Okay, ich werde die numerischen Referenzen im Text in APA 7-konforme In-Text-Zitate umwandeln und ein überarbeitetes, alphabetisch sortiertes Literaturverzeichnis im APA 7-Format am Ende hinzufügen. Der Rest des Textes bleibt unverändert.

Wichtiger Hinweis: Die ursprüngliche Referenzliste enthielt einige URLs, die auf nicht standardmäßig zitierbare Quellen (wie Forendiskussionen [34] oder Suchergebnisseiten [39]) oder nur auf Nachrichtenseiten [107] verwiesen. Diese wurden bestmöglich als APA 7-Zitate formatiert, sind aber wissenschaftlich möglicherweise nicht ideal. Zudem gab es Unklarheiten und Mehrfachzuweisungen bei der Nummerierung in Abschnitt VIII im Vergleich zur URL-Liste am Ende. Ich habe versucht, dies anhand des Kontexts und der expliziten Nennungen in Abschnitt VIII aufzulösen, wobei die Zuweisung der Nummer im Text zur entsprechenden Quelle in der finalen URL-Liste bzw. zu den explizit nummerierten Quellen in Abschnitt VIII Vorrang hatte. Bei Widersprüchen wurde die explizite Zuordnung in Abschnitt VIII bevorzugt. Fehlende Detailinformationen (wie Jahrgänge, Seitenzahlen) wurden, wenn nicht auffindbar, mit "n.d." (no date) gekennzeichnet oder weggelassen.

Der Zusammenhang zwischen kognitiver Anstrengung und kognitiver Leistung: Eine multidisziplinäre Literaturübersicht

I. Einleitung 1.1.

Die Bedeutung des Zusammenhangs zwischen Anstrengung und Leistung Kognitive Anstrengung ist ein allgegenwärtiger Aspekt menschlicher Aktivität. Sie ist erforderlich beim Erlernen komplexer Fähigkeiten wie dem Lesen, dem Spielen eines Musikinstruments oder dem Programmieren (Clay et al., 2022), bei der Lösung von Problemen (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.), bei alltäglichen Entscheidungen (Kahneman, 1973) und bei der beruflichen Leistung (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Die Fähigkeit, kognitive Anstrengung zu mobilisieren und aufrechtzuerhalten, ist entscheidend für das Erreichen persönlicher und gesellschaftlicher Ziele, insbesondere in einer Welt, die zunehmend komplexe Problemlösungsfähigkeiten erfordert (Clay et al., 2022). Die praktische Relevanz des Verständnisses, wie kognitive Anstrengung und kognitive Leistung zusammenhängen, erstreckt sich über zahlreiche Disziplinen: Pädagogische Psychologie und Bildung: Die Optimierung von Lernumgebungen und Lehrmethoden hängt entscheidend davon ab, wie die kognitive Belastung (Cognitive Load) gesteuert wird, um eine effektive Anstrengung (Germane Load) zu fördern, ohne die Lernenden zu überfordern (Cognitive Load Theory; Vogel et al., 2020). Human Factors und Ergonomie: Das Konzept der mentalen Arbeitsbelastung (Mental Workload) ist zentral für die Gestaltung sicherer und effizienter Mensch-Maschine-Systeme, von Fahrzeugcockpits bis hin zu komplexen Überwachungsaufgaben (Vogel et al., 2020). Klinische Psychologie und Psychiatrie: Abweichungen in der Sensitivität gegenüber Anstrengungskosten oder in der Fähigkeit, Anstrengung zu mobilisieren, werden als mögliche Faktoren bei psychischen Störungen wie Depression, Schizophrenie oder chronischen Erschöpfungssyndromen diskutiert (Kahneman, 1973). Wirtschaftswissenschaften und Neuroökonomie: Anstrengung wird als Kostenfaktor in Entscheidungsmodellen betrachtet (Effort Discounting), der den subjektiven Wert von Belohnungen beeinflusst und erklärt, warum Individuen oft weniger anstrengende Optionen bevorzugen (Westbrook & Braver, 2015). Neurowissenschaften: Die Identifizierung der neuronalen Korrelate von Anstrengungsbewertung, -allokation und kognitiver Kontrolle, insbesondere die Rolle von Hirnregionen wie dem anterioren Cingulären Cortex (ACC), ist ein aktives Forschungsfeld (Di Nota et al., 2022). Sportwissenschaft: Kognitive Ermüdung, die durch anhaltende mentale Anstrengung entsteht, kann die physische Leistungsfähigkeit von Athleten beeinträchtigen (van Cutsem et al., 2017). Angesichts dieser breiten Relevanz stellt sich die fundamentale Frage: Wie hängt der Grad der investierten mentalen Arbeit mit der Qualität oder Quantität des kognitiven Outputs zusammen? Ist mehr Anstrengung immer besser, oder gibt es Grenzen und modifizierende Faktoren, die diese Beziehung komplexer gestalten? 1.2. Ziele und Struktur des Berichts Dieser Bericht zielt darauf ab, eine umfassende, multidisziplinäre Synthese der aktuellen wissenschaftlichen Literatur zum Verhältnis zwischen kognitiver Anstrengung und kognitiver Leistung zu liefern. Basierend auf einer breiten Recherche, die psychologische Studien und Modelle priorisiert, aber auch relevante Erkenntnisse aus Kognitions- und Neurowissenschaften, Wirtschaftswissenschaften, Biologie und anderen angrenzenden Feldern einbezieht, werden folgende Kernfragen beleuchtet: Definitionen: Wie werden kognitive Anstrengung und kognitive Leistung konzeptualisiert und von verwandten Konstrukten abgegrenzt? Messung: Mit welchen Methoden werden momentane kognitive Anstrengung und kognitive Leistung typischerweise operationalisiert und gemessen? Linearität: Gibt es Evidenz für einen direkten, linearen Zusammenhang zwischen Anstrengungsgrad und Leistungsniveau? Nicht-Linearität: Welche Belege gibt es für nicht-lineare Zusammenhänge (z.B. U-förmig, invers U-förmig), und wann führt mehr Anstrengung zu keiner Verbesserung oder sogar Verschlechterung der Leistung (z.B. Überlastung, Ermüdung, "Choking under Pressure")? Moderierende Faktoren: Welche Variablen (z.B. Aufgabenmerkmale, individuelle Unterschiede wie Motivation, Fähigkeit, Alter, Selbstwirksamkeit; Kontextfaktoren wie Stress, Anreize) beeinflussen die Beziehung zwischen Anstrengung und Leistung maßgeblich? Theoretische Modelle: Welche etablierten Theorien oder Modelle erklären den Zusammenhang und welche Vorhersagen machen sie? Der Bericht ist wie folgt strukturiert: Abschnitt II widmet sich den Definitionen und konzeptuellen Abgrenzungen von kognitiver Anstrengung und Leistung. Abschnitt III beschreibt die gängigen Messmethoden. Abschnitt IV untersucht die Form des Zusammenhangs, einschließlich linearer und nicht-linearer Beziehungen sowie Phänomene der Leistungsbeeinträchtigung. Abschnitt V analysiert die wichtigsten moderierenden Faktoren. Abschnitt VI stellt zentrale theoretische Modelle vor und vergleicht sie. Abschnitt VII synthetisiert die Ergebnisse, identifiziert zentrale wissenschaftliche Debatten sowie Forschungslücken und diskutiert Implikationen. Abschließend listet Abschnitt VIII Schlüsselpublikationen auf, die für eine vertiefte Auseinandersetzung mit dem Thema relevant sind. II. Definitionen: Kognitive Anstrengung und Kognitive Leistung Ein klares Verständnis der Kernkonstrukte ist grundlegend für die Untersuchung ihres Zusammenhangs. Die Begriffe "kognitive Anstrengung" und "kognitive Leistung" werden jedoch in verschiedenen Forschungsfeldern nicht immer einheitlich verwendet, was eine präzise Abgrenzung erforderlich macht (Vogel et al., 2020). 2.1. Kognitive Anstrengung: Konzeptualisierungen und Herausforderungen 2.1.1. Kernidee und grundlegende Definitionen Im Kern bezieht sich kognitive Anstrengung auf das Ausmaß des Engagements bei anspruchsvollen Aufgaben (Westbrook & Braver, 2015) oder die Intensität der willentlichen Aufmerksamkeit (Cho et al., 2022). Sie wird auch als die willentliche Zuweisung von Ressourcen zur Bewältigung von Aufgabenanforderungen definiert (Arslanoğlu et al., 2021). Anstrengung kann als ein Konstrukt verstanden werden, das zwischen den Merkmalen einer Aufgabe, der verfügbaren Verarbeitungskapazität einer Person und der tatsächlichen Güte der durchgeführten Informationsverarbeitung vermittelt (Vogel et al., 2020). Sie beeinflusst fundamentale kognitive Prozesse wie Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtnis, kognitive Kontrolle und Entscheidungsfindung (Kahneman, 1973). 2.1.2. Abgrenzung von verwandten Konstrukten Die konzeptuelle Klarheit erfordert eine Abgrenzung von eng verwandten Begriffen: Anstrengung vs. Aufmerksamkeit: Anstrengung ist nicht synonym mit Aufmerksamkeit. Sie bezieht sich spezifisch auf die Top-down, willentliche, endogene Aufmerksamkeit, die subjektiv als anstrengend empfunden werden kann, im Gegensatz zur Bottom-up, unwillkürlichen, exogenen Aufmerksamkeit, die dies typischerweise nicht ist (Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung impliziert aktives Engagement, während Aufmerksamkeit den Mechanismus der Selektion und Fokussierung beschreibt (Cho et al., 2022). Anstrengung vs. Schwierigkeit: Obwohl eng verbunden und Schwierigkeit oft als primärer Bestimmungsfaktor für Anstrengung angesehen wird (Westbrook & Braver, 2015), sind die Begriffe nicht identisch. Eine Aufgabe kann schwierig sein (z.B. geringe Erfolgswahrscheinlichkeit), ohne als anstrengend bewertet zu werden (Westbrook & Braver, 2015). Die Unterscheidung wird deutlich bei "datenlimitierten" Aufgaben (Leistung durch Datenqualität begrenzt, z.B. Lesen schlecht sichtbarer Schrift) im Gegensatz zu "ressourcenlimitierten" Aufgaben (Leistung durch Ressourceneinsatz verbesserbar; Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung ist primär bei ressourcenlimitierten Aufgaben relevant, wo mehr investierte Ressourcen die Leistung steigern können. Schwierigkeit kann sich auf die Quantität der benötigten Ressourcen beziehen, Anstrengung auf das Ausmaß des Engagements dieser Ressourcen (Charles & Nixon, 2019). Anstrengung vs. Kognitive Kontrolle: Anstrengende Aufgaben erfordern oft kognitive Kontrolle – die Fähigkeit, Informationsverarbeitung zielgerichtet zu steuern und automatische Reaktionen zu überwinden (Westbrook & Braver, 2015). Physiologische Marker der Kontrolle korrelieren oft mit dem Gefühl der Anstrengung (Westbrook & Braver, 2015). Dennoch sind die Konstrukte nicht deckungsgleich. Kontrolle kann unter bestimmten Umständen als mühelos erlebt werden (z.B. im "Flow"-Zustand; Westbrook & Braver, 2015). Umgekehrt könnte Anstrengung primär die Entscheidung betreffen, Kontrollressourcen einzusetzen, anstatt die Kontrolle selbst zu sein (Westbrook & Braver, 2015). Einige Forscher sehen Kontrolle als die erfolgreiche Anwendung, während Anstrengung der Versuch ist (ResearchGate, n.d.). Theorien wie der Erwartungswert der Kontrolle (EVC) modellieren explizit die Entscheidung zur Kontrollausübung (und damit Anstrengung) als Abwägung von Kosten und Nutzen (Shenhav et al., 2013). Anstrengung vs. Kognitive Belastung (Cognitive Load): Diese Begriffe werden oft synonym verwendet, insbesondere im Kontext der Cognitive Load Theory (CLT). Einige Forscher unterscheiden jedoch: Kognitive Belastung kann sich auf die objektiven Anforderungen beziehen, die eine Aufgabe an das kognitive System stellt (intrinsische, extrinsische, germane Last in CLT; Vogel et al., 2020), während Anstrengung die tatsächlich vom Individuum investierten Ressourcen widerspiegelt (Arslanoğlu et al., 2021). Eine Aufgabe kann eine hohe potentielle Belastung aufweisen, aber wenn eine Person keine Anstrengung investiert, ist die erlebte Belastung möglicherweise geringer (Arslanoğlu et al., 2021). 2.1.3. Anstrengung als Kostenfaktor und Aversion Eine vorherrschende Sichtweise in Psychologie, Wirtschaftswissenschaften und Neurowissenschaften betrachtet kognitive Anstrengung als inhärent kostspielig oder aversiv (Clay et al., 2022). Menschen neigen dazu, kognitive Anstrengung zu vermeiden, wenn möglich ("Gesetz der geringsten Anstrengung"; Clay et al., 2022). Diese Aversion wird in Paradigmen des "Effort Discounting" quantifiziert, bei denen Individuen bereit sind, auf Belohnungen zu verzichten, um Anstrengung zu vermeiden (Kahneman, 1973). Die Kosten der Anstrengung werden unterschiedlich konzeptualisiert, z.B. als Opportunitätskosten (Zeit/Ressourcen könnten anderweitig genutzt werden; Cacioppo & Petty, 1982) oder als metabolische Kosten (obwohl einfache Glukose-Modelle kritisiert werden; Van Cutsem et al., 2017). Eine Meta-Analyse bestätigte eine starke, konsistente positive Assoziation zwischen subjektiv bewerteter Anstrengung und negativem Affekt (Frustration) über verschiedene Kontexte hinweg, was die Annahme stützt, dass Anstrengung per se aversiv ist (Saunders et al., 2023). 2.1.4. Anstrengung als Wert und Belohnung Im Kontrast zur reinen Kostenperspektive gibt es zunehmend Evidenz dafür, dass kognitive Anstrengung unter bestimmten Umständen als intrinsisch belohnend oder wertvoll erlebt werden kann (Clay et al., 2022). Menschen wählen manchmal freiwillig anstrengende Tätigkeiten wie Rätsel oder anspruchsvolle Spiele, auch ohne externe Belohnung (Clay et al., 2022). Experimentelle Studien zeigen, dass die Belohnung von Anstrengung selbst (unabhängig von der Leistung) dazu führen kann, dass Personen später anspruchsvollere Aufgaben bevorzugen, selbst wenn keine weitere Belohnung in Aussicht steht (Clay et al., 2022). Dies deutet darauf hin, dass der Wert von Anstrengung gelernt werden kann und nicht inhärent negativ sein muss (Clay et al., 2022). Faktoren wie persönliches Interesse können dazu führen, dass anstrengende Aufgaben als weniger ermüdend und sogar als angenehm empfunden werden (Milyavskaya et al., 2021). Neurobiologisch wurde gezeigt, dass Belohnungen nach hoher Anstrengung stärkere Aktivierungen in Belohnungszentren (z.B. ventrales Striatum) hervorrufen können (Clay et al., 2022). Diese Befunde stellen die universelle Gültigkeit der Aversionshypothese in Frage und legen nahe, dass der Kontext und die individuelle Bewertung entscheidend sind (Clay et al., 2022). 2.1.5. Anstrengung als vermittelnder Faktor Kognitive Anstrengung wird oft als Mediator betrachtet, der die Auswirkungen anderer Variablen auf Verhalten und Erleben beeinflusst. Sie vermittelt zwischen Motivation und Leistung/physiologischen Reaktionen (Westbrook & Braver, 2015). Sie ist ein zentrales Element in Theorien zur kognitiven Ermüdung (Leistungsabfall über die Zeit), zu Depletionseffekten (nachlassende Selbstkontrolle nach vorheriger Anstrengung) und zu Geistigem Abschweifen (Mind-Wandering; Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung spielt auch eine Rolle bei der Strategiewahl, wenn Individuen zwischen aufwändigeren, aber potenziell erfolgreicheren Strategien und weniger aufwändigen, aber fehleranfälligeren Strategien wählen (z.B. bei Gedächtnisaufgaben oder Entscheidungsfindung; Westbrook & Braver, 2015; Modell-basierte vs. Modell-freie Kontrolle; Westbrook & Braver, 2015). 2.1.6. Interdisziplinäre Perspektiven Das Konstrukt der kognitiven Anstrengung wird in verschiedenen Disziplinen beleuchtet: Psychologie: Fokus auf willentliche Aufmerksamkeit, Ressourcenallokation, Kosten-Nutzen-Abwägungen, subjektives Erleben (Kahneman, 1973). Neurowissenschaften: Untersuchung neuronaler Korrelate im Gehirn (z.B. Aktivierungsmuster in ACC, PFC, SN; Neurotransmitter wie Dopamin), Mechanismen der Kontrollallokation (Di Nota et al., 2022). Wirtschaftswissenschaften/Neuroökonomie: Modellierung von Anstrengung als Kostenfaktor in Entscheidungsmodellen, Anwendung von Discounting-Paradigmen (Westbrook & Braver, 2015). Pädagogik: Konzeptualisierung im Rahmen der Cognitive Load Theory (insbesondere Germane Load als produktive Anstrengung; Vogel et al., 2020). Human Factors/Ergonomie: Untersuchung als mentale Arbeitsbelastung (Mental Workload) in angewandten Kontexten (Vogel et al., 2020). Die Vielfalt der Definitionen und Perspektiven unterstreicht, dass "kognitive Anstrengung" kein monolithisches Konstrukt ist. Es umfasst wahrscheinlich verschiedene Facetten – das subjektive Gefühl, den Allokationsprozess, den objektiven Ressourceneinsatz –, deren Bedeutung vom theoretischen Rahmen und Kontext abhängt. Diese Mehrdeutigkeit stellt eine Herausforderung für die Forschung dar (Vogel et al., 2020) und erfordert eine präzise Definition des jeweils untersuchten Aspekts. Die dominante Sichtweise der Anstrengung als Kostenfaktor wird zunehmend durch Befunde herausgefordert, die auf einen potenziellen intrinsischen Wert von Anstrengung hindeuten, was die Komplexität des Konstrukts weiter erhöht. 2.2. Kognitive Leistung: Dimensionen und Domänen 2.2.1. Allgemeine Definition Kognitive Leistung bezieht sich allgemein auf die Effizienz und Effektivität, mit der eine Person Informationen verarbeiten, Entscheidungen treffen, Probleme lösen, lernen und sich erinnern kann (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Sie ist ein Maß dafür, wie gut das Gehirn bei Aufgaben funktioniert, die Denken und Informationsverarbeitung erfordern (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). 2.2.2. Schlüsselkomponenten und kognitive Domänen Kognition ist kein einheitliches Konzept, sondern umfasst verschiedene Funktionen oder Domänen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Die Messung kognitiver Leistung zielt auf diese spezifischen Fähigkeiten ab: Aufmerksamkeit und Konzentration: Umfasst Wachheit (Alertness), die Fähigkeit, den Fokus aufrechtzuerhalten und Ablenkungen zu ignorieren (selektive und Daueraufmerksamkeit; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Verarbeitungsgeschwindigkeit: Die Geschwindigkeit, mit der Informationen aufgenommen, verarbeitet und Reaktionen initiiert werden, oft gemessen durch Reaktionszeiten (einfach, Wahl-; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Gedächtnis: Arbeitsgedächtnis (Working Memory): Kurzfristiges Halten und Manipulieren von Informationen (z.B. eine Telefonnummer merken beim Wählen; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Langzeitgedächtnis: Erwerb, Verarbeitung, Speicherung (Konsolidierung) und Abruf von Informationen über längere Zeiträume (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Umfasst episodisches Gedächtnis (Ereignisse), semantisches Gedächtnis (Faktenwissen) und implizites Lernen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Exekutive Funktionen: Übergeordnete Kontrollprozesse, einschließlich logischem Schlussfolgern, Problemlösung, Planung, Entscheidungsfindung, kognitiver Kontrolle (z.B. Überwindung von Interferenzen), Inhibition (Unterdrückung irrelevanter Reaktionen) und kognitiver Flexibilität (Wechsel zwischen Aufgaben oder Regeln; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Sprache und Kommunikation: Rezeptive (Verstehen) und expressive (Produzieren) Sprachfähigkeiten, sowohl mündlich als auch schriftlich (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Visuell-räumliche Fähigkeiten: Verarbeitung und Manipulation visueller und räumlicher Informationen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Metakognition: Das Bewusstsein und Verständnis der eigenen Denkprozesse (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). 2.2.3. Leistungsvariabilität Kognitive Leistung ist nicht statisch. Sie variiert je nach gemessener Domäne – eine Person kann in einem Bereich (z.B. Daueraufmerksamkeit) gut, in einem anderen (z.B. Gedächtnis) aber schwächer sein (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Zudem schwankt die Leistung einer Person auch über die Zeit (intraindividuelle Variabilität, IIV; Hülür et al., 2020). Eine höhere IIV, insbesondere bei Reaktionszeitmaßen, wird mit kognitiver Instabilität und geringerer kognitiver Kontrolle in Verbindung gebracht (Hülür et al., 2020). Die Multidimensionalität der kognitiven Leistung ist ein wichtiger Aspekt für die Untersuchung des Zusammenhangs mit kognitiver Anstrengung. Da verschiedene Aufgaben unterschiedliche kognitive Funktionen und Systeme beanspruchen (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.), ist es plausibel, dass sich der Einfluss von Anstrengung je nach gemessener Leistungsdimension (z.B. Geschwindigkeit vs. Genauigkeit) und der Art der Aufgabe (z.B. Arbeitsgedächtnis- vs. Aufmerksamkeitsaufgabe) unterscheidet. Eine hohe Leistung in einer Domäne garantiert keine hohe Leistung in einer anderen (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.), und somit könnte auch die Anstrengungs-Leistungs-Beziehung domänenspezifisch variieren. Die Wahl des Leistungsmaßes ist daher entscheidend für die Interpretation von Forschungsergebnissen. 2.3. Tabelle: Vergleichende Definitionen und Abgrenzungen Zur Verdeutlichung der zentralen Konstrukte und ihrer Beziehungen dient folgende Tabelle:

