung Alfred Stocks Buch „*The Hydrides of Boron and Silicon*“. Ich las es und fand Interesse an diesem Gebiet. Wie kam es aber, dass sie gerade dieses Buch auswählte? Nun, es war die Zeit der Wirtschaftskrise. Niemand von uns hatte viel Geld. So kaufte sie das billigste Chemiebuch (2.06 \$), das damals in der Buchhandlung der University of Chicago erhältlich war. So sehen die Ereignisse aus, die zu einer Karriere führen können!

Dudley R. Herschbach (1986), Molekularstrahlen, Reaktionsdynamik

Herschbach zitiert in seiner Nobel-Rede die folgende Geschichte von **Otto Stern (Stern-Gerlach-Experiment, Nobelpreis 1943)**:

Am nächsten Morgen wachte ich früh auf, zu früh um ins Labor zu gehen. Da es zum Verlassen des Bettes zu kalt war, blieb ich liegen, dachte über die Frage aus dem Seminar nach und kam dabei auf die Idee für das Experiment. Als ich ins Labor kam, stellte ich Gerlach zur Mitarbeit an, der ganz im Gegensatz zu mir ein geschickter Experimentator war. Das ging soweit, dass jeder von mir konstruierte Teil des Apparats von Gerlach noch einmal neu gemacht werden musste. Wir brachten den Apparat immer erst nach Mitternacht zum Laufen.

Als schließlich alles richtig zu funktionieren schien, hatten wir ein eigenartiges Erlebnis. Nach dem Belüften der Vakuumapparatur nahm Gerlach den Detektorflansch ab. Aber er konnte nicht eine Spur Silber auf dem Flansch sehen und gab ihn deshalb mir. Während Gerlach über meine Schulter schaute, als ich die Platte ganz genau betrachtete, sahen wir überrascht, wie allmählich zwei deutliche Spuren des Strahls erschienen. Wir wiederholten das Experiment mehrmals mit demselben mysteriösen Ergebnis. Schließlich verstanden wir, was da geschah. Ich war damals das, was man in den USA Assistant Professor nennt. Mein Gehalt war so niedrig, dass ich mir gute Zigarren nicht leisten konnte und deshalb schlechte rauchte. Diese enthalten eine Menge Schwefel, so dass mein Atem auf der Platte das Silber in Silbersulfid umwandelte, das pechschwarz und damit leicht sichtbar ist. Es war, wie wenn man einen photographischen Film entwickelt.

Johann Deisenhofer, Robert Huber, Hartmut Michel
(1988), Photosynthetisches Reaktionszentrum des
Purpurbakteriums *Rhodospseudomonas viridis*

Wie so häufig bei neuen wissenschaftlichen Entwicklungen und technischen Erfindungen war es eine zufällige Beobachtung, die den Anstoß für die Experimente gab, die schließlich zur Aufklärung der dreidimensionalen Struktur eines photochemischen Reaktionszentrums führten: Im August 1978 beobachtete ich, dass lipdifreies Bakteriorhodopsin bei Aufbewahrung im Tiefkühlschrank feste, vermutlich glasähnliche Aggregate bildete. Von da an war ich überzeugt, dass es möglich sein sollte, nicht nur diese Festkörper, sondern auch dreidimensionale Kristalle herzustellen.

Kary B. Mullis, (1993) PCR-Methode

Eines Freitags nachts fuhr ich wie üblich von Berkeley hinauf nach Mendocino, wo ich eine kleine Hütte ganz abgelegen in den Wäldern hatte. Meine Freundin, Jennifer Barnett, schlief neben mir. Ich dachte nach.

Bei dieser nächtlichen Fahrt durch die Berge hingen die Blütenstände der voll aufgeblühten kalifornischen Rosskastanien über die Straße, und die Luft war feucht, kühl und mit ihrem Duft erfüllt.

Ermutigt durch die Fortschritte bei meinem Gedankenexperiment dachte ich weiter darüber nach und auch über die Dinge, die möglicherweise schief gehen könnten.

HEUREKA!!! Das Ergebnis wäre genau das gleiche, nur die Signalintensität wäre verdoppelt. Und noch einmal HEUREKA!!! Ich könnte es immer wieder machen, und jedes Mal würde sich die Signalintensität verdoppeln.

Ich hielt beim Meilenstein 46.7 auf dem Highway 128. Im Handschuhfach fand ich etwas Papier und einen Stift. Ich rechnete nach, dass zwei hoch zehn etwa tausend ist, zwei hoch zwanzig etwa eine Millionen und zwei hoch dreißig ungefähr eine Milliarde.

Jennifer wollte, dass wir weiterfahren. Ich fuhr die Straße entlang und nach etwa einer Meile kam mir in den Sinn....

„Beim Zeus“, rief ich. Ich hatte die zwei ärgerlichsten Probleme der DNA-Chemie auf einen Schlag gelöst.

„Jennifer, wach auf, ich hab mit etwas Unglaubliches ausgedacht“.

Sie wachte nicht auf. Ich hatte auch schon früher über unglaubliche Dinge nachgedacht, die jedoch bei Tageslicht immer einiges von ihrem Glanz verloren hatten. Die neue Idee konnte bis morgen warten.

Aber ich schlief in jener Nacht nicht. Wir kamen zu meiner Hütte, und ich fing an, auf jede waagrechte Fläche, die beschreibbar war, sei es mit Kugelschreiber, Bleistift oder Kreide, bis zum Morgengrauen kleine Diagramme zu zeichnen. Erst dann fiel ich mit Hilfe einer letzten Flasche guten Cabernets aus dem Mendocino County in einen Halbschlaf.

Richard E. Smalley (1996), Fullerene

Entgegen der meisten schriftlichen Darstellungen glaube ich nicht, dass die Entdeckung der Fullerene viel mit astrophysikalischen Fragen wie dem Mechanismus der Bildung interstellarer Kohlenstoffmoleküle zu tun hatte. Sicherlich kam Kroto zur Klärung dieser Fragen nach Texas, und zweifellos haben wir wegen seines anstehenden Besuchs zum ersten mal Kohlenstoff in der AP2-Apparatur verwendet; dennoch ergab sich die Entdeckung der Fullerene zufällig, nicht zwangsläufig aus dieser Forschungsrichtung. C_{60} und die Fullerene wären mit AP2 oder einem anderen Gerät ohnehin innerhalb von ein oder zwei Jahren entdeckt worden. Zwei andere Gruppen hatten bereits aus ganz anderen Gründen Kohlenstoff in einer Ultraschall-Clusterstrahl-Apparatur eingesetzt.

