

Plastizität: Assoziationen aus der Neuropsychologie



**Prof. Dr. phil. Peter Brugger,
Rehabilitationszentrum Valens und Psychiatrische Universitätsklinik Zürich**

Überblick

Plastizität bedeutet die Formbarkeit oder Flexibilität eines Systems. Als Anpassungsreaktion an sich verändernde Umwelt- oder Reizbedingungen garantiert sie Stabilität und Effizienz eines Systems. Plastizität ist ein generelles biologisches Prinzip und manifestiert sich auf genetischer und phänotypischer Ebene. Neuronale Plastizität meint das Änderungspotential von Nervenverbänden in Anatomie und Funktion. Alles Lernen beruht auf plastischen Veränderungen. Entwicklungsdefizite können kompensiert werden durch Funktionsanpassungen, läsionsbedingte Defizite in Motorik und Kognition können ebenfalls teilkompensiert werden und Neurorehabilitation kann die partiellen Kompenstationen gezielt fördern. Wie der zugrunde liegende Vortrag gibt auch vorliegender Aufsatz eine knappe Übersicht über die Breite des Phänomens «Plastizität». Auf weiterführende Literatur wird verwiesen.

1. Arten von Plastizität

In der Biologie meint Plastizität die Verformbarkeit eines Systems mit dem Zweck, eine Funktion unter unterschiedlichen Umweltbedingungen auszuführen. Damit ist Plastizität ein Garant für langfristige Stabilität. Es gibt Plastizität auf genetischer Ebene; die Aktivierung bestimmter Gene kann epigenetisch geregelt sein. Als Reaktion auf ein wechselseitiges Angebot an Nährstoffen können Gene etwa ein- oder ausgeschaltet werden. Auf Ebene des Phänotypes kann sich ein Organismus ohne genetische Plastizität an sich verändernde Umweltbedingungen anpassen. Das Parade-

beispiel ist der Industriemelanismus des Birkenspanners: ein Birkenspanner ist größtenteils hell, mit kleinen dunklen Sprenkeln – optimal getarnt auf hellrindigen Birken. Während der Industrialisierung färbten sich Birkenrinden homogen dunkel. Dadurch erhielten zur Dunkelflügigkeit mutierte Individuen plötzlich einen selektiven Vorteil! Diesen Vorgang bezeichnet man als «phänotypische Plastizität».

«Sexuelle Plastizität» ist am weitesten verbreitet bei Fischen (Balcombe, 2020). Sie bezeichnet die Wandelbarkeit des Geschlechts einer Art, und ihr Prinzip ist wichtig zu kennen in einer Zeit der Genderstudien.

Auch marine Würmer sind uns Menschen weit überlegen in der plastischen Regulation des Geschlechterverhältnisses innerhalb einer Population. *Bonellia viridis* zeigt dies besonders anschaulich. Die würstchengroßen Weibchen lassen einen bis zu 2 Meter langen Rüssel in der Brandung hin und herschwenken. Wenn eins der knapp millimeter-kleinen Männchen auf einen solchen Rüssel trifft, bringt es der Lockstoff darauf in Ekstase; es wandert zum Mund des Weibchens hin, wird verschluckt und am Verdauungstrakt vorbei in eine Körperhöhle befördert, wo es zusammen mit anderen bereits verschluckten Männchen das Weibchen begattet.

Passiert dies dem Weibchen selten, wird aus den befruchteten Eiern Männchen, passiert es häufig, entstehen Weibchen – damit wird garantiert, dass eine *Bonellia viridis* Population ein möglichst ausgewogenes Geschlechterverhältnis zeigt. Solche Anpassungsleistungen werden von naiven Vertretern der These, dass der Mensch «die Krone der Schöpfung» darstelle, nicht genügend gewürdigt (z.B. Ramachandran, 2011; siehe Brugger, 2012 für eine Kritik solch anthropomorphen Denkens in der Biologie).

2. Erfahrungsabhängige Plastizität

Klinisch arbeitende Neuropsychologen kennen das engere Feld der neuronalen Plastizität und kortikalen Reorganisation. Anpassungsleistungen nach peripher oder zentral bedingten Gliedmaßeneinschränkungen (Amputation oder Hemiparese) gehören zu den im Alltag am häufigsten besprochenen Beispiele von Plastizität. Sie werden hier nicht besprochen; es sei auf die reiche Literatur verwiesen (als Einstieg eignen sich etwa Raffin, 2021 und Maier et al., 2019).

Hier seien einige Beispiele nicht-traumatisch bedingter Plastizität kurz besprochen, um die Universalität des Phänomens hervorzuheben. Auch Störungen in der frühen Entwicklung sind von erfahrungsabhängiger Plastizität be-

gleitet (Abschnitt 3). Abschnitt 4 behandelt schließlich die Prismenadaptation als Beispiel für erfahrungsabhängige Plastizität in der Neurorehabilitation.