Konstrukt Kerndefinition Schlüsselmerkmale/Dimensionen Beziehung zur Anstrengung Beispielhafte Maße/Aufgaben Kognitive Anstrengung (Cognitive Effort) Ausmaß des Engagements / Intensität der willentlichen Aufmerksamkeit / Ressourcenzuweisung bei anspruchsvollen Aufgaben (Westbrook & Braver, 2015). Vermittelt zwischen Aufgabe, Kapazität und Leistung (Vogel et al., 2020). Subjektives Erleben (Empfindung von Mühe), objektiv (Ressourcenmobilisierung), motivational (Entscheidung zur Investition). Oft als aversiv/kostspielig betrachtet (Kahneman, 1973), kann aber auch wertvoll sein (Clay et al., 2022). Anstrengung ist die untersuchte Variable. Eng verbunden mit, aber verschieden von Aufmerksamkeit, Schwierigkeit, Kontrolle, Belastung. Subjektive Ratings (NASA-TLX; Charles & Nixon, 2019), Pupillometrie (Cho et al., 2022), Herzratenvariabilität (HRV), Blutdruck (Fu et al., 2021), EEG/fMRT-Aktivierung (Fu et al., 2021), Wahlverhalten (Demand Selection Task; Kahneman, 1973, Effort Discounting; Westbrook & Braver, 2015). Kognitive Leistung (Cognitive Performance) Effizienz und Effektivität der Informationsverarbeitung, Problemlösung, Lernen, Gedächtnis etc. (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Maß für die Funktionsgüte des Gehirns bei Denkaufgaben (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Multidimensional: Aufmerksamkeit, Geschwindigkeit, Gedächtnis (Arbeits-, Langzeit-), Exekutivfunktionen (Planung, Kontrolle, Problemlösung), Sprache etc. (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Anstrengung wird investiert, um die Leistung zu beeinflussen (oft zu verbessern, aber nicht immer). Leistung ist das Ergebnis der kognitiven Prozesse. Genauigkeit (% korrekt, Fehler; Neubauer et al., 2024), Reaktionszeit (RT; Hülür et al., 2020), RT-Variabilität (IIV; Hülür et al., 2020), Gedächtnisspanne (Kłoda et al., 2022), Aufgabenlösungszeit, spezifische Testscores (PVT, SART, Stroop; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Aufmerksamkeit (Attention) Prozess der selektiven Konzentration auf bestimmte Informationen unter Ignorierung anderer (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Wachheit, selektive A., geteilte A., Daueraufmerksamkeit. Top-down (willentlich) vs. Bottom-up (unwillkürlich; Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung ist eng mit willentlicher (Top-down) Aufmerksamkeit verbunden (Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung ist das Engagement, Aufmerksamkeit der Mechanismus. Daueraufmerksamkeitstests (SART; Neubauer et al., 2024), Vigilanztests (PVT; Human Performance Resources by CHAMP, n.d.), Selektive Aufmerksamkeitsaufgaben (Stroop; Kłoda et al., 2022). Schwierigkeit (Difficulty) Eigenschaft einer Aufgabe, die hohe Anforderungen an Verarbeitungskapazitäten stellt oder eine geringe Erfolgswahrscheinlichkeit impliziert (Westbrook & Braver, 2015). Objektiv (z.B. Anzahl Elemente, Komplexität der Regeln) vs. subjektiv (wahrgenommene Schwierigkeit). Datenlimitiert vs. Ressourcenlimitiert (Westbrook & Braver, 2015). Schwierigkeit ist ein Hauptdeterminant für die Notwendigkeit von Anstrengung (Westbrook & Braver, 2015). Eine schwierige Aufgabe erfordert oft mehr Anstrengung, aber nicht zwangsläufig (siehe datenlimitierte Aufgaben; Westbrook & Braver, 2015). Aufgabenparameter (z.B. N in N-back, Anzahl Regeln), subjektive Schwierigkeitsratings. Kognitive Kontrolle (Cognitive Control) Fähigkeit zur zielgerichteten Steuerung von Gedanken und Handlungen, Überwindung von Interferenzen und Automatismen (Westbrook & Braver, 2015). Inhibition, Aufgabenwechsel, Konfliktmonitoring, Zielaufrechterhaltung. Merkmal nicht-automatischer Prozesse (Westbrook & Braver, 2015). Anstrengende Aufgaben erfordern oft Kontrolle (Westbrook & Braver, 2015). Anstrengung kann die Entscheidung zur Kontrollausübung sein (Westbrook & Braver, 2015). Kontrolle kann manchmal mühelos sein ("Flow"; Westbrook & Braver, 2015). EVC-Theorie verbindet Kontrollallokation mit Anstrengungskosten (Shenhav et al., 2013). Stroop-Test, Flanker-Aufgabe, Go/No-Go-Aufgaben, Aufgabenwechsel-Paradigmen. Kognitive Belastung (Cognitive Load) Die Gesamtmenge an mentaler Aktivität/Ressourcenbeanspruchung, die durch eine Aufgabe im Arbeitsgedächtnis entsteht (Vogel et al., 2020). Intrinsisch (Aufgabenkomplexität), extrinsisch (Instruktionsdesign), german (Lernprozesse; Xu et al., 2024). Eng verwandt mit Anstrengung. Belastung bezieht sich auf die Anforderungen der Aufgabe, Anstrengung auf die investierten Ressourcen (Skulmowski & Rey, 2023). Hohe Belastung erfordert oft hohe Anstrengung, aber Anstrengung kann auch bei moderater Belastung variieren (Motivation). Subjektive Ratings (spez. für Load), physiologische Maße (ähnlich wie bei Anstrengung), Leistungsmaße unter verschiedenen Instruktionsbedingungen.

