

Pierre Sachse, Eberhard Ulich (Hrsg.)

Psychologie menschlichen Handelns: Wissen und Denken - Wollen und Tun

Zum 80. Geburtstag von Winfried Hacker



Das Arbeitsgedächtnis als „Nadelöhr“ des Denkens

Pierre Sachse, Markus Martini, Jakob Pinggera, Barbara Weber, Katharina Reiter & Marco Furtner, *Innsbruck*

1 Theoretischer Hintergrund

Es ist ein wenig bekannter Sachverhalt, dass der Terminus „working memory“ (Arbeitsgedächtnis) interessanterweise erstmals durch eine Basisarbeit zur psychischen Regulation von Tätigkeiten – „Plans and the structure of behavior“ (Miller, Galanter & Pribram, 1960, p. 65) – eingeführt wurde,⁹ bevor er in begrifflicher Erweiterung ein bedeutsames Konzept der Allgemeinen Psychologie werden sollte. Das Arbeitsgedächtniskonzept umfasst die Gesamtheit der kognitiven Prozesse, Mechanismen und Strukturen, die aufgabenrelevante Informationen aktiv für eine zielgerichtete Verarbeitung temporär verfügbar halten, koordinieren, bei Bedarf manipulieren; es kann als funktionelle Einheit des gleichzeitigen Verarbeitens und Behaltens von Informationen charakterisiert werden (vgl. u.a. Baddeley & Hitch, 1974; Baddeley, 1986, 2000, 2007, 2012). Demnach ist das Arbeitsgedächtnis für alle anspruchsvolleren kognitiven Leistungen von zentraler Bedeutung. So billigen Vertreter der Kognitionspsychologie auch heute dem Arbeitsgedächtniskonzept für Bereiche der angewandten Disziplinen wie der Pädagogischen und Klinischen Psychologie Wert zu, erstaunlicherweise findet hingegen die Arbeitspsychologie oft nicht einmal Erwähnung (vgl. beispielweise Rummer & Fiebach, 2010). Dabei kommt dem Arbeitsgedächtnis doch insbesondere auch im Arbeitskontext eine leistungsbestimmende Rolle zu. Schlichtes Nachdenken oder gleich ein Blick in Winfried Hackers Lehrbuch von 1986 wäre hierfür allerdings vonnöten gewesen. Die Entlastung des Arbeitsgedächtnisses dürfte sich in der Zukunft sogar als ein unerlässlicher Gestaltungsschwerpunkt erweisen.

Bei einer Tätigkeitsklasse ist das Arbeitsgedächtnis als „Nadelöhr“ des Denkens, als „Enge des Bewusstseins“, besonders offenkundig: bei den Entwurfstätigkeiten. Sie umfassen u.a. das Entwerfen von Programmen, Maschinen, Verfahren, Gebäuden, Substanzen. Es sind Arbeitstätigkeiten mit problemfindenden und problemlösenden Anteilen. Weitere Spezifika von Entwurfstätigkeiten aus psychologischer Sicht wurden u. a. von Görner (1973, 1976, 1994), Hacker (1998, 2005), Sachse (1999, 2002), Hacker & Sachse (2006, 2013) beschrieben. Oft unterschätzt und bislang kaum im Entwurfskontext untersucht wurden allerdings Anforderungen, bei denen „nur“ ein algorithmisches Denken, also ein wissenschaftsgestütztes, regelbasiertes Bearbeiten von komplexen Aufgaben (nicht von Problemen) notwendig wird. Solche Anforderungen finden sich z.B. bei der Modellierung von Geschäftsprozessen, die zunehmend von Wirtschaftsinformatikern gestaltet werden. Die modellhafte Abbildung und Beschreibung von Geschäftsprozessen erlaubt die Dokumentation und Optimierung solcher Abläufe, eine zeitlich-logische, zielgerichtete Abfolgegestaltung von Aufgaben (Gadatsch, 2008). Auch für die Bearbeitung solcher Aufgaben dürfte dem Arbeitsgedächtnis eine Schlüsselrolle zukommen, müssen doch u. a. zugleich diverse Regeln aus dem Langzeitgedächtnis aktiviert, in das Arbeitsgedächtnis überführt und der Trade-off von

⁹ Es verwundert dabei kaum, dass Miller et al. (1960) auf Lewin (1935) rekurrieren, u.a. hinsichtlich der Beziehung zwischen den Zielen und Gedächtnisleistungen.

Bewussterhalten und Verarbeiten gemeistert werden. Wir kommen in der Darstellung unserer empirischen Studie darauf zurück.

Vorab sollen ausgewählte Befunde zur Arbeitsgedächtnisproblematik erwähnt werden, deren Kenntnis wir in diesem Kontext noch für wichtig erachten: Interindividuelle Unterschiede in der Arbeitsgedächtniskapazität sind hoch korreliert mit Indikatoren kognitiver Leistungen in komplexen Aufgaben, beispielsweise dem Erlernen einer Programmiersprache (Shute, 1991), dem Textverstehen (Hacker, Hübner, Müller, Nedkova, Osterland & Wollenberger, 1992; Hacker & Osterland, 1995; Daneman & Merikle, 1996; Hacker & Sieler, 1997; Ozuru, Dempsey & McNamara, 2009), dem deduktiven Schließen (Oberauer, Weidenfeld & Hörnig, 2006; De Neys, 2006). Zudem ist die Arbeitsgedächtniskapazität der stärkste einzelne Prädiktor für die allgemeine Intelligenz (Oberauer, Süß, Wilhelm & Sander, 2007; Oberauer, Süß, Wilhelm & Wittmann, 2008). Es gibt ferner Hinweise, dass ausgeprägt planungsgeneigte Personen dann hohe Leistungen erzielen, wenn zugleich eine hohe Arbeitsgedächtniskapazität vorliegt (Wiesner & Hacker, 1994). Aufgrund ausgeprägterer strategienbedingter Kompilation sowie einer fortgeschritteneren Prozeduralisation im Sinne von Anderson (1982) weisen Spitzenkünstler eine überdurchschnittliche mentale Verarbeitungskapazität auf (Hacker, Handrick, Heimann, Oehm, Richter, Sachse & Schneider, 1999; Hacker, 2005). Bei Anforderungen vom Typ des Problemlösens werden die mentalen Ressourcen der Bearbeiter durch die Berücksichtigung mehrerer Zwischenziele und -resultate, der Aufrechterhaltung einer angemessenen Problemrepräsentation, der Strategie des vorausschauenden (bzw. auch des rückwärtsgerichteten) Denkens etc. erheblich belastet (Kotovsky, Hayes & Simon, 1985; Sweller, 1988). Zu dieser Belastung tragen deklarative und prozedurale Prozesse bei. Die deklarativen Prozesse beim Problemlösen dienen dem Aufbau und der Aufrechterhaltung der Problemrepräsentation und beziehen sich auf Objekte und deren Eigenschaften sowie auf Operatoren. Die prozeduralen Prozesse sind dagegen strategischer Art und wirken in der Struktur der von den deklarativen Prozessen bestimmten Repräsentationen (Klix, 1971; Newell & Simon, 1972; Dörner, 1976; Klauer, 1993). Je stärker die Ressourcen belastet werden, um so weniger erfolgreich und effizient wird das Denken sein, da die Problembearbeiter der Belastung des Arbeitsgedächtnisses durch die deklarative und prozedurale Vereinfachungen entlastend entgegenwirken. Dies wird durch den Einsatz weniger belastender Strategien und das Operieren in einem vereinfachten Problemraum erreicht, womit oftmals zugleich relevante Aspekte vernachlässigt oder übersehen werden können. Gleichzeitig ist während der Problembearbeitung ein Auftreten sogenannter „illegaler“ Operationen zu beobachten (Egan & Greeno, 1974; Hussy, 1984; Richardson, 1984; Dörner, 1989; Klauer, 1993, 1995). Das deklarative Vereinfachen ist im Gegensatz zum Einsatz von Planungsheuristiken (Polya, 1945; Newell & Simon, 1972) selten eine bewusst eingesetzte Strategie der Informationsreduktion, sondern die Folge eines unbeabsichtigten Verlustes deklarativer Informationen aus dem Arbeitsgedächtnis bei Überlastung sowie der Interferenz der Prozesse des Verarbeitens und des Aktivierens (Anderson & Jeffries, 1985). Des Weiteren belegen die Befunde von Kyllonen & Christal (1990), dass interindividuelle Unterschiede in den Problemlöseleistungen ansonsten gleich befähigter Bearbeiter mit Unterschieden in der Kapazität des Arbeitsgedächtnisses einhergehen. Untersuchungen zu Ausmaß und Art der Belastungen mentaler Ressourcen bestätigen ferner, dass ein „internales“ (mentales) Problemlösen das Arbeitsgedächtnis unter sonst gleichen Bedingungen stärker belastet als ein „externales“ Problemlösen, das beispielsweise an einem gegenständlichen Modell äußerlich

vollzogen wird. Die Problemlösegüte nimmt statistisch gesichert ab, je internaler die Probleme bearbeitet werden müssen (Klauer, 1993; Gilhooly, Logie, Wetherick & Wynn, 1993). Bei der Wahl etwaiger externer Unterstützungsformen muss bedacht werden, dass sie an das Arbeitsgedächtnis nicht höhere Anforderungen stellen als sie selbst zu reduzieren vermögen. In experimentellen Untersuchungen zum „Design Problem Solving“ wurde zudem nachgewiesen, dass Personen mit geringerer Arbeitsgedächtnisspanne mehr überflüssige Lösungsschritte tätigen, mehr ineffiziente Lösungsmöglichkeiten erwägen und mehr Zeitbedarf beim Entwerfen benötigen. Zwischen der Arbeitsgedächtnisspanne und der Lösungsgüte bestanden signifikante mittelstarke Beziehungen (Sachse & Hacker, 1997; Hacker & Sachse, 2013).

Auf dieser Basis (und damit zugleich auf der Grundlage der identifizierten Erkenntnislücken) hat uns in unserer Studie zur Modellierung von Geschäftsprozessen folgende Kernfragestellung geleitet: Wie wirkt sich die Begrenztheit kognitiver Ressourcen, das Arbeitsgedächtnis (- bestimmt anhand von fünf validierten Tests -), auf *Prozesskriterien* (Art und Anzahl benötigter Lösungsschritte / Bereitstellungs-, Anpassungs-, Wiederholungs-, Verwerfungs-, Positionierungsschritte) und *Ergebniskriterien* (Lösungsqualität, Lösungszeit, Fehlerart und -anzahl) bei der Bearbeitung einer *komplexen, algorithmischen Aufgabe* aus?

2 Hypothesen

Für ein erfolgreiches Handeln bei der Modellierung von Geschäftsprozessen müssen unablässig Sachverhalte bewusst erhalten werden (u. a. diverse Teilziele und Zwischenergebnisse), während andere bearbeitet werden. Insofern stellen solche „mentalen Doppeltätigkeiten“ (Hacker & Osterland, 1995) zugleich erhöhte Anforderungen an die begrenzte mentale Arbeitsgedächtniskapazität. Bei einer fehlenden Entlastungsmöglichkeit kann dies mit einer Zunahme ineffizienter, überflüssiger resp. redundanter Bearbeitungsschritte (insbesondere Verwerfungs- und Wiederholungsschritte), einem erhöhten Zeitbedarf und einer Abnahme der Lösungsgüte einhergehen. Solche Zusammenhänge konnten bislang für anspruchsvolle Entwurfstätigkeiten belegt werden (vgl. Sachse, Hacker, Leinert & Riemer, 1999; Pietzcker, 2004; Hacker & Sachse, 2013), dürften aber ebenso für komplexe, algorithmische Anforderungen bei der Geschäftsprozessmodellierung von Gültigkeit sein (vgl. Kapitel 1), da diese gleichermaßen mentale Kapazität binden. Bei allen Arbeitstätigkeiten mit hohen Anforderungen an das kurzfristige Behalten besitzt die Erhöhung der Größe der Behaltensspanne des Arbeitsgedächtnisses unmittelbare Bedeutung und hat zudem Einfluss auf die Fehlerquote. So sieht u. a. Anderson (1987) im Arbeitsgedächtnis eine entscheidende Fehlerquelle für anspruchsvolle geistige Arbeitstätigkeiten, z.B. dem Programmieren. Auch Befunde aus der Grundlagenforschung zu interindividuellen Unterschieden in der Arbeitsgedächtniskapazität belegen, dass Probanden mehr Fehler erzeugen, wenn beispielsweise ein Konflikt zwischen dem Aufgabenziel und dem visuellen Orientierungsreiz besteht (Antisakkadenaufgabe / Kane, Bleckley, Conway & Engle, 2001), wenn beim Stroop-Test die Zahl der inkongruenten im Vergleich zu den kongruenten Durchgängen (das Farbwort „ROT“ wird z.B. in grüner Farbe präsentiert) reduziert wurde (Kane & Engle, 2003) oder wenn beim inzidentellen deterministischen

Sequenzlernen eine gelernte alte Sequenz inhibiert und eine neue Sequenz gelernt werden musste (Martini, Furtner & Sachse, 2013).

