

Nanochemische Vorbedingungen für menschliches Zeitempfinden

Menschliches subjektives Zeitempfinden ist situationsabhängig und umfasst ein breites Zeitband. Albert Einstein soll einmal spaßeshalber gesagt haben: Wenn man mit einem netten Mädchen zwei Stunden lang zusammensitzt, meint man, es wäre eine Minute. Sitzt man jedoch eine Minute auf einem heißen Ofen, meint man, es wären zwei Stunden; das sei Relativität.

Im Gegensatz zum subjektiven, sehr relativen Zeitempfinden lassen sich menschliche Tätigkeiten mit physikalischer Zeitmessung reproduzierbar messen und objektiv vergleichen. Menschliches Leben verläuft danach in einem Zeitfenster, das im unteren Bereich an jene hundertstel Sekunden grenzt, um die Hundert-Meter-Läufer wettkämpfen, und im oberen etwa die Lebensspanne hundertjähriger Menschen umfasst.

In der Nanowelt, der Welt der Milliardstel Meter, geht es meist viel schneller zu. Besonders kleine Moleküle wie die Sauerstoffmoleküle in unserer Luft sausen mit einer mittleren Geschwindigkeit von 480 Meter pro Sekunde durch den Raum. Das sind immerhin 1.728 Kilometer pro Stunde. Wegen der riesigen Menge von Molekülen in einem Kubikmeter Raumluft stoßen sie fortwährend zusammen, im Schnitt etwa 10 Milliarden Mal pro Sekunde (Young, H.D. / Freedmann, R.A. 2004).

Auch im wässrigen Milieu haben selbst große Moleküle noch eine sehr hohe Beweglichkeit und Kollisionsrate. Das führt dazu, dass bestimmte unterschiedliche Moleküle mit ihrer speziellen räumlichen Gestalt bei einem Zusammenprall - ähnlich zweier komplementärer Bausteine - einander erkennen können. In der Nanowelt heißt einander Erkennen, dass man aufgrund der räumlichen Architektur aneinander oder ineinander zusammenpasst. Ganz so wie ein Schlüssel sein Schloss erkennt, indem er nur dieses aufzusperren vermag. Nicht jedes Zusammentreffen von zueinander passenden Molekülen führt jedoch zu einer wechselseitigen Erkennung. Der zufällige Zusammenstoß muss zum Beispiel in der passenden räumlichen Orientierung und mit der richtigen Energie erfolgen. Oft befinden sich ferner die Rezeptoren räumlich weit entfernt von jenen Zellen, wo die Botenstoffe produziert werden, sodass zum Beispiel große Hormone mit ihren geringen

Diffusionsgeschwindigkeiten speziell entwickelte Transportsysteme wie den Blutkreislauf benötigen, um relativ schnell zu ihren entlegenen Rezeptoren zu gelangen und dort ihre Wirkung auszuüben.

Die temperaturbedingte Bewegungsenergie der Moleküle ermöglicht zwar das gegenseitige Erkennen, reicht jedoch bekanntlich für Lebensprozesse nicht aus. Physiologische Prozesse benötigen für ihren Ablauf vor allem Fremdenergie, die unmittelbar von der Sonne herrühren kann oder mittelbar über durch Sauerstoffatmung erzeugte energiereiche Moleküle bereitgestellt wird. Mit dieser chemischen Energie werden eine Fülle von Proteinen, Kohlenhydraten, Nukleinsäuren sowie Fettmoleküle aufgebaut. Sie alle dienen als Baustoffe, Botenstoffe oder als Informationsträger dem komplexen Geschehen in einer lebenden Zelle. Ein Teil der Fremdenergie ermöglicht außerdem die Evolution, indem sie für eine Abnahme der Entropie aufkommt und so erst evolutionäres Leben mit seinen immer geordneter und komplexer werdenden Strukturen und Funktionen ermöglicht.