Obwohl der Zufall in dieser Geschichte eine wesentliche Rolle gespielt hat, sollte man sich die Unvermeidlichkeit der Entdeckung vor Augen führen. Einzig herausragend in dieser Geschichte ist der Kohlenstoff. Fullerene werden erhalten, wo immer Kohlenstoff kondensiert. Wir brauchten nur eine Weile, um das herauszufinden.

Hideki Shirakawa (2000), Polyacetylen synthese, organische Metalle

Kurz nachdem ich zu Ikedas Arbeitsgruppe gestoßen war, gelang uns 1967 die direkte Synthese von Polyacetylen in Form eines dünnen Films – rein zufällig als Folge einer Panne. Nach einer Reihe von Kontrollversuchen war der Fehler lokalisiert: Wir hatten den Ziegler–Natta–Katalysator in beinahe tausendfach höherer Konzentration eingesetzt als üblich.

William S. Knowles (2001), asymmetrische katalytische Hydrierung

Eigentlich beschreibt dieser Beitrag die Entwicklungsgeschichte einer Erfindung. Der Erfindungsprozess an sich ist nicht eindeutig verstanden, aber eine wohl wichtige Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein einer gewaltigen Portion Naivität. Daher sind es meistens nicht die Experten, denen eine Erfindung gelingt; die Experten treten vielmehr erst in Erscheinung, sobald ein Fingerzeig gegeben wurde, und verwerten dann die Entdeckung. Unsere eigene Arbeit veranschaulicht dieses Phänomen auf ausgezeichnete Weise.

Paul Ehrlich (Nobelpreis Medizin, 1908), der Vater der Chemotherapie stellte einst fest, das für den Erfolg einer Entwicklung vier Gs erforderlich sind: Geist, Geld, Geduld und Glück. Das erste versteht sich von selbst. Man muss eine gute Idee haben. Das zweite ist essentiell. Man braucht finanzielle Unterstützung. Allerdings würde ich eine Ausgewogenheit empfehlen, denn zu viel oder zu wenig ist hinderlich. Für das dritte brauchst du Ausdauer. Die Dinge entwickeln sich niemals so schnell wie du es willst. Glück schließlich ist das Allerwichtigste. Ich vermute, dass keine Erfindung jemals ohne die gütige Mithilfe eines Zufalls gemacht wurde.

Le hasard ne favorise que les esprits préparés.

Louis Pasteur

Significant inventions are not mere accidents. The erroneous view that they are is widely held, and it is one that the scientific and technical community, unfortunately, has done little to dispel. Happenstance usually plays a part, to be sure, but there is much more to invention than the popular notion of a bolt out of the blue. Knowledge in depth and in breadth are virtual prerequisites. Unless the mind is thoroughly charged beforehand, the proverbial spark of genius, if it should manifest itself, probably will find nothing to ignite.

Paul Flory

Heuristik:

Erfindekunst, Wissenschaft von den Methoden und Regeln der Entdeckung und Erfindung von Theoremen bzw. der Konstruktion von Theorien auf nichtdeduktivem Wege.

In gewissem Sinne kann die heuristische Methode als Spezialfall der Trial-and-error-Methode aufgefasst werden. Sie arbeitet zum Unterschied von der deduktiven Methode mit Vermutungen, Analogien, Arbeitshypothesen, Modellen der verschiedensten Art.

Die heuristischen Methoden lassen sich auf elektronischen Rechenmaschinen simulieren. Solche heuristischen Maschinen arbeiten ähnlich wie moderne Schachspielautomaten, d.h. sie besitzen einen Satz von allgemeinen strategischen Prinzipien und verwenden diese Prinzipien je nach Lage des Falles in Kombination mit der Trial-and-error-Methode

G. Klaus, M. Buhr (Hrsgb.), *Philosophisches Wörterbuch*

A **heuristic** is an approach for directing one's attention in learning, discovery, or problem-solving. It is derived from the Greek "heurisko", which means "I find". Heuristic methods rely on assumptions, analogies, working hypotheses, models.

Typical rules for heuristic problem solving are rules such as:

- If you have difficulties understanding a problem, try to draw a picture.
- If you can't find a solution, assume that you have a solution and see what you can derive from that ("working backward").
- If the problem is abstract, try examining a concrete example.