Wir erwarten:

Hypothese 1: *Die Arbeitsgedächtniskapazität zeigt negative Beziehungen zu den Verwerfungs- und Wiederholungsschritten [Prozesskriterien].*

Hypothese 2a: *Die Arbeitsgedächtniskapazität zeigt positive Beziehungen zur Lösungsgüte, negative Assoziationen zu den syntaktischen Fehlern, semantischen Fehlern und zur Lösungszeit [Ergebniskriterien].*

Hypothese 2b: *Die fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben weisen – über Geschlecht und Alter hinweg – prädiktive Fähigkeiten bezüglich der kritischen Ergebnisvariablen (syntaktische Fehler, semantische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit) auf.*

3 Studie: Modellierung von Geschäftsprozessen

3.1 Methodik

Versuchspersonen

An der Studie nahmen 60 Studierende der Universität Innsbruck teil (40 % Frauen, 60% Männer). Das durchschnittliche Alter betrug 24 Jahre (bei einer Altersspanne von 19 bis 41 Jahren). Das experimentelle Setting bestand aus zwei Segmenten: Teil 1: Einführung in das Prozessmodellierungsprogramm und Training mit der „Cheetah Experimental Platform“ (Pinggera, Zugal & Weber, 2010) sowie die anschließende Messung der Arbeitsgedächtniskapazität (Zeitung: ca. 150 Minuten). Der Einführungs- part für die Studierenden beinhaltete Informationen zu grundlegenden Elementen von Geschäftsprozessmodellen. Ferner wurde unter Anleitung eine Modellierungsaufgabe gemeinsam erarbeitet und danach eine weitere Aufgabe durch die Studierenden selbstständig bearbeitet. Teil 2: Die Probanden wurden gebeten, selbstständig einen komplexen Geschäftsprozess zu modellieren (Zeitung: ca. 30 Minuten). Zwischen der Trainings- und der Testphase lag(en) mindestens ein Tag, maximal sieben Tage. Aufgrund eines fehlerhaften und unvollständigen Datensatzes einer Versuchsperson beruhen die statistischen Analysen demnach auf einem Stichprobenumfang von $N = 59$.

Aufgabenstellung

Vor der unmittelbaren Testphase wurden den Probanden die Programmbedingungen sowie die wesentlichen Elemente des Modells in einer Kurzpräsentation durch den Versuchsleiter nochmals erörtert. Etwaige offene Fragen der Probanden wurden in dieser Phase ebenso noch beantwortet. Danach erhielten die Probanden die untenstehende Aufgabenstellung zur Erarbeitung des Prozessmodells, die während der gesamten Bearbeitungszeit auf dem Bildschirm für sie einsehbar war.

„Zuerst wird die Kreditanfrage in das Computersystem der Bank eingetragen. Anschließend wird geprüft, ob alle nötigen Daten vorhanden sind. Sollten nicht alle Daten vorhanden sein, wird der Kunde kontaktiert. Anschließend werden die Daten wieder geprüft. Diese Schritte werden so lange wiederholt, bis die Daten vollständig sind. Nachdem dieser Vorgang abgeschlossen ist, werden die folgenden Überprüfungen unabhängig voneinander ausgeführt: Die Bank errechnet die verfügbaren finanziellen Mittel des Kunden; die Bank errechnet das jährliche Einkommen des Kunden; die Bank errechnet die benötigten finanziellen Mittel des Kunden. Nachdem alle Überprüfungen abgeschlossen sind, wird eine Entscheidung, wie im Folgenden beschrieben, gefällt. Wenn der Kredit weniger als 1.000.000 € beträgt, kann ein einzelner Mitarbeiter die Entscheidung treffen. Für Kredite über 1.000.000 € oder mehr müssen zwei Mitarbeiter an der Entscheidung beteiligt sein. In diesem Fall evaluiert jeder der beiden Mitarbeiter unabhängig vom anderen das Kreditersuchen. Anschließend treffen die beiden Mitarbeiter gemeinsam eine Entscheidung. Falls die Bank die Kreditanfrage positiv bewertet, wird dem Kunden ein Angebot vorgelegt. Andernfalls wird dem Kunden ein negativer Bescheid zugestellt. Danach wird die Kreditanfrage im Computersystem abgeschlossen und der Prozess beendet. Sollte der Kunde das Angebot akzeptieren, wird das Geld auf das Konto des Kunden transferiert. Anschließend wird die Kreditanfrage im Computersystem abgeschlossen und der Prozess beendet. Sollte der Kunde das Angebot nicht akzeptieren, wird evaluiert, ob das Angebot überarbeitet werden kann. Sollte sich die Bank dazu entscheiden, dem Kunden ein neues Angebot zu machen, muss das Angebot überarbeitet werden. Daraufhin muss über die Kreditvergabe erneut entschieden werden (wie beim vorherigen Angebot). Sollte die Bank das Angebot nicht überarbeiten wollen, wird dem Kunden ein negativer Bescheid zugestellt. Anschließend wird die Kreditanfrage im Computersystem abgeschlossen und der Prozess beendet.“

Untersuchungsmaterial und -mittel

Zur Untersuchung der Prozessmodellierung wurde die „Cheetah Experimental Plattform“ (CEP) verwendet. Bei der CEP handelt es sich um ein Modellierungswerkzeug, das speziell für die Untersuchung des Prozesses der Prozessmodellierung entwickelt wurde (Pinggera, Zugel & Weber, 2010). Einerseits beinhaltet die CEP Komponenten, welche die Durchführung von Untersuchungen unterstützen. So können beispielsweise Fragebögen eingegeben werden, die den Probanden dann in vordefinierter Reihenfolge präsentiert werden. Andererseits beinhaltet die CEP einen Modellierungseditor, der für die Erstellung von Geschäftsprozessmodellen verwendet werden kann. Dieser speichert jede Interaktion des Modellierers mit der Modellierungsumgebung und versieht diese mit einem Zeitstempel. So kann im Anschluss die Erstellung eines Geschäftsprozessmodells Schritt für Schritt nachvollzogen werden. Solche Interaktionen umfassen das Hinzufügen und Löschen von Aktivitäten, Kontrollflusselementen und Kanten sowie die Veränderung des Layouts des Prozessmodells. Zu diesem Zweck können Modellelemente verschoben und die Kantenverläufe angepasst werden. Des Weiteren können Kanten beschriftet und Aktivitäten umbenannt werden. Eine vollständige Auflistung der von CEP unterstützten Interaktionen ist in der Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Mögliche Interaktionen mit der „Cheetah Experimental Platform“ (CEP).

<i>Interaktion</i>	<i>Beschreibung</i>
CREATE NODE	Erstellen einer Aktivität oder eines Kontrollflusselements
DELETE NODE	Löschen einer Aktivität oder eines Kontrollflusselements
CREATE EDGE	Erstellen einer Kante
DELETE EDGE	Löschen einer Kante
RECONNECT EDGE	Eine Kante neu verbinden
CREATE CONDITION	Die Bedingung einer Kante erstellen
DELETE CONDITION	Die Bedingung einer Kante löschen
UPDATE CONDITION	Die Bedingung einer Kante bearbeiten
RENAME	Eine Aktivität umbenennen
MOVE NODE	Verschieben einer Aktivität oder eines Kontrollflusselements
MOVE EDGE LABEL	Die Bedingung einer Kante verschieben
CREATE / DELETE / MOVE EDGE BENDPOINT	Den Verlauf einer Kante beeinflussen

Bestimmung der Arbeitsgedächtniskapazität (Verfahrensbeschreibung + Testwertberechnung)

Zur Messung der Arbeitsgedächtniskapazität wurden vier Aufgaben aus der Arbeitsgedächtnisbatterie von Lewandowsky, Oberauer, Yang & Ecker (2010) gewählt: die „operation span“ (OSPAN), die „sentence span“ (SSPAN), die „memory updating“-Aufgabe (MU) und die „spatial short-term memory“-Aufgabe (SSTM). Weiterhin wurde der bewährte „Rechenspannentest“ (RSPAN) von Hacker & Sieler (1993) eingesetzt. Die Aufgaben der Arbeitsgedächtnisbatterie von Lewandowsky et al. (2010) wurden in MATLAB 7.10.0.499 und der Psytolbox-Version 3 (Brainard, 1997; Pelli, 1997) programmiert; der RSPAN-Test wurde hingegen auf der CEP programmiert. Die fünf Tests zur Bestimmung der Arbeitsgedächtniskapazität wurden jedem Probanden in der dargelegten Reihenfolge auf 14-Zoll-Notebooks präsentiert.

OSPAN-Test: In jedem Durchgang sahen die Probanden eine sich ändernde Sequenz von arithmetischen Operationen (z.B. $3 + 4 = 7$) und zu erinnernde Konsonanten. Die Aufgabe des Probanden bestand darin, die Richtigkeit jeder Rechnung zu beurteilen (innerhalb von 3 Sekunden) und sich die präsentierten Buchstaben (Präsentationszeit: 1 Sekunde, in der Mitte des Bildschirms) für den späteren seriellen Abruf zu merken. Die Probanden gaben mit der Pfeiltaste „links“ an, dass die Rechnung korrekt ist und mit der Pfeiltaste „rechts“, dass die Rechnung falsch ist. Am Ende jedes Durchgangs erschien ein Fragezeichen in der Mitte des Bildschirms. Die Probanden wurden aufgefordert, die zu merkenden Buchstaben in der präsentierten Reihenfolge – ohne Zeitdruck – einzutippen. Ein Durchgang enthielt zwischen vier und acht Folgen von Rechnungen und Buchstaben. Es gab drei Übungsdurchgänge, diesen folgten fünfzehn Testdurchgänge, in welchen jeweils drei Durchgänge der entsprechenden Rechnungen und Buchstabenfolgen präsentiert wurden.

SSPAN-Test: Diese Aufgabe ähnelte der OSPAN. In jedem Durchgang wurde den Probanden ein Satz präsentiert, den die Probanden nach der Sinnhaftigkeit beurteilen mussten (sinnhafte Sätze wurden auf der Basis von drei Satzstrukturtypen variiert). Auf die Sätze folgte jeweils ein Buchstabe, der in der Mitte des Bildschirms präsentiert wurde. Alle Sätze enthielten zwischen acht und elf Wörter. Die Satzlänge, der Einsatz von Vornamen und der Einbau von „während“ und „als“ wurde über die Satzkatégorien experimentell ausbalanciert. Jeder Durchgang enthielt zwischen drei und sieben Sätze, die jeweils für 5 Sekunden präsentiert wurden. Hinsichtlich aller anderen Aspekte war die SSPAN identisch zur OSPAN.

MU-Test: In jedem Durchgang sahen die Probanden zwischen drei und fünf Rahmen. In jedem dieser Rahmen erschien sequenziell eine Zahl zwischen 1 und 9. Die Probanden mussten sich die Zahl für den jeweiligen Rahmen merken. Anschließend folgten arithmetische Rechenoperationen; so erschienen einmal oder mehrmals in einem der präsentierten Rahmen Zahlen, die addiert oder subtrahiert werden mussten (z.B. Rahmen 1 „+2“, Rahmen 4 „-4“). Die Probanden mussten die Rechenoperation mit der gerade memorierten Zahl durchführen und diese mit dem Ergebnis mental ersetzen. Nach einer variierenden Zahl von „updatings“ (zwischen zwei und sechs) erschien ein Fragezeichen in jedem der präsentierten Rahmen. Dabei mussten die Probanden die letzte erinnerte Zahl eintippen. Die Eingabe der Zahlen war zeitlich nicht limitiert und es gab in dieser sowie den folgenden Arbeitsgedächtnisaufgaben keine Rückmeldung zum erreichten Resultat. Die Aufgabe bestand aus zwei Übungsdurchgängen und fünfzehn Testdurchgängen.

