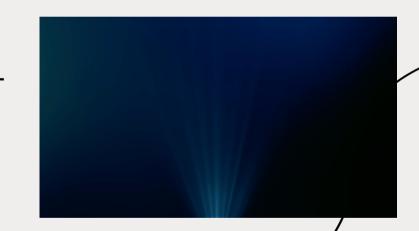


Wie rechnet unser Gehirn?



Stephan E. Vogel



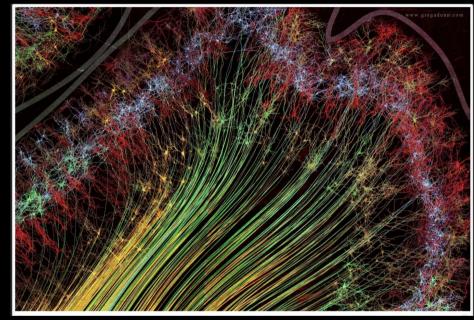
Graz: 08.02.2024



ÜBERBLICK

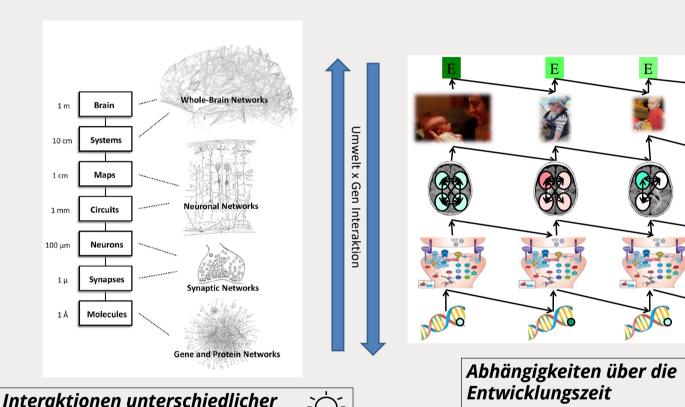
- OI Komplexität des Gehirns
 Mentale Rechenprozesse und
 neurowissenschaftliche Methoden
- O2 Domänenspezifische Prozesse
 Symbolische Repräsentationen über Anzahlen
 und die Rangordnung von Ziffern
- O3 Domänenübergreifende Prozesse Interferenzen, Inhibition und Metakognitive Überwachung
- O4 Allgemeines Fazit
 So rechnet unser Gehirn





Komplexität des Gehirns

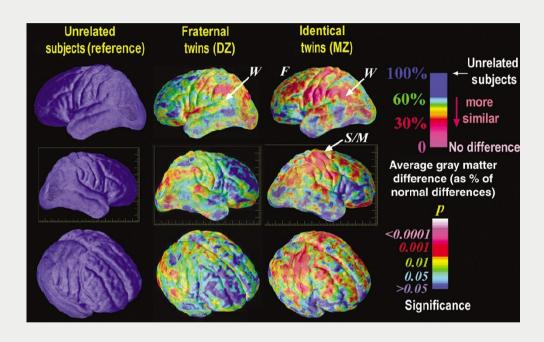




Ebenen.

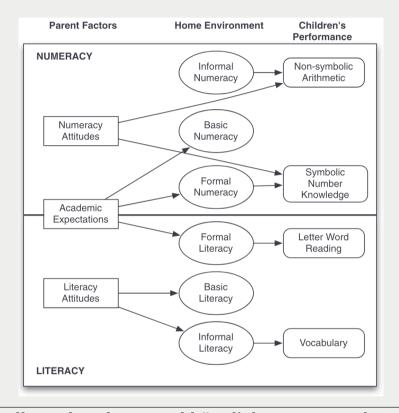
Komplexität des Gehirns





Hohe Ähnlichkeit der Gehirnstruktur zwischen Eineiligen-Zwillingen.