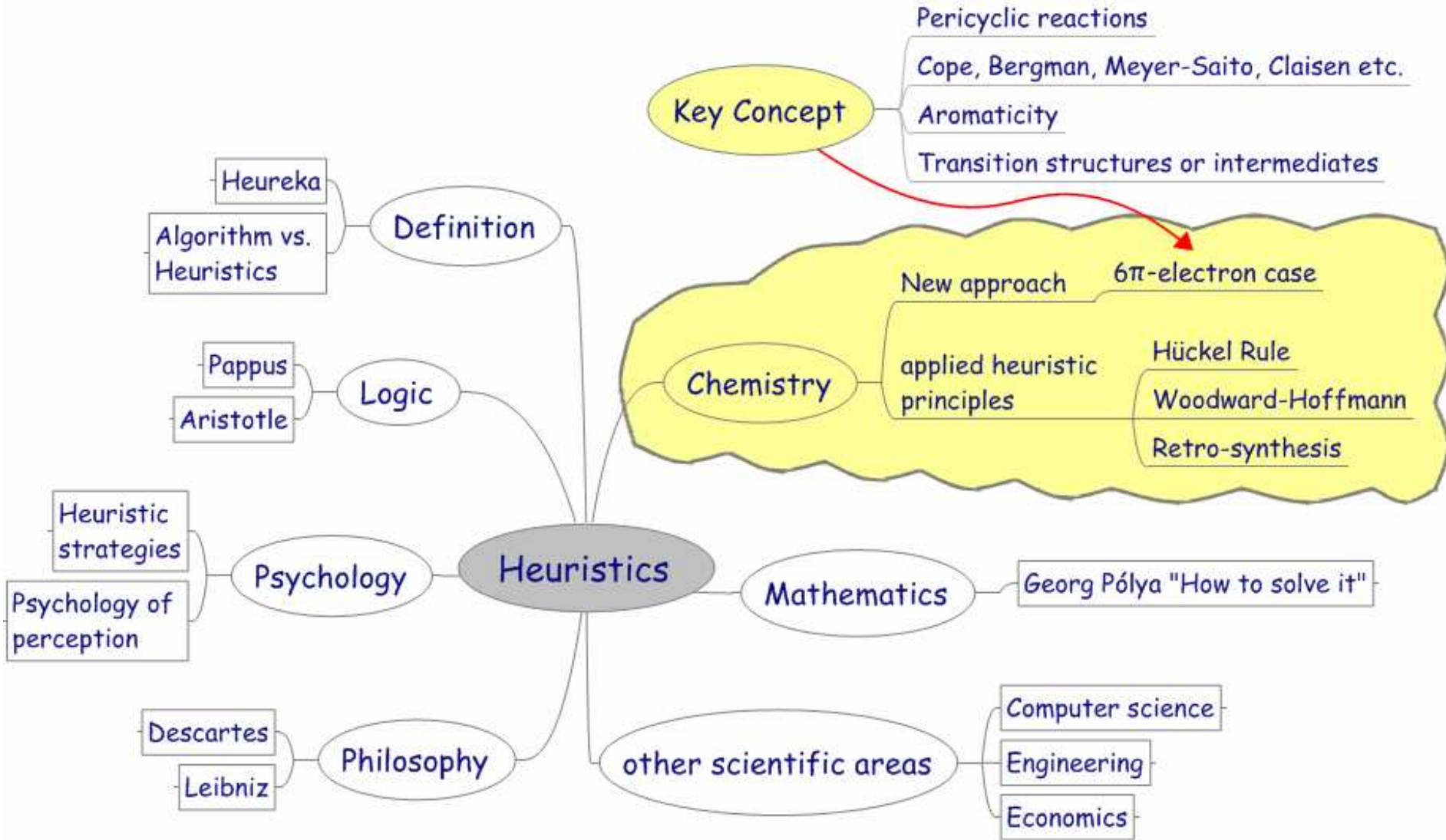
G. Pólya, *How to solve it*

Chemistry is full of heuristic principles: homology principle, "Umpolung", retro synthesis, numerous concepts involving polarity, "common sense", "rule of thumb".

Lit.: N. Graulich, H. Hopf, P. Schreiner, *Chem. Soc. Rev.* **2010**, 39, 1503-1512.

N. Graulich, H. Hopf, P. Schreiner, *Chemistry Eur. J.* **2011**, 17, 30-40.

N. Graulich, H. Hopf, P. Schreiner, *Chemistry Asian J.* **2011**, in press.



Heureka
Algorithm vs. Heuristics

Definition

Pappus
Aristotle

Logic

Heuristic strategies
Psychology of perception

Psychology

Descartes
Leibniz

Philosophy

Mathematics

Georg Pólya "How to solve it"

other scientific areas

Computer science
Engineering
Economics

Key Concept

Pericyclic reactions
Cope, Bergman, Meyer-Saito, Claisen etc.
Aromaticity
Transition structures or intermediates

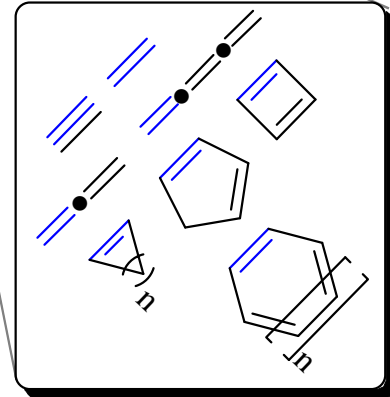
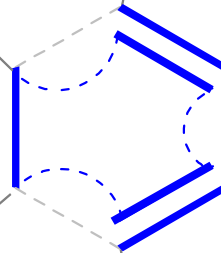
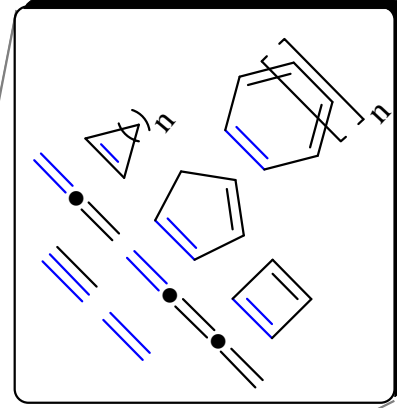
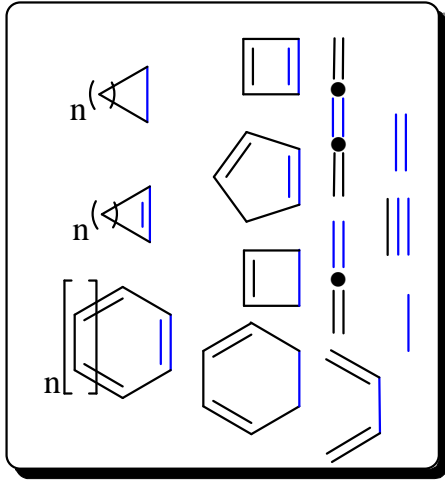
Chemistry

New approach

6π-electron case

applied heuristic principles

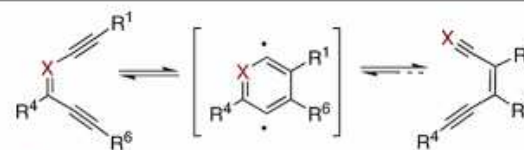
Hückel Rule
Woodward-Hoffmann
Retro-synthesis



Cope like reactions with Heteroatoms

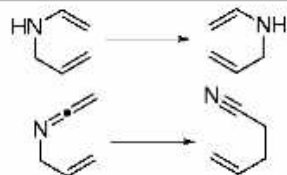


Tuesuwan, B.; Kerwin, S. M. *Biochemistry*, **2006**, *45*, 7265-7276.

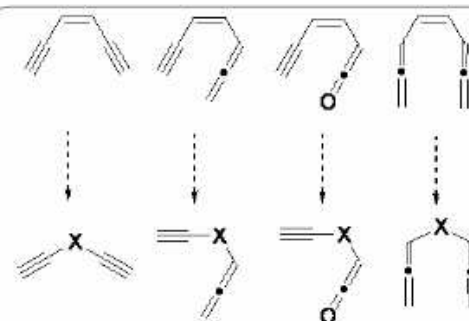


X = CH or N

Feng, L.; Zhang, A.; Kerwin, S. M. *Org. Lett.* **2006**, *8*, 1983-1986.



Walters, M. A. *J. Org. Chem.* **1996**, *61*, 978-983.