SSTM-Test: In dieser Aufgabe wurde den Probanden ein 10 x 10 Gitter präsentiert, in dem sequenziell zwischen zwei und sechs Punkte für 900 Millisekunden erschienen. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, sich das Muster und weniger die genaue Position der Punkte zu merken. Die Generierung der Punkte erfolgte automatisch. Kein Punkt erschien in der Eckposition, um eine verbale Kodierung zu erschweren. Nach der Präsentation der Punkte wurden die Probanden aufgefordert, das Punktemuster zu reproduzieren. Dabei erschien ein leeres Gitter, in das die Probanden die Punkte – ohne Zeitdruck – eintragen mussten. Dies geschah mittels „Mausklicks“. Wurde ein Punkt falsch gesetzt, konnte dieser Schritt rückgängig gemacht werden, indem man den falsch gesetzten Punkt „anklickte“. Der Punkt verschwand und konnte neu positioniert werden. Wurden alle Punkte eingetragen, erschien ein „Next“ Feld unterhalb des Gitters. Durch einen „Klick“ auf die Schaltfläche wurden die Einträge des Probanden gespeichert und der nächste Durchgang gestartet. Nach drei Übungsdurchgängen folgten dreißig Testdurchgänge.

Hinweis: Der SSTM-Test repräsentiert eine relationale Integrationsaufgabe, die sich an die Originalversion von Oberauer (1993) anlehnt. Bei dieser Aufgabe ist es erforderlich, neue Relationen zwischen mehreren Elementen zu erstellen und die Relationen in eine Struktur zu integrieren. Die relationale Integrationsfunktion stellt insofern eine weitere abgrenzbare Funktion dar, die über das klassische Halten und Verar-

beiten von Informationen hinausgeht (Oberauer, Süß, Wilhelm & Wittmann, 2003, 2008).

Für eine detaillierte Beschreibung der OSPAN-, SSPAN- MU- und SSTM-Aufgaben sei nochmals auf Lewandowsky et al. (2010) verwiesen.

RSPAN-Test: Hierbei wurde den Probanden eine Gleichung für fünf Sekunden präsentiert (z.B. „ $6 + 5 - 3 =$ “). Die Aufgabe des Probanden bestand darin, die letzte Zahl der Gleichung zu memorieren (Endziffer) und gleichzeitig das richtige Rechenergebnis zu generieren und zu behalten. Die Anzahl der Aufgaben stieg einstufig von zwei bis sieben an. Jede Stufe umfasste dabei drei Aufgabenblöcke. Als richtig bearbeitet galt ein Aufgabenblock nur dann, wenn sowohl alle Endziffern als auch alle Ergebnisse in der richtigen Reihenfolge wiedergegeben wurden (z.B. Endziffer und Ergebnis der Gleichung 1 und Endziffer und Ergebnis der Gleichung 2). Am Ende der Aufgabe erschienen, entsprechend der Anzahl der präsentierten Gleichungen, freie Felder (2 Spalten, gekennzeichnet mit Endziffer und Ergebnis, z.B. bei 2 Rechnungen erschienen 4 freie Felder). Die Probanden wurden instruiert, die Endziffern und Ergebnisse in die freien Felder einzutragen. Dabei bestand kein Zeitdruck. Bei der Aufgabeninstruktion wurde betont, dass erst beide Teilleistungen zusammen eine zutreffende Bearbeitung ergeben. Es erfolgte ferner keine Rückmeldung zur erbrachten Leistung. Auf zwei Übungsdurchgänge folgten die Testdurchgänge. Die Aufgabe wurde unterbrochen, wenn auf zwei aufeinanderfolgenden Aufgabenstufen keiner der drei Aufgabenblöcke richtig bearbeitet wurde (vgl. ausführlich Hacker & Sieler, 1993).

Die *Berechnung der Testwerte* für die OSPAN-, SSPAN und MU-Aufgaben erfolgte auf der Basis der relativen Richtigkeit der reproduzierten Items. Ein Beispiel: Wurden beim OSPAN-Test 4 von 6 Buchstaben richtig erkannt, so wurde ein Punktwert von $4/6 = 0,667$ bestimmt. Der Gesamtpunktwert ergibt sich dann aus der Mittelwertbildung der Teilergebnisse. Der Punktwert beim SSTM-Test konnte wiederum aus dem (Zell-)Abstand zwischen präsentiertem und reproduziertem Einzelpunkt bestimmt werden. Demnach wurden zwei Punkte vergeben, wenn es zwischen gesetztem Punkt und präsentiertem Punkt keinen (Zell-)Abstand gab. Bei einem Abstand von einer Zelle wurde ein Punkt vergeben und bei mehr als einer Zelle null Punkte. Die Summe der Punktwerte wurde dividiert durch die Gesamtpunktzahl von 240 (zur Testwertberechnung vgl. Lewandowsky et al., 2010). Der RSPAN-Wert wurde über die Formel $RSP = 1.5 + \sum R/3$ ermittelt (wobei R die Summe der richtigen Ergebnisse pro Block definiert; zur Bestimmung der Testwerte vgl. Hacker & Sieler, 1993, Hacker, Handrick, Heimann, Oehm, Richter, Sachse & Schneider, 1999).

Prozess- und Ergebniskriterien

Die ausgewerteten *Prozesskriterien* sind die Gesamtbearbeitungsschritte, die eine Versuchsperson zur Erstellung des Geschäftsprozessmodells benötigt, sowie die Arten dieser Schritte. Diese Arbeitsschritte und ihre Operationalisierungen sind in der Tabelle 2 beschrieben.

Tabelle 2: Schritttarten und ihre Operationalisierungen.

<i>Bereitstellungsschritte</i>	Ein Objekt wird aus dem verfügbaren Reservoir herausgenommen und für eine Weiterbearbeitung bereitgestellt.
<i>Anpassungsschritte</i>	Ein Objekt wird auf dem Bildschirm an die schon vorhandenen Bedingungen bzw. an die gestellten Anforderungen angepasst. Es wird beispielsweise beschriftet oder umbenannt.
<i>Wiederholungsschritte</i>	Ein bereits vorhandener Lösungsansatz wird, nachdem er kurzzeitig verworfen wurde, wieder hergestellt. Dabei werden ein Objekt bzw. mehrere Objekte in eine frühere Anordnung zurückgebracht.
<i>Verwerfungsschritte</i>	Ein Objekt wird endgültig verworfen, da es zur Lösungsfindung nicht geeignet erscheint. Es wird dabei vom Bildschirm entfernt.
<i>Positionierungsschritte</i>	Ein Objekt wird auf dem Bildschirm in eine andere Position gebracht. Es wird die „Secondary Notation“ (Layout) des Modells verändert.

Die bereits in der Tabelle 1 beschriebenen Interaktionen wurden hierbei den verschiedenen Schritttarten zugeordnet. So stellt beispielsweise die Erstellung einer neuen Aktivität im Prozessmodell (d.h. mittels einer CREATE NODE-Operation) einen Bereitstellungsschritt dar. Eine Übersicht der Kategorisierungen ist in der Tabelle 3 dargestellt. Das Neuverbinden von Kanten stellt einen Spezialfall dar, da ein Neuverbinden auch durch das Löschen einer Kante und Einfügen einer neuen Kante erreicht werden kann. Deshalb wird für das Neuverbinden einer Kante jeweils ein Verwerfungsschritt und ein Bereitstellungsschritt erhoben. Dadurch ist garantiert, dass Modellierer, welche Kanten durch Neuverbinden wiederverwenden, auswertetechnisch gleich behandelt werden wie Modellierer, die diesen Schritt durch Löschen und Einfügen einer neuen Kante durchführen. Durch die Verwendung der CEP konnten somit alle Schritte – mit Ausnahme der Wiederholungsschritte – automatisch erkannt werden. Den Wiederholungsschritten konnten keine vordefinierten Interaktionen mit dem Modellierungswerkzeug zugeordnet werden, so dass diese manuell ausgewertet werden mussten. Dabei wurde für jeden Verwerfungsschritt geprüft, ob dieser später im Modellierungsprozess wiederhergestellt wurde, d.h. ob Bereitstellungsschritte existieren, die eigentlich Wiederholungsschritte sind.

Tabelle 3: Kategorisierung der Interaktionen.

<i>Schrittart</i>	<i>Interaktion</i>
Bereitstellungsschritte	CREATE NODE CREATE EDGE RECONNECT EDGE
Anpassungsschritte	RENAME CREATE CONDITION UDPATE CONDITION DELETE CONDITION
Wiederholungsschritte	Keine vordefinierten Schritttarten
Verwerfungsschritte	DELETE NODE DELETE EDGE RECONNECT EDGE
Positionierungsschritte	MOVE NODE MOVE EDGE_LABEL CREATE / DELETE / MOVE EDGE BENDPOINT

Als *Ergebniskriterien* wurden die Lösungszeit (- die den Zeitraum vom Lesen der Aufgabenstellung bis zur vollständigen Modellierung des Prozessmodells umfasste -) und die Lösungsgüte registriert. Die Lösungsgüte konnte anhand der „Graph Edit Distance“ (GED) automatisiert berechnet werden. Zur Bestimmung der Qualität von Geschäftsprozessmodellen wurde die strukturelle Ähnlichkeit von Geschäftsprozessmodellen zu einem Referenzmodell als Qualitätsmaß genutzt. Geschäftsprozessmodelle bestehen aus Knoten (Aktivitäten und Kontrollflussknoten) und Kanten. Auf dieser Grundlage sind verschiedene Operationen möglich: das Einfügen und Löschen von Knoten, das Einfügen und Löschen von Kanten sowie das Austauschen von Knoten. Die Anzahl an Operationen, die zur Transformation des Ausgangsmodells in das Referenzmodell nötig sind, dient somit zur Bestimmung eines Ähnlichkeitswertes. Die Ähnlichkeitswerte liegen im Bereich von 0.0 bis 1.0, wobei ein Wert von 1.0 ein Modell identisch zum Referenzmodell beschreibt (vgl. Pinggera, Zugal & Weber, 2010; Dijkman, Dumas, van Dongen, Käärrik & Mendling, 2011).

Als ein weiteres Ergebniskriterium wurden charakteristische Fehler erfasst. Es sind insbesondere syntaktische und semantische Fehler für die Analyse von Geschäftsprozessmodellen aufschlussreich (vgl. das SEQUAL-Framework von Krogstie, 2012). Syntaktische Fehler beschreiben die Übereinstimmung des Geschäftsprozessmodells mit der Notation, in welcher das Modell erstellt wurde. Ein Beispiel für einen syntaktischen Fehler sind Startknoten mit eingehenden Kanten (ein Startknoten darf aber nur ausgehende Kanten haben). Ein weiteres Qualitätsmerkmal auf der syntaktischen Ebene ist das „Soundness“-Kriterium (Recker, 2007; Henrik, Smirnov & Mendrik, 2012). Verletzungen der Soundness-Eigenschaft können zu Problemen bei der Ausführung eines Prozesses führen, beispielsweise zu „Deadlocks“ (der modellierte Geschäftsprozess bleibt bei der Ausführung stecken) oder „Lack of Synchronization“ (Aktivitäten werden aufgrund von fehlerhaften Kontrollflussstrukturen zu oft ausgeführt). Die syntaktischen Fehler konnten ebenso automatisiert registriert werden. Die erkannten Feh-

ler wurden zu einem Maß für die syntaktische Qualität des Modells aggregiert. Es gilt: Je niedriger der aggregierte Wert ist, desto höher ist die syntaktische Qualität des Modells. Semantische Fehler sind fehlende oder überflüssige Aktivitäten im Geschäftsprozessmodell. Unter semantischer Qualität wird einerseits die Validität des Modells (das Modell ist richtig in Bezug auf die zu modellierende Domäne) und andererseits dessen Vollständigkeit verstanden (alle in Bezug auf die zu modellierende Domäne relevanten Informationen sind im Modell enthalten). Die semantischen Fehler wurden in dieser Studie über die Anzahl der korrekt identifizierten Aktivitäten im Geschäftsprozessmodell erfasst. Zu diesem Zweck wurde die Abbildung der enthaltenen Aktivitäten auf die Aktivitäten des zugehörigen Referenzmodells verwendet, um die Anzahl der korrekt identifizierten Aktivitäten zu bestimmen. Durch die Division dieses Wertes durch die Gesamtanzahl der Aktivitäten des Referenzmodells konnte ein relativer Wert für die Anzahl von semantischen Fehlern ermittelt werden.

