

Ralph Radach und Markus J. Hofmann

# Graphematische Verarbeitung beim Lesen von Wörtern

---

Im folgenden Beitrag wird die Verarbeitung von Buchstaben und Wörtern aus der Sicht der kognitionswissenschaftlich fundierten Leseforschung diskutiert. Im ersten Abschnitt wird anhand von Befunden zu zentralen Fragestellungen der Forschung exemplarisch ein neurokognitives Modell der Zeichen- und Wortverarbeitung diskutiert. Dabei zeigt sich, dass auch auf den elementarsten Stufen der Verarbeitung geschriebener Zeichen top-down Wirkungen höherer Prozesse bis hin zur Semantik nachweisbar sind. Im zweiten Abschnitt werden, nach einer kurzen Einführung zur Messung und Analyse von Blickbewegungen, wichtige Ergebnisse der Forschung zur graphematischen Verarbeitung beim dynamischen Lesen diskutiert. Auf dieser Grundlage wird abschließend ein Prozessmodell skizziert, in dem die Zeichenverarbeitung organisch in den kontinuierlichen Leseprozess eingebettet ist.

1. Einleitung
2. Zur visuellen Erkennung einzelner Wörter
- 2.2 Ein neurokognitives Modell der Wortverarbeitung
- 2.2 Experimentelle Befunde zur Worterkennung
3. Zeichen und Wörter in der Dynamik des natürlichen Lesens
- 3.1 Befunde zur graphematischen Verarbeitung beim dynamischen Lesen
- 3.2. Ein Modell der Informationsverarbeitung beim dynamischen Lesen
4. Schlussbemerkungen
5. Literatur

10 Stichworte (alphabetisch sortiert): Blickspanne (perceptual span), graphematische Verarbeitung, Lesen, Orthographische Verarbeitung, Worterkennung, Associative Read-Out Model, Glenmore-Modell, semantische Repräsentation.

## 1 Einleitung

Aus der Sicht der kognitiven Psychologie sind Worterkennung und Lesen mentale Prozesse, bei denen allgemeine Prinzipien und Mechanismen der menschlichen Informationsverarbeitung am Gegenstand der geschriebenen Sprache realisiert werden. Dabei bestehen Gemeinsamkeiten mit anderen Domänen wie etwa der Bildwahrnehmung, der visuellen Suche oder dem problemlösenden Denken. Beispiele hierfür sind etwa die Nutzung integrierter Gedächtnissysteme, die Priorisierung bestimmter Informationseinheiten oder die Koordination mit konkurrierenden Aufgaben. Demgegenüber gibt es aber auch Besonderheiten der Informationsverarbeitung beim Erkennen von Schriftzeichen und beim Lesen von Wörtern, die im Mittelpunkt dieses Kapitels stehen werden. Entsprechend der Zielstellung des Bandes konzentrieren wir uns auf das Niveau der Verarbeitung von Buchstaben und der von Ihnen gebildeten Wörter, wogegen die umfangreiche Forschung zur Satz- und Textverarbeitung nicht berücksichtigt werden kann.

Eine weitere Beschränkung liegt in der Konzentration auf die visuell-orthographische Verarbeitung, wogegen phonologische Information nur am Rande Beachtung finden kann. Die oft als „sequenziell“ bezeichnete Route der Wortverarbeitung durch Aktivierung von Klangeigenschaften wird im Kapitel von F. Domahs im vorliegenden Band ausführlich diskutiert. In diesem Zusammenhang verweisen wir auch auf die Literatur zur Rolle des phonologischen Arbeitsgedächtnisses (Inhoff u.a., 2004) sowie zum Vergleich der Wortverarbeitung beim leisen und lauten Lesen (z.B. Inhoff/Radach 2014).

Historisch betrachtet hat die heutige kognitionswissenschaftliche Leseforschung ihre Wurzeln in zwei verschiedenen Traditionslinien. James McKeen Cattell veröffentlichte schon 1885 seine Untersuchungen "Über die Zeit der Erkennung und Benennung von Schriftzeichen, Bildern und Farben", durch die er die tachistoskopische Leseforschung mitbegründete. Nur einige Jahre später erschienen die ersten Arbeiten über Messungen von Blickbewegungen, die eine Untersuchung des dynamischen Lesens ermöglichten, und bald konnten Ergebnisse der empirischen Leseforschung in einem Lehrbuch zusammengefasst werden (Huey 1908).

In der tachistoskopischen Forschung wird in der Regel eine Zeichenkette für kurze Zeit dargeboten und Versuchspersonen um eine Reaktion gebeten, z.B. die Unterscheidung zwischen Wort oder Nichtwort. Dabei wird der Vorteil einer präzisen Kontrolle über die räumlichen und zeitlichen Bedingungen der Informationsaufnahme durch einen Verzicht auf die Erfassung der Dynamik des natürlichen Lesens erkauft. Je nach Sichtweise kann man dabei das Fehlen konkurrierender Prozesse auf der Wort-, Satz- oder Textebene als Vor- oder Nachteil diskutieren (Grainger 2003). Blickbewegungen liefern dagegen Daten über die dynamische Abfolge des Lesens von Wörtern, Sätzen und Texten. Dabei besteht allerdings das Problem, dass wegen der parallelen Verarbeitung von Einheiten auf mehreren Ebenen nur indirekt (z.B.

durch geschickte experimentelle Manipulation) geschlossen werden kann, welcher mentale Aufwand mit der Verarbeitung eines bestimmten Buchstabenclusters oder Wortes verbunden ist (Inhoff/Radach 1998).

Nachdem die Bedeutung bestimmter Hirnareale für die Sprach- und Schriftverarbeitung durch die Erkenntnisse der neuropsychologischen Forschung in Umrissen bekannt war, hat insbesondere seit den 80er Jahren die Verfügbarkeit moderner neurowissenschaftlicher Methoden zu einem enormen Aufschwung der Forschung beigetragen. Dabei spielen vor allem EEG-Messungen (Kutas/van Petten 1994) und Imaging-Techniken wie das fMRI (Price 2012) eine entscheidende Rolle. Der zunehmenden Durchdringung von kognitions- und neurowissenschaftlichen Ansätzen Rechnung tragend, werden wir in diesem Kapitel eine integrierende, neurokognitive Perspektive verfolgen.

## 2. Zur visuellen Erkennung einzelner Wörter

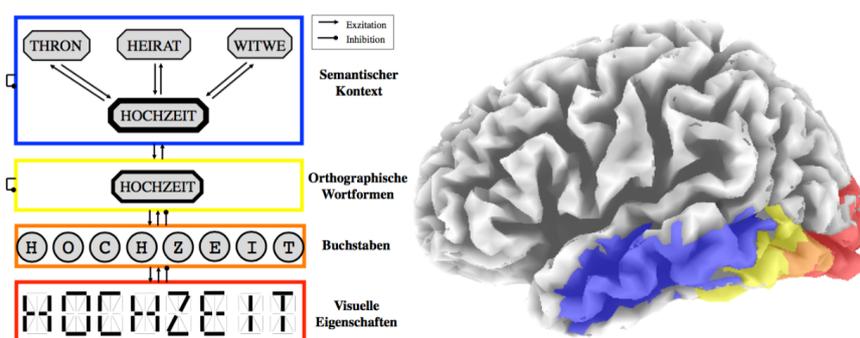
Die in der Worterkennungs- und Leseforschung gewonnenen Leistungsdaten wie Reaktionszeiten, Fehler, Erkennungsschwellen sowie zunehmend auch Blickbewegungs- und Biosignaldaten dienen als Grundlage für die Entwicklung von Theorien und Modellen. Dabei werden die früher vorherrschenden konzeptionell-beschreibenden Theorien zunehmend von computationalen Modellen abgelöst, die Prozesse der Zeichen- und Wortverarbeitung funktional erklären und vorhersagen.