Außer Energie und Materie ist Information vonnöten, um ein sinnvolles und lebensstüchtiges zelluläres Geschehen zu erreichen. Information steckt überall drinnen, in den Strukturen, in den Bauplänen und der Funktionssteuerung der Zellen. Der größte Teil der Struktur- und Funktions-Information der lebenden Zelle ist im Zellkern in der Erbsubstanz DNA gespeichert. Die jeweils benötigte Detailinformation wird dort abgelesen und wandert dann als Boten-RNA zu den Eiweißfabriken der Zelle, den Ribosomen, wo eine Vielfalt von Eiweißmolekülen, die als Baustoffe und Botenstoffe dienen, produziert wird. Für die Übersetzung der RNA-Basen-Sequenz in die entsprechende Aminosäure-Sequenz von Eiweißmolekülen brauchen Ribosomen Zeit, insbesondere im Falle großer Proteine mit tausenden von Aminosäuren, die zudem in tausenden Exemplaren schnell zur Verfügung stehen müssen. Plötzlich geht sogar der anscheinend so schnellen Nanowelt die Zeit aus. Was tun? Sie erfindet das Verfahren der Gleichzeitigkeit! Auf dem langen RNA-Faden sitzen hunderte Ribosomen wie Perlen auf einer Kette und wandern gleichzeitig ans andere Ende des RNA-Fadens. Dabei lesen alle Ribosom versetzt, aber gleichzeitig die RNA-Basen ab und verknüpfen in der richtigen Reihenfolge die jeweiligen Aminosäuren zu den gewünschten Eiweißmolekülen. Aus einer einzigen RNA-Kopie entstehen so hunderte Eiweißmoleküle knapp hintereinander. Im Schnitt entstehen so an einem RNA-Faden 100 bis 200 Proteine pro Sekunde und Zelle (*Silbernagel, S. / Despoupoulos, A.* ⁶2003).

Das komplexe Geschehen in der Zelle mit seiner Informationsspeicherung, dem Stofftransport, der Transkription von DNA zu Strukturbausteinen und Botenstoffen, mit der chemischen Energiegewinnung in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle, einschließlich der Informationsverarbeitung in Nervenzellen und einer Fülle von Stoffwechselprozessen - alles aufeinander abgestimmt und funktionstüchtig - gehört zu den großen, im einzelnen noch gar nicht erforschten Wundern der Natur. Unerforscht, weil das Geschehen auf der mikroskopisch kleinen Nanoskala dem Auge nicht unmittelbar zugänglich ist und nur indirekt durch mühsame und jahrelange Forschungsarbeit zu erschließen ist. Erst der Zusammenschluss individueller Zellen zu größeren Zellverbänden und höheren Organismen führt dann zu der uns geläufigen und sichtbaren Pflanzen- und Tierwelt. Moderne Forschungsmethoden ermöglichen uns zunehmend Einblicke in die Geheimnisse einer Nanowelt, die einen Vergleich mit den technischen und kulturellen Errungenschaften unserer Zivilisation nicht zu scheuen brauchen. Im Gegenteil, nanotechnologische Entwicklungen unserer Technik verdanken oft ihre Inspirationen dem Vorbild in der Natur.

Für bewusstes menschliches Zeitempfinden ist das Nervensystem verantwortlich. Es besteht aus rund 100 Milliarden Nervenzellen, welche untereinander über 1000 bis 10.000 Verzweigungen pro Nervenzelle zu einem ungemäin komplizierten Netzwerk verknüpft sind. In diesem Netzwerk wird Information dadurch verarbeitet, dass sich ein Signal entlang der Nervenzellenmembran ausbreitet. Die Erregungsförtpflanzung entlang der neuronalen Membran ist insofern eine Meisterleistung des Nanogeschehens, als die Erregung nicht in Richtung der vorhandenen Spannungsdifferenz von null an der Innenseite der Membran zur Außenseite mit minus 120 Millivolt wandert, was auch kaum zielführend wäre. Denn ein Strom durch die wenige Nanometer dicke Membran könnte ein Signal kaum über größere Entfernungen transportieren. Das Membranpotential von maximal 120 Millivolt entsteht mit Hilfe von Ionenpumpen an der Membran zwischen innen und außen. Zellmembranen sind etwa 10 Nanometer dick und aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung ausgezeichnete elektrische Isolatoren für elektrische Teilchen. Ionen können nur durch sie hindurch, wo geöffnete Kanäle sind oder wo komplex gebaute transmembranale Eiweißmoleküle Ionen unter Energieverbrauch gegen einen Spannungsgradienten transportieren. Solche Ionenpumpen erzeugen einen Spannungsgradienten und einzelne geöffnete Ionenkanäle lassen ihn wieder lokal abfallen. Der spontane Strom durch geöffnete Ionenkanäle kann dabei lediglich von der Innen- zur Außenseite der Membran fließen. Dennoch gelingt es den Nervenzellen mit diesem