Statistische Analysen

Zur Überprüfung, inwiefern das Arbeitsgedächtnis mit den Schrittarten und den kritischen Ergebnisvariablen (syntaktische Fehler, semantische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit) in Beziehung steht, wurden unterschiedliche datenanalytische Strategien verwendet. In einem ersten voranalytischen Schritt wurde geprüft, inwiefern die vier Arbeitsgedächtnistests (OSPAN, SSPAN, MU, SSTM) von Lewandowsky et al. (2010) mit dem Arbeitsgedächtnistest (RSPAN) von Hacker & Sieler (1993) in Beziehung stehen und ob die fünf unterschiedlichen Test-Aufgaben zu einem gemeinsamen Faktor Arbeitsgedächtniskapazität zusammengefasst werden können. Hierfür wurden sowohl eine konfirmatorische Faktorenanalyse als auch eine explorative Faktorenanalyse berechnet. Bezüglich der konfirmatorischen Faktorenanalyse wurde überprüft, auf welche Weise die manifesten Variablen (Arbeitsgedächtnisaufgaben) die latente Variable Arbeitsgedächtniskapazität repräsentieren. Die Passung der Modelle (Goodness of Fit) wurde mittels Chi-Quadrat Statistik (Chi-squared Statistic), dem Verhältnis von Chi-Quadrat zu den Freiheitsgraden (Ratio of Chi-square to df), CFI (Comparative Fit Index), TLI (Tucker-Lewis Index) und RMSEA (Root Mean Square Error of Approximation) berechnet. Multiple Passungsindizes (Multiple Fit Indices) erlauben eine konservative Testung der Ergebnisse. Eine akzeptable Modellpassung entspricht den nachfolgenden Kriterien (Cutoff Criteria) (vgl. Schreiber, Nora, Stage, Barlow & King, 2006): $\text{Ratio of } \chi^2 \text{ to df} \leq 2 \text{ oder } 3$, $\text{CFI} \geq .95$, $\text{TLI} \geq .95$, $\text{RMSEA} < .06$. Mittels explorativer Faktorenanalyse [Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Promax ($\kappa = 4$)] wurden zudem die dimensional-strukturalen Beziehungen zwischen allen Arbeitsgedächtnis-Tests überprüft.

In einem zweiten voranalytischen Schritt wurden im Rahmen einer explorativen Faktorenanalyse [Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Promax ($\kappa = 4$)] die dimensional-strukturalen Beziehungen der fünf Schrittarten (Bereitstellungsschritte, Anpassungsschritte, Wiederholungsschritte, Verwerfungsschritte, Positionierungsschritte) erfasst.

Drittens wurden Produkt-Moment-Korrelationsanalysen nach Pearson berechnet, um ein allgemeines Muster der linearen Beziehungen zwischen den Variablen (Arbeitsgedächtnis, Schrittararten, kritische Ergebnisvariablen) zu erhalten.

Viertens wurde die relative Bedeutsamkeit der fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben (OSPAN, SSPAN, MU, SSTM, RSPAN) zur Vorhersage der kritischen Ergebnisvariablen (syntaktische Fehler, semantische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit) überprüft. Hierfür wurden hierarchisch multiple lineare Regressionsanalysen berechnet (unter Kontrolle von Geschlecht und Alter).

3.2 Ergebnisse

Voranalysen

Konfirmatorische Faktorenanalyse – Arbeitsgedächtnis: Um zu überprüfen, ob die vier Aufgaben der Arbeitsgedächtnisbatterie von Lewandowsky et al. (2010) (1) OSPAN, (2) SSPAN, (3) MU und (4) SSTM und die Arbeitsgedächtnisaufgabe (RSPAN) von Hacker & Sieler (1993) auf einer globalen Skala Arbeitsgedächtniskapazität¹⁰ zusammengefasst werden können, wurde eine konfirmatorische Faktorenanalyse (CFA) berechnet (Maximum-Likelihood). Es zeigt sich eine sehr gute Modellpassung bezüglich der latenten Variable Arbeitsgedächtniskapazität: [$\chi^2(5) = 2.00$, $p > .10$; $\chi^2/df = 0.40$; Comparative Fit Index (CFI) = 1.00; Tucker-Lewis Index (TLI) = 1.17; Root Mean Square Error of Approximation (RMSEA) = 0.00]; vgl. Abbildung 1].

¹⁰ Hinweis: Zur Berechnung eines globalen Arbeitsgedächtniskapazitätswertes wurden die Werte in jeder Arbeitsgedächtnisaufgabe z-transformiert und über die fünf Tests, für jeden Probanden, gemittelt. Somit erhielten wir einen zusammengefassten Arbeitsgedächtniskapazitätswert (vgl. Engle, Carullo & Collins, 1991; Salthouse, Babcock & Shaw, 1991; Craig & Lewandowsky, 2012).

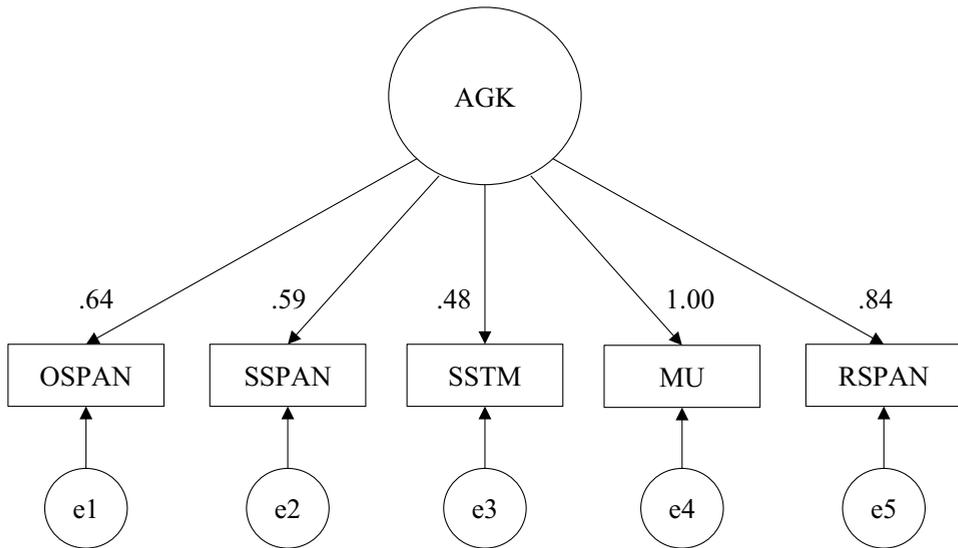


Abbildung 1: Konfirmatorische Faktorenanalyse – Arbeitsgedächtnis: Es wurden die standardisierten Regressionsgewichte dargestellt (AGK = Arbeitsgedächtniskapazität, OSPAN = „Operation span“, SSPAN = „Sentence span“, SSTM = „Spatial short-term memory“, MU = „Memory updating“, RSPAN = Rechenspanne).

Explorative Faktorenanalyse – Arbeitsgedächtnis: Zur weiteren Überprüfung der empirischen Überlappung der vier Aufgaben der Arbeitsgedächtnisbatterie von Lewandowsky et al. (2010) (1) OSPAN, (2) SSPAN, (3) MU und (4) SSTM und der Arbeitsgedächtnisaufgabe (RSPAN) von Hacker & Sieler (1993) wurde – über eine konfirmatorische Faktorenanalyse hinausgehend – eine explorative Faktorenanalyse berechnet [Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Promax ($\kappa = 4$): fünf unterschiedliche Arbeitsgedächtnisaufgaben]. Eine einfaktorielle Lösung (Gesamtvarianz: 51 %) mit einem Eigenwert > 1.0 wurde extrahiert. Demzufolge repräsentieren die fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben den Globalfaktor Arbeitsgedächtniskapazität (Faktor I; vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Explorative Faktorenanalyse (EFA) – Arbeitsgedächtnisaufgaben.

Arbeitsgedächtnisaufgaben	Faktor
	I
Memory updating task (MU)	.85
Rechenspanne (RSPAN)	.80
Operation span (OSPAN)	.72
Sentence span (SSPAN)	.64
Spatial short-term memory (SSTM)	.48

Anmerkung: Bartlett's Test der Sphärizität: Approximiertes $\chi^2(10) = 55.25, p < .001$.

Explorative Faktorenanalyse – Schrittarten: Zur Überprüfung der empirischen Überlappung der genutzten unterschiedlichen Schrittarten (Bereitstellungsschritte, Anpassungsschritte, Wiederholungsschritte, Verwerfungsschritte und Positionierungsschritte)

te) bei der Bearbeitung der komplexen algorithmischen Aufgabe wurde eine explorative Faktorenanalyse (EFA) berechnet (Hauptkomponentenanalyse, Rotationsmethode: Promax ($\kappa = 4$): fünf unterschiedliche Schritarten). Drei Faktoren (Gesamtvarianz: 81 %) mit Eigenwerten > 1.0 wurden extrahiert. Faktor I repräsentiert die Verwerfungs- und Wiederholungsschritte, Faktor II die Bereitstellungs- und Anpassungsschritte und Faktor III die Anpassungs- und Positionierungsschritte (siehe Tabelle 5). Es zeigt sich eine starke empirische Überlappung der Verwerfungs- und Wiederholungsschritte. Die drei Faktoren korrelieren äußerst gering miteinander ($r_s = -.01 - -.04$). Auf der Basis der explorativen Faktorenanalyse werden die beiden genannten Schritarten für die Korrelationsanalysen in einer gemeinsamen Skala „Verwerfungs- und Wiederholungsschritte“ zusammengefasst.

Tabelle 5: Explorative Faktorenanalyse (EFA) – Schritarten in Relation zur Lösungszeit.

Schritarten	Faktoren		
	I	II	III
Verwerfungsschritte	.92	-.14	.10
Wiederholungsschritte	.91	.13	-.10
Bereitstellungsschritte	-.01	.88	-.21
Anpassungsschritte	.01	.61	.51
Positionierungsschritte	-.01	-.15	.93

Anmerkung: Bartlett's Test der Sphärizität: Approximiertes $\chi^2(10) = 47.33$, $p < .001$. Die Primär- und Sekundärladungen $\geq .30$ sind fett markiert.

Hauptanalysen

Hypothese 1 und 2a – Assoziationen zwischen Arbeitsgedächtnis, Schritarten und kritischen Ergebnisvariablen: Die Mittelwerte, Standardabweichungen und korrelativen Beziehungen sind in der Tabelle 6 dargestellt. Das Arbeitsgedächtnis (global) weist negative Assoziationen zu den Verwerfungs- und Wiederholungsschritten, den syntaktischen und semantischen Fehlern ($r_s = -.24 - -.46$, $ps < .05$) und positive Beziehungen zu den Anpassungs- und Positionierungsschritten sowie der Lösungsgüte auf ($r_s = .25 - .28$, $ps < .05$). Bezüglich der Verwerfungs- und Wiederholungsschritte zeigt MU, OSPAN und RSPAN die stärksten negativen Beziehungen ($r_s = -.23 - -.26$, $ps < .05$). Alle fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben belegen signifikant negative Korrelationen zu den semantischen Fehlern ($r_s = -.27 - -.46$, $ps < .05$). MU, SSPAN und SSTM zeigen negative Assoziationen zu den syntaktischen Fehlern ($r_s = -.26 - -.27$, $ps < .05$). OSPAN und SSTM weisen wiederum die stärksten Beziehungen zur Lösungsgüte auf ($r_s = .25 - .32$, $ps < .05$). Sowohl der Globalfaktor Arbeitsgedächtniskapazität als auch die fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben zeigen keine bedeutsamen Beziehungen zur Lösungszeit ($r_s = -.08 - .07$, $ps > .10$).

Tabelle 6: Korrelationsanalysen nach Pearson zwischen Arbeitsgedächtnis, Schrittarten und kritischen Ergebnisvariablen (syntaktische Fehler, semantische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit).

Skalen	<i>M</i>	<i>SD</i>	1	1a	1b	1c	1d	1e	2	3	4	5
Arbeitsgedächtnis (global)	.08	.72	-.27*	-.30*	-.19†	.10	.28*	.25*	-.24*	-.46***	.26*	-.04
Memory updating task (MU)	.10	1.02	-.26*	-.35**	-.17	.00	.33**	.14	-.26*	-.38**	.18	-.02
Operation span (OSPAN)	-.06	.93	-.23*	-.31*	-.09	-.02	.16	.05	.05	-.33**	.25*	.07
Sentence span (SSPAN)	.11	.99	-.14	-.06	-.14	.07	.12	.32*	-.26*	-.29*	.08	-.08
Spatial short-term memory (SSTM)	.18	1.04	-.12	-.13	-.09	.20†	.26*	.19†	-.27*	-.34**	.32**	.02
Rechenspanne (RSPAN)	.06	1.14	-.26*	-.33**	-.17	.03	.11	.13	-.06	-.27*	.17	-.07
<i>M</i>	–	–	.003	.006	.001	.052	.008	.043	.98	.89	.72	1637.11
<i>SD</i>	–	–	.003	.004	.002	.014	.003	.026	1.38	.12	.14	585.41

Anmerkung: $N = 51-59$. 1 = Verwerfungs- und Wiederholungsschritte, 1a = Verwerfungsschritte, 1b = Wiederholungsschritte, 1c = Bereitstellungsschritte, 1d = Anpassungsschritte, 1e = Positionierungsschritte, 2 = syntaktische Fehler, 3 = semantische Fehler, 4 = Lösungsgüte, 5 = Lösungszeit. *** $p < .001$, ** $p < .01$, * $p < .05$, † $p < .10$ (einseitige Testung).