Einstellung der Eltern und häusliche Lernumgebung beinflusst numerische Fertigkeiten



¹ Thompson, P. M., Cannon, T. D., Narr, K. L., van Erp, T., Poutanen, V.-P., Huttunen, M., Lönnqvist, J., Standertskjöld-Nordenstam, C.-G., Kaprio, J., Khaledy, M., Dail, R., Zoumalan, C. I., & Toga, A. W. (2001). Genetic influences on brain structure. *Nature Neuroscience*, 4(12), 1253–1258. https://doi.org/10.1038/nn758

² Skwarchuk, S.-L., Sowinski, C., & LeFevre, J.-A. (2014). Formal and informal home learning activities in relation to children's early numeracy and literacy skills: The development of a home numeracy model. *Journal of Experimental Child Psychology*, 121, 63–84. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.006

Mentale Rechenprozesse

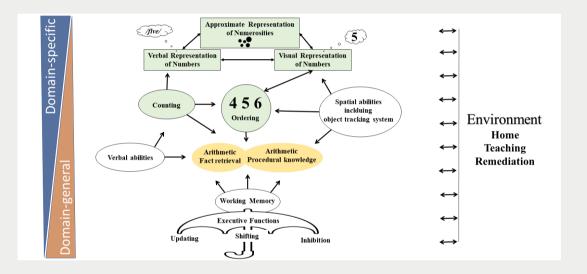


Domänenspezifische Prozesse:

- Verständnis über die Anzahl (nicht-symbolisch)
- Symbolische Repräsentationen von Anzahlen (e.g., Arabische Ziffern, Zahlenwörter)
- Wissen über die Rangordnung (serielle Beziehung zwischen Objekten)
- · Visuelle-räumliche Zahlenvorstellungen

Domänenübergreifende Prozess:

- Arbeitsgedächtnis
- Metakognitive Funktion
 - Überwachung und Kontrolle
- Exekutive Funktionen
 - Inhibition
 - Aktualisierung von Arbeitsgedächtnisinhalten
 - Wechsel des Aufmerksamkeitsfokus
- Visuell-räumliche Vorstellungen im Allgemeinen



¹Peters, L., & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30(November 2016), 265–279.

² Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

³Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitive foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm

Mentale Rechenprozesse



Domänenspezifische Prozesse:

- Symbolische Repräsentationen von Anzahlen (e.g., Arabische Ziffern, Zahlenwörter)
- Wissen über die Rangordnung (serielle Beziehung zwischen Objekten)

Wie verändern sich domänenszpezifische und domänenübergreifende Aktivierungsmuster mit Alter und Expertise?

Bei welchen Aufgaben spielen diese Prozesse eine Rolle?

Wie bilden sich symbolische Repräsentationen (Ziffern, Zahlenwörter, Rangordnung) im Gehirn ab?

Domänenübergreifende Prozess:

- Arbeitsgedächtnis
- Metakognitive Funktion
 - Überwachung und Kontrolle
- Exekutive Funktionen
 - Inhibition
 - Aktualisierung von Arbeitsgedächtnisinhalten
 - · Wechsel des Aufmerksamkeitsfokus
- Visuell-räumliche Vorstellungen im Allgemeiner

Wie hängen Interferenzen beim Konzeptwandel mit Expertise und Inhibition zusammen?

Wie bildet sich metakognitive Überwachung im Gehirn ab und wie ist der Zusammenhang mit konzeptuellen Interferenzen?

¹Peters, L., & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30(November 2016), 265–279.

² Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

³Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitive foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm

Neurowissenschaftliche Methoden





Funktionelle und strukturelle Magnetresonanztomografie (MRT)



Elektroenzephalografie (EEG)



Transkranielle Elektrostimulation (tES)



Neurowissenschaftliche Methoden

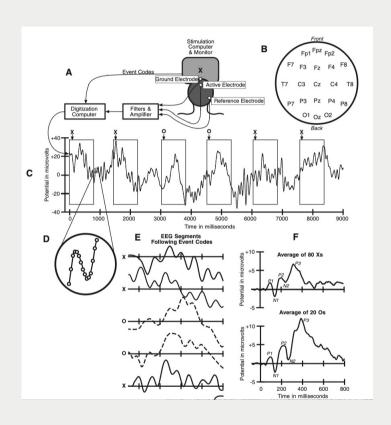




Neurowissenschaftliche Methoden







²Luck, S. J. (2014). *An Introduction to the Event-Related Potential Technique* (2nd edition). A Bradford Book







