



Über zeitliche Proportionen der in uns ablaufenden Prozesse

Adalbert Feltz

(Trofaiach/ Österreich)

Veröffentlicht: 15. Dezember 2023

Abstract

In the last decades ultra-short laser pulses for the first time allowed to observe chemical bond formation in the range of femtoseconds ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$), which was verified for elementary reactions in living systems, too. The paper thematized remarkable time spread to our sense of time in seconds and minutes which we need for perceiving and recognizing events: 1s is in relation to 1fs as 31,7 million years to 1s. Recently internal charge shifts (polarizations) of atoms and molecules commonly always correlated with chemical bond formation have been detected in the range of attoseconds ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$). With respect to speed events on the microscopic and macroscopic scale appear to be comparable and time spreading mainly could be caused by the difference between happening at the atomic and molecular scale and macroscopic dimensions of ourselves. The article draws attention to bacteria indicating six magnitudes of time between starting connection of a nucleotide controlled by triple codes at a gen strand at 10^{-3} s and duplication after 20 minutes (about 10^3 s). About 60-fold more needs cell dividing of a person. Cell dividing within 6 to 8 magnitudes suggests that the formation of a molecule suitable for record of information requires very much more expense of time than the following growing phase up to duplication supported by given gen information.

Resümee

Ultrakurze Laserpulse haben in den letzten Jahrzehnten das Knüpfen einer chemischen Bindung und damit auch Elementarreaktionen in lebenden Systemen im Bereich von Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) detektiert. Die Abhandlung thematisiert die bemerkenswerte Zeitspreizung zu unserem Zeitempfinden in Sekunden und Minuten, in denen wir Ereignisse wahrnehmen und verarbeiten; denn 1 s verhält sich zu 1 fs wie 31,7 Mill. Jahre zu 1 s. Ladungsverschiebungen (Polarisationen) in Atomen und Molekülen, die mit der Bildung chemischer Bindungen stets einhergehen, sind im Bereich von Attosekunden ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) gemessen worden. In Bezug auf die Geschwindigkeit erweisen sich Ereignisse im mikroskopischen und makroskopischen Bereich als vergleichbar und die Zeitspreizung findet bereits durch den enormen Unterschied zwischen atomarem und molekularem Geschehen und den makroskopischen Dimensionen von uns selbst im Wesentlichen eine Erklärung. Bakterien benötigen vom Start des Anknüpfens eines Nukleotids gemäß den Vorgaben des Triple-Codes eines Genstrangs im Takt von 10^{-3} s bis zur Zellteilung nach 20 Minuten ca. 6 Größenordnungen, die Zellteilung beim Menschen ca. das 60.fache. Das Ereignis der Zellteilung in 6 bis 8 zeitlichen Größenordnungen legt angesichts der Bildung einer chemischen Bindung in 50 bis 100 fs nahe, dass die Entstehung eines zur Informationssteigerung geeigneten Moleküls einen zeitlich viel größeren Aufwand beansprucht als die anschließende Wachstumsphase bis zur Duplizierung mit Hilfe der in Genen gespeicherten Information.

Keywords/Schlüsselwörter

Femtosecond, attosecond, time spread to our sense of time, bacteria duplication, cell dividing
Femtosekunde, Attosekunde, Zeitspreizung zu unserem Zeitempfinden, Bakterien-Duplikation

Nach der Überlieferung wurde die Sekunde (s) im Altbabylonischen Reich - datiert von 1800 vor der Zeitrechnung, der Zeit Hammurapis, bis 1595 vor der Zeitrechnung, der Eroberung Babylons durch die Hethiter (Mittlere Bronzezeit) – aus dem Lunisolarkalender abgeleitet als 60. Teil einer Minute, letztere als der 60. Teil einer Stunde, 24 Stunden gleich 1 Tag und 6 Monate mit 30 sowie 6 Monate mit 29 Tagen gleich 1 Jahr. Außerdem gab es dann noch Schaltjahre mit einem 13. Monat. Da das Sekundenpendel auf dem Breitengrad von Babylon 992,5 mm Länge hat, ist zu vermuten, dass der Zusammenhang mit dem Urmaß, der Babylonischen Doppellelle von 990–996 mm, bereits zu dieser Zeit erkannt wurde. 1/10 davon war die Basis des Hohlmaßes, dessen Wassergewicht, die „Schwere Mine“ ergab mit 977,67 g das Gewichtmaß (Walden 1931).