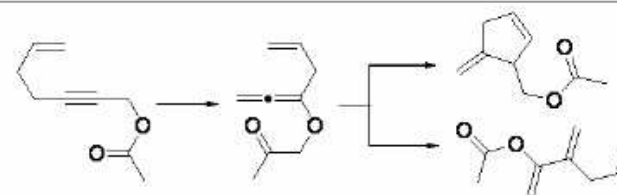
Bui, B. H.; Schreiner, P. R. *Eur. J. Org. Chem.* **2006**, 4187-4192.



Bellemin-Lapponnaz S.; Le Ny, J. P.; Dedieu, A. *Chem. Eur. J.* **1999**, *5*, 57-64.



Claisen, L.; Tietze, E. *Ber.* **1925**, 275-281.



Hopf, H.; Wolff, J. *Eur. J. Org. Chem.* **2001**, 4009-4030.



Musch, P. W.; Remenyi, C.; Helten, H.; Engels, B. *J. Am. Chem. Soc.* **2002**, *124*, 1823-1828.

Zusammenfassung: Wie entsteht Neues?

Irrationale und unverstandene Anteile:

zündende Idee, Eingebung, Traum, Enthüllung, Erscheinung -
der eigentliche Schöpfungsprozess?

Rationale Anteile:

kreativitätsfördernde Umgebung: Gespräche, Kontakte mit Gleichgesinnten

Geld (nicht zu viel)

Systematisches, deduktives Vorgehen, Heuristik

Akzeptanz unterschiedlicher Wege und Forschungsstile/-persönlichkeiten
("Freiheit")

Wie entsteht Neues nicht?

Bürokratisierung und Fremdkontrolle (neue Formen: Evaluierung, Ranking?)

Zu viel Geld?

Zu wenig Hindernisse?

politisch determinierte Programme (Leuchtturmprojekte, Cluster, Exzellenzinitiativen, Innovationsoffensiven, Qualitätspakte)

verordnete Interdisziplinarität, Fremdbestimmung

Konzentrationsprozesse, Großforschung - gibt es ein Optimum?

Von außen erzwungene Konkurrenz

Förderstrukturen - sollten den Forschern/innen angepasst sein, nicht umgekehrt

Literatur zum Thema:

Andrew Robinson

Sudden genius? The gradual path to creative breakthroughs

Oxford University Press, Oxford, 2010

Steven Johnson

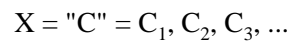
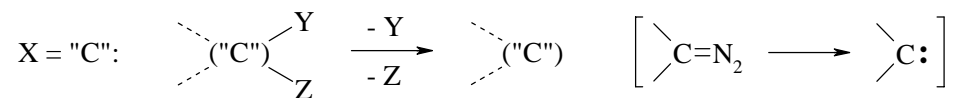
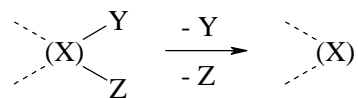
Where good ideas come from – the natural history of innovation

Riverhead Books, New York, 2010

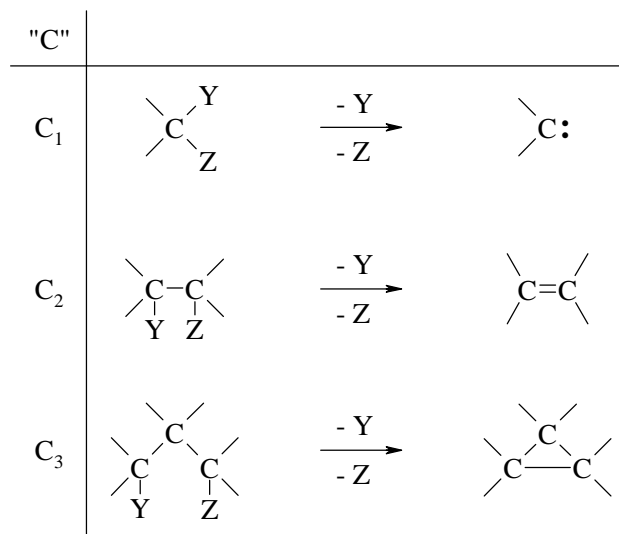
Zum Entdecken gehört Glück,
zum Erfinden Geist, und beide
können beides nicht entbehren.

