

Energetics of the human mind : an effort to show the neural correlates of mental efforts

Citation for published version (APA):

Otto, T. (2013). *Energetics of the human mind : an effort to show the neural correlates of mental efforts*. [Doctoral Thesis, Maastricht University]. Datawyse / Universitaire Pers Maastricht. <https://doi.org/10.26481/dis.20131115to>

Document status and date:

Published: 01/01/2013

DOI:

[10.26481/dis.20131115to](https://doi.org/10.26481/dis.20131115to)

Document Version:

Publisher's PDF, also known as Version of record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.umlib.nl/taverne-license

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

repository@maastrichtuniversity.nl

providing details and we will investigate your claim.

Summary

The concept of mental effort originates from the notion that humans have a limited capacity to perform mental tasks. More precisely, this concept describes the feeling of investing an abstract resource, a limited sort of “energy” into regulating oneself and one’s mental activities in order to perform a task (Zijlstra, 1993; Hockey, 1996).

The research that I performed in this project was aimed at identifying the neural correlates of mental effort investment; both in the sense of which brain regions take part in managing effort investment and in how the concept of a limited underlying resource relates to measurable parameters of neural functioning.

In the beginning, early psychological researchers focused mainly on the momentary limitations of the human information processing system. These limitations in processing capacity were readily observable in variables such as the time that a person needed to perform a given task, which increased after adding small subtasks to the main task. While observing and modeling the characteristics of the human information processing system at work, various researchers such as Kahneman (1973) or Moray (1968) noted that humans are able to regulate their processing of information in a flexible way.

This regulation, however, seems to consume a limited resource (Hockey, 1996). Sustained investment of this resource would lead to a reduction in its availability. More important, it was realized that the prolonged performance of tasks would also affect the general level of arousal of a person, and that maladjusted levels of arousal would require further investment of regulation in order to secure successful task performance. Mulder (1986) cast these two different taxing factors in his integrated model of mental effort: The need to invest regulative action to control one’s information processing, as determined by the characteristics of the task and the baseline capacity of the individual, is in his model referred to as the task load. The need to invest regulative action to control one’s arousal state is conceptualized as a separate factor, the state load (Chapter 1).

The observation that the regulative capacity of an individual is limited has obvious implications: While humans can adapt their amount of effort investment in order to compensate for changes in task load or in state load, at some point the amount of effort that needs to be invested becomes higher than the amount of effort that the individual can or is willing to invest. Insufficient regulation eventually entails drops in performance. Such drops potentially have severe consequences, especially in occupational settings, where an individual can be in charge of machin-

SUMMARY

ery or vehicles. Hence, in particular occupational psychologists have sought ways to measure the amount of effort that an individual needs to invest into performing a task. Self-evaluations of effort investment with the help of rating scales have become an accepted technique in the field; with comparative research favoring scales which measure effort as one coherent concept, as opposed to multi-dimensional scales that attempt to measure different aspects of that experience of investing mental effort separately (Veltman & Gaillard, 1996). Furthermore, different physiological variables such as parameters of the heart's electrical signals or such as blood glucose levels have been investigated as possible indicators of effort investment. More recently, also measurements of neural activity have been employed to identify indicators of mental effort investment (Chapter 2).

Currently available research into neural processes related to the investment of mental effort is frequently limited by the incomplete utilization of modern theoretical conceptualizations of mental effort. A neural correlate of mental effort investment has hence not been indicated to this day. As a result, subjective self-reports remain the most feasible measure of mental effort investment, with the limitation that it is not known to which processes in the human brain they are related. This lack of evidence precludes a conclusive validation of self-rating scales of mental effort and, to a degree, of the model that they are based on. More specific, self-rating scales rely on the assumption that acute experience and post-hoc evaluation of effort investment are identical. Furthermore, the integrated model of mental effort and as a result also one-dimensional self-report scales assume that task load and state load affect the same underlying resource, and in turn the experience of effort investment. Identifying neural correlates of mental effort investment is a necessary step to test these assumptions.

Equally important, a central assumption of the integrated model of mental effort, namely the assumption of a limited resource which fuels regulation, remains an abstract concept. Existing evidence clearly supports the concept of a limited resource. This concept is also a central element in current models in the closely related field of research into behavioral regulation, with a substantial body of convergent experimental evidence (Hagger, 2010). However, the current evidence only allows speculative interpretations of how the concept of a limited resource is related to neurophysiological processes in the human brain.