Plastizität in der Motorik

(Adaptationseffekte in der Lokomotion)

«Sponaneous Alternation Behavior» (SAB) bezeichnet die Tendenz, eine einmal eingeschlagene Richtung in einem Labyrinth bei der nächsten freien Wahl zu vermeiden (Dember und Richman, 1989). Der Effekt zählt zu den universellsten biologischen Phänomenen überhaupt; er ist beim Menschen, bei Invertebraten und bei Einzellern zu beobachten. SAB ist eine Illustration von Kurzzeit-Plastizität im motorischen System.

Versuche mit Kellerasseln belegen dies anschaulich. Wird ein Individuum nach links gezwungen, verrichten die rechtsseitigen Beinpaare (Aussenseite der Linkskurve) mehr Arbeit als die linksseitigen. Die resultierende erhöhte Ermüdung führt dazu, dass bei der nächsten, freien Wahl die Gegenrichtung gewählt wird (Beale and Webster, 1971; vergl. auch meinen Beitrag im Newsletter des VFCR, Nr. 23, 2018). SAB ist nicht auf die Lokomotion beschränkt. Eine nicht-räumliche Form der SAB zeigt sich im Generieren von Zufallszahlen: hier wird das Nennen der gleichen Zahl zwei oder mehrere Male nacheinander vermieden (Brugger, 1997). SAB und die Vermeidung von Wiederholungen beim Zufallsgenerieren sind Plastizitätsphänomene; eine Reaktion hängt von vorhergehenden Reaktionen ab.

Plastizität in der Sensorik

(Adaptationseffekte in der Wahrnehmung)

Schaut man ungefähr eine Minute lang auf eine rote Fläche und wendet den Blick dann auf eine weiße, erscheint diese grün. Dieser Adaptations- oder Ermüdungseffekt zeugt von der Plastizität der farbspezifischen Zellen in der Netzhaut: Die relative Erregbarkeit von rot- respektive grünsensitiven Zäpfchen passt sich unmittelbar vorhergehenden Reaktionen an. Solch erfahrungsabhängige Plastizität ist ein Prinzip der visuellen Wahrnehmung auf allen Ebenen der Reizintegration. Sie ist retinal für die Farbadaptation, kortikal für die Beobachtung von Bewegungen oder für das Beurteilen des Geschlechts einer betrachteten androgenen Gestalt (vergl. meinen Beitrag im Newsletter des VFCR, Nr. 23, 2018).

Plastizität im Assoziieren

(Semantische Bahnung)

Entscheidungen, ob eine kurzzeitig gezeigte Buchstabensequenz ein sinnvolles Wort ist oder nicht («lexikalische Entscheidungen») hängen davon ab, welches Wort wir kurz zuvor inspiziert hatten. So werden die Buchstaben LÖWE rascher als Wort erkannt, wenn ihnen «MÄHNE» vorherging als wenn sie dem Wort «BUCH» folgt. Plastizität in assoziativen semantischen Netzwerken lässt uns die Buchstabenfolge BANK als Sitzgelegenheit erkennen, nachdem wir zum Beispiel «Park» gelesen haben. Wir denken aber

ans Geldinstitut, nachdem wir «Erspartes» gelesen hatten. Plastizität im Assoziieren erlaubt das Aufdecken von psychiatrischen Erkrankungen (Weisbrod et al., 1998) und ist auch ein Maß für die Esoterikneigung gesunder Versuchspersonen (Pizzagalli et al., 2001).

3. Plastizität in der frühen Entwicklung

Kätzchen, die in einer Umgebung aus lauter vertikalen Streifen aufwachsen, vermögen später waagrechte Reize in normaler Umwelt erst nicht wahrzunehmen. Richtungsspezifische Zellen in ihrem visuellen Kortex haben sich neu organisiert; die nie beanspruchten horizontal-sensitiven Zellen sind abgebaut worden («use it or lose it»). Sie können durch intensive Exposition mit horizontalen Ausrichtungen zwar wieder aktiviert werden, erreichen jedoch nie eine Funktionalität von normalem Ausmaß.

Geburtsblinde Menschen können lernen, mit den Fingerspitzen zu lesen. Die Buchstaben des Braille-Alphabets bestehen aus kleinen Nippelchen, die aus einer 2x3-Matrix hervorstehen oder nicht. Informationen über einen taktil gelesenen Text gelangen somit primär in den somatosensorischen Kortex. Die Okzipitallappen, die bei Blinden «arbeitslos» sind, springen aber nach einer gewissen Zeit des Lesetrainings unterstützend ein (Pascal-Leone & Torres, 1993).