Die Zeiteinheit Sekunde sowie das vermutlich davon abgeleitete Längen- und Hohlmaß kommen dem menschlichen Empfinden offenbar recht nahe; denn diese Größen haben seit nahezu 4 Jahrtausenden Bestand. Sekunde und Minute eignen sich sowohl zur Beschreibung beobachtbarer wie auch in uns selbst stattfindender Bewegungsabläufe z. B. bei der Erfassung beliebiger mechanischer Bewegungsvorgänge wie im Transportwesen oder im sportlichen Geschwindigkeitswettbewerb. Unser Herz schlägt etwa im Sekundentakt und das Auge, mit dem wir ca. 90% unserer Information in uns aufnehmen, ist in der Lage, bis zu maximal 30 Lichtpunkte/s getrennt wahrzunehmen. In Prokaryoten, z. B. *Escherichia coli* beträgt die Generationszeit einer Verdoppelung ca. 20 Minuten auf der Basis einer Geschwindigkeit für den durch Polymerase katalytisch gesteuerten Aufbau des komplementären Genstrangs von ca. 1000 Nukleotiden/s aus Bestandteilen des Cytoplasmas (Wikipedia 2023a). Bei Eukaryoten, z. B. beim Menschen, umfasst der Zellteilungszyklus aufgrund des viel größeren Genoms und einer geringeren Geschwindigkeit von 50 bis 100 Nukleotiden/s dagegen einen Zeitraum von ca. 19,5 Stunden (Wikipedia 2023b).

Derartige Prozesse wie auch ihre Wahrnehmung und gedankliche Verarbeitung sind das Resultat einer großen Zahl verschiedenster chemischer Einzelreaktionen, die in komplexer Weise ineinandergreifen und deren zeitlicher Verlauf jeweils gesondert Aufklärung erfordert. Dazu wird in der chemischen Kinetik z. B. in Gleichgewichtsreaktionen die Wechselwirkung von Ausgangsstoffen unter Bildung von Produktstoffen untersucht, indem man die Zeitabhängigkeit der Konzentrationsabnahme von Ausgangs- bzw. Zunahme von Produktstoffen, das heißt die Reaktionsrate unter isochoren und isothermen Bedingungen ermittelt. Letztere kann durch Katalysatoren erhöht werden, ändert sich je nach dem zugrunde liegenden Reaktionsmechanismus in der Zeit unterschiedlich, läuft von anfangs hohen Werten bis zum Gleichgewicht gegen null und wird durch eine Geschwindigkeitskonstante charakterisiert, die nach der Arrhenius-Gleichung mit der Temperatur in der Regel exponentiell zunimmt.

Die aktuelle Bewegung, mit der reagierende Atome bzw. Moleküle aufeinander zukommen, mit welcher Geschwindigkeit die Lösung und die Knüpfung neuer chemischer Bindungen erfolgt und wie rasch die Produktspezies aus dem mikroskopischen Umsetzungsknäuel entweichen, kann durch die Reaktionsrate als einer phänomenologischen Größe und deren zeitlicher Verfolgung nicht erschlossen werden. Die molekularkinetische Betrachtung lenkt mit der Anwendung der kinetischen Theorie der Gase (Stoßtheorie) den Blick auf die hohe Geschwindigkeit im Bereich von km/s, mit der die reagierenden Spezies in Wechselwirkung treten (Schwabe 1975a), und die Theorie des aktivierten Komplexes,

eines durch Abstoßungskräfte und Lockern von Bindungen bedingten Übergangszustandes (Schwabe 1975b; Evans/Polanyi 1935) die Aufmerksamkeit auf die Zeitskala von Schwingungsfrequenzen, indem die Zustandssummen der von den reagierenden Partikeln eingebrachten potentiellen Energien in die Rechnung einbezogen werden. Tatsächlich wurde auf diesem Weg an einer Auswahl von verschiedenen Reaktionen eine Absolutberechnung der Aktivierungsenergie sowie der Geschwindigkeitskonstanten mit Annäherung an in der phänomenologischen chemischen Kinetik experimentell zugängliche Größen erreicht.