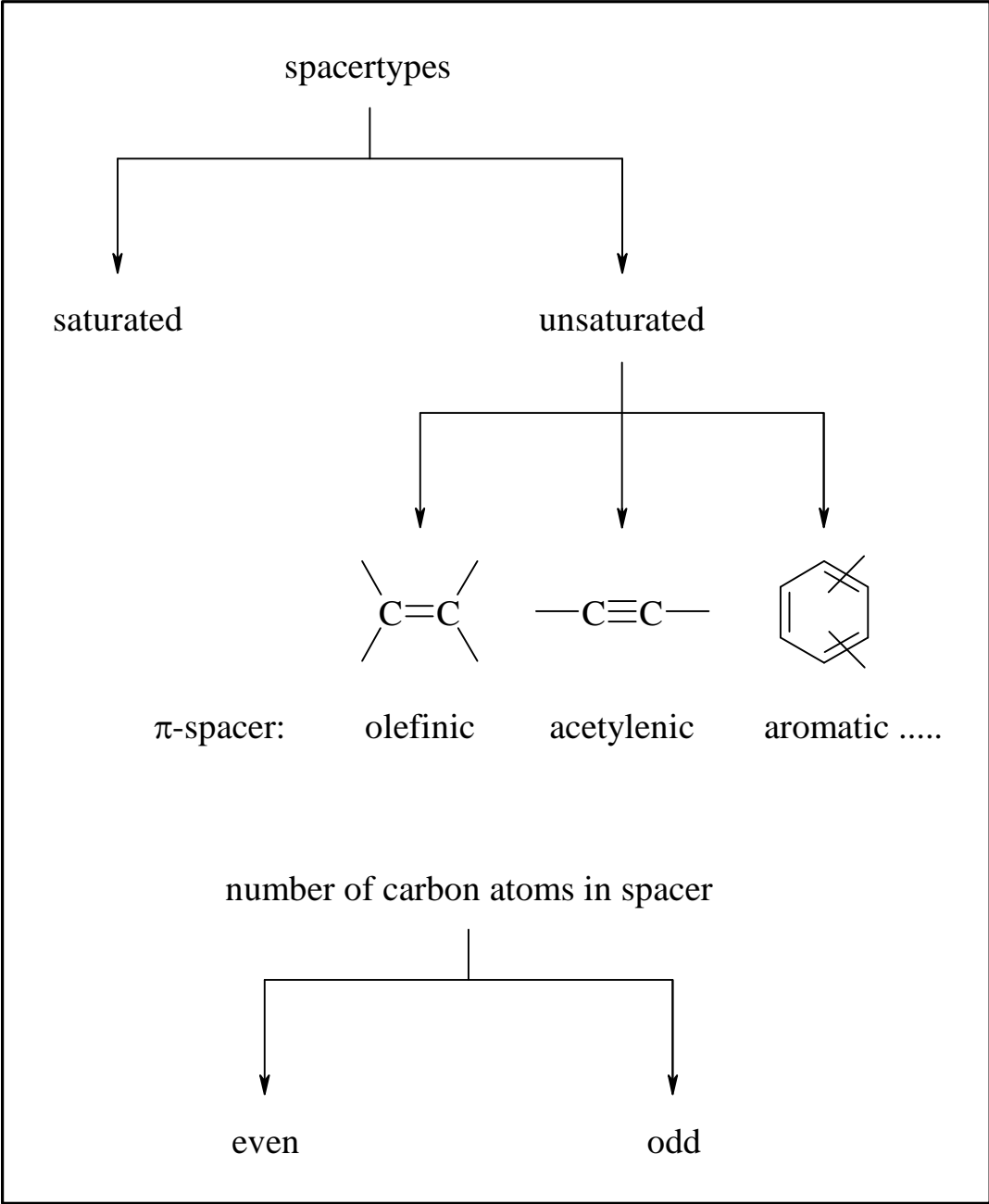
J. W. von Goethe

Elimination:

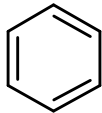
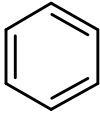


"C" = general organic fragment = spacer

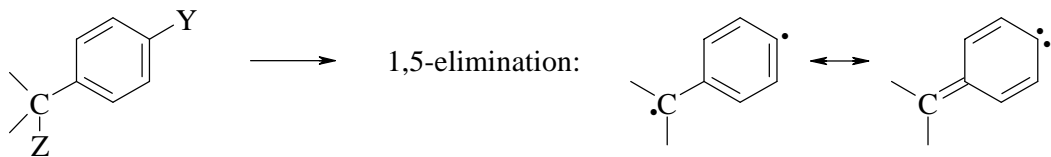
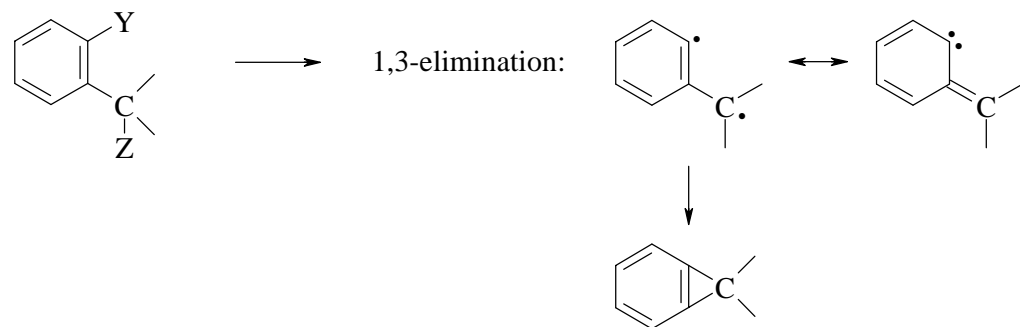
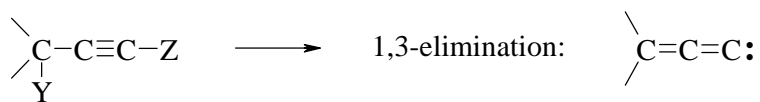
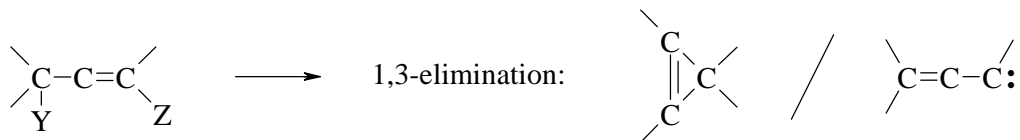
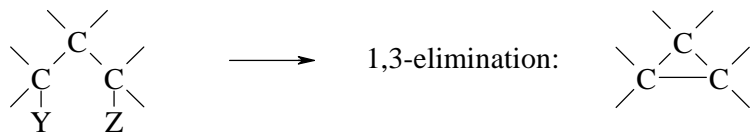
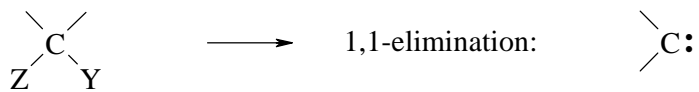




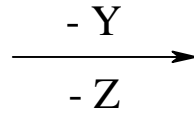
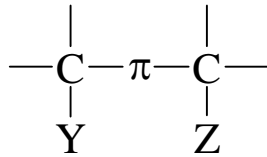
Search for even π -spacers

	0	=	≡		hetero- aromatics
=	X	X	X	X	X
≡	X		X	X	X
 (o, p)	X			X	X
hetero- aromatics	X				X
:	:				:	
:	:				:	
:	:				:	

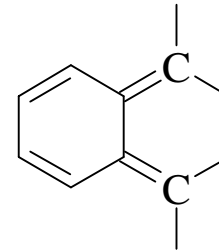
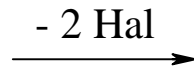
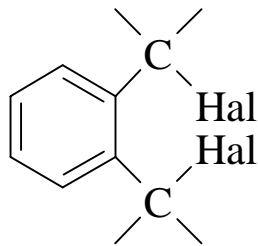
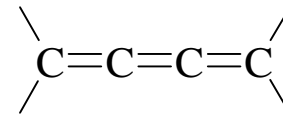
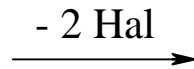
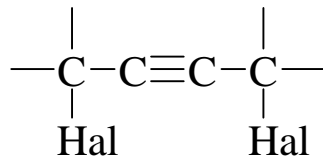
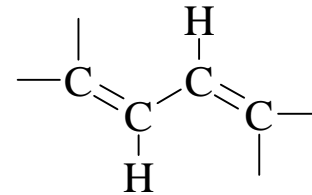
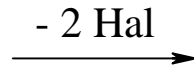
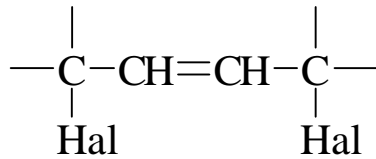
Search for odd π -spacers