III. Messung und Operationalisierung Die empirische Untersuchung des Zusammenhangs zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung erfordert valide und reliable Methoden zur Messung beider Konstrukte. Die Forschung bedient sich dabei einer Vielzahl von subjektiven, physiologischen und verhaltensbasierten Maßen. 3.1. Messung Kognitiver Anstrengung Die Operationalisierung von Anstrengung ist eine Herausforderung, da sie sowohl eine subjektive Erfahrung als auch einen objektiven Prozess der Ressourcenmobilisierung umfasst. 3.1.1. Subjektive Bewertungen Die einfachste Methode ist die direkte Befragung der Versuchspersonen nach ihrer wahrgenommenen Anstrengung. Verbreitung und Nutzen: Subjektive Ratings sind weit verbreitet, einfach zu implementieren und nicht-invasiv (Skulmowski & Rey, 2023). Sie erfassen die phänomenologische Erfahrung der Anstrengung. Instrumente: NASA-Task Load Index (NASA-TLX): Ein multidimensionales Instrument, das neben anderen Faktoren wie mentaler, physischer und zeitlicher Anforderung, Leistung und Frustration auch eine explizite Skala für "Anstrengung" (Effort) enthält (Charles & Nixon, 2019). Es gilt als eines der am häufigsten verwendeten Instrumente zur Messung der mentalen Arbeitsbelastung (Charles & Nixon, 2019). Eindimensionale Skalen: Einfache Likert-Skalen oder visuelle Analogskalen, auf denen Personen ihre momentane oder aufgabenbezogene Anstrengung einschätzen (Neubauer et al., 2024). Limitationen: Subjektive Maße sind anfällig für Verzerrungen (Biases), soziale Erwünschtheit, Gedächtniseffekte und interindividuelle Unterschiede in der Skalennutzung (Kang et al., 2024). Sie spiegeln die wahrgenommene Anstrengung wider, die nicht perfekt mit dem objektiven Ressourceneinsatz übereinstimmen muss. 3.1.2. Physiologische Maße (Objektive Indizes) Diese Methoden erfassen physiologische Reaktionen, die mit der Aktivität des autonomen (ANS) oder zentralen Nervensystems (ZNS) während kognitiver Beanspruchung assoziiert sind. Sie gelten als sensitiver als subjektive Maße, können aber durch andere Faktoren (z.B. emotionale Erregung, körperliche Aktivität) beeinflusst werden (Kang et al., 2024). Sie bieten oft eine hohe zeitliche Auflösung und Spezifität (Charles & Nixon, 2019). Pupillometrie: Die Messung der Pupillenweite ist ein etabliertes Maß für kognitive Anstrengung und Belastung (Fu et al., 2021). Befunde: Die Pupille erweitert sich typischerweise mit steigender Aufgabenschwierigkeit (Kang & Klingner, 2024), Arbeitsgedächtnislast (Cho et al., 2022) und der Notwendigkeit zur Aufmerksamkeitssteuerung (Cho et al., 2022). Die Größe der aufgabenevozierten Pupillenreaktion (Task-Evoked Pupillary Response, TERP) gilt als Index für die Intensität der Anstrengung (Cho et al., 2022). Auch der Basis-Pupillendurchmesser kann mit Erregung oder Explorationsverhalten korrelieren (Kang & Klingner, 2024). Metriken wie der maximale Pupillendurchmesser und die Latenz der Pupillenreaktion werden verwendet (Kang et al., 2024). Reduzierte Pupillenreagibilität auf Konflikte kann mentale Überlastung signalisieren (van Steenbergen et al., 2015). Vorteile/Nachteile: Hohe zeitliche Auflösung, nicht-invasiv (Kang et al., 2024). Jedoch sensitiv gegenüber Umgebungslicht und allgemeiner Erregung. Kardiovaskuläre Maße: Veränderungen der Herzaktivität und des Blutdrucks werden ebenfalls zur Erfassung von Anstrengung genutzt. Metriken: Die Herzrate (HR) steigt oft mit mentaler Arbeitsbelastung oder Stress an (Di Nota et al., 2022). Die Herzratenvariabilität (HRV) kann unter kognitiver Last abnehmen (Fu et al., 2021). Insbesondere die systolische Blutdruckreaktivität (SBP) wird, basierend auf Theorien wie der Motivation Intensity Theory, als Indikator für anstrengungsbezogenes Coping und Engagement verwendet (Gendolla & Richter, 2010). Auch der diastolische Blutdruck (DBP) und andere Maße (z.B. Herzkontraktilität) kommen zum Einsatz (Gendolla & Richter, 2010). Interpretation: Erhöhte kardiovaskuläre Aktivität wird oft als Mobilisierung physiologischer Ressourcen zur Bewältigung von Anforderungen interpretiert (Gendolla & Richter, 2010). Elektroenzephalographie (EEG): Misst die elektrische Aktivität des Gehirns mit hoher zeitlicher Auflösung (Charles & Nixon, 2019). Befunde: Veränderungen in spezifischen Frequenzbändern korrelieren mit kognitiver Anstrengung und Last. Beta-Aktivität (assoziiert mit aktivem Denken) nimmt oft mit der Komplexität zu, während Alpha-Aktivität (assoziiert mit Entspannung) abnimmt (Fu et al., 2021). Anhaltende Anstrengung und Ermüdung können mit einer Zunahme der frontalen Theta-Aktivität einhergehen (Enophones, 2023). Ereigniskorrelierte Potentiale (EKPs), wie die Reward Positivity (RewP), können motivationale Aspekte der Anstrengung (z.B. Reaktion auf Belohnung nach Anstrengung) widerspiegeln (Player et al., 2024). Analysen der Skaleninvarianz (z.B. Hurst-Exponent, H) des EEG-Signals zeigen, dass H mit zunehmender Anstrengung/Schwierigkeit abnimmt, was als genereller Marker diskutiert wird (Kosciessa et al., 2020). Vorteile/Nachteile: Sehr gute zeitliche Auflösung, relativ kostengünstig. Räumliche Auflösung begrenzt, anfällig für Artefakte. Funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT): Misst hämodynamische Veränderungen (Blutfluss, Oxygenierung) als indirektes Maß neuronaler Aktivität mit guter räumlicher Auflösung (Charles & Nixon, 2019). Befunde: Erhöhte Aktivierung in Netzwerken, die mit exekutiver Kontrolle assoziiert sind (Executive Control Network, ECN; z.B. dorsolateraler Präfrontalkortex, DLPFC; parietale Regionen), wird bei anstrengenden Aufgaben beobachtet (Di Nota et al., 2022). Gleichzeitig wird oft eine Deaktivierung des Default Mode Network (DMN) festgestellt (Di Nota et al., 2022). Das Salience Network (SN), einschließlich ACC und Insula, ist ebenfalls an der Anstrengungsallokation und -überwachung beteiligt (Di Nota et al., 2022). Aktivierungsmuster können zwischen Anstrengung und individueller Kapazität differenzieren (Schmidt et al., 2013). Vorteile/Nachteile: Gute räumliche Auflösung, ermöglicht Lokalisierung. Geringere zeitliche Auflösung als EEG, teuer, laut, bewegungsempfindlich, schränkt mögliche Aufgaben ein (Zhang et al., 2023). Funktionelle Nahinfrarotspektroskopie (fNIRS): Eine optische Methode, die ebenfalls Blutoxygenierung misst (Zhang et al., 2023). Vorteile/Nachteile: Portabler und weniger bewegungsempfindlich als fMRT, kompatibel mit Hörgeräten (Zhang et al., 2023). Bessere zeitliche Auflösung als fMRT, bessere räumliche Auflösung als EEG (Zhang et al., 2023). Wird zunehmend in der Kognitionsforschung eingesetzt, z.B. bei Höranstrengung (Zhang et al., 2023). Andere Maße: Elektrodermale Aktivität (EDA) bzw. Hautleitfähigkeit (Fu et al., 2021), Atemfrequenz (Fu et al., 2021) und Elektromyographie (EMG; Fu et al., 2021) werden ebenfalls in Studien zur kognitiven Belastung eingesetzt. 3.1.3. Verhaltensbasierte Maße (Indirekte Indizes) Anstrengung kann auch indirekt über das Wahlverhalten oder die Persistenz erfasst werden. Wahlverhalten: In Aufgaben wie der Demand Selection Task (Kahneman, 1973) oder bei Effort-Discounting-Paradigmen (Westbrook & Braver, 2015) wird die Präferenz für weniger anstrengende Optionen als Indikator für die subjektiven Kosten der Anstrengung interpretiert (Kahneman, 1973). Die Bereitschaft, Belohnungen gegen eine Reduktion der Anstrengung einzutauschen, erlaubt eine Quantifizierung dieser Kosten (Kahneman, 1973). Persistenz: Die Dauer, die eine Person bereit ist, sich mit einer Aufgabe zu beschäftigen, oder die Anzahl der absolvierten Durchgänge vor dem Abbruch können ebenfalls als Maß für die investierte Anstrengung oder die Ermüdungsgrenze dienen. Die Vielfalt der Messmethoden spiegelt die Komplexität des Anstrengungskonstrukts wider. Jede Methode hat spezifische Stärken und Schwächen. Subjektive Maße erfassen das bewusste Erleben, sind aber anfällig für Verzerrungen. Physiologische Maße bieten objektivere Einblicke in zugrundeliegende Prozesse, ihre Interpretation kann jedoch durch Konfundierungsvariablen erschwert sein. Verhaltensmaße erfassen die motivationalen Konsequenzen von Anstrengungskosten. Eine Kombination verschiedener Maße (z.B. subjektive Ratings, Pupillometrie und Leistung; Kang et al., 2024) erscheint daher ideal, um ein umfassendes Bild der kognitiven Anstrengung zu erhalten und die Konvergenz bzw. Divergenz verschiedener Indikatoren zu untersuchen. 3.2. Messung Kognitiver Leistung Die Messung kognitiver Leistung erfolgt typischerweise durch standardisierte Tests, die spezifische kognitive Domänen erfassen (National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015). Die Wahl des Maßes hängt von der untersuchten kognitiven Funktion ab (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). 3.2.1. Genauigkeitsbasierte Maße Diese erfassen die Korrektheit oder Qualität der Leistung. Metriken: Prozent korrekter Antworten, Fehlerraten, Trefferquoten (Hits), Falschalarme (False Alarms) (Neubauer et al., 2024). In Go/No-Go-Aufgaben sind insbesondere die Kommissionsfehler (fälschliche Reaktion auf No-Go-Stimuli) relevant (Neubauer et al., 2024). Maße aus der Signalentdeckungstheorie (z.B. d' für Sensitivität) werden ebenfalls verwendet (Cacioppo & Petty, 1982). Anwendung: Weit verbreitet in Gedächtnistests (Wiedererkennen, freier Abruf; Fiveable, n.d.), Entscheidungsaufgaben (Magd et al., 2024), Kategorisierungsaufgaben und Aufgaben zur Reaktionsinhibition (Neubauer et al., 2024). 3.2.2. Geschwindigkeitsbasierte Maße Diese erfassen die Schnelligkeit der Informationsverarbeitung oder Reaktion. Reaktionszeit (Reaction Time, RT): Gemessen in Millisekunden (ms) (Kłoda et al., 2022). Unterschieden werden einfache RT (ein Stimulus, eine Reaktion), Wahl-RT (mehrere Stimuli/Reaktionen) und Go/No-Go-RT (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). RT ist ein fundamentaler Indikator kognitiver Leistungsfähigkeit (Pison, n.d.). Verarbeitungsgeschwindigkeit: Zeit, die zur Bearbeitung einer Aufgabe oder eines Aufgabenteils benötigt wird. Reaktionszeitvariabilität (Intraindividuelle Variabilität, IIV): Schwankungen der RT einer Person über mehrere Durchgänge hinweg. Gemessen z.B. durch Standardabweichung (SD) der RT oder Variationskoeffizient (CV) (Hülür et al., 2020). Erhöhte IIV wird mit kognitiver Instabilität, geringerer kognitiver Kontrolle und neurologischen Beeinträchtigungen in Verbindung gebracht (Hülür et al., 2020). RT-basierte IIV scheint oft sensitiver zu sein als genauigkeitsbasierte IIV (Tse et al., 2018). 3.2.3. Kombinierte Maße Diese versuchen, Geschwindigkeit und Genauigkeit zu integrieren. Effizienzmaße: Z.B. Verhältnis von Genauigkeit zu RT. Inverse Effizienz-Scores (IES): RT geteilt durch Genauigkeit; höhere Werte bedeuten geringere Effizienz. 3.2.4. Aufgabenspezifische Metriken Viele kognitive Tests haben spezifische Leistungsindikatoren: Arbeitsgedächtnis: Gedächtnisspanne (z.B. Anzahl korrekt erinnerter Ziffern/Wörter; Reading Span; National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2015), Leistung in N-Back-Aufgaben (Genauigkeit, RT; Cacioppo & Petty, 1982), Genauigkeit bei Veränderungsdetektionsaufgaben (Chen et al., 2024). Aufmerksamkeit/Vigilanz: Psychomotor Vigilance Task (PVT) misst RT und Aufmerksamkeitslücken (Lapses) (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Sustained Attention to Response Task (SART) erfasst Kommissionsfehler und RT (Neubauer et al., 2024). Exekutive Kontrolle: Stroop-Test misst Interferenz (RT-Differenz inkongruent vs. kongruent/neutral), Fehler (Kłoda et al., 2022). Flanker-Aufgabe misst ähnliche Interferenz-Effekte. Aufgabenwechsel-Paradigmen messen Wechselkosten (RT-Verlängerung beim Aufgabenwechsel). Lernen: Lerngeschwindigkeit, Leistungsverbesserung über die Zeit (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Problemlösen/Schlussfolgern: Korrektheit der Lösung, Lösungszeit (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Die Wahl des Leistungsmaßes hat erhebliche Auswirkungen darauf, wie sich die Beziehung zur kognitiven Anstrengung darstellt. Unterschiedliche Maße erfassen unterschiedliche Facetten der Kognition (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.). Anstrengung könnte sich unter bestimmten Bedingungen primär auf die Geschwindigkeit auswirken (Kłoda et al., 2022), unter anderen auf die Genauigkeit oder auf die Konsistenz der Leistung (Variabilität; Hülür et al., 2020). Zudem unterscheiden sich Aufgaben darin, welche kognitiven Funktionen sie primär beanspruchen (Schmidt et al., 2013). Daher kann die beobachtete Anstrengungs-Leistungs-Beziehung stark davon abhängen, wie Leistung gemessen wird und welche Art von Aufgabe verwendet wird. Beispielsweise könnten RT-basierte Maße sensibler für subtile Veränderungen oder IIV sein als reine Genauigkeitsmaße (Tse et al., 2018). Beim Vergleich von Studien ist daher eine genaue Betrachtung der verwendeten Leistungsmetriken unerlässlich. 3.3. Tabelle: Gängige Operationalisierungen und Messmethoden

Konstrukt Kategorie Spezifische Methode/Maß Kerninformation Stärken Schwächen Repräsentative Zitate Kognitive Anstrengung Subjektiv NASA-TLX (Effort-Skala) Wahrgenommene Anstrengung (multidimensional) Etabliert, einfach, erfasst subjektives Erleben Subjektiv, anfällig für Bias, retrospektiv (Charles & Nixon, 2019)

Subjektiv Likert-/VAS-Skalen Wahrgenommene Anstrengung (eindimensional) Sehr einfach, momentan erfassbar Subjektiv, Skaleninterpretation (Neubauer et al., 2024)

Physiologisch Pupillometrie (Pupillendurchmesser, TERP) ANS-Aktivität, Arousal, kognitive Last Objektiv, hohe zeitl. Auflösung, sensitiv Lichtempfindlich, unspezifisch (Arousal) (Cho et al., 2022)

Physiologisch Kardiovaskulär (HR, HRV, SBP) ANS-Aktivität, Coping-Anstrengung Objektiv, etabliert (SBP für MIT) Beeinflusst durch physische Aktivität, Emotionen (Fu et al., 2021)

Physiologisch EEG (Frequenzanalyse, EKP, Skaleninvarianz) ZNS-Aktivität, kortikale Prozesse Sehr hohe zeitl. Auflösung, direktes Hirnmaß Begrenzte räuml. Auflösung, artefaktanfällig (Fu et al., 2021)

Physiologisch fMRT (BOLD-Signal) ZNS-Aktivität, Lokalisierung von Hirnregionen Hohe räuml. Auflösung Geringe zeitl. Auflösung, teuer, restriktiv (Di Nota et al., 2022)

Physiologisch fNIRS ZNS-Aktivität (Blutoxygenierung) Guter Kompromiss räuml./zeitl. Auflösung, portabel Misst nur kortikale Aktivität, indirekt (Zhang et al., 2023)

Verhaltensbasiert Wahlverhalten (Demand Selection, Effort Discounting) Subjektive Kosten/Wert der Anstrengung Direkte Quantifizierung der Anstrengungskosten Indirekt, erfordert spezifische Paradigmen (Kahneman, 1973) Kognitive Leistung Genauigkeit % Korrekt, Fehlerrate, d' Korrektheit, Qualität der Verarbeitung Direkte Erfolgsmessung Deckeneffekte, unempfindlich bei einfachen Aufgaben (Neubauer et al., 2024)

Geschwindigkeit Reaktionszeit (RT) Verarbeitungsgeschwindigkeit, Effizienz Sensitiv, kontinuierlich, etabliert Kann durch Strategien beeinflusst werden (Speed-Accuracy Tradeoff) (Hülür et al., 2020)

Geschwindigkeit RT-Variabilität (IIV) Konsistenz der Leistung, kognitive Stabilität Sensitiver Indikator für kognitive Funktion/Dysfunktion Erfordert viele Trials, Interpretation komplex (Hülür et al., 2020)

Aufgabenspezifisch Arbeitsgedächtnisspanne, N-Back-Leistung, PVT-Lapses etc. Leistung in spezifischen kognitiven Domänen Gezielte Messung spezifischer Funktionen Ergebnisse nicht immer generalisierbar (Human Performance Resources by CHAMP, n.d.)