Derartige neurokognitive Modelle der visuellen Zeichen- und Worterkennung sollen Antworten auf eine ganze Reihe von Forschungsfragen liefern, wobei wir uns hier auf die folgenden Aspekte konzentrieren wollen: Wie ist die funktionale Architektur der Verarbeitung beschaffen, d.h. welche Module und Stufen der Verarbeitung werden durchlaufen? Wie kann die zeitliche Dynamik der Verarbeitung beschrieben werden, d.h. welche Dauer und zeitliche Taktung haben die spezifischen Schritte? Wo und wie wird die in sprachlichen Symbolen kodierte Information neuronal repräsentiert, d.h. welche Hirnareale sind an der Verarbeitung der sprachlich kodierten Information beteiligt (siehe Jacobs/Hofmann 2013 für eine detaillierte Diskussion zu Fragen der Modellbildung)?

Im folgenden Abschnitt soll zunächst ein theoretischer Rahmen gesetzt werden, indem das Associative Read-Out Model (AROM) als Beispiel für ein aktuelles neurokognitives Worterkennungsmodell skizziert wird (Hofmann u.a. 2011; vgl. Grainger/Jacobs 1996; McClelland/Rumelhart 1981). Im zweiten Teil werden dann innerhalb dieses Rahmens die wichtigsten experimentellen Effekte diskutiert, zu deren Erklärung eine solches Modell in der Lage sein sollte (vgl. Hofmann/Jacobs 2014).

## 2.1 Ein neurokognitives Modell der Wortverarbeitung

Modelle der visuellen Worterkennung bedienen sich, vereinfacht gesprochen, derselben aufsteigenden Gliederung, die auch dieser Band verwendet (Collins/Loftus 1975; Grainger/Jacobs 1996; Jacobs/Grainger 1994; McClelland/Rumelhart 1981; Hofmann u.a. 2011): Relativ kleine Einheiten wie visuelle Merkmale und Buchstaben aktivieren visuell-orthographische Wortformen, und schließlich die Repräsentationen semantischer Zusammenhänge (siehe Abb. 1).



**Abbildung 1:** Neurokognitives Simulationsmodell der visuellen Worterkennung (links) mit korrespondierenden Repräsentationen im Gehirn (rechts). Gelesen wird dem Modell als Repräsentation visueller Eigenschaften präsentiert, die mit der Aktivierung des okzipitalen Cortex ab 50 ms nach Reizdarbietung assoziiert sind (rot, BA 17+18). Diese regen andere Repräsentationen an (Pfeil), oder hemmen sie (Pfeil mit Punkt am Ende). Am stärksten werden die Detektoren der Buchstaben aktiv, die dem gezeigten Wort entsprechen. Diese wiederum regen Aktivierungen in orthographischen Wortformen an, die den fusiformen Cortex (gelb, BA37) etwa 100 ms nach Reizdarbietung erreichen. Jede orthographische Wortform regt seine Entsprechung auf der semantischen Ebene an und dient damit gleichzeitig als Schnittstelle zu höheren Repräsentationsebenen, wie z.B. semantische Bedeutungsinformationen im temporalen Cortex (blau, BA21). Hier aktiviert ein gezeigtes Wort semantisch relationierte Wörter, welche seine Bedeutung algorithmisch konkretisieren. Wird ein somit voraktiviertes Wort beispielsweise später gezeigt, dann wird es einfacher wiedererkannt (vgl. Abb. 2; Abb. adaptiert aus Hofmann/Jacobs 2014).

Diese Taxonomie lässt sich anhand der neuronalen Aktivierungsmuster im Gehirn nachvollziehen. Wie auch bei anderen visuellen Reizen, erfolgt die erste kortikale Repräsentation des geschriebenen Wortes etwa 50 ms nach Reizdarbietung im okzipitalen Cortex (Abb. 1; vgl. Hofmann/Jacobs 2014). Dort werden visuelle

Eigenschaften wie Linien verschiedener Orientierungen durch unterschiedliche Neuronen repräsentiert. Diese Informationen wandern entlang des sogenannten ventralen visuellen Pfades vom Okzipitallappen bis hin zum Temporallappen (Ungerleider/Mishkin 1982). Dabei gilt die generelle Regel, dass weiter vorne gelegene Neuronen jeweils höhere Abstraktionsebenen des Geschriebenen repräsentieren, und damit ein Aktivierungsmuster von weiter hinten gelegenen Neuronen anzeigen. So wird z.B. der Buchstabe 'T' weiter vorne repräsentiert als dessen Konstituenten: eine vertikale Linie 'l' und eine horizontale Linie '┌'. Als höchste Abstraktionsebene visueller Koinzidenzdetektoren kann der linke visuelle fusiforme Gyrus gelten, das sogenannte visuelle Wortformareal (z.B. Cohen u.a. 2000; Kronbichler u.a. 2004). Visuelle Informationen erreichen diese Region etwa 100 ms nach Reizdarbietung (Duncan u.a. 2010; Hofmann u.a. 2009). Es gilt in der einschlägigen Literatur als unstrittig, dass der fusiforme Gyrus als eine Schnittstelle zu höheren Repräsentationen gelten kann, d.h. semantischen Relationen zwischen Wörtern (Price/Devlin 2003; McCandliss u.a. 2003), die im anterior anschließenden Temporallappen repräsentiert werden (siehe Abb. 1).

## 2.2 Experimentelle Befunde zur Worterkennung

Ein erster Effekt, der demonstriert, auf welche Weise visuelle Eigenschaften im okzipitalen Cortex repräsentiert werden, ist der *Wortlängeneffekt* (siehe Tabelle 1). Seit langem ist bekannt, dass längere Buchstabenfolgen mehr Zeit benötigen, um wiedererkannt zu werden (z.B. Ziegler/Jacobs/Klüppel 2001). Ein längeres Wort weist mehr visuelle Eigenschaften auf, daher löst es auch eine höhere Aktivierung im okzipitalen Cortex aus als ein kürzeres Wort (Schurz u.a. 2010).

Diese Informationen erreichen etwa ab 50 ms nach Reizdarbietung den okzipitalen Cortex. Deshalb lassen sich elektromagnetische Unterschiede zwischen langen und kurzen Wörtern bereits früher als 100 ms nach Reizdarbietung im Gehirn zeigen (Hauk/Pulvermüller 2004). Interessanterweise reichen die okzipitalen Effekte nur für sinnfreie Buchstabenfolgen, sogenannte Nichtwörter, in weiter anteriore Areale wie den fusiformen Gyrus hinein (Schurz u.a. 2010). Dies können sogenannte top-down Verknüpfungen erklären, die von der höheren Repräsentationsebene semantischer Eigenschaften bis hin zur Ebene visueller Eigenschaften hinabreichen (vgl. von oben nach unten gerichtete Pfeile in Abb. 1).

Worteeigenschaft	Funktion des Modells	Erklärte Effekte in Gehirn und Verhalten		
		Wo	Wann	Verhalten
1. Länge	Visuelle Eigenschaften werden 50 ms nach Reizrepräsentation im Okzipitallappen repräsentiert	Geringere okzipitale Aktivierung nach kurzen Buchstabenfolgen, die nur für sinnfreie Buchstabenfolgen in höhere Repräsentationsebenen hineinreichen	60-125ms	Schnellere Reaktionen nach kurzen Buchstabenfolgen
2. Sequenz	Visuelle Eigenschaften werden von höheren Repräsentationsebenen beeinflusst	Höhere okzipitale Aktivierung nach Wörtern (>NW), und geringere Aktivierung bei erwarteten Wörtern im Satzkontext	Wortvorhersehbarkeit ab 60ms	Schnellere Reaktionszeiten nach Wörtern als nach Nichtwörtern (NW)
3. Frequenz	Höhere Grundaktivierung für häufige Wörter erleichtert den Zugriff auf das Lexikon	Wortfrequenzeffekte im fusiformen Gyrus	Wortfrequenzeffekte zwischen 100 und 200 ms	Schnellere Reaktionen nach häufigen Wörtern
4. Wiederholung	Wenn eine Repräsentation bereits aktiv ist, fällt es leichter diese erneut zu aktivieren	Weniger fusiforme Aktivierung bei wiederholter Darbietung	Vor 200 ms	Schnellere Reaktionen und weniger Fehler bei wiederholter Darbietung
5. Orthographische Nachbarschaft	Nicht nur die präsentierten, sondern auch orthographisch ähnliche Wörter werden aktiviert	Keine fusiformen Aktivierungsunterschiede, stattdessen kompensatorische Effekte der Semantik im temporalen Cortex	N400-Effekte für Nichtwörter (ab 200 ms)	Orthographisch ähnliche Wörter helfen beim Erkennen von Wörtern aber hindern das Zurückweisen von Nichtwörtern
6. Semantische Zusammenhänge	Semantische Assoziationen durch gemeinsames Auftreten in Sätzen definiert	Geringere Aktivierung nach assoziierten Wörtern	N400-Effekte für Wörter	Schnellere Wiedererkennen nach assoziierten Wörtern, und bei vielen Assoziierten im Kontext