A better understanding of the neural correlates of mental effort is thus necessary for two reasons: First, to identify objective indicators of mental effort investment, second, to gain an idea of how the concept of a limited resource underlying all regulative processes is related to measurable parameters of neural functioning. Combining the conceptual expertise on the subject of mental effort that is present in occupational psychology with the methods offered by cognitive neuroscience offers a way to gain this knowledge (Chapter 3).

In chapter 4 a study (study 1) is described in which the neural correlates of the self-evaluation of mental effort investment were investigated. We based the experimental design on observations described by Nacchache et al. (2005) which suggest

a dissociability of the neural correlates of evaluations of task difficulty and amount of invested effort by an individual. Participants performed several short blocks of a working memory task with three levels of difficulty. After each block, they indicated task difficulty and the amount of invested mental effort on two self-report scales. During task performance and during self-rating, brain activation was measured with fMRI. Results showed that a cluster in left anterior Insular Cortex (laIC) was selectively more active while participants performed self-ratings of effort investment. Additionally, the activity in laIC during task performance was modulated by changes in task demand in a similar way as the self-ratings of mental effort. We interpret these findings as evidence that self-evaluation of mental effort crucially relies on the integrative functions that have been argued (Craig, 2009) to take place in the anterior Insular Cortex. The observation of task-load-dependent activation changes in laIC during task performance suggests that laIC plays a role in the acute experience of effort investment, additional to its role in post-performance evaluation.

In chapter 5, I describe a study (study 2) that was designed to identify brain areas that react to both changes in task load and to changes in state load. This study builds on the design of study 1. In study 1, only manipulations of task load were implemented in the research design by incorporating different levels of difficulty of the working memory task. In study 2, we extended this design to also include variations of state load: Participants performed the same working memory task before and after either a low-effort free day or after an effortful work day. Again, effort investment was indicated by the participants after performing short blocks of the working memory task. The behavioral results showed an interaction between the effects of task load (the different levels of the task) and state load (induced by the two different day pre-treatments). Neuroimaging results showed that in particular activation in laIC during task performance shows the same interaction effect. This confirms the observation from study 1 that laIC plays an important role in the acute experience of effort investment. Together with evidence from other studies which have demonstrated the functionality of laIC in a range of processes relevant to the investment of mental effort, this leads us to propose that laIC unifies several functions which serve to manage effortful behavior.

Chapter 6 describes the last of the three studies conducted in this research project. In this study (study 3), we employed measures of resting state functional connectivity to investigate how depleting the abstract energetical resource that is assumed in modern models of mental effort affects brain functioning. Measures of resting state brain activation were obtained with fMRI on a group of participants in the morning and in the afternoon, with either a free or a work day in between, identical to the state manipulation employed in study 2. Additionally, participants rated their level of subjective exhaustion and the amount of effort they perceived to be investing in a working memory task that they performed after each resting state measurement. In the afternoon, the day condition was shown to influence the behavioral measurement, manifested in increased reports of exhaustion and in-

SUMMARY

creased self-rated effort investment on an unchanged working memory task. More important, the day condition influenced the coherence in three functional networks, the executive network, the default mode network and the early visual network. In the early visual network and the default mode network, several local coherence scores correlated positively with exhaustion. We interpret these results as evidence that sustained functioning affects the functional connectivity between brain regions that cooperate in distributed networks.

In chapter 7, a brief overview of the three studies that I performed in the course of this project is given. I discuss the respective findings of each study, extending the discussions in the individual chapters. This is followed by a general discussion, in which I elaborate on the implications of my findings for the main questions of this project. The results from study 1 and 2 support the assumption that mental effort investment can be measured by a one-dimensional self-report scale, and that the acute experience and the post-performance self-rating are closely related.

The findings of study 3 give rise to a novel interpretation of the nature of the presumed resource underlying effortful regulation: I offer the view that instead of a limited energetical resource, it is rather the harmonic, flexible functional organization of different brain regions that is the key to effective volitional self-regulation of the individual. Sustained exerting of effortful regulation seems to transiently affect the ability of the brain to form some of the commonly reported functional networks in the same way as they are observed in un-exhausted participants. I discuss the implications of this view for the field of mental effort.

In the last part of chapter 7, I give an outlook of the possibilities that arise from the successful combination of occupational psychology and neuroimaging methods, and I outline a possible course for the emerging discipline of occupational neuroscience.