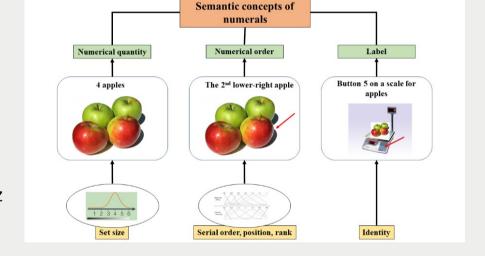
Symbolische Repräsenation von Mengen:

- Anzahl der Objekte
- Assoziation zwischen Symbolen und Mengen



Rangordnung von Ziffern und Zahlen:

- Die serielle Beziehung zwischen Objekten in einer Sequenz
- Wissen über die Position und Rangordnung von Objekten



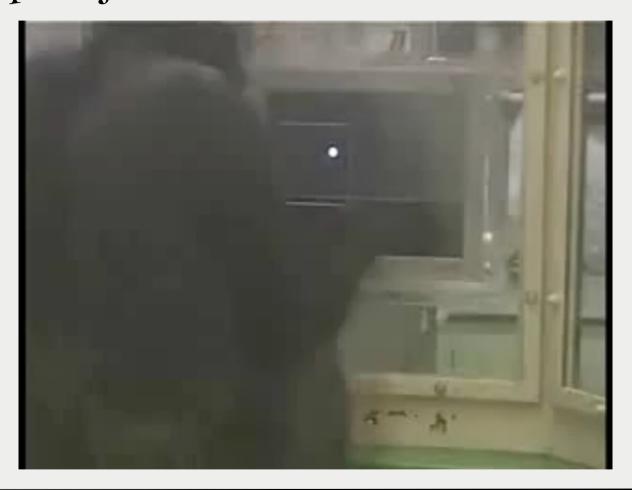
2-3-4

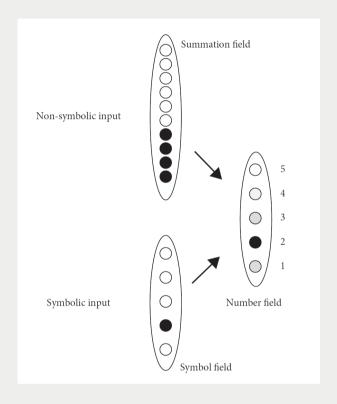
¹ Ansari, D., & Vogel, S. E. (2013). The Oxford Handbook of Cognitive Neuroscience: Cognitive Neuroscience of Numerical Cognition.

² Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. Annual review of neuroscience, 32, 185–208. https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.051508.135550

³ Lyons, I. M., Vogel, S. E., & Ansari, D. (2016). On the ordinality of numbers: A review of neural and behavioural studies. Progress in Brain Research, 227, 187–221. https://doi.org/10.1016/S1099-4831(10)06803-3







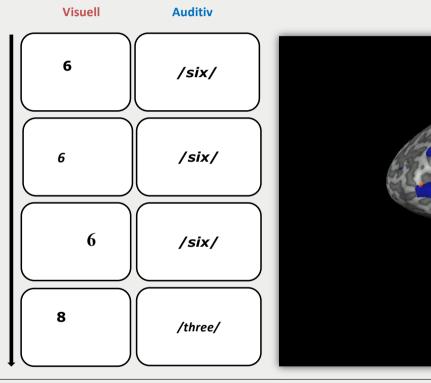
² Verguts, T., & Fias, W. (2004). Representation of number in animals and humans: A neural model. Journal of cognitive neuroscience, 16(9), 1493–504. https://doi.org/10.1162/0898929042568497.



Wie bilden sich unterschiedliche Formate (Ziffern, Zahlenwörter) im Gehirn ab?

Versuchspersonen:

34 Erwachsene (22.84 Jahre)



Formatspezifische Aktivierungsmuster konvergieren in zentralen Bereich des numerischen Verständnisses.