IV. Die Anstrengungs-Leistungs-Beziehung: Linearität und Nicht-Linearität Die zentrale Frage betrifft die Form des Zusammenhangs zwischen dem Grad der investierten kognitiven Anstrengung und dem resultierenden Leistungsniveau. Ist die Beziehung linear – führt mehr Anstrengung immer zu besserer Leistung – oder gibt es komplexere, nicht-lineare Muster? 4.1. Die lineare Hypothese: Mehr Anstrengung, bessere Leistung? Die intuitive Annahme, dass höhere Anstrengung zu besseren Ergebnissen führt, findet in einigen theoretischen Ansätzen und empirischen Befunden Unterstützung, zumindest innerhalb bestimmter Grenzen. Theoretische Grundlagen: Ressourcenmodelle implizieren oft, dass die Zuweisung von mehr kognitiven Ressourcen (Anstrengung) die Leistung bei ressourcenlimitierten Aufgaben verbessert, solange die Kapazitätsgrenzen nicht erreicht sind (Westbrook & Braver, 2015). Viele Motivationstheorien gehen davon aus, dass Anstrengung mit der Stärke eines Motivs oder der Wichtigkeit eines Ziels zunimmt, was wiederum zu besseren Ergebnissen führt (Gendolla & Richter, 2010). Die EVC-Theorie postuliert, dass Anstrengung (Kontrollallokation) erhöht wird, wenn der erwartete Nutzen die Kosten übersteigt (Shenhav et al., 2013). Auch die Cognitive Load Theory (CLT) sieht in der "germanen" kognitiven Belastung eine Form produktiver Anstrengung, die für tiefgreifendes Lernen notwendig ist (Xu et al., 2024). Empirische Evidenz: Zahlreiche Studien zeigen Leistungsverbesserungen (z.B. höhere Genauigkeit, schnellere Reaktionszeiten) bei steigenden Aufgabenanforderungen oder durch Anreize, die vermutlich die Anstrengung erhöhen (Magd et al., 2024). Neuroimaging-Studien belegen oft eine erhöhte Aktivität in exekutiven Kontrollnetzwerken (ECN) bei höherer Arbeitsgedächtnislast oder Aufgabenschwierigkeit, was zumindest bis zu einem gewissen Punkt mit aufrechterhaltener oder verbesserter Leistung einhergeht (Di Nota et al., 2022). Die Motivation Intensity Theory (MIT) sagt einen linearen Anstieg der Anstrengung mit der wahrgenommenen Schwierigkeit voraus, allerdings nur solange Erfolg als möglich und lohnend erscheint (Gendolla & Richter, 2010). Dies impliziert eine lineare Beziehung innerhalb eines bestimmten Bereichs von Schwierigkeit und Motivation. Grenzen der Linearität: Die Annahme einer rein linearen Beziehung ist jedoch begrenzt. Sie gilt oft nur in einem moderaten Bereich von Aufgabenanforderungen oder individuellen Fähigkeiten und kann Effekte von Überlastung, Ermüdung oder fehlgeleiteter Anstrengung nicht erklären. 4.2. Nicht-Linearität: Die invertierte U-Kurve und optimale Anstrengung Die Vorstellung, dass "mehr" nicht immer "besser" ist, wird durch nicht-lineare Modelle beschrieben, insbesondere durch die invertierte U-förmige Beziehung. Das Yerkes-Dodson-Gesetz (YDL): Beschreibung: Dieses fast schon sprichwörtliche Gesetz besagt, dass die Leistung mit steigender Erregung (Arousal) oder Motivation bis zu einem optimalen Punkt zunimmt und danach wieder abfällt (Diamond et al., 2007). Entscheidend ist die Interaktion mit der Aufgabenschwierigkeit: Das optimale Erregungsniveau ist bei schwierigen Aufgaben niedriger als bei einfachen Aufgaben (Diamond et al., 2007). Bei einfachen Aufgaben kann der Zusammenhang auch linear positiv sein, während er bei schwierigen Aufgaben die typische invertierte U-Form annimmt (Lupien et al., 2009). Relevanz und Kritik: Das YDL wird häufig herangezogen, um die Auswirkungen von Stress, Erregung und Motivation auf die Leistung zu erklären (Yerkes & Dodson, 1908). Es verdeutlicht, dass sowohl Unter- als auch Übermotivation bzw. -erregung suboptimal sein können. Kritiker weisen jedoch darauf hin, dass das Gesetz oft übervereinfacht oder falsch interpretiert wird (Diamond et al., 2007). Moderne Ansätze betonen die Notwendigkeit, Interaktionen mit Aufgabenmerkmalen und individuellen Unterschieden zu berücksichtigen (Lupien et al., 2009). Einige Modelle postulieren sogar separate lineare und invertierte U-Beziehungen für unterschiedliche Komponenten der Angst (kognitiv vs. somatisch; Martens et al., 1990). Evidenz für invertierte U-Beziehungen: Motivation Intensity Theory (MIT): Wie bereits erwähnt, sagt MIT voraus, dass die Anstrengung mit der Schwierigkeit steigt, aber bei zu hoher (unmögliche oder ungerechtfertigte) Schwierigkeit abrupt abfällt (Disengagement; Gendolla & Richter, 2010). Dies beschreibt eine spezifische Form der Nicht-Linearität (Anstieg gefolgt von Abfall). Leistung vs. Schwierigkeit/Stress/Anreize: Empirische Studien finden Belege dafür, dass die Leistung bei moderaten Niveaus von Aufgabenschwierigkeit, Stress oder Anreizen am höchsten ist und bei sehr niedrigen oder sehr hohen Niveaus sinkt (Player et al., 2024). Konfliktadaption: Die Fähigkeit, kognitive Kontrolle nach erlebten Konflikten anzupassen (eine Form anstrengungsbasierter Adaption), scheint einer invertierten U-Kurve zu folgen: Sie ist bei niedriger bis moderater Aufgabenschwierigkeit vorhanden, fehlt aber oder kehrt sich bei hoher Schwierigkeit um (van Steenbergen et al., 2015). Chronischer Stress: Eine Studie fand eine invertierte U-Beziehung zwischen dem Ausmaß chronischen Stresses (gemessen mit dem PSS) und Indikatoren der Motivation zur Anstrengung (Akzeptanzrate von Anstrengungsangeboten, Drift-Rate im Entscheidungsmodell, neuronale Belohnungsreaktion ΔRewP; Player et al., 2024). Sowohl niedriger als auch hoher chronischer Stress waren mit geringerer Motivation assoziiert als moderater Stress. Kognitive Nähe (Expertise): Bei Bewertungsaufgaben zeigte die Entscheidungsqualität eine invertierte U-Beziehung zur kognitiven Nähe (Vertrautheit/Expertise) des Bewerters (Scherngell et al., 2021). Sowohl zu geringe als auch zu hohe Expertise führten zu schlechteren Entscheidungen als moderate Expertise. Die Evidenz deutet stark darauf hin, dass die Beziehung zwischen Anstrengung (bzw. den sie beeinflussenden Faktoren wie Schwierigkeit, Erregung, Motivation) und Leistung fundamental nicht-linear ist, insbesondere wenn die Anforderungen hoch sind oder über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden müssen. Die häufig beobachtete invertierte U-Form (Gendolla & Richter, 2010) legt ein allgemeines Prinzip nahe: Kognitive Systeme operieren in optimalen Bereichen. Eine Abweichung von diesem Optimum – sei es durch zu geringe oder zu hohe Anstrengung, Anforderung oder Erregung – führt zu Leistungseinbußen. Lineare Zusammenhänge, die in manchen Studien berichtet werden, könnten lediglich einen Ausschnitt dieser umfassenderen nicht-linearen Funktion darstellen. Dies impliziert, dass einfache Annahmen ("mehr Anstrengung = bessere Leistung") unzureichend sind und das Verständnis des optimalen Anstrengungsniveaus für eine gegebene Aufgabe und Person entscheidend ist. 4.3. Leistungsabfall: Überlastung, Ermüdung und "Choking" Die nicht-lineare Beziehung manifestiert sich besonders deutlich in Phänomenen, bei denen erhöhte Anstrengung oder Anforderungen zu einer Leistungsverschlechterung führen. Kognitive Überlastung (Cognitive Overload): Definition: Tritt auf, wenn die Anforderungen einer Aufgabe die verfügbaren Verarbeitungskapazitäten, insbesondere des Arbeitsgedächtnisses, übersteigen (Xu et al., 2024). Folgen: Führt zu einem Abfall der Leistung (Genauigkeit, Geschwindigkeit; Charles & Nixon, 2019), Schwierigkeiten bei der Konzentration und Informationsaufnahme (Enophones, 2023). Hohe Aufgabenkomplexität ist eine häufige Ursache (Magd et al., 2024). Physiologische Marker wie eine verringerte Pupillenreaktion auf Konflikte können Überlastung anzeigen (van Steenbergen et al., 2015). Stress kann das Risiko einer Überlastung erhöhen, da er das Arbeitsgedächtnis beeinträchtigt (Yang et al., 2023). Mentale Ermüdung (Mental Fatigue): Definition: Ein psychobiologischer Zustand, der durch anhaltende, anspruchsvolle kognitive Aktivität verursacht wird (Englert, 2018). Gekennzeichnet durch subjektive Gefühle von Müdigkeit, Energiemangel und reduzierter Motivation (Wang et al., 2024). Abzugrenzen von Schläfrigkeit oder rein physischer Erschöpfung, obwohl Zusammenhänge bestehen (Englert, 2018). Auswirkungen: Beeinträchtigt nachfolgende kognitive Leistungen (Aufmerksamkeit, Gedächtnis, Entscheidungsfindung, Reaktionszeit; Yang et al., 2023), erhöht die Fehleranfälligkeit (Yang et al., 2023), reduziert die Effizienz (Yang et al., 2023) und kann auch die physische Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen (van Cutsem et al., 2017). Letzterer Punkt ist jedoch nicht unumstritten; einige Studien finden keinen Effekt auf nachfolgende physische Ausdauer (Brown et al., 2020). Mechanismen (Debatte): Ressourcenerschöpfung (Resource Depletion): Die klassische Sichtweise postuliert, dass anstrengende kognitive Kontrolle auf begrenzte Ressourcen (z.B. Glukose, Neurotransmitter, neuronale Konnektivität) zurückgreift, die sich bei längerer Nutzung erschöpfen (Englert, 2018). Kritikpunkte sind der Mangel an eindeutigen biologischen Substraten für die "Ressource" und die Schwierigkeit, motivationale Einflüsse zu erklären (Westbrook & Braver, 2015). Neuere Ansätze schlagen eine Abschwächung der neuronalen Netzwerkkonnektivität als "Ressource" vor (Shenhav et al., 2019). Motivationale Verschiebung / Kostenakkumulation: Eine alternative Sichtweise betrachtet Ermüdung als subjektives Signal oder Gefühl, das anzeigt, dass die fortgesetzte Aktivität die anfallenden Kosten (Anstrengung) nicht mehr wert ist (Wang et al., 2024). Die wahrgenommene Anstrengung steigt, was zu einer Reduzierung der Motivation und schließlich zum Disengagement führt. Dies passt zu Kosten-Nutzen-Modellen. Unterlastungs-Theorie (Underload Theory): Ermüdung bei einfachen, repetitiven Aufgaben wird auf Langeweile, negativen Affekt und reduziertes Engagement zurückgeführt (Wang et al., 2024). Weniger relevant für hoch anspruchsvolle Aufgaben. Neuronale Abfallentsorgung (Neural Waste Disposal): Ansammlung von Stoffwechselprodukten im Gehirn (Wang et al., 2024). Neuronale Korrelate: Veränderte Aktivität in präfrontalen Regionen (insb. ACC), DMN und SN (Di Nota et al., 2022). Zunahme frontaler Theta-Oszillationen im EEG (Enophones, 2023). "Choking under Pressure" (Versagen unter Druck): Definition: Suboptimale Leistung in einer Drucksituation trotz vorhandener Fähigkeiten und Motivation, gute Leistung zu erbringen (Baumeister, 1984). Abzugrenzen von Panik (irrationales Denken), "Yips" (fokale Dystonie) oder Leistungstiefs (längere Perioden schlechter Leistung; Baumeister, 1984). Druckquellen sind z.B. Bewertung durch andere, Belohnungen/Bestrafungen, Wettbewerb, Zeitdruck (Gucciardi et al., 2024). Mechanismen (Debatte): Distraktions-Theorien (Distraction Theories): Druck lenkt die Aufmerksamkeit auf aufgabenirrelevante Reize (z.B. Sorgen über Konsequenzen, Lärm), wodurch kognitive Ressourcen (insbesondere Arbeitsgedächtnis) von der eigentlichen Aufgabe abgezogen werden (Chib et al., 2014). Besonders schädlich für Aufgaben, die stark vom Arbeitsgedächtnis und von Aufmerksamkeitskontrolle abhängen (Chib et al., 2014). Neuroimaging-Befunde stützen die Beteiligung von Motivations- und Aufmerksamkeitsnetzwerken (Chib et al., 2014). Explizite Überwachungs- / Selbstfokus-Theorien (Explicit Monitoring / Self-Focus Theories): Druck erhöht das Selbstbewusstsein und führt dazu, dass Personen versuchen, normalerweise automatisch ablaufende, prozeduralisierte Fähigkeiten bewusst zu überwachen und zu kontrollieren. Dies stört den flüssigen Ablauf der Fertigkeit (Baumeister, 1984). Es kommt zu einem "Reinvestment" expliziten Wissens (Beilock & Carr, 2001). Besonders schädlich für gut gelernte motorische Fertigkeiten oder Aufgaben, die auf implizitem/prozeduralem Wissen basieren (Studer-Luethi et al., 2021). Übererregungs-Theorien (Over-Arousal Theories): Exzessive physiologische Erregung, induziert durch Druck, stört die Leistung, oft im Sinne des YDL (Baumeister, 1984). Interaktion der Mechanismen: Distraktion und explizite Überwachung können gleichzeitig auftreten (Chib et al., 2014). Welcher Mechanismus dominiert, hängt vermutlich von der Art der Aufgabe (kognitiv vs. motorisch), dem Fähigkeitsniveau des Ausführenden (Chib et al., 2014) und der Art des Drucks ab (z.B. Ergebnisdruck vs. Beobachtungsdruck; DeCaro et al., 2011). Obwohl Überlastung, Ermüdung und Choking unterschiedliche Ursachen und Verläufe haben, weisen sie eine gemeinsame Schnittmenge auf: die Störung kognitiver Kontroll- und Aufmerksamkeitsprozesse. Überlastung strapaziert direkt die Kontrollkapazität (Xu et al., 2024). Ermüdung kann die Fähigkeit oder die Bereitschaft zur Kontrollausübung reduzieren (Englert, 2018). Choking beinhaltet eine Fehlleitung der Aufmerksamkeit und Kontrolle – entweder wird sie von der Aufgabe abgelenkt oder falsch angewendet (explizite Überwachung; Chib et al., 2014). Dies unterstreicht die zentrale Rolle von Aufmerksamkeits- und Kontrollmechanismen für die Aufrechterhaltung der Leistung unter anspruchsvollen Bedingungen und legt nahe, dass Interventionen zur Vermeidung von Leistungsabfall spezifisch am jeweiligen Mechanismus ansetzen müssen. V. Moderierende Faktoren der Anstrengungs-Leistungs-Beziehung Die Beziehung zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung ist nicht fix, sondern wird durch eine Vielzahl von Faktoren beeinflusst. Diese Moderatoren bestimmen, wie effektiv investierte Anstrengung in Leistung umgesetzt wird und wo die optimalen Anstrengungsniveaus liegen. Sie lassen sich grob in Aufgabenmerkmale, individuelle Unterschiede und Kontextfaktoren unterteilen. 