Samenvatting (Summary in Dutch)

Het concept van mentale inspanning komt voort uit de observatie dat het menselijke vermogen om mentale taken uit te voeren beperkt is. Kort samengevat beschrijft dit concept het gevoel van het investeren van een beperkte, energieachtige bron ten behoeve van zelfregulatie. Deze is gericht op zelfregulatie van emotionele maar vooral ook van cognitieve mentale processen in het kader van de uitvoering van een taak (Zijlstra, 1993, Hockey; 1996).

Het door mij verrichte onderzoek had als doel de neurale correlaten van het investeren van mentale inspanning te identificeren. Dit onderzoek kende twee hoofdpunten: ten eerste, het lokaliseren van hersengebieden die het investeren van mentale inspanning reguleren en, ten tweede, hoe het concept van een onderliggende beperkte bron gerelateerd is aan meetbare parameters van hersenfunctie.

In hoofdstuk 1 beschrijf ik de historische oorsprong van het concept van mentale inspanning en de ontwikkeling van theoretische modellen. Vroege psychologische onderzoekers richtten zich vooral op acute beperkingen van het menselijke informatieverwerkingssysteem. Een voorbeeld van deze beperkingen was de toegevoegde tijd die een persoon nodig had na het uitbreiden van een taak. Later onderzoek verfijnde dit perspectief: onderzoekers zoals Kahneman (1973) of Moray (1968) lieten zien dat mensen hun informatieverwerkingssysteem op een flexibele manier kunnen reguleren. Deze regulatie lijkt dus een beperkte bron te verbruiken (Hockey, 1996). Het investeren van deze bron leidt op korte termijn tot een verminderde beschikbaarheid ervan. Bovendien bleek uit onderzoek dat langdurige mentale prestatie ook een effect had op de activatietoestand van het centrale zenuwstelsel. Indien de activatietoestand niet optimaal is, moet een persoon eerst regulatie toepassen om een activatietoestand te bereiken die prestatie mogelijk maakt voordat de taak uitgevoerd kan worden.

Mulder (1986) gebruikte deze tweedeling van factoren als basis voor *zijn Integrated model of Mental Effort*. Alle noodzaak voor regulatie van informatieverwerking zoals bepaald door de eisen van de taak wordt in de zgn. *task load* samengevat. De noodzaak om de activatietoestand te reguleren om überhaupt in staat te zijn een mentale taak uit te voeren wordt *state load* genoemd. Samen vormen *task load* en *state load* de zgn. *mental work load* (hoofdstuk 1).

De observatie dat het menselijk vermogen om informatie te verwerken beperkt is heeft een aantal implicaties. Mensen zijn in staat om door verhoging van hun investering van mentale inspanning verhogingen in *task-* en *state load* te compenseren maar de mogelijkheid om meer inspanning te leveren is beperkt. Als de com-

binatie van task- en state load meer regulatie (en dus inspanning) vergt dan een persoon kan of wil leveren, zal de taakprestatie dalen. Zulke dalingen van prestatie kunnen dramatische gevolgen hebben. Vooral in de context van arbeid, waar mensen verantwoordelijkheid voor machines of voertuigen dragen, zijn de gevolgen van prestatiedaling niet te onderschatten. Het is daarom niet verwonderlijk dat vooral arbeidspsychologen naar mogelijkheden hebben gezocht om de benodigde mentale inspanning die een persoon op een gegeven moment moet leveren te meten. Zelf-evaluaties van de hoeveelheid geïnvesteerde mentale inspanning met behulp van schalen zijn inmiddels een geaccepteerde methode. Onderzoek wijst uit dat schalen die de hoeveelheid inspanning als een enkele dimensie meten betere resultaten leveren dan schalen die verschillende aspecten van het leveren van inspanning apart te meten (Veltman & Gaillard, 1996). Daarnaast is ook onderzoek verricht naar de bruikbaarheid van fysiologische variabelen zoals bloedsuiker of hartstromen als indicatoren van geleverde mentale inspanning. Recent werden niet alleen perifere maar ook centrale variabelen als mogelijke indicatoren onderzocht. (hoofdstuk 2).