Hypothese 2b – Prädiktive Fähigkeiten des Arbeitsgedächtnisses zur Vorhersage der kritischen Ergebnisvariablen: Über die Korrelationsanalysen hinausgehend wurde ferner bestimmt, welche der fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben den größten Beitrag zur Vorhersage der kritischen Ergebnisvariablen leisten (semantische und syntaktische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit). Hierfür wurden hierarchische multiple lineare Regressionsanalysen berechnet. Im Block 1 wurden Geschlecht und Alter kontrolliert und im Block 2 wurden die fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben (MU, OSPAN, SSPAN, SSTM und RSPAN) als Prädiktoren eingesetzt. Die Kriteriumsvariablen waren jeweils die syntaktischen Fehler, die semantischen Fehler, die Lösungsgüte und die Lösungszeit. Wie aus der Tabelle 7 ersichtlich wird, zeigt sich keine Multikollinearität hinsichtlich der Variablen. Der Varianzinflationsfaktor (VIF) befindet sich in einem Bereich von 1.20 bis 2.22. VIFs unterhalb von 5.00 (Menard, 1995) oder sogar 10.00 (Neter, Wasserman & Kutner, 1985) stellen kein substantielles Problem bezüglich der Multikollinearität dar.

Zur Vorhersage der syntaktischen Fehler klären die gesamten Arbeitsgedächtnisaufgaben – über Geschlecht und Alter hinweg – 17 % an inkrementeller Varianz auf ($\Delta F = 2.16$, $p < .10$) (vgl. Tabelle 7, erste Spalte „Syntaktische Fehler“). Die spezifische Analyse der standardisierten Regressionsgewichte belegt, dass MU ($\beta = -.40$, $p < .05$) der stärkste negative Prädiktor bezüglich der syntaktischen Fehler ist. Zur Vorhersage der semantischen Fehler klären die gesamten Arbeitsgedächtnisaufgaben – über Geschlecht und Alter hinweg – 25 % an inkrementeller Varianz auf ($\Delta F = 2.77$, $p < .05$) (s. Tabelle 7, zweite Spalte „Semantische Fehler“). Die spezifische Analyse der

standardisierten Regressionsgewichte zeigt, dass SSTM ($\beta = -.35, p < .05$) der stärkste negative Prädiktor hinsichtlich der semantischen Fehler ist. Zur Vorhersage der Lösungsgüte klären die gesamten Arbeitsgedächtnisaufgaben – über Geschlecht und Alter hinweg – 14 % an inkrementeller Varianz auf ($\Delta F = 1.38, p > .10$) (siehe Tabelle 7, dritte Spalte „Lösungsgüte“). Die spezifische Analyse der standardisierten Regressionsgewichte bestätigt, dass SSTM ($\beta = .35, p < .05$) der stärkste Prädiktor hinsichtlich der Lösungsgüte ist. Zur Vorhersage der Lösungszeit klären die gesamten Arbeitsgedächtnisaufgaben – über Geschlecht und Alter hinweg – 6 % an inkrementeller Varianz auf ($\Delta F = .48, p > .10$) (vgl. Tabelle 7, vierte Spalte „Lösungszeit“). Die spezifische Analyse der standardisierten Regressionsgewichte zeigt keinen signifikanten Prädiktor bezüglich der Lösungszeit.

Tabelle 7: Standardisierte Regressionsgewichte zur Vorhersage kritischer Ergebnisvariablen mittels des Arbeitsgedächtnisses (Subskalen).

Arbeitsgedächtnisaufgaben	Syntaktische Fehler		Semantische Fehler		Lösungsgüte		Lösungszeit		Kollinearitätsstatistik VIF
	β	p	β	p	β	p	β	p	
Geschlecht	-.29	.052	-.02	.925	.00	.982	-.12	.489	1.32
Alter	-.25	.094	-.15	.334	-.21	.211	-.15	.426	1.36
Memory updating task (MU)	-.40	.032	-.07	.719	-.11	.604	-.02	.946	2.22
Operation span (OSPAN)	.24	.134	-.12	.482	.22	.246	.16	.425	1.67
Sentence span (SSPAN)	-.14	.354	-.20	.214	.08	.657	-.13	.501	1.38
Spatial short-term memory (SSTM)	-.15	.305	-.35	.021	.35	.033	.15	.378	1.20
Rechenspanne (RSPAN)	.28	.121	.02	.917	-.08	.698	-.19	.369	1.81

Anmerkung: $N = 51-59$. VIF = Varianzinflationsfaktor. Hierarchische multiple lineare Regressionsanalysen wurden berechnet (Block 1: Geschlecht, Alter; Block 2: fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben). Die standardisierten Beta Regressionskoeffizienten von Geschlecht, Alter und die Arbeitsgedächtnisaufgaben werden abgebildet (Block 2). Signifikante Ergebnisse ($p < .05$) sind fett markiert.

Appendix: Die in der Abbildung 2 (im Abschnitt 3.3) dargestellten Prozessmodelle zeigen (A) eine Ideallösung für die bearbeitete komplexe Aufgabe und (B) eine suboptimale Lösung eines Probanden, welcher beispielhaft eine geringe Arbeitsgedächtniskapazität aufwies, dem gehäuft syntaktische und semantische Fehler unterliefen, der ineffiziente Bearbeitungsschritte tätigte und dessen Lösungsgüte folglich gering war.

3.3 Diskussion

Die Kernfragestellung der vorliegenden Studie bezog sich darauf, welche Beziehungen sich zwischen dem Arbeitsgedächtnis, den Schritttarten und den kritischen Ergebnisvariablen (syntaktische Fehler, semantische Fehler, Lösungsgüte und Lösungszeit) nachweisen lassen. Zwei zentrale Hypothesen wurden aus der vorliegenden Studie abgeleitet. Bezüglich der ersten Hypothese wurde angenommen, dass die Arbeitsgedächtniskapazität negativ mit den Verwerfungs- und Wiederholungsschritten assoziiert ist. Die Korrelationsanalysen belegen, dass das Arbeitsgedächtnis tatsächlich moderat negative Assoziationen zu den Verwerfungs- und Wiederholungsschritten aufweist. Bei der zweiten Hypothese wurde erwartet, dass die Arbeitsgedächtniskapazität eine positive Beziehung zur Lösungsgüte und negative Beziehungen zu den syntaktischen Fehlern, semantischen Fehlern und zur Lösungszeit aufweist (Hypothese 2a). Zudem wurden die prädiktiven Fähigkeiten der fünf Arbeitsgedächtnisaufgaben bezüglich der kritischen Ergebnisvariablen überprüft (Hypothese 2b). Mittels Korrelations- sowie Regressionsanalysen konnten bedeutsame Beziehungen zwischen dem Arbeitsgedächtnis und kritischen Ergebnisvariablen (insbesondere der syntaktischen Fehler, semantischen Fehler und der Lösungsgüte) nachgewiesen werden.

Die konfirmatorische Faktorenanalyse belegt, dass alle eingesetzten Verfahren auf dem latenten Faktor der Arbeitsgedächtniskapazität laden. Betrachtet man das Arbeitsgedächtnis aus funktionaler Sicht, bestätigen die Ergebnisse die Annahme, dass das Arbeitsgedächtniskonstrukt aus einer Reihe von spezifischen, voneinander abgrenzbaren Prozessen besteht. Die eingesetzten Messverfahren bilden dabei (a) das klassische Halten und simultane Verarbeiten von Informationen (OSPAN, SSPAN, RSPAN), (b) den flexiblen Abruf, die Transformation und den Ersatz von Informationen (MU, siehe Ecker, Lewandowsky, Oberauer & Chee, 2010) und (c) die relationale Integrationsfunktion (SSTM) ab. Oberauer, Süß, Wilhelm & Wittmann (2003, 2008) konnten beispielsweise mittels eines Strukturgleichungsmodells zeigen, dass sich die relationale Integrationsfunktion von der Haltens- und Verarbeitungsfunktion und einer Supervisionsfunktion (- gemessen über eine Switching-Aufgabe -) abgrenzt. Miyake, Friedman, Emerson, Witzki & Howerter (2000) und Friedman, Miyake, Corley, Young, DeFries & Hewitt (2006) grenzten drei Subfunktionen innerhalb der zentralen Exekutive ab: Inhibition, Switching und Updating. Updating stellte dabei den stärksten Prädiktor sowohl für die fluide als auch für die kristalline Intelligenz dar. Die OSPAN und die RSPAN bilden in diesem Kontext zwar die gleiche Funktion ab (Halten und Verarbeiten), jedoch kann die RSPAN separate Varianzanteile aufklären. Ein wesentlicher Unterschied zwischen der OSPAN und der RSPAN basiert darauf, dass die OSPAN den unmittelbaren Abruf von Informationen (in der durchgeführten Aufgabe: Buchstaben) mit einer Verarbeitungsaufgabe kombiniert (Rechnen), die inhaltlich nur in geringem Maße zusammenhängen. In der RSPAN hingegen konkurrieren die Inhalte der Verarbeitungsaufgabe (Rechnen) mit den zu erinnernden Items (Zahlen). Im Gegensatz zur OSPAN hinterlässt die Verarbeitungsaufgabe im Rahmen der RSPAN

Spuren im Arbeitsgedächtnis, die mit den kurzfristig aktivierten Items konkurrieren, d.h. die zu haltenden Items müssen in einem stärkeren Ausmaß vor Interferenz geschützt werden.

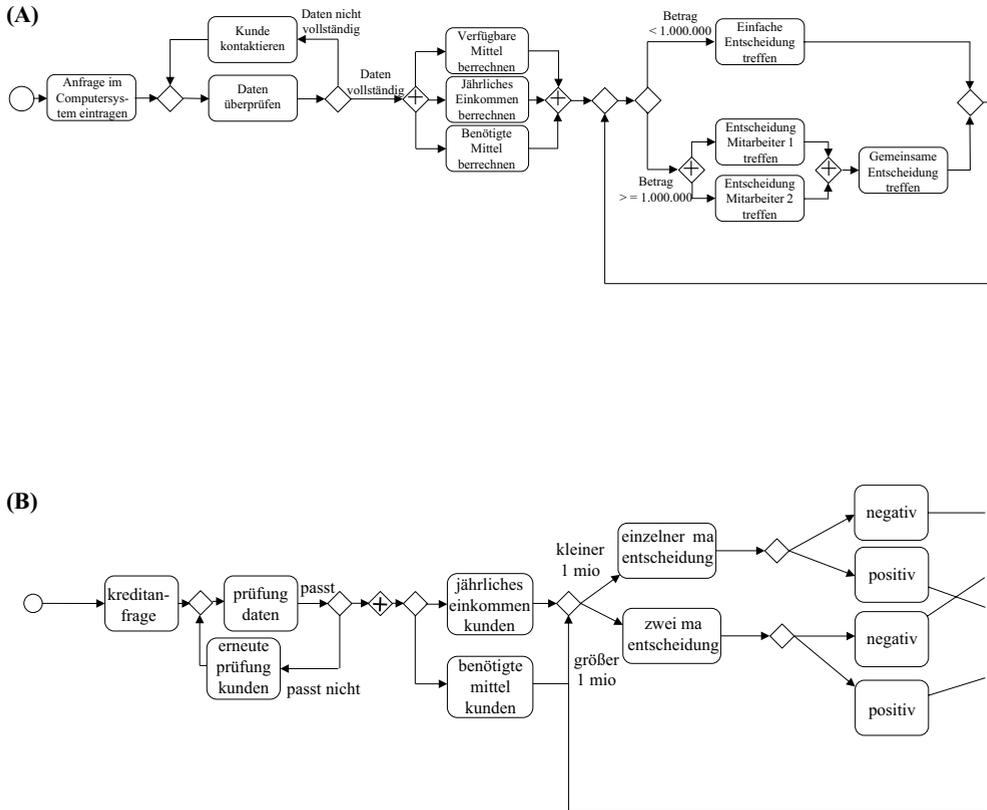
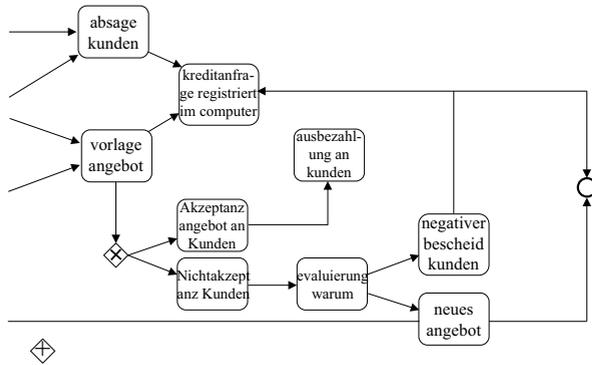
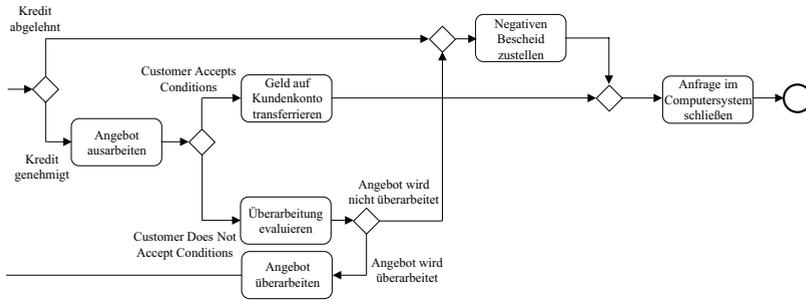