Wechselspiel von sich öffnenden Ionenkanälen und Ionenpumpen Signale in Richtung der langen Faserfortsätze zu transportieren, also senkrecht zum Spannungsgradienten. Eine innovative Meisterleistung! Ionenkanäle sind, ebenso wie Ionenpumpen, über die gesamte Membran in Abständen von etwa einem Millimeter verteilt. Öffnet ein Ionenkanal, so fällt an dieser Stelle das Membranpotential, sodass zum nächsten, einen Millimeter weiter entfernten Ionenkanal, der noch geschlossen ist und noch einen 120 Millivolt Gradienten hat, plötzlich eine neue Spannungsdifferenz entsteht, diesmal aber in die Richtung der erwünschten Erregung. Die Ionenkanäle werden von der Membranspannung gesteuert und öffnen sich bereits durch eine geringe Erniedrigung des Potentials, etwa durch einen minimalen Ionenstrom von dem benachbarten, bereits geöffneten Kanal mit dem abgefallenen Membranpotential. Geöffnete Kanäle schließen wieder in Tausendstel Sekunden, damit bei Bedarf ohne große Verzögerung das nächste Aktionspotential die Nervenfasern entlang laufen kann. Der erforderliche Ionenstrom in Richtung der Erregung ist auf diese Weise minimal. Eine Nervenzelle feuert im Takt von etwa Tausendstel Sekunden. Die Erregung wandert mit einer Geschwindigkeit von 2 Meter pro Sekunde in langsamen und bis zu 100 Meter pro Sekunde in schnellen Neuronen. Die schnellen Neuronen verdanken ihre beschleunigte Stromleitung einer innovativen Fettisolation der neuronalen Membran zwischen den Ionenkanälen. Die biologische Evolution musste ohne metallische elektrische Leiter auskommen, die im Zusammenhang mit der Elektrotechnik unseren technischen Fortschritt der letzten 150 Jahre förmlich konstituierten. Die Natur schafft es dennoch, dass die Erregung senkrecht zum Membranspannungspotential der Neuronen wandert. Im Computer werden Signale mit schnellen Elektronen transportiert, im Nervensystem dagegen durch die Wanderung des durch schwache Ionenströme gesteuerten Öffnungszustandes von Ionenkanälen. Die Erregungssignale können sich auf diese Weise senkrecht zum vorhandenen Membranpotential schnell und verlässlich entlang der Nervenfasern fortpflanzen.

Wie erfolgt nun die Weitergabe des Erregungsstroms von einer Nervenzelle zu einer benachbarten Nervenzelle? An den Kontaktstellen zwischen einzelnen Nervenzellen, den Synapsen, kommen die Nervenfasermembranen auf einen Abstand von etwa 20 Nanometer einander sehr nahe. Ein direkter Ionenstromfluss in der extrazellulären Flüssigkeit von Membran zu Membran über diesen Spalt hinweg ist durchaus denkbar. Die Natur wählte jedoch einen anderen und noch dazu einen unerhört kreativen Weg, der völlig neue Möglichkeiten und Fulgurationen beinhaltet. Der synaptische Spalt zwischen zwei Neuronen wird mit Hilfe chemischer molekularer Botenstoffe, sog.

Neurotransmitter, überbrückt. Diese werden, ausgelöst von dem ankommenden Signal an der Synapse, in großer Zahl von der Nervenzelle ausgeschüttet und diffundieren relativ schnell durch den extrazellulären Spalt zur benachbarten Neuronenmembran, wo über Erkennungsmoleküle, die Rezeptoren, das Membranpotential der nächsten Nervenzelle erregt wird und die Erregung weiterlaufen kann.

Die Diffusion der Neurotransmitter im synaptischen Spalt ist allerdings gar kein schneller Prozess und dauert knapp Millisekunden, da ja der Transmitter auch wieder weggeräumt werden muss, sonst würde das empfangende Neuron nicht mehr aufhören zu feuern.