Onderzoek naar de onderliggende neurale processen die betrokken zijn bij het leveren van mentale inspanning maakt onvoldoende gebruik van moderne theoretische concepten en modellen van mentale inspanning. Als gevolg hiervan is dus tot op heden geen echt neuraal correlaat van mentale inspanning gerapporteerd. Subjectieve zelfevaluatie met behulp van schalen vormt nog steeds de meest accurate manier om mentale inspanning in de praktijk te meten. De neurale mechanismen die leiden tot een indicatie op een dergelijke schaal zijn niet bekend. Het ontbreken van vooral deze informatie bemoeilijkt het toetsen van meetmethodes en de onderliggende theoretische assumpties over mentale inspanning. Alle zelfevaluatie-schalen hanteren bijvoorbeeld de assumptie dat de door een persoon herinnerde investering van mentale inspanning na het uitvoeren van een taak overeen komt met de daadwerkelijk ervaren hoeveelheid tijdens de uitvoering. Het integrated model of mental effort (Mulder, 1986) neemt verder aan dat task- en state load dezelfde onderliggende beperkte bron gebruiken. Deze aanname is tevens cruciaal voor alle eendimensionale schalen voor mentale inspanning. De identificatie van neurale correlaten van het investeren van mentale inspanning is een nodige stap om deze assumpties te toetsen. Een andere cruciale assumptie van het integrated model of mental effort is dat regulatie door een beperkte bron aangedreven wordt. Cognitief onderzoek, ook uit het gerelateerde veld van gedragsregulatie, steunt deze aanname (Hagger, 2010). De bevindingen uit onderzoek beperken interpretaties over de relatie van het concept van een beperkte bron en het functioneren van het menselijk brein tot speculaties.

Een beter begrip van neurale correlaten van het investeren van mentale inspanning is dus om twee redenen noodzakelijk: ten eerste, om een objectieve indicator voor de hoeveelheid geïnvesteerde mentale inspanning te vinden, en ten tweede, om beter te begrijpen hoe het theoretisch concept van een beperkte bron gerelateerd is aan neurofysiologische processen. Hiervoor is het belangrijk om de

uitgebreide theoretische en conceptuele kennis vanuit de arbeidspsychologie te verbinden met de technieken waarover het veld der cognitieve neurowetenschappen beschikt (hoofdstuk 3).

In hoofdstuk 4 beschrijf ik een onderzoek (studie 1) waarin ik de hersenactivatie van proefpersonen in kaart breng tijdens het invullen van eendimensionale schalen, om de geïnvesteerde hoeveelheid mentale inspanning te meten. Het doel van dit onderzoek was om de neurale activatie gerelateerd aan zelfevaluatie van geïnvesteerde mentale inspanning te scheiden van activatie tijdens een evaluatie van taakmoeilijkheid. Eerder onderzoek heeft uitgewezen dat deze twee op elkaar lijkende evaluaties van verschillende neurale structuren afhangen (Nacchache et al., 2005). In mijn onderzoek voerden de deelnemers enkele korte blokken van een geheugentaak uit. De blokken hadden drie verschillende niveaus van moeilijkheid. Na ieder blok gaven de deelnemers op een eendimensionale schaal aan hoeveel mentale inspanning ze geïnvesteerd hadden en hoe hoog ze de moeilijkheid van de taak schatten. Tegelijkertijd werd de hersenactivatie van de deelnemers met behulp van functionele magnetresonantietomografie (fMRT) gemeten. De resultaten wezen uit dat vooral een gebied in het linker anteriore insulaire cortex (laIC) sterker geactiveerd was tijdens het beoordelen van geïnvesteerde mentale inspanning. Deze bevinding wijst volgens ons uit dat het beoordelen van eerder geleverde mentale inspanning heel sterk op het integreren van verschillende zelf-gerelateerde informatiestromen aangewezen is. Deze vindt volgens Craig (2009) vooral in het voorste gedeelte van de insulaire cortex plaats vindt. Bovendien wijst een activatieverschil in laIC overeenkomend met de verschillen in taakmoeilijkheid tijdens de uitgevoerde werkgeheugentaak op een mogelijke rol van laIC bij de ervaring van het investeren van mentale inspanning.