**Tabelliel :** Überblick über Effekte, die durch interaktive Aktivationsmodelle erklärt werden können.

Vor allem Wörter rufen semantische Repräsentationen wach, welche ihrerseits die Ebene orthographischer Wortformen anregen. Da semantische Repräsentationen also die Aktivierung auf der Ebene orthographischer Wortformen 'verrauschen', lassen sich die neuronalen Aktivierungen im fusiformen Gyrus nicht mehr allein durch die Wortlänge vorhersagen.

Eine zweite Klasse an Phänomenen, die erklärt werden sollten, sind *Wortsequenzeffekte*. Mittels funktioneller Magnetresonanztomographie (fMRT) kann man zeigen, dass bei der Bearbeitung von Wortlisten nach Wörtern die Aktivierung des okzipitalen Cortex größer ist als nach sinnfreien Buchstabenfolgen (Kuchinke u.a. 2011). Eine Erklärung wäre, dass Wörter auf der semantischen Ebene Erwartungshaltungen für andere Wörter anregen. So könnte also der semantische Kontext „CLAUDIA HATTE IHR FAHRRAD AUF DER STRASSE ...“ die Erwartung des Wortes STEHEN auslösen, weil FAHRRAD, AUF, und DER damit semantisch assoziiert sind (siehe Abb. 2). Diese assoziierten Wörter würden also STEHEN schon vor der Präsentation dieses Wortes aktivieren. Solche erwarteten Wörter lösen eine wesentlich geringere Aktivierung im okzipitalen Cortex aus als unerwartete Wörter (Hofmann u.a. 2014), wie z.B. GEBORGT in diesem Satzkontext. Dies lässt sich am besten dadurch erklären, dass sich die semantische Aktivierung top-down bis zur Ebene visueller Eigenschaften ausbreitet. Es werden also bereits vor der Reizdarbietung die visuellen Eigenschaften erwartbarer Wörter voraktiviert. Im Gegensatz dazu müssen die visuellen Eigenschaften unerwarteter Wörter exklusiv nach Reizdarbietung aktiviert werden, was eine erhöhte okzipitale Aktivierung auslöst (Hofmann u.a. 2014). Die hirnelektrischen Daten von Dambacher und Kollegen (2009) legen nahe, dass solche Erwartungseffekte bereits etwa 60 ms nach Reizdarbietung beginnen. Dies bestätigt die Hypothese, dass Wortsequenzeffekte bis auf die Ebene der visuellen Eigenschaften hinab wirken können.

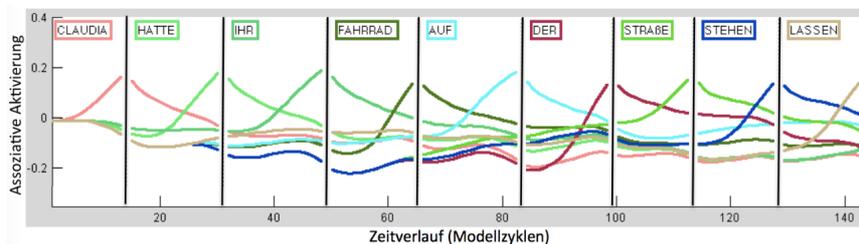
Eine dritte Klasse an Effekten, die sich mit einem AROM im ventralen visuellen Pfad erklären lassen, sind *Wortfrequenzeffekte* (Fiebach u.a. 2002; Graininger/Jacobs 1996; Kronbichler u.a. 2004; McClelland/Rumelhart 1981). Das Modell postuliert, dass der lexikalische Zugriff auf häufige Wörter schneller erfolgt. Dabei wird eine hohe Worthäufigkeit durch eine höhere Grundaktivierung auf der Ebene orthographischer Wortformen abgebildet (McClelland/Rumelhart 1981). Somit erreichen häufige Wörter eine zum Wiedererkennen kritische Menge an Aktivierung früher als seltene Wörter (vgl. Reilly/Radach 2006). Dieser Zugriff auf lexikalische Repräsentationen findet bereits ab 100 bis 150 ms nach Reizdarbietung statt, was sich durch elektrophysiologische Wortfrequenzeffekte im Gehirn aufzeigen lässt (Dambacher u.a. 2006; Hauk/Pulvermüller 2004). Deshalb ist dies auch der früheste Zeitpunkt, zu dem ein magnetischer Puls mit der Aktivierung des fusiformen Gyrus interferiert (Duncan/Pattamadilok/Devlin 2010). Spätestens jedoch ab 200 ms sollte der Zugriff auf ein mentales Lexikon bereits begonnen haben (Dambacher u.a. 2006; Hauk/Pulvermüller 2004).

Ein vierter Effekt, der ebenso im Zuge des Zugriffs auf das mentale Lexikon auftritt, betrifft die *Wiederholung von Wörtern*, die im Allgemeinen das Wiedererkennen erleichtert (Grainger/Jacobs 1993). Entsprechend zeigen bildgebende Studien, dass eine orthographische Überlappung zwischen dem vorhergehenden und dem aktuellen Wort die Aktivierung im linken fusiformen Gyrus verringert (Devlin u.a. 2004). Dieser Effekt verschwindet jedoch, wenn die orthographische Überlappung von semantischen Zusammenhängen begleitet wird. Deshalb schlagen Devlin und Koautoren (2004) vor, dass der fusiforme Gyrus im Wesentlichen als Schnittstelle zu Prozessen höherer Ordnung fungiert (Hofmann u.a. 2009; Price/Devlin 2003). Auch wenn das häufig als Antithese zur reinen Repräsentation visueller Wortformen gesehen wird (McCandliss u.a. 2003), lassen sich diese scheinbar widersprüchlichen Ansichten im Rahmen des AROM in Einklang bringen: Der fusiforme Gyrus repräsentiert zwar visuell-orthographische Wortformen, aber trotzdem gilt das allgemeine Prinzip der Interaktivität, denn die Region stellt gleichzeitig eine Schnittstelle zu höheren Repräsentationen dar (McClelland/Rumelhart 1981). Solche Wiederholungseffekte treten hirnelektrisch bereits während des Zugriffs auf das mentale Lexikon in einem Zeitbereich zwischen 150 und 200 ms nach Reizdarbietung auf (Huber u.a. 2008). Ebenso sind Reaktionszeiten und Fehlerraten bei wiederholter Darbietung verringert (Grainger/Jacobs 1993).

Wenn wir uns auf der Ebene orthographischer Wortformen befinden, dann tut sich damit eine fünfte Klasse an Phänomenen auf, die durch das Modell erklärbar sind: Die Effekte der *orthographischen Nachbarschaft* (Grainger/Jacobs 1996). Orthographische Nachbarn sind Wörter, die sich vom Zielwort durch genau einen Buchstaben unterscheiden. Das Modell sagt voraus, dass nicht nur die gezeigten Wörter, sondern auch orthographisch ähnliche Wörter aktiviert werden (Grainger/Jacobs 1996). Wenn eine Aufgabe verlangt zu entscheiden, ob der dargebotene Reiz ein Wort ist, dann helfen orthographische Nachbarn, d.h. die Entscheidung funktioniert schneller und fehlerfreier. Während solche Verhaltenseffekte recht gut verstanden sind, erlebten Binder und Kollegen (2003) in ihrer funktionellen Bildgebungsstudie eine Überraschung, als sie testen wollten, ob viele orthographisch ähnliche Wörter auch Aktivierungen im fusiformen Gyrus auslösen. Sie fanden keinen Beleg dafür. Stattdessen zeigten sie, dass Wörter mit einer geringeren Anzahl orthographischer Nachbarn eine höhere Aktivierung im temporalen Cortex auslösen. Dieser Effekt lässt sich durch Hinzunahme einer semantischen Ebene erklären: Binder und Kollegen (2003) schlugen vor, dass eine schwierigere Identifizierbarkeit auf der orthographischen Ebene kompensatorische semantische Effekte im Temporallappen auslösen. Je schwerer ein Wort auf orthographischer Ebene zu identifizieren ist, desto mehr semantische Informationen müssen für dessen Identifikation herangezogen werden.