Die direkte Beobachtung der aktuellen atomaren bzw. molekularen Bewegung beim Passieren des Übergangszustandes blieb der Verfügbarkeit gepulster Laser mit einer Zeitauflösung bis nahe an den Bereich von Schwingungsfrequenzen des sichtbaren Lichts und damit bis zu einigen Femtosekunden ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$) vorbehalten, die erst vor weniger als einem halben Jahrhundert in die experimentelle Technik Eingang fand (Moulton 1982; Moulton 1986). Die Ultrakurzzeitspektroskopie vermittelte erstmals einen Einblick in den Ablauf von Elementarschritten der Bildung und Spaltung chemischer Bindungen. Die Dynamik atomarer Bewegung über einen Abstand von ca. 1 \AA mit einer Geschwindigkeit von ca. 1 km/s verlangt die Aufzeichnung über ca. 100 fs . Der Bewegungsablauf kann mittels einer Weglängendifferenz von 1 \mu m zwischen einem Impuls und einem folgenden mit einer Zeitauflösung von $3,3 \text{ fs}$ verfolgt werden. Die Erfassung atomarer Bewegung in einem Reaktionsdiffusionsprozess mit seinen kurzlebigen Übergangszuständen ist Gegenstand der Femtochemie, die sich seitdem etabliert und, wie die Zahl der ständig steigenden Publikationen zeigt, rasant entwickelt hat. Ausgehend von der Fragmentierung von Iodcyan $\text{I-CN} \rightarrow \text{I} + \text{CN}$ 1985 (Zewail 1985) führten die bahnbrechenden Arbeiten von A. H. Zewail im Laboratory of Chemical Physics am California Institute of Technology Pasadena bereits 1999 zur Verleihung des Nobelpreises für Chemie (Zewail 2000).

Von zweiatomigen Molekülen, z. B. NaI im Molekularstrahl (Charon/Suzor-Weiner 1998) bis hin zu Makromolekülen wie Proteinen und DNA-Strukturen sind mit den Methoden der Femtochemie kovalente, ionogene und dative chemische Wechselwirkungen einschließlich Wasserstoffbrücken- und Van der Waals-Bindung in zuvor nicht zugänglicher detaillierter Weise beschrieben worden (Zewail 1994). Zahlreiche Publikationen betreffen Schwingungsanregung und Energieübertragung in Molekülen, Solvatationsprozesse in Flüssigkeiten (El-Shishtawy et al. 2018) und vor allem auch den Detailmechanismus photochemischer Prozesse wie der Photosynthese (Brumer/Shapiro 2012; Sarovar et al. 2010).

Demgegenüber vollzieht sich unsere Sinneswahrnehmung und die gedankliche Verarbeitung von Informationen im Prozess des Erkennens im gewohnten Zeittakt von Sekundenbruchteilen, ggf. bis hin zu Minuten oder sogar Stunden und bei längerer Beobachtungszeit und Theorienbildung in viel längeren Zeitabschnitten. Dabei unterliegt es nach den mittels zeitaufgelöster Ultrakurzzeit-Spektroskopie gewonnenen Erkenntnissen wohl kaum einem Zweifel, dass die Elementarschritte der Funktion unseres Organismus, der ständige Auf- und Umbau sowie Abbau von Molekülen bis hin zu Peptiden und DNA – Strukturen auf einer Zeitskala unvorstellbar kurzer ineinandergreifender Einzelaktionen von einigen 10^{-15} s beruht. Es folgt daraus für das Verhältnis zwischen dem Zeittakt atomarer bzw. molekularer Wechselwirkung im physiologischen Geschehen bis hin zum Puls unserer Herzfunktion bzw. Wahrnehmung eines Ereignisses in z. B. einer Sekunde der erstaunliche Wert von 1 zu ca. 30 Millionen Jahre ($31,7 \text{ Mio Jahre} = 10^{15} \text{ s}$). Blickt man von unserem Zeitempfinden etwa in Sekunden zurück, ergibt sich damit ein Zeitraum bis ins mittlere Tertiär, etwa der erdgeschichtlichen Epoche der Auffaltung des Himalaja und der Alpen.

Wechselwirkungen zwischen Atomen und Molekülen bzw. Molekülfragmenten wie sie bei der Ausbildung und Lösung chemischer Bindungen mittels Femtosekunden-Spektroskopie verfolgt werden können, sind in den agierenden Spezies i. allg. mit Verschiebungen elektronischer Ladungen (Polarisationen) verknüpft, deren Bewegungsverhalten zu detektieren zeitaufgelöste Laserpulse im Bereich von Attosekunden ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) ermöglicht haben. Durch Erzeugung sehr hoher Intensität von kurzzeitigen Femtosekunden-Laserpulsen und des dadurch ermöglichten Zugangs zur Hohen Harmonischen konnte eine Zeitauflösung im Bereich von bis zu weniger als 50 Attosekunden erreicht werden. Dafür wurden G. Mourou und D. Strickland zusammen mit A. Ashkin 2018 mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet (Strickland/Mourou 1985; Poffenberger 2018).

