

„Predictive Coding“

– ein Mechanismus zur Wahrnehmung?

Einleitung

Im Folgenden wird über eine Theorie berichtet, die die Fähigkeit neuronaler Mechanismen herausstellt, Vorhersagen auf der Grundlage früherer sensorischer Inputs zu treffen, also durch Erfahrungen. Diese Theorie heißt „Prädiktive Kodierung“ und geht auf den britischen Neurowissenschaftler Karl J. Friston zurück. Sie hat in den kognitiven Neurowissenschaften in den letzten Jahrzehnten zunehmend an Aufmerksamkeit gewonnen und ist als ein bedeutender Paradigmenwechsel in der Informationsverarbeitung zu verstehen. Mit ihr wird eine andere Sicht auf neuronale Verarbeitungsprozesse angeboten und die Vorstellung von einer linearen Reiz-Reaktionskette verlassen, wonach eine datengesteuerte sensorische Reizauswertung im Kortex zu einer Wahrnehmung und ggf. motorischen Reaktion führt („stimulus-response behavior“; „bottom-up-Richtung“).

Wahrscheinlichkeitstheorie

Unsere sensorische Umgebung ist extrem reichhaltig und komplex strukturiert, so dass die sensorische Informationsverarbeitung unmöglich auf jedem Detail basieren kann. Eine der Hauptaussagen aktueller Theorien zur Gehirnfunktion ist, dass die sensorische Evidenz nicht ausreicht, um „Wahrnehmung“ zu erklären. Die Theorie der „prädiktiven Kodierung“ beschreibt „Wahrnehmung“ als einen konstruktiven Prozess, der die Integration von externen „Bottom-up-Sensorsignalen“ mit intern generierten „Top-down-Informationen“ erfordert und nutzt das „Bayes-Theorem“ der bedingten Wahrscheinlichkeiten.

Der Satz von Bayes, oder auch „Bayes-Theorem“ genannt, wurde 1763 vom Mathematiker Thomas Bayes entwickelt und bildet die Grundlage für die klassische frequentistische Statistik. Es handelt sich um eine logische Formel gemäß der Definition der bedingten Wahrscheinlichkeit. Die Wahrscheinlichkeit P , dass A eintritt, unter der Bedingung, dass B bereits eingetreten ist, entspricht dem Quotienten aus der Wahrscheinlichkeit, dass B eintritt, wenn A eingetreten ist, multipliziert mit der Wahrscheinlichkeit für A und der für B (Anderson, 1996).

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)}$$

Danach wird die Erwartung eines kommenden Ereignisses auf der Grundlage vorheriger Erfahrungen („A-priori-Wahrscheinlichkeit“) ermittelt. So generiert das Gehirn auf allen Ebenen der Verarbeitungshierarchie Rechenmodelle, die Vorhersagen über neuronale Aktivitäten auf den darunterliegenden Ebenen liefern. Diese Erwartungen werden als Feedback in die sensorischen Hirnareale geschickt, wo sie mit den rezipierten Sinnesdaten abgeglichen werden. Im Laufe der Zeit werden dann übergeordnete Repräsentationen im Gehirn geformt, die genauere Vorhersagen ermöglichen. Werden diese durch die eingehenden sensorischen Daten verletzt, entsteht ein „Vorhersagefehler“. Mangelhafte Signale wiederum, aus den

Unterschieden zwischen Vorhersage und sensorischem Input resultierend, werden zu kortikalen Ebenen gesendet („Feedforward-Signal“). Hier nimmt der Frontallappen des Gehirns, der präfrontale Kortex, eine Schlüsselrolle ein, um das „Vorhersagemodell“ zu aktualisieren, kontinuierlich zu verbessern und Fehler für die Zukunft zu minimieren. Höhere Ebenen des Nervensystems „prognostizieren“ also ständig den eingehenden Fluss von Sinnesdaten aus niedrigeren Ebenen. Das Gehirn des Menschen wird folglich als ein generatives Verarbeitungssystem betrachtet, das prädiktive, approximative „Bayes’sche Modelle“ lernt.