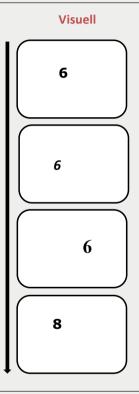




Wie bilden verändert sich die symbolische Repräsentation mit dem Alter?

Versuchspersonen:

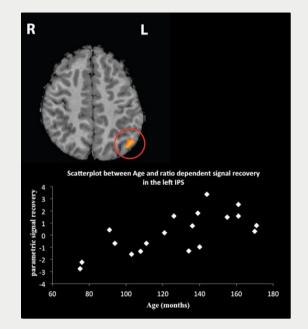
39 Kinder (6 - 14 Jahre)



Aktivierungen unabhängig vom Alter



Aktivierungszunahme mit Alter

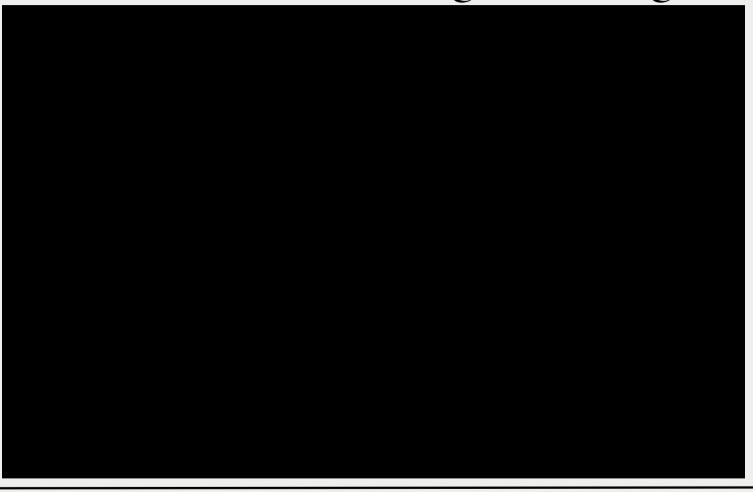


Zunehmend präzisere Aktvierung numerischer Informationen in Bereichen des linken 🚉



Spezifische Prozesse: Rangordnung





 $^{^{1}\,\}text{Matsuzawa},$ T. (1985). Use of numbers by a chimpanzee. Nature, 315(6014), 57–59.

²https://www.youtube.com/watch?v=IAEwYj5Nma4.

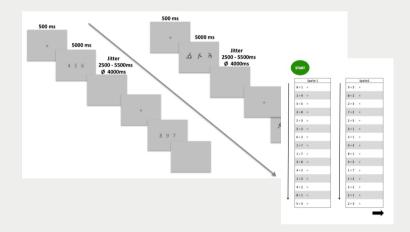
Spezifische Prozesse: Rangordnung

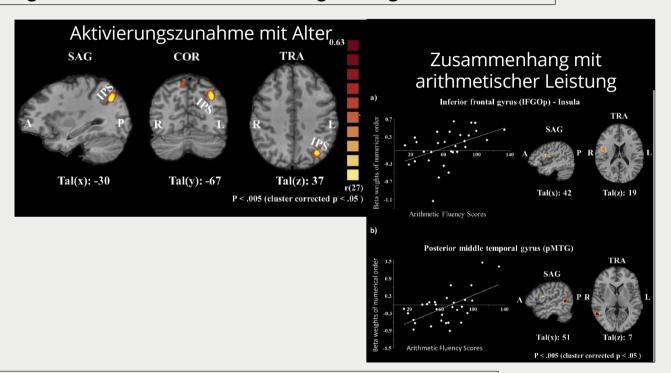


Bilden ähnliche Gehirnregionen unser Wissen über die Rangordnung von Zahlen ab?

Versuchspersonen:

30 Kinder (7 - 10 Jahre)





Altersbedingte Aktvierung in Regionen symbolischen Ziffernwissens. Bessere arithmetische Leistung hängt mit einer erhöhten Aktivierung im exekutiven Kontrollnetzwerk zusammen.