F. Krausz konnte mit seiner Gruppe auf diesem Weg 2001 aus extrem kurzem ultraviolettem Licht und Kontrolle der Pulsform von nur aus ein bis zwei Wellenzügen bestehenden intensiven Femtosekundenpulsen reproduzierbar gleiche Attosekunden-Lichtpulse in dichter Folge erzeugen. Er schuf damit die Voraussetzung, durch zwecks statistischer Sicherung bis zu 10^6 -facher Wiederholung der Einzelmessung die Bewegung von Elektronen auf subatomarer Skala in Echtzeit zu verfolgen (Hentschel et al. 2001; Drescher et al. 2020). Ihm wurde für seine bahnbrechenden messmethodischen Innovationen und die dadurch ermöglichten Beobachtungen bis in vorher unzugängliche räumliche und zeitliche Dimensionen 2023 der Nobelpreis für Physik zuerkannt (Wikipedia 2023c).

Bereits 2005 haben F. Krausz und R. Kienberger über erste Anwendungen der Attosekundenphysik berichtet (Krausz/Kienberger 2006). Völlig neue Details im Bewegungsverhalten elektronischer Ladungsträger wurden mit Hilfe der Attosekunden-Messtechnik in Halbleitern aufgespürt und ein zeitlicher Takt im Bereich von Femtosekunden in Chips wird für erreichbar gehalten (Czepel 2021). Die Perspektiven für die angewandte Festkörperphysik, die sich aus den Möglichkeiten der Attosekunden-Spektroskopie ergeben, sind auch Gegenstand einer Abhandlung von J. Vogelsang (Vogelsang 2023).

Das Ende dieser brisanten Entwicklung erscheint nicht absehbar. 2020 ist die Zeitauflösung im Bereich von Attosekunden noch übertroffen worden, indem es gelang, an H_2 -Molekülen, die mit Röntgenlicht der Röntgenstrahlungsquelle PETRA III am Hamburger Beschleunigerzentrum DESY bestrahlt wurden, 247 Zeptosekunden ($1 \text{ zs} = 10^{-21} \text{ s}$) für die Zeit zu messen, in der ein Photon ein H_2 -Molekül durchheilt (Grundmann et al. 2020).

Bei einem Bezug von $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ auf unser Zeitempfinden von angenommen 1 s würden sich mit 10^{18} s 31,7 Milliarden Jahre ergeben, womit das geschätzte Alter des Universums mit etwa 14 Milliarden um mehr als das Doppelte übertroffen werden würde.

Man könnte auf den Gedanken kommen, dass wir selbst so etwas wie ein Universum in uns bergen, in dem aus unvorstellbar großer Anzahl von miteinander verkoppelten extrem kurzzeitigen Einzelaktionen das Zeitempfinden in Sekunden und Minuten hervorgeht, das wir benötigen, um einen Sachverhalt in unserem Bewusstsein zu erfassen.

Die Elementarreaktionen in unserem Organismus finden, wie die Messungen zeigen, im zeitlichen Takt nahe der Frequenz des sichtbaren Lichts statt (385-789 Terahertz entsprechend ca. 0,26 - 0,13 fs) und sind damit von einer Sekunde vergleichbar weit entfernt wie wir in unserem Zeitempfinden von bis zu hundert Millionen Jahren zurück liegenden Ereignissen der erdgeschichtlichen Entwicklung. Bezieht man die um Größenordnungen schnelleren intra-atomaren und intra-molekularen Ladungsverschiebungen, mit denen Zerfall und Ausbildung chemischer Bindungen stets gekoppelt sind, in die Analogie mit ein, gelangt man rasch in ein Zeitraster, wie es Beobachtungen kosmischer Entwicklungen bisher nahelegen.

Ist der auf Beobachtungen und gesicherte experimentelle Befunde gegründete Erkenntnisprozess, von dem wir annehmen, dass er die außerhalb unseres Bewusstseins existierende Realität adäquat abbildet, tatsächlich unabhängig und inwieweit sind die in uns geltenden zeitlichen Proportionen zwischen Elementarreaktionen und Erkennen oder auch Taktfolge des Herzschlags etwa Projektion eines übergeordneten Zeitgefüges? Letzteres könnte bedeuten, dass unsere Erkenntnis, eingebettet in dieses Zeitgefüge, befangen und demzufolge nicht uneingeschränkt unabhängig ist. In Goethes Faust weist der Erdgeist den Faust, der sich ihm vergleichbar dünkt, zurecht: „Du gleichst dem Geist, den Du begreifst, nicht mir.“

Analogieschlüsse sind aber bekanntlich häufig nicht zielführend und verleiten zu falschen Schlussfolgerungen. Beim näheren Hinschauen auf vorhandene Befunde lassen sich durchaus Ansätze zur rationalen Erklärung der bemerkenswerten Zeitspreizung zwischen Elementarreaktionen im Takt von Femtosekunden und Ereignissen in Sekunden- und Minuten in lebenden Organismen aufspüren.