Wahrnehmung und Kognition

Eine Reihe von empirischen Studien mit bildgebenden Verfahren unterstützt die vorhersagende Datenverarbeitung als eine kanonische Berechnung der Kognition, deren grundlegende Funktion darin besteht, Regelmäßigkeiten im sensorischen Input in verschiedenen Domänen zu erkennen, um Vorhersage und Wahrnehmung zukünftig zu erleichtern. Wahrnehmung und Kognition sind also nicht nur von eingehenden Sinnesdaten abhängig, sondern sind auch ein Produkt von Erwartungen; das Gehirn sorgt dafür, dass Erfahrung einen Sinn ergibt. Wahrnehmungen können als Hypothesen darüber aufgefasst werden, was einen spezifischen Sinneseindruck verursacht hat. Wahrnehmung ist demnach ein kreativer Akt, der aus (bruchstückhaften) Sinnesdaten im Verbund mit Erfahrungen eine Realität konstruiert. Dieses Modell hat sich u. a. in der Hör-

forschung bewährt. „Prädiktive Kodierung“ ist der allgemeine Verschlüsselungsmechanismus im Hörkortex: Das Gehirn erkennt Gesprochenes, indem es akustische Signale von unten nach oben mit Vorhersagen von oben nach unten integriert und in verständliche Sprache umsetzt. Das Gehirn des Menschen *hört* beim Sprachverstehen *voraus*, d.h. Hörende identifizieren oft schon ein Wort, bevor es vollständig gehört wurde. Es existieren auch psycholinguistische Modelle, die auf eine selektive Voraktivierung auf mehreren Ebenen der sprachlichen Repräsentation hindeuten, wie sie von der „Prädiktiven Kodierung“ vorgeschlagen wird. Ableitungen ereigniskorrelierter Potenziale zur Wortvorhersage zeigten, dass sich die Wortformvorhersage in „frühen“ Gehirnreaktionen manifestiert, d.h., vor dem Auftreten einer der stabilsten (sprachrelevanten) Komponenten, der „N400“.

N400-Welle: Komponente der menschlichen ereigniskorrelierten Potenziale, die in Sprachverarbeitungsaufgaben (Sprache) mit einer Latenz von 400 ms zum auslösenden Wort, einer zentralen Verteilung und einer negativen Polarität erhalten werden kann. Die N400 wird z. B. zuverlässig durch nicht in den Kontext passende Wörter (Ich trinke meinen Kaffee mit Sahne und Hund.) ausgelöst und zeigt generell die Schwierigkeit an, mit der ein Wort in den Kontext eingeordnet werden kann. Sie lässt sich auditorisch und visuell erhalten. Mit Hilfe der N400 können Vorgänge der Sprachverarbeitung, wie z.B. die Struktur des mentalen Lexikons, untersucht werden (<https://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/n400/8183>).

Vorhersagbarkeiten

Prädiktive Prozesse haben Erklärungskraft auf allen Ebenen der Sprachhierarchie (Laute, Wörter, Sätze), parallel zur hierarchischen Architektur des Gehirns und der gerichteten Nachrichtenübermittlung zwischen den Verarbeitungsebenen und höheren kognitiven Ebenen. Das quasi-periodische Öffnen

und Schließen des Mundes während der Artikulation, zusammen mit den gleichzeitigen Bewegungen der Artikulatoren (etwa der Lippen) ist bspw. informativ dafür, wann ein bestimmtes Sprachmerkmal wahrscheinlich auftreten wird (Rothermich & Kotz, 2013).

Ein prädiktiver Kodierungsansatz scheint besonders für das Sprachverständnis relevant zu sein. Theorien zum Sprachverständnis gehen davon aus, dass Hörende (und Lesende) routinemäßig versuchen, die Bedeutung, aber auch die klangliche (und visuelle) Form kommender Wörter vorherzusagen. Studien zum Satzverständnis haben neuronale Korrelate für die Vorhersagbarkeit eines Wortes in seinem Kontext (z. B. durch ein bedeutungsbezogenes vorangehendes Wort einer Äußerung) sowie für die Genauigkeit einer solchen Vorhersage gefunden. Forschungsergebnisse belegen weiter, dass die Sprachverarbeitung, insbesondere Satzverarbeitungsmechanismen, Vorhersagen über das Auftreten nachfolgender Wörter mit Hilfe von kognitiven Prozessen generieren, die für hierarchische Strukturen sensibel und auf die Sprachverarbeitung spezialisiert sind (Shain et al., 2020) – und nicht durch Rückmeldungen von exekutiven Kontrollmechanismen. So ist wahrscheinlich, dass auf ein Verb ein Adjektiv folgt („Mustererkennung“). Die Voraktivierung von Gedächtnis Spuren bei der Sprachverarbeitung steht außerdem in Zusammenhang mit Frequenzeffekten (Häufigkeitseffekten) (Connine et al., 1993). Frequenzeffekte beziehen sich auf schnellere Aktivierung und Abruf von Wörtern, die mit hoher Häufigkeit vorkommen im Vergleich zu solchen mit niedriger Auftretenshäufigkeit. Häufigkeitseffekte werden besonders deutlich bei der Untersuchung von „Native Speakern“, die mit dem Wortschatz ihrer Muttersprache vertrauter sind als mit dem von Nicht-MuttersprachlerInnen. Native Speaker können sich besser auf „Top-Down-Inferenzen“ verlassen als Nicht-Muttersprachler, sodass in Situationen, in denen die „Bottom-Up-Sensorik“ beeinträchtigt ist (z. B. Hören unter Störlärm), die Sprachperformanz