Effekte auf der Ebene orthographischer Wortformen lassen sich zeitlich mit Hirnstrommessungen im Zeitbereich der N400 aufzeigen (Holcomb/Grainger/

O'Rourke 2002). Die N400-Komponente des ereigniskorrelierten Potentials beginnt etwa ab 200 ms nach Reizdarbietung (Kutas/Federmeier 2011). Explizite quantitative Simulationen auf der Ebene orthographischer Wortformen können N400-Effekte jedoch nur für Nichtwörter erklären (Braun u.a. 2006). Dies war einer der Gründe dafür, im AROM über die Ebenen der Verarbeitung von visuellen Eigenschaften, Buchstaben und Wortformen hinaus auch die Ebene der semantischen Wortverarbeitung einzubeziehen. Das AROM definiert semantische Relationen auf Grund der Hebb'schen Lernregel (Hebb 1949). Zwei Wörter gelten als assoziiert, wenn sie signifikant häufiger gemeinsam in den 43 Millionen Sätzen eines großen Corpus auftreten, als man es auf Grund der einzelnen Auftretenshäufigkeiten der Wörter erwarten würde (Landauer/Dumais 1997; Hofmann u.a. 2011). Auf diese Weise können wir einen sechsten Typus an Befunden vorhersagen, die mit *semantischen Assoziationen* verbunden sind. Wörter werden bei vorhergehendem assoziierten Wort schneller und fehlerfreier erkannt, wobei dies für eine Vielzahl von Relationstypen und Aufgabenvariationen gilt (Lucas 2000). Ebenso zeigen sich verminderte Aktivierungen im temporalen Cortex, wenn einem Wort ein assoziiertes Wort vorausging (Rossel u.a. 2003). Schließlich gilt für das Lesen von Sätzen, dass eine erhöhte Wortvorhersehbarkeit auf Grund semantischer Erwartungshaltungen eine kleinere N400 auslöst (z.B. Dambacher u.a. 2006; Abb. 2).



**Abbildung 2:** AROM-Simulation semantischer Kontexteffekte an einem Beispielsatz des Potsdam Satzkorpus (Kliegl u.a. 2006). Die X-Achse bildet den Zeitverlauf ab. Je mehr Modellzyklen bis zur Präsentation des nächsten Wortes vergehen, desto mehr Zeit benötigt die Worterkennung. Die Y-Achse zeigt die assoziative Aktivierung der Wörter auf der semantischen Kontextebene. Jedem Wort entspricht eine Farbe, z.B. blau für STEHEN. FAHRRAD, AUF, und DER sind mit diesem Wort assoziiert. Deshalb erhöhen sie dessen Grundaktivierung. Wenn STEHEN schließlich präsentiert wird, erreicht es die zur Identifikation notwendige Schwelle früher und wäre damit leichter zu erkennen, wenn es viele semantisch assoziierte Wörter im Satzkontext aufweist (Hofmann/Jacobs 2014).

### 3. Zeichen und Wörter in der Dynamik des natürlichen Lesens

In der Realität des dynamischen Lesens ist die Erkennung von Graphemen und Wörtern fast immer in die Verarbeitung von Sätzen und/oder Texten eingebettet. Als sichtbares Verhalten bewegen sich dabei die Augen relativ gut koordiniert ruckweise über die Lesezeile. Die als „Sakkaden“ bezeichneten Bewegungen sind sehr schnell und dauern, je nach Länge, etwa 20 bis 40 ms, bei sehr langen Bewegungen auch etwas mehr. Zwischen den Sakkaden liegen die Fixationen, Phasen relativer Bewegungslosigkeit (mit Mikrobewegungen, die hier keine Rolle spielen), in denen die Textinformation aufgenommen wird. Die Dauer der Fixationen beträgt von etwa 60 bis über 500 ms, wobei Gruppenmittelwerte bei erwachsenen Lesern um 220 bis 250 ms betragen (siehe Inhoff/Radach 1998 für einen Überblick zur Methodik der Blickbewegungsforschung).

Nur während der Fixationen wird neue visuelle Information aufgenommen, wobei dies wegen des scharfen Abfalls der Auflösungsgüte zur Peripherie hin nur innerhalb eines relativ kleinen räumlichen Fensters geschehen kann. Die Diskrimination von Buchstaben erfolgt innerhalb einer Blickspanne (perceptual span) von etwa 8-10 Buchstaben nach rechts bis etwa vier Buchstaben nach links bzw. bis zum Anfang des aktuellen Wortes. Diese Asymmetrie zeigt, dass die Blickspanne nur zum Teil von der Sehschärfe abhängt, deren Abfall in die Peripherie nahezu symmetrisch verläuft. Es handelt sich vielmehr teilweise um das Ergebnis der Zuweisung mentaler Ressourcen in Form selektiver visueller Aufmerksamkeit. Die Asymmetrie der Blickspanne kehrt sich um, wenn die Leserichtung geändert wird. Eine bilinguale Person würde also nach links mehr Buchstaben erkennen, wenn sie beispielsweise hebräisch oder arabisch liest (siehe Schotter u.a. 2011, für eine aktuelle Übersicht).

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Leseforschung mit Hilfe von Blickbewegungen rasant entwickelt und wichtige Ergebnisse sind in einer Reihe von Überblicksarbeiten zusammengefasst worden (u.a. Radach/Kennedy 2004, 2013; Rayner 2009). Der methodische Grundgedanke der Forschung besteht darin, dass die Position, Abfolge und vor allem Dauer von Fixationen die Prozesse der visuellen und sprachlichen Verarbeitung beim Lesen reflektieren (Inhoff/Radach 1998; Radach/Kennedy, 2004). Dabei gelten die oft implizit angenommenen Hypothesen einer Übereinstimmung von Fixationsposition und -gegenstand sowie Fixationsdauer und Verarbeitungsaufwand allerdings nur näherungsweise. Die wichtigsten Ausnahmen bestehen in der oben erwähnten Aufnahme extrafovealer Information (d.h. einer gleichzeitigen Verarbeitung benachbarter Zeichen und/oder Wörter) sowie in Einflüssen bereits vorher fixierter Wörter. Hierdurch kann z.B. die aktuelle Blickzeit erhöht sein, wenn vorher ein besonders schwieriges Wort gelesen wurde (siehe Kliegl u.a. 2006 für eine umfassende Diskussion).

### 3.1 Befunde zur graphematischen Verarbeitung beim dynamischen Lesen

Es gibt neben grundsätzlichen Gemeinsamkeiten auch Unterschiede zwischen der oben im Detail diskutierten Verarbeitung einzelner Wörter und dem dynamischen Lesen von Sätzen und Texten. Wir wollen uns in der weiteren Diskussion auf zwei dieser Unterschiede konzentrieren, nämlich erstens, dass während einer Fixation graphematische Information von mehreren Wörtern aufgenommen werden kann und zweitens, dass die Verarbeitung dieser Information durch Top-Down Einflüsse höherer Repräsentationsebenen mitbestimmt wird.