Von A. H. Zewail wurde die Entstehung einer chemischen Bindung über die kurze Wegstrecke $1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ cm}$ in 100 fs verfolgt, was einer Geschwindigkeit von 1 km/s entspricht, und letzterer Wert kommt der Nervenleitgeschwindigkeit der Skelettmuskulatur mit ca. 100 m/s (Wikipedia) bis auf den Faktor 10 und damit unserer Wahrnehmung von Signalen in Bruchteilen einer Sekunde bereits recht nahe. In Bezug auf die Geschwindigkeit sind Ereignisse im mikroskopischen und makroskopischen Bereich demnach vergleichbar, und die Zeitspreizung kann im Wesentlichen auf die enorme Breite zwischen atomarem und molekularem Geschehen und der demgegenüber makroskopischen körperlichen Dimension von uns selbst zurückgeführt werden.

In den millionenfach kleineren Lebensformen z. B. in Bakterien ($0,5 - 1 \mu\text{m}$) erfolgt das Anfügen eines komplementären Nukleotids aus dem Cytoplasma entsprechend den Vorgaben am bereits vorhandenen Gen-Strang im zeitlichen Rhythmus von 10^{-3} Sekunden. Der Strang wird dadurch rasch zur Doppelhelix komplettiert, die in ihm gespeicherte Information dupliziert, der Vorgang durch ein spezielles Peptid (Polymerase) katalytisch beschleunigt. Jedes Triplet von Nukleotiden codiert in bestimmten Bereichen des Genoms eine von 20 protein-bildenden Aminosäuren, deren Abfolge einschließlich definiertem Start und Abbruch den Aufbau eines Proteins oder Proteids mit jeweils spezieller Funktion. Letztere sind die materielle Basis für den Aufbau eines Bakteriums mit seinen Organellen und der einhüllenden Membran. Vom ersten Abgreifen einer Information durch Anfügen eines nächsten Nukleotids im Takt von 10^{-3} s als Start für eine Duplizierung bis zum fertig ausgebildeten Organismus vergehen in der Welt der Bakterien etwa 20 Minuten bzw. 1200 s. Die Duplizierung umfasst demnach ein Zeitintervall von ca. 6 Größenordnungen einer Sekunde, beim Menschen mit einer mittleren Größe der Körperzellen von $25 \mu\text{m}$ die Zellteilung 19,5 Stunden und damit das ca. 60-fache. Angesichts des Knüpfens einer chemischen Bindung in ca. 100 fs (10^{-13} s) und der daraus resultierenden 16 bzw. 18 Größenordnungen bis zur Zellteilung kann darauf geschlossen werden, dass die Entstehung eines zur Informationsspeicherung geeigneten Nukleotids im Rahmen einer solchen Betrachtung ca. 10 Größenordnungen einer Sekunde umfasst, das heißt es wäre dazu ein relativ viel größerer Zeitaufwand erforderlich.

Ausgehend vom Elementarschritt des Knüpfens von chemischen Bindungen ist die Synthese eines zur Informationsspeicherung geeigneten Moleküls, z. B. einer der 4 Purinbasen, angekoppelt an Ribose und verbunden mit Phosphorsäure zwecks Verbindung mit einem an der Helix benachbarten Nukleotid zweifellos ein vielstufiger und komplex verlaufender Prozess, was den dazu relativ viel größeren Zeitbedarf erklärt. Ausgehend von der im Gen gespeicherten Information kann der Aufbau der Proteine und Proteide in all

ihrer Vielfalt unterschiedlicher Funktion offenbar zielgerichteter, effektiver und dadurch bis zur Duplizierung millionenfach schneller vor sich gehen als die Entstehung eines Nukleotids im Ergebnis seiner Synthese aus Bestandteilen im Cytoplasma durch Knüpfen und der dazu benötigten definierten Abfolge chemischer Bindungen.