KURZBIOGRAFIE

Christiane Kiese-Himmel, Klinische Psychologin BDP, Universitätsmedizin Göttingen, ist im wissenschaftlichen Beirat kommunikationsmedizinischer Zeitschriften, Autorin von Fachbüchern, Lehrbuchbeiträgen, psychologischen Tests, Mitwirkende an der Erstellung mehrerer interdisziplinärer Leitlinien; Koordinatorin der Interdisziplinären S3-LL, Version 1.1, AWMF-Registernr. 049-015, „Therapie von Sprachentwicklungsstörungen“ sowie Gastprofessorin an der Klinik für Phoniatrie und Pädaudiologie des Universitätsklinikums Münster.

von Native Speakern besser ausfällt als von Nicht-MuttersprachlerInnen (Goletani et al., 2009).

Die hierarchische prädiktive Kodierung erstreckt sich auch auf die Verarbeitung auf Diskursebene in der natürlichen Sprache (Kandylaki et al., 2016). In einer Konversation weiß man meistens, was der/die Andere gleich sagen wird.

Störungsmodelle

Beeinträchtigungen in der Übermittlung von Erwartungen an die sensorischen Bahnen können sich erheblich auf die Kognition auswirken, weswegen das Modell der „Prädiktiven Kodierung“ zugleich zur Formulierung von klinischen Störungsmodellen herangezogen wird. Es wird bspw. vermutet, dass der Mechanismus der „prädiktiven Kodierung“ bei Personen mit einer Autismus-Spektrum-Störung (ASS), Schizophrenie, Demenz oder mit einer Major Depression anders abläuft und kognitive Mängel bei derart erkrankten Personen als abweichender prädiktiver Kodierungsprozess in neuronalen Netzen interpretiert werden können. So könnte es sein, dass das Gehirn einer Person mit einer ASS nicht in der Lage ist, Fehler in der Vorhersage sensorischer Signale auf der untersten Ebene der Verarbeitungshierarchie zu ignorieren, weil sie Vorinformationen

nicht zu nutzen vermag. Einige Symptome der Schizophrenie werden mit einem Versagen der „Top-down-Vorhersagen“ und/oder einer verstärkten Gewichtung von „Bottom-up-Vorhersagefehlern“ zu erklären versucht, und kognitive Defizite bei Demenz werden als abweichende prädiktive Kodierung in hierarchischen neuronalen Netzwerken interpretiert. Eine schwere Depression (Major Depression) wird traditionell als eine Störung betrachtet, die durch negative kognitive Verzerrungen gekennzeichnet ist, und zu einer gestörten Signalisierung von Vorhersagefehlern führen könnte.

Fazit

„Prädiktive Kodierung“ ist die Verwendung von Informationen, um zukünftige Ereignisse zu prognostizieren, zu antizipieren oder zu kontrollieren. Es ist ein wichtiger Bestandteil vieler informationsverarbeitenden Systeme, somit auch der Wahrnehmung.

Die spannende Frage ist nun, ob „prädiktive Kodierung“ auch in der Logopädie und Sprachtherapie, bei der es um komplexe kognitive Fähigkeiten wie die Verarbeitung von gesprochener Sprache geht, genutzt werden kann (in der Behandlung von affektiven, psychotischen Störungen oder einer Posttraumatischen Belastungsstörung wird „prädiktive Kodierung“ bereits durch kognitive Umstrukturierungen eingesetzt). Um diese Frage beantworten zu können, ist noch eine lange Wegstrecke an wissenschaftlicher Forschung zurückzulegen.