Am Beginn der Verarbeitung während einer Lesefixation stehen elementare Routinen der visuellen Wahrnehmung. Primär betrifft dies die Analyse visueller Merkmale (Striche, Bögen und Punkte) und ihrer räumlich strukturierten Kombinationen, die den Informationsgehalt alphabetischer Zeichen ausmachen (siehe z. B. Balota u.a. 2006; Grainger u.a. 2008 für detaillierte Diskussionen). Dabei ist wesentlich, dass nicht die visuellen Merkmale, sondern ihre abstrakte orthographische Identität das Rohmaterial für die weitere graphematische Verarbeitung im Rahmen der Worterkennung bilden. Diese Tatsache kann anhand eines Experiments von McConkie und Zola (1979) illustriert werden. Die Versuchsteilnehmer waren aufgefordert, Text zu lesen, der im mIxEd CaSe FoRmAt PrÄsEnTiErT wurde, d.h. als Abfolge von Groß- und Kleinbuchstaben. Mit etwas Training kann dieses Textformat recht gut bewältigt werden (Inhoff/Radach 2014). Als kritische Manipulation erfolgte während einiger Sakkaden ein Wechsel, bei dem alle Kleinbuchstaben in Großbuchstaben umgewandelt wurden und umgekehrt. Das wesentliche Ergebnis besteht nun darin, dass dieser Wechsel nicht mit Kosten für die Lesezeit verbunden war. Damit ist gezeigt, dass nicht visuelle Merkmale, sondern ein abstrakter orthographischer Kode mit Hilfe des sensorischen Gedächtnisses von einer Fixation zur nächsten übertragen wird.

Hiervon ausgehend ergibt sich die Frage, welche weiteren Formen sprachlicher Information von nicht direkt fixierten (parafovealen) Wörtern aufgenommen und damit über mehrere Fixationen integriert werden kann. Eine wichtige Methode zur Untersuchung dieser Fragestellung ist die sogenannte *boundary technique*, bei der Wörter in der Parafovea (also z.B. direkt rechts neben der aktuellen Fixationsposition) maskiert oder anderweitig modifiziert werden (z.B. durch Buchstabenersetzung). Sobald eine Sakkade ins Zielwort ausgeführt wird, verschwindet die Modifikation und das Wort wird fehlerfrei dargeboten. Erhöht sich aufgrund der Diskrepanz zwischen parafoveal und foveal verfügbarer Information die Blickzeit, gilt dies als indirekter Beleg für den Nutzen der parafovealen (Vor)Verarbeitung (siehe Hutzler u.a. 2013; Risse/Kliegl 2014, für kritische Diskussionen). Die Methode kann modifiziert werden, um durch selektive Maskierung während der Fixation die zeitliche Dynamik der fovealen und parafovealen Verarbeitung abzubilden (z.B. Inhoff/Radach 2014).

Eine ganze Reihe von Untersuchungen mit Hilfe dieser und ähnlicher Methoden hat wichtige Erkenntnisse darüber geliefert, wie graphematische Information in der Parafovea aufgenommen wird. Dabei ist die Kenntnis der Identität der ersten drei Buchstaben besonders effektiv, wogegen der letzte Buchstabe (obwohl visuell distinkt) nur von relativ begrenztem Nutzen zu sein scheint. Insgesamt beruht der relative Beitrag des einzelnen Buchstaben zur Bestimmung der lexikalischen Identität eines Wortes auf einer Kombination aus Sichtbarkeit (Abstand zur aktuellen Fixationsposition) und orthographischem Wissen, wie es in Maßen der positionsabhängigen Frequenz von Buchstaben und ihrer Kombinationen zum Ausdruck kommt (Stevens/Grainger 2003). Beispielsweise sind im deutschen Wort *Rhabarber* die ersten drei oder vier Buchstaben in ihrer Kombination selten, obwohl das Wort insgesamt eine mittlere Häufigkeit hat. Dies führt dazu, dass Fixations- und Blickzeiten im Wort erhöht sind und ankommende Sakkaden weniger weit rechts landen. Die parafoveal wahrgenommene orthographische Regularität hat damit auch einen Einfluss auf die Programmierung der nachfolgenden Sakkade (Radach/Heller/Inhoff 2004).

Interessanterweise gibt es keine überzeugenden Belege für die Nutzung von extrafovealer Wortlängeninformation für die graphematische und lexikalische Verarbeitung. Es wäre ja denkbar, dass die Präsenz eines relativ langen Wortes in der Parafovea alle kurzen Wörter als Kandidaten für die orthographische und/oder lexikalische Verarbeitung ausschließt. Diese Hypothese haben Inhoff und Kollegen (2003) in einem Experiment geprüft, bei dem mit Hilfe der *boundary technique* durch parafoveale Löschung des mittleren Buchstaben in einem siebenbuchstabigen Wort eine inkorrekte Wortlängeninformation dargeboten wurde. Dieser Faktor wurde gegen korrekte vs. inkorrekte (durch sinnlose Strings maskierte) orthographische Information variiert. Für beide Faktoren ergaben sich jeweils etwa gleichgroße Verlängerungen der Blickzeit bei modifizierter parafovealer Information. Diese Wirkungen waren komplett additiv, so dass von einer funktionalen Trennung der Verarbeitung grober visueller Merkmale (Wortlänge und möglicherweise Wortgestalt wie Ober- und Unterlängen) einerseits und graphematischer Information andererseits auszugehen ist.

Eine der ersten grundlegenden Untersuchungen zur Wirkung des Satzkontextes auf die Verarbeitung von Buchstabeninformation wurde bereits 1985 von Balota, Pollatsek und Rayner publiziert. In diesem inzwischen klassischen Experiment wurden Versuchspersonen gebeten, Sätze der folgenden Form zu lesen:

1. Since the wedding was today, the baker rushed the wedding cake/pies to the reception.

In Beispielsatz 1 ist das Wort *cake* durch den Kontext sehr gut vorhersagbar, während das Wort *pies* akzeptabel ist, sich aber nicht annähernd so gut aus dem Zusammenhang ergibt. Zusätzlich wurde unter Nutzung der Boundary-Methode

als zweiter Faktor die visuelle Ähnlichkeit des Previews variiert, so dass z.B. während einer Fixation auf dem Wort *wedding* u.a. auch die Varianten *cahc* oder *picz* mit teilweise überlappenden Buchstaben präsentiert wurden. Das Kernergebnis des Experimentes bestand darin, dass der Nutzen durch die parafoveale Verarbeitung graphematischer Teilinformation stark zunahm, wenn das Zielwort durch den Kontext vorhersagbar war. Dies kann als Beleg dafür gelten, dass kognitive top down Information während des normalen Lesens bereits die frühesten Phasen der Zeichen- und Wortverarbeitung beeinflussen kann.

Inzwischen sind ähnliche Variationen mehrfach realisiert worden, z.B. durch ein Experiment aus unserer Arbeitsgruppe, in dem wir zeigen, dass eine hohe Vorhersagbarkeit im Kontext zu einer besseren parafovealen Zeichenverarbeitung im übernächsten Wort, also am äußersten Rand der Blickspanne führt (Radach/Inhoff/Glover/Vorstius 2013). Hiermit vergleichbar haben Schotter, Lee, Reidermann und Rayner (2015) zumindest für kontextuell vorhersagbare Wörter im Englischen bestätigt, dass auch semantische Information parafoveal vorverarbeitet werden kann (siehe Hohenstein/Kliegl 2014 für eine umfassende Diskussion).

In den Bereich von Kontextwirkungen fällt auch ein Satz, mit dem inzwischen wohl fast jeder im Internet konfrontiert wurde:

2. „Neah einr Stidue der Cmabirdge Uinertvisy ist es eagl, in wlecher Rehenifloge die Bcuhtsbaen in Woeretn vokrmomen“

(Siehe <http://www.mrc-cbu.cam.ac.uk/people/matt.davis/Cmabrigde>, für einen Abriss zum Hintergrund). Zunächst ist festzustellen, dass schon scheinbar geringfügige Transpositionen erhebliche Verlängerungen von Blickzeiten beim Lesen verursachen (z.B. White u.a. 2008). Andererseits ist zu fragen, wie man auch bei massiven Vertauschungen immer noch zu mehr oder weniger richtigen Lösungen kommt. Um dies zu erklären, wurden auf der Ebene der Wortverarbeitung theoretische Ansätze entwickelt, in denen die Annahme einer festen Kodierung gelockert wird.