Abbildung 2: (A) Darstellung einer Ideallösung des erstellten Prozessmodells, (B) Darstellung einer suboptimalen Lösung des erstellten Prozessmodells (Vp. 210: viertniedrigster z-transformierter globaler Arbeitsgedächtniskapazitätswert, niedrigster GED-Wert).



Prozessmodellierung bezieht sich auf den Handlungsverlauf, dem der Modellierer folgt, um ein Prozessmodell zu kreieren, zu konstruieren. Start- und Zielzustände sind mehr oder weniger klar definiert und es gilt, den Weg zwischen Ausgangs- und Endzustand effizient zu gestalten und zu externalisieren. Der Modellierungsprozess kann hier als hierarchisch strukturierter Handlungsverlauf beschrieben werden (Miller, Galanter & Pribram, 1960; Rumelhart & Norman, 1982; Cooper & Shallice, 2000; Botvinick & Plaut, 2004; Botvinick, 2008). So müssen beispielsweise in einem Kreditvergabeprozess zuerst die Daten eines Kunden geprüft werden, bevor die Bank entscheiden kann, ob ein Kredit vergeben wird oder nicht. Der gesamte Modellierungsprozess kann in diesem Kontext entweder über „means-end“-Beziehungen, in denen frühere Handlungen die Bedingungen für spätere Handlungen darstellen oder über „part-whole“-Beziehungen, bei denen einzelne, kohärente Subeinheiten in den Gesamtprozess eingebettet werden (z.B. die Berechnung der verfügbaren und benötigten Mittel sowie das jährliche Einkommen, vgl. Abbildung 2), beschrieben werden. Mindestens drei Makrophasen bestimmen dabei den Modellierungsprozess (Pinggera, Furtner, Martini, Sachse, Reiter, Zugal & Weber, 2013): (a) *Verstehen*: der Modellierer erzeugt ein mentales Modell des Problems. Dieses Modell wird u.a. als Basis für die Entscheidungsprozesse und die anzuwendenden Problemlösestrategien genutzt (Newell & Simon, 1972); (b) *Modellierung*: es kommt zur Externalisierung der Problemlösung; (c) *Abstimmung*: nach der Modellierungsphase kann es zu einer Reihe von Anpassungs- und zusätzlichen Positionierungsschritten kommen (z.B. die Umbenennung von Handlungsschritten, Veränderung des Layouts und der Typografie), um die Verständlichkeit des Prozessmodells zu erhöhen. Neben der Beschreibung der einzelnen Phasen im Prozessmodell ist es zudem wichtig, kognitive Aspekte im Modellierungsprozess zu beachten, wobei dem Arbeitsgedächtnis eine zentrale Rolle zukommt. Es ist bedeutsam, wie die Einzelrepräsentationen, die in Summe das gesamte Prozessmodell abbilden, zum richtigen Zeitpunkt ausgewählt oder aktiviert werden und wie diese, einmal ausgewählt, die planmäßigen „lower-level“ Handlungsrepräsentationen steuern. Dabei müssen bei der Durchführung von „lower-level“ Handlungsschritten „higher-level“ Handlungsrepräsentationen außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus aufrechterhalten werden (Botvinick, 2008).

Das Arbeitsgedächtnis kann bekanntlich als ein System konzeptualisiert werden, das eine begrenzte Menge an Informationselementen – auf der Basis von momentan aktivierten Langzeitgedächtnisinhalten – temporär halten und manipulieren kann (Cowan, 2005; Unsworth & Engle, 2007; Oberauer, 2009; Conway, Getz, Macnamara & Engel de Abreu, 2011). O'Reilly & Frank (2006) beschrieben für den Kontext der hierarchischen Informationsverarbeitung drei zentrale Eigenschaften des Arbeitsgedächtnisses: (a) die robuste Aufrechterhaltung der high-level Handlungsrepräsentationen bei der Durchführung von spezifischen Subschritten, (b) ein schnelles Updating von high-level Handlungsrepräsentationen im Verlauf der Subschritte und (c) ein selektives Updating, das sich auf die Auswahl von Handlungsrepräsentationen bezieht, welche sich auf unterschiedlichen Ebenen und Zeitpunkten in der Handlungshierarchie

befinden. Diese Annahmen können unsere Befunde bestätigen, da eine signifikant positive Relation zwischen dem globalen Arbeitsgedächtniskapazitätswert und der Lösungsgüte sowie ein signifikant negativer Zusammenhang mit den Fehlern besteht. Die Fehleranalysen stimmen mit Studien überein, die belegen, dass interindividuelle Unterschiede zwischen Probanden mit einer hohen Arbeitsgedächtniskapazität und Probanden mit einer geringen Arbeitsgedächtniskapazität bestehen; die erstgenannte Personengruppe weist in Leistungsaufgaben (z.B. der Stroop-Aufgabe oder der Antisakadenaufgabe) eine geringere Fehlerrate auf (Kane & Engle, 2003; Kane et al., 2001; Martini et al., 2013). Zudem stimmt die signifikant positive Relation zwischen Arbeitsgedächtniskapazität und Lösungsgüte mit Ergebnissen aus Studien im Bereich der Alltagskognition überein (z.B. Lese- und Sprachverständnis: Daneman & Carpenter, 1980, 1983; Just & Carpenter, 1992; Vokabellernen: Daneman & Green, 1986; logisches Schließen: Kyllonen & Stephens, 1990; Problemlösen und Adaption in neuen Situationen: Conway, Cowan, Bunting, Theriault & Minkoff, 2002; Engle, Tuholski, Laughlin & Conway, 1999; Qualität von Vorlesungsmitschriften: Kiewra & Benton, 1988). Einen theoretischen Rahmen für die interindividuellen Unterschiede der vorliegenden Ergebnisse können die Annahmen von Unsworth & Engle (2007) liefern. Sie unterscheiden zwischen einem primären und einem sekundären Gedächtnis. Das primäre Gedächtnis hält eine bestimmte Anzahl von Informationselementen (ca. 4 Items), welche für die Weiterverarbeitung über die kontinuierliche Allokation der Aufmerksamkeit in einem aktiven Zustand gehalten werden. Wird diese Kapazitätsgrenze überschritten, werden die aktiven Informationselemente aus dem primären Gedächtnis in das sekundäre Gedächtnis transferiert. Im sekundären Gedächtnis können die Informationselemente zwar noch in einem erhöhten Aktivierungszustand sein, befinden sich aber nicht mehr im Aufmerksamkeitsfokus (Cowan, 2005). Die Suche und der Abruf von Informationselementen aus dem sekundären Gedächtnis erfolgt über einen „cue“-abhängigen Suchprozess. Zu interindividuellen Unterschieden kann es deshalb kommen, da Personen mit einer geringen Arbeitsgedächtniskapazität (a) weniger distinkte Items im primären Gedächtnis halten und sie (b) weniger gut zwischen relevanten und irrelevanten Informationen unterscheiden können, d.h. sie inkludieren mehr irrelevante Repräsentationen in ihre Suchsets und verwenden sogenannte „noisier cues“. Die äußerst geringe Korrelation zur Lösungszeit hingegen entspricht nicht unseren Erwartungen. Probanden mit einer hohen Arbeitsgedächtniskapazität lösen die komplexe Modellierungsaufgabe nicht schneller. Eine mögliche Interpretation dieses Ergebnisses besteht in der kombinierten Betrachtung der Lösungsschritte und der Lösungsgüte. Unsere Ergebnisse weisen eine negative Relation zwischen der Arbeitsgedächtniskapazität und den Verwerfungs- und Wiederholungsschritten auf. Probanden mit höheren Kapazitätswerten scheinen demnach im iterativen Lösungsprozess eine eindeutigere (Teil-)Prozessmodellabbildung mental zu repräsentieren und einmal externalisierte Teilschritte bzw. Teillösungen weniger oft zu verwerfen. Die positiven Relationen zwischen der Arbeitsgedächtniskapazität und den Anpassungs- und Positionierungsschritten beziehen sich auf Bearbeitungsschritte an bereits externalisierten (Teil-)Pro-

zesselementen. Die vom Probanden ausgewählten Prozesselemente sind ein fixer Bestandteil des zu lösenden Prozessmodells. Der Proband hat sich bereits entschieden, welches Objekt oder welche Verknüpfung die gegebene (Teil-)Lösung repräsentiert. Zudem spricht dies für ein korrektes, regelbasiertes Bearbeiten der Aufgabe. Veränderungen finden nur noch auf layout-technischer Basis (Anpassungsschritte) oder in der Anordnung der gesetzten Handlungsschritte statt (die Ordnung in der Prozessmodellierungs-Sequenzkette wird umstrukturiert; s. Petre, 1995). Eine Möglichkeit, die höhere Lösungsgüte zu erklären, sehen wir darin, dass Probanden mit einer hohen Arbeitsgedächtniskapazität in der gleichen Zeit aktiver das bestehende – noch unvollständige Modell – mittels Anpassungs- und Positionierungsschritten in eine „Ideallösung“ transformieren (vgl. Abbildung 2). Weitere Studien wären ferner dienlich, um spezifische Beziehungen und Effekte von diversen Persönlichkeitseigenschaften (z.B. Gewissenhaftigkeit, Neurotizismus / emotionale Stabilität), Denkstilen (z.B. globales versus analytisches Denken) und motivationalen Aspekten (intrinsische Motivation und Flow) zu überprüfen und zu kontrollieren.

Die Erzeugung eines Globalwertes des Arbeitsgedächtnisses erlaubt es, in ihm mehr als ein Konglomerat unterschiedlicher, voneinander abgrenzbarer Funktionen zu sehen (s. Oberauer et al., 2000, 2003, 2008). Die Nutzung der vorliegenden Auswahl an Arbeitsgedächtnistests hatte zugleich den Vorteil, den Beitrag der unterschiedlichen Arbeitsgedächtnisfunktionen im Modellierungsprozess näher analysieren zu können. Dabei machen unsere Befunde deutlich, dass die Fähigkeiten des Updating (MU-Aufgabe) und der relationalen Integration von Informationen (SSTM-Aufgabe) als wesentliche Prädiktoren für die Fehleranzahl und die Lösungsgüte angesehen werden können. Die Funktion des Updating steht dabei in negativer Relation zu den syntaktischen Fehlern, während die Funktion der relationalen Integration negativ die Anzahl der semantischen Fehler vorhersagt. Die Ergebnisse können als direkte Untermauerung der Annahmen von O'Reilly & Frank (2006) gesehen werden. Ein schnelles und selektives Updaten von high-level Handlungsrepräsentationen außerhalb des Aufmerksamkeitsfokus scheint ein wesentliches Kriterium für eine geringe Anzahl von syntaktischen Fehlern zu sein. In diesem Sinne kann die falsche Selektion einer high-level Repräsentation beispielsweise zu einem falschen Setzen von eingehenden oder ausgehenden Kanten und in weiterer Folge zu „Deadlocks“ oder einer „Lack of Synchronisation“ führen (vgl. Abschnitt 3.1). Der Unterschied zwischen semantischen und syntaktischen Fehlern besteht darin, dass letztere vom Inhalt des Modells relativ unabhängig sind und sich auf die „Modellsprache“ selbst beziehen. Semantische Fehler beziehen sich hingegen auf den Inhalt des Modells. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine geringere Anzahl von semantischen Fehlern in direkter Relation zur GED („Graph Edit Distance“) steht. Unsere Ergebnisse bestätigen, dass die Leistung in der SSTM-Aufgabe einen zentralen Prädiktor für die semantischen Fehler und GED darstellt. Weitere Studien belegen, dass die Arbeitsgedächtniskapazität einen beträchtlichen Anteil der Varianz im schlussfolgernden Denken (Wilhelm & Oberauer, 2006; Kane, Hambrick, Tuholski, Wilhelm, Payne & Engle, 2004) und der Intelligenz (Co-

wan, Elliott, Scott, Morey, Mattox, Hismjatullina & Conway, 2005) aufklärt. Probanden mit einer hohen relationalen Integrationskapazität scheinen demnach eine größere Anzahl von Verknüpfungen zwischen Elementen und Slots über den Aufmerksamkeitsfokus zu integrieren und wieder abzurufen. Je größer die entsprechende Kapazität ist, eine bestimmte Anzahl von Informationselementen und deren Beziehungen untereinander in eine neue Struktur zu integrieren, desto höher ist die Lösungsgüte des Modells und desto weniger semantische Fehler werden begangen (vgl. Halford, Cowan & Andrews, 2007).