5.1. Aufgabenmerkmale Aufgabenkomplexität/-schwierigkeit: Definition und Messung: Komplexität kann objektiv definiert werden durch Merkmale wie die Anzahl der Elemente, ihre Interaktionen, die Anzahl der Schritte oder das Ausmaß an Unsicherheit (Magd et al., 2024). Die subjektive Wahrnehmung der Schwierigkeit ist ebenfalls entscheidend (Magd et al., 2024). Auswirkungen: Generell erfordert höhere Komplexität mehr Anstrengung (Adjei et al., 2024) und führt oft zu schlechterer Leistung (geringere Genauigkeit, längere Bearbeitungszeit, geringere funktionale Angemessenheit; Magd et al., 2024), insbesondere jenseits eines optimalen Punktes (invertierte U-Kurve; van Steenbergen et al., 2015). Komplexität erhöht die kognitive Belastung (Adjei et al., 2024). Allerdings kann Komplexität unter bestimmten Umständen auch positive Effekte haben, z.B. die Motivation bei repetitiven Aufgaben steigern (Magd et al., 2024) oder tiefere Verarbeitung und Lernprozesse (germane Last) fördern, wenn sie angemessen gestaltet ist (Adjei et al., 2024). Die Richtung des Zusammenhangs zwischen Komplexität und Leistung ist daher nicht eindeutig und wird in der Literatur unterschiedlich berichtet (negativ, positiv, nicht-linear; Magd et al., 2024). Ältere Erwachsene sind oft stärker von Aufgabenkomplexität betroffen (Hess & Ennis, 2012). Interaktionen: Die Effekte der Komplexität hängen stark von der Expertise (Adjei et al., 2024), der Selbstwirksamkeit (Wen et al., 2022) und den verfügbaren Ressourcen der Person ab. Aufgabentyp: Ressourcenlimitiert vs. Datenlimitiert: Anstrengung verbessert die Leistung primär bei ressourcenlimitierten Aufgaben, bei denen mehr Ressourceneinsatz zu besseren Ergebnissen führen kann (Westbrook & Braver, 2015). Kognitive Domäne: Die Anstrengungs-Leistungs-Beziehung kann sich unterscheiden, je nachdem, ob eine Aufgabe primär das Arbeitsgedächtnis (Kahneman, 1973), die Daueraufmerksamkeit (Fortenbaugh et al., 2021) oder motorische Fertigkeiten (Baumeister, 1984) beansprucht. Auch die Mechanismen des Leistungsversagens (z.B. Choking) sind aufgabentypspezifisch (DeCaro et al., 2011). Neuheit vs. Übung: Mit zunehmender Übung und Automatisierung sinkt der Anstrengungsbedarf für eine Aufgabe (Westbrook & Braver, 2015). Neue Aufgaben erfordern mehr bewusste, anstrengende Verarbeitung (Cacioppo & Petty, 1982). Aufgabendauer: Längere Bearbeitungszeiten führen typischerweise zu Ermüdung und damit zu Leistungsabfall und/oder erhöhter wahrgenommener Anstrengung (Westbrook & Braver, 2015). Die genaue Dauer, die nötig ist, um signifikante Ermüdungseffekte (insbesondere auf nachfolgende physische Leistung) hervorzurufen, ist jedoch Gegenstand von Diskussionen (Brown et al., 2020). 5.2. Individuelle Unterschiede Motivation und Ziele: Potenzielle Motivation (MIT): Die wahrgenommene Wichtigkeit oder der Wert eines Ziels bestimmt die maximale Anstrengung, die eine Person zu investieren bereit ist (Potenzielle Motivation). Dies setzt die Obergrenze für die Anstrengung, die bei steigender Schwierigkeit mobilisiert wird (Gendolla & Richter, 2010). Intrinsische Motivation/Interesse: Hohes Interesse an einer Aufgabe kann die Bereitschaft zur Anstrengung erhöhen und gleichzeitig das Gefühl der Ermüdung reduzieren (Milyavskaya et al., 2021). Interessierte Personen wählen eher anspruchsvollere Aufgaben, auch ohne externe Belohnung (Milyavskaya et al., 2021). Anstrengung selbst kann durch Lernerfahrungen (Belohnung von Anstrengung) einen intrinsischen Wert erhalten (Clay et al., 2022). Need for Cognition (NFC): Personen mit hohem NFC neigen dazu, kognitive Anstrengung zu genießen und suchen aktiv nach anspruchsvollen Aufgaben (Cacioppo & Petty, 1982). NFC korreliert positiv mit der Leistung bei komplexen kognitiven Aufgaben (Westbrook & Braver, 2015). Dieser Zusammenhang könnte durch höhere aufgabenspezifische Selbstwirksamkeit vermittelt sein (Dai et al., 2024). Die Stärke des Zusammenhangs zwischen NFC und Anstrengung könnte jedoch von der allgemeinen Selbstwirksamkeit moderiert werden (Plastizitätshypothese; Woo, 2011). Kognitive Fähigkeiten/Kapazität: Arbeitsgedächtniskapazität (WMC): Eine höhere WMC ermöglicht generell bessere Leistungen unter kognitiver Last. Allerdings könnten Personen mit hoher WMC bei Aufgaben, die stark auf das Arbeitsgedächtnis angewiesen sind, anfälliger für "Choking under Pressure" sein (Chib et al., 2014). Die Anstrengungsallokation interagiert mit der Kapazität; Personen können Anstrengung auch über ihre Kapazitätsgrenze hinaus investieren (was aber nicht zu besserer Leistung führt; Kosciessa et al., 2020). Personen mit höherer Kapazität zeigen möglicherweise eine effizientere neuronale Aktivierung (geringere Aktivität für gleiche Leistung) in bestimmten Netzwerken (z.B. Salience Network; Schmidt et al., 2013). Die Fähigkeit beeinflusst auch die Wahl des Anstrengungsniveaus (Shenhav et al., 2013). Athleten scheinen im Durchschnitt eine leicht höhere WMC als Nicht-Athleten zu haben (Furley et al., 2024). Allgemeine Fähigkeit/Expertise: Höhere Fähigkeit oder Expertise reduziert die für eine bestimmte Aufgabe benötigte Anstrengung (Adjei et al., 2024) und beeinflusst die Wahl der Strategien (Wood & Bandura, 1989). Experten greifen stärker auf automatisierte Prozesse zurück (Vogel et al., 2020). Alter: Anstrengungskosten: Kognitive Aktivität wird im Alter generell als anstrengender und kostspieliger empfunden. Ältere Erwachsene müssen oft mehr Anstrengung aufwenden, um das gleiche Leistungsniveau wie jüngere Erwachsene zu erreichen (Hess & Ennis, 2012). Anstrengungsallokation: Ältere Erwachsene zeigen oft eine höhere physiologische Anstrengungsreaktion (z.B. SBP) bei niedriger bis moderater Schwierigkeit, neigen aber dazu, bei sehr hoher Schwierigkeit früher zu disengagieren (Anstrengung zurückzuziehen; Hess & Ennis, 2012). Ihre Anstrengungsbereitschaft hängt stärker von der wahrgenommenen Wichtigkeit der Aufgabe ab (Hess & Ennis, 2012). Sie verfolgen möglicherweise vorsichtigere Strategien (z.B. langsamer, aber genauer in SART-Aufgaben; Fortenbaugh et al., 2021). Motivation in Studien: Es gibt Hinweise, dass ältere Studienteilnehmer oft höher motiviert sind, gute Leistungen zu zeigen, als jüngere (studentische) Teilnehmer, was die Interpretation von Altersvergleichen beeinflussen kann (Ryan & Campbell, 2021). Ermüdungszustand: Vorbestehende mentale oder physische Ermüdung reduziert die Kapazität und die Bereitschaft, weitere Anstrengung zu investieren, und beeinträchtigt somit die Leistung bei nachfolgenden Aufgaben (Westbrook & Braver, 2015). Selbstwirksamkeit (Self-Efficacy): Definition: Die Überzeugung einer Person, fähig zu sein, eine bestimmte Aufgabe erfolgreich auszuführen (Touroutoglou et al., 2021). Beziehung zur Leistung: Generell positiv, aber komplex. Meta-analytische Evidenz deutet darauf hin, dass vergangene Leistung ein stärkerer Prädiktor für Selbstwirksamkeit ist als umgekehrt. Der Einfluss von Selbstwirksamkeit auf zukünftige Leistung ist schwächer und kontextabhängig (Sitzmann & Yeo, 2013). Hohe Selbstwirksamkeit kann zu höheren Zielen und größerer Persistenz führen (Dai et al., 2024), aber gemäß Kontrolltheorien auch zu geringerer Anstrengung, wenn Erfolg als sicher erscheint (Sitzmann & Yeo, 2013). Beziehung zur Anstrengung: Hohe Selbstwirksamkeit ist oft mit einer größeren Bereitschaft zur Anstrengung verbunden, insbesondere bei Schwierigkeiten (Dai et al., 2024). Sie beeinflusst die Wahl von Bewältigungsstrategien (Wood & Bandura, 1989). Aufgabenspezifische Selbstwirksamkeit könnte den Zusammenhang zwischen NFC und Leistung vermitteln (Dai et al., 2024). Allgemeine Selbstwirksamkeit könnte den Zusammenhang zwischen NFC und Anstrengung moderieren (abschwächen; Woo, 2011). Die EVC-Theorie berücksichtigt die wahrgenommene Kontroll- und Leistungswirksamkeit als Faktoren der Anstrengungsentscheidung (Touroutoglou et al., 2021). 5.3. Kontextfaktoren Stress: Akuter Stress: Kann Leistung je nach Aufgabe und Person verbessern oder verschlechtern (vgl. YDL; Lupien et al., 2009). Kann die Vermeidung von kognitiver und physischer Anstrengung erhöhen (Wiedemann et al., 2023). Beeinträchtigt möglicherweise prosoziale Anstrengung stärker als eigennützige Anstrengung (Wiedemann et al., 2023). Führt zu physiologischen (z.B. Cortisolanstieg) und neuronalen Veränderungen (z.B. erhöhte Aktivität im ECN unter Bedrohung; Di Nota et al., 2022). Chronischer Stress: Zeigt möglicherweise eine invertierte U-Beziehung zur Motivation, Anstrengung für Belohnungen zu investieren (Player et al., 2024). Anreize/Belohnungen: Leistungseffekte: Externe Belohnungen (monetär oder nicht-monetär) wirken generell leistungssteigernd, vermutlich durch erhöhte Motivation und Anstrengung (Otto & Daw, 2019). Dieser Effekt kann auch bei Personen mit hoher intrinsischer Motivation auftreten (Eckartz et al., 2024). Nicht-monetäre Belohnungen könnten bei Arbeitsgedächtnisaufgaben effektiver sein als monetäre, möglicherweise weil sie die intrinsische Motivation weniger untergraben (Chen et al., 2024). Effekte auf Anstrengungsbewertung: Belohnungen können den wahrgenommenen Wert anstrengender Aufgaben erhöhen (Cacioppo & Petty, 1982). Die Belohnung von Anstrengung selbst kann deren intrinsischen Wert steigern (Clay et al., 2022). Effort Discounting ist sensitiv gegenüber der Belohnungshöhe (größere Belohnungen werden weniger stark abgewertet; Ostaszewski et al., 2017). Potenzielle negative Effekte: Sehr hohe Anreize können Druck erzeugen und zu Leistungsabfall führen ("Choking"; Saunders et al., 2023). Monetäre Belohnungen können intrinsische Motivation reduzieren (Chen et al., 2024). Feedback: Leistungsrückmeldungen können die motivierenden Effekte von Druck oder Anreizen verstärken (Yerkes & Dodson, 1908). Sozialer Kontext: Die Anwesenheit anderer (insbesondere bei Bewertung oder Wettbewerb) kann den empfundenen Druck erhöhen (Beilock & Carr, 2001). Umgekehrt kann in Gruppenkontexten auch "soziales Faulenzen" (Social Loafing) auftreten, d.h. eine Reduktion der individuellen Anstrengung bei kognitiven Aufgaben (Science.gov, n.d.). Die Vielzahl und Vielfalt der identifizierten Moderatoren unterstreicht die hohe Plastizität und Kontextabhängigkeit der Anstrengungs-Leistungs-Beziehung. Faktoren wie Motivation (Gendolla & Richter, 2010), wahrgenommene Fähigkeiten (Dai et al., 2024), altersbedingte Kosten (Hess & Ennis, 2012), Stresslevel (Player et al., 2024) und das Aufgabendesign (Adjei et al., 2024) formen dynamisch, wie sich investierte Anstrengung in Leistung niederschlägt (oder eben nicht). Diese Formbarkeit erklärt viele scheinbare Widersprüche in der Literatur und macht deutlich, dass eine Vorhersage der Leistung allein aufgrund der Anstrengung (oder umgekehrt) unzuverlässig ist, ohne diese moderierenden Einflüsse zu berücksichtigen. Darüber hinaus interagieren individuelle Unterschiede kritisch mit den Aufgabenanforderungen. Beispielsweise unterscheidet sich die Anstrengungsallokation älterer und jüngerer Erwachsener je nach Aufgabenschwierigkeit (Hess & Ennis, 2012). Personen mit hoher Arbeitsgedächtniskapazität versagen unter Druck eher bei Arbeitsgedächtnis-lastigen Aufgaben (Chib et al., 2014). Selbstwirksamkeit beeinflusst Strategiewahl und Persistenz unterschiedlich je nach Aufgabenkomplexität (Wood & Bandura, 1989). Der Effekt der Aufgabenkomplexität hängt von der Expertise (Adjei et al., 2024) und den Selbstwirksamkeitsüberzeugungen (Wen et al., 2022) ab. Der Zusammenhang zwischen Need for Cognition und Anstrengung wird möglicherweise durch die allgemeine Selbstwirksamkeit moderiert (Woo, 2011). Dies unterstreicht die Notwendigkeit personenzentrierter Ansätze: Ein "One-size-fits-all"-Modell der Anstrengung und Leistung ist unzureichend; der Effekt von Anstrengung hängt entscheidend von der Passung zwischen Person (Fähigkeiten, Eigenschaften, Zustand) und Aufgabe ab. 5.4. Tabelle: Schlüsselmoderatoren der Anstrengungs-Leistungs-Beziehung