Beispielsweise schlagen Grainger und Whitney (2004) eine Enkodierung in Form von Buchstabenpaaren vor, die gegen Vertauschungen relativ robust ist. Demgegenüber betonen Kinoshita und Norris (2013), dass die Identifikation von Buchstaben und deren Position ein verrauschter Prozess ist und wir nicht jeden Buchstaben korrekt wiedererkennen müssen. Da das Wiedererkennen einzelner Wörter also immer nur auf relativen Wahrscheinlichkeiten basiert, dass spezifische Wörter präsentiert wurden, können wir trotz Auslassungen, Ersetzungen und Vertauschungen die Wörter immer noch korrekt aus den jeweils möglichen Kandidaten auswählen. Noch einen Schritt weiter führt die am obigen Beispiel leicht nachvollziehbare Tatsache, dass Wörter mit Buchstabenvertauschungen im Kontext eines Satzes viel leichter erkannt werden können. Im Rahmen des oben be-

schriebenen Modells der Worterkennung (siehe Abb. 1) sollten erwartete Wörter stets voraktiviert werden. Hierdurch wäre davon auszugehen, dass selbst bei nur mäßiger orthographischer Überlappung zwischen dem erwarteten und präsentierten Wort eine korrekte Identifikation ausgelöst wird. Es gilt also auch an dieser Stelle die grundlegende Aussage, dass die beim Lesen beobachtbaren Leistungen nur durch permanente Wechselwirkungen von bottom-up und top-down Verarbeitung erklärbar sind (Hofmann/Jacobs 2014; Hofmann u.a. 2014).

### 3.2. Ein Modell der Informationsverarbeitung beim dynamischen Lesen

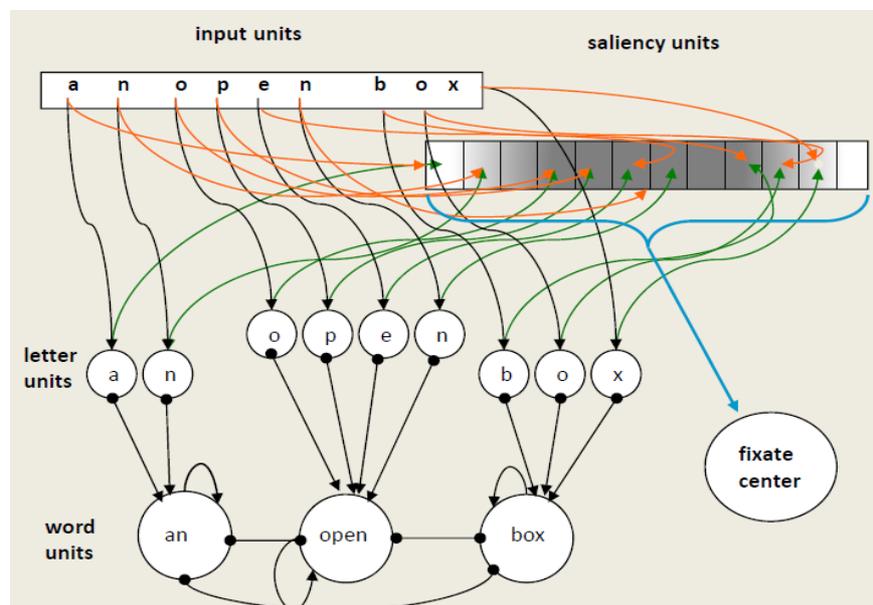
Die bisher entwickelten computationalen Modelle des dynamischen Lesens konzentrieren sich im Kern auf die Erklärung der Koordination zwischen der linguistischen, vor allem lexikalischen, Verarbeitung einerseits und der Steuerung von Blickbewegungen andererseits. Diese Modelle können anhand von zwei Dimensionen klassifiziert werden (Radach/Reilly/Inhoff 2007). Das erste Unterscheidungsmerkmal ist der Grad, in dem neben der linguistischen Verarbeitung auch basale perzeptive und/oder visuomotorische Faktoren eine Rolle bei der Steuerung der Blickbewegungen spielen. Die zweite, wesentlich kontroverser diskutierte, Dimension betrifft die Frage, ob beim Lesen Wörter innerhalb der Blickspanne nur sequentiell oder auch parallel verarbeitet werden.

Es besteht in der Literatur weitgehend Einigkeit darüber, dass erwachsene Leser die Buchstaben innerhalb (relativ gut bekannter) Wörter nicht primär seriell, sondern parallel verarbeiten (Pollatsek/Rayner 1989). Allerdings wird dieses Prinzip in einer in der Literatur prominenten Familie von Modellen negiert, sobald es um graphematische Information aus benachbarten Wörtern geht. Ein zentraler Mechanismus der sogenannten *Sequential-Attention*-Modelle besteht darin, dass sich ein Spotlight der „Aufmerksamkeit“ und damit der lexikalischen Verarbeitung innerhalb der Blickspanne seriell von einem Wort zum anderen bewegt (Reichle u.a. 1998; siehe Reichle u.a. 2009 für Argumente, die ein solches Modell stützen).

Als Alternative haben Inhoff, Radach, Starr und Greenberg (2000) einen Verarbeitungsgradienten vorgeschlagen, der eine parallele graphematische Verarbeitung über Wortgrenzen hinweg erlaubt. Dieser Aufmerksamkeitsgradient kann einem Spotlight funktional äquivalent werden, wenn Wörter oder Textregionen besonders schwer zu verarbeiten sind. In diesem Fall wären alle Ressourcen auf ein Wort konzentriert und die Überlappung zwischen mehreren aktivierten Buchstabenclustern verschwindet. Eine ähnliche Position wird von Engbert, Nuthmann, Richter und Kliegl vertreten (2005). Sie haben in ihrem sehr erfolgreichen SWIFT-Modell (Akronym für *saccade generation with inhibition by foveal targets*) neben dominierender paralleler Verarbeitung auch einen quasi-seriellen

Modus implementiert, der eintreten kann, wenn ein besonders schwieriges Wort fixiert wird.

Im folgenden Abschnitt möchten wir kurz auf das Glenmore-Modell eingehen, das als einziges der bisher veröffentlichten Modelle zur Blicksteuerung beim Lesen explizit ein Modul der graphematischen Verarbeitung einschließt (Reilly/Radach 2003, 2006). Dabei wird eine gegenüber dem am Beginn des Kapitels vorgestellten AROM einfachere Version eines interaktiven Aktivationsmodells der Zeichenverarbeitung in eine komplexe Architektur der visuomotorischen Steuerung beim dynamischen Lesen eingebettet.



**Abbildung 3:** Zeichen- und Wortverarbeitung im Glenmore-Modell. Unterschiedliche Typen von Verbindungen sind farblich kodiert. Weitere Erläuterungen im Text.

Abbildung 3 zeigt die wichtigsten Grundelemente des Modells und illustriert das Zusammenspiel von Zeichen- und Wortverarbeitung. Am Beginn jeder Fixation wird ein 30 Elemente umfassender Vektor von visuellen *input units* aktiviert, der eine Blickspanne repräsentiert, wobei sich der virtuelle Fixationspunkt knapp links von der Mitte befindet (siehe Abb. 3 oben). Die Breite dieses Inputvektors ist so dimensioniert, dass aus den äußersten Randbereichen kaum je relevante Information aufgenommen wird. Wesentlich ist eine Gewichtung nach dem seitli-

chen Abstand zum Fixationspunkt, die mit Hilfe einer Gammafunktion realisiert wird.

Von hier wird Aktivierung an zwei weitere Elemente übertragen, einerseits an einen Vektor von *letter units* (schwarze Verbindungen) zur Buchstabenverarbeitung sowie einen Vektor von *saliency units* (orange Verbindungen). Der Salienzvektor erhält weiteren Input aus der Buchstabenverarbeitung (grüne Verbindungen) von den *letter units*. Er realisiert eine Integration visueller und linguistischer Information und bildet so insgesamt die Salienz (Attraktivität) eines Wortes als potenzielles Ziel der nächsten Sakkade ab. Über den Verlauf der Buchstabenverarbeitung erreicht die Aktivierung der *letter units* nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen ein Maximum und beginnt dann wieder abzusinken. Dabei können weiter vom Fixationsort entfernte, parafoveale Buchstaben den gleichen Spitzenwert erreichen, dies wird aber umso länger dauern, je größer die Distanz zur "Fovea" ist.