4 Resümee

Verdichtend formuliert können wir für die Bearbeitung einer komplexen, algorithmischen Aufgabe (Geschäftsprozessmodellierung) – für das Denken als ein wissensgestütztes Aufgabebearbeiten – festhalten: Personen mit einer geringen Arbeitsgedächtniskapazität oder einer diesbezüglich fehlenden Entlastungsmöglichkeit tätigen mehr ineffiziente und redundante Bearbeitungsschritte; zugleich begehen sie mehr syntaktische und semantische Fehler und die Güte ihrer Lösung nimmt signifikant ab. Somit erweist sich das Arbeitsgedächtnis auch für diese Anforderungsklasse einerseits als ausdrücklich handlungsbedeutsam und andererseits wiederum als ein „Nadelöhr“ bzw. „Flaschenhals“ des Denkens. Es müssen hierbei u.a. verschiedene Regeln aus dem Langzeitgedächtnis aktiviert, in das Arbeitsgedächtnis überführt und die Konkurrenzsituation von Bewussthalten und Verarbeiten beherrscht werden. Dabei kommt erschwerend hinzu: Regelwissen impliziert nicht auch gleich eine Regelnutzung, das richtige Regelwissen impliziert wiederum nicht eine richtige Regelnutzung, und eine korrekte Lösung kann zudem auf verschiedenen Wegen erreicht werden (Prinzip der kognitiven Multivalenz). Des Weiteren gilt: Auch bei kurzfristigen Repräsentationen im Arbeitsgedächtnis führen unterschiedliche Repräsentationsformen zu unterschiedlichen Leistungen. Mängel in den Denkergebnissen können dabei auf ungeeignete bzw. unvollständige interne Repräsentationen oder auf falsche Operationen zurückgehen (vgl. Dörner, 1976; Funke, 2003). Das Arbeitsgedächtnis ist ferner durch andersartige Zwischentätigkeiten hochgradig störbar; allerdings wäre eine möglichst nur minimale Störung der mentalen Aufgabebearbeitung geradezu unerlässlich. Effektives Handeln, auch geistiges Handeln, ist bekanntlich auf unzerschnittene und unverzögert arbeitende Rückkopplungskreise angewiesen (vgl. die TOTE- bzw. VVR-Einheiten der Handlungsregulation, Hacker, 1973). Während der Aufgabebearbeitung stören Unterbrechungen und verzögerte Rückmeldungen den Prozess und unterbinden im schlimmsten Fall seinen Fortgang.

Entlastungsmöglichkeiten des Arbeitsgedächtnisses werden für die Aufgabenklasse der algorithmischen Anforderungen – analog derer beim „Design Problem Solving“ nachgewiesenen – u. a. im unterstützenden skizzierenden und schriftlichen Fixieren von Erwägungen im Sinne externer Speicherung (analog und digital) gesehen. Folgt man dem Konzept Dörners (1995), der zwischen vier „Instanzen“ des Arbeitsgedächtnisses unterscheidet, nämlich dem Protollgedächtnis, Erwartungshorizont, Ab-

sichtsgedächtnis und Situationsbild, würden demnach solche externen Speicher insbesondere zu einer Entlastung des Protokollgedächtnisses (dem „Logbuch“ des vergangenen inneren und äußeren Handelns) beitragen. Solche beobachtbaren externen Operationen beim Aufgabebearbeiten und Problemlösen können als externe Anteile des Denkens oder – verkürzt – als „externes Denken“ bezeichnet werden (Sachse, Hacker & Leinert, 2004; Sachse & Hacker, 2012); wenn man das Denken als eine komplexe Denktätigkeit begreift, liegt eine Interpretation als externe Komponente des Denkens tatsächlich nahe („naturalistic cognition“). Neben einer gedächtnisentlastenden Funktion kommt den externen Operationen auch eine lösungserzeugende, denkunterstützende Funktion zu. Eine Erklärung hierfür bietet das empirisch begründete Konzept zur Entstehung geistiger Handlungen aus materiellen Handlungen und zur Umkehrbarkeit dieses Entwicklungsweges (Interiorisierungs- / Exteriorisierungskonzept von Galperin, 1966).

Für die Arbeitspraxis gilt fernerhin: Arbeitsgestaltungsmaßnahmen müssen auch die belastenden Anforderungen an das Arbeitsgedächtnis umfassen sowie diese reduzieren. Als hilfreich dürfte sich hierbei eine Betrachtung der zwei kooperierenden mentalen Verarbeitungsmodi von Information erweisen, der willkürlichen und bewussten („System 2“) versus der intuitiven Anteile („System 1“) der intellektuellen Regulation (Kahneman, 2012, vgl. auch Stanovich & West, 2000). Diese Differenzierung kann zur verbesserten psychologischen Unterstützung anspruchsvoller Arbeitstätigkeiten beitragen. Bei unserem Untersuchungsbeispiel, der Modellierung von Geschäftsprozessen unter Berücksichtigung der Begrenztheit kognitiver Ressourcen und des Fehleraspekts, war vordergründig das langsamer arbeitende, bewusstseinspflichtige, rationale Prozeduren nutzende "System 2" von erheblicher Bedeutung gewesen. Weiteres Potenzial sehen wir auch in aktuellen, prozessbasierten Konzepten der Arbeitsgedächtnisforschung, die eine deutliche Überlappung zwischen der Verarbeitung und dem Behalten von Informationen postulieren.

In summa ist weiterhin gültig: Die zentrale Bedeutung des Arbeitsgedächtnisses als „mentale Werkbank“ für anspruchsvollere kognitive Leistungen in unterschiedlichen Tätigkeitsfeldern wird noch immer unterschätzt.

Literatur

- Anderson, J. R. (1982). Acquisition of cognitive skill. *Psychological Review*, 89 (4), 369-406.
- Anderson, J. R. (1987). Skill acquisition: Compilation of weak-method problem situations. *Psychological Review*, 94 (2), 192-210.
- Anderson, J. R. & Jeffries, R. (1985). Novice LIPS errors. Undeducted losses of information from working memory. *Human Computer Interaction*, 22, 403-423.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. New York: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (2000). The episodic buffer. A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4 (11) 418-423.
- Baddeley, A. D. (2007). *Working memory, thought and action*. Oxford: Oxford University Press.
- Baddeley, A. D. (2012). Working memory: Theories, models, and controversies. *Annual Review of Psychology*, 63, 1-29.

- Baddeley, A. D. & Hitch, G. J. (1974). Working memory. In G. H. Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation* (Bd. 8, S. 47-89). New York: Academic Press.
- Botvinick, M. (2008). Hierarchical models of behaviour and prefrontal function. *Trends in Cognitive Sciences*, 12 (5), 201-208.
- Botvinick, M. & Plaut, D.C. (2004). Doing without schema hierarchies: a recurrent connectionist approach to normal and impaired routine sequential action. *Psychological Review*, 111, 395-429.
- Brainard, D. (1997). The psychophysics toolbox. *Spatial Vision*, 10, 433-436.
- Conway, A. R. A., Cowan, N., Bunting, M. F., Theriault, D. J. & Minkoff, S. R. B. (2002). A latent variable analysis of working memory capacity, short-term memory capacity, processing speed, and general fluid intelligence. *Intelligence*, 30, 163-184.
- Conway, A. R. A., Getz, S. J., Macnamara, B. & Engel de Abreu, P. M. J. (2011). Working memory and intelligence. In R. J. Sternberg & S. B. Kaufman (Eds.), *The Cambridge handbook of intelligence* (pp. 394-418). Cambridge: Cambridge University Press.
- Cooper, R. & Shallice, T. (2000). Contention scheduling and the control of routine activities. *Cognitive Neuropsychology*, 17, 297-338.
- Cowan, N. (2005). *Working memory capacity*. New York: Taylor & Francis.
- Cowan, N., Elliott, E. M., Scott, S. J., Morey, C. C., Mattox, S., Hismjatullina, A. & Conway, A. R. (2005). On the capacity of attention: Its estimation and its role in working memory and cognitive aptitudes. *Cognitive Psychology*, 51 (1), 42-100.
- Craig, S. & Lewandowsky, S. (2012). Whichever way you choose to categorize, working memory helps you learn. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 65 (3), 439-464.
- Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1980). Individual differences in working memory and reading. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 19, 450-466.
- Daneman, M. & Carpenter, P. A. (1983). Individual differences in integrating information between and within sentences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 9, 561-584.
- Daneman, M. & Green, I. (1986). Individual differences in comprehending and producing words in context. *Journal of Memory and Language*, 25, 1-18.
- Daneman, M. & Merikle, P. M. (1996). Working memory and language comprehension: A meta analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 3 (4), 422-433.
- De Neys, W. (2006). Dual processing in reasoning: Two systems but one reasoner. *Psychological Science*, 17, 428-433.
- Dijkman, R. M., Dumas, M., van Dongen, B., Käärik, R. & Mendling, J. (2011). Similarity of business process models: Metrics and evaluation. *Information Systems*, 36 (2), 498-516.
- Dörner, D. (1976). *Problemlösen als Informationsverarbeitung*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Dörner, D. (1989). *Die Logik des Misslingens*. Reinbeck: Rowohlt.
- Dörner, D. (1995). Problemlösen und Gedächtnis. In D. Dörner & E. van der Meer (Hrsg.), *Das Gedächtnis. Probleme – Trends – Perspektiven* (S. 295-320). Göttingen: Hogrefe.
- Ecker, U. K. H., Lewandowsky, S., Oberauer, K. & Chee, A. E. H. (2010) The components of working memory updating: An experimental decomposition and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36, 170-189.
- Egan, D. E. & Greeno, J. G. (1974). Theory of rule induction: knowledge acquired in concept learning, serial pattern learning, and problem solving. In L. W. Gregg (Ed.), *Knowledge and cognition* (pp. 43-103). New York: Wiley.
- Engle, R. W., Carullo, J. J. & Collins, K. W. (1991). Individual differences in working memory for comprehension and following directions. *Journal of Educational Research*, 84, 253-262.