Synapsen erscheinen so als Wermutstropfen für die Geschwindigkeitsstrategie der Signalübermittlung, entpuppen sich beim genaueren Hinsehen jedoch als eine faszinierende Fulguration für das Gesamtsystem. An den Synapsen kommt es nämlich zur Interaktion der Informationsströme in den Nervenfasern mit der Chemie des gesamten Organismus. Spezielle Botenstoffe können zum Beispiel als Neuromodulatoren hier eingreifen und das Kommunikationsgeschehen in den Neuronen stark beeinflussen. Wirksamkeit und Effizienz der Synapsen sind davon abhängig, wie häufig Synapsen von Erregungen durchlaufen werden. Dadurch spielen sie bei Gedächtnisleistungen eine vorrangige Rolle.

Die Geschwindigkeit der Signalübertragung in Nervenfasern von einem Meter bis zu 100 Meter pro Sekunde und die synaptische Erregungsdiffusion von zehntel Millisekunden sind die grundlegenden Geschwindigkeitsbarrieren für die Funktion unseres Gehirns und damit auch für unser Denken und Fühlen. Unmittelbare Reflexe sind die schnellsten motorischen Reaktionen und erfolgen in Millisekunden. Die Reaktionszeiten beim Start eines Hundertmeterläufers liegen jedoch bereits in der Größenordnung von 100 Millisekunden, da der Startschuss erst sensorisch verarbeitet werden und die Information noch an die zuständigen Muskeln weitergeleitet werden muss.

Höhere Fähigkeiten unseres Gehirns bis hin zum Bewusstsein benötigen wegen des hohen Vernetzungsgrades nochmals Zeit. So ist es doch erstaunlich, dass bei dem riesigen Vernetzungsgrad über Milliarden von Synapsen und angesichts der insgesamt relativ langen neuronalen Wegstrecken mit vielen Synapsen wir dennoch sekundenschnell denken und fühlen können. Wir erkennen ein bekanntes Gesicht in Sekunden, eine hochkomplexe Leistung, für die nur wenig mehr Zeit benötigt wird, als die ihr zugrunde liegenden neuronalen Primärprozesse. Dass wir dennoch in Bruchteilen von Se-

kunden einen uns nahe stehenden Menschen erkennen können, liegt in der parallelen Arbeitsweise unseres Gehirns begründet. Visuelle Informationen werden in Komponenten wie Farbe, Bewegung, räumliche Orientierung und andere zerlegt und von verschiedenen, räumlich entfernten Neuronengruppen unabhängig voneinander, aber gleichzeitig verarbeitet und dann mit Erinnerungskomponenten und Gefühlskomponenten versehen zu einem komplexen Bewusstseinsbild und Gesamteindruck integriert.

Bewusstseinsbildung ist ein relativ langsamer Prozess. Willkürhandlungen werden sogar erst mit einer Verzögerung von mehr als einer halben Sekunde dem Bewusstsein gemeldet. In seinem berühmten Experiment zeigt Benjamin Libet (vgl. Roth, G. 2003, 486), dass Willkürhandlungen der Bewegungsorgane bereits ohne Wissen des Bewusstseins eine halbe Sekunde vorher vorbereitet werden, bevor das Bewusstsein glaubt, einen Entschluss gefasst zu haben. Nicht der bewusste Wille wäre demnach der Entscheidungsträger für unser Handeln, sondern unser Unbewusstes. In Momenten der Gefahr und der Zeitnot war Denken eben immer schon ein Luxus.

Da die Größenordnung von Millisekunden bei den Primärprozessen nicht gerade überwältigend ist, der Computer hat es bekanntlich mit seiner Lichtgeschwindigkeit viel leichter, verwendet die Natur zur Beschleunigung das Prinzip der Gleichzeitigkeit und der parallelen Bearbeitung. Bei komplexen Abläufen kommt es dadurch zu bemerkenswert kurzen Bearbeitungszeiten, insbesondere hinsichtlich des Integrationsprozesses, der zum Bewusstsein der Gegenwart führt, und zu dem simultan zahllose Gehirnareale mit Gedächtnisinformationen und Gefühlslagen beitragen. Ernst Pöppel (2000) zeigt sehr eindrucksvoll, wie unser Bewusstsein in Abschnitten von etwa drei Sekunden getaktet ist: Die Gegenwart dauert drei Sekunden und wird dann in diesem Rhythmus abgespeichert.