Kategorie Moderator Richtung/Art der Moderation Kernbefunde/Mechanismen Repräsentative Zitate Aufgabenmerkmale Komplexität/ Schwierigkeit Erhöht Anstrengungsbedarf; oft negativer Effekt auf Leistung jenseits Optimums (Invertierte U-Kurve); Interaktion mit Expertise/Fähigkeit. Höhere kognitive Last; kann Motivation/Lernen aber auch fördern. (Magd et al., 2024)

Aufgabentyp Effekt von Anstrengung stärker bei ressourcenlimitierten Aufgaben; domänenspezifische Effekte (WM vs. Aufmerksamkeit etc.); Choking-Mechanismen variieren. Beanspruchung unterschiedlicher kognitiver Systeme. (Westbrook & Braver, 2015)

Aufgabendauer Längere Dauer führt zu Ermüdung, erhöht wahrgenommene Anstrengung, verschlechtert Leistung. Ressourcenerschöpfung oder motivationale Verschiebung. (Englert, 2018) Individuelle Unterschiede Motivation (Potenzielle M., Intrinsische M., Interesse, NFC) Höhere Motivation erlaubt/fördert Anstrengung bei höherer Schwierigkeit; Interesse kann Anstrengung angenehmer machen, Ermüdung reduzieren. Setzt Obergrenze für gerechtfertigte Anstrengung (MIT); verändert Kosten-Nutzen-Bewertung; NFC assoziiert mit Freude an Anstrengung. (Gendolla & Richter, 2010)

Kognitive Fähigkeit (WMC, Expertise) Höhere Fähigkeit reduziert Anstrengungsbedarf für gleiche Leistung; beeinflusst Strategiewahl; Interaktion mit Druckeffekten (Choking). Effizientere Verarbeitung; Automatisierung. (Adjei et al., 2024)

Alter Ältere benötigen mehr Anstrengung; höhere Kosten; früheres Disengagement bei hoher Schwierigkeit; stärkere Abhängigkeit von Motivation. Kognitive Effizienz sinkt; Ressourcenbegrenzung; strategische Anpassung. (Hess & Ennis, 2012)

Ermüdung Vorhandene Ermüdung reduziert Bereitschaft/Fähigkeit zu weiterer Anstrengung; verschlechtert Leistung. Reduzierte Ressourcen/Kapazität oder Motivation. (Englert, 2018)

Selbstwirksamkeit (Self-Efficacy) Meist positiv mit Anstrengungsbereitschaft und Leistung assoziiert; vermittelt/moderiert andere Zusammenhänge (z.B. NFC); beeinflusst Zielsetzung, Persistenz, Strategiewahl. Überzeugung eigener Fähigkeiten beeinflusst Motivation und Umgang mit Herausforderungen. (Touroutoglou et al., 2021) Kontextfaktoren Stress (akut, chronisch) Akut: kann Leistung je nach Aufgabe/Person verbessern/verschlechtern (YDL); erhöht Anstrengungsvermeidung. Chronisch: Invertierte U-Beziehung zur Anstrengungsmotivation. Physiologische/neuronale Veränderungen; Beeinflussung von Aufmerksamkeit und Bewertungsprozessen. (Di Nota et al., 2022)

Anreize/ Belohnungen Erhöhen meist Anstrengung und Leistung; können Anstrengung wertvoller machen; sehr hohe Anreize können zu Choking führen; können intrinsische Motivation untergraben. Verändern Kosten-Nutzen-Kalkulation; erhöhen Motivation; erzeugen Druck. (Clay et al., 2022)

Feedback Kann motivierende Effekte von Druck/Anreizen verstärken. Erhöht Salienz von Leistung und Zielen. (Yerkes & Dodson, 1908)

Sozialer Kontext Anwesenheit anderer kann Druck erhöhen (Bewertung, Wettbewerb) oder Anstrengung reduzieren (Social Loafing). Beeinflusst Motivation, Selbstaufmerksamkeit, Verantwortungsdiffusion. (Science.gov, n.d.)

VI. Theoretische Modelle und Erklärungsansätze Um den komplexen Zusammenhang zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung zu erklären, wurden verschiedene theoretische Modelle entwickelt. Diese Modelle unterscheiden sich in ihren Grundannahmen, ihrem Fokus und ihren Vorhersagen. 6.1. Ressourcen- / Kapazitätsmodelle Kernidee: Diese Modelle gehen davon aus, dass kognitive Prozesse auf einer begrenzten Menge an mentalen Ressourcen (z.B. Aufmerksamkeit, Arbeitsgedächtniskapazität, mentale Energie) basieren (Westbrook & Braver, 2015). Kognitive Anstrengung wird als der Prozess der Zuweisung dieser limitierten Ressourcen zu einer Aufgabe verstanden. Die Leistung hängt davon ab, wie viele Ressourcen verfügbar sind und wie effizient sie zugewiesen werden. Annahmen: Die zentralen Annahmen sind die Begrenztheit der Ressourcen und ihre potenzielle Erschöpfbarkeit bei anhaltender Nutzung, was zu Ermüdung und Leistungsabfall führt (Englert, 2018). Aufgaben konkurrieren um dieselben Ressourcen, was Interferenz bei Doppelaufgaben erklärt (Murray, 1999). Vorhersagen: Die Leistung sollte mit zunehmender Ressourcenzuweisung (Anstrengung) steigen, bis die Kapazitätsgrenze erreicht ist. Werden die Anforderungen zu hoch (Überlastung) oder sind die Ressourcen erschöpft (Ermüdung), sinkt die Leistung. Stärken und Schwächen: Diese Modelle sind intuitiv verständlich und erklären grundlegende Phänomene wie Kapazitätsgrenzen und Ermüdungseffekte. Ein Hauptkritikpunkt ist jedoch die oft vage Definition der "Ressource" (Englert, 2018). Einfache biologische Korrelate wie Blutzucker konnten nicht überzeugend als die limitierende Ressource identifiziert werden (Van Cutsem et al., 2017). Zudem fällt es reinen Ressourcenmodellen schwer zu erklären, warum Anstrengung manchmal freiwillig gesucht wird oder wie Motivation Ermüdungseffekte beeinflussen kann (Westbrook & Braver, 2015). Neuere Ansätze versuchen, die Ressource spezifischer zu fassen, z.B. als die Konnektivität neuronaler Netzwerke, die durch intensive Nutzung geschwächt werden kann (Shenhav et al., 2019). 6.2. Motivation Intensity Theory (MIT) Kernidee: Entwickelt von Jack Brehm, fokussiert diese Theorie auf die Determinanten der momentanen Anstrengungsintensität (Gendolla & Richter, 2010). Sie basiert auf dem Prinzip der Ressourcenschonung: Anstrengung wird nur in dem Maße mobilisiert, wie sie (1) notwendig ist, um ein Ziel zu erreichen, und (2) durch den erwarteten Nutzen gerechtfertigt ist (Gendolla et al., 2017). Annahmen: Die entscheidende Determinante für die notwendige Anstrengung ist die wahrgenommene Schwierigkeit der Aufgabe. Die Rechtfertigung der Anstrengung wird durch die potenzielle Motivation bestimmt – das Maximum an Anstrengung, das eine Person aufgrund der Wichtigkeit oder des Werts des Ziels zu investieren bereit ist (Gendolla & Richter, 2010). Anstrengung wird proportional zur wahrgenommenen Schwierigkeit mobilisiert, aber nur solange Erfolg als möglich und die notwendige Anstrengung als gerechtfertigt (d.h. nicht höher als die potenzielle Motivation) angesehen wird (Gendolla & Richter, 2010). Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt (Aufgabe zu schwierig/unmöglich oder Anstrengung übersteigt den Nutzen), wird die Anstrengung zurückgezogen (Disengagement; Gendolla & Richter, 2010). Die Wichtigkeit des Ziels beeinflusst die Anstrengung also nicht direkt, sondern nur indirekt über die Festlegung der Obergrenze (potenzielle Motivation; Gendolla & Richter, 2010). Vorhersagen: Die Theorie sagt eine spezifische nicht-lineare Beziehung zwischen wahrgenommener Schwierigkeit und Anstrengungsintensität voraus: Anstrengung steigt zunächst mit der Schwierigkeit an und fällt dann bei zu hoher Schwierigkeit oder zu geringer potenzieller Motivation abrupt ab (Gendolla & Richter, 2010). Wenn die Schwierigkeit unbekannt ist, sollte die Anstrengung proportional zur potenziellen Motivation (Zielwichtigkeit) sein (Gendolla et al., 2017). Diese Vorhersagen wurden oft mithilfe kardiovaskulärer Maße (insbesondere SBP-Reaktivität) gestützt (Gendolla & Richter, 2010). Stärken und Schwächen: MIT bietet präzise, testbare Vorhersagen über die Anstrengungsallokation in Abhängigkeit von Schwierigkeit und Motivation und erklärt das Phänomen des Disengagements. Der Fokus liegt jedoch primär auf der Mobilisierung von Anstrengung, weniger auf dem subjektiven Erleben oder Langzeiteffekten wie Ermüdung. 6.3. Expected Value of Control (EVC) Theory Kernidee: Dieses von Shenhav, Botvinick, Cohen und Kollegen entwickelte Modell betrachtet die Allokation kognitiver Kontrolle (und damit Anstrengung) als Ergebnis einer Kosten-Nutzen-Analyse (Shenhav et al., 2013). Das Ziel ist die Maximierung des erwarteten Werts der Kontrolle (Expected Value of Control, EVC). Annahmen: Die Ausübung kognitiver Kontrolle wird als inhärent kostspielig angesehen (entspricht kognitiver Anstrengung; Shenhav et al., 2013). Die Entscheidung, wie viel Kontrolle (Anstrengung) investiert wird, basiert auf der Integration von drei Faktoren: (1) dem erwarteten Nutzen (Payoff) einer kontrollierten Handlung, (2) der erwarteten Intensität der Kontrolle, die zur Erzielung dieses Nutzens notwendig ist, und (3) den damit verbundenen Anstrengungskosten (Shenhav et al., 2013). Dem dorsalen anterioren Cingulären Cortex (dACC) wird eine zentrale Rolle bei der Integration dieser Informationen und der Steuerung der Kontrollallokation zugeschrieben (Shenhav et al., 2013). Vorhersagen: Anstrengung wird investiert, wenn der EVC hoch ist. Das Modell kann erklären, warum Menschen manchmal leichtere Aufgaben wählen (hohe Kosten der schweren Aufgabe senken den EVC) oder sich für anspruchsvollere Aufgaben entscheiden (wenn der erwartete Nutzen die Kosten überwiegt). Es kann flexibel erklären, wie Belohnungen, Schwierigkeit und Kosten die Motivation und Kontrollausübung beeinflussen. Erweiterungen wie die Learning EVC (LEVC) Theorie berücksichtigen auch den zukünftigen Wert des Lernens durch Anstrengung (Lieder et al., 2019). Das Modell lässt sich auch auf die Kontrolle habitueller Handlungen anwenden (Frömer et al., 2019) und mit individuellen Unterschieden in der wahrgenommenen Wirksamkeit (Selbstwirksamkeit) verknüpfen (Touroutoglou et al., 2021). Stärken und Schwächen: Bietet einen normativen Rahmen, der Kosten, Nutzen und Kontrollmechanismen integriert. Hat eine starke neurobiologische Fundierung (dACC-Funktion). Erklärt flexible Anstrengungsallokation. Eine Herausforderung bleibt die präzise Definition und Messung der "Kosten" der Kontrolle. Frühe Versionen vernachlässigten den Lernwert, was durch LEVC adressiert wurde (Lieder et al., 2019). 6.4. Cognitive Load Theory (CLT) Kernidee: CLT stammt aus der pädagogischen Psychologie und fokussiert auf die Gestaltung von Lernumgebungen, um die begrenzte Kapazität des Arbeitsgedächtnisses optimal zu nutzen (Vogel et al., 2020). Annahmen: Das Arbeitsgedächtnis hat eine limitierte Kapazität für die Verarbeitung neuer Informationen (Xu et al., 2024). Lernen beinhaltet den Aufbau von Schemata im Langzeitgedächtnis, die dann die Arbeitsgedächtnisbelastung reduzieren (Xu et al., 2024). Die kognitive Gesamtbelastung setzt sich aus drei Komponenten zusammen: (1) Intrinsische Belastung: bedingt durch die Komplexität des Lernmaterials selbst (Anzahl interagierender Elemente). (2) Extrinsische Belastung: verursacht durch suboptimales Instruktionsdesign (z.B. unnötige Informationen, schlechte Darstellung). (3) Germane Belastung: resultiert aus kognitiven Prozessen, die direkt dem Verstehen und Schemabau dienen (produktive Anstrengung; Xu et al., 2024). Die Summe aus intrinsischer und extrinsischer Belastung sollte die Arbeitsgedächtniskapazität nicht übersteigen, um Ressourcen für die germane Belastung freizuhalten. Vorhersagen: Instruktionsdesigns, die extrinsische Belastung minimieren und intrinsische Belastung managen (z.B. durch Zerlegen komplexer Inhalte), fördern das Lernen. Strategien, die germane Belastung anregen (z.B. Selbst-Erklärungen, elaboratives Fragen), verbessern das Verständnis (Xu et al., 2024). Der Expertise-Reversal-Effekt besagt, dass optimale Instruktionen vom Vorwissen des Lernenden abhängen (Adjei et al., 2024). Stärken und Schwächen: Bietet konkrete, empirisch gestützte Richtlinien für die Gestaltung von Lernmaterialien und -umgebungen. Weit verbreitet in der Bildungsforschung und -praxis. Der Fokus liegt jedoch primär auf Lernkontexten; motivationale Aspekte und momentane Anstrengungsschwankungen außerhalb von Instruktionssituationen werden weniger betont. Die operationale Trennung der drei Belastungsarten kann schwierig sein. 6.5. Effort Discounting Modelle Kernidee: Diese Modelle aus der Verhaltensökonomie und Neuroökonomie betrachten Anstrengung als Kostenfaktor, der den subjektiven Wert von zukünftigen oder unsicheren Belohnungen mindert, analog zur Zeit- oder Wahrscheinlichkeitsdiskontierung (Westbrook & Braver, 2015). Annahmen: Der subjektive Wert einer Belohnung sinkt mit steigender erforderlicher Anstrengung. Dieser Abwertungsprozess kann durch mathematische Funktionen beschrieben werden (z.B. hyperbolisch, exponentiell, parabolisch, Potenzfunktion; Ostaszewski et al., 2017). Vorhersagen: Individuen wählen die Option, die nach Abzug der Anstrengungskosten den höchsten subjektiven Wert aufweist. Dies erklärt die häufige Präferenz für weniger anstrengende Optionen. Es gibt interindividuelle Unterschiede in der Stärke der Abwertung (Diskontierungsrate), die mit Persönlichkeitsmerkmalen (z.B. NFC; Cacioppo & Petty, 1982) und klinischen Zuständen (z.B. Apathie, Depression; Ostaszewski et al., 2017) zusammenhängen können. Ähnlich wie bei der Zeitdiskontierung gibt es Magnitude-Effekte: Größere Belohnungen werden tendenziell weniger stark durch Anstrengung abgewertet (Ostaszewski et al., 2017). Die Modelle sind sowohl auf physische als auch auf kognitive Anstrengung anwendbar (Ostaszewski et al., 2017). Stärken und Schwächen: Bieten einen quantitativen Rahmen zur Messung subjektiver Anstrengungskosten. Stellen eine Verbindung zur allgemeinen Entscheidungstheorie her. Die genaue mathematische Form der Abwertungsfunktion ist noch Gegenstand der Forschung; einige Studien deuten darauf hin, dass konkave Funktionen (z.B. Potenzfunktion) die Daten besser beschreiben als die hyperbolische Funktion, die bei der Zeitdiskontierung oft favorisiert wird (Ostaszewski et al., 2017). Die Modelle beschreiben das Phänomen der Abwertung, erklären aber nicht vollständig, warum Anstrengung als kostspielig empfunden wird. 6.6. Theorien zu Ermüdung und Choking Wie in Abschnitt 4.3 detailliert beschrieben, gibt es spezifische Theorien, die sich auf Mechanismen des Leistungsabfalls konzentrieren, wie Ressourcenerschöpfungs- vs. motivationale Modelle der Ermüdung und Distraktions- vs. explizite Überwachungstheorien des Choking. Die Koexistenz dieser unterschiedlichen theoretischen Ansätze spiegelt die Vielschichtigkeit des Phänomens wider. Kein einzelnes Modell kann derzeit alle Aspekte der Anstrengungs-Leistungs-Beziehung umfassend erklären. Ressourcenmodelle betonen die Kapazitätsgrenzen, MIT die motivationalen Schwellenwerte, EVC und Discounting-Modelle die Kosten-Nutzen-Kalkulation, und CLT den spezifischen Kontext des Lernens. Sie bieten eher komplementäre als konkurrierende Perspektiven. EVC liefert beispielsweise einen Rahmen für die Entscheidung zur Ressourcenallokation, während Ressourcenmodelle die Grenzen dieser Ressourcen beschreiben. Ein umfassendes Verständnis erfordert daher wahrscheinlich eine Integration von Einsichten aus mehreren Theorien. Zukünftige Forschung sollte darauf abzielen, diese Modelle stärker zu integrieren und ihre jeweiligen Geltungsbereiche und Interaktionen genauer zu definieren. 6.7. Tabelle: Vergleich der wichtigsten theoretischen Modelle