- Engle, R. W., Tuholski, S. W., Laughlin, J. E. & Conway, A. R. A. (1999). Working memory, short-term memory, and general fluid intelligence: A latent-variable approach. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 309-331.
- Friedman, N. P., Miyake, A., Corley, R. P., Young, S. E., DeFries, J. C. & Hewitt, J. K. (2006). Not all executive functions are related to intelligence. *Psychological Science*, 17 (2), 172-179.
- Funke, J. (2003). *Problemlösendes Denken*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Gadatsch, A. (2008). *Grundkurs Geschäftsprozess-Management*. Wiesbaden: Vieweg.
- Galperin, P. J. (1966). Die geistige Handlung als Grundlage für die Bildung von Gedanken und Vorstellungen. In J. Lompscher (Hrsg.), *Probleme der Lerntheorie* (S. 33-49). Berlin: Volk und Wissen.
- Gilhooly, K. J., Logie, R. H., Wetherick, N. E. & Wynn, V. (1993). Working memory and strategies in syllogistic-reasoning tasks. *Memory and Cognition*, 21, 115-224.
- Görner, R. (1973). *Untersuchungen zur psychologischen Analyse des Konstruierens*. Unveröffentlichte Dissertation, TU Dresden.
- Görner, R. (1976). Zur Entwicklung räumlicher Vorstellungen als Operieren an internen Repräsentationen. In W. Hacker (Hrsg.), *Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten* (S. 72-77). Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Görner, R. (1994). Zur psychologischen Analyse von Konstrukteur- und Entwurfstätigkeiten. In B. Bergmann & P. Richter (Hrsg.), *Die Handlungsregulationstheorie. Von der Praxis einer Theorie* (S. 233-241). Göttingen: Hogrefe.
- Hacker, W. (1973). *Allgemeine Arbeits- und Ingenieurpsychologie: Psychische Struktur und Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hacker, W. (1986). *Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Hacker, W. (1998). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Arbeitstätigkeiten*. Bern: Huber.
- Hacker, W. (2005). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Wissens-, Denk- und körperlicher Arbeit*. Bern: Huber.
- Hacker, W., Handrick, S., Heimann, I., Oehm, D., Richter, F., Sachse, P. & Schneider, M. (1999). Individuelle Unterschiede im Arbeitsgedächtnis für numerisches Material: Rechenspanne. *Zeitschrift für Differentielle und Diagnostische Psychologie*, 20, 290-308.
- Hacker, W., Hübner, I., Müller, H., Nedkova, S., Osterland, D. & Wollenberger, E. (1992). Profitiert nur der Bessere? Zum Einfluß von Text- und Arbeitsgedächtnismerkmalen auf das Textverstehen. *Sprache und Kognition*, 11, 208-222.
- Hacker, W. & Osterland, D. (1995). Mentalkapazität und Textverstehen: Funktionen der zentralen Exekutive. *Zeitschrift für Experimentelle Psychologie*, 42 (4), 646-671.
- Hacker, W. & Sachse, P. (2006). Entwurfstätigkeiten und ihre psychologischen Unterstützungsmöglichkeiten. In B. Zimolong & U. Konrad (Hrsg.), *Enzyklopädie der Psychologie, Themenbereich D, Serie III, Band 2: Ingenieurpsychologie*, 671-707. Göttingen: Hogrefe.
- Hacker, W. & Sachse, P. (2013). *Allgemeine Arbeitspsychologie: Psychische Regulation von Tätigkeiten*. Göttingen: Hogrefe.
- Hacker, W. & Sieler, R. (1993). *Rechenspannentest (Testmaterial)*. Institut für Allgemeine Psychologie und Methodenlehre, TU Dresden (unveröffentlichtes Manuskript).
- Hacker, W. & Sieler, R. (1997). Arbeitsgedächtnis - einfache vs. komplexe Spannen als Prädiktoren des Textverstehens. *Zeitschrift für Psychologie*, 205, 143-167.
- Halford, G. S., Cowan, N. & Andrews, G. (2007). Separating cognitive capacity from knowledge: A new hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, 11 (6), 236-242.

- Henrik, L., Smirnov, S. & Mendling, J. (2012). On the refactoring of activity labels in business process models. *Information System*, 37 (5), 443-459.
- Hussy, W. (1984). *Denkpsychologie*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Just, M. A. & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension: Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99, 122-149.
- Kahneman, D. (2012). *Schnelles Denken, langsames Denken*. München: Siedler.
- Kane, M. J., Bleckley, M. K., Conway, A. R. A. & Engle, R. W. (2001). A controlled-attention view of working-memory capacity. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130 (2), 169-183.
- Kane, M. J. & Engle, R. W. (2003). Working-memory capacity and the control of attention: The contributions of goal neglect, response competition, and task set to Stroop interference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132 (1), 47-70.
- Kane, M. J., Hambrick, D. Z., Tuholski, S. W., Wilhelm, O., Payne, T. W. & Engle, R. W. (2004). The generality of working memory capacity: A latent variable approach to verbal and visuospatial memory span and reasoning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133, 189-217.
- Kiewra, K. A. & Benton, S. L. (1988). The relationship between information-processing ability and notetaking. *Contemporary Educational Psychology*, 13, 33-44.
- Klauer, K. C. (1993). *Belastung und Entlastung beim Problemlösen. Eine Theorie deklarativen Vereinfachens*. Göttingen: Hogrefe.
- Klauer, K. C. (1995). Grundlagen der Problemlöseforschung. In B. Strauß & M. Kleinmann (Hrsg.), *Computersimulierte Szenarien in der Personalarbeit* (S. 17-42). Göttingen: Verlag für Angewandte Psychologie.
- Klix, F. (1971). *Information und Verhalten*. Berlin: Deutscher Verlag der Wissenschaften.
- Kotovsky, K., Hayes, J. R. & Simon, H. A. (1985). Why are some problems hard? Evidence from tower of Hanoi. *Cognitive Psychology*, 17, 248-294.
- Krogstie, J. (2012). *Model-based development and evolution of information systems: A quality approach*. London: Springer.
- Kyllonen, P. C. & Christal, P. E. (1990). Reasoning ability is (little more than) working memory capacity?! *Intelligence*, 14, 389-433.
- Kyllonen, P. C. & Stephens, D. L. (1990). Cognitive abilities as determinants of success in acquiring logic skill. *Learning and Individual Differences*, 2, 129-160.
- Lewandowsky, S., Oberauer, K., Yang, L. & Ecker, U. (2010). A working memory test battery for MATLAB. *Behavior Research Methods*, 42, 571-585.
- Lewin, K. (1935). *A dynamic theory of personality: Selected papers*. New York: McGraw-Hill.
- Martini, M., Furtner, M. R. & Sachse, P. (2013). Working memory and its relation to deterministic sequence learning. *PLoS ONE*, 8 (2), 1-8. e56166. doi:10.1371/journal.pone.0056166.
- Menard, S. (1995). *Applied logistic regression analysis: Sage university series on quantitative applications in the social sciences*. Thousand Oaks, CA: Sage.
- Miller, G. A., Galanter, E. & Pribram, K. H. (1960). *Plans and the structure of behavior*. New York: Holt.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H. & Howerter, A. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex „frontal lobe“ tasks: A latent variable analysis. *Cognitive Psychology*, 41, 49-100.
- Neter, J., Wasserman, W. & Kutner, M. H. (1989). *Applied linear regression models*. Homewood, IL: Irwin.
- Newell, A. & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice Hall.
- Oberauer, K. (1993). Die Koordination kognitiver Operationen: Eine Studie über die Beziehung zwischen Intelligenz und „working memory“. *Zeitschrift für Psychologie*, 201, 57-84.

- Oberauer, K. (2009). Design for a working memory. *Psychology of Learning and Motivation*, 51, 45-100.
- Oberauer, K., Süß, H.-M., Schulze, R., Wilhelm, O. & Wittmann, W.W. (2000). Working memory capacity – Facets of a cognitive ability construct. *Personality and Individual Differences*, 29, 1017-1045.
- Oberauer, K., Süß, H.-M., Wilhelm, O., & Sander, N. (2007). Individual differences in working memory capacity and reasoning ability. In A. R. A. Conway, C. Jarrold, M. J. Kane, A. Miyake & J. N. Towse (Eds.), *Variation in working memory* (pp. 49-75). New York: Oxford University Press.
- Oberauer, K., Süß, H.-M., Wilhelm, O. & Wittmann, W. W. (2003). The multiple faces of working memory: Storage, processing, supervision, and coordination. *Intelligence*, 31, 167-193.
- Oberauer, K., Süß, H.-M., Wilhelm, O. & Wittmann, W. W. (2008). Which working memory functions predict intelligence? *Intelligence*, 36, 641-652.
- Oberauer, K., Weidenfeld, A. & Hörnig, R. (2006). Working memory capacity and the construction of spatial mental models in comprehension and deductive reasoning. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59 (2), 426-447.
- O'Reilly, R. C. & Frank, M. J. (2006). Making working memory work: A computational model of learning in prefrontal cortex and basal ganglia. *Neural Computation*, 18, 283-328.
- Ozuru, Y., Dempsey, K. & McNamara, D. S. (2009). Prior knowledge, reading skill, and text cohesion in the comprehension of science texts. *Learning and Instruction*, 19, 228-242.
- Pelli, D. (1997). The video toolbox software for visual psychophysics: Transforming numbers into movies. *Spatial Vision*, 10, 437-442.
- Petre, M. (1995). Why looking isn't always seeing: Readership skills and graphical programming. *Communications of the ACM*, 38 (6), 33-44.
- Pietzcker, F. (2004). *Konstruktion lehren – Wirkung einer konstruktionsmethodischen Ausbildung auf das Konstruieren bei Studenten und Konstrukteuren*. München: Dr. Hut.
- Pinggera, J., Furtner, M. R., Martini, M., Sachse, P., Reiter, K., Zugal, S. & Weber, B. (2013). Investigating the process of process modeling with eye movement analysis. In: *ER BPM*, 438-450.
- Pinggera, J., Zugal, S. & Weber, B. (2010). Investigating the process of process modeling with Cheeth Experimental Platform. *Proceedings ER-POIS '10*, 13-18.
- Polya, G. (1945). *How to solve it*. Princeton: Princeton University Press.
- Recker, J. (2007). Understanding quality in process modelling: Towards a holistic perspective. *Australasian Journal of Information Systems*, 14 (2), 43-63.
- Richardson, J. T. E. (1984). Developing a theory of working memory. *Memory and Cognition*, 12, 71-83.
- Rumelhart, D. & Norman, D. A. (1982). Simulating a skilled typist: A study of skilled cognitive-motor performance. *Cognitive Science*, 6, 1-36.
- Rummer, R. & Fiebach, C. (2010). Prozessbasierte Ansätze in der aktuellen Arbeitsgedächtnisforschung. *Psychologische Rundschau*, 61 (1), 1-2.
- Sachse, P. (1999). Unterstützung des entwerfenden Problemlösens im Konstruktionsprozess durch Prototyping. In P. Sachse & A. Specker (Eds.), *Design thinking: Analyse und Unterstützung konstruktiver Entwurfstätigkeiten (Mensch-Technik-Organisation, Band 22, S. 67-145)*. Zürich: vdf.
- Sachse, P. (2002). *Idea materialis: Entwurfsdenken und Darstellungshandeln oder Über die allmähliche Verfertigung der Gedanken beim Skizzieren und Modellieren*. Berlin: Logos.
- Sachse, P. & Hacker, W. (1997). Unterstützung des Denkens und Handelns beim Konstruieren durch Prototyping. *Konstruktion*, 49 (4), 12-16.

- Sachse, P. & Hacker, W. (2012). External procedures in design problem solving by experienced engineering designers – methods and purposes. *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, 13 (5), 603-614.
- Sachse, P., Hacker, W. & Leinert, S. (2004). External thought – Does sketching assist problem analysis? *Applied Cognitive Psychology*, 18, 415-425.
- Sachse, P., Hacker, W., Leinert, S. & Riemer, S. (1999). Prototyping als Unterstützungsmöglichkeit des Denkens und Handelns beim Konstruieren. *Zeitschrift für Arbeits- und Organisationspsychologie*, 2, 71-82.
- Salthouse, T. A., Babcock, R. L., & Shaw, R. J. (1991). Effect of adult age on structural and operational capacities in working memory. *Psychology and Aging*, 6, 118-127.
- Schreiber, J. B., Nora, A., Stage, F. K., Barlow, E. A. & King, J. (2006). Reporting structural equation modeling and confirmatory factor analysis results: A review. *The Journal of Educational Research*, 99, 323-337.
- Shute, V. J. (1991). Who is likely to acquire programming skills? *Journal of Educational Computing Research*, 7 (1), 1-24.
- Stanovich, K. E. & West, R. F. (2000). Individual differences in reasoning: Implication for the rationality debate. *Behavioural and Brain Sciences*, 23, 645-665.
- Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12, 257-285.
- Unsworth, N. & Engle, R. W. (2007). The nature of individual differences in working memory capacity: Active maintenance in primary memory and controlled search from secondary memory. *Psychological Review*, 114, 104-132.
- Wiesner, B. & Hacker, W. (1994). Mentale Handlungsvorbereitung: Studie zu Leistungseinfluss und personalen Bedingungen. *Zeitschrift für experimentelle und angewandte Psychologie*, 41 (4), 649-677.
- Wilhelm, O. & Oberauer, K. (2006). Why are reasoning ability and working memory capacity related to mental speed? An investigation of stimulus-response compatibility in choice reaction time tasks. *European Journal of Cognitive Psychology*, 18, 18-50.