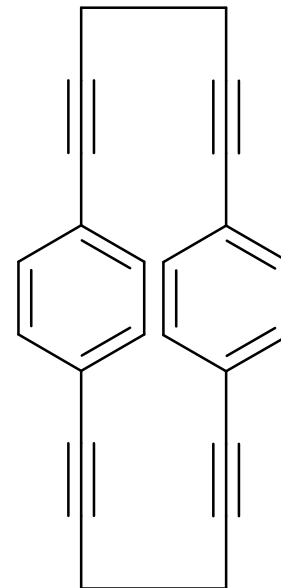
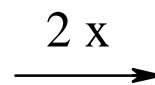
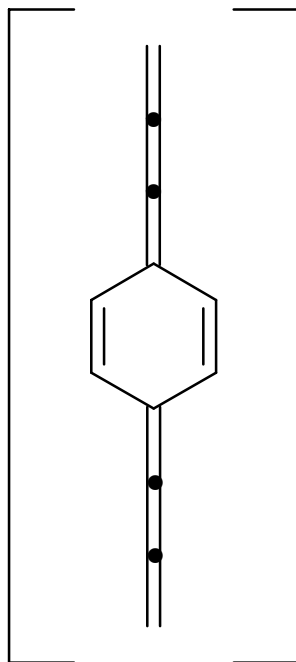
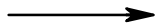
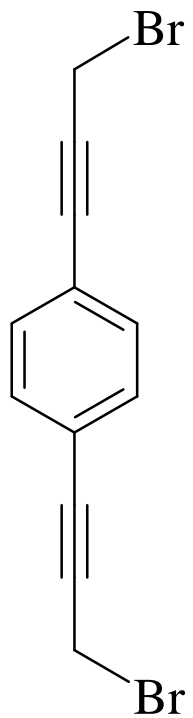


π -spacer:

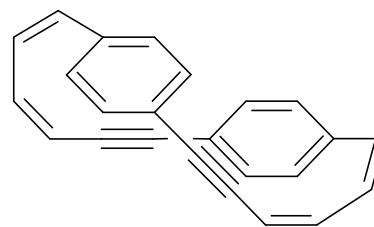
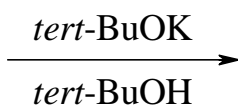
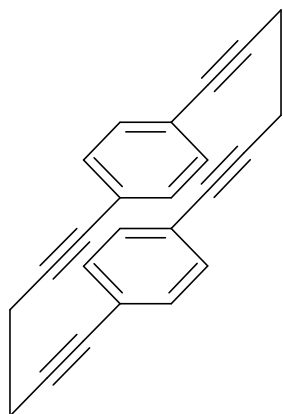


α, ω - oder 1, j -
elimination products

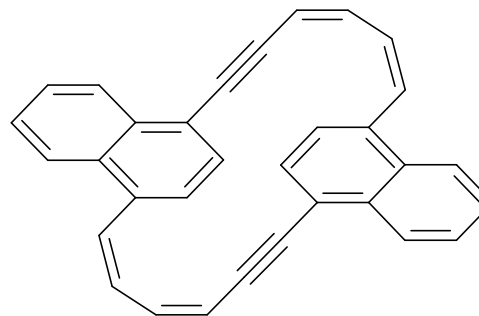
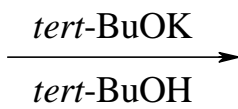
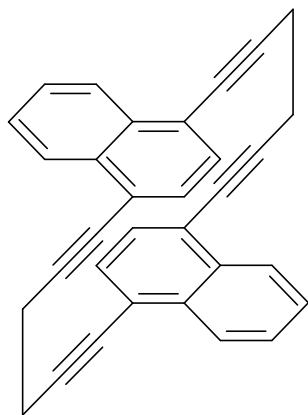




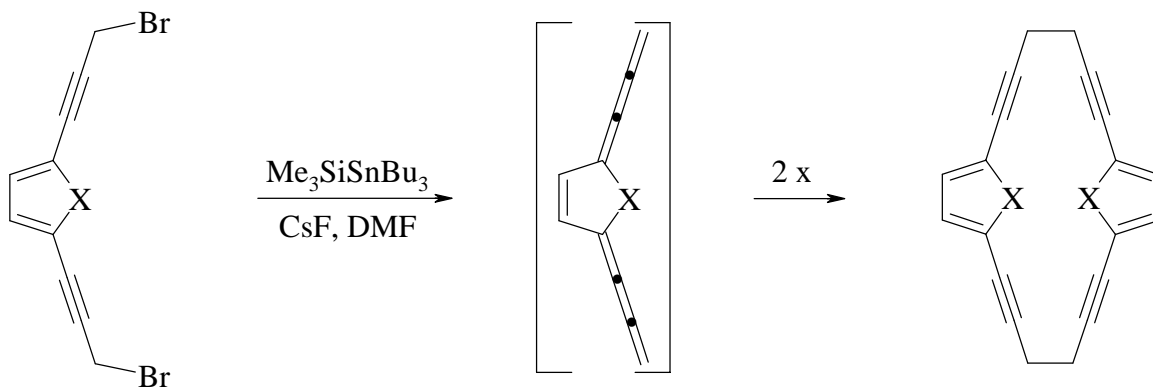
CH ₂ Cl ₂	0%
THF	trace
DMF	11%
CH ₃ CN	46%