Theorie Kernkonzept Schlüsselannahmen Hauptvorhersagen (Anstrengung-Leistung) Stärken Schwächen Schlüsselzitate Ressourcen-/ Kapazitätsmodelle Kognition basiert auf limitierten, erschöpfbaren Ressourcen (Aufmerksamkeit, WM, Energie). Anstrengung = Ressourcenzuweisung. Ressourcen sind endlich; Nutzung führt zu Erschöpfung (Ermüdung); Aufgaben konkurrieren um Ressourcen. Leistung steigt mit Anstrengung bis Kapazitätsgrenze; Überlastung/Ermüdung führt zu Leistungsabfall. Intuitiv; erklärt Kapazitätslimits, Ermüdung, Interferenz. Vage Definition der "Ressource"; erklärt schwer Motivationseffekte & Wert von Anstrengung. (Westbrook & Braver, 2015) Motivation Intensity Theory (MIT) Momentane Anstrengung wird durch wahrgenommene Schwierigkeit & potenzielle Motivation (Zielwert) bestimmt; basiert auf Ressourcenschonung. Anstrengung ~ Schwierigkeit, wenn Erfolg möglich & gerechtfertigt; sonst Disengagement; Zielwert setzt Obergrenze (pot. Motivation). Invertierte U-Beziehung zwischen Schwierigkeit & Anstrengung (Anstieg, dann Abfall); Anstrengung ~ Zielwert nur bei unklarer Schwierigkeit. Präzise Vorhersagen zur Anstrengungsallokation; erklärt Disengagement; empirisch gestützt (kardiovaskulär). Fokus auf Mobilisierung, weniger auf Erleben/Langzeiteffekte. (Gendolla & Richter, 2010) Expected Value of Control (EVC) Theory Kontroll-/Anstrengungsallokation basiert auf Kosten-Nutzen-Analyse zur Maximierung des EVC (Nutzen - Kosten). Kontrolle ist kostspielig (Anstrengung); EVC integriert erwarteten Nutzen, Kontrollintensität, Kosten; dACC zentral für Berechnung/Allokation. Anstrengung wird investiert, wenn EVC hoch; erklärt flexible Wahl zwischen leichten/schweren Aufgaben basierend auf Belohnung/Kosten; kann Lernwert integrieren (LEVC). Normativer Rahmen; integriert Kosten, Nutzen, Kontrolle; starke neurobiol. Basis; erklärt flexible Allokation. Kostenmessung schwierig; frühe Modelle ohne Lernwert. (Shenhav et al., 2013) Cognitive Load Theory (CLT) Optimierung von Instruktion durch Management limitierter WM-Kapazität; Fokus auf Lernen. WM limitiert; Lernen = Schemabau im LZG; 3 Load-Typen (intrinsisch, extrinsisch, german); ICL+ECL ≤ Kapazität; GCL ist produktive Anstrengung. Leistung (Lernen) optimal, wenn ECL minimiert, ICL gemanagt & GCL gefördert wird; Expertise-Reversal-Effekt. Konkrete Instruktionsrichtlinien; breite Anwendung in Pädagogik. Fokus auf Lernkontexte; weniger auf Motivation/momentane Anstrengung außerhalb Instruktion. (Vogel et al., 2020) Effort Discounting Modelle Anstrengung ist Kostenfaktor, der subjektiven Wert von Belohnungen reduziert (analog zu Zeit-/Wahrscheinlichkeitsdiskontierung). Subjektiver Wert sinkt mit Anstrengung; mathematische Funktionen beschreiben Abwertung; individuelle Unterschiede in Diskontierungsraten. Wahlverhalten maximiert subjektiven Wert nach Abzug der Anstrengungskosten; erklärt Präferenz für geringe Anstrengung; Magnitude-Effekte. Quantitativer Rahmen für Anstrengungskosten; Verbindung zur Entscheidungstheorie; anwendbar auf kognitive/physische Anstrengung. Genaue Funktion unklar; erklärt nicht, warum Anstrengung kostspielig ist. (Westbrook & Braver, 2015)

VII. Synthese, Debatten und zukünftige Richtungen Die umfassende Literaturrecherche offenbart ein komplexes und dynamisches Bild des Zusammenhangs zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung. Eine einfache, lineare Beziehung existiert nur unter bestimmten Bedingungen; generell ist der Zusammenhang nicht-linear und unterliegt dem Einfluss zahlreicher moderierender Faktoren. 7.1. Gesamtsynthese Die zentrale Erkenntnis ist, dass die Beziehung zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung typischerweise einer invertierten U-Kurve folgt oder zumindest durch Kapazitätsgrenzen und Ermüdungseffekte nicht-linear wird. Mehr Anstrengung führt nur bis zu einem gewissen Punkt zu besserer Leistung; darüber hinaus kann sie zu Stagnation oder sogar zu Leistungsabfall durch Überlastung, Ermüdung oder Mechanismen wie "Choking under Pressure" führen. Dieser Zusammenhang wird maßgeblich durch Aufgabenmerkmale (Komplexität, Typ, Dauer), individuelle Unterschiede (Motivation, Fähigkeiten, Alter, Selbstwirksamkeit, Ermüdung) und Kontextfaktoren (Stress, Anreize, Feedback) moduliert. Die Messung beider Konstrukte stellt eine Herausforderung dar. Kognitive Anstrengung wird über subjektive Ratings, eine Reihe physiologischer Indikatoren (Pupillometrie, kardiovaskuläre Maße, EEG, fMRT, fNIRS) und Verhaltensmaße (Wahlverhalten, Persistenz) operationalisiert. Kognitive Leistung wird durch Genauigkeits-, Geschwindigkeits- oder aufgabenspezifische Metriken erfasst. Jede Messmethode hat Vor- und Nachteile, und die Wahl der Operationalisierung beeinflusst die beobachteten Zusammenhänge. Eine multi-modale Erfassung erscheint am vielversprechendsten. Zur Erklärung der Befunde existieren verschiedene theoretische Modelle. Ressourcenmodelle betonen Kapazitätslimits, MIT fokussiert auf motivationale Schwellenwerte für Anstrengung basierend auf Schwierigkeit und Zielwert, EVC und Discounting-Modelle rahmen Anstrengung als Kosten-Nutzen-Entscheidung, und CLT konzentriert sich auf die Optimierung der kognitiven Belastung im Lernkontext. Keine Theorie erklärt das Phänomen allein umfassend, aber ihre Integration – z.B. die EVC-basierte Entscheidung zur Allokation begrenzter Ressourcen (Ressourcenmodelle) unter Berücksichtigung motivationaler Grenzen (MIT) – bietet ein reichhaltigeres Verständnis. Die Forschung bewegt sich zunehmend weg von statischen Modellen hin zu dynamischeren, kontextsensitiven Ansätzen. Es wird immer deutlicher, dass Anstrengungsallokation ein aktiver, adaptiver Prozess ist, der von internen Zuständen, externen Faktoren, Lernerfahrungen und kontinuierlichen Bewertungen von Kosten und Nutzen abhängt. 7.2. Zentrale wissenschaftliche Debatten Mehrere Kernfragen bleiben Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Diskussion: Ist Anstrengung inhärent kostspielig oder potenziell wertvoll? Die traditionelle Sichtweise der Anstrengung als aversiver Kostenfaktor (Clay et al., 2022), die durch Discounting-Befunde gestützt wird (Westbrook & Braver, 2015), steht im Kontrast zu Evidenz, dass Anstrengung unter bestimmten Umständen (z.B. bei Interesse, nach Belohnung von Anstrengung) als wertvoll erlebt oder sogar aktiv gesucht wird (Clay et al., 2022). Die Debatte dreht sich darum, ob der Wert in der Anstrengung selbst liegt oder in den damit assoziierten positiven Ergebnissen (z.B. Kompetenzerleben, Antizipation von Belohnung; Clay et al., 2022). Diese Frage hat fundamentale Implikationen für Motivations- und Entscheidungstheorien. Mechanismen der mentalen Ermüdung: Ressourcenerschöpfung vs. Motivationale Verschiebung? Die klassische Erklärung der Ermüdung durch Erschöpfung einer limitierten Ressource (Englert, 2018) wird zunehmend kritisiert, da die "Ressource" schwer fassbar ist und motivationale Einflüsse schwer zu erklären sind (Westbrook & Braver, 2015). Alternative Modelle betonen Ermüdung als subjektives Signal, das eine Neubewertung der Kosten-Nutzen-Relation anstößt und zu einer Reduktion der Motivation führt, die Anstrengung aufrechtzuerhalten (Wang et al., 2024). Die Idee der Abschwächung neuronaler Netzwerkkonnektivität bietet eine differenziertere Ressourcenperspektive (Shenhav et al., 2019). Mechanismen des "Choking": Distraktion vs. Explizite Überwachung? Es ist umstritten, ob Leistungsversagen unter Druck primär dadurch entsteht, dass die Aufmerksamkeit von der Aufgabe abgelenkt wird (Distraktion; Beilock & Carr, 2001) oder dadurch, dass sie übermäßig und störend auf die Ausführung der Fertigkeit gelenkt wird (explizite Überwachung; Beilock & Carr, 2001). Die Evidenz deutet darauf hin, dass beide Mechanismen relevant sein können, wobei ihre Dominanz von der Art der Aufgabe (kognitiv/arbeitsgedächtnislastig vs. motorisch/prozedural) und der Art des Drucks abhängen könnte (DeCaro et al., 2011). Altersunterschiede: Kognitiver Abbau vs. Motivationale Veränderungen? Sind Leistungsunterschiede im Alter primär auf eine nachlassende kognitive Effizienz zurückzuführen, die höhere Anstrengung erfordert (Hess & Ennis, 2012), oder spielen auch strategische Anpassungen der Motivation, veränderte Zielprioritäten (z.B. gemäß Socioemotional Selectivity Theory; Ryan & Campbell, 2021) und Anstrengungsallokationsstrategien (z.B. erhöhte Vorsicht; Fortenbaugh et al., 2021) eine wesentliche Rolle? Die möglicherweise höhere Motivation älterer Versuchspersonen in Laborsituationen (Ryan & Campbell, 2021) kompliziert die Interpretation zusätzlich. 7.3. Widersprüchliche Befunde und Forschungslücken Trotz erheblicher Fortschritte bleiben einige Bereiche widersprüchlich oder untererforscht: Die Bedingungen, unter denen lineare vs. nicht-lineare Anstrengungs-Leistungs-Zusammenhänge auftreten, sind nicht immer klar, obwohl Moderatoren wie Aufgabenschwierigkeit eine Schlüsselrolle spielen. Die Auswirkungen kognitiver Ermüdung auf die physische Leistung sind inkonsistent. Während Meta-Analysen einen negativen Effekt nahelegen (Brown et al., 2020), finden einzelne Studien keinen Effekt (Brown et al., 2020). Moderatoren wie die Art der physischen Aufgabe (isolierte Muskeln vs. Ganzkörper) könnten hier relevant sein (Giboin et al., 2018). Obwohl Netzwerke wie ECN, SN und DMN konsistent mit Anstrengung und Ermüdung in Verbindung gebracht werden (Di Nota et al., 2022), ist die spezifische Funktion einzelner Regionen (z.B. die genaue Rolle des dACC bei der EVC-Berechnung; Shenhav et al., 2013) und die Rolle von Neurotransmittern (wie Dopamin und Acetylcholin bei der Anstrengungsbewertung und -mobilisierung; Kleinschmidt et al., 2024) noch nicht vollständig geklärt. Die Übertragbarkeit von Laborbefunden (z.B. aus N-Back- oder Discounting-Aufgaben) auf reale Anstrengungsleistungen und -entscheidungen ist oft unklar (ökologische Validität; Kahneman, 1973). Das komplexe Zusammenspiel verschiedener individueller Unterschiede (NFC, Selbstwirksamkeit, WMC, Alter, Persönlichkeit; Studer-Luethi et al., 2021) bei der Vorhersage der Anstrengungsallokation in spezifischen Situationen bedarf weiterer Untersuchung. 7.4. Zukünftige Forschungsrichtungen Aus den Debatten und Lücken ergeben sich wichtige Richtungen für zukünftige Forschung: Theoretische Integration: Entwicklung umfassenderer Modelle, die Ressourcenaspekte, Kosten-Nutzen-Bewertungen und motivationale Faktoren integrieren. Computational Modeling (z.B. Erweiterungen von EVC; Lieder et al., 2019, Reinforcement Learning; Science.gov, n.d.) wird hierbei eine wichtige Rolle spielen. Verbesserte Messung: Weiterentwicklung und Validierung objektiver, nicht-invasiver Maße, die das subjektive Anstrengungserleben reliabel erfassen. Systematischer Einsatz multi-modaler Messansätze zur Triangulation. Anstrengung als Wert vs. Kosten: Gezielte Untersuchung der Bedingungen (Lernhistorie, Kontext, individuelle Denkweisen/Mindsets), unter denen Anstrengung als wertvoll bzw. aversiv erlebt wird. Neurobiologie der Ermüdung: Klärung der neuronalen und neurochemischen Mechanismen mentaler Ermüdung, die über einfache Ressourcenerschöpfungsmodelle hinausgehen. Choking-Mechanismen: Weitere Differenzierung der Interaktion von Distraktion und expliziter Überwachung bei verschiedenen Aufgaben und Fähigkeitsniveaus. Ökologische Validität: Durchführung von Studien in realitätsnäheren Umgebungen, um die Generalisierbarkeit von Laborbefunden zu prüfen. Interventionen: Entwicklung und Evaluation von Interventionen zur Optimierung der Anstrengungsallokation, zum Management von Ermüdung und zur Prävention von Choking, angepasst an spezifische Kontexte und Individuen. Entwicklungsperspektive: Untersuchung der Entwicklung von Anstrengungsbewertung und -allokation über die Lebensspanne. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Forschungsfeld zur kognitiven Anstrengung und Leistung dynamisch ist und sich hin zu komplexeren, kontextabhängigen Modellen bewegt. Die Anerkennung, dass Anstrengung nicht einfach eine lineare Funktion der Anforderung ist, sondern eine adaptive Entscheidung, die von einer Vielzahl interner und externer Faktoren beeinflusst wird, prägt zunehmend die Forschung und Theoriebildung. VIII. Schlüsselpublikationen Die folgende Liste enthält eine Auswahl zentraler Publikationen, die für das Verständnis des Zusammenhangs zwischen kognitiver Anstrengung und Leistung von besonderer Bedeutung sind. Sie umfasst sowohl grundlegende Arbeiten als auch wichtige theoretische Beiträge, Übersichtsarbeiten und neuere empirische Studien oder Meta-Analysen. Die bibliographischen Angaben sind so aufbereitet, dass sie leicht in das APA 7-Format überführt werden können (soweit die Informationen aus den Snippets verfügbar waren). 8.1. Seminare Arbeiten und grundlegende Konzepte (Kahneman, 1973) (Norman & Bobrow, 1975) (Yerkes & Dodson, 1908) (Bandura, 1977) (Cacioppo & Petty, 1982) (Sweller, 1988) 8.2. Wichtige theoretische Rahmenwerke & Übersichtsarbeiten (Brehm & Self, 1989) (Shenhav et al., 2013) (Shenhav et al., 2017) (Sweller et al., 1998) (Westbrook & Braver, 2015) (Inzlicht et al., 2018) (Hockey, 2013) (Baumeister, 1984) (Beilock & Carr, 2001) 8.3. Wichtige Meta-Analysen & neuere empirische Befunde (van Cutsem et al., 2017) (Brown et al., 2020) (Hufton et al., n.d.) (Sitzmann & Yeo, 2013) (Milyavskaya et al., 2021) (Clay et al., 2022) (Ostaszewski et al., 2017) (Hess & Ennis, 2012) (Saunders et al., 2023) (Lieder et al., 2019) (van Steenbergen et al., 2015) (DeCaro et al., 2011) (Anmerkung: Diese Liste basiert primär auf den bereitgestellten Snippets und bekannten Schlüsselwerken. Eine erschöpfende bibliographische Recherche würde weitere relevante Publikationen identifizieren. Die Formatierung ist an APA 7 angelehnt, kann aber aufgrund fehlender Details in den Snippets unvollständig sein.)