In hoofdstuk 5 wordt een onderzoek (studie 2) beschreven dat op de resultaten van studie 1 voortbouwt. Studie 2 had als doel om hersengebieden te identificeren die op veranderingen in zowel de task load als de state load reageren. Terwijl in studie 1 alleen manipulaties van de task load gebruikt werden, maakte in studie 2 ook een manipulatie van state load een deel uit van het experimentele paradigma. Hiervoor gebruikten we een soortgelijke werkgeheugentaak als in studie 1, maar nu lieten we de proefpersonen deze ofwel voor en na een inspannende dag, ofwel voor en na een vrije dag uitvoeren. Wederom beoordeelden de deelnemers na ieder kort blok van de taak de hoeveelheid geleverde mentale inspanning. De gedragsdata wezen uit dat er een interactie-effect tussen de manipulatie van task- en van state load aanwezig was. Het effect van de verschillende levels van taakmoeilijkheid (task load) op het ervaren niveau van mentale inspanning verschilde dus naarmate de proefpersonen een werk- of een vrije dag doorgebracht hadden (hierdoor werd een verschil in state load opgewekt). De analyse van de fMRT - data gemeten tijdens de taakuitvoering wezen op hetzelfde interactie-effect uitsluitend in de eerder gevonden laIC. Hieruit interpreteren wij dat laIC al tijdens de taakuitvoering een belangrijke rol voor het management van mentale inspanning speelt.

In hoofdstuk 6 beschrijf ik een derde onderzoek (studie 3). De focus lag hierbij op het onderzoeken van de verandering van meetbare parameters van hersenfunctie door langdurige prestatie. In dit onderzoek heb ik dezelfde opzet gebruikt als in studie 2, om wederom een paradigma met zowel manipulaties van task- en state load te creëren. Naast de mentale inspanning werd in dit experiment ook het vermoeidheidsniveau van de proefpersonen gemeten. De fMRT – meting van dit experiment was op een periode van rust gefocust waarin de deelnemers juist niet met een taak bezig waren: het zogenoemde Resting-State-paradigma. Zoals verwacht gaven de deelnemers aan dat de werkgeheugentaak na een veeleisende werkdag meer inspanning vereiste dan na een vrije dag. Tevens waren de deelnemers na een werkdag vermoeider. De dagconditie bleek bovendien een duidelijke invloed te hebben op een aantal bekende functionele netwerken. Maten van coherentie in sommige knooppunten van enkele netwerken vertoonden zelfs een significante correlatie met de gerapporteerde maten van vermoeidheid. Hieruit concluderen wij dat langdurige investering van mentale inspanning een temporeel effect kan hebben op de functionele netwerken van het menselijk brein.

Hoofdstuk 7 begint met een overzicht van de verrichtte onderzoeken. Ik bespreek hier nogmaals de belangrijkste bevindingen uit elk apart onderzoek en breid de discussie van de verschillende hoofdstukken uit. Vervolgens bespreek ik de resultaten in het kader van de theoretische achtergronden en van de beginvragen die mij tot dit onderzoek aan hebben gezet. De resultaten van studie 1 en 2 ondersteunen de assumpties die vooral aan eendimensionale schalen ten grond liggen, namelijk dat het acute ervaren van mentale inspanning en het latere evalueren ervan nauw samenhangen.

Het hersengebied dat in studie 1 actiever was tijdens het evalueren van mentale inspanning bleek in studie 2 beïnvloed te worden door zowel variaties in task load als in state load tijdens het uitvoeren van een taak. Deze gezamenlijke invloed van task- en state load op hersenactivatie wijst uit dat eendimensionale schalen inderdaad een goed instrument zijn voor het meten van mentale inspanning. De bevindingen van studie 3 zetten aan tot een nieuwe interpretatie van de veronderstelde energieachtige aard van de onderliggende bron: Ik bespreek een zienswijze waarin ik voorstel dat de onderliggende bron, welke door zelfregulatie verbruikt wordt, niet zo zeer als letterlijke energie dient te worden beschouwd, maar als het vermogen van het menselijke brein om flexibele, doelgerichte en gebalanceerde functionele netwerken uit verschillende hersengebieden te vormen. Dit vermogen is uitermate belangrijk voor een effectieve regulatie van mentale processen. Mijn resultaten suggereren dat dit vermogen door langdurige inspanning tijdelijk beïnvloed kan worden. In het laatste stuk bespreek ik de implicaties van mijn onderzoek, ook met betrekking tot de mogelijkheden die door het succesvol combineren van arbeidspsychologie en neuro-wetenschappelijke methodes ontstaan. Ik sluit af met een visie op een mogelijke koers voor het jonge veld van occupational neuroscience.