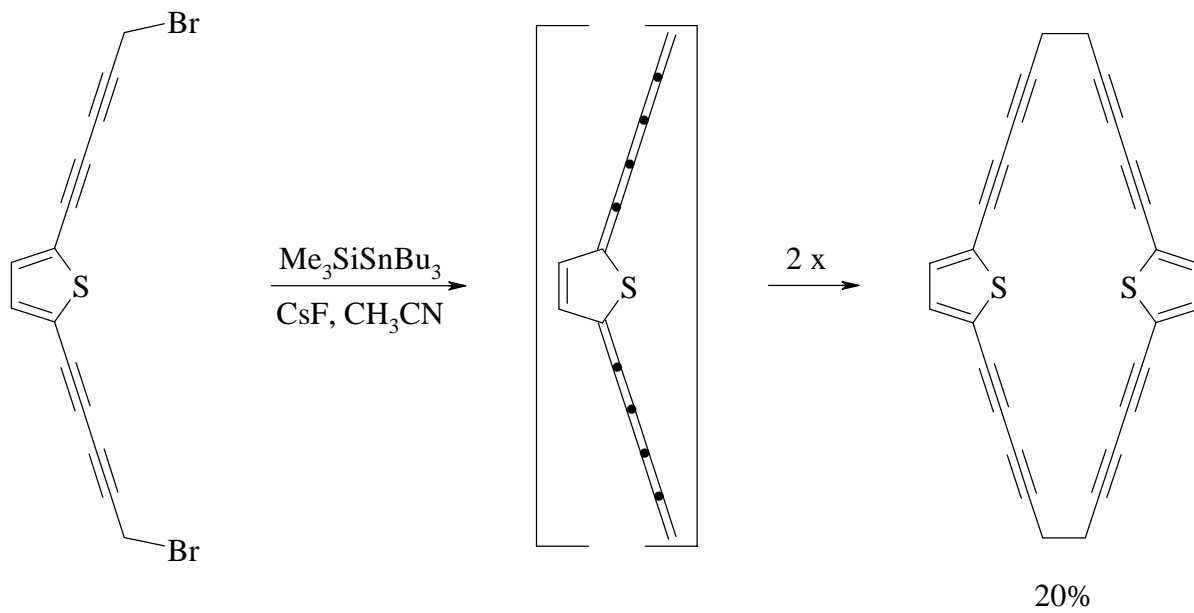
85%



96%



X	yield, %
O	26
S	30



Erwin Neher (1991) Patch clamp Technik, Ionenkanäle

Etwa 1980 hatten wir unsere Bemühungen um eine Verbesserung des Kontakts schon fast aufgegeben, als wir durch einen Zufall beobachteten, dass der Abdichtwiderstand plötzlich um zwei Größenordnungen anstieg, als leichter Unterdruck auf die Pipette gegeben wurde. Der resultierende Abdichtwiderstand war im Bereich von Gigaohm, die Abdichtung also ein „Gigaseal“. Es stellte sich heraus, dass ein Gigaseal reproduzierbar erzielt werden konnte, wenn Unterdruck angelegt und gleichzeitig einige einfache Maßnahmen getroffen wurden, um saubere Glasoberflächen zu gewährleisten, z.B. das Benutzen einer frischen Pipette für jedes Experiment und der Einsatz filtrierter Lösungen. Glücklicherweise war gerade zu diesem Zeitpunkt Fred Sigworth zu uns gestoßen. Mit seiner Ingenieurserfahrung verbesserte er die elektronischen Meßverstärker so, dass sie mit den gewachsenen Anforderungen durch die Fortschritte der Ableittechnik Schritt hielten.

Ernst Ruska (1986), Elektronenmikroskop

Infolge meines geschilderten Denkfehlers und aus der experimentellen Enttäuschung heraus beschloss ich, mich weiterhin lieber mit der magnetischen Linsen zu befassen. Ich berichte das nur deshalb so ausführlich, weil man daraus sieht, dass man auch gelegentlich das Glück haben kann, ohne überlegene Geisteskräfte auf einen besseren oder gar auf den allein richtigen Weg zu gelangen.

K. Barry Sharpless (2001), asymmetrische Synthese, Synthesechemie.

Ich bewundere Kollegen, die vielfältige Forschungsprojekte in Schwung und große Arbeitskreise auf Trab halten können; doch meine "Monomanie", die Schuld daran trägt, dass ich diese Fähigkeit nicht besitze, ist gleichzeitig meine Stärke, denn sie ermöglicht es mir, mich auch über Jahre hinweg auf ein einziges Thema zu konzentrieren. Ich weiß, dass manche Chemiker meinen Ansatz als „intuitiv“ bezeichnen – ein Terminus, der meines Erachtens die Konsequenz unterschätzt, die meine Methode auszeichnet; zutreffender wäre vielleicht „unstrukturiert“ oder „kontemplativ“. Viele aus meiner Mitarbeiterschar sind schell und wendig, schwingen sich auf einige wenige interessante Informationen auf und setzen sie schon mal zu vorläufigen Gedankengefügen zusammen, die dann auseinander genommen und zur Anpassung an neue Daten anders zusammengesetzt werden. Ich andererseits bin sehr hartnäckig:

mein Training bestand schließlich aus fleißigem Herumstochern und Aufwirbeln im Manasquan River – ein Lehrplan, auf dem sowohl Dringlichkeit als auch Gemächlichkeit standen, der Erkundung ohne vorherige Annahmen erlaubte und ohne die Struktur, die einem durch Fristen oder Konkurrenz oder zu viel oder zu wenig Wissen aufgezwungen wird.

Da ich, gezwungen durch meine Schüchternheit, lernte vieles selbst zu tun, gab (und gibt) es keinen richtigen oder falschen Weg, nur viele Wege, von denen sich einige jeweils mehr oder weniger gut für ein gegebenes Problem eignen. Dennoch herrscht strenge Disziplin: Alles, was beobachtet werden kann, sollte auch beobachtet werden, selbst wenn es später nur den farblosen Hintergrund bildet, aus dem die spannenden Dinge aufblitzen wie die Venus am Abendhimmel. Das Ziel ist immer, etwas Neues zu finden, hoffentlich etwas Unerwartetes und besser noch, bis dahin Unvorstellbares. Als ich Forscher an Labor- und Schreibtisch wurde, blieb meine Methode die Gleiche. Ich versuche, mir die Verpackung, in der die Information ankommt, wegzudenken, und lasse dann die Stückchen und Teile sich gemächlich umherbewegen, vergleichbar am ehesten mit Gegenständen, die langsam in Schwerelosigkeit umhertaumeln; doch mit der Zeit wird schließlich jede mögliche Beziehung zu anderen, früher eingegangene Informationen geprüft. Seitdem ich der Fakultät am Scripps Research Institute angehöre, habe ich herausgefunden, dass Schwimmen im Meer und Laufen am Strand ein ausgezeichnetes Medium für diese Art von Aktivität abgeben; der beste „Katalysator“ ist jedoch – unabhängig vom Klima – ein großzügiges, anregendes Gespräch.... Es ist eine enorme Konzentration erforderlich, dass beim Auftreten bestimmter Gedankenkonstellationen, die eine Verbindung zu irgendeiner früheren, vielleicht Jahrzehnte zurückliegende Beobachtung herstellen, kleine Funken aufblitzen. Leider fällt es mir mit zunehmendem Alter immer schwerer, diese Verbindungen herzustellen, deshalb treten die Funken nicht mehr so häufig auf, auch wenn sie so hell scheinen wie eh und je.dieses nicht die Methode ist, mit der die meisten Wissenschaftler ihre Arbeit angehen, und sie sich nicht gut zur Beschaffung von Fördermitteln eignet; die Anforderungen der meisten Forschungsgesellschaften sind auf die Beantwortung von Fragen ausgerichtet, die eher aus politischen als aus wissenschaftlichen Gründen gestellt werden. Auch kommt mein Ansatz den Bedürfnissen von Graduate-Studenten wenig entgegen, denn sie brauchen Publikationen für den Wettbewerb um einen Arbeitsplatz. Heute geht es in der Hochschulchemie bedeutend härter zu, und ich bin froh, zu meiner Zeit geboren zu sein.