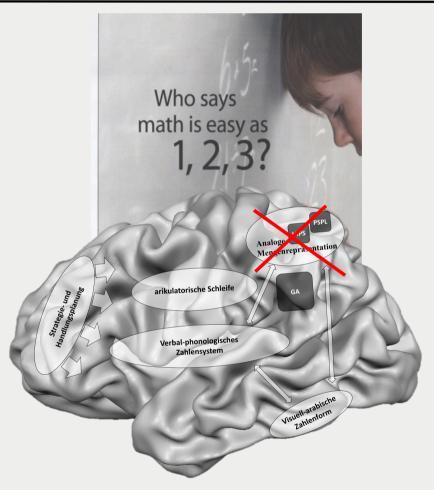


Spezifische Prozesse



"Seit ich mich erinnern kann, sind Zahlen nicht meine Freunde. Wörter sind einfacher [...] sie zerteilen sich nicht plötzlich, zerlegen sich in Brüche, haben Reste oder verwandeln sich in komplettes Kauderwelsch, [...]. Selbst Zahlen wie Wörter zu verwenden, würde nicht funktionieren, weil es noch weniger Sinne ergäbe. Natürlich folgen Zahlen Mustern und Abfolgen, aber die kann ich nicht sehen."

(Beacham & Trott, 2005, S.1)



Spezifische Prozesse: Fazit



Domänenspezifische Prozesse:

- Symbolische Repräsentationen von Anzahlen (e.g., Arabische Ziffern, Zahlenwörter)
- Wissen über die Rangordnung (serielle Beziehung zwischen Objekten)

Formatspezifische und formatunspezifische (abstrakte) Aktivierungsmuster.

Zunehmende Regionale Spezialisierung durch quantiative Veränderungden der Aktivitäsmuster.

Komplexe Interaktionsmuster zwischen Alter, Expertise und neuronalen Netzwerken.

² Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

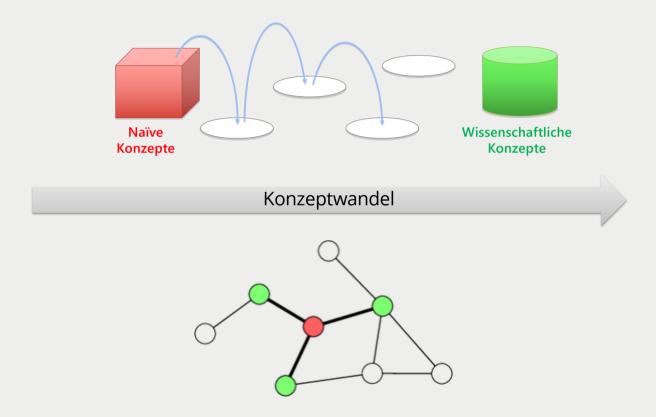
³Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitive foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm







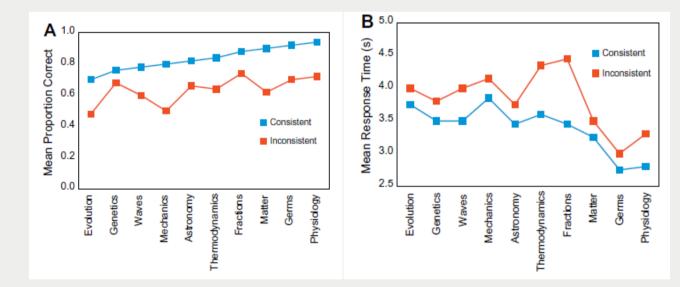




Konsistente Aussagen

Inkonsistente Aussagen Naïv und wissenschaftlich wahr (e.g., People turn food into energy) Nnaïv und wissenschaftlich falsch (e.g., Rocks turn food into energy) Naïve wahr, Wissenschaftlich falsch (e.g., Plants turn food into energy) Naïve falsch, Wissenschaftlich wahr (e.g., Bacteria turn food into energy)

Konzeptueller Interferenz Effekt (KIE)





Math

grade

0.40**

0.15

Zeigen sich ähnliche Effekte in der Mathematik?