Bibliographie

- Brumer, Paul / Shapiro, Moshe (2012): "Molecular response in one-photon absorption via natural thermal light vs. pulsed laser excitation". *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 109(48) 19575–19578.
- Charon, Eric / Suzor-Weiner, Annick (1998): "Femtosecond dynamics of NaI ionization and dissociative ionization". *The Journal of Chemical Physics* 108(10), 3922–3932.
- Czepel, Robert (2021): Der Elektronenjäger. ORF-Interview mit Ferenc Krausz, 01. Juni 2021.
- Drescher, M. / Hentschel, M. / Kienberger, R. / et al. (2002): "Time-resolved atomic inner-shell spectroscopy". *Nature* 419(6909), 803–807.
- El-Shishtawy, Reda M. / Haddon, Robert C. / Al-Heniti, Saleh H. / et al. (2018): "Quantum transfer energy in the framework of time-dependent dipole-dipole interaction". *Results in Physics, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA* 8, 89–92.
- Evans, M. G. / Polanyi, M. (1935): "Some applications of the transition state method to the calculation of reaction velocities, especially in solution". *Transactions of the Faraday Society* 31, 875–894.
- Grundmann, Sven / Trabert, Daniel / Fehre, Kilian / et al. (2020): "Zeptosecond birth time delay in molecular photoionization". *Science* 370(6514), 339–341.
- Hentschel, M. / Kienberger, R. / Spielmann, C. / et al. (2001): "Attosecond metrology". *Nature* 414(6863) 509–513.
- Krausz, Ferenc / Kienberger, Reinhard (2006): "Attosekundenphysik: Erste Anwendungen einer jungen Disziplin". *Jahrbuch 2005/2006*, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching.
- Moulton, Peter (1982): "Ti-doped Sapphire: Tunable Solid-state Laser". *Optics News* 8(6), 9–13.
- Moulton, P. F. (1986): "Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃". *Journal of the Optical Society of America B* 3(1), 125–133.
- Poffenberger, Leah (2018): "The 2018 Nobel Prize in physics". *American Physical Society News* 27(10).
- Sarovar, Mohan / Ishizaki, Akihito / Fleming, Graham R. / Whaley, K. Brigitta (2010): "Quantum entanglement in photosynthetic light harvesting complexes". *Nature Physics* 6, 462–467.
- Schwabe, Kurt (1975a): "Molekulartheoretische Betrachtung – Stoßtheorie". In *Physikalische Chemie*, Akademie-Verlag, Berlin, S. 528–531.
- Schwabe, Kurt (1975b): "Theorie des Übergangszustandes". In *Physikalische Chemie*, Akademie-Verlag, Berlin, S. 534–545.
- Strickland, Donna / Mourou, Gerard (1985): "Compression of amplified chirped optical pulses". *Optics Communications* 56(3), 219–221.
- Vogelsang, Jan (2023): "Attosekunden-Spektroskopie: Von Atomen zu nanoskaligen Festkörpern". *Bunsen-Magazin* 5, 157–159.
- Walden, Paul (1931): *Maß, Zahl und Gewicht in der Chemie der Vergangenheit: ein Kapitel aus der Vorgeschichte des sogenannten quantitativen Zeitalters der Chemie*. F. Enke, Stuttgart.

- Wikipedia (2023a): Bakteriellles Wachstum. https://de.wikipedia.org/wiki/Bakterielles_Wachstum (letzter Zugriff: 10.11.2023).
- Wikipedia (2023b): Zellzyklus. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zellzyklus> (letzter Zugriff: 10.11.2023).
- Wikipedia (2023c): Ferenc Krausz. https://de.wikipedia.org/wiki/Ferenc_Krausz (letzter Zugriff: 10.11.2023).
- Wikipedia(2023d): Nervenleitgeschwindigkeit. <https://de.wikipedia.org/wiki/Nervenleitgeschwindigkeit> (letzter Zugriff 15.11.2023)
- Zewail, Ahmed H. (1985): "The Femtosecond Photofragment Spectroscopy: The Reaction $\text{ICN} \rightarrow \text{CN} + \text{I}^*$ ". *The Journal of Physical Chemistry* 89(24), 5141–5143.
- Zewail, Ahmed H. (1994): *Femtochemistry – Ultrafast Dynamics of the Chemical Bond*, Vols. I and II, World Scientific, New Jersey, Singapore.
- Zewail, Ahmed H. (2000): "Femtochemistry. Past, present, and future". *Pure and Applied Chemistry* 72(12), 2219–2231.