Literaturverzeichnis

Adjei, M. B., Li, S., Zhu, G., & Wang, Z. (2024). *Complexity affects performance, cognitive load, and awareness*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/383915256_Complexity_affects_performance_cognitive_load_and_awareness>

Arslanoğlu, E., Özdemir, R. A., & Kocak, S. (2021). Evaluation of cognitive load in team sports: literature review. *BMC Sports Science, Medicine and Rehabilitation*, *13*, 125. [https://doi.org/10.1186/s13102-021-00353-1](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1186/s13102-021-00353-1)

Bandura, A. (1977). Self-efficacy: Toward a unifying theory of behavioral change. *Psychological Review*, *84*(2), 191–215. [https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.191](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1037/0033-295X.84.2.191)

Baumeister, R. F. (1984). Choking under pressure: Self-consciousness and paradoxical effects of incentives on skillful performance. *Journal of Personality and Social Psychology*, *46*(3), 610–620. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.46.3.610>

Beilock, S. L., & Carr, T. H. (2001). On the fragility of skilled performance: What governs choking under pressure? *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(4), 701–725. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.4.701>

Brehm, J. W., & Self, E. A. (1989). The intensity of motivation. *Annual Review of Psychology*, *40*, 109–131. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.40.020189.000545>

Brown, D. M. Y., Graham, J. D., & Innes, K. K. (2020). Effects of Prior Cognitive Exertion on Physical Performance: A Systematic Review and Meta-analysis. *Sports Medicine*, *50*(10), 1799-1819. [https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-2](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1007/s40279-020-01322-2)

Brown, D. M., Bray, S. R., Graham, J. D., & Innes, K. K. (2020). *Prolonged cognitive activity increases perception of fatigue but does not influence perception of effort, affective valence or performance during subsequent isometric endurance exercise*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/343510976_Prolonged_cognitive_activity_increases_perception_of_fatigue_but_does_not_influence_perception_of_effort_affective_valence_or_performance_during_subsequent_isometric_endurance_exercise>

Cacioppo, J. T., & Petty, R. E. (1982). The need for cognition. *Journal of Personality and Social Psychology*, *42*(1), 116–131. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.42.1.116>

Charles, R. L., & Nixon, J. (2019). *Cognitive workload estimation using physiological measures: a review*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/376833135_Cognitive_workload_estimation_using_physiological_measures_a_review>

Chen, T., Yang, T., Zhang, Y., Chen, A., & Hitchman, G. (2024). Evidence for the Beneficial Effect of Reward on Working Memory: A Meta-Analytic Study. *Brain Sciences*, *14*(4), 364. <https://doi.org/10.3390/brainsci14040364>

Chib, V. S., Shimojo, S., & O'Doherty, J. P. (2014). The effects of incentive framing on performance decrement under pressure are mediated by the nucleus accumbens. *The Journal of Neuroscience*, *34*(47), 15646–15655. [https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2801-14.2014](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2801-14.2014)

Cho, M. R., Hallowell, B., & Lee, J. B. (2022). The Unfolding of Cognitive Effort During Sentence Processing: Pupillometric Evidence From People With and Without Aphasia. *American Journal of Speech-Language Pathology*, *31*(3), 1240–1256. [https://doi.org/10.1044/2022\_AJSLP-21-00111](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1044/2022_AJSLP-21-00111)

Clay, G., Korb, F. M., Mlynski, C., Hinvest, N., & Zénon, A. (2022). Rewarding cognitive effort increases the intrinsic value of mental labor. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *119*(6), e2111785119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111785119>

Dai, W., Ma, Z., & Shang, Z. (2024). Yes, I Can: The Interplay of Need for Cognition and Task Confidence in Cognitive Task Performance. *Behavioral Sciences*, *12*(12), 128. [https://doi.org/10.3390/bs12120128](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/bs12120128)

DeCaro, M. S., Thomas, R. D., Albert, N. B., & Beilock, S. L. (2011). Choking under pressure: Multiple routes to skill failure. *Journal of Experimental Psychology: General*, *140*(3), 390–406. [https://doi.org/10.1037/a0023466](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1037/a0023466)

Di Nota, P. M., Baharnoori, M., Anderson, G. S., & Attached, M. (2022). Facing successfully high mental workload and stressors: An fMRI study. *PLoS ONE*, *17*(1), e0261643. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261643>

Diamond, D. M., Campbell, A. M., Park, C. R., Halonen, J., & Zoladz, P. R. (2007). The temporal dynamics model of emotional memory processing: a synthesis on the neurobiological basis of stress-induced amnesia, flashbulb and traumatic memories, and the Yerkes-Dodson law. *Neural Plasticity*, *2007*, 60803. <https://doi.org/10.1155/2007/60803>

Eckartz, K., Heinz, M., & Stracke, R. (2024). The Effect of Incentives in Nonroutine Analytical Team Tasks. *Journal of Political Economy*, *132*(7), 2131-2161. <https://doi.org/10.1086/729443>

Englert, C. (2018). Bridging Exercise Science, Cognitive Psychology, and Medical Practice: Is “Cognitive Fatigue” a Remake of “The Emperor's New Clothes”? *Frontiers in Psychology*, *9*, 1246. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01246>

Enophones. (2023, January 20). *Cognitive Load and Brain Fatigue: How to Train Smarter, Not Harder*. Enophones Blog. <https://getenophone.com/blogs/news/cognitive-load-and-brain-fatigue-how-to-train-smarter-not-harder>

Fiveable. (n.d.). *Cognitive performance*. Fiveable Library. Retrieved April 14, 2025, from <https://library.fiveable.me/key-terms/cognitive-psychology/cognitive-performance>

Fortenbaugh, F. C., DeGutis, J., & Esterman, M. (2021). Age differences in sustained attention tasks: A meta-analysis. *Psychology and Aging*, *36*(8), 877–893. <https://doi.org/10.1037/pag0000649>

Frömer, R., Lin, H., Wolf, K. K. H., Inzlicht, M., & Shenhav, A. (2019). Expected Value of Control and the Motivational Control of Habitual Action. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1812. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01812>

Fu, S., Rigas, I., & Tsaftaris, S. A. (2021). Can EEG Be Adopted as a Neuroscience Reference for Assessing Software Programmers’ Cognitive Load? *Sensors*, *21*(7), 2338. <https://doi.org/10.3390/s21072338>

Furley, P., Bertrams, A., Englert, C., & Memmert, D. (2024). Comparison of working memory performance in athletes and non-athletes: a meta-analysis of behavioural studies. *Memory*, *32*(3), 351-366. <https://doi.org/10.1080/09658211.2024.2423812>

Gendolla, G. H. E., & Richter, M. (2010). *Refining the prediction of effort: Brehm's distinction between potential motivation and motivation intensity*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/280683142_Refining_the_prediction_of_effort_Brehm's_distinction_between_potential_motivation_and_motivation_intensity>

Gendolla, G. H. E., Wright, R. A., & Richter, M. (2017). *Advancing Issues in Motivation Intensity Research: Updated Insights from the Cardiovascular System*. Archive ouverte UNIGE. <https://access.archive-ouverte.unige.ch/access/metadata/b6a49d31-0f10-4762-8b34-7f28eeff0758/download>

Giboin, L. S., Gruber, M., & Martin, A. (2018, December 20). *The effect of ego depletion or mental fatigue on subsequent physical endurance performance: a meta-analysis*. OSF Preprints. [https://doi.org/10.31219/osf.io/mr5pk](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.31219/osf.io/mr5pk)

Gucciardi, D. F., Flood, A., Leong, S., & Ong, C. W. (2024). Mental toughness and choking susceptibility in athletes. *PLoS ONE*, *19*(4), e0298248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0298248>

Hess, T. M., & Ennis, G. E. (2012). Age differences in the effort and costs associated with cognitive activity. *Journals of Gerontology Series B: Psychological Sciences and Social Sciences*, *67*(4), 447–455. <https://doi.org/10.1093/geronb/gbr129>

Hill, D. M., Hanton, S., Matthews, N., & Fleming, S. (2010). *Choking in sport: A review*. ResearchGate. <https://www.researchgate.net/publication/232834289_Choking_in_sport_A_review>

Hockey, G. R. J. (2013). *The psychology of fatigue: Work, effort and control*. Cambridge University Press.

Hufton, J. R., et al. (n.d.). Meta-study on clutch performance. *International Review of Sport & Exercise Psychology*.

Hülür, G., Ram, N., & Willis, S. L. (2020). Heterogeneous Indicators of Cognitive Performance and Performance Variability Across the Lifespan. *Frontiers in Aging Neuroscience*, *12*, 62. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2020.00062>

Human Performance Resources by CHAMP. (n.d.). *Cognitive Performance: What it is and how to boost yours*. HPRC-online.org. Retrieved April 14, 2025, from <https://www.hprc-online.org/mental-fitness/performance-psychology/cognitive-performance-what-it-and-how-boost-yours>

Inzlicht, M., Shenhav, A., & Olivola, C. Y. (2018). The Effort Paradox: Effort Is Both Costly and Valued. *Trends in Cognitive Sciences*, *22*(4), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.01.007>

Kahneman, D. (1973). *Attention and effort*. Prentice-Hall.

Kang, J., & Klingner, T. D. (2024). Cognitive effort assessment through pupillary responses: Insights from multinomial processing tree modeling and neural interconnectivity patterns during mental arithmetic. *Open Journal of Computational Mathematics and Neural Technology*, *1*(1), 1-12. <https://www.ojcmt.net/download/cognitive-effort-assessment-through-pupillary-responses-insights-from-multinomial-processing-tree-14196.pdf>

Kang, J., Zhang, Y., & Li, P. (2024). Investigating mental workload across task modalities: a multimodal analysis using pupillometry. *Ergonomics*, 1–16. [https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2414203](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1080/00140139.2024.2414203)

Kleinschmidt, O., Gilardeau, A., & Giersch, A. (2024). *Cognitive effort and reward. Functional imaging of time on task and the involvement of dopaminergic and cholinergic substrates*. bioRxiv. [https://doi.org/10.1101/2024.12.12.628171v3](https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1101/2024.12.12.628171v3)

Kłoda, M., Duda-Zięba, A., Głąb, M., Wawrzuta, D., Kuśnierz, M., Śledziowska, K., & Drozdz, J. (2022). Diagnostic accuracy of CompCog: reaction time as a screening measure for mild cognitive impairment. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, *22*(1), 208.