Versuchspersonen:

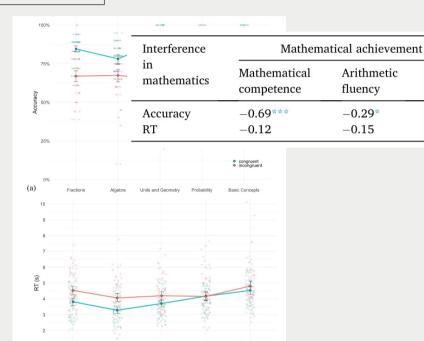
62 Erwachsene (23.50 Jahre)

Konsistente Aussagen

Naïv und wissenschaftlich wahr (e.g., A 1€ coin is a piece of cash) Naïv und wissenschaftlich falsch (e.g., A 1€ coin is a cuboid)

Inkonsistente Aussagen

Naïve wahr, Wissenschaftlich falsch (e.g., A 1€ coin is a circle) Naïve falsch, Wissenschaftlich wahr (e.g., A 1€ coin is a cylinder)



In der Mathematik zeigen sich ähnliche Interfernzeffekte über fast alle Domänen hinweg. Personen mit höheren mathematischen Fertigkeiten zeigen geringer Interfernzen.





Wie bilden sich Interfernzen im Gehirn ab und variieren diese mit Expertise?

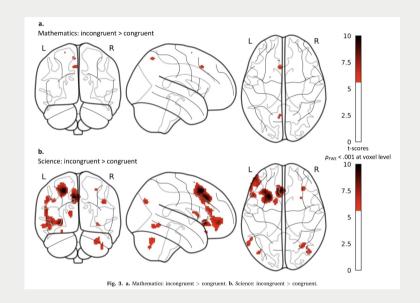
Versuchspersonen:

31 Mathematiker (23.23 Jahre)

30 Nicht-Mathematiker (24.13)

Mathematische und Wissenschaftliche

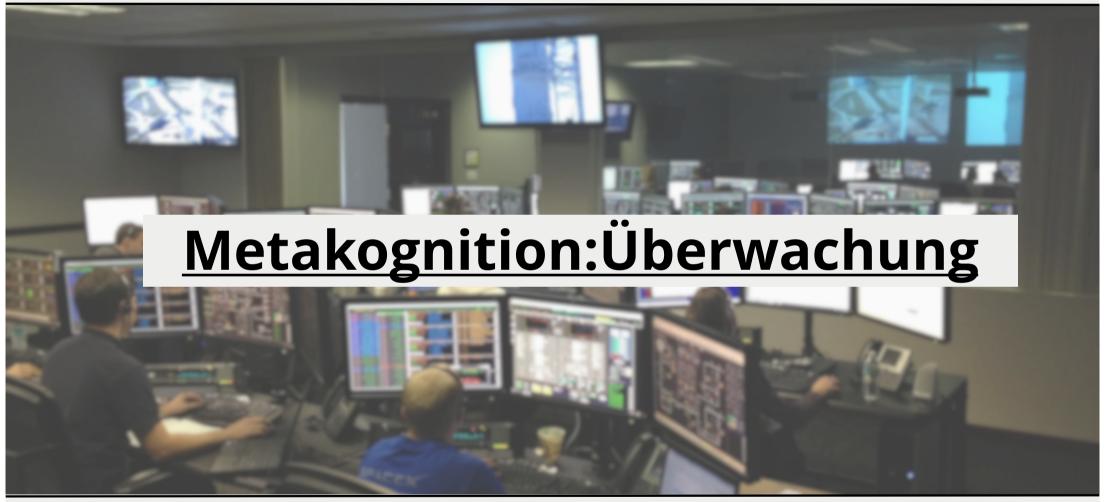
Konsistente Aussagen Inkonsistente Aussagen



Gehirnaktivierungen sind sehr domänenspezifisch, aktivieren aber Netzwerke, die generell mit exekutiver Kontrolle und Inhibtion assoziert sind. Kein offensichtler Expertise Effekt.