Die Wortebene ist im Modell durch die *word units* repräsentiert, von denen die *letter units* durch Feedbackverbindungen top down - Input erhalten. Das Aktivierungsniveau der Worteinheiten ist einerseits eine Funktion des mittleren Inputs ihrer Buchstabeneinheiten, hängt andererseits aber auch von der Worthäufigkeit ab. Dies ist in Form einer positiven selbstrekurrenten Verbindung implementiert, durch die das Aktivierungsniveau hochfrequenter Wörter schneller steigt.

Während jeder Fixation besteht ein Wettbewerb zwischen den Wörtern, der durch inhibitorische Verbindungen realisiert wird. Wenn ein Wort das Maximum der Aktivierung erreicht hat, scheidet es aus dem Wettbewerb aus. In dieser Architektur werden mehrere Wörter simultan verarbeitet, oft wird jedoch ein Wort den größten Anteil der Verarbeitungsressourcen auf sich vereinigen. Die Aktivierungswerte von Wort- und Buchstabeneinheiten werden von einer Fixation zur nächsten übertragen, wodurch die im Abschnitt 3.1 ausführlich diskutierte Integration von parafovealer und fovealer Information realisiert ist.

Die Aktivität der *letter units* wird auch zu einem Fixationszentrum übertragen (blaue Verbindungen), wo eine Summation der gesamten Aktivität im Sprachverarbeitungsmodul erfolgt. Ein stetiger Abfall der Aktivierung im Fixationszentrum bewirkt eine wachsende Tendenz zur Auslösung einer Sakkade, die je nach Schwierigkeit der aktuellen sprachlichen Verarbeitung früher oder später erfolgen wird. Sobald die Aktivierung im Fixationszentrum einen Schwellenwert unterschreitet, kommt es zur Sakkade, die auf die Wortposition gerichtet wird, an der sich das gegenwärtige Salienzmaximum befindet (Reilly/Radach 2006).

#### 4. Schlussbemerkungen

Das Anliegen unseres Kapitels bestand darin, einen Einblick in die Forschung zur graphematischen Verarbeitung aus Sicht der kognitionswissenschaftlich begrün-

deten Leseforschung zu liefern. Dabei reproduziert die Teilung unseres Textes in einen ersten Abschnitt zur Einzelwortverarbeitung und einen weiteren zum kontinuierlichen Lesen die Situation in der gegenwärtigen Forschungslandschaft. Man kann die Trennung beider Herangehensweisen sehr schön im Beispiel des oben diskutierten Phänomens der Buchstabenvertauschung illustrieren, zu dem beide Communities mehr oder weniger unabhängig publiziert haben. Es ist wiederholt dazu aufgerufen worden, diese Trennung zu überwinden (Grainger 2003; Radach/Reilly/Inhoff 2007) und im letzten Jahrzehnt mehrten sich tatsächlich die Zeichen für einen langsamen, aber stetigen Fortschritt in Richtung Integration. In diesen Kontext gehört, wie oben erläutert, auch die Entwicklung des Glenmore-Modells.

Ein wichtiges Fazit unserer Überblickdarstellung sehen wir darin, dass man die graphematische Verarbeitung eigentlich gar nicht isoliert von anderen Ebenen und Modulen im Gesamtverbund der Verarbeitung geschriebener Sprache betrachten kann. Obwohl einige Elemente der Zeichen- und Wortverarbeitung durchaus einen modularen Charakter haben, bestehen zu jedem Zeitpunkt massive Wechselwirkungen. Wie wir an verschiedenen Beispielen gezeigt haben, wird dies immer dann besonders eindrucksvoll deutlich, wenn Top Down – Faktoren wie etwa semantische Erwartungen selbst die elementarsten Routinen der Zeichenverarbeitung beeinflussen.

Nach unserer Überzeugung kann der Weg zu einem umfassenden Verständnis von Leseprozessen nur über neurokognitive Simulationsmodelle führen, in denen die Komplexität der Sprachverarbeitung (auch für begrenzte Gegenstandsbereiche) realistisch abgebildet wird. Dabei gehört zu einer realistischen Abbildung, dass Lesen immer nur im Gesamtverbund mentaler Tätigkeit stattfinden kann. Daher sollte eine gute Theorie des Lesens immer auch danach fragen, wie sich ein Prozess wie die graphematische Verarbeitung in das allgegenwärtige Zusammenspiel von Wahrnehmung, Sensomotorik, Gedächtnis und Lernen integriert.

## 5. Literatur

- Balota, David/Melvin Yap/Michael Cortese (2006): Visual Word Recognition. In: Matthew J. Traxler/Morton A. Gernsbacher (Hg.): Handbook of Psycholinguistics. (Second Edition). Amsterdam, 285-375.
- Binder, Jeffrey R. u.a. (2003): Neural correlates of lexical access during visual word recognition. In: Journal of Cognitive Neuroscience, 15, 372-393.
- Braun, Mario M. u.a. (2006): Model-generated lexical activity predicts ERP amplitudes in lexical decision. In: Brain Research, 1073-1074, 431-439.

- Cattell, J. McKeen (1885): Über die Zeit der Erkennung und Benennung von Schriftzeichen, Bildern und Farben. In: *Philosophische Studien* 2, 635-650.
- Collins, Allen M./ Elizabeth F. Loftus (1975): A spreading-activation theory of semantic processing. In: *Psychological Review*, 82, 407–428.
- Cohen, Laurent u.a. (2000): The visual word form area spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. In: *Brain* 123, 291–307.
- Dambacher, Michael u.a. (2009): Event-related potentials reveal rapid verification of predicted visual input. In: *PloS one* 4, 1-8.
- Dambacher, Michael u.a. (2006): Frequency and predictability effects on event-related potentials during reading. In: *Brain Research*, 1084, 89–103.
- Devlin, Joseph, T. u.a. (2004): Morphology and the internal structure of words. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 101, 14984-14988.
- Duncan, Keith J./Chotiga Pattamadilok/Joseph T. Devlin (2010): Investigating occipito-temporal contributions to reading with TMS. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 739–50.
- Engbert, Ralf/Antje Nuthmann/Eike Richter//Reinhold Kliegl (2005): SWIFT: A dynamical model of saccade generation during reading. In: *Psychological Review*, 112, 777–813.
- Fiebach, Christian J. u.a. (2002): fMRI Evidence for dual routes to the mental lexicon in word recognition. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 11–23.
- Grainger, Jonathan (2003): Moving eyes and reading words: How can a computational model combine the two? In Hyönä, Jukka/Ralph Radach/Heiner Deubel (Hg.). *The Mind's Eye: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movement Research*. Oxford, 457-470.
- Grainger, Jonathan/Arthur M. Jacobs (1993): Masked partial-word priming in word recognition: Effects of positional letter frequency. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19, 951–964.
- Grainger, Jonathan/Arthur M. Jacobs (1996): Orthographic processing in visual word recognition: a multiple read-out model. In: *Psychological Review*, 103, 518–65.
- Grainger, Jonathan/Arnaud Rey/Stephane Dufau (2008): Letter perception: from pixels to pandemonium. In: *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 381-387.
- Hauk, Olav/Friedemann Pulvermüller (2004): Effects of word length and frequency on the human event-related potential. In: *Clinical Neurophysiology*, 115, 1090–103.
- Hebb, David (1949): *The Organization of Behavior*. New York.
- Hofmann, Markus J./Arthur M. Jacobs (2014): Interactive activation models and semantic context: From behavioral to brain data. In: *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 46, 85-104.