Dass ihr Beitrag essentiell ist (und nicht bloss mit der taktilen Wahrnehmung korreliert), zeigen TMS-Experimente mit Blinden und Sehenden. Nur bei ersteren führt Störung okzipitaler Regionen zu Braille-Lesefehlern (Cohen et al., 1997). «Taktil-visuelle Substitution» geht weit über das Lesetraining hinaus. Sie wurde schon früh in den Neurowissenschaften eingesetzt, um Geburtsblinde ihre Umgebung «sehen» zu lassen. Über eine in Blickrichtung ausgerichtete Kamera werden Helligkeitsunterschiede in von sehr vielen feinen Stiftchen vermittelte Druckunterschiede übersetzt.

Damit entsteht ein «taktiles Bild», (historisch erst auf dem Rücken, dann auf der Stirn, in neuerer Zeit auch auf der Zunge); die blinde Person lernt, starken Druck mit ausgeprägter Helligkeit zu assoziieren, taktil-sensorische Information wird insofern als «Sehen» interpretiert, als dass auch Reize außerhalb des Tasträums erfasst werden können. Macpherson (2019) gibt eine Übersicht über wahrnehmungspsychologische und philosophische Aspekte der sensorischen Substitution, die mittlerweile auch Smartphone-Technologie nutzt.

4. Plastizität im Rahmen der kognitiven Neurorehabilitation

Plastizität bildet die physiologische Grundlage für viele neurorehabilitative Methoden (Johnson and Cohen, 2022 für eine Übersicht). Hier soll einzig das Beispiel der Prismenadaptation in der Rehabilitation des Negleks kurz besprochen werden. Yang et al. (2013) befanden diese Methode aufgrund einer systematischen Übersicht von

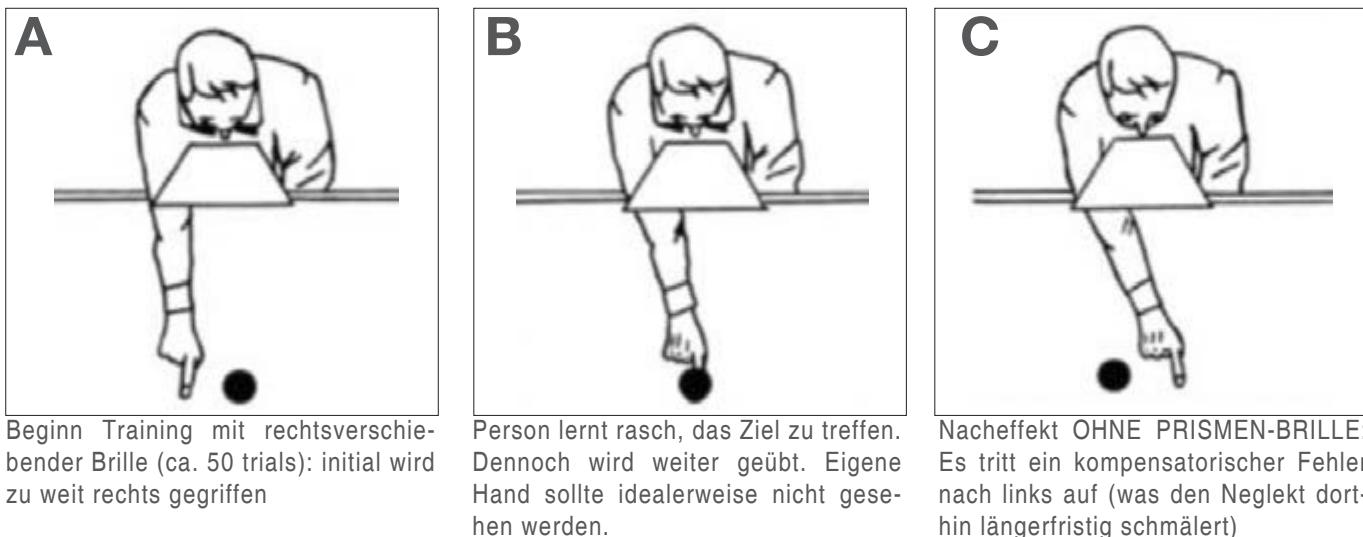


Abb. 1. Die drei Phasen der Neglekt-Therapie mittels Prismenbrille.

A: Patient(in) mit einer die Welt nach rechts verschiebenden Brille begeht initial einen rechtsseitigen Zeigefehler, lernt aber allmählich (**B**), diesen zu korrigieren. Nach Entfernung der Brille (**C**) tritt ein kompensatorischer Fehler nach links hin auf. Dieser wirkt auch längerfristig (über Tage hinweg) dem linksseitigen Neglekt entgegen.

randomisierten klinischen Versuchen als besonders erfolgversprechend. Barrett et al. (2012) spezifizierten weiter für welche Unterart Neglekt Prismenadaptation besonders empfehlenswert ist.