Übergreifende Prozesse: Überwachung



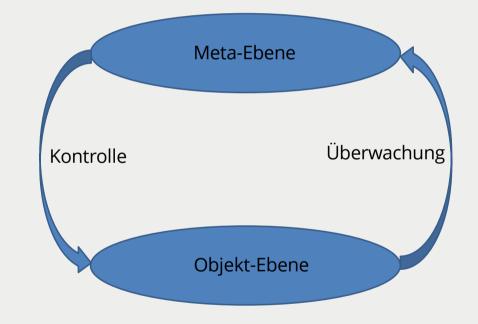
"Denken über das Denken"

Wie überwachen und kontrollieren Personen ihre mentalen Vorgänge?

Überwachung = Subjektive Selbst-einschätzung, wie gut ich eine (mentale) Aufgabe bearbeite/gelöst habe.

Kontrolle = Handlungsorientiert – Adaptive, exekutive Tätigkeiten um die Performanz/Leistung zu verbessern.

- Korreliert sehr hoch mit akademischen Erfolg^[2,3]
- Wichtiges Element der kognitiven Entwicklung mit breitem Einfluss auf viele mentale Tätigkeiten [4]



¹Nelson, T. O., & Narens, L. (1990). Metamemory: A Theoretical Framework and New Findings. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 26, pp. 125–173). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60053-5

² Hacker, D. J., Dunlosky, J., & Graesser, A. C. (2009). Handbook of Metacognition in Education (1st edition). Routledge.

³Roebers, C. M., Krebs, S. S., & Roderer, T. (2014). Metacognitive monitoring and control in elementary school children: Their interrelations and their role for test performance. *Learning and Individual Differences*, 29, 141–149. ⁴Lyons, K. E., & Ghetti, S. (2010). Metacognitive Development in Early Childhood: New Questions about Old Assumptions. In A. Efklides & P. Misailidi (Eds.), *Trends and Prospects in Metacognition Research* (pp. 259–278). Springer US

Übergreifende Prozesse: Überwachung



Wie wirkt sich der Konzeptuelle Interferenzeffekt auf die metakognitive Überwachung aus?

Versuchspersonen:

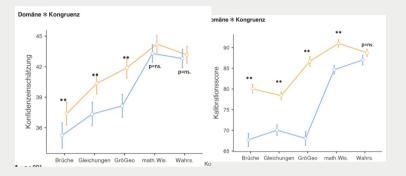
81 Erwachsene (42 female; age 18-40 years)

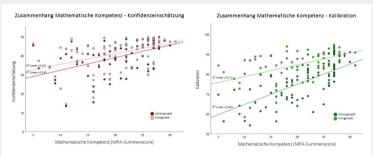


Maße der metakognitiven Überwachung:

- · Absolute Konfidenzeinschätzung
- Kalibratinswert (Passung zwischen Konfideneinschätzung und der Verfikation)







Inkonsistene Aussagen führen zu geringeren Kofidenzeinschätzungen und Kalibrationswerten. Personen mit einer höheren mathematischen Expertise sind weniger stark davon betroffen.



Übergreifende Prozesse: Überwachung



Wie bildet sich metakonitive Überwachung im Gehirn ab?

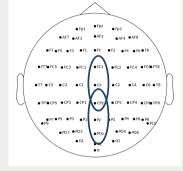
Versuchspersonen:

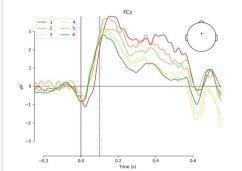
39 Erwachsene (23 Frauen; 19-33 Jahre)



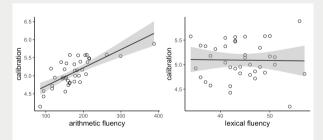
Maße der metakognitiven Überwachung:

- · Absolute Konfidenzeinschätzung
- Kalibratinswert (Passung zwischen Konfideneinschätzung und der Verfikation)









Bereits 300 – 400ms nach Verifikation zeigen sich im EEG Signal Muster, welche die spätere Konfidenzeinschätzung vorraus sagen.

Konfidenz- und Kalibrationswerte stehen mit arithmetischer Leistung in einem Zusammenhang.



Übergreifende Prozesse: Fazit



Domänenübergreifende Prozess:

- Arbeitsgedächtnis
- Metakognitive Funktion
 - Überwachung und Kontrolle
- Exekutive Funktionen
 - Inhibition
 - Aktualisierung von Arbeitsgedächtnisinhalter
 - Wechsel des Aufmerksamkeitsfokus
- Visuell-räumliche Vorstellungen im Allgemeiner

Konzeptuelle Interfernzen in der Mathematik.