- Hofmann, Markus J. u.a. (2009): Affective processing within 1/10th of a second: In: *Cognitive, Affective and Behavioral Neurosciences*, 9, 389–397.
- Hofmann, Markus J. u.a. (2011): Remembering words in context as predicted by an Associative Read-Out Model. In: *Frontiers in Psychology*, 2, 1-11.
- Hofmann, Markus J. u.a. (2014): Occipital and orbitofrontal hemodynamics during naturally paced reading : An fNIRS study. In: *NeuroImage*, 94, 193–202.
- Hohenstein, Sven/Reinhold Kliegl (2014): Semantic preview benefit during reading. In: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 40 (1), 166.
- Holcomb, Phillip J./Jonathan Grainger/Tim O'Rourke (2002): An electrophysiological study of the effects of orthographic neighborhood size on printed word perception. In: *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14, 938–950.
- Huey, Edmund (1908): *The Psychology and Pedagogy of Reading*. Macmillan.
- Huber, David E. u.a. (2008): The dynamics of integration and separation: ERP, MEG, and neural network studies of repetition effects. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 34, 1389–416.
- Hutzler, Florian u.a. (2013): Parafoveal X-masks interfere with foveal word recognition: evidence from fixation-related brain potentials. In: *Frontiers in Systems Neuroscience*, 7(33), online publication.
- Inhoff, A.W. u.a. (2000). Allocation of Visuo-Spatial Attention and Saccade Programming during Reading. In: Kennedy, Alan/Ralph Radach/Dieter Heller/Joel Pynte (Hg.): *Reading as a Perceptual Process*. Oxford, 221-247.
- Inhoff, Albrecht/Cynthia Connine/Brianna Eiter/Ralph Radach/Dieter Heller (2004): Phonological representation of words in working memory during sentence reading. In: *Psychonomic Bulletin and Report*, 11, 320-325.
- Inhoff, Albrecht/Ralph Radach (1998): Definition and computation of oculomotor measures in the study of cognitive processes. In: Geoffrey Underwood (Hg.): *Eye Guidance in Reading and Scene Perception*. Oxford, 29-54.
- Inhoff, Albrecht/Ralph Radach (2014): Parafoveal Preview Benefits during Silent and Oral Reading: Testing the Parafoveal Information Extraction Hypothesis. In: *Visual Cognition*, 22, 354-376.
- Inhoff, Albrecht u.a. (2003): Distinct subsystems for the parafoveal processing of spatial and linguistic information during eye fixations in reading. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology - A*, 56A(5), 803-827.
- Jacobs, Arthur M./Jonathan Grainger (1994): Models of visual word recognition: Sampling the state of the art. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 20, 1311–1334.
- Jacobs, Arthur M./Markus Hofmann, J. (2013): Neurokognitive Modellierung. In: Erich Schröger/Stefan Kölsch (Hg.): *Affektive und Kognitive Neurowissenschaft: Bd. C/II/9*. Göttingen, 431-444.

- Kliegl, Reinhold/Antje Nuthmann/Ralf Engbert (2006): Tracking the mind during reading: The influence of past, present, and future words on fixation durations. In: *Journal of Experimental Psychology: General*, 135, 12–35.
- Kronbichler, Martin u.a. (2004): The visual word form area and the frequency with which words are encountered: evidence from a parametric fMRI study. In: *NeuroImage* 21, 946–53.
- Kuchinke, Lars u.a. (2011): Human striatal activation during adjustment of the response criterion in visual word recognition. In: *NeuroImage* 54, 2412–2417.
- Kutas, M./C. Van Petten (1994): Psycholinguistics electrified: event-related brain potential investigations. In Morton Ann Gernsbacher (Hg.), *Handbook of Psycholinguistics*. San Diego, 83-143.
- Kutas, Marta/Kara D. Federmeier (2011): Thirty years and counting: finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP): In: *Annual Reviews in Psychology*, 62, 621–47.
- Landauer, Thomas K./Susan T. Dumais (1997): A solution to Plato's problem: The latent semantic analysis theory of acquisition, induction, and representation of knowledge. In: *Psychological Review*, 104, 211–240.
- Lucas, Margery (2000): Semantic priming without association: A meta-analytic review. In: *Psychonomic Bulletin & Review*, 7, 618-630.
- McCandliss, Bruce D./Laurent Cohen/ Stanislas Deaene (2003): The visual word form area: expertise for reading in the fusiform gyrus. In: *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 293-299.
- McClelland, Jay L./David E. Rumelhart (1981): An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 1. An account of basic findings. In: *Psychological Review*, 5, 375–407.
- McConkie, George W./David Zola (1979): Is visual information integrated across successive fixations in reading? *Perception & Psychophysics*, 25, 221-224.
- Pollatsek, Alexander/Keith Rayner (1989): Reading. In Michael Posner, (Hg.), *Foundations of Cognitive Science*. Cambridge, Massachusetts, 401-436.
- Price, Cathy J. (2012): A review and synthesis of the first 20 years of PET and fMRI studies of heard speech, spoken language and reading. In: *NeuroImage*, 62, 816–847.
- Price, Cathy J./Devlin, Joseph T. (2003): The myth of the visual word form area. In: *NeuroImage* 19, 473–481.
- Radach, Ralph/Albrecht Inhoff/Lisa Glover/Christian Vorstius (2013): Contextual constraint and N+2 preview effects in reading. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66, 619-633.
- Radach, Ralph/Dieter Heller/Albrecht Inhoff (2004): Orthographic regularity gradually modulates saccade amplitudes in reading. In: *European Journal of Cognitive Psychology*, 16, 27–51.

- Radach, Ralph/Alan Kennedy (2004): Theoretical perspectives on eye movements in reading: past controversies, current deficits and an agenda for future research. In: *European Journal of Cognitive Psychology*, 16, 3-26.
- Radach, Ralph/Alan Kennedy (2013): Eye movements in reading: Some theoretical context. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 66, 429-452.
- Radach, Ralph/Ronan Reilly/Albrecht Inhoff (2007): Models of oculomotor control in reading: towards a theoretical foundation of current debates. In: Roger van Gompel u.a. (Hg.): *Eye Movement Research*. Oxford 237-270.
- Rayner, Keith (2009): Eye movements and attention in reading, scene perception, and visual search. In: *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62, 1457-1506.
- Reichle, Erik u.a. (1998): Toward a model of eye movement control in reading. In: *Psychological Review*, 105, 125–157.
- Reichle, Erik u.a. (2009): Encoding multiple words simultaneously in reading is implausible. In: *Trends in Cognitive Sciences*, 13, 115–119.
- Reilly, Ronan/Ralph Radach (2003): Foundations of an interactive activation model of eye movement control in reading. In Hyönä, Jukka/Ralph Radach/Heiner Deubel (Hg.): *The Mind's Eyes: Cognitive and Applied Aspects of Eye Movements*. Oxford.
- Reilly, Ronan/Ralph Radach (2006): Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. In: *Cognitive Systems Research*, 7, 34-55.
- Risse, Sarah/Reinhold Kliegl (2014): Dissociating preview validity and difficulty in parafoveal processing of word n+1 during reading. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 40, 653-668.
- Rossell, Susan L./Cathy Price/A. Christina Nobre (2003): The anatomy and time course of semantic priming investigated by fMRI and ERPs. In: *Neuropsychologia*, 41, 550–64.
- Schotter, Elisabeth u.a. (2015): The effect of contextual constraint on parafoveal processing in reading. In: *Journal of Memory & Language*, 83, 118-139.
- Schurz, Matthias u.a. (2010): A dual-route perspective on brain activation in response to visual words: evidence for a length by lexicality interaction in the visual word form area (VWFA). In: *NeuroImage* 49, 2649–2661.
- Stevens, Michael/Jonathan Grainger (2003): Letter visibility and viewing position effects in word recognition. In: *Perception & Psychophysics*, 65, 133-151.
- Ungerleider, Leslie G./Michael Mishkin (1982): Two cortical visual systems. In: David J. Ingle/Melvyn A. Goodale/Richard J. W. Mansfield (Hg.): *Analysis of Visual Behavior*. Cambridge, 549–586.
- Ziegler, Johannes C./Arthur M. Jacobs/Dorothee Klüppel (2001): Pseudohomophone effects in lexical decision. In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 27, 547–559.