Ein paar Gedankensplitter zu grundlegenden Forschungsfragen:

- Könnte „prädiktive Kodierung“ bei Sprachanbahnung und Sprachaufbau genutzt werden, indem sich durch Vorhersagen Phoneme zu Silben verbinden und darauf basierend weitere Sprachsegmente in der linguistischen Hierarchie, z. B. Wörter, erarbeiten lassen?
- Könnten Therapierende „prädiktive Kodierung“ diagnostisch verwenden (z. B. zur Untersuchung und Analyse bestimmter Sprachfunktionen, zur Identifizierung bestimmter Merkmale des Sprechens, der gebräuchlichsten Wörter und Phrasen), um spezifische Interventionen zur Förderung solcher Merkmale zu entwickeln?
- Könnte „prädiktive Kodierung“ als ein Instrument verwendet werden, um die Fortschritte während einer Behandlung zu erfassen?
- Könnten Therapierende bestimmte Sprachfunktionen kodieren, um die Fortschritte der PatientInnen über die Zeit zu verfolgen und den Therapieerfolg zu messen? Dadurch könnten sie ggf. schneller auf Veränderungen in Sprechen und Sprache reagieren und die Therapie anpassen, sofern nötig.

Das sind einige Optionen, die es erst einmal in der Grundlagenforschung zu untersuchen gilt, bevor sie in der klinischen Forschung validiert werden können.

Literatur

- Anderson, J. R. (1996). *Kognitive Psychologie*. Spektrum.
- Connine, C. M., Titone, D., & Wang, J. (1993). Auditory word recognition: Extrinsic and intrinsic effects of word frequency. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory & Cognition*, 19(1), 81–94. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.19.1.81>
- Golestani, N., Rosen, S., & Scott, S. K. (2009). Native-language benefit for understanding speech-in-noise: the contribution of semantics. *Bilingualism-Language and Cognition*, 12(3), 385–392. <https://doi.org/10.1017/S1366728909990150>
- Kandylaki, K. D., Nagels, A., Tune, S., Kircher, T., Wiese, R. et al. (2016). Predicting “when” in discourse engages the human dorsal auditory stream: An fMRI study using naturalistic stories. *Journal of Neuroscience*, 36(48), 12180–12191. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4100-15.2016>
- Rothermich, K., & Kotz, S. A. (2013). Predictions in speech comprehension: fMRI evidence on the meter-semantic interface. *NeuroImage*, 70, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.12.013>
- Shain, C., Blank, I. A., van Schijndel, M., Schuler, W., & Fedorenko, E. (2020). fMRI reveals language-specific predictive coding during naturalistic sentence comprehension. *Neuropsychologia*, 138, Article: 107307. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107307>



Autorin

Prof. Dr. rer. nat. Dipl.-Psych.
Christiane Kiese-Himmel
Universitätsmedizin Göttingen
Waldweg 37, Eingang A, D-37073 Göttingen
ckiese@med.uni-goettingen.de
christiane.kiese@uni-muenster.de

Lesen stimuliert die Hirnaktivität

Wenn es ums Lesen geht, unterstreichen wir meistens dessen gesellschaftliche Bedeutung für die Zukunft einer Person, seine sozialen Chancen und Arbeitsmöglichkeiten. Viel seltener sprechen wir über die Rolle des Lesens bei der Entwicklung kognitiver Fähigkeiten. Wer regelmäßig liest, kann besser nachdenken, gerät in Stresssituationen nicht so schnell aus dem Konzept, hat mehr Überblick im Leben und kann komplexe Situationen eher bewältigen.

Lesen ist die Verflechtung visueller, orthografischer, semantischer und phonologischer Nervenimpulse. Verfolgen wir einmal den Prozess: Zu Beginn muss man ein Wort sehen können, muss räumlich einschätzen, wie die Buchstaben im Verhältnis

zueinanderstehen und anschließend wie die Wörter im Satz korrespondieren. Man muss Wörter buchstabieren können, um ihre Bedeutung wissen, ihren Klang erkennen, sie aussprechen können. Kurzum, eine umfassende Aktivität.

Sobald wir eine Zeitung oder ein Buch aufschlagen, zünden ganze zehn Gehirnregionen ein Synapsenfeuerwerk. Lesen erweist sich dabei als starker Motor für den Erhalt der Neuroplastizität. Ein gesundes Gehirn muss in Bewegung bleiben. Für die Gehirne von Kindern – aber auch für die von Erwachsenen – ist es wichtig, dass die Nerven immer wieder neue Verbindungen aufbauen und das in so vielen aktiven Hirnregionen wie möglich. Genau das passiert beim Lesen.

ke