Interfernzeffekte variieren mit Expertiseniveau.

Interfernzeffekte zeigen Aktivierungsmuster die mit Inhibtionsprozessen assoziert sind.

Interfernzen wirken sich auf metakognitive Überwachungsleistungen aus.

Bereits 300-400ms nach Antwortgabe entstehn sichtbare Signale im Gehirn, welche die Konfidenz der Antworteinschätzung abbilden.

² Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

³Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitive foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

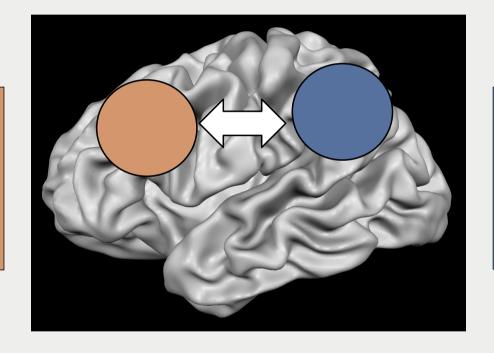
⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm

Allgemeines Fazit



<u>Domänenübergreifende</u> Prozesse:

Mentale Prozesse die in vielen unterschiedlichen Bereichen (Lesen, Rechnen, Malen etc.) eine Rolle spielen.



<u>Domänenspezifische</u> Prozesse:

Mentale Prozesse, die in einer Domäne (Rechnen), nicht aber in anderen Domänen (Lesen) eine Rolle spielen.

¹Peters, L., & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30(November 2016), 265–279.

²Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

³Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitive foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

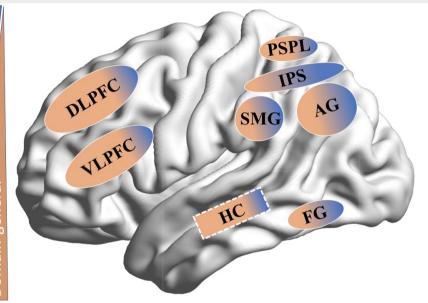
⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm

Allgemeines Fazit



<u>Domänenübergreifende</u> Prozesse:

Mentale Prozesse die in vielen unterschiedlichen Bereichen (Lesen, Rechnen, Malen etc.) eine Rolle spielen. Domain-specifi



<u>Domänenspezifische</u> Prozesse:

Mentale Prozesse, die in einer Domäne (Rechnen), nicht aber in anderen Domänen (Lesen) eine Rolle spielen.

¹ Peters, L., & De Smedt, B. (2018). Arithmetic in the developing brain: A review of brain imaging studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30(November 2016), 265–279.

² Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, 332(6033), 1049–1053.

³ Vogel, S. E., & Ansari, D. (2012). Neurocognitve foundations of typical and atypical number processing. *Lernen und Lernstoerungen*, 1(2), 135–149.

⁴Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental dynamics of the mathematical brain.; http://www2.psych.utoronto.ca/users/courses/260f/week8a/sld033.htm

Konferenzen in Graz







Andreas Schleicher -OECD Direktor für Bildung

Als Koordinator der *Programm for International*Student Assessment (PISA) ist Andreas Schleicher einer breiten Öffentlichkeit bekannt geworden. Der Statistiker ist derzeit <u>OECD</u> Direktor des Direktorats für Bildung.



European Association for Research on Learning and Instruction (EARLI)





Lokale Organisatoren: Stephan Vogel Roland Grabner

¹ https://future-education.uni-graz.at/de/conference-2024/

²https://www.earli.org/events/earli2025

Dankeschön!













Daniel Ansari







Western
The Brain and



Karl-Heinz Graß

Dankeschön!

Michael Schneider TRIER



Silvia Schöneburg-Lehnert



Bert Se Smedt



Roland Grabner



Clemens Brunner



Michaele Meier



Shiva Taghizadeh



Dennis Wambacher

Danke für die Aufmerksamkeit!