Das Prinzip der Methode veranschaulicht, wie selbst kurzfristiges Tragen einer Brille, die den Blick einer Person nach einer Seite hin verschiebt, als Nacheffekt ohne die Brille eine systematische Kompensationsreaktion zur anderen Seite hin auslöst. Speziell wird für Patienten mit linksseitigem Neglekt eine Brille mit Rechtsabweichung gewählt. Das Zeigen auf einen im Greifraum unmittelbar vorne liegenden Gegenstand (Punkt) erfolgt dadurch initial zu weit nach rechts (Abb. 1A).

Über mehrere Versuche hinweg lernt der Patient aber, akurat auf den Punkt zu zeigen; sein motorisches System hat sich plastisch der visuellen Verschiebung angepasst (Abb. 1B). Der therapeutische Effekt besteht dann in einer übertriebenen Linksabweichung, wenn die Brille weggelegt wird. Damit wird die läsionsbedingte Vernachlässigung nach links zumindest teilweise kompensiert (Abb. 1C). Erstaunlich ist, dass die Methode der präzisen Adaptation relativ lang andauernde Nacheffekte zeigt und auch den Neglekt im Vorstellungsräum verbessert.

Literatur:

- Balcombe J (2020) *Was Fische Wissen. Wie sie lieben, spielen, planen.* Hamburg: Mareverlag.
- Barrett AM, Goedert KM, Basso JC (2012) Prism adaptation for spatial neglect after stroke: translational practice gaps. *Nature Reviews Neurology* 8, 567-577.
- Beale IL, Webster DM (1971) The relevance of leg movement cues to turn alternation in woodlice (*porcellio scaber*). *Animal Behaviour* 19, 353-356.
- Brugge P (1997) Variables that influence the generation of random sequences: an update. *Perceptual and Motor Skills* 84, 627-661.
- Brugge P (2012) *Tabula Rama. Review of VS Ramachandran: The Tell-Tale Brain. Cognitive Neuropsychiatry* 17, 351-358.

Cohen LG, Celnik P, Pascual-Leone A, Corwell B, Falz L, Dambrosia J, Honda M, Sadato N, Gerloff C, Catalá MD, Hallett M. (1997) Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature* 389, 180-183.

Dember, WN, Richman, CL (1989) *Spontaneous alternation behavior.* New York: Springer.

Jacquin-Courtois S, O'Shea J, Luauté J, Pisella L, Revol P, Mizuno K, Rode G, Rossetti Y (2013) Rehabilitation of spatial neglect by prism adaptation. A peculiar expansion of sensorimotor after-effects to spatial cognition. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 37, 594-609.

Johnsson BP, Cohen LG (2022) Reward and plasticity: implications for neurorehabilitation. *Handbook of Clinical Neurology* 184, 331-340.

Liu H, Todd EV, Lokman PM, Lamm MS, Godwin JR, Gemell NJ (2017) Sexual plasticity: a fishy tale. *Molecular Reproduction and Development* 84, 171-194.

Macpherson F (Hrsg.) (2019) *Sensory Substitution and Augmentation.*

Oxford: Oxford University Press.

Maier M, Ballester BR, Verschure PFMJ (2019) Principles of neurorehabilitation based on motor learning and brain plasticity mechanisms. *Frontiers in Systems Neuroscience* 13, 74.

Pascual-Leone A, Torres F (1993) Sensorimotor cortex representation of the reading finger of Braille readers: an example of activity-induced cerebral plasticity in humans. *Brain* 116, 39-52.

Pizzagalli D, Lehmann D, Brugge P (2001) Lateralized direct and indirect semantic priming effects in subjects with paranormal experiences and beliefs. *Psychopathology* 34, 75-80.

Raffin E (2021) The various forms of sensorimotor plasticity following limb amputation and their link with rehabilitation strategies. *Revue Neurologique* 177, 1112-1120.

Ramachandran VS (2011) *The tell-tale brain: Unlocking the mystery of human nature.* London: William Heinemann.

Weisbrod M, Maier S, Harig S, Himmelsbach U, Spitzer M (1998) Lateralised semantic and indirect semantic priming effects in people with schizophrenia. *British Journal of Psychiatry* 172, 142-146.

Yang NYH, Zhou D, Chung RCK, Li-Tsang CWP, Fong KNK (2013) Rehabilitation interventions for unilateral neglect after stroke: a systematic review from 1997 through 2012. *frontiers in Human Neuroscience* 7, article 187, 1-11.