Im Blick auf die ungeheure Vielfalt und Komplexität des Geschehens im Nanobereich sollte die Hypothese, dass all unser Wahrnehmen, Denken, Fühlen und Handeln in der von Karl Popper (²2005) so genannten Welt 2 ein eindeutiges Korrelat in Welt 1, der Welt der Physik, Chemie und Physiologie habe, doch etwas leichter zu akzeptieren sein. Geist und Seele sind danach zwar Produkte der Nanochemie, stellen aber im Sinne einer Fulguration ganz neue Eigenschaften dar, die nicht im einzelnen Neuron und in den Teilen auftreten, sondern Eigenschaften des Ganzen sind. Geist und Seele und ihr zeitlicher Ablauf sind zwar offenbar abhängig von Neuronen, Synapsen und neuronalen Netzen. Sie sind jedoch keineswegs mit ihnen gleichzusetzen oder auf diese reduzierbar. Denn da ist ja noch jede Menge Information für

Struktur und Funktion dabei. Und Information ist eine andere und neue Kategorie als Materie und Energie.

Zusammenfassend ergibt sich im Organismus ein Bild von Nanozeit, das die unterschiedlichsten primären Nanogeschwindigkeiten zu einem Ganzen und komplexen Ablaufgeschehen vernetzt. Zur Verfügung standen der Evolution unterschiedliche Diffusionsgeschwindigkeiten und langsame chemische Reaktionen, die mit Enzymkatalysatoren stark beschleunigt werden können. Lichtgeschwindigkeit für die Informationsverarbeitung stand nicht zur Verfügung.

Die Evolution musste mit vorgegebenen Geschwindigkeiten arbeiten und stand vor der Aufgabe, die physikalisch-chemischen Nanogeschwindigkeiten mit den Anforderungen der Geschwindigkeitsphänomene der realen Welt, in der sich der Organismus im Wettbewerb entwickelte, in Einklang zu bringen. Geschwindigkeit, also diejenige Zeit, die man braucht, um eine Aufgabe zu erledigen oder eine Wegstrecke zurückzulegen, ist ein gewichtiger Selektionsfaktor im Geschehen der Entstehung der Arten. Höhere Geschwindigkeiten sind dem evolutionären Überleben meist dienlicher als langsame, beispielsweise bei der Jagd auf Beute. Aber Geschwindigkeit ist nicht alles. Je komplexer ein Organismus ist, umso eher kann er Zeitzwänge zugunsten anderer überlebenswichtiger Eigenschaften vernachlässigen. Die hohe Reproduktionsrate von Einzellern – Bakterien verdoppeln ihre Anzahl in wenigen Stunden – kontrastiert gehörig mit der jahrelangen Aufzucht der nächsten Generation beim Menschen. Und dennoch gibt es ihn, den Menschen, wengleich immer noch im Kampf mit sehr schnellen Mikroben. Schnelligkeit ist offenbar nur eine der verschiedenen Strategien fürs Überleben. Und zum Glück kochen alle Lebewesen mit denselben nanochemischen Voraussetzungen und Begrenzungen. Dennoch, oder gerade deswegen, werden im Zuge der Evolution durch kreative Einfälle immer wieder Beschleunigungen entdeckt und realisiert. Zeitökonomie scheint eine Grundkonstante der Evolution zu sein. Geht am Ribosom die Übersetzung des langen RNA-Fadens in das gewünschte Protein zu langsam, so setzen sich eben hunderte Ribosomen gleichzeitig auf denselben Faden, mit dem Ergebnis, dass in derselben Zeit dann eben hunderte identische Proteinmoleküle entstehen.

Das Prinzip der Gleichzeitigkeit, also der parallelen Bearbeitung, haben wir natürlich auch in unserer kulturellen Welt, der Welt 3 nach Popper, entwickelt. In den Schreibstuben des Mittelalters stellten zahlreiche Mönche gleichzeitig Kopien eines Buches her, dessen einzelne Abschrift ein ganzes

Menschenleben dauern konnte. Solange, bis Gutenberg kam und neue Zeitmaßstäbe für die Produktion von Büchern setzte.