1. Am Schreibtisch:

Von Leonard Euler (1707–1783) wird berichtet, dass er konzentriert und effektiv am Schreibtisch arbeiten und schreiben konnte, während seine vielen Kinder auf seinem Rücken herumturtelten und zwischen seinen Beinen spielten. Euler, einer der produktivsten Mathematiker der Neuzeit, war offenbar ohnehin kaum abzulenken: Auch die Erblindung 1771 hat seine Produktivität nicht ernsthaft eingeschränkt; fast die Hälfte seiner Werke entstand danach.

2. Im Computer:

Ein Computer kann keine Idee haben und deshalb auch keine Mathematik machen. Aber es gibt Entdeckungen am Computer, im Computer, die ohne Computer nicht möglich wären. Zu diesen Entdeckungen zählt sicher das berühmte Apfelmännchen; die bemerkenswerten fraktalen Strukturen, die unter Iterationen entstehen, sind ohne Rechner (und Bildschirm) nicht zu sehen.

3. Im Bett

Gauss in einem Brief aus dem Jahre 1796:

Das Geschichtliche jener Entdeckung ist bisher nirgends von mir öffentlich erwähnt, ich kann es aber sehr genau angeben. Der Tag war der 29. März 1796..... Durch angestregtes Nachdenken über den Zusammenhang aller Wurzeln untereinander nach arithmetischen Gründen glückte es mir, bei einem Ferienaufenthalt in Braunschweig am Morgen des gedachten Tages (ehe ich aus dem Bette aufgestanden war) diesen Zusammenhang auf das klarste anzuschauen, so dass ich die spezielle Anwendung auf das 17-Eck und die numerische Bestätigung auf der Stelle machen konnte.

4. In der Kirche

Es ist überliefert, dass **Dirichlet** den entscheidenden Gedanken zum Beweis des Einheits-Satzes fand, während er die Ostermesse in der Sixtinischen Kapelle des Vatikans hörte.

5. In Gefangenschaft

Jean Leray (1906 – 1998) entwickelte seine tiefsten und wichtigsten Erkenntnisse, fundamentale Beiträge zur modernen algebraischen Topologie wie die Spektralsequenzen und die Theorie der Garben, im Kriegsgefangenenlager Edelbach in Österreich.

Nothing is more favorable than prison for the abstract sciences!“ sagte Andre Weil, der in deutscher Kriegsgefangenschaft war.

6. Am Strand

Stephen Smale berichtet über die Umstände seiner Arbeit 1960 in Rio de Janeiro:

Especially enjoyable were the times on the beach. My work was mostly scribbling down ideas and trying to see how arguments could be put together. Deeply involved in this kind of thinking and working on a pad of paper, the distraction of the beach didn't bother me. Moreover, one could take time off from the research to swim

7. Paradies für Mathematiker

Für viele Mathematiker ist die perfekte Arbeitsumgebung ein Ort wie das mathematische Forschungsinstitut *Oberwolfach*, das recht abgelegen im Schwarzwald liegt. Es gibt dort Ruhe, gutes Essen, eine hervorragende Bibliothek, große Tafeln, Computer, mehrere Espressomaschinen, einen Billardtisch, ein Musikzimmer, einen großen Weinkeller, lange Wanderwege und Kollegen aus aller Welt.

Es existiert angeblich ein roter Tischtennisschläger aus Oberwolfach, auf dem Günter Frey mit einem schwarzen Filzstift Günther Harder begeistert seine Idee erklärt hat, die den Ausgangspunkt zum Beweis der Fermatschen Vermutung gebildet hat.

8. Ein Dachzimmer in Princeton

Der Beweis der Fermatschen Vermutung durch Andrew Wiles – dass $x^n + y^n = z^n$ für $n > 2$ keine Lösung in positiven ganzen Zahlen hat – gehört zu den großen dramatischen Stoffen der modernen Wissenschaft.

Wiles schreibt:

I was sitting at my desk on Monday morning, 19 September, examining the Kolyvagin–Flach method. It wasn't that I believed I could make it work, but I thought that at least I could explain why it didn't work. I thought I was clutching at straws, but I wanted to reassure myself. Suddenly, totally unexpectedly, I had this incredible revelation. I realised that although the Kolyvagin–Flach method wasn't working completely, it was all I needed to make my original Iwasawa theory work. [...] It was so indescribably beautiful....

I have never heard of anyone stumbling on something sitting down

Charles Kettering

Gottfried Benn:

Als ich die “*Morgue*” schrieb, mit der ich begann und die später in so viele Sprachen übersetzt wurde, war es abends, ich wohnte im Nordwesten von Berlin und hatte im Moabiter Krankenhaus einen Sektionskurs gehabt. Es war ein Zyklus von sechs Gedichten, die alle in der gleichen Stunde aufstiegen, sich heraufwarfen, da waren, vorher war nichts von ihnen da; als der Dämmerzustand endete, war ich leer, hungernd, taumelnd und stieg schwierig hervor aus dem großen Verfall.

Gottfried Benn, *Lebensweg eines Intellektualisten*

Gauss in einem Brief
aus dem Jahre 1796:

Das
Geschichtliche jener
Entdeckung ist bisher
nirgends von mir
öffentlich erwähnt,
ich kann es aber sehr
genau angeben. Der
Tag war der 29. März
1796..... Durch
angestregtes
Nachdenken über den
Zusammenhang aller
Wurzeln untereinander
nach arithmetischen
Gründen glückte es
mir, bei einem
Ferienaufenthalt in
Braunschweig