Die Reizfortleitung in den Nervenfasern ist eine große evolutionäre Entwicklung gewesen. In Ermangelung der idealen metallischen elektrischen Leitfähigkeit mit Lichtgeschwindigkeit musste unter widrigen Bedingungen in wässrigen Systemen ein alternativer Weg gefunden werden, um Informationen weiterzuleiten. Die Diffusion von Signalmolekülen von einem Ort zum anderen, selbst in der durch einen Blutkreislauf beschleunigten Weise, war einfach zu langsam. Unsere eher träge Gefühlswelt ist immer noch Ausdruck dieser langsamen chemisch-hormonellen Signalausbreitung. Dagegen profitiert unser Denken von der schnelleren neuronal-synaptischen Übertragung der Erregungssignale. Die schon in frühen menschlichen Gesellschaften erfundene Methode der Rauchsignale oder die neuzeitlichen Kommunikationstechnologien zur Informationsweitergabe mit Lichtgeschwindigkeit blieben anderen lebenden Organismen bisher verschlossen. Konstitutive Barrieren sind schwer zu unterlaufen und nur durch einen Systemwechsel zu umgehen. Ein Marathonläufer braucht für die Strecke von 42,195 Kilometer etwas mehr als zwei Stunden, eine Barriere für den Menschen. Das Rauchsignal benötigt hierfür nur 0,14 Millisekunden.

Der kreative Umgang mit Zeit ist kein Monopol des Menschen, er durchzieht bewusst oder unbewusst unsere gesamte Schöpfung, die Nanowelt ebenso wie unsere tägliche Erfahrungswelt. Zeitökonomie ist bereits ein Charakteristikum der Nanowelt und nicht erst der kulturellen Evolution, wenngleich wir in Welt 3 völlig neuen Beschleunigungsmaßstäben ausgesetzt sind. Dennoch haben wir allen Grund, auch in Welt 3 einer schöpferischen Zukunft mit Vertrauen entgegensehen zu können. Denn Zeiten der Beschleunigung sowie Zeiten der Muße enthalten Fulgurationspotential sowohl für Destruktives als auch für Zukunftsfähiges und Fruchtbares. Erst im Nachhinein werden wir es genauer wissen.

Literatur

- CALVIN, William H. (2002): Die Sprache des Gehirns. Wie in unserem Bewusstsein Gedanken entstehen. - dtv 33074. München.
- DÜWEKE, Peter (2001): Kleine Geschichte der Hirnforschung. Von Descartes bis Eccles. - C.H.Beck. München.
- EDELMAN, Gerald M. / TONONI, Giulio (2004): Gehirn und Geist. Wie aus Materie Bewusstsein entsteht. - dtv 34074. München.

- EDELMAN, Gerald M. (2004): Das Licht des Geistes, Wie Bewusstsein entsteht. - Walter Verlag. Düsseldorf / Zürich.
- PÖPPEL, Ernst (2000): Grenzen des Bewusstseins. Wie kommen wir zur Zeit, und wie entsteht Wirklichkeit. – Insel Taschenbuch 2727. Frankfurt am Main.
- POPPER, Karl (²2005): Alles Leben ist Problemlösen. Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. – Piper. München.
- ROTH, Gerhard (2003): Aus der Sicht des Gehirns. - Suhrkamp Verlag. Frankfurt am Main.
- ROTH, Gerhard (2003): Fühlen, Denken, Handeln. Wie das Gehirn unser Verhalten steuert. – Suhrkamp Verlag Taschenbuch Wissenschaft 1678. Frankfurt am Main.
- SILBERNAGL, Stefan / DESPOPOULOS, Agamemnon (⁶2003): Taschenatlas der Physiologie. – Thieme. Stuttgart.
- SPITZER, Manfred (2000): Geist im Netz. Modelle für Lernen, Denken und Handeln. - Spektrum Akad. Verlag. Heidelberg.
- WIKIPEDIA: Die freie Enzyklopädie Online. <http://de.wikipedia.org/>
- YOUNG, Hugh D. / FREEDMANN, Roger A. (¹¹2004): University Physics. – Pearson Education Inc.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Matreier Gespräche - Schriftenreihe der
Forschungsgemeinschaft Wilheminenberg](#)

Jahr/Year: 2004

Band/Volume: [2004](#)

Autor(en)/Author(s): Wechsberg Manfred

Artikel/Article: [Nanochemische Vorbedingungen für menschliches
Zeitempfinden 97-105](#)